

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR KATKILI YAĞLARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Y. Emre KARABACAK

**MART 2013
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BOR KATKILI YAĞLARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Yunus Emre KARABACAK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11/02/2013
Tezin Savunma Tarihi : 06/03/2013**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hasan BAŞ

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Yunus Emre KARABACAK tarafından hazırlanan

BOR KATKILI YAĞLARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 19/02/2013 gün ve 1494 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Olkan ÇUVALCI

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan BAŞ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Endüstride özellikle içten yanmalı motorların içerisinde kullanılan çeşitli mekanizmalar, bu mekanizmaların gösterdikleri sürtünme davranışları ve meydana gelen aşınmalar önem arz etmekte ve bu olumsuzlukların en aza indirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları da bor bileşiklerinin motor yağlarına katkı olarak eklenip kullanılması şeklinde gerçekleşmektedir. Ancak bor bileşiklerinin motor yağlarına katılıp kullanılmasıyla ilgili literatürde detaylı ve net bir bilgi olmaması bu çalışmanın nedenini oluşturmaktadır. Bu tez çalışmamın yapılması süresince her türlü maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım, sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan BAŞ hocama, tüm Makine Mühendisliği Bölümü hocalarına ve çalışanlarına, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne, beni büyüten, üzerimde emeği çok büyük olan ve değerini hiçbir şeyle kıyaslayamayacağım, sevgili anne ve babama, kardeşlerime, bana destek veren Çaykur 100. Yıl Çay Paketleme Fabrikası Müdürlüğü çalışanlarına, yardımlarından dolayı okul ve iş hayatımdaki tüm değerli dostlarıma teşekkür ediyorum. Ayrıca benim için çok özel bir insan olan Bahar' a da teşekkür ediyorum.

Yunus Emre KARABACAK
TRABZON 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BOR KATKILI YAĞLARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç Dr. Hasan BAŞ’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdığimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2013

Yunus Emre KARABACAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2. Temel Triboloji Bilgileri.....	2
1.2.1 Sürtünme.....	2
1.2.2. Uyumlu ve Uyumsuz Yüzeyler.....	4
1.2.3. Hidrodinamik Yağlama.....	4
1.2.4. Hidrostatik Yağlama.....	5
1.2.5. Elastohidrodinamik Yağlama.....	6
1.2.6. Aşınma.....	7
1.2.6.1. Adhezyon Aşınması.....	7
1.2.6.2. Abrasyon Aşınması.....	8
1.2.6.3. Yorulma Aşınması.....	8
1.2.7. Sürtünme, Yağlama ve Aşınma.....	9
1.3. Yağlayıcı Maddeler.....	11
1.3.1. Katı Yağlayıcılar.....	11
1.3.2. Sıvı Yağlayıcılar.....	13
1.3.2.1. Sentetik Esaslı Yağlar.....	13
1.3.2.2. Mineral Esaslı Yağlar.....	13
1.3.2.3. Sentetik ve Mineral Esaslı Yağlar Arasındaki Farklar.....	14

1.3.3.	Yarı Katı Yağlayıcılar.....	15
1.3.4.	Gaz Yağlayıcılar.....	15
1.3.5.	Yağlayıcılara Katılan Katkı Maddeleri.....	15
1.3.6.	Yağlayıcı Maddelerin Genel Özellikleri ile İlgili Parametreler.....	16
1.4	Yağlayıcı ve Yağlayıcı Katkı Maddesi Olarak Bor Bileşiklerinin Kullanılması.....	17
1.4.1.	Borun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	17
1.4.2.	Borun Kullanım Alanları.....	18
1.4.3.	Bor Bileşikli Yağlayıcılar ve Yağ Katkıları.....	20
1.4.4.	Yağlayıcı ve Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür.....	21
1.4.5.	Yağlayıcı ve Yağ Katkısı Olarak Borik Asit.....	22
1.5.	İçten Yanmalı Motorlarda Mekanik Kayıplar ve Yağlama Sistemleri.....	27
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
2.1.	Hidrodinamik Yağlama Teorisi.....	31
2.1.1.	Hidrodinamik Yağlamanın Teorik Temelleri.....	31
2.1.2.	Hidrodinamik Yağlama Teorisinin Genel Denklemi.....	32
2.2.	EHD Yağlama Teorisi.....	35
2.2.1.	EHD Yağlamanın Teorik Temelleri.....	35
2.2.2.	EHD Yağlama Teorisinin Genel Denklemi.....	37
2.2.3.	Kontak Yüzeylerin Elastik Deformasyonu.....	39
2.2.4.	Viskozite Basınç İlişkisi.....	40
2.2.5.	Yoğunluk Basınç İlişkisi.....	41
2.3.	Deney Sisteminin Yapısının İncelenmesi.....	41
2.3.1.	Giriş.....	42
2.3.2.	T53 SLIM Çok Amaçlı (Multi Purpose) Deney Sisteminin Detayları.....	42
2.3.3.	Diesel Motorunda (John Deere) Yapılan Deneylerin Detayları.....	51
2.3.4.	Deneylerde Kullanılan Baz Yağın Özellikleri.....	54
2.4.	Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Karşılaştırılması.....	56
3.	BULGULAR.....	59
3.1.	Giriş.....	59
3.2.	Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi.....	59
3.2.1.	Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Sürtünme Davranışları.....	59
3.2.2.	Sürtünme Kuvvetinin Zaman ile Değişimi.....	61

3.3.	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi.....	62
3.3.1	Baz Yağa %2 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	62
3.3.2	Baz Yağa %4 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	64
3.3.3.	Baz Yağa %6 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	66
3.4.	Yağ Katkısı Olarak Borik Asidin Sürtünmeye Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi.....	68
3.4.1.	Baz Yağa %2 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	68
3.4.2.	Baz Yağa %4 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	70
3.4.3.	Baz Yağa %6 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları	72
3.5.	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Değişik Sıcaklıklarda Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi.....	74
3.5.1.	Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Değişik Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları.....	74
3.5.2.	Baz Yağa %4 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları	76
3.5.3.	Baz Yağa %4 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları.....	78
3.6	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranlarının Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi.....	80
3.6.1	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Baz Yağ İçerisindeki Oranının Sürtünmeye Olan Etkisi.....	80
3.6.2.	Yağ Katkısı Olarak Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranının Sürtünmeye Olan Etkisi.....	81
3.6.3.	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranlarının Sürtünmeye Olan Etkisinin Karşılaştırılması.....	82
3.7.	Baz Yağa Optimum Oranda Katılan Bor Katkıları ve Bor Katkılı Yağların Bir Diesel Motorun Yakıt Tüketimine Etkisi.....	86
4.	İRDELEME.....	88
4.1	Kontak Bölgesi ve Kontak Bölgesinde Baz Yağın Sürtünme Davranışlarının İrdelenmesi.....	88
4.2	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi.....	91
4.3.	Yağ Katkısı Olarak Borik Asidin Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi.....	92

4.4.	Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Değişik Sıcaklıklarda Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi.....	93
4.5.	Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağa Katkı Oranlarının Sürtünmeye Etkisinin İrdelenmesi.....	93
4.6.	%4 Hegzagonal Bor Nitrür ve %3 Borik Asit Katkılı Baz Yağın Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi.....	94
5.	SONUÇLAR.....	95
6.	ÖNERİLER.....	96
7.	KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BOR KATKILI YAĞLARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yunus Emre KARABACAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan BAŞ
2013, 102

Motor içerisinde krank mili, kam mili ve biyel kolu gibi elemanlarda meydana gelen mekanik kayıplar, toplam kaybın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle kam mekanizması, krank mili ve diğer mekanizmaların yağlanmasında kullanılan motor yağı, yüksek verim ve performans için çok önemli olmaktadır. Yağların performans karakteristiklerini geliştirmek amacıyla, motorlar ve endüstriyel makinalar sahasında kullanılan baz yağlara katkı maddeleri ilave edilmektedir. Son yıllarda bor bileşiklerinin katkı olarak kullanımı artmaktadır. Bu çalışmada, sürtünme kaybının belirlendiği test aparatı üzerinde bor katkılı yağlama yağları incelenmiştir. Bu amaçla iki tipteki bor katkısı, baz yağa ayrı ayrı, farklı oranlarda katılması incelenmiş 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 göstermiştir. Optimum katkı oranlarının, borik asit için %3 ve bor nitrür için %4 olduğu belirlenmiştir. Deneyler, ayrıca, 170 kw'lık bir dizel motor kullanılarak her iki optimum katkı oranı ile yapılmıştır. Deneylerin sonucunda, borik asit ve bor nitrür katkılı yağların sayesinde yakıt tüketiminde sırasıyla %3,6 ve %2,7 oranında bir azalma olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Motor yağı, Katkılı yağlar, Borik asit, Bor nitrür, Sürtünme, Sürtünme katsayısı

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF BORON ADDITIVE OILS ON THE
PERFORMANCE OF ENGINES

Yunus Emre KARABACAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hasan BAŞ
2013, 102

The mechanical losses occurred within the engine, the cam mechanism, crank rod mechanism and the other mechanisms create a significant portion of the total losses. Hence, the engine's lubricating oil used in cam and crank rod mechanism and the other mechanisms is very important criteria for efficiency and motor performance. In order to improve the performance characteristics of lubricating oils, some additives have been added to the base oil used in the field of motors and industrial machines. In recent years, the use of boron compounds as additives has been increasing. In this study, the effects of the boron compounds on lubrication oils were investigated in the test apparatus. For this purpose; base oils containing two types of boron compound were studied at different concentrations. The results were evaluated taking into account on forming a tribo film in boundary or mixed lubrication conditions. As a result of this study; the experiments showed that boron compounds reduced the coefficient of friction from 10% to 50%, under different test conditions. The optimum concentration ratio has been determined for boric acid of 3%, for hexagonal boron nitride of 4%. Experiments were also carried out for both of optimum concentration ratios using a 170 KW diesel engine. At the end of the experiments, a decrease of 3.6% and 2.7% in the fuel consumption, thanks to boric acid and boron nitride additives, was observed, respectively.

Key words: Internal combustion engines, Friction, Wear, Engine oil, Boron compounds

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	a) Kayma sürtünmesi, b) Yuvarlanma, kayma-yuvarlanma sürtünmesi.....	2
Şekil 2.	a) Sıvı sürtünme, b) Sınır sürtünme, c) Kuru sürtünme	3
Şekil 3.	Sınır sürtünmesinde yağlı bölge ve temas noktaları	3
Şekil 4.	a) Uyumlu(konformal) yüzeyli sistem, b) Uyumsuz (nonkonformal) yüzeyli sistem.....	4
Şekil 5.	Hidrodinamik radyal kaymalı yatağın çalışması.....	5
Şekil 6.	Gerçek kontak, hertz basıncı ve eşdeğer kontak modeli.....	6
Şekil 7.	Adhezyon aşınması modeli.....	7
Şekil 8.	Abrazyon aşınması modeli.....	8
Şekil 9.	Yorulma aşınması modeli.....	9
Şekil 10.	Farklı yağlama rejimlerine göre sürtünme katsayısının değişimi.....	10
Şekil 11.	Farklı yağlama rejimlerine göre aşınma oranı değişimi.....	10
Şekil 12.	Grafitin moleküler düzeni ve tabakalı yapısı.....	12
Şekil 13.	Molibden disülfidin tabakalı moleküler yapısının yandan görünüşü.....	12
Şekil 14.	Hegzagonal bor nitrürün üç boyutlu moleküler düzeni	21
Şekil 15.	Hegzagonal bor nitrürün kimyasal düzeni.....	22
Şekil 16.	Borik asidin kristal kafes yapısı.....	23
Şekil 17.	Borik asit tabakaları arasındaki zayıf Van der Waals bağları.....	24
Şekil 18.	Bir pin-on disk sisteminde 320 d/dk dan sonra sisteme eklenen borik asit tozları nedeniyle sürtünme katsayısının önemli ölçüde düşmesi.....	24
Şekil 19.	Borik asitle kaplanmış yüzeylerde meydana gelen kontak içerisinde sürtünme katsayısının artan basınç ile değişimi.....	25
Şekil 20.	Borik asit ilavesi yapılan bir pin on disk sisteminde sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi.....	26
Şekil 21.	Borik asidin tek başına katı yağlayıcı olarak ve sıvı yağlarda yağ katkısı olarak kullanılması halinde sürtünme katsayısına etkisi.....	27
Şekil 22.	Bir içten yanmalı motorda meydana gelen güç kayıpları.....	28
Şekil 23.	Bir içten yanmalı motorun yağlama sistemi.....	29
Şekil 24.	Stribeck diyagramı ve çeşitli motor elemanlarının maruz kaldıkları yağlama rejimlerinin bu diyagramdaki yeri.....	29

Şekil 25. Motorlarda mekanik kayıpların dağılımı.....	30
Şekil 26. Hidrodinamik kaymalı yataklar için Stribeck eğrisi	32
Şekil 27. Rijit, az yüklü ve aşırı yüklü kontakta basınç dağılımı.....	35
Şekil 28. Hertz ve EHD basınçları dağılımı ve yağ filmi.....	37
Şekil 29. Paralel, hareketli iki yüzey	37
Şekil 30. Kontak Geometrisi	38
Şekil 31. EHD kontakta hertz basıncı dağılımı	39
Şekil 32. Farklı yüzey konfigürasyonları	42
Şekil 33. Kontak bloğu ve disk, yakın plan ısıtıcı gurubu.....	43
Şekil 34. Bir Deney makinasının kesiti.....	44
Şekil 35. Deney makinası(a), kontrol ünitesi(b).....	44
Şekil 36. Deney makinasının şematik görünüşü.....	45
Şekil 37. Kontak numunesi ve disk	46
Şekil 38. Sürtünme kuvvetinin ölçümü	46
Şekil 39. Sürtünme kuvvetinin baz yağ ve katkılı yağa göre zamanla değişimi.....	48
Şekil 40. Kalibrasyon eğrisi.....	49
Şekil 41. Taramalı elektron mikroskopunda kontak numunesinin yüzeyinin görünüşü, deney öncesi (a,b,c) ve deney sonrası(d,e,f).....	50
Şekil 42. John Deere diesel motorlu Aksa AJD 170 jeneratör	51
Şekil 43. Deneysel baz yağ olarak kullanılan yağın Viskozite-Sıcaklık ilişkisi	55
Şekil 44. Teorik ve deneysel sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 45. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	60
Şekil 46. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	61
Şekil 47. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	62
Şekil 48. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri	63
Şekil 49. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	64
Şekil 50. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	65
Şekil 51. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	66

Şekil 52.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	67
Şekil 53.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	68
Şekil 54.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	69
Şekil 55.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	70
Şekil 56.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	71
Şekil 57.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	72
Şekil 58.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	73
Şekil 59.	n= 600 d/dk devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme kuvveti değişimleri.....	74
Şekil 60.	n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	75
Şekil 61.	n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri.....	76
Şekil 62.	n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	77
Şekil 63.	n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri.....	78
Şekil 64.	n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	79
Şekil 65.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda hegzagonal bor nitrür katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	80
Şekil 66.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda borik asit katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	81
Şekil 67.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %2 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	82

Şekil 68.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %4 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 69.	20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %6 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 70.	Baz yağ ve optimum katkı oranları kullanılması durumunda, 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, aşınma oranları, (a) sabit yükte, (b) sabit hızda.....	85
Şekil 71.	%4 bor nitrür ve %3 borik asit katkılı motor yağı kullanılarak John Dere marka dizel motorda yapılan deneyler.....	87
Şekil 72.	Kontak bölgesi.....	88
Şekil 73.	Kontak bölgesi için Stribeck Diyagramı ve yağlama rejimlerinin dağılımı.....	89
Şekil 74.	Hidrodinamik ve karışık yağlama rejimleri içerisinde gerçekleşen bölgesel mikro EHD temaslar.....	90

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deney öncesi ve deney sonrası yüzey pürüzlüğünün değişimi	50
Tablo 2. Diesel jeneratörün teknik özellikleri.....	52
Tablo 3. Deneylerde kullanılan baz yağa ait teknik özellikler.....	54
Tablo 4. Teorik ve deneysel sürtünme katsayılarının karşılaştırılması	57
Tablo 5. 20 ⁰ C de değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	59
Tablo 6. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	60
Tablo 7. Deneylerde ölçülen sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi.....	61
Tablo 8. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	62
Tablo 9. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	63
Tablo 10. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	64
Tablo 11. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	65
Tablo 12. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	66
Tablo 13. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	67
Tablo 14. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	68
Tablo 15. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	69
Tablo 16. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	70
Tablo 17. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	71
Tablo 18. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri.....	72
Tablo 19. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri.....	73

Tablo 20. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme kuvveti değişimleri.....	74
Tablo 21. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	75
Tablo 22. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri.....	76
Tablo 23. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	77
Tablo 24. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimler.....	78
Tablo 25. n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	79
Tablo 26. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda hegzagonal bor nitrür katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	80
Tablo 27. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda borik asit katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri.....	81
Tablo 28. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %2 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	82
Tablo 29. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %4 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	83
Tablo 30. 20 ⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %6 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması.....	84
Tablo 31. Baz yağın, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağın ve %3 borik asit katkılı yağın kullanılması halinde, farklı devir sayılarında 1 er saat çalışma sonucunda gerçekleşen yakıt tüketimi.....	86

SEMBOLLER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a	: İvme
d	: Mil çapı
D	: Yatak çapı
F	: Yatak yükü
F_N	: Kontak yükü
F_S	: Sürtünme kuvveti
$F_{S,karışık,teorik}$: Karışık sürtünme bölgesindeki teorik sürtünme kuvveti
$F_{sınır,teorik}$: Sınır sürtünme bölgesindeki teorik sürtünme kuvveti
$F_{viskoz,teorik}$: Hidrodinamik sürtünme bölgesindeki teorik sürtünme kuvveti
E_1, E_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin elastisite modülü
E'	: Eşdeğer elastisite modülü
G	: Boyutsuz malzeme parametresi
h_{min}	: Minimum film kalınlığı
h	: Film kalınlığı
m	: Kütle
l	: Boy
P, p	: Basınç
P_{max}	: Maksimum basınç
R	: Eşdeğer eğrilik yarıçapı
R_1, R_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin eğrilik yarıçapı
t	: Zaman
T	: Sıcaklık(yağ sıcaklığı)
T_0	: Çevre sıcaklığı
u_1, u_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin x yönündeki hızları
U_e	: Boyutsuz hız parametresi
V	: Elastik deformasyon
v_1, v_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin y yönündeki hızları

w_1, w_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin z yönündeki hızları
ρ	: Yoğunluk
v_1, v_2	: Birinci ve ikinci yüzeylerin poisson oranları
$\eta_{(p)}$: p basıncındaki yağlayıcının viskozitesi
η_0	: Çevre basıncındaki yağlayıcının viskozitesi
$\rho_{(p)}$: p basıncındaki yağlayıcının yoğunluğu
$\rho_{(0)}$: Çevre basıncındaki yağlayıcının viskozitesi
Ω, ω	: Açısal hız
μ	: Sürtünme Katsayısı
$\mu_{S, karışık, teorik}$: Karışık sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı
$\mu_{sınır, teorik}$: Sınır sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı
$\mu_{viskoz, teorik}$: Hidrodinamik sürtünme bölgesindeki sürtünme katsayısı
EHD	: Elâstohidrodinamik
α	: Metalik kontak oranı
τ_{kf}	: Sınır sürtünmede yağ tabakasının kayma kopma mukavemeti
σ_{kf}	: Sınır sürtünmede yağ tabakasının çekme kopma mukavemeti
$\frac{du}{dy}$: Hız gradyanı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüz endüstrisinde içten yanmalı motorların kullanım alanı oldukça genişlemiş, deniz, hava ve kara taşıtlarında, elektrik enerjisi üreten jeneratörlerde, çok çeşitli ve farklı amaçlarla fabrikalarda, tarım teknolojisinde ve daha bir çok alanda öncelikli tercih olarak seçilmeye devam edilmektedir. İçten yanmalı motorların, geçen zaman içerisinde temel olarak yapısal donanımları pek değişmemiş fakat verimlilikleri arttırılmıştır. Bu değişiklikler mekanik kayıpların azaltılması, yanma olayının iyileştirilmesi, hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin geliştirilip kullanılması vb. gibi sıralanabilir. Bu gelişmeler içerisinde içten yanmalı motorlarda sürtünme kuvvetlerinden meydana gelen mekanik kayıpların en aza indirilmesi önemli bir yer tutar. Sürtünme kuvvetinin en aza indirilmesi demek, motorlarda önemli bir kayıp olan mekanik kayıpların en aza indirilmesi, dolayısıyla motor veriminin artması anlamına gelmektedir. Bundan dolayı motorlarda kullanılan yağlama yağlarını ve bu yağlara katkı olarak ilave edilen katkı maddelerinin incelenmesi önem teşkil etmektedir. Özellikle son zamanlarda bor esaslı katkı maddelerinin sadece içten yanmalı motorlar değil şanzıman ve diferansiyel gibi güç iletim sistemlerinde sürtünmeyi azaltma amacıyla baz yağa katılarak kullanılması oldukça sık rastlanan bir durumdur.

Sürtünmeden dolayı meydana gelen mekanik kayıplar kam, piston, biyel, krank vb. gibi motor elemanları ayrıca şanzıman ve diferansiyel gibi güç aktarma organları üzerinde meydana gelmekte olup yapılan bu çalışmada bor katkılı yağlama yağları ile çalışan mekanizmalarda meydana gelen sürtünme kayıpları incelenecektir. Bu mekanizmalarda gerçekleşen mekanik kayıplar motor verimini doğrudan etkilemektedir. Bu amaç doğrultusunda motor yağı olan baz yağa bor esaslı katkının ilave edilmesi suretiyle elde edilen söz konusu katkılı yağın davranışı ve bu katkılı yağın sistemde kullanılmasıyla mekanizmalarda meydana gelen hidrodinamik, elastohidrodinamik ya da sınır yağlama koşullarının tribolojik özellikleri bu çalışmada incelenmiştir.

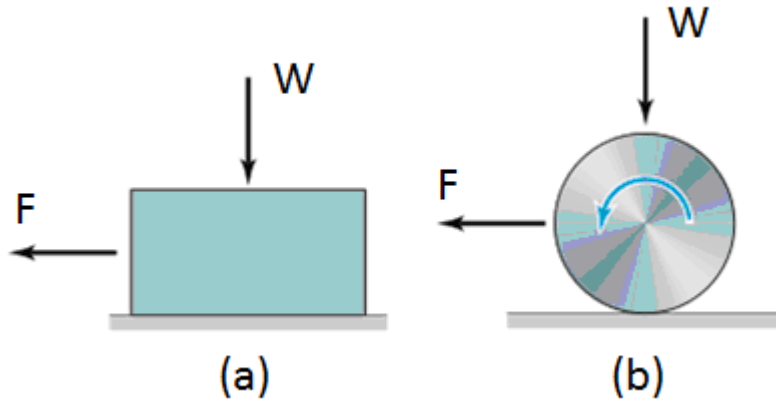
1.2. Temel Triboloji Bilgileri

Temasta ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana gelir. Bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin başında yağlama gelir.

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanlarının yaklaşık %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır[1]. Bu aşınma ve kayıplardan meydana gelen maddi kayıpların oldukça fazla olduğu ve bu kayıpların azaltılması için alınan her türlü önlemler ve buna yönelik çalışmaların önem arz ettiği ortadadır.

1.2.1. Sürtünme

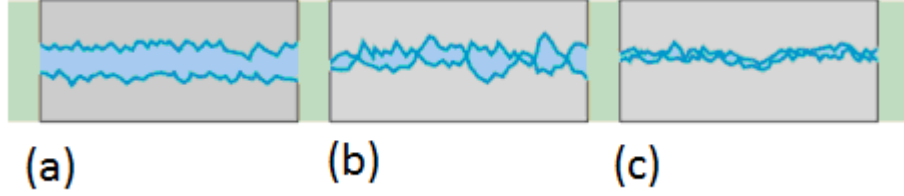
Genel anlamda sürtünme temasta olan ve izafi hareket yapan bir cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir. Birbirlerine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma mevcut olabilir.



Şekil 1. a) Kayma sürtünmesi, b) Yuvarlanma, kayma-yuvarlanma sürtünmesi[2].

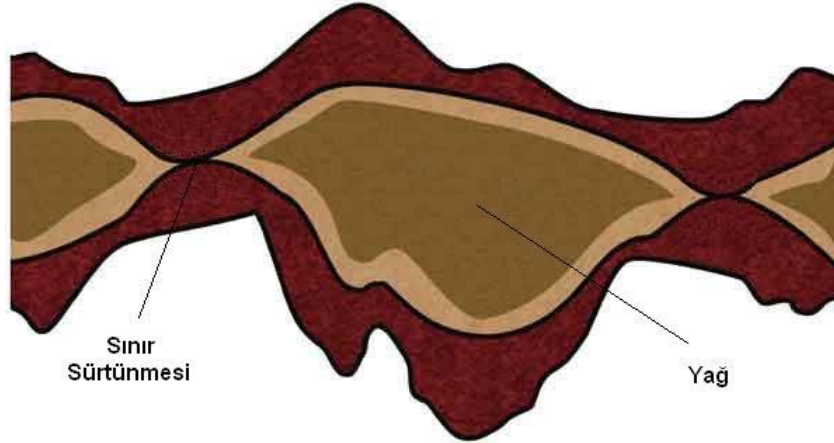
İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya

temasta bulunan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir ve esas sürtünme, yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur ki bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda yani yüzeyler tamamiyle ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır[2].



Şekil 2. a) Sıvı sürtünme, b) Sınır sürtünme, c) Kuru sürtünme[2].

Teorik olarak kuru sürtünme izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı bir direnç yani sürtünme kuvveti oluşur. Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişir[3].

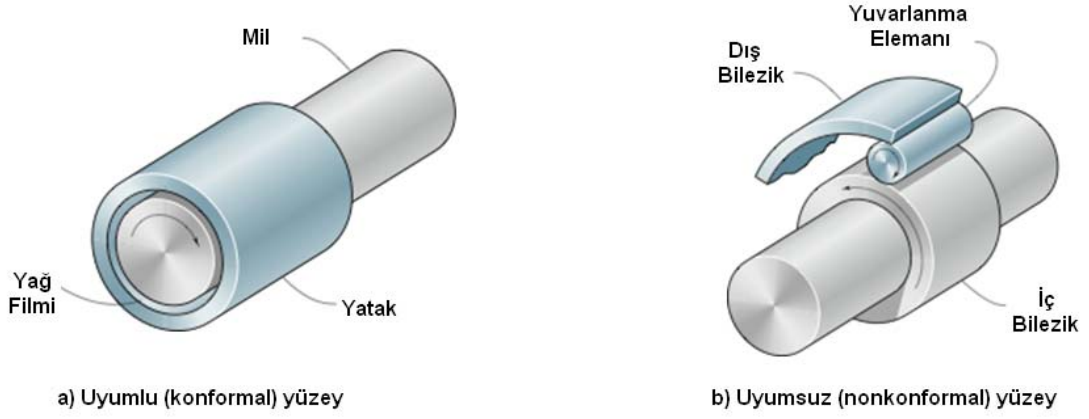


Şekil 3. Sınır sürtünmesinde yağlı bölge ve temas noktaları[3].

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında yağ tabakaları oluşmaktadır. Sıvı sürtünmesi ise, madeni yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir[1],[2],[3].

1.2.2. Uyumlu (Konformal) ve Uyumsuz (Nonkonformal) Yüzeyler

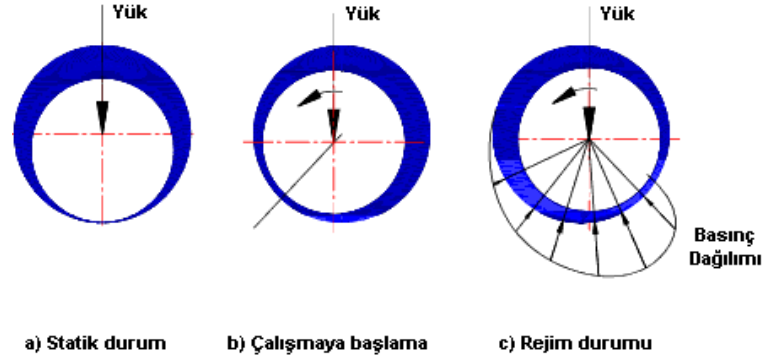
Makine elemanlarının bir çoğu tribolojik ilkeleri ve geometrik faktörleri göz önüne alınarak eş çalışan yüzey durumları uyumlu (konformal) yüzeyli ve uyumsuz (nonkonformal) yüzeyli olarak iki guruba ayrılabilir. Radyal hidrodinamik kaymalı yataklar, mil ve burç gibi sistemler uyumlu yüzeylidir. Zincir mekanizmaları, dişli çarklar, rulmanlar ve kam mekanizmaları gibi sistemler ise uyumsuz yüzeye sahiptirler. Bu iki gurubun çalışma prensipleri ve geometrik parametreleri yanında önemli tribolojik farklılıkları da vardır[3].



Şekil 4. a) Uyumlu (konformal) yüzeyli sistem, b) Uyumsuz (nonkonformal) yüzeyli sistem[3].

1.2.3. Hidrodinamik Yağlama

Hidrodinamik sıvı yağlamasında, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basınçlı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar sırasıyla yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde yani aksenal kaymalı yataklarda ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde yani radyal kaymalı yataklarda gerçekleşir. Radyal kaymalı yatak uyumlu (konformal) yüzeylere sahiptir ve yağ filmi içerisindeki basınç yaklaşık 5 MPa olup filmin en ince olduğu noktanın kalınlığı mil üzerindeki yüke, izafi hızlara, viskoziteye ve pürüz yüksekliklerine bağlıdır. Hidrodinamik yağlamanın olduğu sistemlerde elastik etkiler söz konusu değildir [1], [2].



Şekil 5. Hidrokinamik radyal kaymalı yatağın çalışması[2].

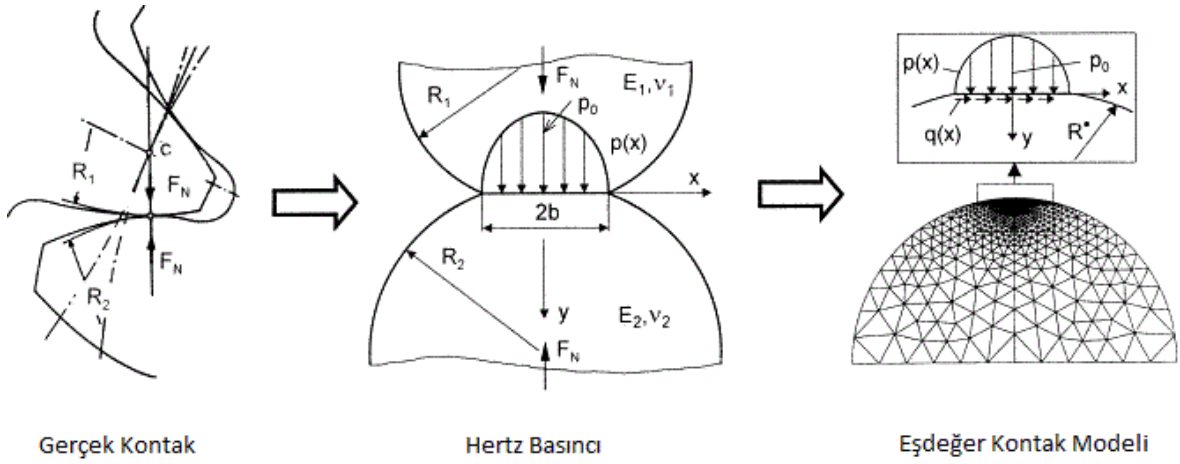
Hidrokinamik sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında kuru ve sınır sürtünmesi halleri ve bunlara bağlı olarak aşınma meydana gelir. Bu nedenle hidrokinamik sıvı sürtünmesi halinde sistemlerin aşınması tamamen önlenemez. Hidrokinamik sıvı sürtünmede yağlayıcı maddeler olarak sıvı, gaz veya gres kullanılabilir. Buna göre sıvı sürtünmesi halleri Hidrokinamik, Gazodinamik veya Reodinamik olarak isimlendirilir[1],[2].

1.2.4. Hidrostatik Yağlama

Hidrostatik yağlama halinde, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç, bir yüksek basınçlı pompa vasıtasıyla dışarıdan sağlanır ve yağ basınçlı bir şekilde 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 gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında dahi sıvı sürtünmesi hali vardır, kuru veya sınır sürtünmesinin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da yoktur[1],[2].

1.2.5. Elastohidrokinamik Yağlama (EHD)

Elastohidrokinamik yağlama, yağlanan yüzeylerde önemli ölçüde elastik deformasyonun olduğu yağlama şeklidir. EHD yağlama; kam mekanizmaları, rulmanlar, dişli çarklar gibi yuvarlanma ya da hem yuvarlanma hem de kayma hareketlerinin olduğu sistemlerde görülür[1], [2].



Şekil 6. Gerçek kontak, hertz basıncı ve eşdeğer kontak modeli[4].

EHD yağlama sert ve yumuşak olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Sert EHD yağlama elastisite modülü yüksek olan metalik malzemelerin yüzeyleri arasında meydana gelmektedir. Yağ filmi içerisinde meydana gelen basınç oldukça yüksektir (0,5 GPa – 4 GPa(40 bin bar)), katı yüzeyleri deformasyona uğratan elastik ve viskoz etkilerin her ikisi de önemli karakteristiklerdir. Yumuşak EHD yağlama ise elastisite modülü düşük olan malzemelerin yüzeyleri arasında meydana gelir. Yağ filmi içerisinde meydana gelen basınç nispeten daha düşüktür (0,5 MPa – 4 MPa), burada katı yüzeyleri deformasyona uğratan elastik etkiler viskoz etkilere baskındır[1],[2].

1.2.6. Aşınma

Aşınma, birbirine temas eden ve birbirlerine göre izafi hareket yapan sürtünme halindeki cisimlerin yüzeylerinde sürtünme etkisiyle oluşan ve istenilmeyen malzeme kaybıdır. Bunun sonucu olarak makine elemanları giderek aşınır ve fonksiyonlarını tam olarak yerine getiremez hale gelir. Belli başlı tribolojik aşınma türleri; adhezyon aşınması (yapışma), abrazyon aşınması ve yorulma (pitting) dir[1],[2].

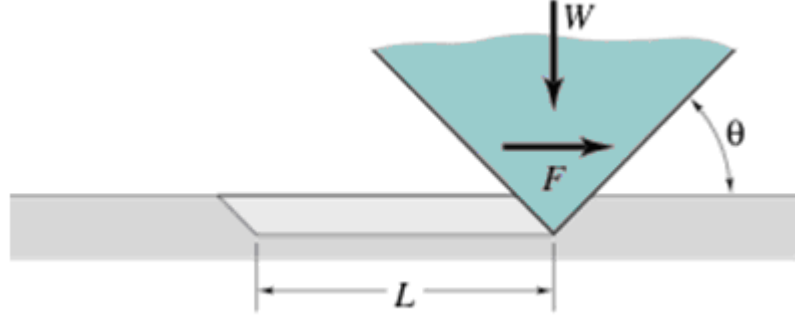
1.2.6.1. Adhezyon Aşınması

Birbirine temas eden cisimlerin gerçek temas yüzeyleri (yüzey pürüzleri) aslında çok çok küçük olduğundan, çok küçük yüklerde dahi yüksek basınç altındadırlar. Bu durumda malzemeler plastik deformasyona uğrayarak, birbirine gerçek temas yüzeylerinden mikro kaynak ile bağlanırlar. Bu sırada iki cisim arasında devam eden izafi hareket sonucu kaynak bağı kopar ve sonuçta cismin birinden malzeme eksilmesi oluşur[1],[2].



Şekil 7. Adhezyon aşınması modeli[2].

1.2.6.2. Abrazyon Aşınması



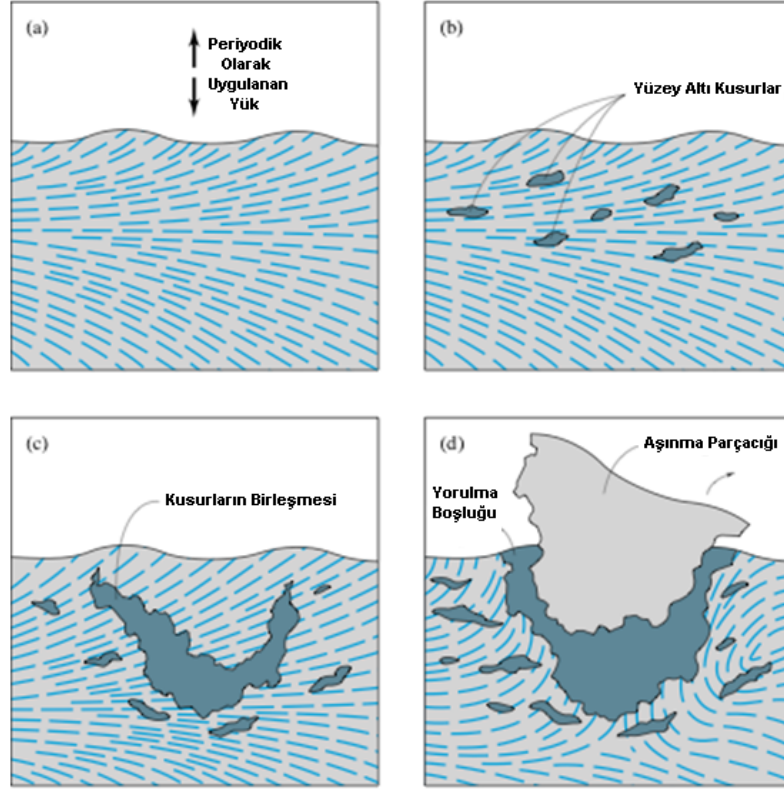
Şekil 8. Abrazyon aşınması modeli[2].

Abrazyon aşınması, birbirine göre izafi hareket yapan iki metal yüzey arasında dış koşulların etkisiyle yabancı sert parçacıkların ya da küçük cisimlerin girmesi ve bu parçacıkların yumuşak yüzeye gömülerek sert yüzeyden kazınma etkisiyle malzeme kaldırılmasıyla meydana gelen bir aşınma türüdür. Sert parçacıklar ve küçük cisimler gömüldükleri yüzeyde de tahribat yaparlar ve yüzeyi hareket yönünde çizerler. Fakat asıl tahribat karşı yüzeydedir. W yükü altında F kuvveti ile θ koniklik açısına sahip olan daha sert malzeme metali çizer. Bu eylem abrazif aşınmayı simüle eder[1],[2].

1.2.6.3. Yorulma (Pitting) Aşınması

Yorulma (pitting), dişli çarklar, rulmanlı yataklar, kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halindeki yüzeylerde sıkça görülen bir aşınma türüdür.

Bu tür makine elemanlarında temas alanları küçük olduğundan temas yüzeylerinde hertz basınçları meydana gelir. Bu basınçlar sonucu yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri meydana gelir. Kayma gerilmelerinin maksimum olduğu noktada plastik deformasyon meydana gelir. Bu deformasyon zamanla yüzeye ilerleyerek yüzeyde çukurcuklar meydana getirir. Bu olaya yorulma aşınması denir[1][2].

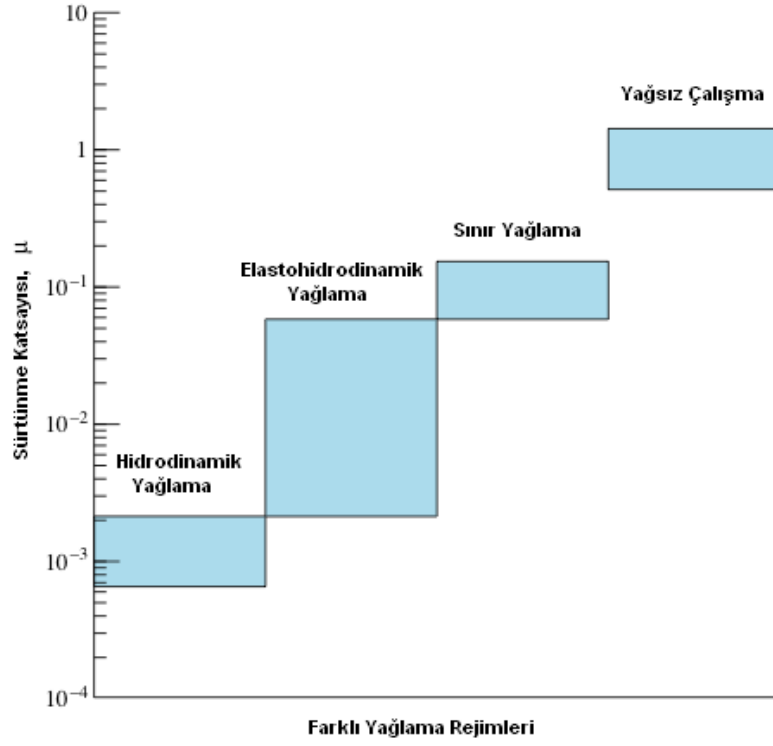


Şekil 9. Yorulma aşınması modeli[2].

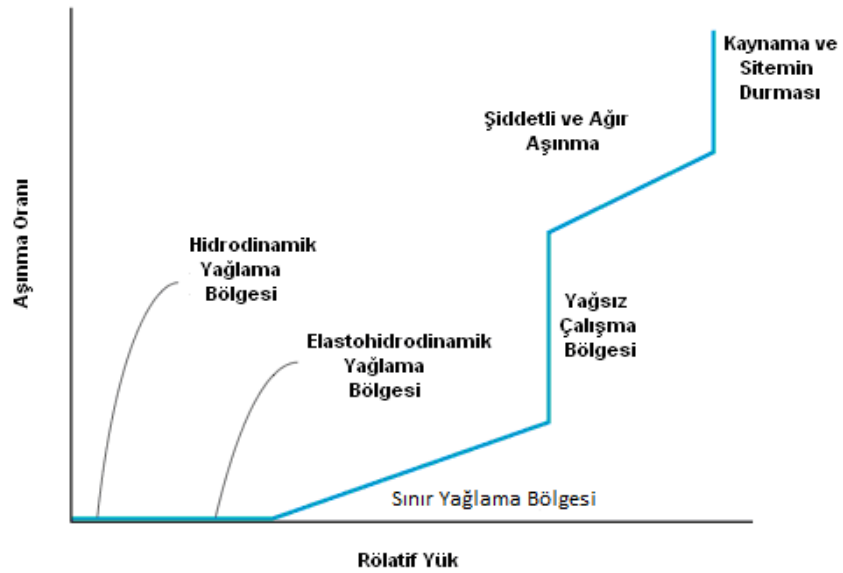
1.2.7. Sürtünme, Yağlama ve Aşınma

Farklı yağlama bölgesinde sürtünme katsayısının davranışı da farklılık arz eder. Sınır yağlama içerisinde sürtünme; hidrodinamik yağlama bölgesinden çok daha büyük olmasına rağmen, yine de yağlanmamış yüzeylerde geçerli olan sürtünme katsayısından çok daha düşüktür. Sürtünme katsayısı; hidrodinamikten EHD' ye, EHD' den sınır yağlamaya, sınır yağlamadan yağlanmamış kuru bölgeye giderken artmaktadır[2].

Belirli bir yük ile yüklenmiş bir sistem değişik yağlama şartları altında değişik oranda aşınmaya maruz kalır. Buna göre hidrodinamik ve EHD yağlama şartlarında; ya aşınma yoktur ya da çok azdır. Bunun nedeni pürüz yüksekliklerinin birbirine temas etmemesidir. Sınır yağlama bölgesinde ise artan yükte beraber aşınma oranı da artar. Yağsız bölgede ise yük artmasa dahi çalışma süreci içerisinde aşınma oranı artacaktır. Bu bölgede yükün artırılması durumunda, aşınma oranı büyük oranda artarak devam edecektir ve sonuçta parçalar birbirine kaynayacaktır. Artık sistemin çalışması sona ermiştir[2].



Şekil 10. Farklı yağlama rejimlerine göre sürtünme katsayısının değişimi[2]



Şekil 11. Farklı yağlama rejimlerine göre aşınma oranı değişimi[2].

1.3. Yağlayıcı Maddeler

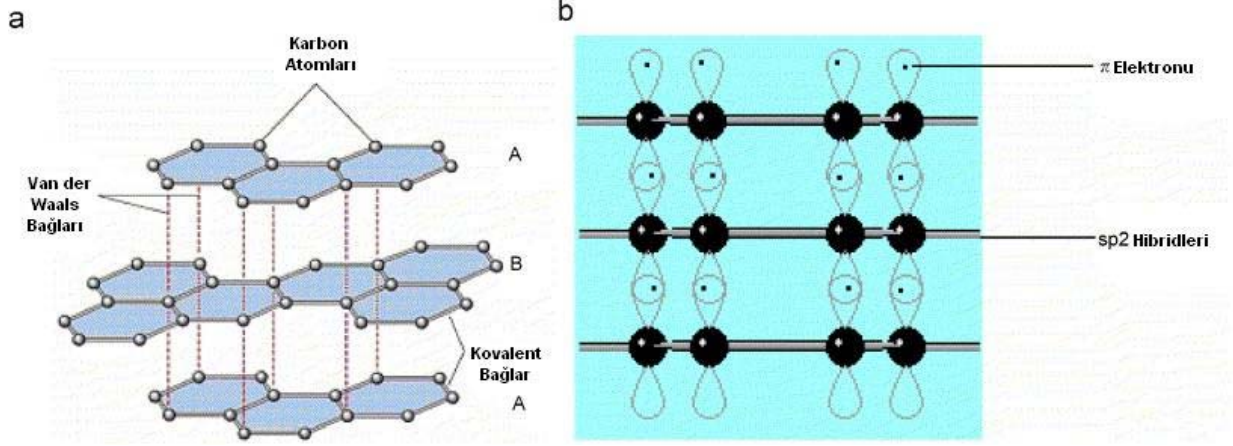
Yağlayıcı maddeler; sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen veya tamamen önlemek ve sıcaklığın yükselişini ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Sürtünme bakımından, çeşitli sürtünme halleri için yağlayıcı maddenin fonksiyonu farklıdır. Sıvı sürtünmesinde yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığından, burada sürtünme açısından önemli olan husus yağın viskozitesidir. Bu nedenle sıvı sürtünmesi halinde genellikle sıvı, bazı hallerde gaz yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Sınır sürtünmesi halinde yağlayıcı maddenin yapışma kabiliyeti ve buna bağlı olarak kimyasal bileşimi önemlidir. Bu nedenle sınır sürtünmesi halinde katı ve katkılı sıvı yağların önemli bir fonksiyonu, sürtünmeden dolayı yüzeylerde oluşan ısının, yağın sirkülasyonu ile dışarıya taşınmasıdır[1], [2].

Yağlayıcı maddeler fiziksel hollere göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört gruba ayrılabilir[1].

1.3.1. Katı Yağlayıcılar

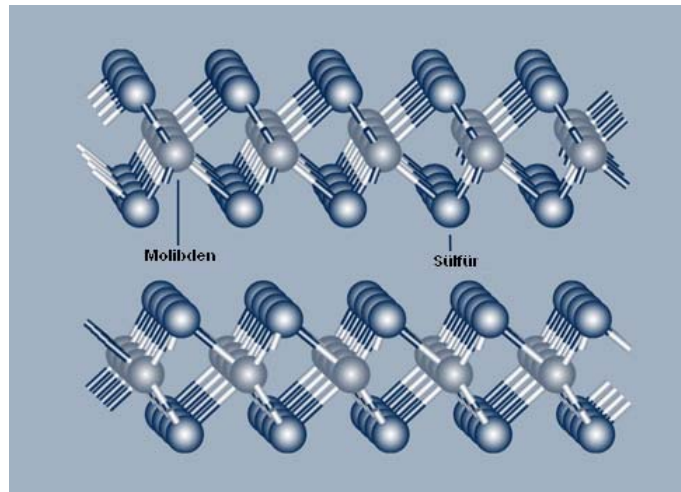
Kuru yağlama ya da katı yağlayıcılar yalnız başlarına, sıvı yağlar ya da greslerin içine karıştırılarak kullanılır. Pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılar grafit, molibden disülfid[1] ve teflondur (Poli Tetrafluoroethylene, PTFE).

Birbirinden farklı fiziksel formlarda yağlayıcı olarak kullanılabilen grafit; yüksek sıcaklıklarda tek başına, diğer hallerde ise yağ veya gres yağı ile bir süspansiyon oluşturacak şekilde karıştırılarak kullanılmaktadır. Grafitin yağlama özelliğinin iyi olması, hegzagonal tabakalı moleküler yapısı ve bu tabakalar arasında bulunan zayıf kimyasal bağlar nedeniyle madensel yüzeylerin üzerinde, kayma gerilmesi küçük ve metal yüzeyi üzerinde kopma mukavemeti yüksek bir tabaka oluşturabilmesinden ileri gelmektedir. Ayrıca grafitin ısıl kararlılığı da iyidir. Grafitin katı yağlayıcı olarak kullanılmasında havanın nemi son derece önemlidir. Grafit, vakum ortamında çok kuvvetli bir aşındırıcı gibi davranır.[1], [5],[6],[7],[8].



Şekil 12. Grafitin moleküler düzeni ve tabakalı yapısı[8].

Molibden disülfidin moleküler grafitte benzer. Madensel yüzeylerin üzerine yapışan lamelli tabakalar bir biri üzerinden kolayca kaymakla birlikte bu tabakaların oluşmasına hava veya suyun etkisi bulunmaz. Bu nedenle, vakum ortamında, oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda iyi bir yağlama özelliğine sahiptir. Bu yüzden, uzay araçlarında sıklıkla kullanılır. Ayrıca, molibden disülfidin de ısıl kararlılığı yüksektir. Özgül ağırlığı grafitten daha yüksek olduğu için, sıvı yağlarda katkı olarak kullanılma özelliği daha kötüdür[1], [6], [7], [9].



Şekil 13. Molibden disülfidin tabakalı moleküler yapısının yandan görünüşü[2].

Teflon (PTFE) tek başına bir katı yağlayıcı, gres veya sıvı yağlara katılmak suretiyle bir yağ katkısı olarak ta kullanılabilir. Teflon diğer katı yağlayıcılar gibi tabakalı bir yapıya sahip değildir. Fakat, teflon molekülleri o kadar büyüktür ki tabakalı bir yapı oluşturarak büyük moleküller birbiri üzerlerinden kayarlar. Bu da sürtünme katsayısını düşürür. Ancak, teflonun maksimum çalışma sıcaklığı düşüktür[7].

1.3.2. Sıvı Yağlayıcılar

Genel olarak sıvı yağlar endüstride bir çok alanda kullanılmakta olup iki metal (ya da metal olmayan) çalışma yüzeyini birbirinden ayırmak ve sürtünme kaybını en aza indirerek kolay bir hareket sağlamak için kullanılan maddeler olarak tanımlanmaktadır[10].

Bir sıvı yağın temel kullanım amacı iki metal yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltarak hareketi kolaylaştırmaktır. Bunun yanı sıra donanımda oluşan ısıyı gidermek, güç kaybını önlemek, yüzeyleri korozyondan korumak, çalışan parçaların temizlenmesini sağlamak ve aşınmayı engellemektir[10].

Endüstriyel yağların üretiminde yaklaşık %85 – 90 oranında baz yağ, %10 – 15 oranında ise katkı maddeleri kullanılmaktadır [10].

Endüstriyel, yağlar elde edilişlerine göre başlıca iki grupta toplanırlar.

1. Sentetik esaslı yağlar
2. Mineral esaslı yağlar

1.3.2.1. Sentetik Esaslı Yağlar

Sentetik yağlar, diğer doğal yağların görev yapamayacakları hallerde yağlamayı yapabilmek gayesiyle; ya petrolden damıtılan mineral yağı kimyasal olarak işleyip iyileştirerek, ya da tamamen kimyasal olarak elde edilir ve kullanılırlar[11].

1.3.2.2. Mineral Esaslı Yağlar

Ham petrolün destilasyonu sonucunda elde edilen dip ürünün (bakiye), yeniden mineral yağ elde edilebilecek şekilde rafine edilmesiyle elde edilirler. Mineral esaslı yağlar ile hayvani ve bitkisel yağlar arasındaki fark, hayvani ve bitkisel yağların yapılarında bir oksijen köprüsünün bulunmasıdır[11].

Mineral esaslı yağlar kimyasal yapı bakımından; Alifatik, Aromatik ve Karışık (Alifatik ve aromatik) olmak üzere başlıca üç gruba ayrılır[11].

1.3.2.3. Sentetik ve Mineral Esaslı Yağlar Arasındaki Farklar

Bu iki yağ çeşidi arasındaki fark; mineral yağların doğrudan doğruya ham petrolden rafine edilmesi, sentetik yağların ise, rafine işlemlerinden elde edilen saf bileşenlerden kimyasal olarak üretilmesidir. Laboratuar koşullarında özel olarak üretilen bu moleküller daha yüksek düzeyde koruma sağlar ve performansı artırır [12].

Sentetik yağların mineral esaslı yağlardan temel farkı, kullanılan özel hammadde ve katkıları dolayısıyla çok daha dayanıklı olmalarıdır. Sentetik yağlar, özellikle performansa yönelik kullanılırken, mineral yağlar genellikle daha düşük güce sahip motorlar için tercih edilir[12].

Sentetik motor yağları genellikle mineral yağlara kıyasla daha ince oldukları için motor içinde sürtünmeler dolayısıyla gerçekleşen güç kayıplarını azaltarak, aracın daha etkin kullanımını sağlar [12].

Sentetik yağlar özellikle modern motorların karşılaşılabilecekleri en ağır koşullarla baş edebilmek için geliştirilmiştir. Sentetik yağlar geleneksel mineral yağlara oranla çok daha akıcıdır. Bu akıcılık, motor korumasını büyük ölçüde artırır. Motor ilk çalıştırıldığında mineral yağların dolaşımı belli bir zaman alır, bu da sürtünmeye yol açtığı için yağlanmamış motor parçalarında fark edilir bir aşınma oluşturur. Buna karşılık, sentetik yağlar motoru çalıştırır çalıştırmaz yağlama görevini yerine getirmeye başlar ve motor içerisinde hareket halinde olan her parçayı korur. Sentetik yağlar aynı zamanda fark edilir bir yakıt tasarrufu da sağlar. Mineral yağların ısınması ortalama bir otomobil yolculuğunda en azından on dakikalık bir zaman alır. Daha yoğun yapıları olduğu ve daha yavaş hareket ettikleri için tüm bu süre boyunca motor, daha verimsiz çalışır ve daha çok hararet yapar. Oysa sentetik yağlar çok daha kısa sürede etkin yağlamayı sağladıkları için motor kısa sürede en yüksek verime ulaşır. Sentetik yağların bir başka üstünlüğü de daha çevreci olmalarıdır. Çünkü motor emisyonunu azaltmaya yardımcı olurlar ve katalitik dönüştürücülerin ömrünü uzatırlar. Tüm bu özellikleriyle modern sentetik yağlar, herhangi bir mineral yağa oranla çok daha üstündür [12].

Mineral esaslı baz yağlar; ham petrolün kapalı ortamlarda ısıtılarak sırası ile gaz, benzin, gazyağı gibi hafif kısımlarının ayrılmasından sonra vakum altında ısıtmaya devam edilmesi ile elde edilirler. Bu şekilde elde edilen vakum yağlar, rafinerilerde bir dizi süreçten geçirilir ve istenen özellikler kazandırılarak baz yağlar elde edilirler[10],[11].

1.3.3. Yarı Katı Yağlayıcılar (Gresler)

Gresler, içinde katılaştırıcı madde bulunan ve sıvı yağlardan oluşan yarı katı yağlayıcı maddelerdir. Katılaştırıcı madde olarak genellikle alüminyum, baryum, kalsiyum, lityum, sodyum gibi madensel sabunlar ve bunların yanı sıra bentonit, mika veya organik esaslı sabun olmayan maddeler de kullanılabilir. Gresler genellikle açıkta tek başına ve uzun yağlama süreleri olan düşük, orta hız ve orta yük altında çalışan sistemlerde kullanılırlar[1],[2].

1.3.4. Gaz Yağlayıcılar

Yüksek hız ve az yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde, gaz niteliğinde yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Bunların viskoziteleri sıvılara göre çok küçük olduğundan, kullanıldığı sistemlerde oluşan sürtünme ve buna bağlı olarak sıcaklık çok az olur. Ancak bu sistemlerin yük taşıma kabiliyetleri çok azdır. İlk zamanlarda hava, hidrojen ve azot gaz yağlayıcıların ana malzemeleri olduğu halde, günümüzde kükürt heksafloridler, sıvı nitrojen, buhar ve organik buhar kullanılmaktadır. Böylece ultrasantrifüjlerde, yüksek hızlı taşlama tezgahlarının ana millerinde, jiroskoplarda, elektrik motorlarında uygulanan bu yağlama usulü, gaz türbinleri, jet motorları, roketler, nükleer reaktörler gibi sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır[1],[2].

1.3.5. Yağlayıcılara Katılan Katkı Maddeleri

Rafineride ham petrolden elde edilen baz yağlar her ne kadar yağlama görevini yerine getirir de, günümüzün yüksek performanslı ekipmanlarında kullanılabilmesi ve

madeni yağdan beklenen sürtünme ve aşınmayı azaltma, soğutmayı sağlama, sızdırmazlığı sağlama, tortu ve depozit oluşumunu kontrol altında tutma gibi görevleri yapabilmesi için bazı katkı maddelerini içermesi gerekmektedir[13].

Madeni yağların üretiminde yaklaşık %10 - 15 oranında kullanılan yağ; temizleyici, pas önleyici, renk verici, koruyucu, kalınlaştırıcı, viskozite indeks geliştirici, aşınma önleyici, oksidasyona karşı koruyucu, akma noktası düşürücü, köpük oluşumu önleyici gibi özellikler kazandırmak amacı ile eklenmesi gereken maddeler katkı olarak tanımlanmaktadır [13].

Katkı maddeleri; yüzey koruyucu , performans geliştirici ve performans koruyucu katkıları olmak üzere 3 ana grupta toplanırlar[14].

Yüzey koruyucu katkıları; aşınma önleyici katkıları, aşırı basınç katkıları pas ve korozyon önleyici katkıları, deterjanlar (temizleyiciler), dispersanlar (dağıtıcılar), sürtünme azaltıcı katkıları olarak sınıflandırılabilir[14].

Performans geliştirici katkıları, viskozite indeks geliştiriciler, akma noktası düşürücüler, sızdırmazlık sağlayıcı katkıları olarak sınıflandırılabilir[14].

Performans koruyucu katkıları da; köpük önleyici katkıları, oksidasyon önleyici katkıları, metal aktifliğini azaltan katkıları olarak sınıflandırılabilir[14].

Genel olarak tipik bir katkı maddesi paketinin; %60'ını dispersanlar, %21'ini deterjanlar, %10'unu aşınma önleyiciler, %4'ünü sürtünme azaltıcılar, %3'ünü oksidasyon önleyiciler, %1'ini akma noktası düşürücüler diğer %1'ini ise pas ve köpük önleyiciler oluşturmaktadır [14].

1.3.6. Yağlayıcı Maddelerin Genel Özellikleri ile İlgili Parametreler

Yağlayıcı maddelerin özelliklerini, yağlama kabiliyetine ve fiziksel davranışlarına bağlı olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Yağlayıcı maddelerin yağlama özelliğini tayin eden faktörler viskozite ve yapışma kabiliyetidir. Fiziksel davranışlarına bağlı olan özellikler ise: katılma noktası, özgül ısı, oksidasyon, alevlenme noktası, damlama noktasıdır. Yağların ve greslerin seçimi bu özelliklere göre yapılır[1],[2].

1.4. Yağlayıcı ve Yağlayıcı Katkı Maddesi Olarak Bor Bileşiklerinin Kullanılması

Bor bileşikleri ve bor bileşikli yağ katkı maddeleri otomotiv ve endüstriyel yağlama sistemlerinde geniş bir uygulama alanı bularak bu alanda yeni gelişmelere neden olmaktadır. Bor bileşikleri üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar; onların yağ formülasyonları ve yeni nesil sistemler için istikrarlı ve uyumlu yağ bileşenlerinin hazırlanması için gerekli özellik ve parametrelerini sergileyerek ortaya koymuştur. Tek başına yağlayıcı ya da sıvı yağlar için katkı olarak kullanılan bor bileşikleri; aşınma gerçekleşen sistemlerde verimlilik, iyi film mukavemeti sağlama, yüksek sıcaklık direncine sahip olma ve sistemi kendinden yağlama gibi özelliklere sahip olduğundan, önemli tribolojik avantajlar ortaya koymaktadırlar. Dünyada bor bileşikli motor yağı katkı maddeleriyle ilgili olarak patent başvurularının artması ise bu alandaki ilginin bir göstergesidir. Bor madeni; oksitler, esterler, nitritler ve borik asit gibi çeşitli formlarda katı yağlayıcı yada sıvı yağlayıcı için katkı bileşiği olarak kullanılabilir. Bu nedenden dolayı bor bileşiklerinin yeni yağ formülasyonları ile beraber kullanılması beklenen bir durumdur [15].

1.4.1. Borun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Bor, atom numarası 5 ve kimyasal sembolü B olan kimyasal elementtir. Bor bir yarı metaldir. Gerek güneş sisteminde gerek Dünya'nın kabuğunda düşük miktarda bir elementtir. Buna rağmen, doğada rastlanan bileşiklerinin (borat minerallerinin) suda çözünürlüğü nedeniyle belli yerlerde yüksek yoğunlukta bulunabilir. Bu mineraller boraks ve kernit olarak topraktan çıkarılır[16].

Elemental bor doğada bulunmaz. Endüstride yüksek saflıkta bor zorlukla elde edilebilir. Çünkü bor, karbon ve başka elementlerle bileşikler oluşturur. Borun çeşitli allotropları vardır. Amorf bor kahverengi bir tozdur. Kristal bor ise siyah, son derece sert (Mohs sertlik skalasında yaklaşık 9.5) ve oda sıcaklığında düşük iletkenidir. Elemental bor, yarı iletken endüstrisinde bir dopant olarak kullanılır[16].

Dünyanın en zengin boraks yatakları Türkiye'nin orta ve batı bölgeleridir. Balıkesir'de Sultançayırı ve Bigadiç, Eskişehir'de Seyitgazi ve Kütahya çevresi önemli çıkarım alanlarıdır [16].

1.4.2. Borun Kullanım Alanları

Bor mineralleri, sanayide sayısız denecek kadar çok çeşitli işlerde kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

İmalat sanayinde özellikle talaşlı imalat işlemlerinde soğutma sıvısı, içten yanmalı motorlar, diferansiyel ve şanzıman gibi güç aktarma ünitelerinde aşınma ve sürtünme azaltıcı yağ katkı maddesi olarak kullanılmaktadır[17].

İnşaat ve çimento sektöründe mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı (daha sağlam, hafif ve depreme-ısıya dayanıklı binaların yapılmasında, yalıtımda) kullanılmaktadır[17].

Cam elyafı olarak hafifliği, fiyatının düşüklüğü, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı nedeniyle plastiklerde, sinai elyaf v.b. de, lastik ve kağıtta yer edinmiş olan cam elyaf, kullanıldığı malzemelere sertlik ve dayanıklılık kazandırmaktadır. Böylece sertleşmiş plastikler otomotiv, uçak sanayinde, çelik ve diğer metalleri ikame etmeye başlamıştır. Ayrıca spor malzemelerinde de (kayaklar, tenis racketleri v.b.) kullanılmaktadır[17].

Ahşap koruma işlemlerinde bakteri ve çürümeye karşı koruyucu ve alev geciktirici olarak kullanılmaktadır[17].

Nükleer uygulamalarda, atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında (B10) bor kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır[17].

Metalürji alanında ise boratlar yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayisinde koruyucu bir cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayisinde, elektrolit elde edilmesinde sarf edilmektedir. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise; kalay kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda, özellikle çeliğin sertliğini artırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda ferrobör oldukça önem kazanmıştır. Çelik üretiminde bor ilavesi çeliğin sertleştirilebilme niteliğini geliştirmektedir[17].

Otomobil hava yastığı ve antifriz imalatında bor; hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, elementel bor ile potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör ile harekete geçirilir. Sistemin harekete geçirilmesi ve hava yastıklarının harekete geçirilmesi için geçen toplam zaman 40 milisaniyedir. Ayrıca bor otomobillerde antifriz olarak ve hidrolik sistemlerde de kullanılmaktadır[17].

Sağlık sektöründe ise BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle; beyin kanserlerinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesine yaraması ve sağlıklı hücrelere zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih nedeni olabilmektedir. Metabolizmadaki bor, kalsiyum, magnezyum ve fosfor dengesini ayarlar. Sağlıklı kemiklerin oluşumuna, kasların ve beyin fonksiyonlarının gelişimine yardım eder[17].

Bor kimyasalları özellikle füze ve uçuş yakıtı olarak da kullanılmaktadır. Sodyum tetraborat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar[17].

Sodyum borohidrat, atık sulardaki civa, kurşun, gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır[17].

Son günlerde sodyum borohidritin'in kullanıldığı, sodyum borohidrattan enerji üreten hücre yakıtıyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Sodyum borohidratın kimyasal bağlarında hidrojen mevcut olup, katalist hidrojeni açığa çıkarmakta veya elektrik üretmektedir. Bu üretimde temel prensip ise, su ile boraksın reaksiyonudur. Bu reaksiyondan üretilen hidrojen direk içten yanmalı motorlara beslenebilir veya hücre yakıtlarında kullanılabilirler. Bunun yanında yüksek sıcaklıkta borun doğrudan yakıt olarak kullanıldığı motorlar üzerinde de çalışmalar devam etmektedir[17].

Bor, demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu içerisinde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücüleri, otomobillerde doğru akım-motorları ve ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda, borların piller/aküler de kullanılması ile maliyetler düşürülmüş ve çevre dostu piller/aküler üretilmeye başlanmıştır[17].

Ayrıca bor ; fiber optik, kozmetik, kauçuk ve plastik sanayi, fotoğrafçılık, patlayıcı madde üretimi, antifriz ve hidrolik yağ imalatı, petrol boya, yanmayan ve erimeyen boya imalatı, tekstil boyası imalatı, zımpara, aşındırıcı ve kompozit malzeme imalatı, manyetik cihazlar, ileri teknoloji araştırmaları, mumyalama ve daha bir çok sektörde ve alanda kullanılmaktadır [17].

1.4.3. Bor Bileşikli Yağlayıcılar ve Yağ Katkıları

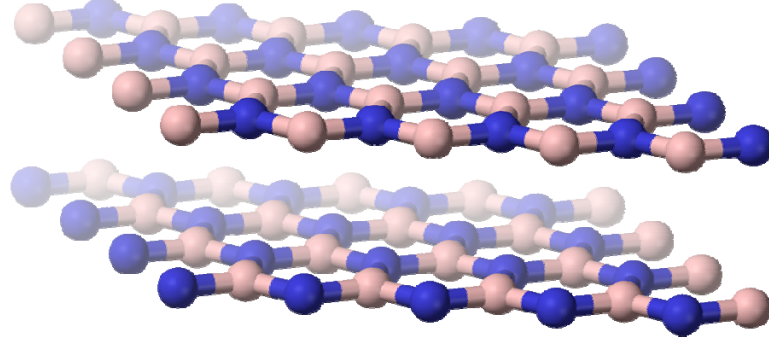
Bor bileşikleri, yağ içinde çözülmüş ya da nanopartikül formunda, yağda çözünmeyen, yağ içerisine dağılmış inorganik borat tuzları şeklinde, aşınma önleyici sürtünme düzenleyici, antioksidan, ve korozyon önleyici olarak bilinirler. Bor bileşikleri, daha önce yağlar içerisinde kullanılan diğer yağ katkı maddelerinin yerlerini almalarında iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Mevcut çalışmalar yüksek performanslı yağlayıcı ya da yağ katkı maddesi olarak yeni bor bileşiklerinin geliştirilmesi ve onların tribolojik özelliklerinin incelenmesi üzerine odaklanmaktadır[18].

Bor bileşikleri tribolojik özellikler açısından benzersiz bir kombinasyona sahiptir. Buna ek olarak çevreye ve sistem içerisinde çalışan makine elemanlarına verdiği zararın az olduğu düşünülmektedir[19]. Bu nedenlerden dolayı bor esaslı yağlayıcılar ve yağ katkı maddeleri ile ilgili araştırmalar son on yılda artmıştır. Bor bileşikleri özellikle sınır yağlama şartlarında yağ katkısı, katı yağlayıcı ve yüzey kaplama maddesi olarak incelenmiştir [20], [21], [22], [23]. Yağda çözünen bor bileşikleri sürtünme düzenleyici, korozyon önleyici, antioksidan ve aşınma önleyici özellikleri ile umut vericidir [24], [25], [26], [27], [28]. 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[29].

Bor bileşiklerinin, hem kuru hem de yağlı kayma koşulları altında, kayan yüzeyler arasında düşük sürtünme sağlamak için benzersiz özellikleri vardır[30].

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

1.4.4. Yağlayıcı ve Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür

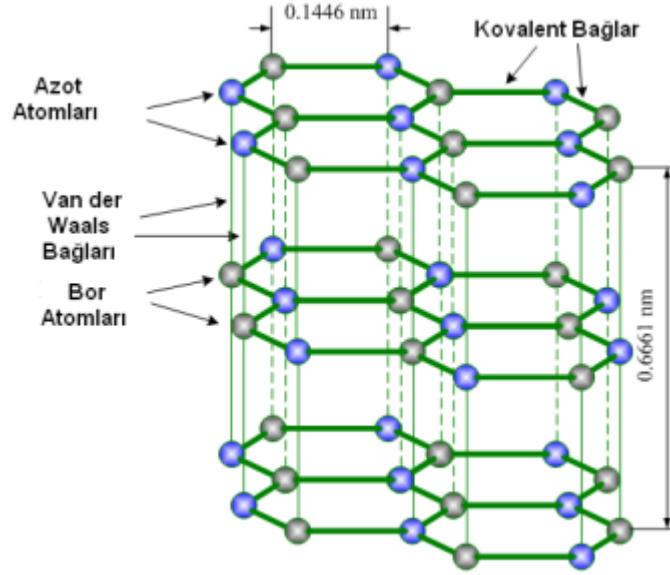


Şekil 14. Hegzagonal bor nitrürün üç boyutlu moleküler düzeni[31].

Bor nitrür toz halinde seramik bir yağlayıcıdır, 1200 °C gibi çok yüksek sıcaklıklarda ve oksitleyici ortamlarda dahi yapısı bozulmadan yağlama işlevini yerine getirebilir. Bu husus diğer katı yağlayıcılardan onu ayırır. Borun yüksek bir ısıl iletkenliği sebebiyle kullanıldığı yatak kolay soğur. Bor nitrür iki kristal yapıda olabilir. Kübik bor nitrür; elmas gibi çok sert bir malzeme olup takım uçları imalatında kullanılır. Hegzagonal bor nitrürün ise atom dizilişi grafitte benzer olduğundan yağlayıcılık özelliğine sahip bir bileşiktir. Hegzagonal bor nitrür sürtünme katsayısı en düşük ve en yüksek sıcaklıklara dayanıklı seramik yağlayıcıdır. Vida mekanizmaları, ekstrüzyon ile üretim gibi sürtünme katsayısının düşük olması istenen işlemlerde başarıyla kullanılmaktadır. Grafitten farkı, rengi ve olağan üstü bir elektriksel yalıtkanlığa sahip olmasıdır. Renk ve yalıtkanlık açısından grafitin kullanılmadığı yerlerde kullanılır ve kimyasal olarak stabildir. Alternatiflerine kıyasla üstün tribolojik özellikleri bir çok çalışmada ortaya konmuştur[32], [33], [34], [35], [36], [37], [38].

Hegzagonal bor nitrür grafit gibi iyi bilinen bir katı yağlayıcıdır ve moleküler yapısı grafitte oldukça benzer. Beyaz renginden dolayı bazen beyaz grafit olarak da adlandırılır. Hegzagonal bor nitrürün atomsal tabakalarında, bor ve azot kovalent bağla birbirine bağlıdır ve bu iki boyutlu levha şeklinde bir formun meydana gelmesine neden olur. Bu iki

boyutlu tabakalar ise birbirine van der Waals tipi bağlar ile bağlıdır ve bu bağlar zayıftır[30].



Şekil 15. Hegzagonal bor nitrürün kimyasal düzeni[30].

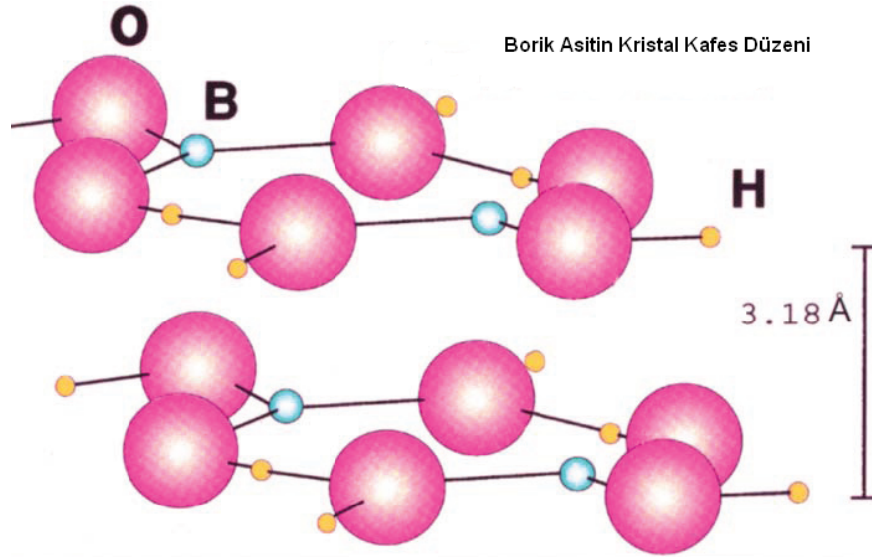
Hegzagonal bor nitrür tek başına katı bir yağlayıcı olmasının yanı sıra, tüm sıvı yağlara ve greslere katkı olarak katılabilir ve daha önceki bir çok çalışmada da katılmıştır[30]. Yapılan sistematik çalışmalarda, sıvı baz yağa yaklaşık yüzde bir oranında katılan hegzagonal bor nitrür birbiri üzerinden kayan her ikisi de madeni malzemenin yapılmış yatak ve muylu içerisinde sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmıştır [20].

Hegzagonal bor nitrür, greslere de katkı olarak katılarak incelenmiştir. Birbiri üzerinden kayan ve her ikisi de çelik malzemenin yapılmış yatak ve muyluda, hegzagonal bor nitrür katkılı gresin alternatiflerine kıyasla daha yüksek performans sergilediği gösterilmiştir[39].

1.4.5. Yağlayıcı ve Yağ Katkısı Olarak Borik Asit

Borik asit bor bileşiğinin zayıf bir asididir. Nötron soğurucu, antiseptik, insektisit ve alev geciktirici olarak kullanılabilir. Renksiz kristal veya toz şeklinde bulunabilir ve suda çözünür. Borik asit çevreye zararsızdır ve takım tezgahlarında soğutma ve kesme işlemlerinde kullanılabilir. Katı olarak kesme olayının olduğu bölgeye gönderilen borik

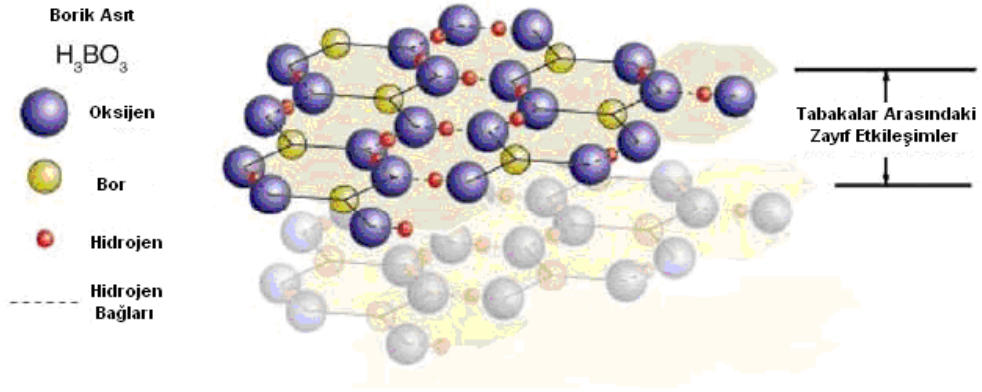
asit, tabakalı yapısından dolayı sürtünme kuvvetini azaltarak takımı korur. Borik asit takımların aşınmasını azaltır. Alüminyum ve çeliğe uygundur[40], [41].



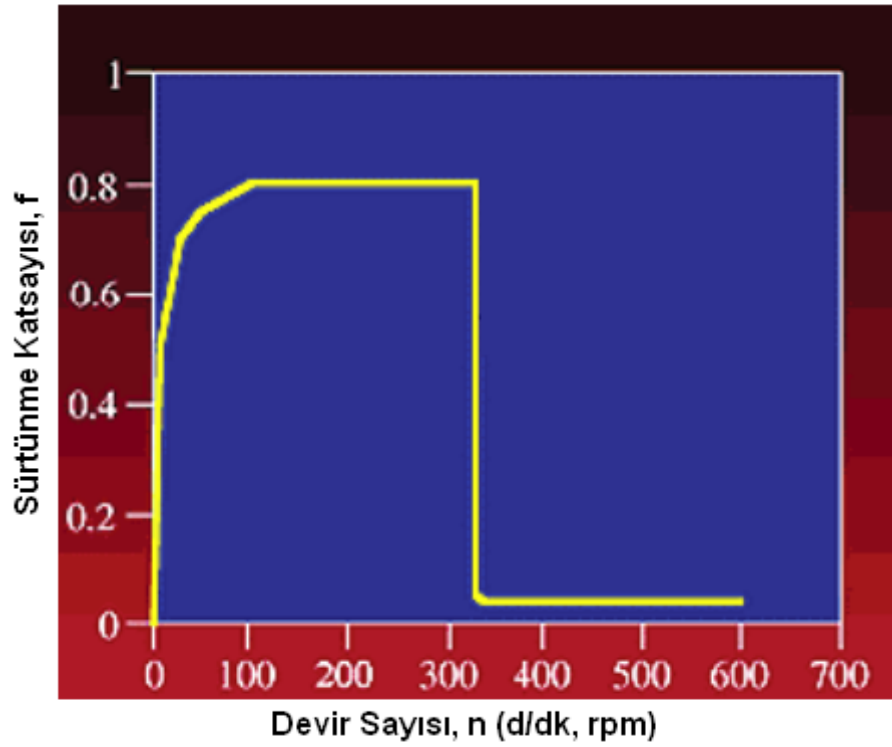
Şekil 16. Borik asidin kristal kafes yapısı[36].

Hidrojen, oksijen ve bor atomları birbirlerine güçlü bir şekilde bağlanarak tabakaları oluştururlar. Aralarında belirli bir mesafede iki tabakayı birbirine bağlayan bağ Van der Waals bağlarıdır. Tıpkı grafit, hegzagonal bor nitrür katı yağlayıcıları gibi borik asit te tabakalı bir yapıya sahiptir ve bu aradaki zayıf bağın kolayca kopması suretiyle tabakalar bir biri üzerinden rahatça kayar. Kuru yağlama amacıyla borla kaplanan yüzeyler nemli ortamlarda borik asit oluşumuna imkan sağlayarak, kendi kendine gerçekleşen bir yağ filmi tabakası oluşturulabilir. Oluşan bu tabakalı yapı ise sürtünme ve aşınmanın azalmasını sağlar [30], [41].

Şekil 18' de her ikisi de çelik malzemeden yapılmış bir pin-on disk sisteminde çalışan yüzeyler arasına borik asit tozu ilave edilmeden önce ve ilave edildikten sonra sürtünme katsayısının devir sayısına göre değişimi görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi borik asit tozu sürtünme katsayısını düşürmüştür[30],[42],[43], [44].



Şekil 17. Borik asit tabakaları arasındaki zayıf Van der Waals bağları[41].

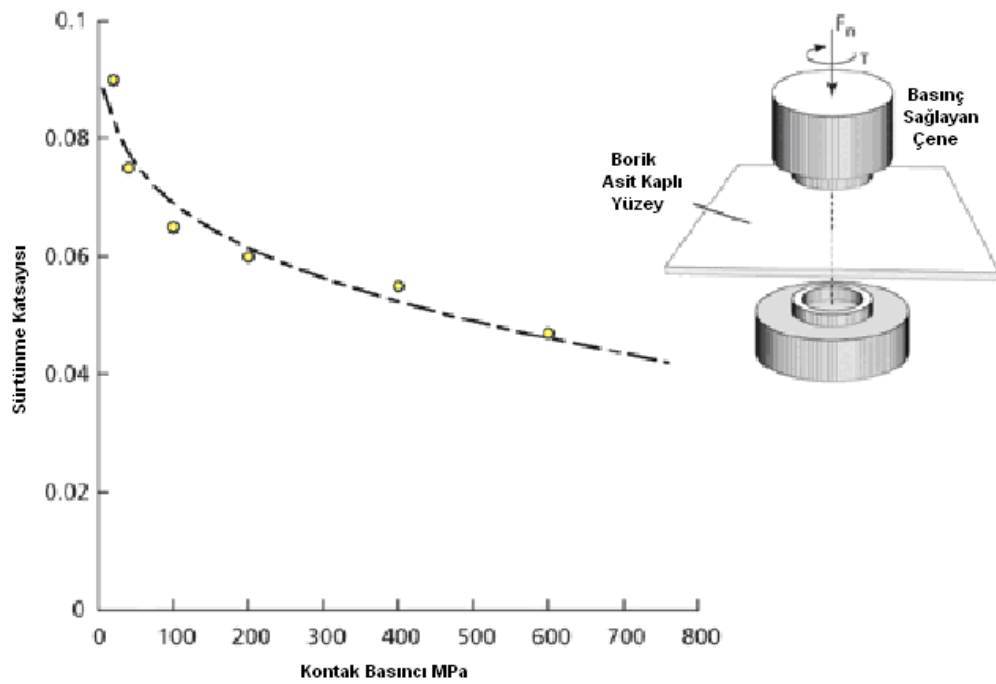


Şekil 18. Bir pin-on disk sisteminde 320 d/dk' dan sonra sisteme eklenen borik asit tozları nedeniyle, sürtünme katsayısının önemli ölçüde düşmesi [30],[42],[43], [44].

Katı yağlayıcı olarak borik asidin bir başka özelliği ise; artan kontak basıncı ile yağlama kapasitesinin artmasıdır. Artan kontak basıncı ile beraber borik asitle kaplı metal yüzeylerin arasındaki ince film tabakasında geçerli olan sürtünme katsayısı azalır[42],[43], [44]. Bunun nedeni artan kontak basıncının moleküler düzeyde tabakalar arasında bulunan Van der Waals bağlarını daha kolay kopartarak söz konusu tabakaların dönüş yönüne doğru birbiri üzerinden kaymalarını kolaylaştırmasıdır. Bu nedenle borik asidin bir katı

yağlayıcı olarak yağlama mekanizması, molibden disülfid gibi diğer katı yağlayıcılarınkine benzemektedir[30], [45].

Bir katı yağlayıcı olarak borik asit ile yapılan çalışmalar; farklı kontak şekillerinin söz konusu olduğu ortamlarda yada kayan yüzeylerin birisinin çelik diğerinin seramik olduğu durumlarda da sürtünme katsayısının ve kontak basıncının birbiri ile ters orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Borik asit ile kaplanmış bir levhanın, çene çifti vasıtasıyla üzerine etkiyen basınç ile yüzeyler arasında geçerli olan sürtünme katsayısının ters orantılı olduğu tespit edilmiştir[41], [46].



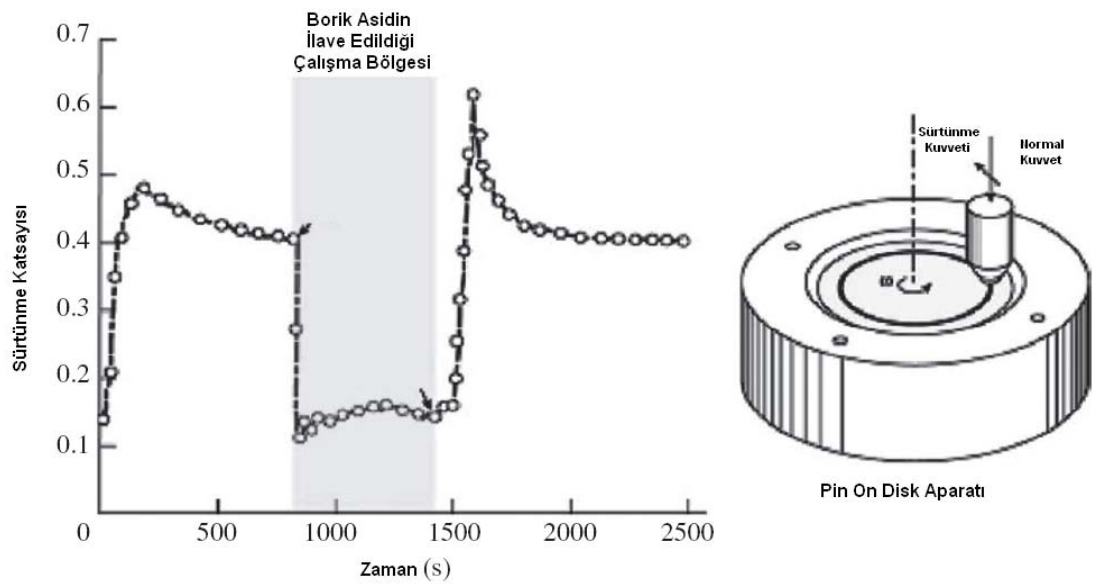
Şekil 19. Borik asitle kaplanmış yüzeylerde meydana gelen kontak içerisinde sürtünme katsayısının artan basınç ile değişimi[41].

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 daha önceki bir çok çalışmada da katılmıştır[30], [47], [48]. Borik asit, düşük yoğunluğu nedeniyle, katıldığı yağın içerisinde uzun süre dağılımını koruyup katkı özelliğini devam ettirebilir[30].

Ağırlıkça yüzde 1 oranında, nanometre boyutlarında borik asit tozu ilave edilen sıvı yağ ile yapılan deneylerde, sürtünme katsayısının 0.15 ten 0.04 e düştüğü, ayrıca, kontak bölgesinde basınç ile sürtünme katsayısı arasında ters orantılı bir değişim görülmüştür[30]. Başka bir çalışmada farklı yüklerde yüklenen ve belirli bir hızla çalışan pin-on disk

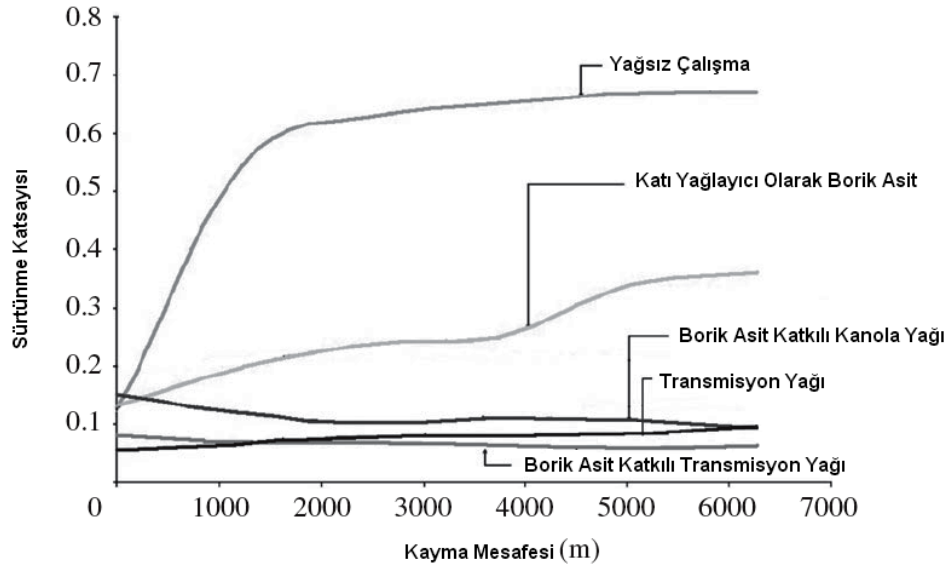
sisteminde, kontak bölgesinde, film tabakası içerisinde mevcut bulunan borik asit vasıtasıyla giderek artan basınç değerine rağmen kayma sürtünme katsayısı 0.10 den 0.02 değerine kadar düştüğü ve aşınmanın da azaldığı gözlemlenmiştir[49].

Kontaktaki hertz basıncının 1.9 GPa olarak ölçüldüğü ve 1 m/s hız ile hareket eden başka bir pin-on disk çalışmasında, sisteme toz halinde borik asit ilavesi yapıldığında, sürtünme katsayısı 0,4 ten 0,15 e gerilemiştir[50].



Şekil 20. Borik asit ilavesi yapılan bir pin on disk sisteminde sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi[50].

Borik asidin katı yağlayıcı olarak kullandığı durumda ve farklı yağlara yağ katkısı olarak ilave edildiği durumlarda, sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 21. de görülmektedir. Borik asit en yüksek performansını yağ katkısı olarak kullanıldığı zaman göstermektedir[51].

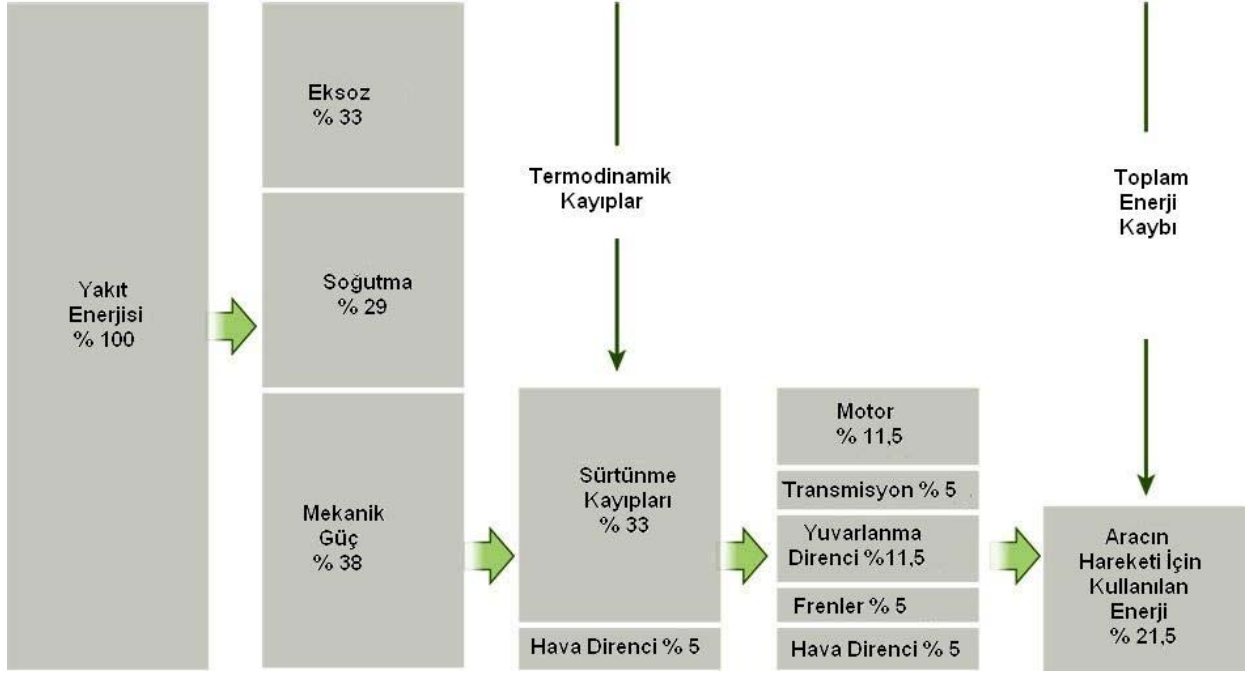


Şekil 21. Borik asidin tek başına katı yağlayıcı olarak ve sıvı yağlarda yağ katkısı olarak kullanılması halinde sürtünme katsayısına etkisi[51].

1.5. İçten Yanmalı Motorlarda Mekanik Kayıplar ve Yağlama Sistemleri

İçten yanmalı motorlarda hareketli parçalar ve yardımcı mekanizmalardaki sürtünmeler motorun gücünü önemli ölçüde düşürmektedir. Motor gücünün yaklaşık yüzde 20-30 kadarlık kısmının sürtünmelere harcandığı bilinmektedir. Sürtünmeler en fazla piston-segman ve silindirler arasında, krank mili yataklarında ve süpap mekanizmasında meydana geldiği bilinmektedir. Sürtünme kayıpları düşük viskoziteli yağ kullanımı, hareketli parçaların ağırlıklarının azaltılması, sürtünen parçaların yüzey kalitelerinin iyileştirilmesi ve parçaların düşük sürtünme sağlayan katı yağlayıcı maddeler ile kaplanması yoluyla azaltılabilmektedir[52].

Motor silindirlerinde üretilen gücün sürtünmeyle kaybolan kısmı su ve yağ soğutma sistemleri ile dışarı atılmaktadır. Sürtünmeye harcanan gücü çeşitli yöntemler kullanarak azaltmak mümkündür. Motor parçaları arasındaki kuru sürtünmeleri azaltmak amacıyla motor yağı kullanılmaktadır. Motor yağı birbiri ile ilişkilendirilmiş parçalar arasında sıvı sürtünme sağlamak suretiyle sürtünme kuvveti oldukça düşük seviyelere indirgenmiştir. Yağlama suretiyle sürtünmeyi azaltma işlemi çok eskiden beri bütün makinelerde kullanılan bir yöntemdir[52], [54].

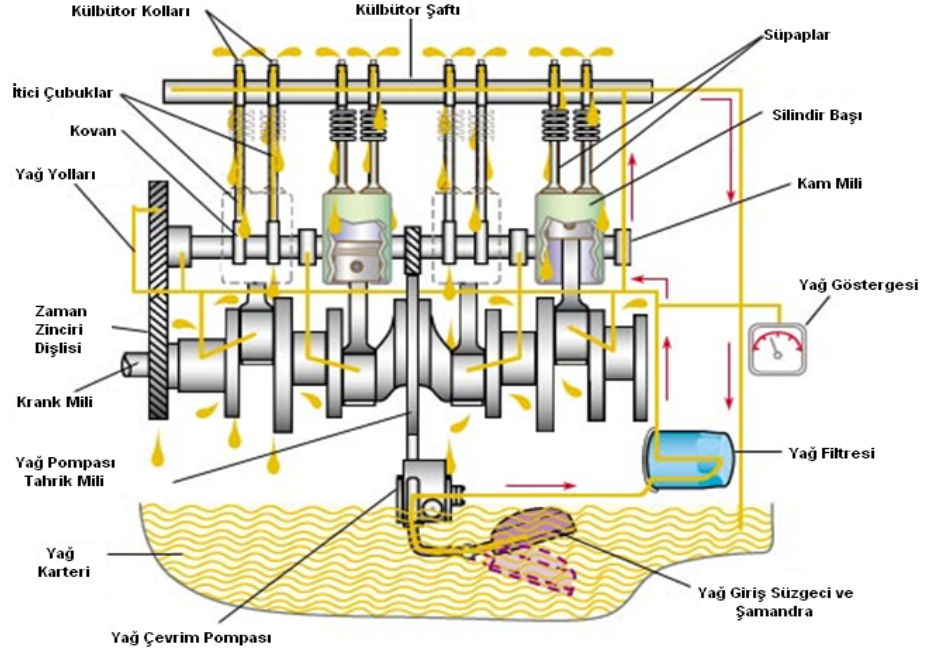


Şekil 22. Bir içten yanmalı motorda meydana gelen güç kayıpları[53].

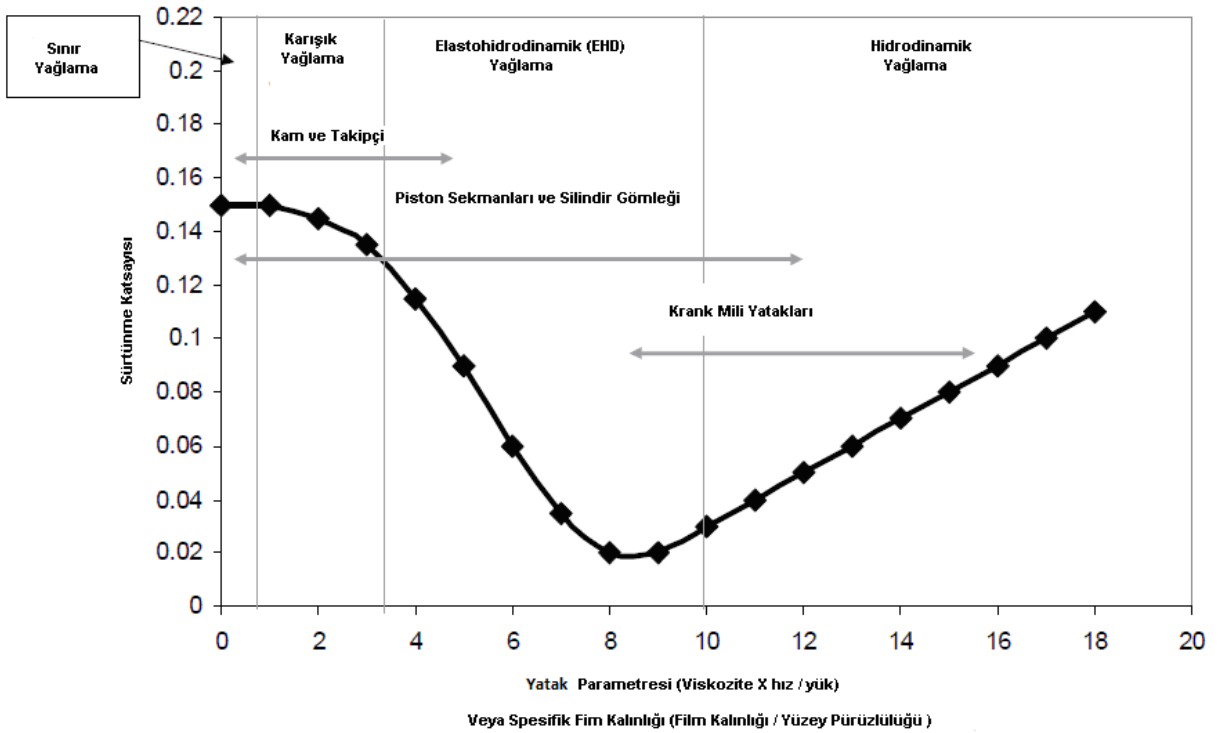
Yağların temel özellikleri koruyucu ve sürtünmeyi azaltıcı olmalarıdır. Fakat belirli bir süre kullanılan yağların bu özellikleri bozularak motor parçaları üzerinde aşınmalar meydana gelmekte, motorun bakım ve revizyona girme periyodu kısalmaktadır. Parça deformasyonuna bağlı olarak motor karakteristikleri değişmektedir[52], [56].

Hidrodinamik (veya EHD) yağlama şartları altında düşük viskoziteli yağlar daha az direnç göstererek iç sürtünmelerin azalmasına sebep olmakta ve bu sayede yakıt ekonomisi sağlanmaktadır. Ancak düşük viskoziteli yağların kullanılması yağ tüketimini arttırırken yağ filmi kalınlığının azalmasına hatta yırtılmasına neden olabilmektedir[52], [56].

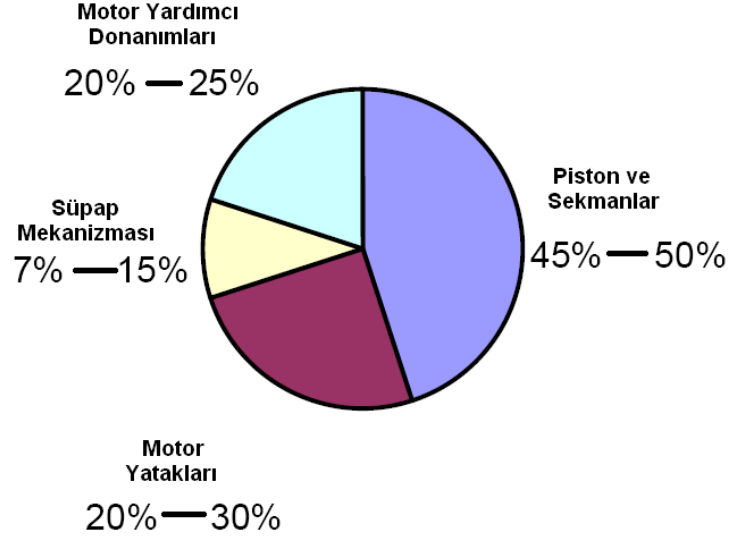
Genel olarak sürtünme; sıvı, karışık ve kuru sürtünme diye üç kısma ayrılabilir. Motor elemanlarının maruz kaldığı sürtünme; parça geometrisi, yüzey pürüz yüksekliği, hareketli yüzeylerin izafi hızları, normal yükler, parçaların yapıldığı malzemeler yada kaplama malzemesi, sıcaklık, yağların farklı tribolojik ve reolojik özelliklerinden dolayı bu grupların sadece birine girmeyebilir[57],[58]. Bunun yanında motorlarda sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıpların incelenmesi için bir çok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır[59], [60], [61], [62].



Şekil 23. Bir içten yanmalı motorun yağlama sistemi[55]



Şekil 24. Stribeck diyagramı ve çeşitli motor elemanlarının maruz kaldıkları yağlama rejimlerinin bu diyagramdaki yerleri[58].



Şekil 25. Motorlarda mekanik kayıpların dağılımı[61].

En büyük mekanik kayıp oranı piston ve sekmanlarda gerçekleşmektedir. Bu motor elemanlarının mazur kaldıkları yağlama rejimleri, pistonun silindir içindeki hareketine, yağlama yağına ve diğer parametrelere bağlı olarak hidrodinamik, EHD, karışık ya da sınır yağlama şeklinde olabilir. Piston ve sekman gurubu karışık veya sınır yağlama rejimlerinde çalışırken en fazla aşınma ve en büyük sürtünme gücü kaybı bu grupta meydana gelir. Daha sonra sırasıyla motor yataklarında, yardımcı donanımlarda ve süpap mekanizmasında sürtünme kayıpları meydana gelir[62].

1.6. Literatür Özeti

Bor bileşikleri ve bor bileşikli yağ katkı maddeleri otomotiv ve endüstriyel yağlama sistemlerinde geniş bir uygulama alanı bularak bu alanda yeni gelişmelere neden olmaktadır. Bor bileşikleri üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar; onların yağ formülasyonları ve yeni nesil sistemler için istikrarlı ve uyumlu yağ bileşenlerinin hazırlanması için gerekli özellik ve parametreleri sergileyerek ortaya koymuştur. Tek başına yağlayıcı ya da sıvı yağlar için katkı olarak kullanılan bor bileşikleri; aşınma gerçekleşen sistemlerde verimlilik, iyi film mukavemeti sağlama, yüksek sıcaklık direncine sahip olma ve sistemi kendinden yağlama gibi özelliklere sahip olduğundan, önemli tribolojik avantajlar ortaya koymaktadırlar.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalar bölümünde hidrodinamik ve elastohidrodinamik yağlama konuları ile ilgili teorik bilgiler verilecektir. Bu teorik bilgiler daha sonra sonuçların değerlendirilmesi ve irdeleme kısmında yorumlar yapılırken kullanılacaktır. Bunun yanında deneyin yapılışı ve deney sistemi hakkında da açıklama verilecektir.

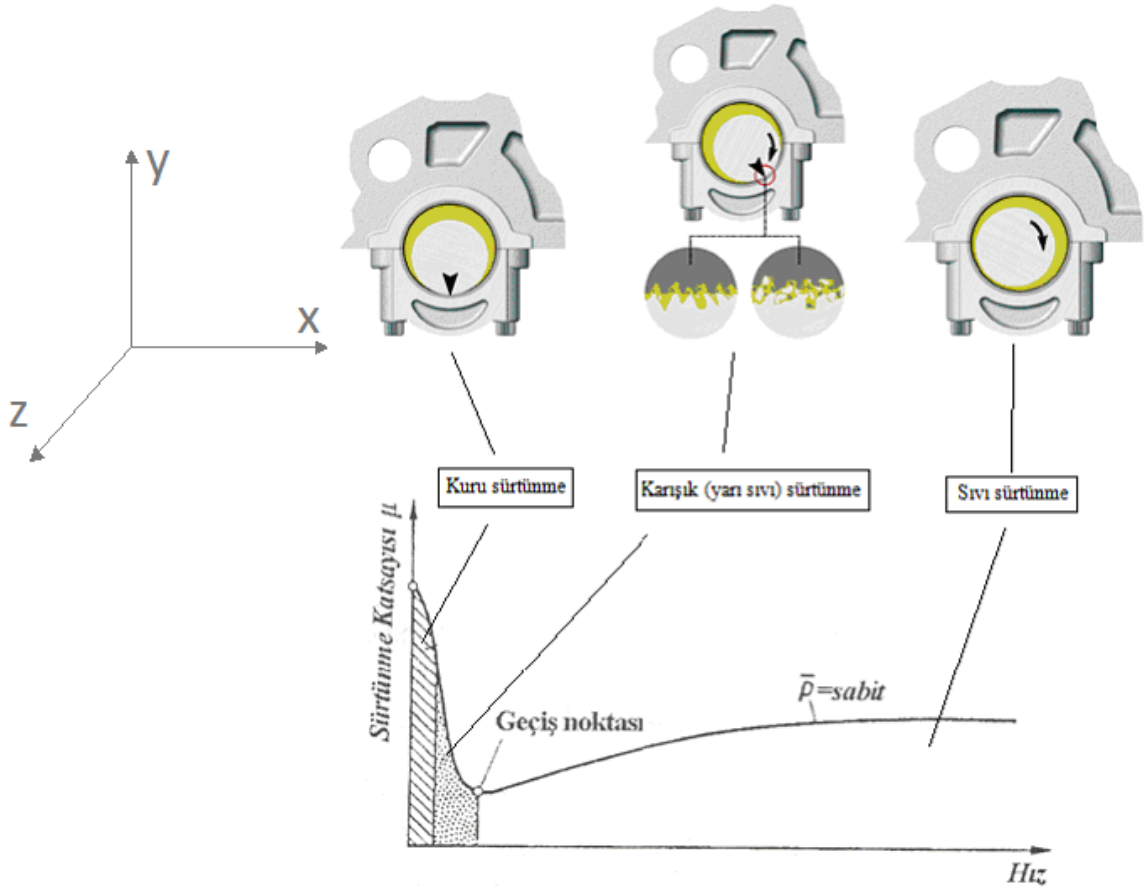
2.1. Hidrodinamik Yağlama Teorisi

Bu bölümde hidrodinamik yağlama teorisinin temelleri üzerine durulacaktır.

2.1.1. Hidrodinamik Yağlamanın Teorik Temelleri

Hidrodinamik yağlama (HY) genel olarak konformal (iç bükey, uyumlu) yüzeyler ile karakterize edilmektedir. Yatak yüzeylerinin birbirine yaklaşması, yüzeylerin bağlı hareketi ve yüzeyler arasında bulunan yağlayıcının bir viskoziteye sahip olması nedeniyle, hidrodinamik bir şekilde yağlanan, radyal veya aksenal yataklarda meydana gelen pozitif basınç, yatak yüzeylerini birbirinden ayırmaktadır. Bu pozitif basıncın varlığı uygulanan normal yükü ile orantılıdır. Basıncın büyüklüğü genellikle 5 Mpa' dan daha küçük olduğundan yüzeyleri elastik deformasyona uğratan değere sahip değildir. Hidrodinamik bir şekilde yağlanmış bir yatakta minimum film kalınlığı, uygulanan normal yükün, yüzeyler arası bağlı hızın, yağın viskozitesinin ve yüzeylerin geometrisinin (yüzey pürüzlülüğünün) bir fonksiyonudur. Kayma hareketi için gerekli olan minimum yağ filmi kalınlığı; yatak yükü, viskozite, yüzey pürüzlülüğü ve izafi kayma hızına bağlıdır. Minimum yağ filmi kalınlığı normal olarak $1\mu\text{m}$ 'yi geçmektedir[1], [2], [63].

Hidrodinamik yağlamada yağ filmi, genellikle parçaların katı yüzeylerinin birbiriyle izafi hız yaparak çalışma esnasında birbirleriyle eş çalışan yüzeylerin temaslarına engel olabilecek kalınlığa sahiptir. Bu şart genellikle "yağlamanın ideal şekli" olarak bilinmektedir. Çünkü bu düşük sürtünme kuvveti veya katsayısı büyük aşınma direnci ortaya koymaktadır. Sürtünme karakteristiği ise sadece viskoz akışkanın kaymasından meydana gelmektedir. Yani söz konusu sürtünme sadece yağlayıcı sıvının kendi iç sürtünmesinden ibarettir[1],[2],[63].



Şekil 26. Hidrodinamik kaymalı yataklar için Stribeck eğrisi[63]

Şekil 26' da Hidrodinamik kaymalı yataklar için Stribeck eğrisi görülmektedir. Bu şekle göre, sürtünme katsayısı, yatakta dönen milin hızının değişimi ile değişmektedir. Mil dönmeye başlamadan önce, yani statik halde iken, sürtünme katsayısı en büyük değerini almaktadır. Mil dönmeye başlayınca, yağlama rejimi sırasıyla kuru, karışık (yarı sıvı), ve sıvı sürtünmesi olarak gerçekleşmektedir. Sürtünme katsayısının en düşük değerini aldığı yer; karışık sürtünme bölgesinden sıvı sürtünme bölgesine geçildiği noktadır.

2.1.2. Hidrodinamik Yağlama Teorisinin Genel Denklemi

Hidrodinamik sıvı sürtünmesinin incelenmesi viskoz akışkanların Navier - Stokes denklemlerine ve süreklilik denklemine dayanır. Navier-Stokes denklemlerinden çok ince bir yağ tabakasına sahip hidrodinamik sıvı sürtünmesinin basınç denklemini bulmak için

bazı varsayımlar yapılır. Buna göre geometri önemli olmamakla beraber plakalar arasındaki boşluk daralan biçimdedir, plakalar arası hız yeterlidir, boşlukta yeteri kadar yağ bulunur, akış laminar ve akışkan newtonyendir. Şekil 5 ve Şekil 26 göz önünde bulundurulursa; y koordinatı yönünde olan yağ tabakasının h kalınlığı çok ince olduğundan, y yönündeki boyut, x ve z yönündeki boyutlardan çok daha küçüktür. Dolayısıyla yağ tabakası içerisindeki p basıncı y yönünde değişmez, yani sabittir. Ayrıca yağ tabakasının inceliğinden dolayı yatak yüzeylerindeki herhangi bir eğrilik ihmal edilebilir. Bu varsayım radyal yataklar için geçerlidir. Viskoz kuvvetlere göre eylemsizlik kuvvetleri çok küçüktür ve ihmal edilebilir ayrıca yağ tabakasını etkileyen dış kuvvette yoktur[1],[2]. Bunlara göre Navier-Stokes denklemleri basitleştirilmiş olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3)$$

Süreklilik denkleminde de aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (4)$$

Bu denklemlerde u, v, w akışkan hızının koordinat sistemine göre x, y, z eksenlerin yönlerindeki koordinat bileşenleri, η akışkanın dinamik viskozitesi, ρ akışkanın yoğunluğu ve p akışkanın basıncıdır. Buna göre denklemlerin integrali alınıp integrasyon sabitleri aşağıda belirtilmiş olan sınır koşullarına göre belirlenirse x ve z yönlerindeki akışkanın hız bileşenleri bulunabilir[1],[2].

$$y=0 \text{ için; } u=u_1 \text{ ve } w=w_1 \quad (5)$$

$$y=h \text{ için; } u=u_2 \text{ ve } w=w_2 \quad (6)$$

$$u = \frac{1}{2\eta} y(h-y) \frac{\partial p}{\partial x} + u_1 \frac{(h-y)}{h} + u_2 \frac{y}{h} \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{2\eta} y(h-y) \frac{\partial p}{\partial z} + w_1 \frac{(h-y)}{h} + w_2 \frac{y}{h} \quad (8)$$

Burada u_1, u_2, w_1 ve w_2 üst ve alt plakaların x ve z yönlerindeki hız bileşenleridir. v ve w değerleri süreklilik denkleminde yerlerine konulursa ve $y=0$ için $v=V$, $y=h$ için $v=0$ sınır koşullarına göre y yönünde integral alınır, düzenlemelerden sonra aşağıdaki gibi hidrodinamik sıvı sürtünmesinin genel denklemini elde edilebilir[1],[2].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 6W \frac{\partial(\rho h)}{\partial z} + 12\rho V \quad (9)$$

Burada $U=u_1-u_2$, $W=w_1-w_2$ ve V plakaların x,z ve y yöne izafi hız bileşenleridir. Bu denklem akışkan tabakasında oluşan basınç dağılımını en genel biçimde veren diferansiyel denklemdir. Buna göre akışkan tabakasındaki basınç; akışkan tabakasının h kalınlığına, η viskozitesine, ve ρ yoğunluğuna, $\frac{\partial(\rho h)}{\partial x}$ veya $\frac{\partial(\rho h)}{\partial z}$ terimlerine göre akışkan tabakasının kalınlığının ya da yoğunluğunun x veya y eksenindeki değişimine, yüzeylerin x,y,z yönünde U, V ve W izafi hızlarına bağlıdır. Bu denklem gaz ve sıvı akışkanlar için aynıdır[1],[2].

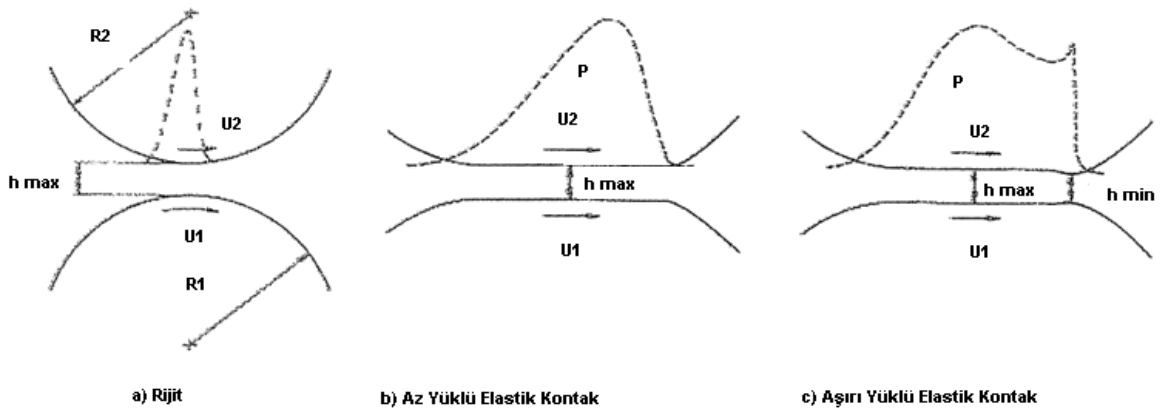
2.2. EHD Yağlama Teorisi

Bu bölümde EHD yağlama teorisinin temelleri üzerinde durulacaktır.

2.2.1. EHD Yağlamanın Teorik Temelleri

EHD yağlama; yüzeylerin elastik deformasyonu ve oluşan basıncın yağlayıcı dinamik viskozitesi üzerindeki etkisinin önemli olduğu aşırı yüklü, birbirleriyle eş çalışan yağlanmış iki makine elemanının çok ince bir yağ filmi ile birbirinden ayrılması olayıdır. EHD yağlama teorisinin iki temel unsuru vardır. Bunlar elastik deformasyon ve viskoz etkiler nedeniyle yağlayıcı film şeklinin, temas yüzeylerin elastik deformasyonu tarafından önemli bir derecede etkilenmiş olmasıdır[64].

Eş çalışan yüzey alanları dış büyük veya büyük yarıçap farkına sahip olduğunda kontaktaki büyük kuvvetler küçük temas boyutlarında taşınırlar. Burada kuvvetleri dengeleyen yüksek basınçlar kontak yüzeyinin elastik deformasyonuna neden olduğu gibi aynı zamanda da yağlayıcının viskozite ve diğer özelliklerine de etki eder. Kontak yüzeyleri az bir yük ile yüklendiğinde basınçlar yaklaşık 5 bin bar civarında olmakta ve yüzeylerde hafif bir deformasyon gelmektedir[64].



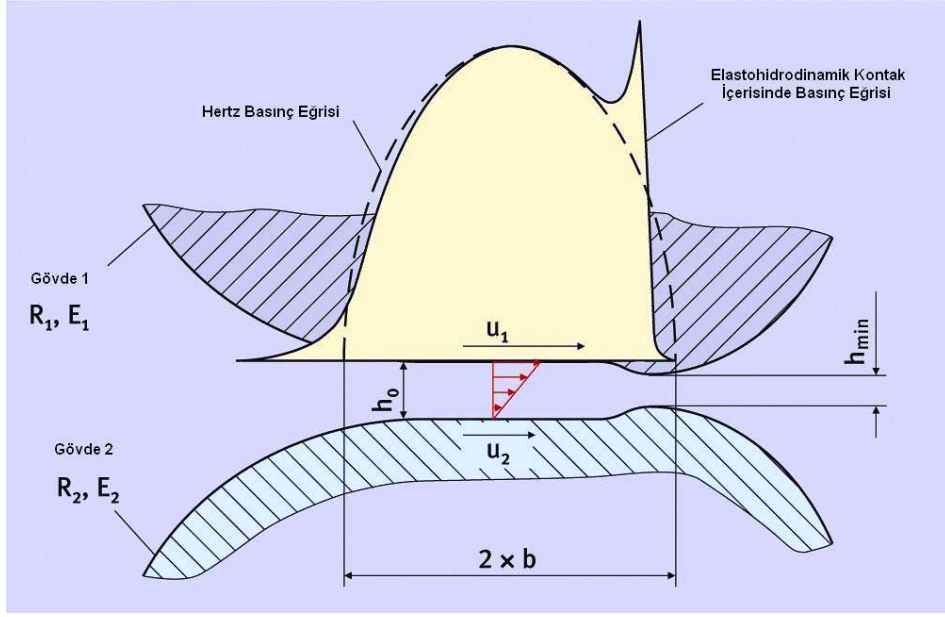
Şekil 27. Rijit, az yüklü ve aşırı yüklü kontakta basınç dağılımı[64].

Bu yağlama durumu hidrodinamikten EHD bölgeye geçiş olarak adlandırılır. EHD kontakın aşırı yüklenmesi durumunda oluşan basınçlar 40 bin bar ve üzerinde olabilmekte ve yüzey alanları fazla miktarda elastik şekil değiştirebilmektedir. Burada kontakın çıkış bölgesinde yağlama aralığında bir daralma meydana gelir ve ikinci basınç tepesi söz konusu basınç dağılımında yer alır[64],[65].

EHD kontakta yağ filmi oluşumunun tanımlanabilmesi; yağ akışı, kontak yüzeyindeki elastik deformasyon, yağlayıcının ısınması, basınç, sıcaklık, akışkan tabakaları arasındaki kayma hali gibi etkilerin yağlayıcı maddenin fiziksel özellikleri üzerindeki bağıntısının ifade edilmesine bağlıdır[64].

EHD kontakta ortaya çıkan şartlar altında yağlayıcı maddelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, EHD yağlama analizinde en fazla zorluk gösteren problemlerden birisidir. Bu problemin nedeni, yağlayıcı maddelerin viskozite, yoğunluk, ısı iletimi, gibi özelliklerinin basınç ve sıcaklık etkisindeki davranışlarının tam olarak ifade edilememesidir. Bunun için moleküler teorinin göz önüne alınmasıyla hal büyüklükleri (basınç, sıcaklık, yoğunluk) ve taşıyıcı (transport) büyüklükleri (viskozite, ısı iletim kabiliyeti) arasında optimal bir çözüm için bağlar türetilmeye çalışılmaktadır. Bu büyüklüklerin tek tek ölçümü ya da uygun değişim parametrelerinin belirlenmesi halinde aranan büyüklükler arasında türetilen uygun yaklaşım formülleri hesaplamalarda kullanılabilir[64].

EHD yağ filminde, viskozite üzerinde birbirine karşı iki önemli etki söz konusudur. Burada yüksek viskozite; büyük kayma gerilmeleriyle yağ filminde oluşan yüksek basınç nedeniyle yağlayıcının yük taşıma kabiliyetini artırır. Bunun yanında belirli bir yükte yağlayıcı maddenin viskozitesi ne kadar büyük olursa, yağ filminin kalınlığı da o kadar büyük olur. Bunlara karşılık, viskozite ile sürtünme ve bununla yağ filminde ısıya dönüşen sürtünme gücü artar. Sürtünme ısısı sıcaklık artışına ve viskozitenin azalmasına neden olur. Bu nedenle sürtünme yağ filmi kalınlığına da etki eder[64].

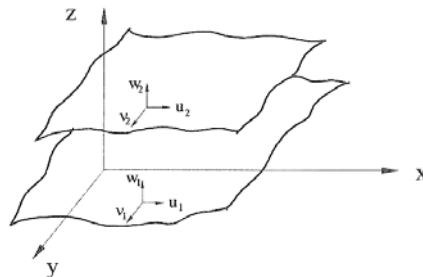


Şekil 28. Hertz ve EHD basınçları dağılımı ve yağ filmi[4].

Kontak bölgesinde yük taşıyıcı film ve giriş bölgesindeki film kalınlıkları, viskozitenin düşük basınçlardaki değerlerinde dahi önemli olmakta ve sürtünmenin hesabı için tüm yağ filmindeki viskozitenin bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle söz konusu sıcaklık ve basınç bölgesi içinde viskozite değerinin mümkün mertebe ortaya çıkması önem kazanmaktadır[64].

2.2.2. EHD Yağlama Teorisinin Genel Denklemi

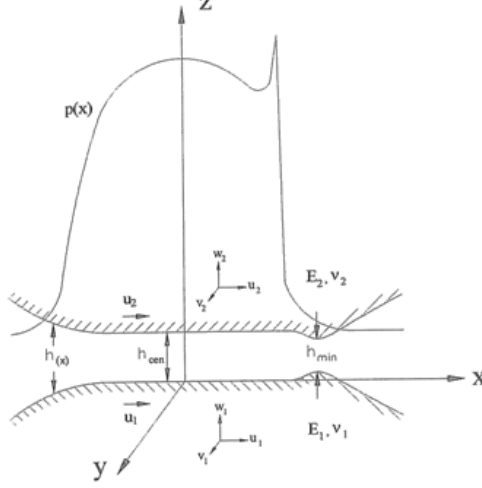
Reynolds diferansiyel denklemi Şekil 29 da görülen iki paralel, hareketli yüzey göz önüne alınarak Navier Stokes ve süreklilik denklemleri vasıtasıyla elde edilebilir[64], [66], [67], [68], [69], [70].



Şekil 29. Paralel, hareketli iki yüzey[64].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho(u_1 + u_2)h}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho(v_1 + v_2)h}{2} \right) + \rho \left(w_2 - w_1 + u_1 \frac{\partial z_1}{\partial x} - u_2 \frac{\partial z_2}{\partial x} + v_1 \frac{\partial z_1}{\partial x} - v_2 \frac{\partial z_2}{\partial x} + \frac{h \partial p}{\partial t} \right) \quad (10)$$

Bir EHD için Şekil 29 ve 30 göz önünde bulundurularak çeşitli kabuller yapılabilir.



Şekil 30. Kontak Geometrisi[64].

EHD kontakta hareket yönünde yani x eksen yönünde ortaya çıkan yağ filminin uzunluğu, enine yöndeki yani y eksen yönündeki film genişliğine kıyasla çok küçüktür. Bu yüzden dolayı yan akış yani y eksen yönündeki akış ihmal edilebilir. Ayrıca akışkan sıkıştırılmaz olarak göz önüne alınabilir ve birbiri üzerinden kayan yüzeylerin enine yönde yani y eksen yönünde herhangi bir hareketi söz konusu değildir. Hareket sadece x eksen yönündedir. Bu durumda (10) denklemi sadeleşerek (11) denkleminde verilen hale dönüşür[64], [66], [67].

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{\rho(u_1 + u_2)h}{2} \right) + \rho \left(w_2 - w_1 + u_1 \frac{\partial z_1}{\partial x} - u_2 \frac{\partial z_2}{\partial x} \right) \quad (11)$$

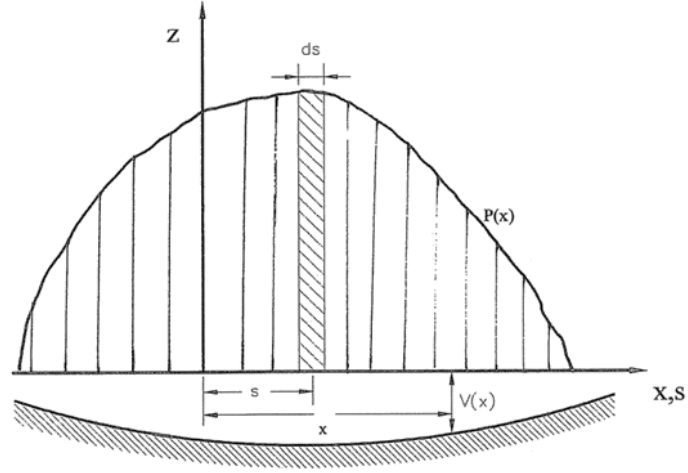
Bu denklem yüzey geometrisi, film kalınlığı, viskozite, ve yoğunluk gibi parametrelerin bilinmesi durumunda kontak içerisindeki EHD basınç dağılımını verir[64].

2.2.3. Kontak Yüzeylerin Elastik Deformasyonu

Bir yükten dolayı bir yüzeye etkiyen basınç o yüzeyde bir elastik deformasyon oluşturur. Bu elastik deformasyonun oluşumu o yüzey çiftinin elastisite modülüne bağlıdır. Buna göre hertz basıncına maruz kalan EHD kontaktaki elastik deformasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir[64], [66], [67].

$$V(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi.E'} \int_{x_1}^{x_2} p(s). \ln|x-s|. ds \quad (12)$$

Burada; V: deformasyon, E' ise eşdeğer elastisite modülüdür. Eşdeğer elastisite modülü aşağıdaki gibi tanımlanabilir[64], [66].



Şekil 31. EHD kontakta hertz basıncı dağılımı[64].

$$E' = \frac{2.E_1.E_2}{E_1.(1-\nu_2^2) + E_2.(1-\nu_1^2)} \quad (13)$$

Burada E_1 ve E_2 ve ν_1 ve ν_2 sırasıyla birinci ve ikinci yüzeyin elastisite modülleri ve poisson oranlarıdır.

Parabolik bir yaklaşımla iki silindir arasındaki film kalınlığı aşağıdaki bağıntıyla verilebilir[64], [66].

$$h(x) = h_{00} + \frac{x^2}{2R} + V(x) \quad (14)$$

Burada h_{00} ; rijit haldeki ilk film kalınlığı, R ; eşdeğer eğrilik yarıçapı, $V(x)$ ise elastik deformasyon miktarıdır. Eşdeğer eğrilik yarı çapı aşağıda verilen denklemle hesaplanabilir[64], [66], [67].

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (15)$$

Burada R_1 ve R_2 ; sırasıyla birinci ve ikinci yüzeyin eğrilik yarıçaklarıdır. (15) denkleminde, silindirler ile eş çalışan düz yüzeylerde düz yüzeyin eğrilik yarı çapı sonsuz olarak alınabilir.

2.2.4 Viskozite Basınç İlişkisi

Literatürde iki önemli basınç viskozite ilişkisi vardır. Bunlardan birincisi Barus denklemi, ikincisi ise Roelands ilişkisidir[64],[66]. Barus denklemi;

$$\eta(p) = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (16)$$

Burada η_0 çevre basıncındaki viskozite, α ise basınç katsayısıdır. Barus denklemi basit ve analitik denklemlere uygulanması kolay olduğu için literatürde çokça kullanılır. Bununla birlikte bu denklem; yüksek basınçlarda aşırı büyük tahmini viskozite değerleri verdiğini için sadece düşük basınçlarda geçerlidir. Yüksek basınçlarda daha hassas viskozite değeri tahmini yapmak için Roelands tarafından önerilen denklem (17) daha doğru sonuç verir[64], [66], [67].

$$\eta(p) = \eta_\infty \left(\frac{\eta_0}{\eta_\infty} \right)^{(1+p/p_r)^2} \quad (17)$$

Burada; η_∞ bir sabittir ($\eta_\infty = 6.31 \times 10^{-5} Pa.s$), p_r de bir sabittir ($p_r = 196.2 \times 10^6 Pa$), z ise viskozite-basınç ilişkisidir. Roelands denkleminin sıcaklık etkilerini hesaba katan (18) formu da vardır [66].

$$\eta(p, T) = \eta_\infty \left(\frac{\eta_0}{\eta_\infty} \right)^{(1+p/p_r)^z \cdot [(T_0+135)/(T+135)]^{s_0}} \quad (18)$$

Burada T; sıcaklık, T_0 ; boşluk sıcaklığı, s_0 ise viskozite sıcaklık indeksidir[66].

2.2.5. Yoğunluk ve Basınç İlişkisi

Genelde yağlar (daha doğrusu tüm sıvılar) sıkıştırılmaz bilindir. Eğer EHD kontaktaki basınç küçük ve yağlama maddesi mineral yağ ise yoğunluk değişimi ihmal edilebilir fakat bazen EHD yağlama sistemlerinde basınçlar o kadar büyük değerler alabilir ki bu şartlar altında sıvı yağ sıkışır, yoğunluğu önemli oranda değişir. Bunun yanında gaz ile yağlanan yataklarda yağlayıcı maddenin sıkışma oranı önemli bir parametredir. Yoğunluk ve basınç ilişkisini veren Dawson&Higginson eşitliği (19) denkleminde verildiği gibidir[64], [66].

$$\rho(p) = \rho_0 \frac{0.59 \times 10^9 + 1.34p}{0.59 \times 10^9 + p} \quad (19)$$

Burada ρ_0 ; yağlayıcı sıvının atmosfer basıncı altındaki yoğunluğudur[66]. Bilimsel çalışmalarda ilerlemeler nedeniyle daha hassas viskozite-basınç tahminleri yapabilmek için bağıntılar ortaya konmuştur. Söz konusu bağıntılarda yağlayıcı maddenin sıkışma oranı; yüzeylerin elastik deformasyonuna kıyasla çok küçük değerlerde kaldığı için genelde ihmal edilebilir.

2.3. Deney Sisteminin Yapısının İncelenmesi

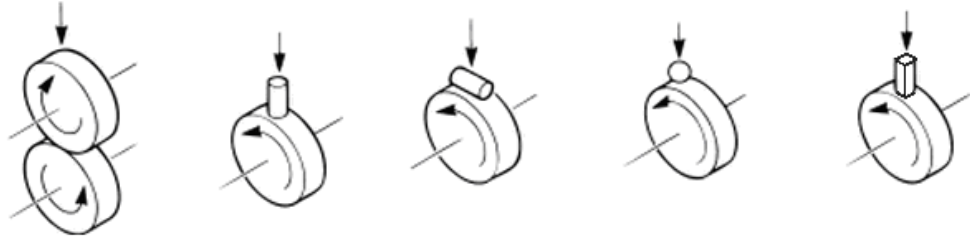
Bu bölümde deneyin yapılacağı sistemlerle ilgili temel bilgiler verilip ölçüm yöntemleri ve ölçüm sonuçlarının nasıl değerlendirileceği açıklanacaktır.

2.3.1. Giriş

Deneylerde farklı kontak yükleri ve farklı devir sayılarında sürtünme kuvvetinin ölçebildiği Plint & Partners marka, blok/disk esaslı deney cihazı kullanılmış olup, söz konusu deneylerin sonucunda belirlenen optimum katkı oranları kullanılarak John Deere marka bir dizel motorunda ayrıca deneyler yapılmıştır.

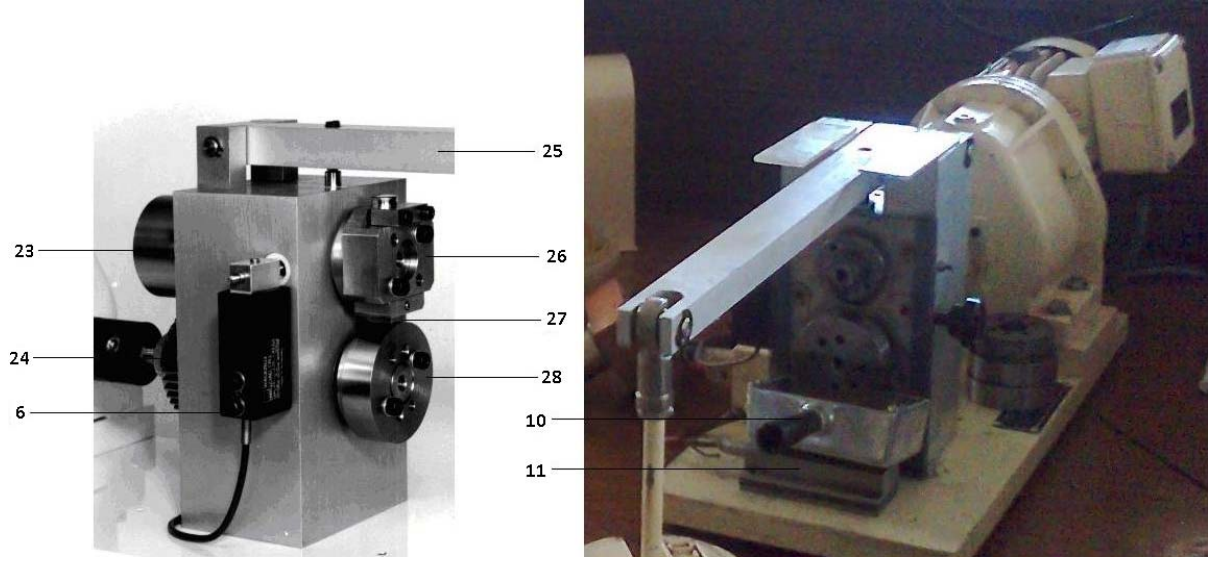
2.3.2. T53 SLIM Multi-Purpose Deney Sisteminin Detayları

Optimum katkı oranlarının belirlendiği T53 SLIM Multi-Purpose; sürtünme kuvvetini ve aşınma miktarını ölçebilen bir deney makinasıdır(Şekil 35(a)). Bu deney makinasıyla birbiri ile eş çalışan blok - disk, iki disk veya başka konfigürasyonlarda çalışma ve ölçüm işlemi yapabilmektedir. Bunun yanında deney makinasının sahip olduğu kontrol ünitesi SLIM 2000 (Şekil 35(b)), seri bağlı ara yüz modülü içermektedir. Sistemin kontrolü ve dataların kaydı bu ünite aracılığı ile yapılmaktadır.



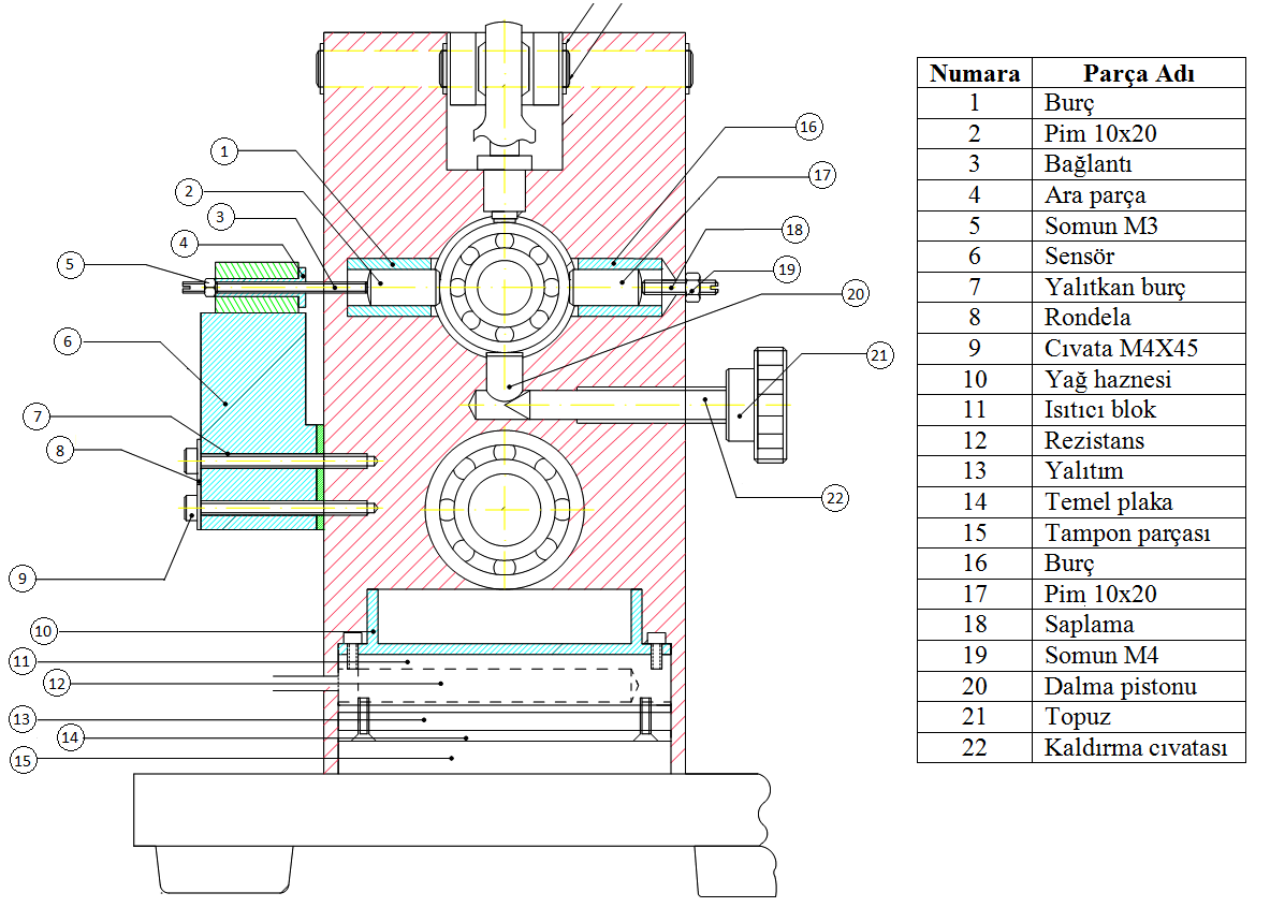
Şekil 32. Farklı yüzey konfigürasyonları

Deney makinasını monofaze, 0,25 KW gücünde bir elektrik motoru çalıştırmaktadır. Elektrik motoru miline bağlı olan bir kaplin vasıtası ile paralel millere hareket iletilmektedir. Bu paralel miller (23-24) (Şekil 33); rulmanlı yataklar ile yataklanmış olup, alt milin ucuna disk bağlanır. Üstteki mile ise yapılacak çalışmaya göre kontak bloğu yada disk (28) (Şekil 33) bağlanabilir. Kontak bloğu üzerindeki yük bir levyeye asılan ağırlıklar aracılığı ile belirlenir. Çalışma esnasında kontak bloğu ve disk arasında meydana gelen sürtünme kuvveti, bir kuvvet sensörü (6) (Şekil 33, Şekil 34) tarafından algılanıp kayıt sistemine iletilir.



Şekil 33. Kontak bloğu, disk ve ısıtıcı gurubunun yakın görünümü

Paralel miller; gövde içine(23-24) (Şekil 33) rulmanlarla yataklanmıştır. Kontak numunesi (27) ise adaptöre (26) bağlanmıştır (Şekil 33). Disk (28) (Şekil 33) hareketli olup kontak numunesi sabittir. Levye ucuna asılan ağırlıklar vasıtası ile kontak numunesi üzerinde sırasıyla; 142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 yükler ve bu yüklerle bağlı olarak kontak bölgesinde sırasıyla; 0.88 MPa, 1.5 MPa, 2.12 MPa, 2.74 MPa, 3.36 MPa basınçlar elde edilmiştir. Teğetsel doğrultuda meydana gelen sürtünme kuvvetini algılayan sensör (6) (Şekil 33, Şekil 34), kablo aracılığı ile kontrol ünitesine bağlıdır. Sistem farklı devir sayılarında çalıştırılabilmektedir. Hız kontrol işlemi (30-900 d/dk) de kontrol ünitesi aracılığı ile yapılmaktadır.



Şekil 34. Deney makinasının kesiti

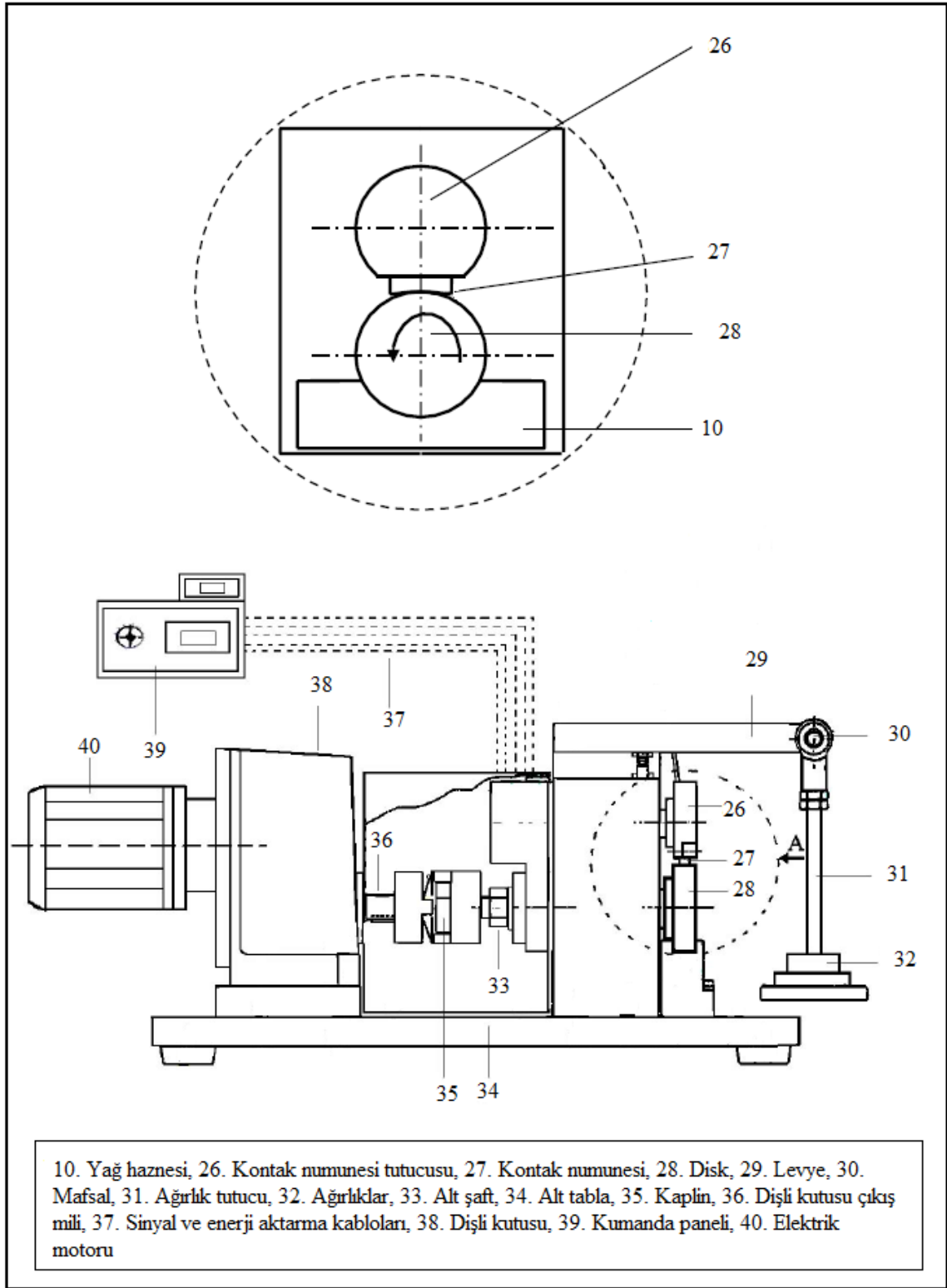


(a)

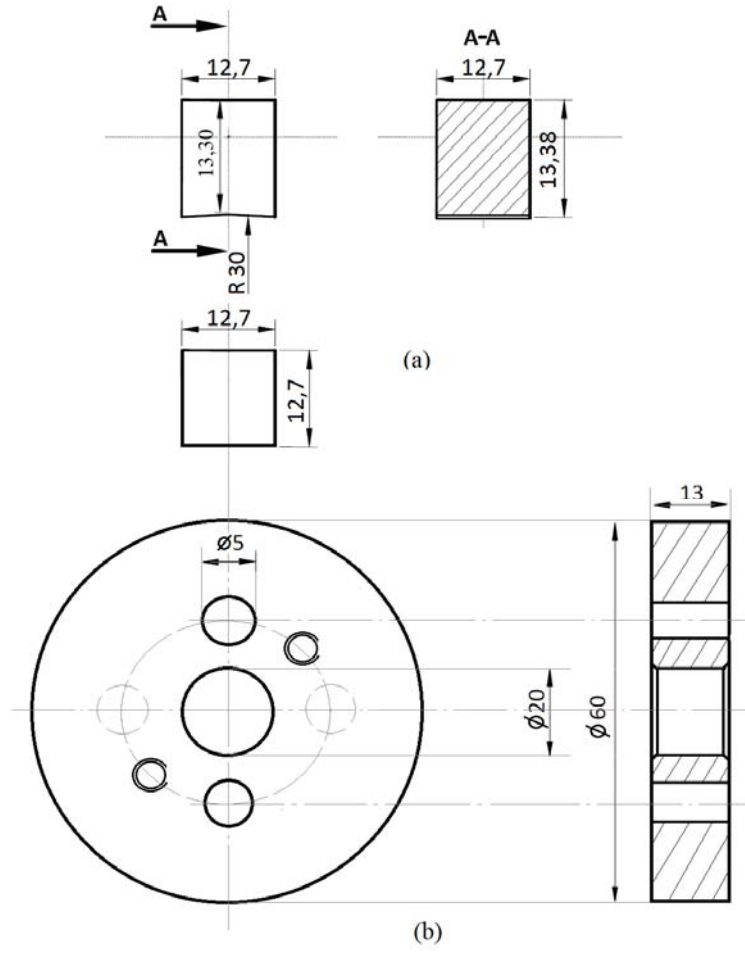


(b)

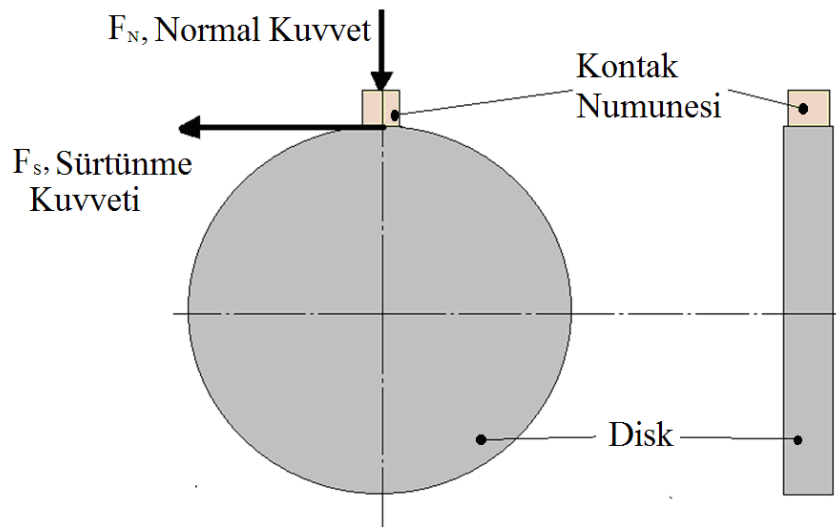
Şekil 35. Deney makinası (a), kontrol ünitesi (b)



Şekil 36. Deney makinasının şematik görünüşü



Şekil 37. Kontakt numunesi (a) ve disk (b)



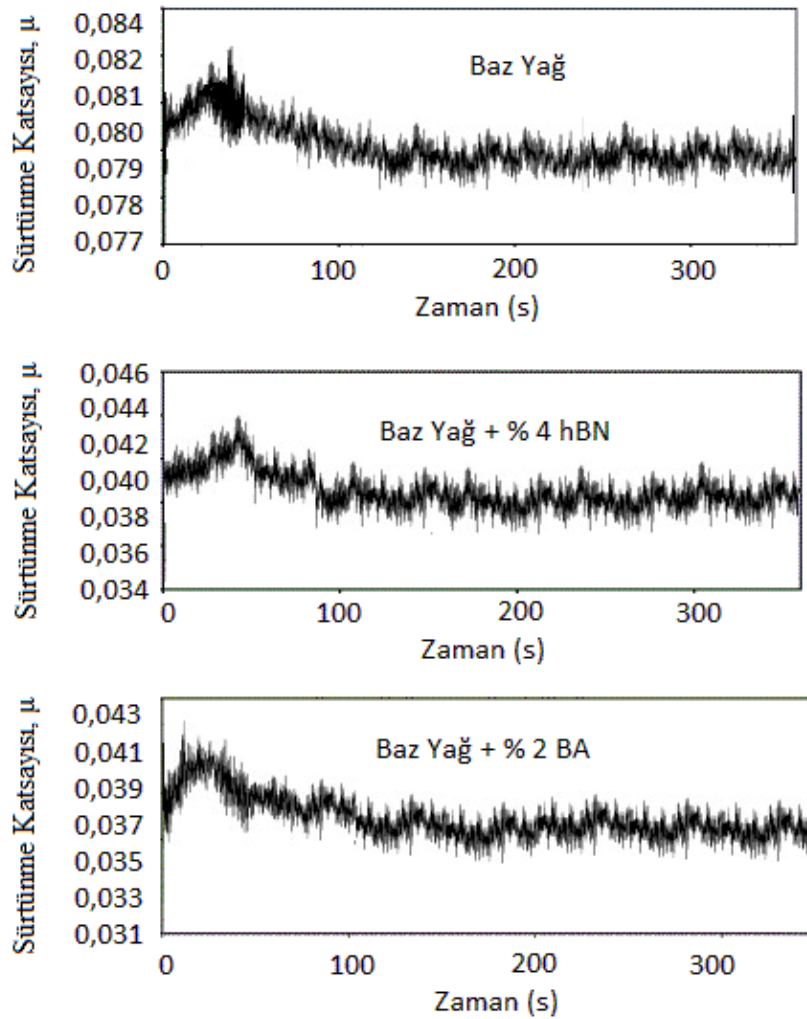
Şekil 38. Sürtünme kuvvetinin ölçümü

Kontak numunesine ait imalat resmi, Şekil 37'den de görüldüğü gibi, yüksekliği 13,38 mm, genişliği ve kalınlığı 12,7 mm ve temas bölgesindeki yarı çapı, eş çalışan diskin yarıçapı ile aynı olup, değeri 30 mm dir. Diskin çapı 60 mm ve kalınlığı 13' mm dir. Hem kontak numunesinin hem de diskin deneylerden önce ve deneylerden sonra yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, ayrıca taramalı elektron mikroskobunda kontak numunesinin yüzeyinin, deney öncesi ve deney sonrası görünüşleri alınmıştır. Deney sisteminde kullanılan disk ve kontak numunesi, malzeme çifti olarak her ikisi de rulman çeliği (52100) tercih edilmiş olup, kontak numunesinin yüzey sertliği 20 HRC, diskin yüzey sertliği ise 60 HRC olarak imal edilmiştir. Sertlik ölçümleri; Bulut Makina marka, uç açısı 120° olan, elmas konik uçlu, dijital rockwell sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Parçaların imalatında kullanılan rulman çeliği alaşımli bir çeliktir ve bünyesinde yaklaşık; %1 karbon, %1.48 krom, %0.3 mangan, %0,007 fosfor, %0.3 silisyum , %0.007 kükürt mevcuttur.

Deneyler hem baz yağ hem de katkılı yağlar için; faklı yüklerde, farklı devir sayılarında, farklı katkı maddesi oranlarında ve farklı sıcaklıklarda yapılmıştır. Hem baz yağ hem de katkılı yağlar ile çalışılırken ölçüm süresi 12 dakika olarak göz önüne alınıp, sürtünme kuvveti değerleri kontrol cihazındaki göstergeden okunarak kayıt altına alınmıştır. Baz yağ ve katkılı yağlar için, çalışma başlangıcının ilk 5 saniyesinde ölçülen sürtünme katsayısının biraz arttığı, tekrar düşme eğilimi gösterdikten sonra kararlı hale geldiği gözlenmiştir. Bu durum sürtünme katsayısı-zaman kayıtlarının alındığı grafiklerde görülmektedir, (Şekil 39). Sürtünme katsayısı değerleri kontrol cihazının göstergesinden okunan sürtünme kuvveti değerlerinin normal kuvvete oranından elde edilmiştir. Sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi, kontrol sistemi aracılığıyla Rikadenki marka 8-381SS model elektronik kayıt ve çizim özellikleri olan bir plotter' a aktarılarak deneyler esnasında eşzamanlı olarak çizilmiştir.

Deney sırasında disk yüzeyine uygulanan düşey doğrultudaki kontak yükleri sırasıyla; 142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 N olarak seçilmiştir. Bu farklı yükler altında deneyler 300 d/dk, 600 d/dk, 900 d/dk farklı devir sayılarında ayrı ayrı yapılmıştır. Test edilecek yağ, dönen diskin (28) alt kısmındaki yağ haznesine (10) doldurularak dönen diskin yağ içerisine bir miktar daldırılması sağlanmıştır. Böylece kontak bölgesine yağın sürekli olarak taşınması dönen disk yardımıyla sağlanarak (Şekil 33), ölçümler yapılmış ve katkılı yağların sürtünme davranışları incelenmiştir. Bu değişik yükler ve devir sayılarında sırasıyla; baz yağ, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağ, %4 hegzagonal bor

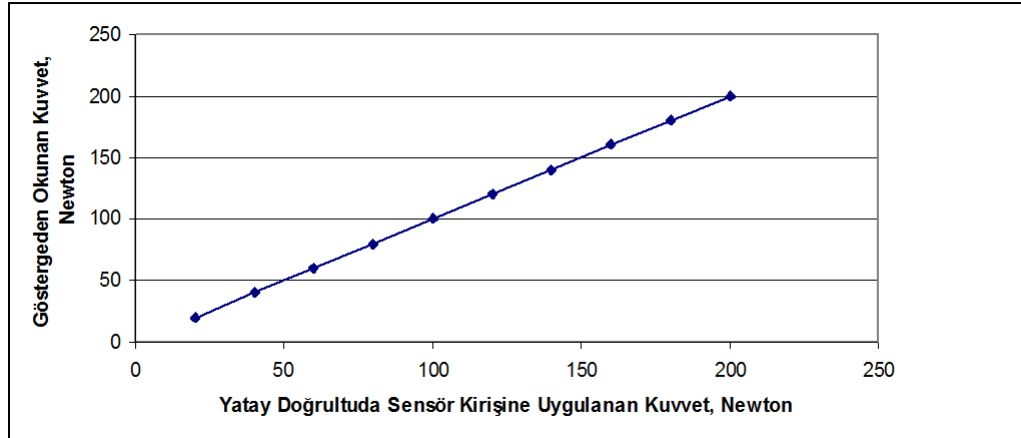
nitrür katkıli yağ, %6 hegzagonal bor nitrür katkıli yağ, %2 borik asit katkıli yağ, %4 borik asit katkıli yağ, %6 borik asit katkıli yağ testlere tabi tutulmuştur. Daha sonra, 600 d/dk sabit devir sayısında; baz yağın, %4 hegzagonal bor nitrür katkıli yağın ve %4 borik asit katkıli yağın, sırasıyla 20°C, 40°C ve 60°C sıcaklıklarda, sürtünme davranışları incelenmiştir. Nihai noktada, baz yağ ve değişik oranlarda bor bileşiği katkıli yağlar için, farklı yüklerde, farklı devir sayılarında, farklı sıcaklıklarda, farklı katkı oranlarında gerçekleşen sürtünme davranışları, dolayısıyla yağlama performansları net bir biçimde ortaya konulmuş, grafik ve tablolar aracılığıyla bu deneyler sistematik bir şekilde incelenmiş ve birbiriyle karşılaştırılıp ortaya çıkan sonuçların analizleri yapılmıştır.



Şekil 39. Sürtünme kuvvetinin baz yağ ve katkıli yağa göre zamanla değişimi

142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 N olarak kontak yüzeyine uygulanan normal kuvvet, levye ucuna yerleştirilen farklı kütlelerdeki bloklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temas yüzeylerinde meydana gelen sürtünme kuvveti ise ölçüm kontrol ünitesinin göstergesinden (Şekil 35b) okunmuştur. Daha sonra sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı ile sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Sürtünme kuvveti ölçümünün kalibrasyonu T53 SLIM Multi-Purpose[77] kataloğundaki bilgiler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Kuvvet ölçüm sensörü (6) (Şekil 33, Şekil 34) üzerindeki strain gauge'den mV cinsinde elde edilen sinyaller, kontrol ünitesinin kendi içerisindeki data çözümüleme kartında Newton cinsine dönüştürülerek, ekrandan okunabilmektedir. Buna göre sıfırlama işlemi için; ağırlıkları taşıyan levyenin (29) (Şekil 36) kaldırılması ve sürtünme kuvvetinin ekranda sıfır olarak okunması gerekmektedir. Bu işlem yapıldıktan sonra kontak numunesinin bağlı olduğu üst aparatı taşıyan mile yatay doğrultuda 142 N luk bir kuvvet uygulayacak şekilde bir makara-ip vasıtası ile mevcut bir kütleyi asıp Newton cinsinden ekranda 142 N değeri okundu. Benzer şekilde yatay doğrultuda 20N ile 200 N aralığında kuvvetler uygulanarak, her uygulanan kuvvetin değeri ve göstergeden okunan kuvvet değerleri ile kalibrasyon eğrisi çizildi. Yapılan hata analizinde hata oranı $\% \pm 0,5$ olarak belirlenmiştir.



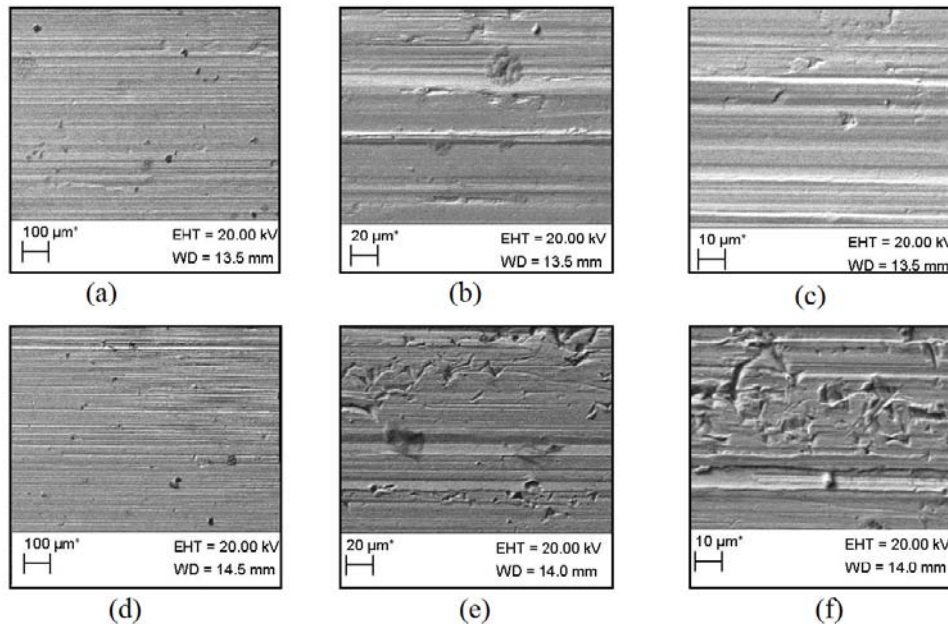
Şekil 40. Kalibrasyon eğrisi

Yapılan deneylerde kullanılan kontak numunesi ve diskin deney öncesi ve deney sonrası yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde; eş çalışan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinde çalışma süresince $0,195 \mu m$ civarında bir azalma olduğu tespit edilmiştir, Tablo 1.

Tablo 1. Deney öncesi ve deney sonrası yüzey pürüzlüğünün değişimi

Deney öncesi (disk)		Deney sonrası (disk)		Deney öncesi (kontak numunesi)		Deney sonrası (kontak numunesi)	
Ra ₁₁	Rz ₁₁	Ra ₁₂	Rz ₁₂	Ra ₂₁	Rz ₂₁	Ra ₂₂	Rz ₂₂
(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
0,400	4,251	0,640	5,260	0,728	4,836	0,533	5,390

Söz konusu yüzeylerin pürüzlülük değerlerindeki azalmanın sadece yüzeylerin ilk çalışmaya başladığı rodaj döneminde (alışma safhasında) olduğu ve bu aşamadan sonra hemen hemen sabit kaldığı ($0,010 \mu m$), aralıklı olarak yapılan ölçümlerle görülmüştür. Bu sebeple rodaj döneminden sonraki yüzey pürüzlülüklerindeki bu değişimler ($0,010 \mu m$) çok az olduğundan, yapılan deneyler süresince yüzey pürüzlülüğündeki değişimin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerde rodaj süresinin 60 sn olduğu tespit edilmiştir. Kontak numunesinin deney öncesi ve deney sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde meydana gelen aşınmaların kısmen adhezif kısmen de abrazif aşınma olduğu Şekil 41' de görülmektedir.



Şekil 41. Taramalı elektron mikroskopunda kontak numunesinin yüzeyinin görünüşü, deney öncesi (a,b,c) ve deney sonrası (d,e,f)

Aşınma testlerinde, numunelerin ağırlıklarının ölçümü amacıyla; Shimadzu-Japan/Libror AEG-120 marka, 0,1 mg hassasiyetinde ve 120.0000 gram'a kadar ölçüm yapabilen bir elektronik hassas laboratuvar terazi kullanılmıştır. Aşınma deneyleri esnasında baz yağ ve optimum oranlarda katkı içeren katkılı yağlar için aşınma test süreleri 7'şer saat olarak göz önüne alındı. Bu nedenle, baz yağ ve katkılı yağlar ile yapılan deneylerde, aşınma oranlarını hesaplayabilmek için kayma mesafeleri; 47,376 km olarak hesaplara katıldı.

2.3.3. John Deere Diesel Motorunda Yapılan Deneylerin Detayları

Aksa Jeneratör Firmasından satın alınmış ve Çaykur 100. Yıl Çay Paketleme Fabrikası Müdürlüğü bünyesinde, elektrik kesintilerinde aydınlatma tesisatını beslemek amacı ile trafo dairesine yerleştirilmiş AJD 170 model jeneratörün tahrik edilmesinde kullanılan John Deere marka diesel motorunda; motor yağına belirli katkı oranlarında bor bileşikleri katılarak bu katkıların motor yağına kıyasla yakıt tüketimine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 42. John Deere diesel motorlu Aksa AJD 170 jeneratör

Tablo 2. Diesel jeneratörün teknik özellikleri

● Çıkış Gücü, 3-Fazlı, 50Hz, GF 0,8

Voltaj	Standby Güç (ESP)		Prime Güç (PRP)		
	kVA	kW	kVA	kW	Amp
400/230	170,00	136,00	155,00	124,00	223,00

● DİZEL MOTOR ÖZELLİKLERİ

Üretici	John Deere				
Model	6068 H				
Silindir ve Tasarım	6 Silindirli, Sıralı Tip				
Hava Emme	Turbo Şarjlı ve Ara Soğutuculu				
Maksimum Standby Güç	1500 d/dk 149 kW[205HP]				
Toplam Silindir Hacmi	L	6,80			
Çap ve Stroke	mm	106 X127			
Sıkıştırma Oranı	17:1				
Norminal Devir	d/dk	1500			
Governör Tipi	Mekanik				
Yağ Kapasitesi	L	19,00			
Su Kapasitesi	L	34,50			
Emilen Hava Debisi	m ³ /dk.	11,20			
Egzoz Gaz Debisi	m ³ /dk.	23,10			
Egzoz Gaz Sıcaklığı	* C	575			
Elektrik Sistemi	12 V d.c.				
Yakıt Tüketimi	Yük	%100	%75	%50	
	L/sa	46,76	40,45	33,50	

● ALTERNATÖR ÖZELLİKLERİ

Üretici	Mecc Alte	
Modeli	ECO 38-1SN	
Frekans	Hz	50
Güç	kVA	180
Tasarım	Fırçasız, 4 kutuplu	
Cos fi	0,80	
Faz Sayısı	3	
Voltaj	V	400/230
Akım	A	259
Yalıtım Sınıfı	H	
Isı Yükselmesi	H	
Stator	2 / 3 adım	
Rotor	Tek Yataklı Esnek Diskli	
İkaz Sistemi	Elektronik (AVR)	

● BOYUT ve AĞIRLIK

Açık Grup	Kuru Ağırlık kg.	Boy mm.	En mm.	Yükseklik mm.	Yakıt Depo Kapasitesi L
AJD 170	1535	2400	1150	1550	380
Kabinli Grup	Kuru Ağırlık kg.	Boy mm.	En mm.	Yükseklik mm.	Yakıt Depo Kapasitesi L
AK 50	1900	3400	1210	1850	380

Jeneratör ISO 8528 yönetmelik şartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiş olup, ISO 9001 sertifika özelliklerine sahiptir.

Standby güç konumu; güvenilir şebeke kaynağının kesilmesi durumunda, değişken elektriksel yüke güç temin etmede kullanılır. Bu durumda aşırı yüklemeye izin verilmez. Prime gün konumunda ise; değişken elektriksel yüke güç temin etmede yıllık sınırsız çalışma saati için kullanılır. 12 saat çalışma periyodunda 1 saat %10 aşırı yükleme için kullanılır.

Diesel motor su soğutmalı, radyatör ve mekanik fana sahiptir. Motor üzerinde fan ve sıcak parçalara dokunmayı önleyen koruyucu kafes, elektrikli marş motoru ve şarj alternatörü, akü, akü kabloları, motor ceket suyu ısıtıcısı, çelik şase ve titreşim önleyici takozlar, şaseye entegre yakıt tankı, esnek yakıt bağlantı hortumları, tek yataklı ve H yalıtım sınıflı alternatör, endüstriyel susturucu ve esnek çelik kompensatör, elektronik akü şarj cihazı, elektronik hız kontrol ünitesi, yakıt su ayırıcı filtre, düşük su seviyesi alarmı, eksoz susturucusu mevcuttur.

Jeneratör, DSE 720 kontrol ünitesi ile kontrol edilmektedir. Diesel motorun çalıştırılması ve durdurulması bu ünite üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu modül jeneratörün çalışma frekansı, voltajı, akımı, motor yağ basıncı, soğutma suyu çıkış sıcaklığı, çalışma saati ve akü voltajı gibi parametreleri izleyerek LCD ekranda göstermektedir.

T53 SLIM Multi-Purpose deney makinasında yapılan deneylerden elde edilen optimum oranlarındaki bor bileşikli katkıları, jeneratörün diesel motorunun yağlama yağına katılmak sureti ile motor yağına kıyasla yakıt tüketimindeki değişme incelenmiştir. Buna göre jeneratör hem baz yağda hem de hegzagonal bor nitrür ve borik asit katkılarının optimum oranlarının katıldığı katkılı yağlarda, 500 d/dk, 1000 d/dk, 1500 d/dk, 2000 d/dk, 2500 d/dk, 3000 d/dk farklı devir sayılarında %7 yükte (boşta çalışma yükü) çalıştırılarak yakıt tüketimi izlenmiştir. Motor devri elektronik kontrol ünitesinin ekranından takip edilmiştir. Yakıt tüketiminin takip edilmesi ise ölçekli bir kapla yakıt tankına yakıt konularak gerçekleştirilmiştir. Hem baz yağ hem de katkılı yağlar için her motor devrinde birer saat çalışılarak tüketilen yakıt miktarları belirlenmiş ve bu veriler grafiğe dökülmüştür.

2.3.4. DeneYlerde Kullanılan Baz Yağın Özellikleri

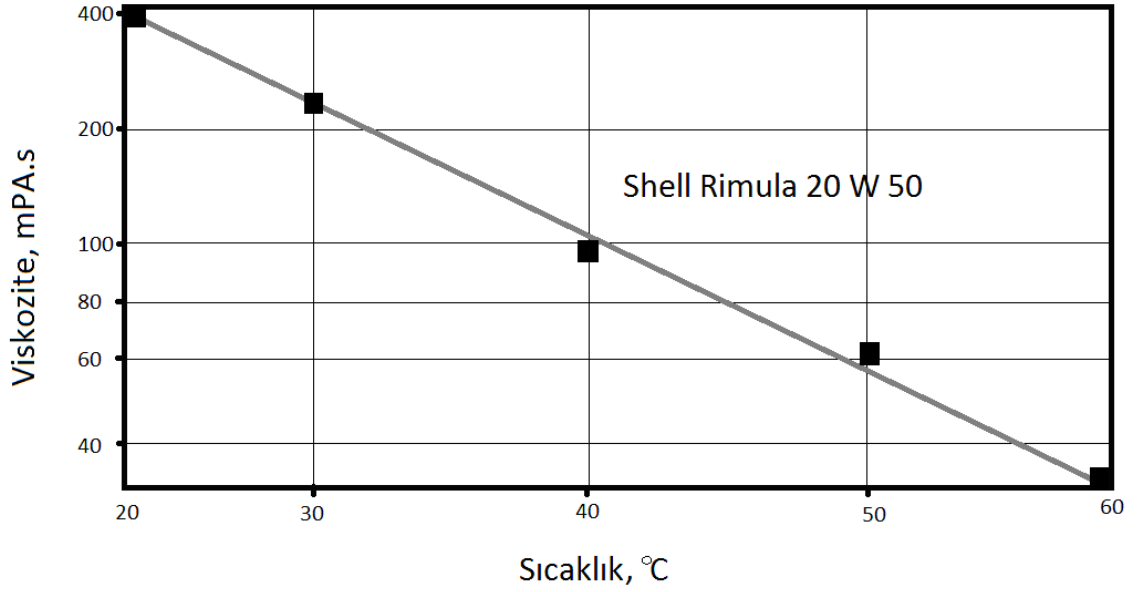
Yapılan tüm deneYlerde ağır hizmet şartları için geliştirilmiş bir dizel motor yağı olan Shell Rimula 20W-50; baz yağ olarak kullanılmıştır. Bu yağın teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3. DeneYlerde kullanılan baz yağa ait teknik özellikler

SAE Viskozite Sınıfı		20W-50
Kinematik Viskozite @ 40 °C cSt. 100 °C cSt.	ASTM D 445	68 8.8
Dinamik Viskozite @ -25 °C mPa s -15 °C mPa s	ASTM D 5293	- 8.910
Viskozite İndeksi	ASTM D 2270	102
Yoğunluk @ 15°C kg/l	ASTM D 4052	0.890
Parlama Noktası COC °C	ASTM D 92	236
Akma Noktası °C	ASTM D 97	-21

DeneYlerde kullanılan baz yağa ağırlıkça %2, %4, %6 oranlarında bor bileşikli katkılar katılmıştır. Oranların belirlenmesinde, $\pm 0,01$ gram hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir elektronik tartı aleti kullanılmıştır. Katkı oranları düşük olmakla birlikte bu katkılar baz yağ ile kolloidal bir karışım oluşturmuştur. Nano boyuttaki katkı partiküllerin baz yağın içerisinde asılı kalması suretiyle homojen görünümlü heterojen bir çözelti meydana gelmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da bor bileşikli katkıların viskoziteye olan etkisi ihmal edildiğinden dolayı bu çalışmada da ihmal edilmiştir[20], [30], [37], [38], [39], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48]. Tüm bu referanslar düşük oranlardaki bor katkılarının baz yağın viskozitesini, parlama ve akma noktasını değıştirmediğini kabul etmiştir.

Tüm yağların viskoziteleri sıcaklıkla değişir. Deneylede baz yağ olarak kullanılan dizel motor yağı için; artan sıcaklıkla beraber viskozitesinin azaldığı yapılan viskozite-sıcaklık ölçümlerinde de görülmüştür. Viskozite ölçümleri; Haake Marka, 0,2 ila 75.000 mPa.s aralığında ölçüm yapabilen ve 15 ila 1.200 mPa.s aralığındaki değerleri %0,5 hassasiyetinde ölçebilen bir bilye düşürmeli viskozite ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 43. Deneylede baz yağ olarak kullanılan yağın Viskozite-Sıcaklık ilişkisi

Deneylede kullanılan baz yağ ve katkı yağlarının viskoziteleri sıcaklıkla değişmiştir. Deneylede cihazında, kontrol ünitesinden kumanda edilebilen rezistanslı bir yağ ısıtma sistemi (11) bulunmaktadır, (Şekil 35 a,b). Bu ısıtma sistemi ile beraber, 20° C, 40° C, 60° C sıcaklıklarda, baz ve katkı yağlarla sürtünme deneyleri yapılırken, termometre ile yağların sıcaklığı sürekli kontrol edilmek suretiyle, deneylerin her bir sıcaklık gruplarındaki test sürelerince, yağ sıcaklıklarının sabit kalması bu termostatlı ısıtma sistemi ile (11) (Şekil 33, Şekil 34) sağlanmıştır.

2.4. Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Karşılaştırılması

Karışık sürtünme bölgesindeki sürtünme kuvveti sınır ve viskoz sürtünme kuvvetlerinin metalik kontak oranına göre toplamına eşittir.

$$F_{S,karışık,teorik} = \alpha F_{sınır,teorik} + (1-\alpha)F_{viskoz,teorik} \quad (20)$$

$$\mu_{S,karışık,teorik} = \alpha\mu_{sınır,teorik} + (1-\alpha)\mu_{viskoz,teorik} \quad (21)$$

Burada α ; metalik kontak oranıdır ve yüzey kalitesine göre 1/500 ila 1/1000 arasında değişir[1]. Temas eden yüzey pürüzleri üzerine yapışmış yağ tabakasının kayma kopma mukavemeti; τ_{kf} , çekme kopma mukavemeti; σ_{kf} olmak üzere sınır sürtünme

katsayısı teorik olarak $\mu_{sınır,teorik} = \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}}$ denklemi ile ifade edilebilir. τ_{kf} ve σ_{kf} değerleri;

sıcaklık, kontak basıncı, kontak geometrisi, yağın kimyasal ve fiziksel özellikleri, yüzey pürüzlerinin morfolojisi gibi parametrelere bağlıdır. Bu değerlerin tayini çok zor olduğundan pratik hesaplarda bu denklemin kullanılması neredeyse imkansızdır. Literatürde, yapılmış olan çalışmalar sonucunda malzeme çiftlerine bağlı olarak sınır sürtünme katsayıları tespit edilmiştir[1]. Buna göre çelik-çelik malzeme çifti için sınır

sürtünme katsayısı; $\mu_{sınır,teorik} = \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}}$ değeri yerine (0,08 ÷ 0,1) arasında alınabilmektedir[1].

$\mu_{viskoz,teorik}$ ise; yağın moleküler tabakaları arasındaki teorik sürtünme katsayısıdır ve

$$\mu_{viskoz,teorik} = \eta \frac{du}{dy} \frac{A}{F_N} \text{ denklemi ile hesaplanabilir. } \eta; \text{ viskozite, } \frac{du}{dy} \text{ hız gradyanı, } F_N$$

kontağa etkiyen normal kuvvet ve A' da kontak alanıdır ve bu değer deney sistemi için; 161,29 mm²' dir. Buna göre toplam sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir[1],[2],[73],[74],[75],[76][77].

$$\mu_{S,karışık,teorik} = \alpha \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}} + (1-\alpha)\eta \frac{du}{dy} \frac{A}{F_N} \quad (22)$$

Bu teorik denklem kullanılarak elde edilen sonuçlar, yapılan deneylerle bulunan sürtünme katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Burada, yapılan teorik hesaplamaların bir sayısal örneği aşağıda verilmiştir. Buna göre $20^{\circ}C$ ' de, 142 N kontak yükü altında, 300 d/dk devir sayısı için baz yağ ile yapılan deneye ait teorik sürtünme katsayısı (22) denklemi esas alınarak ;

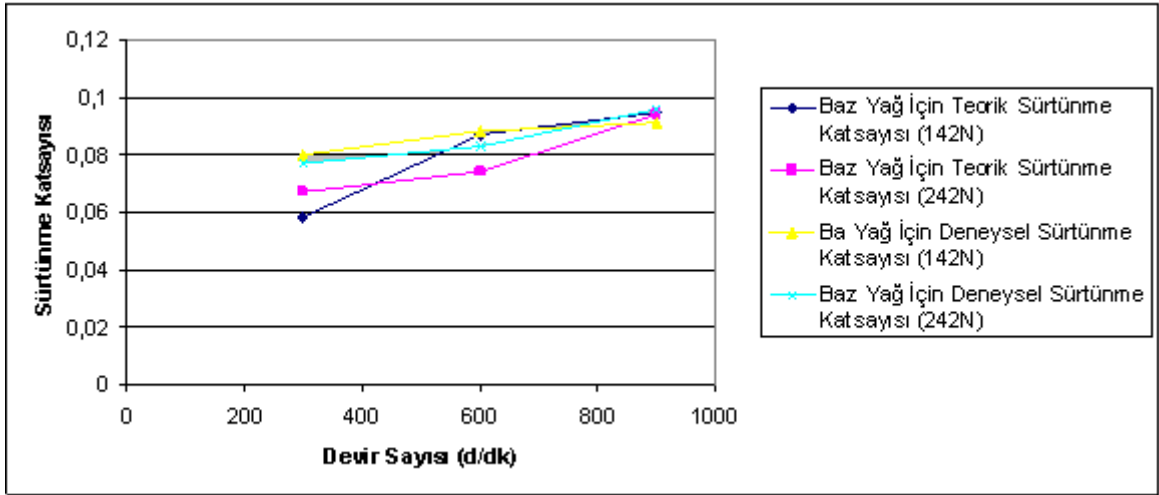
$$\mu_{S,karışık,teorik} = \frac{1}{1000}(0,08) + (1 - \frac{1}{1000})(\frac{400}{10^9} \frac{N.s}{mm^2})(144 \frac{mm}{s})(\frac{1}{0.00112mm}) \frac{(161,29mm^2)}{142N}$$

$\mu_{karışık,teorik} = 0,058$ olarak hesaplanmıştır.

Diğer sürtünme katsayısı değerleri de (22) denklemi kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Teorik ve deneysel sürtünme katsayılarının karşılaştırılması

Devir Sayısı (d/dk)	Baz Yağ İçin Teorik Sürtünme		Baz Yağ İçin Deneysel Sürtünme	
	Katsayısı, $\mu_{teorik} = F_{S,teorik} / F_N$		Katsayısı, $\mu_{deneysel} = F_{S,deneysel} / F_N$	
	($F_N = 142N$)	($F_N = 242N$)	($F_N = 142N$)	($F_N = 242N$)
300	0,058	0,067	0,080	0,077
600	0,087	0,074	0,088	0,083
900	0,095	0,094	0,091	0,096



Şekil 44. Teorik ve deneysel sürtünme katsayılarının karşılaştırılması

Baz yağ için yapılan teorik hesaplarda; deneysel çalışmalarda ki sonuçlara paralel olarak, devir sayısının artması ile sürtünme katsayısının da arttığı görülmüştür. Teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar birbiri ile tutarlı olmasının yanında aradaki farkın nedeni, hesaplamalarda metalik kontak oranı, sınır sürtünmesi ve viskoz sürtünme ile ilgili yapılan ön kabullerden kaynaklanmaktadır[1],[2],[73],[74],[75],[76],[77].

3. BULGULAR

3.1. Giriş

Bu bölümde öncelikle kontak noktasındaki baz yağ ile ilgili olarak; farklı yükler ve farklı devir sayıları altında meydana gelen sürtünme katsayıları incelenecektir. Ardından baz yağa sırasıyla çeşitli oranlarda, nano boyutlarda, toz halindeki hegzagonal bor nitrür ve borik asit maddeleri katılıp, tekrar farklı devir sayısı yük ve sıcaklık şartları altındaki sürtünme davranışları incelenecektir. Son olarak belirlenen optimum katkı oranlarında ki bor bileşikli katkıları baz yağa katılarak bir dizel motorunda denemeye tabi tutulduktan sonra katkılı yağların baz yağa göre yakıt tüketimi üzerindeki etkileri incelenecektir.

3.2. Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi

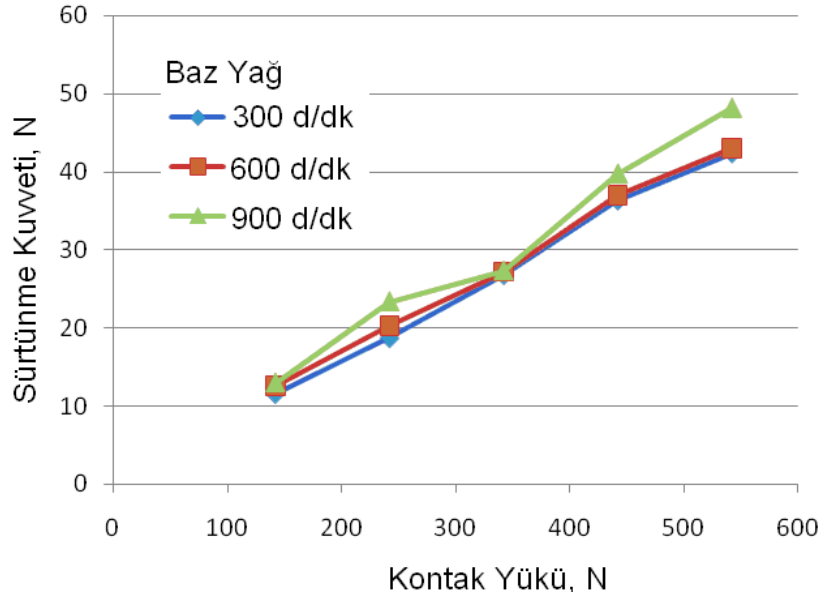
3.2.1. Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Sürtünme Davranışları

Tablo 5. 20⁰ C de değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme kuvvetinin değişimi

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)
142,00	11,50	12,60	13,00
242,00	18,63	20,30	23,40
342,00	26,70	27,20	27,36
442,00	36,24	37,00	39,78
542,00	42,27	43,00	48,23

Tablo 5' te görüldüğü gibi kontak yükleri sırasıyla 142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 N olmak suretiyle 300 d/dk da sisteme sırasıyla uygulanmıştır. Daha sonra aynı yükler kullanılarak deneyler 600 d/dk ve 900 d/dk' da gerçekleştirilmiştir.

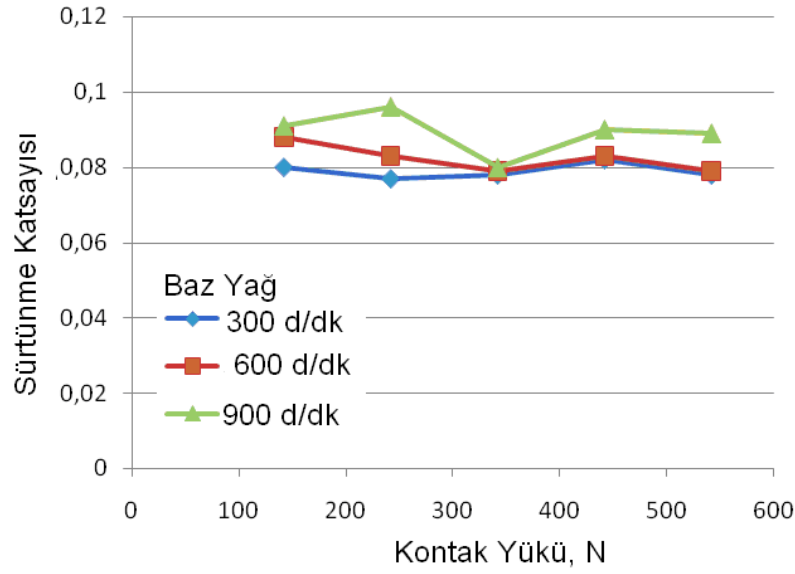
Aynı işlemler değişik oranlardaki katkılı yağlar için de yapılmıştır. Şekil 45' de görüldüğü gibi kontak yükü artınca sürtünme kuvveti de artmaktadır.



Şekil 45. 20⁰C sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme kuvvetinin değişimi

Tablo 6. 20⁰C sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme katsayısının değişimi

Kontak Yükü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,080	0,088	0,091
242,00	0,077	0,083	0,096
342,00	0,078	0,079	0,080
442,00	0,082	0,083	0,090
542,00	0,078	0,079	0,089



Şekil 46. $20^{\circ}C$ sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme katsayısının değişimi

Görüldüğü gibi $20^{\circ}C$ sıcaklıkta baz yağın sürtünme katsayısı; artan yük ile beraber hafifçe düşmüştür. Ancak artan devir sayıları sürtünme katsayısını biraz arttırmıştır.

3.2.2. Sürtünme Kuvvetinin Zaman ile Değişimi

Tablo 7. Deneyle ölçülen sürtünme kuvvetinin zamanla değişimi

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	t= 3. dk 'da Sürtünme Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	t= 6. dk 'da Sürtünme Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	t= 12. dk 'da Sürtünme Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	11,50	11,49	11,50
242,00	18,63	18,63	18,63
342,00	26,70	26,70	26,71
442,00	36,24	36,25	36,24
542,00	42,27	42,27	42,27

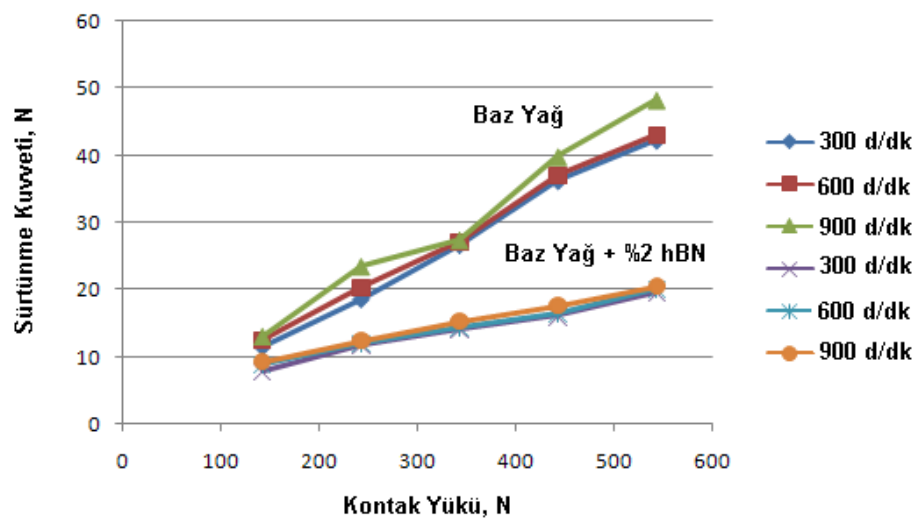
Her ölçüm geriye dönük olarak tekrarlanmış olup Tablo 7’ de görülmektedir. Deneyler esnasında yapılan ölçümlerde, zaman geçtikçe herhangi bir ciddi değişikliğin olmadığı ve ölçüm değerlerinin stabil olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi

3.3.1. Baz Yağa %2 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Saylarındaki Sürtünme Davranışları

Tablo 8. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

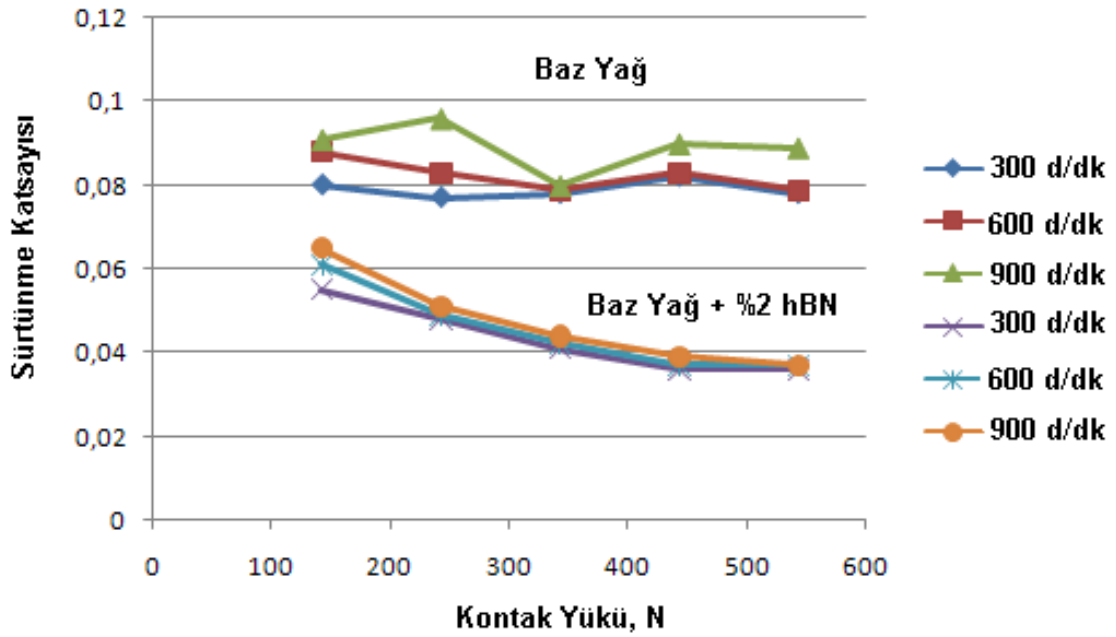
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)
142,00	07,81	08,80	09,30
242,00	11,70	11,85	12,40
342,00	14,03	14,40	15,20
442,00	16,00	16,50	17,50
542,00	19,51	20,10	20,40



Şekil 47. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 9. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,055	0,061	0,065
242,00	0,048	0,049	0,051
342,00	0,041	0,042	0,044
442,00	0,036	0,037	0,039
542,00	0,036	0,037	0,037

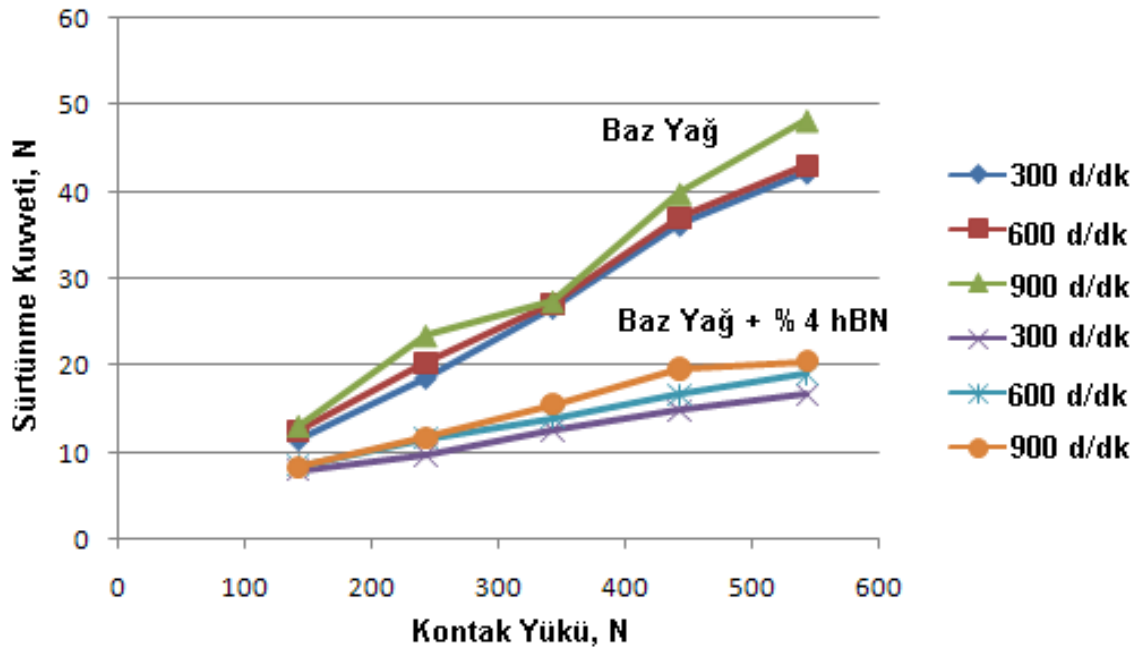


Şekil 48. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.3.2. Baz Yağı %4 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları

Tablo 10. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağı ait sürtünme kuvveti değişimleri

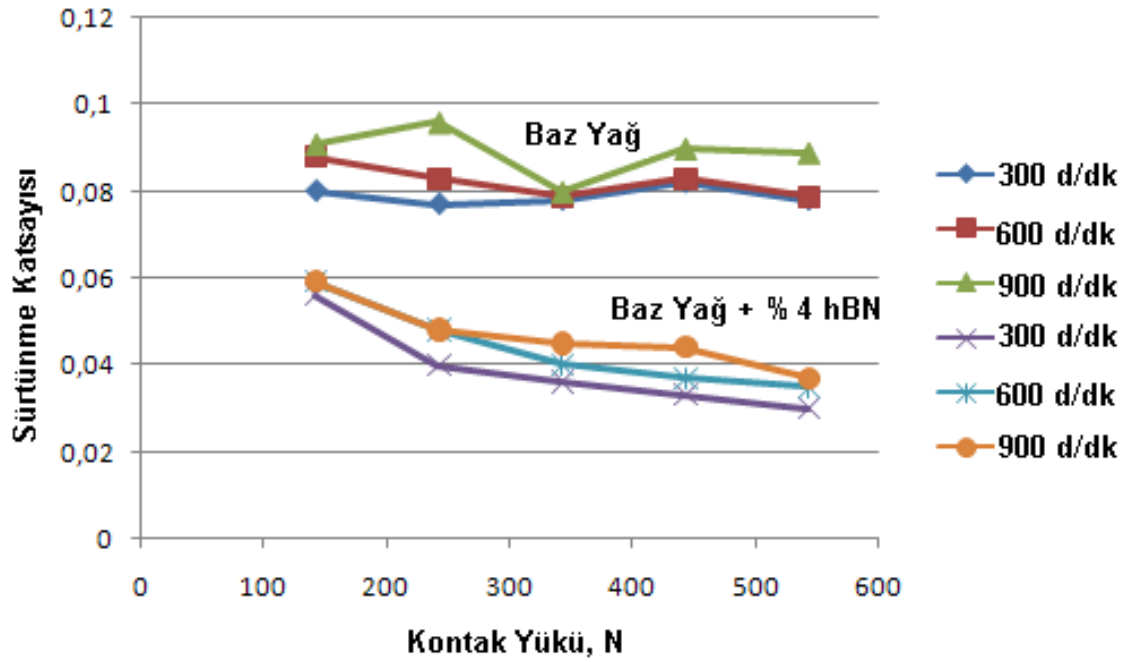
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	08,00	08,50	08,40
242,00	09,70	11,70	11,80
342,00	12,60	14,00	15,60
442,00	14,80	16,70	19,60
542,00	16,70	19,00	20,50



Şekil 49. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağı ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 11. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında , %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,056	0,059	0,059
242,00	0,040	0,048	0,048
342,00	0,036	0,040	0,045
442,00	0,033	0,037	0,044
542,00	0,030	0,035	0,037

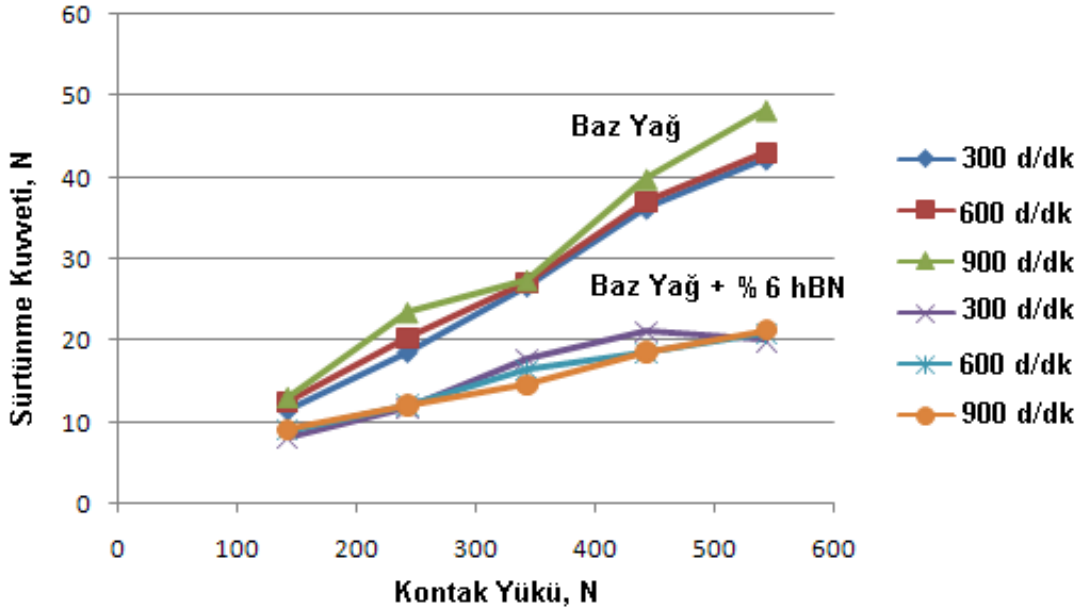


Şekil 50. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.3.3. Baz Yağa %6 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları

Tablo 12. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

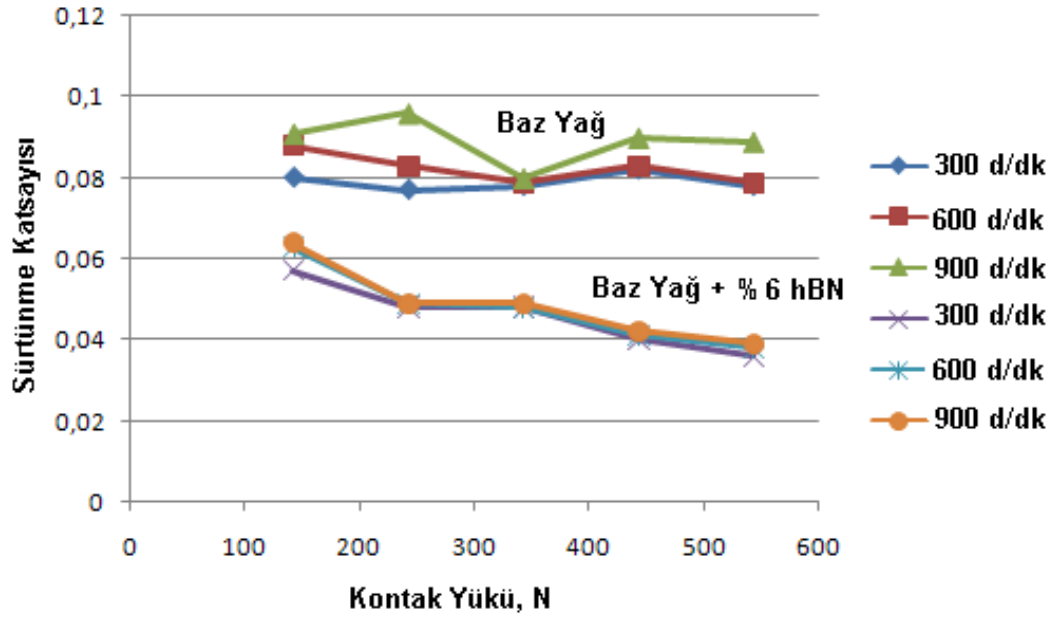
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	08,10	09,00	09,10
242,00	11,80	12,00	12,00
342,00	17,68	16,41	14,50
442,00	21,10	18,40	18,57
542,00	20,00	20,80	21,20



Şekil 51. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 13. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,057	0,063	0,064
242,00	0,048	0,049	0,049
342,00	0,048	0,048	0,049
442,00	0,040	0,041	0,042
542,00	0,036	0,038	0,039



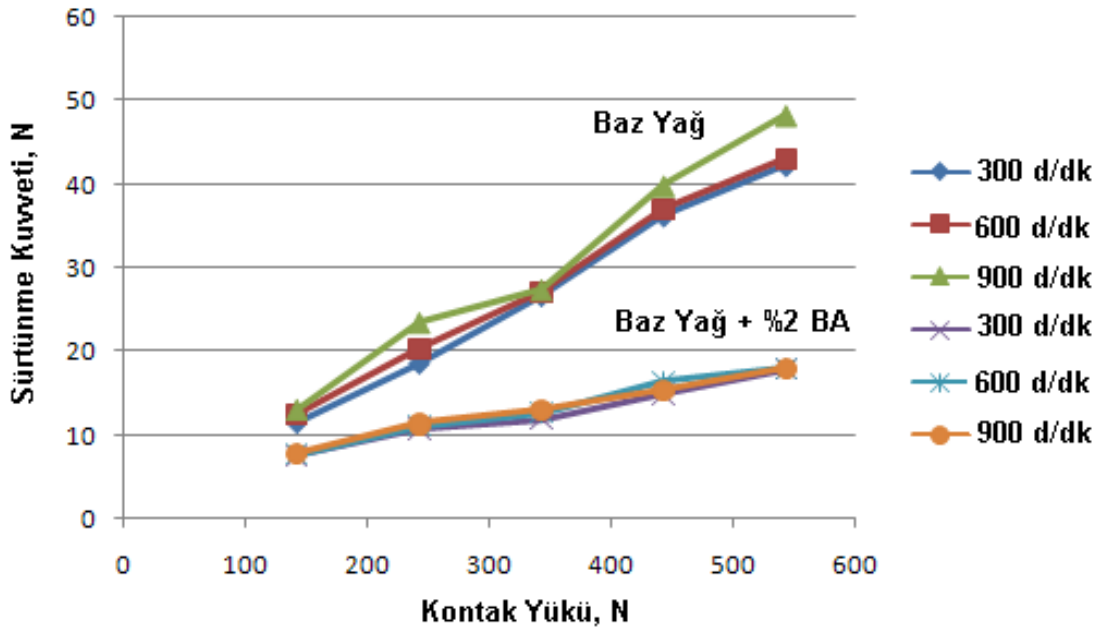
Şekil 52. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 hegzagonal bor nitrür katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.4. Yağ Katkısı Olarak Borik Asitin Sürtünmeye Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

3.4.1. Baz Yağ %2 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları

Tablo 14. 20°C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

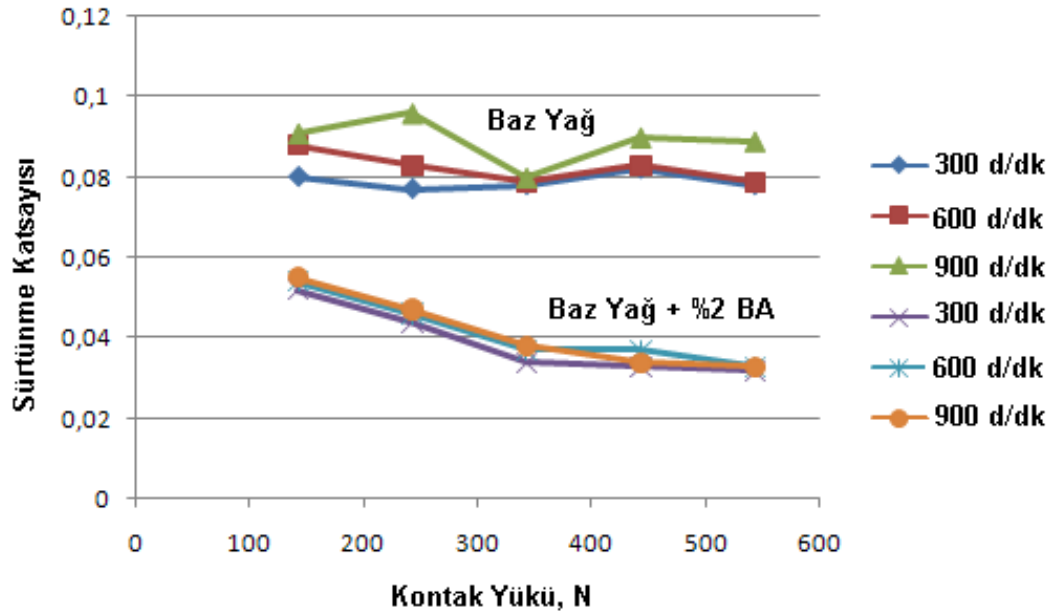
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	07,50	07,68	07,90
242,00	10,70	11,14	11,40
342,00	11,80	12,65	13,00
442,00	14,90	16,40	15,40
542,00	17,80	18,00	18,00



Şekil 53. 20°C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 15. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,052	0,054	0,055
242,00	0,044	0,046	0,047
342,00	0,034	0,037	0,038
442,00	0,033	0,037	0,034
542,00	0,032	0,033	0,033

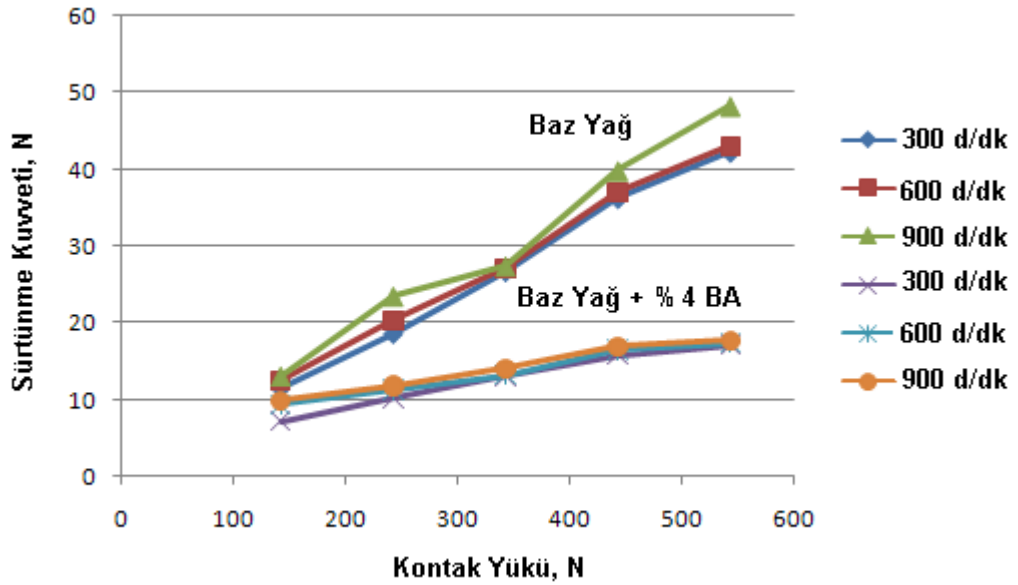


Şekil 54. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %2 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.4.2. Baz Yağı %4 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları

Tablo 16. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağı ait sürtünme kuvveti değişimleri

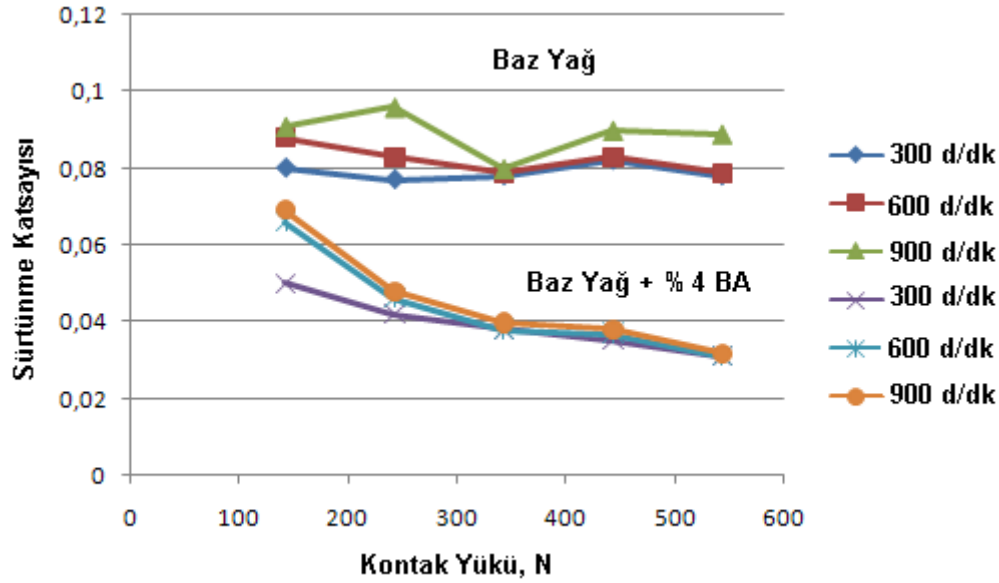
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	07,20	09,40	09,90
242,00	10,20	11,30	11,80
342,00	13,10	13,20	14,00
442,00	15,80	16,50	16,90
542,00	17,10	17,30	17,70



Şekil 55. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağı ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 17. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,050	0,066	0,069
242,00	0,042	0,046	0,048
342,00	0,038	0,038	0,040
442,00	0,035	0,037	0,038
542,00	0,031	0,031	0,032

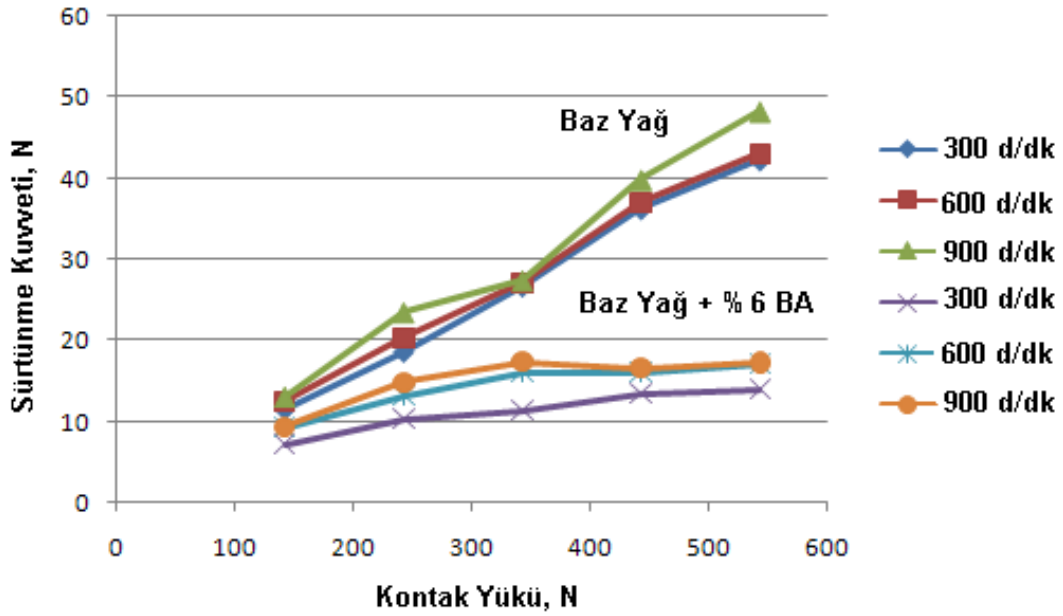


Şekil 56. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %4 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.4.3. Baz Yağa %6 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Yük ve Devir Sayılarında Sürtünme Davranışları

Tablo 18. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

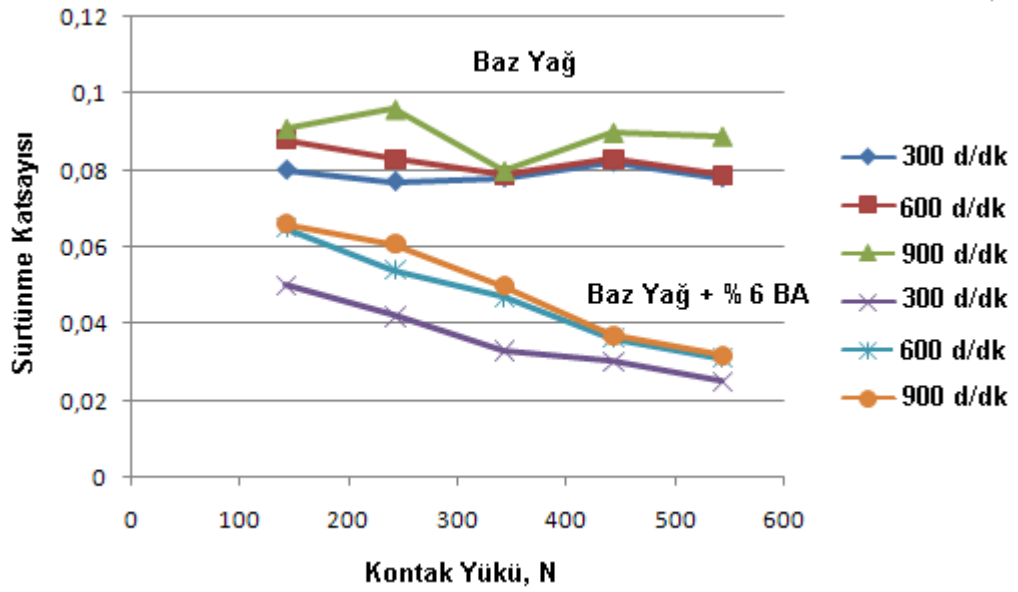
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 600 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	n= 900 d/dk'da Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	07,20	09,30	09,40
242,00	10,30	13,20	14,80
342,00	11,30	16,10	17,30
442,00	13,60	16,00	16,60
542,00	14,00	17,00	17,20



Şekil 57. 20⁰C sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 19. $20^{\circ}C$ sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	n= 300 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 600 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	n= 900 d/dk'da Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,050	0,065	0,066
242,00	0,042	0,054	0,061
342,00	0,033	0,047	0,050
442,00	0,030	0,036	0,037
542,00	0,025	0,031	0,032



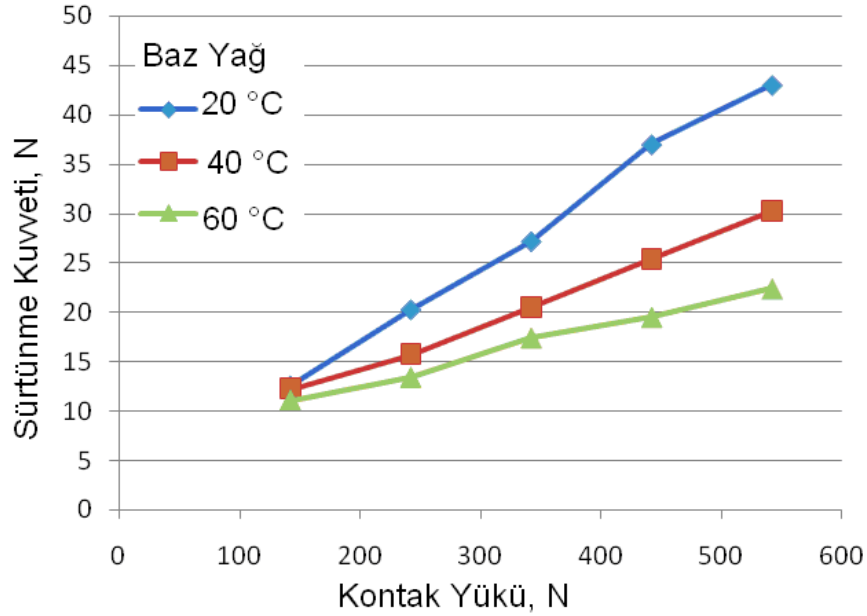
Şekil 58. $20^{\circ}C$ sabit sıcaklıkta, değişik yük ve devir sayılarında, %6 borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı değişimleri

3.5. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Değişik Sıcaklıklarda Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi

3.5.1. Deney Sisteminde Kullanılan Baz Yağın Değişik Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları

Tablo 20. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme kuvveti değişimleri

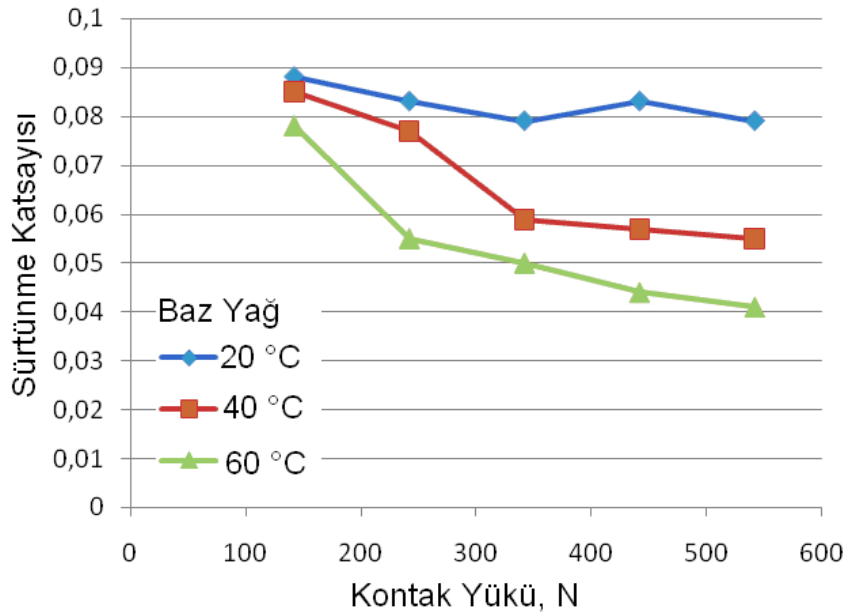
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	T= 40 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	T= 60 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)
142,00	12,60	12,20	11,10
242,00	20,30	15,70	13,40
342,00	27,20	20,50	17,40
442,00	37,00	25,40	19,50
542,00	43,00	30,30	22,4



Şekil 59. $n=600$ d/dk devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 21. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 40 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 60 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,088	0,085	0,078
242,00	0,083	0,077	0,055
342,00	0,079	0,059	0,050
442,00	0,083	0,057	0,044
542,00	0,079	0,055	0,041

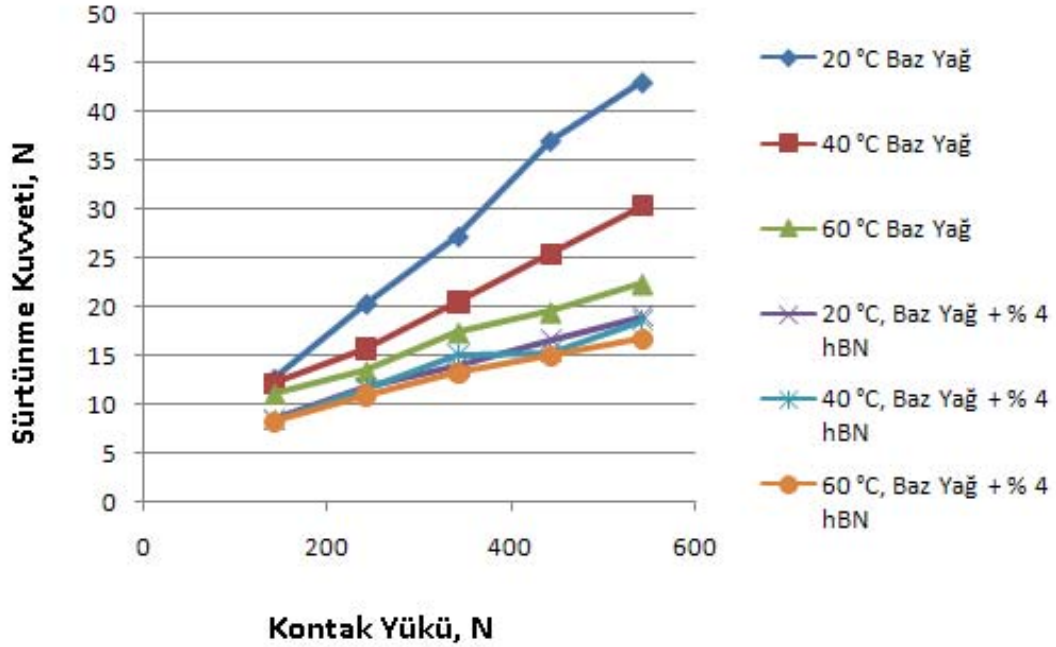


Şekil 60. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında baz yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

3.5.2. Baz Yağa %4 Oranında Hegzagonal Bor Nitrür Katılması Halinde Farklı Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları

Tablo 22. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri

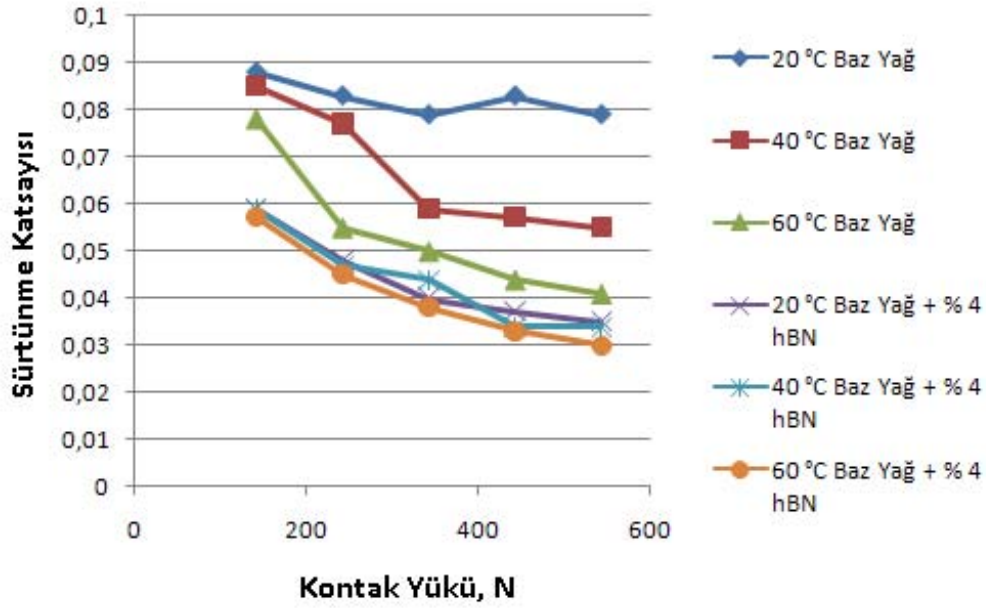
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	T= 40 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)	T= 60 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_S (Newton)
142,00	08,50	08,40	08,20
242,00	11,70	11,60	10,90
342,00	14,00	15,10	13,20
442,00	16,70	15,30	14,90
542,00	19,00	18,50	16,70



Şekil 61. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 23. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 40 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 60 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,059	0,059	0,057
242,00	0,048	0,047	0,045
342,00	0,040	0,044	0,038
442,00	0,037	0,034	0,033
542,00	0,035	0,034	0,030

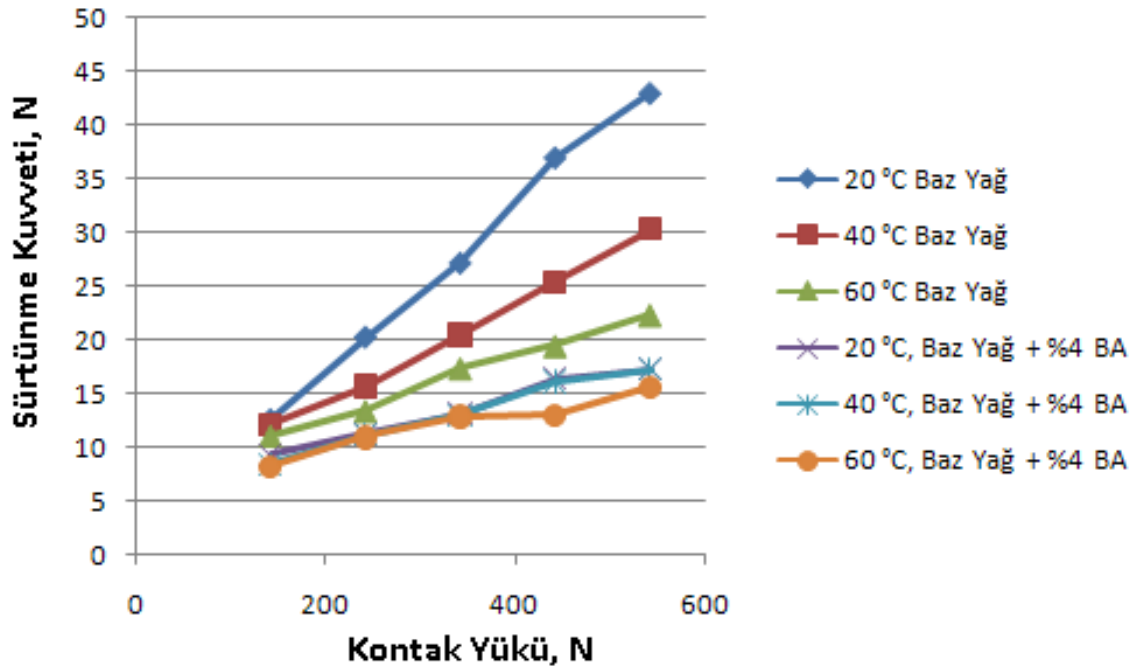


Şekil 62. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

3.5.3. Baz Yağa %4 Oranında Borik Asit Katılması Halinde Farklı Sıcaklıklarda Sürtünme Davranışları

Tablo 24. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimi

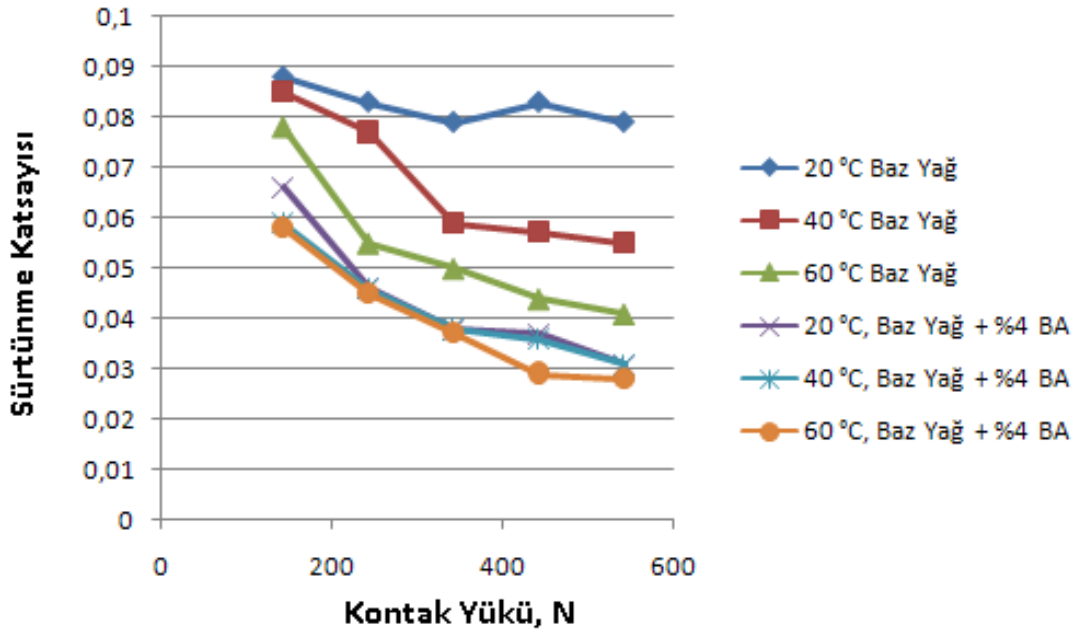
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	T= 40 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)	T= 60 °C' de Sürtünme Kuvveti, F_s (Newton)
142,00	09,40	08,50	08,30
242,00	11,30	11,20	11,00
342,00	13,20	13,00	12,90
442,00	16,50	16,10	13,10
542,00	17,30	17,20	15,60



Şekil 63. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme kuvveti değişimleri

Tablo 25. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	T= 20 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 40 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	T= 60 °C' de Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,066	0,059	0,058
242,00	0,046	0,046	0,045
342,00	0,038	0,038	0,037
442,00	0,037	0,036	0,029
542,00	0,031	0,031	0,028



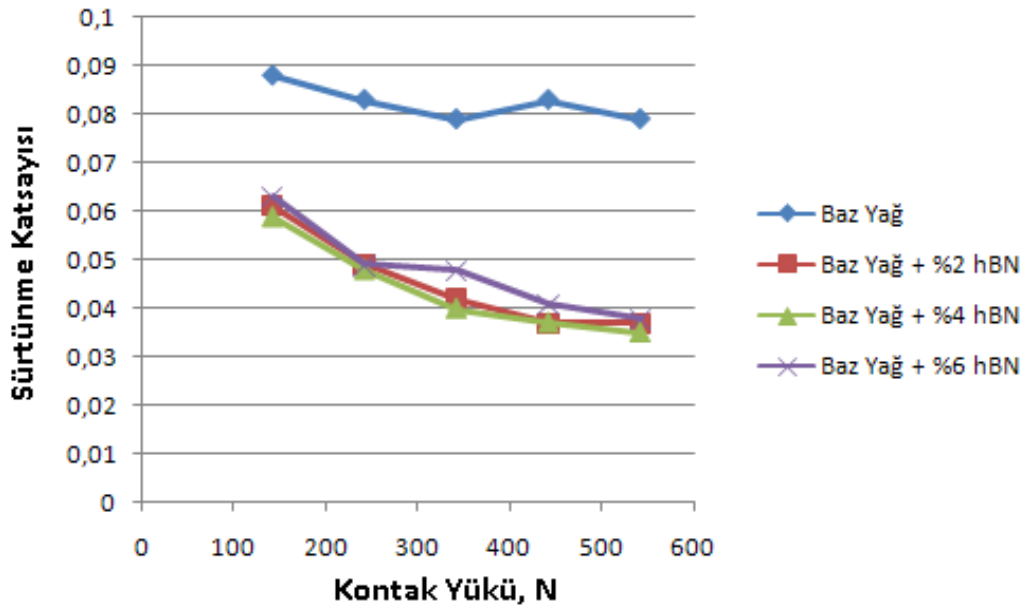
Şekil 64. $n=600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik sıcaklık durumları ve yük miktarlarında %4 oranında borik asit katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

3.6. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranlarının Sürtünmeye Olan Etkisinin İncelenmesi

3.6.1. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Baz Yağ İçerisindeki Oranının Sürtünmeye Olan Etkisi

Tablo 26. $20^{\circ}C$ sabit sıcaklıkta, $n= 600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda hegzagonal bor nitrür katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	%2 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%4 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%6 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,061	0,059	0,063
242,00	0,049	0,048	0,049
342,00	0,042	0,040	0,048
442,00	0,037	0,037	0,041
542,00	0,037	0,035	0,038

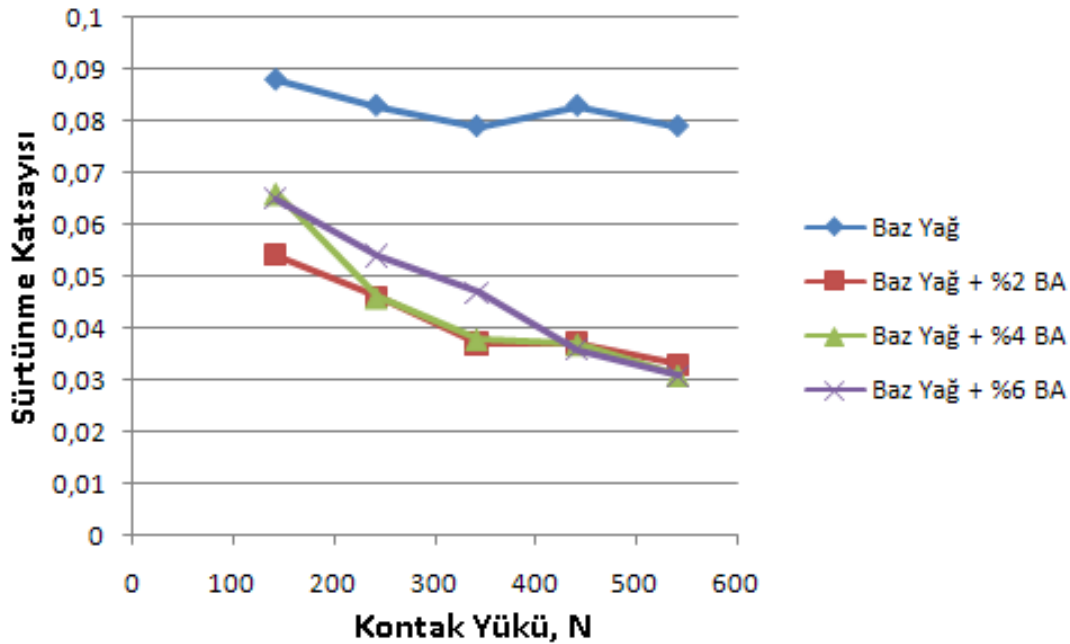


Şekil 65. $20^{\circ}C$ sabit sıcaklıkta, $n= 600$ d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda hegzagonal bor nitrür katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

3.6.2. Yağ Katkısı Olarak Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranının Sürtünmeye Olan Etkisi

Tablo 27. 20⁰C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda borik asit katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	%2 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%4 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%6 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,054	0,066	0,065
242,00	0,046	0,046	0,054
342,00	0,037	0,038	0,047
442,00	0,037	0,037	0,036
542,00	0,033	0,031	0,031

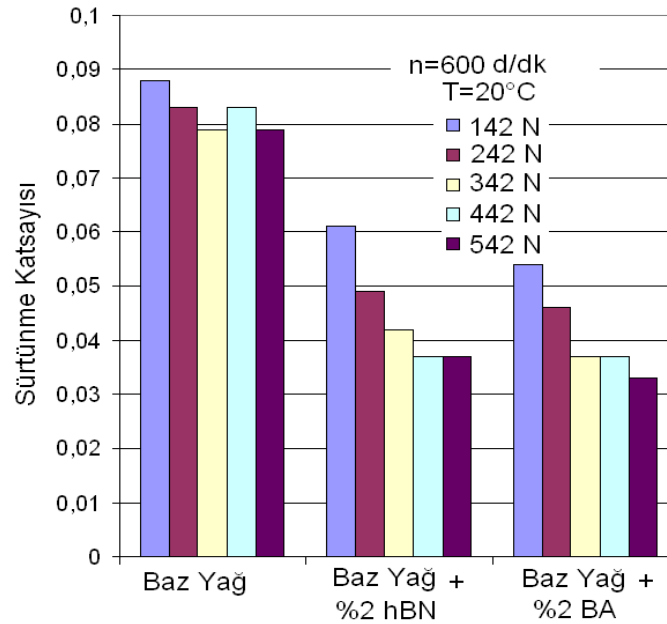


Şekil 66. 20⁰C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, değişik oranlarda borik asit katkıları içeren katkılı yağ için sürtünme katsayısı değişimleri

3.6.3. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağ İçerisindeki Oranlarının Sürtünmeye Olan Etkisinin Karşılaştırılması

Tablo 28. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %2 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

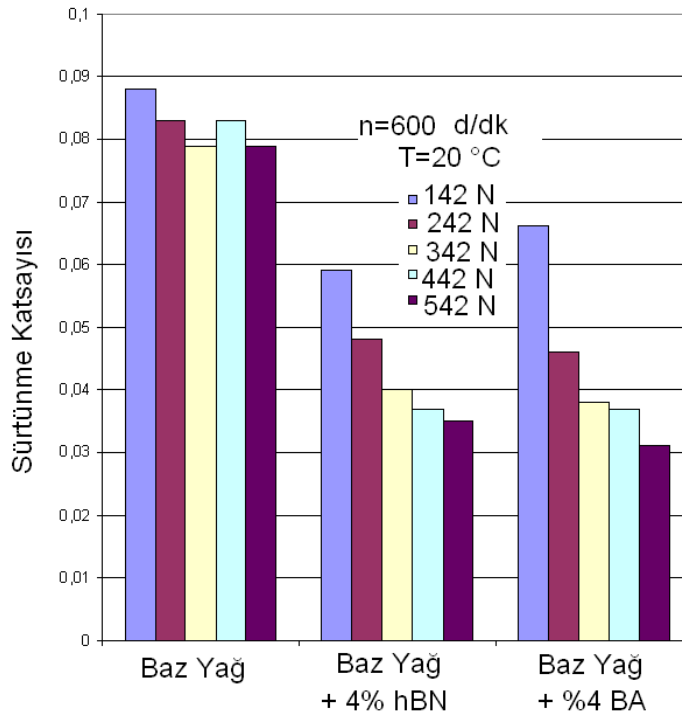
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	Baz Yağın Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%2 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%2 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,088	0,061	0,054
242,00	0,083	0,049	0,046
342,00	0,079	0,042	0,037
442,00	0,083	0,037	0,037
542,00	0,079	0,037	0,033



Şekil 67. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %2 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

Tablo 29. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %4 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

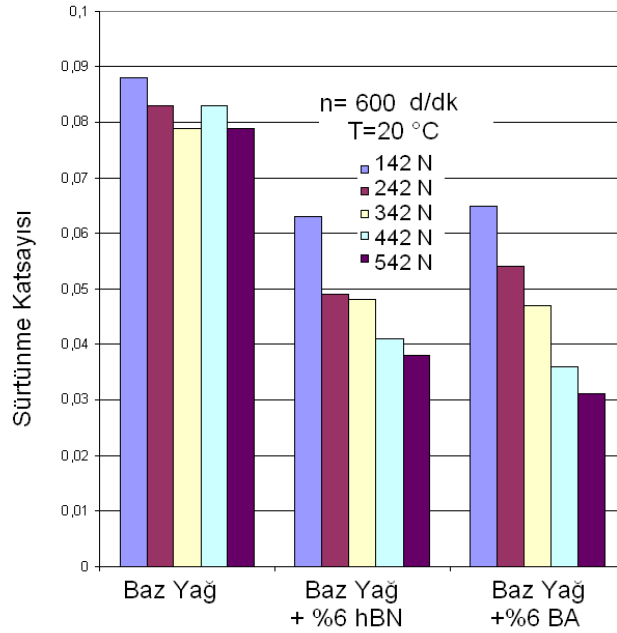
Kontak Yüğü, F_N (Newton)	Baz Yağın Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%4 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%4 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,088	0,059	0,066
242,00	0,083	0,048	0,046
342,00	0,079	0,040	0,038
442,00	0,083	0,037	0,037
542,00	0,079	0,035	0,031



Şekil 68. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %4 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

Tablo 30. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %6 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

Kontak Yüğü, F_N (Newton)	Baz Yağın Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%6 Hegzagonal Bor Nitrür Katsısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$	%6 Borik Asit Katkısı, Sürtünme Katsayısı, $\mu = F_s / F_N$
142,00	0,088	0,063	0,065
242,00	0,083	0,049	0,054
342,00	0,079	0,048	0,047
442,00	0,083	0,041	0,036
542,00	0,079	0,038	0,031

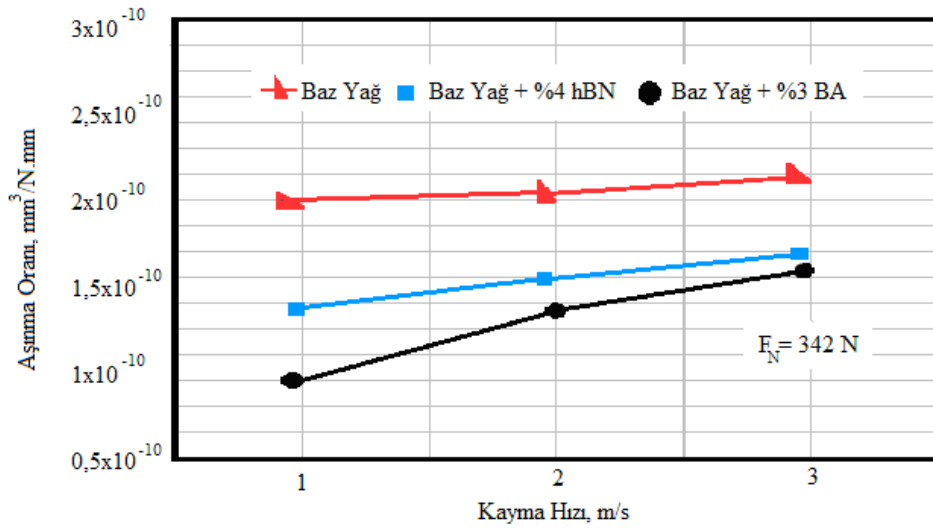


Şekil 69. 20⁰ C sabit sıcaklıkta, n= 600 d/dk sabit devir sayısında, değişik kontak yüklerinde, %6 yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asidin baz yağ içerisindeki oranlarının sürtünmeye olan etkisinin karşılaştırılması

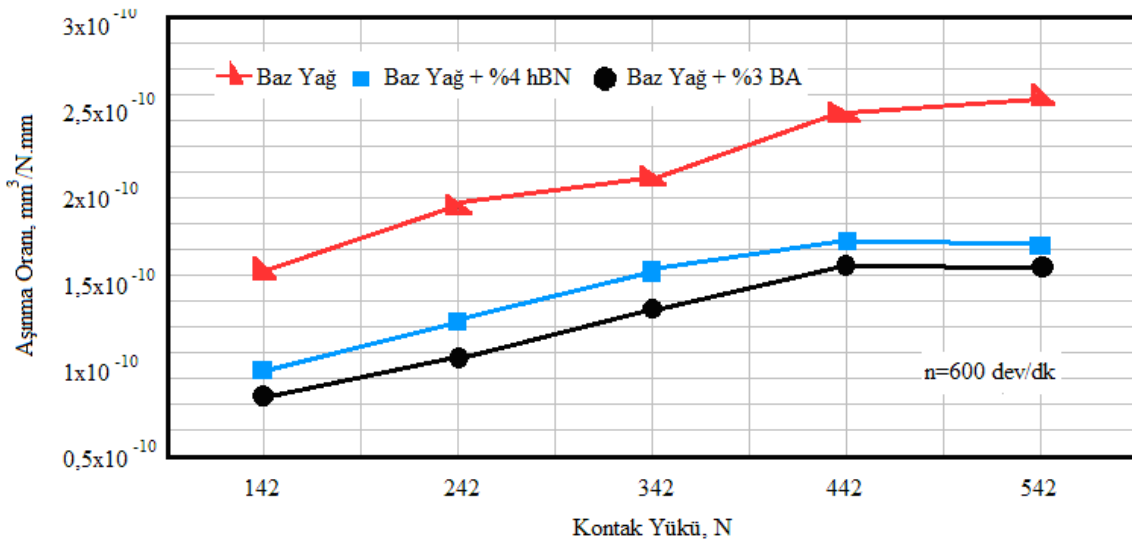
Şekil 67, Şekil 68 ve Şekil 69' da görüldüğü gibi hegzagonal bor nitrür katkısının optimum oranı %4, borik asit katkısının ise %2 ile %4 arasında yer almaktadır. Büyük

yüklerde %4, küçük yüklerde ise %2 borik asit katkılı yağın sürtünme katsayısı daha düşüktür. Bu nedenle borik asit için optimum katkı oranı %3 olarak belirlenmiştir.

Baz yağa, %4 hegzagonal bor nitrid katkı ve %3 borik asit katkı konulduğu durumlarda, sabit kontak yükünde ve sabit devir sayısında, deney numunesinin aşınan yüzeyinde meydana gelen aşınma oranları Şekil 70 a,b' de görülmektedir. Burada aşınma oranı; [aşınma oranı]=[kaldırılan hacim]/[kontak yükü]x[toplam kayma uzunluğu] olarak göz önüne alınmıştır[77].



(a)



(b)

Şekil 70. Baz yağ ve optimum katkı oranlarının kullanılması durumunda, 20°C sabit sıcaklıkta aşınma oranları, (a) sabit yükte, (b) sabit hızda

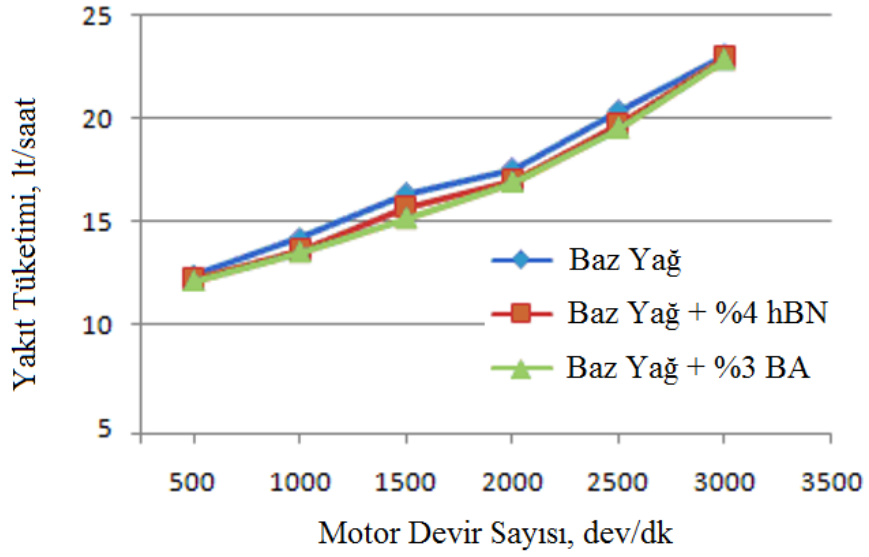
Baz yağa katılan hegzagonal bor nitrür ve borik asit katkıları, baz yağa kıyasla aşınma oranlarını azaltmıştır. Ayrıca Şekil 41' de dikkate alınarak yapılan değerlendirmede söz konusu aşınmaların kısmen abrazif (Şekil 41 e,f) , kısmen adhezif (Şekil 41 d) olduğu görülmektedir.

3.7. Baz Yağa Optimum Oranda Katılan Bor Katkıları ve Bor Katkılı Yağların Bir Diesel Motorun Yakıt Tüketimine Etkisi

TE 53 Slim Multi-Purpose Friction and Wear Tester deney makinasında[77] yapılan deneyler sonucunda, hegzagonal bor nitrür katkısının yağ içindeki en ideal oranı %4, borik asidin ise %3 olarak belirlenmiştir. Aynı oranlardaki hegzagonal bor nitrür ve borik asit kullanılarak, kullanılmamış Shell Rimula 20W 50 baz yağı ile beraber, yeni katkılı yağlar oluşturulmuş ve diesel motora konulmuştur. Katkılı yağlar diesel motora konulmadan önce sırasıyla farklı devir sayılarında sadece taze baz yağ için yakıt tüketimi verileri diesel motora ait elektronik veri panelinden alınmıştır. Burada yakıt tüketimi; motorun saat başına harcadığı yakıt miktarı olarak verilmiştir.

Tablo 31. Baz yağın, %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağın ve %3 borik asit katkılı yağın kullanılması halinde, farklı devir sayılarında 1' er saat çalışma sonucunda gerçekleşen yakıt tüketimi

Devir Sayısı	500 (d/dk)	1000 (d/dk)	1500 (d/dk)	2000 (d/dk)	2500 (d/dk)	3000 (d/dk)
Yakıt Tüketimi (Baz Yağ)	12,383 (lt/saat)	14,186 (lt/saat)	16,356 (lt/saat)	17,550 (lt/saat)	20,357 (lt/saat)	23,060 (lt/saat)
Yakıt Tüketimi (%4 hBN + Baz Yağ)	12,231 (lt/saat)	13,619 (lt/saat)	15,689 (lt/saat)	17,001 (lt/saat)	19,692 (lt/saat)	22,957 (lt/saat)
Yakıt Tüketimi (%3 BA + Baz Yağ)	12,127 (lt/saat)	13,530 (lt/saat)	15,175 (lt/saat)	16,921 (lt/saat)	19,554 (lt/saat)	22,873 (lt/saat)



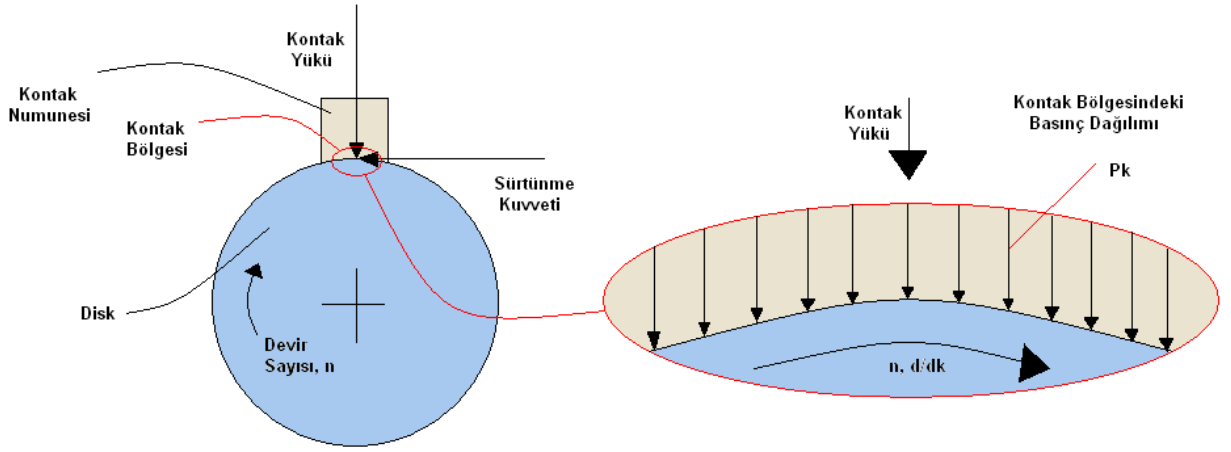
Şekil 71. %4 bor nitrür ve %3 borik asit katkılı motor yağı kullanılarak John Deree marka dizel motorunda yapılan deneyler

Tablo 31 ve Şekil 71' de görüldüğü gibi baz yağda çalışıldığında tüm devir sayılarındaki toplam yakıt tüketiminin ortalaması; 17,315 lt/saat olarak gerçekleşmiştir. Bu değer %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için; 16,864 lt/saat, %3 borik asit katkılı yağ için; 16,696 lt/saat tir. Görüldüğü gibi baz yağa %4 oranında hegzagonal bor nitrür katılması ile yaklaşık %2,7 yakıt tasarrufu elde edilmiştir. Aynı şekilde baz yağa %3 oranında borik asit katılması suretiyle de %3,6 yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

4. İRDELEME

4.1. Kontak Bölgesi ve Kontak Bölgesinde Baz Yağın Sürtünme Davranışlarının İrdelenmesi

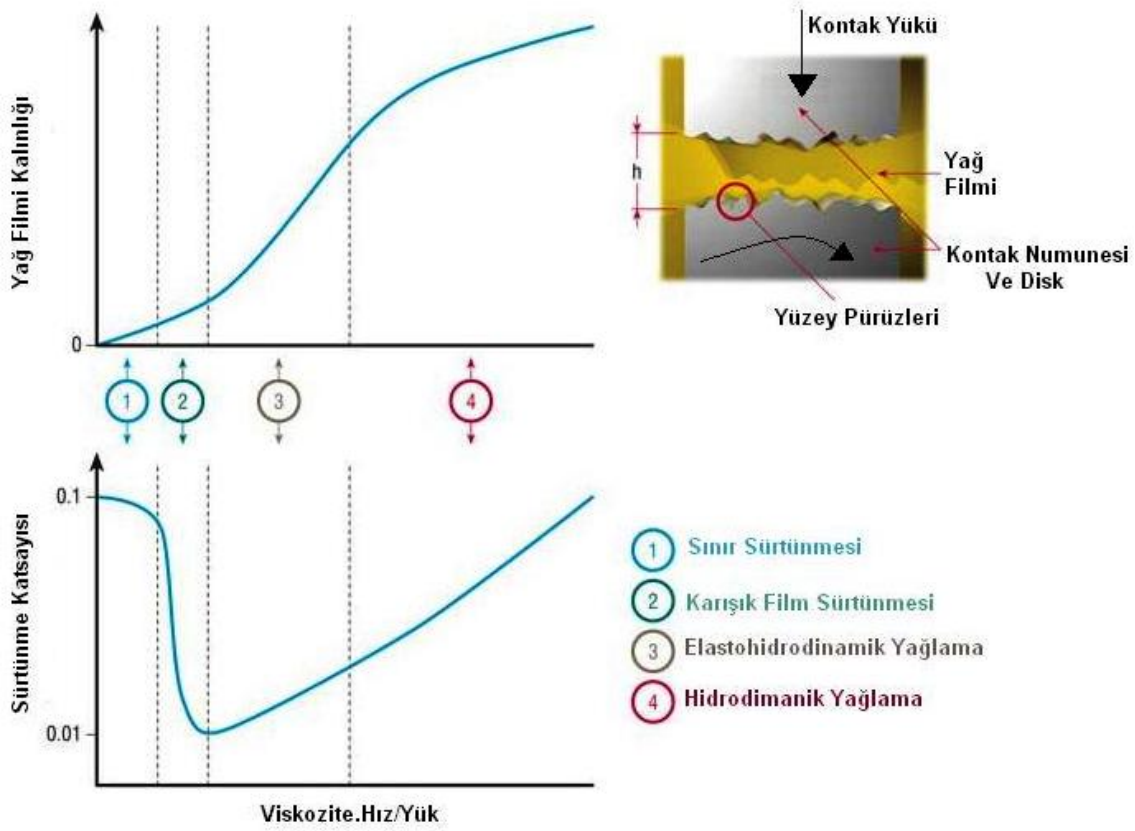
Deneylerde kullanılan baz yağ ve katkılı yağların sürtünme davranışlarının irdelenmesi için öncelikle kontak bölgesinin ve sistemin çalışma şartlarının değerlendirilmesi gerekir.



Şekil 72. Kontak bölgesi

Şekil 72' te görüldüğü gibi kontak numunesi yüzeyi ile disk yüzeyi yarıçapları aynıdır. Bu nedenle kontak numunesi yüzeyi ve disk yüzeyleri bir biri ile uyumlu olup konformaldır. Bu ise kontak bölgesinde gerçekleşen yağlama rejiminin baskın halinin elastohidrodinamik olmadığı anlamına gelir. Ayrıca sırasıyla uygulanan kontak yükleri; 142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 N olup bu kuvvetlerin meydana getirdiği kontak basınçları da sırasıyla; 0.88 MPa, 1.50 MPa, 2.12 MPa, 2.74 MPa, 3,36 MPa dır. Bu basınçların düşük olması ve temas yüzeyi geometrisinin çizgisel veya noktasal olmaması, sistemin genel olarak sınır, karışık ve hidrodinamik yağlama bölgeleri civarında çalışmasına neden olmaktadır. Ayrıca deney sisteminde; kontak yüzeyinin genişliği diskin çevresel uzunluğu çok küçük olduğundan, normal bir hidrodinamik radyal kaymalı yatak

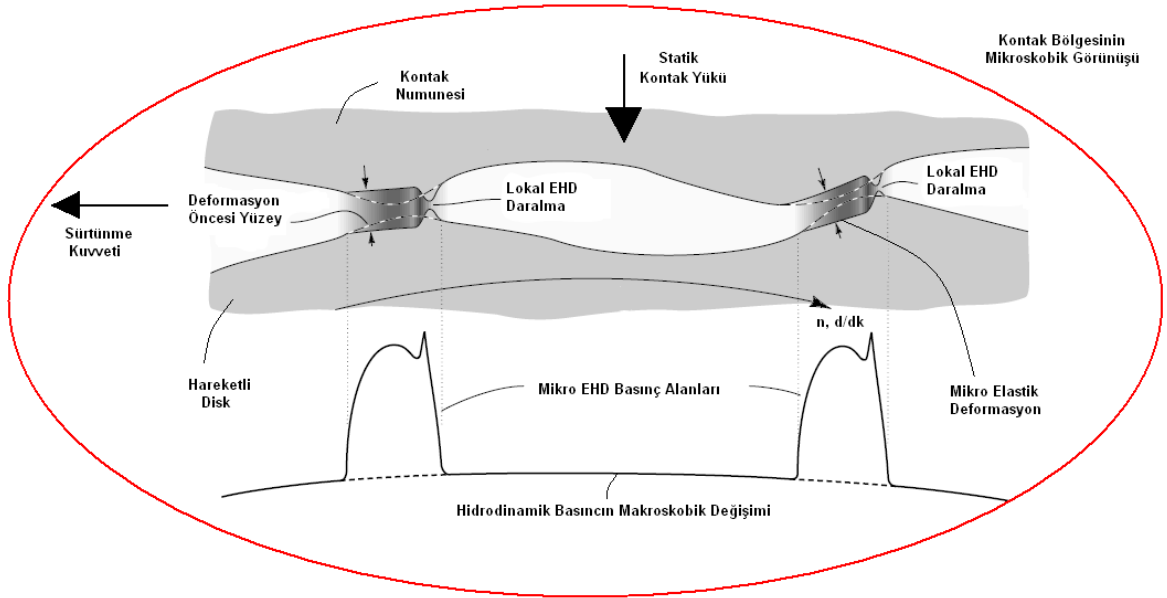
olarak göz önüne alınamaz. Çünkü normal bir hidrodinamik radyal kaymalı yatakta yükü taşıyacak yağ basıncın oluşabilmesi için daralan yağ kamasına ihtiyaç vardır ve daha büyük bir yüzey alanı gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı baskın yağlama rejimi; sınır, karışık ya da hidrodinamik bölgelerinde olduğu söylenebilir. Özellikle yağ filminin incelmesi, düşük hızlarda, büyük yüklerde ve yüksek sıcaklıklarda mikro EHD etkinin de göz önüne alınması gerekir. Bunun yanında meydana gelen yağ filmi kalınlığı normal bir kaymalı yatakta oluşan yağ film kalınlığından daha azdır[71].



Şekil 73. Kontak bölgesi için Stribeck Diyagramı ve yağlama rejimlerinin dağılımı[71].

Şekil 73' de açıkça görüldüğü gibi normal bir durumda sistem hidrodinamik yağlama bölgesinde çalışırken, yük artışı, devir sayısı azalışı veya sıcaklık artışı nedeniyle viskozite değeri düşerse mevcut yağ filmi inceler. Yağ filmindeki incelmeye yağlama rejimini EHD, karışık ya da sınır sürtünme bölgesine taşır. Tüm bunların yanında sistem tamamen hidrodinamik yağlama bölgesinde çalışsa dahi, mikro EHD yağlamaya maruz kalır. Şekil

74’de kontak yüzeyleri arasında meydana gelen mikro elastohidrodinamik yağlama görülmektedir[71], [73].



Şekil 74. Hidrodinamik ve karışık yağlama rejimleri içerisinde gerçekleşen bölgesel mikro EHD temaslar[73].

Makro boyuttaki hidrodinamik veya karışık yağlama rejiminin içerisinde bölgesel mikro EHD yağlamanın mekanizması Şekil74’de açıklanmaktadır. Deney sistemimizdeki kontak numunesinin yüzey alanı küçük olduğundan, oluşan yağ filmi göz önünde bulundurulduğunda, çalışma esnasında meydana gelen mikro EHD olgusunun sürtünme katsayısına etkileri göz ardı edilemeyecek derecede olduğu açıktır.

Şekil 46’ da sabit sıcaklıkta değişik yük ve devir sayılarında baz yağa ait sürtünme katsayılarının değişimi görülmektedir. Buna göre artan devir sayısı ile birlikte sürtünme katsayısı da biraz artmıştır. Sabit devir sayısında yük miktarının artırılması ise sürtünme katsayısının biraz düşmesine neden olmuştur. Buradan çıkan sonuç; sistemin sınır ve karışık yağlama rejimi bölgeleri civarında çalıştığı, fakat azalan yük ya da artan hız ile beraber hidrodinamik yağlama rejimine yaklaştığı şeklinde değerlendirilebilir. Özellikle

en düşük devir sayısında ve en yüksek kontak yükünde mikro EHD etkiler daha ön plana çıkmaktadır.

4.2. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrürün Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi

Yağ katkıları olarak, sırasıyla ağırlıkça %2, %4, ve %6 oranlarında baz yağa ilave edilip farklı yükler ve farklı devir sayılarında deneylere tabi tutulan hegzagonal bor nitrür, değişik şartlar altında sürtünme katsayısını azaltmıştır. Bunun yanında, özellikle ağır yükler altında yani mikro EHD etkilerin daha fazla olduğu şartlarda hegzagonal bor nitrürün etkisi daha fazla olmuştur. Bu etkinin nedeni nanometre boyutunda ve tabakalı moleküler yapıda hegzagonal bor nitrür tozlarının yüzey pürüzleri arasına girmesi ve bir tribofilm oluşturmasıdır. Böylece artan yükler hegzagonal bor nitrür tabakaları arasındaki moleküler bağları daha rahat koparmış, mikro EHD nin etkisini azaltmış bu da doğrudan sürtünme katsayısını azaltmıştır. Sürtünme katsayısının en küçük değeri; 300 d/dk' da, 542 N kontak yükünde ve %4 lük hegzagonal bor nitrürün katkı oranında oluşmuştur. Bu şartlar altında baz yağın sürtünme katsayısı, ilave edilen bu katkı ile 0.078 den 0.030'a düşmüştür.

Kimura ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada[20] baz yağa belirli bir miktarda hegzagonal bor nitrür ilave edilip, çelik-çelik, ve çelik-dökme demir yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Çelik/çelik çalışılan durumda; hegzagonal bor nitrür, %1 katkı oranı mertebesine kadar sürtünme katsayısını hafifçe arttırmış, %1 den sonraki katkı oranlarında sürtünme katsayısını düşürmüş, aşınma da çok ciddi bir oranda azalmış, yaklaşık %4 katkı oranında ise hegzagonal bor nitrürün etkisi sabitlenmiştir. Çelik/dökme demir çalışılan durumda ise; hegzagonal bor nitrür, tüm katkı oranlarında sürtünme katsayısını düşürmüş, aşınmayı da azaltmış, yaklaşık %4 katkı oranında ise hegzagonal bor nitrürün etkisi sabitlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada, %2 lik katkı oranından başlayarak %6 lık orana kadar, değişik yük ve değişik devir sayılarındaki deneylerin sonucunda, en düşük sürtünme katsayısının %4 lük bor nitrür katkı oranında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum, Kimura ve arkadaşlarının çalışmasıyla uyum arz etmektedir.

4.3. Yağ Katkısı Olarak Borik Asit'in Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi

Yağ katkısı olarak sırasıyla %2, %4, ve %6 oranlarında baz yağa eklenip farklı yükler ve farklı devir sayılarında denenen borik asit, bu değişik şartlar altında sürtünme katsayısını azaltmıştır. Bunun yanında özellikle ağır yükler altında yani mikro EHD etkilerin daha fazla olduğu şartlarda, borik asit katkılı yağın sürtünme katsayısı azalması daha fazla olmuştur. Bu etkinin nedeni, tabakalı moleküler yapıda borik asit tozlarının yüzey pürüzleri arasına girmesi ve bir tribofilm oluşturması olarak açıklanabilir[30]. Böylece artan yükler borik asit tabakaları arasındaki moleküler bağları daha rahat koparmış, mikro EHD' nin etkisini azaltmış, bu da doğrudan sürtünme katsayısını düşürmüştür. Bu doğrultuda, sürtünme katsayısının en küçük değeri; 300 d/dk devir sayısı, 542 N kontak yükü ve %6 lük katkı oranında oluşmuştur. Bu şartlar altında baz yağın sürtünme katsayısı ilave katkı yardımıyla ; 0.078' den 0.025' e düşmüştür.

Deneylelerimizde gözlemlenen; artan yük ile beraber sürtünme katsayısının daha çok azalması, oluşan tribofilm ve mikro EHD bölgelerinde geçerli olan yağlama ile açıklanabilir[30]. Deneylelerimiz, literatürde yapılan deneysel çalışmalarla da paralellik göstermektedir. Nitekim, Erdemir ve arkadaşlarının borik asit ile yapmış olduğu pin on disk deneylelerinde [42],[43], [44]; sisteme katı yağlayıcı olarak borik asit ilavesi ile sürtünme katsayısının 0,02 den daha aşağı mertebelere düştüğünü, ayrıca borik asidin kontak basıncın artması ile sürtünme katsayısını azalttığını gözlenmiştir. Bu durum deneysel çalışmalarımızla örtüşmektedir. Yine, Erdemir ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada[30]; ağırlıkça %1 oranında, nanometre boyutlarında borik asit tozu ilave edilen sıvı yağ ile yapılan deneyleler sonucu sürtünme katsayısının %73,3 lük bir azalma ile 0.15 ten 0.04' e düştüğü, ayrıca kontak bölgesinde basınç ile sürtünme katsayısı arasında ters orantılı bir değişme olduğu görmüştür. Düzcükoğlu ve arkadaşlarının yapmış olduğu benzer bir çalışmada ise[49], farklı yüklerde yüklenen ve belirli bir hızla 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' den 0.02 değerine kadar düşme olduğu, bunun ise %80 lik bir azalmaya tekabül ettiği, ayrıca aşınmanın da azaldığı gözlemlenmiştir. Görüldüğü üzere, bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarının literatürdeki çalışma sonuçları ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Ayrıca bu çalışmada, alternatif oranlara kıyasla en uygun borik asit katkı oranının %3 olduğu tespit edilmiştir.

4.4. Yağ Katkısı Olarak Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Değişken Sıcaklıklarda Sürtünmeye Olan Etkisinin İrdelenmesi

Sıcaklık bir maddenin moleküllerinin kinetik enerjisinin bir ölçüsüdür, dolayısıyla sıcaklık artışı moleküler düzeydeki hareket yada titreşim enerjisinin de artışı demektir[72]. Şekil 60' da açıkça görüldüğü gibi, artan sıcaklıkla beraber baz yağın sürtünme katsayısı önemli bir şekilde düşmüştür. Bunun nedeni, artan sıcaklıkla beraber yağ filmi moleküllerinin sıcaklıklarının, dolayısıyla hareketlerinin artması ve bunun sonucu olarak da viskozitenin düşmesi ve yağın incilmesi nedeniyle sıvı sürtünmesinin azalmasıdır. Deneylede tespit edilen bu durum Durak ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneysel çalışmalar[72] ile paralellik arz etmektedir. Buna göre motor yağlarının sıcaklıkla viskoziteleri dolayısıyla sürtünme katsayıları azalmakta ve yağlama performansları önemli ölçüde değişmektedir.

Borik asit ve hegzagonal bor nitrür; artan sıcaklık ile beraber sürtünme katsayısına yaptıkları olumlu etkiyi yani sürtünmedeki azalma etkisini devam ettirmektedirler. Özellikle %4 borik asit katkılı yağın sürtünme katsayısı $60^{\circ}C$ sıcaklıkta 0,03 değerinin altına düşmüştür.

4.5. Hegzagonal Bor Nitrür ve Borik Asidin Baz Yağa Katkı Oranlarının Sürtünmeye Etkisinin İrdelenmesi

Hegzagonal bor nitrür için; daha önce literatürde yapılmış olan çalışmalara[20] ek olarak (Şekil 65'de görüldüğü) gibi yapılan deneyler, ortalama sürtünme katsayısını en düşük veren katkı oranının %4 olduğunu göstermektedir. Borik asit söz konusu olduğunda ise bu oran %3 olmaktadır. Şekil 66' da bu durum görülmektedir. Sürtünme değerlerini minimum yapan bu optimum oranlar kullanılarak, toz halindeki bor katkılarının eş çalışan yüzeylerdeki aşınmaya etkilerini görebilmek için Şekil 70 ve Şekil 41' göz önünde bulundurulursa kısmen adhezif (Şekil 70 d) ve kısmen abrazif (Şekil 70 e,f) aşınmanın olduğu söylenebilir. Ayrıca baz yağa kıyaslandığında bor bileşiklerinin aşınma oranını ortalama %60 ila %80 arasında azalttığı görülebilir, Şekil 70.

4.6. %4 Hegzagonal Bor Nitrür ve %3 Borik Asit Katkılı Baz Yağın Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Bir diesel motorunda kullanılmak amacıyla, daha önceki deneysel çalışmalar sonucu hegzagonal bor nitrür ve borik asit katkıları için belirlenmiş olan optimum oranlar göz önüne alınarak katkılı yağlar 15'er litre olarak hazırlanmıştır. Dizel motorundaki yağ boşaltılarak yerine baz yağ konulmak suretiyle, söz konusu dizel motoru 500 d/dk, 1000 d/dk, 1500 d/dk, 2000 d/dk, 2500 d/dk, 3000 d/dk devir sayılarında %7 yüklü olarak (boşta çalışma yükü) 1'er saat süre ile çalıştırılmış ve tüm devir sayılarındaki toplam yakıt tüketiminin ortalaması; 17,315 lt/saat olarak gerçekleşmiştir. Bu değer aynı devir sayılarında %4 hegzagonal bor nitrür katkılı yağ için; 16,864 lt/saat, %3 borik asit katkılı yağ için; 16,696 lt/saat kg/saat olarak gerçekleşmiştir. Baz yağa %4 oranında hegzagonal bor nitrür katılması ile yaklaşık %2,7 yakıt tasarrufu, aynı şekilde baz yağa %3 oranında borik asit katılması suretiyle de %3,6 yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

1. Yapılan tüm literatür araştırmaları, teorik ve deneysel çalışmalar açıkça göstermiştir ki; bor bileşikli katkılar, motor yağının yağlama performansına olumlu yönde etki etmektedir.
2. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit ağırlıkça %2, %4, %6 oranlarında baz yağa eklenip, 142 N, 242 N, 342 N, 442 N, 542 N kontak yüklerinde 300 d/dk, 600 d/dk, 900 d/dk devir sayılarında, 20, 40, 60⁰C sıcaklıklarda denenmiş ve tüm bu şartlar altında sürtünme katsayısını baz yağa kıyasla %8 - %48 oranında azaltmıştır.
3. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit; yağ katkısı olarak özellikle büyük yüklerde daha etkili performans sergilemiştir.
4. Hegzagonal bor nitrürün baz yağ içerisindeki en uygun katkı oranı %4 olarak, borik asidin baz yağ içerisindeki en uygun katkı oranı ise %3 olarak tespit edilmiştir.
5. Yağ katkısı olarak hegzagonal bor nitrür ve borik asitin farklı yağlama rejimlerinde, büyük yükler altında yağ filminin daha fazla incilmesi nedeniyle mikro EHD temasların etkin olduğu, katkılarının tribofilm oluşturması ve tabakalı moleküler yapısı sebebiyle sürtünmeyi azalttığı sonucuna varılmıştır.
6. Bor esaslı yağ katkıları özellikle soğuk çalışma şartları altında üstün bir yağlama performansı göstermektedir.
7. Borik asidin katkı olarak kullanıldığı durumlarda elde edilen sürtünme katsayıları, hegzagonal bor nitrürün katkı olarak kullanıldığı durumlarda elde edilen sürtünme katsayılarından genelde biraz daha düşüktür.
8. Diesel motorunda yapılan deneyler sonucu; baz yağa %4 oranında hegzagonal bor nitrür katılması ile yaklaşık %2,7 yakıt tasarrufu, aynı şekilde baz yağa %3 oranında borik asit katılması suretiyle de %3,6'lık bir yakıt tasarrufu elde edilmiştir.

6. ÖNERİLER

1. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit belirli oranlarda birbirine katılıp tribolojik davranışları incelenebilir.
2. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit belirli oranlarda greslere katılıp tribolojik davranışları incelenebilir.
4. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit belirli oranlarda yağlara katılıp daha yüksek sıcaklıklarda, 1000 d/dk ve daha yüksek devirlerde incelenebilir.
5. Hegzagonal bor nitrür ve borik asit belirli oranlarda farklı baz yağlara katılarak ortaya çıkan tribolojik davranışlar incelenebilir.
6. Hegzagonal bor nitrür ve borik asidin sürtünmeye olan etkileri, yüzey pürüzlülüğü değerine bağlı olarak incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Akkurt M., Makine Elemanları Cilt: I-II, Birsen Yayınevi, İstanbul 2000.
2. Hamrock B. J., Schmid S. R. ve Jacobson B.O., Fundamentals of Machine Elements, McGraw-Hill, USA, 2004.
3. [http://www.motorship.com/features101/engines-and-propulsion/design-software – aids/calculation-of-shaft-vibrations](http://www.motorship.com/features101/engines-and-propulsion/design-software-aids/calculation-of-shaft-vibrations), 21.11.2012.
4. Ren Z. S., Glodez S., Fajdiga G. ve Ulbin M., Surface initiated crack growth simulation in moving lubricated contact, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenia, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 38,2 (2002) 141–149.
5. Feneberger K., "Graphite: Solid Lubricant", Industrial Lubrication and Tribology, 25,5 (1973) 176 – 178.
6. Sliney E. ve Harnold E., *Solid Lubricants*, Nasa Technical Memorandum TM-103803, Nasa, Ohio, USA, 1991.
7. <http://www.tribology-abc.com/abc/solidlub.htm>, 21.11.2012.
8. Neville A., Morina A., Haque T., ve Voong M., Compatibility between tribological surfaces and lubricant additives, How friction and wear reduction can be controlled by surface/lube synergies, Tribology International, 40, 10–12 (2007) 1680–1695.
9. Hilton M. R., ve Fleischauer D., Applications of Solid Lubricant Films in Spacecraft, Space And Missle Systems Center Air Force Materiel Command 2430 E. El Segundo Boulevard Los Angeles Air Force Base, CA 90245, 1994,USA.
10. Hani, İ., Madeni Yağlar ve Petrol Ofisi Ürünleri, 4. Baskı, Petrol Ofisi A.Ş. Madeni Yağ Direktörlüğü, İstanbul, 2002, 25-35.
11. Yurtseven Y., Endüstriyel Kaynaklı Atık Yağlar ve Değerlendirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
12. Diner, R., Otomotiv ve Sanayide Kullanılan Sentetik Yağlayıcılar, Madeni Yağlar Sempozyumu, Kimya Mühendisleri Odası, Bursa, 1991, 61-64.
13. Petrol Ofisi, Yakıtlar ve Yağlar, Madeni Yağlar Şube Müdürlüğü, İstanbul, 1980, 5, 77-85, 95-99.
14. Taşkıran, Y., Taşıt Yağlarının Genel Özellikleri, Katıklar ve Sınıflandırma, Madeni Yağlar Sempozyumu, Kimya Mühendisleri Odası, Bursa, 1991, 7-25.

15. Choudhary R. B. ve Pande P. P., Lubrication potential of boron compounds-An Overview, Lubrication Science, 14, 2, 2002, 211–222.
16. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Bor>, 21.11.2012.
17. <http://www.etimaden.gov.tr>, 21.11.2012.
18. Shah F. U., Boron Compounds as Additives to Lubricants, Synthesis, Characterization and Tribological Optimization, Luleå university of technology, Printed by Universitetstryckeriet, Luleå, 2009.
19. B. A. Baldwin, Relative antiwear efficiency of boron and sulphur surface species, Wear 45 (1977) 345-353.
20. Kimura Y., Wakabayashi T., Okada K., Wada T. ve Nishikawa H., Boron nitride as a lubricant additive. Wear, 232 (1999) 199–206.
21. Lovell M, Higgs C., Deshmukh P. ve Mobley A., Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. J. Mat. Pro. Tech. 177 (2006) 87-90.
22. Klepper C .C., Williams J. M., Truhan J. J. J., Qu J., Riester L., Hazelton R.C, Moschella J.J, Blau P.J., Anderson J.P., Popoola O.O. ve Keitz. M. D., Tribomechanical properties of thin boron coatings deposited on polished cobalt alloy surfaces for orthopedic applications, Thin Solid Films, 516 (2008) 3070–3080.
23. Wu J.H., Phillips B.S, Jiang W, Sanders J.H, Zabinski J.S. ve Malshe A. P. Bio-inspired surface engineering and tribology of MoS₂ overcoated cBN–TiN composite coating, Wear, 261 (2006) 592–599.
24. Hu Z.S, Yie Y., Wang L.G., Chen G.X. ve Dong J. X., Synthesis and tribological properties of ferrous octoxyborate as antiwear and friction-reducing additive of lubricating oil. Tribol. Lett., 8 (2000) 45-50.
25. Liu W., Jin Z. ve Xue Q., The performance and antiwear mechanism of Scontaining organic borate as an oil additive, Lubricat. Sci., 7 (1994) 49–60.
26. Herdan J. M.. Friction modifiers in engine and gear oils. Lubricat. Sci. 12 (2000) 265-276.
27. Zhang J., Liu W. ve Xue Q., The tribological properties of the heterocyclic compound containing S, N, O, and B as additive in liquid paraffin. Wear, 224 (1999) 68–72.
28. Shen G., Zheng Z., Wan Y., Xu X., Cao L., Yue Q., Sun T. ve Liu A., Synergistic lubricating effects of borate ester with heterocyclic compound, Wear, 246 (2000) 55-58.

29. Lovell M., 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.
30. Erdemir A, Advances in Boron-Based Lubricants and Lubrication Additives, IV. Uluslararası Bor Sempozyumu • IV International Boron Symposium, Ekim 2009, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 205 - 213.
31. http://en.wikipedia.org/wiki/Boron_nitride, 22.11.2012.
32. Greim J. ve Schwetz K. A., Boron Carbide, Boron Nitride, and Metal Borides, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
33. Kawaguchi M., Electronic Structure and Intercalation Chemistry of Graphite-Like Layered Material with a Composition of BC₆N, Journal of Physics and Chemistry of Solids 69, 5–6, (2008) 1171.
34. Silberberg M. S., Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change (5th ed.). New York: McGraw-Hill. p. 483, 2008.
35. Leichtfried G., Properties of diamond and cubic boron nitride, Advanced Materials and Technologies: Powder Metallurgy Data. Refractory, Hard and Intermetallic Materials, Springer, 118–139(2002),1071
36. Lan J. H., Thermal Transport in Hexagonal Boron Nitride Nanoribbons, Physical Review, 79 (2007) 115401.
37. Pawlak Z., Kaldonski T., Pai R., Bayraktar E. ve Oloyede A., A comparative study on the tribological behaviour of hexagonal boron nitride (h-BN) as lubricating micro-articles—An additive in porous sliding bearings for a car clutch , Wear, 267 (2009) 1198–1202.
38. Pawlak Z., Pai R., Bayraktar E., Kaldonski T. ve Oloyede A., Lamellar lubrication in vivo and vitro: Friction testing of hexagonal boron nitride, BioSystems, 94 (2008) 202–208.
39. Pawlak Z, Kaldonski T., Lisewski M., Urbaniak W. ve Oloyede A., "The effect of hexagonal boron nitride additive on the effectiveness of grease-based lubrication of a steel surface", Industrial Lubrication and Tribology, 64,2 (2012), 84 – 89.
40. 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.
41. Sawyer W. G., Schmitz T. L., ve Ziegert J. C., Renewable Tool Coating via Continuous in-situ Deposition, University of Florida Gainesville, <http://web.mae.ufl.edu/tribology/Laboratory/WhitePapers/dryMachiningwp.HTML>, 22.11.2012.

42. Erdemir, A., Tribological properties of boric acid and boric-acid-forming surfaces. Part I: Crystal chemistry and mechanism of self-lubrication of boric acid, Lubr. Eng., 47 (1991) 168-172.
43. Erdemir, A., Fenske, G. R., Erck, R. A., Nichols F. A., ve Busch, D. E., Tribological properties of boric acid and boric-acid- forming surfaces. Part II. Mechanisms of formation and self-lubrication of boric acid films on boron- and boric oxide- containing surfaces, Lubr. Eng., 47 (1991) 179- 185.
44. Erdemir, A., Eryilmaz, O. L. ve Fenske, G. R., Self-replenishing solid lubricant films on boron carbide, Surf. Eng., 15 (1999) 291-295.
45. Erdemir, A., Solid lubricants and self-lubricating films, in “Handbook of Modern Tribology,” B. Bhushan, CRC Press, Boca Raton, FL, 787-818, 2001.
46. Erdemir A, Erck R.A., Robles J., Relationship of hertzian contact pressure to friction behavior of self-lubricating boric acid films, Surface and Coatings Technology, 49, 1–3, (1991), 435–438.
47. Erdemir, A., Lubrication from mixture of boric acid with oils and greases, United States Patent 5, 431 , 830 (1995).
48. Erdemir A., Method to improve lubricity of low sulfur diesel and gasoline fuels, U.S. Patent 6, 783, 651 (2004).
49. Düzcükoğlu H. ve Acaroğlu M., Lubrication Properties of Vegetable Oils Combined with Boric Acid and Determination of Their Effects on Wear, nergy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 32, 3 (2009) 275-285.
50. Barton, T., Steffens, J., Sawyer, W. G., Schmitz, T. L., Ziegert, J. C. ve Lovell, M. R. In situ solid lubricant deposition for environmentally benign forming, Canada, 2004.
51. Deshmukh P., Lovell M. R., Sawyer W. G. ve Mobley A., On the friction and wear performance of boric acid lubricant combinations in extended duration operations, Wear, 260 (2006) 1295–1304.
52. Mert Z., Tek Silindirli Bir Motorda Sürtünmeye Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi ve Sürtünme Gücünün Azaltılması, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2007.
53. Chu S. ve Majumdar A., Opportunities and challenges for a sustainable energy future, Nature, 488 (2012) 294–303.
54. Heywood J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
55. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/226592/gasoline-engine/47234/Lubrication-system>, 13.15.2012.

56. Sekmen Y., İçten Yanmalı Motorlarda Yağlama Yağlarının Performansa Etkisi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997.
57. Comfort C., An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses And Lubricant Properties Affecting Fuel Economy – Part I, U.S Army Research, Engineering, and Development Command, 01 (2003) 3225.
58. Carden P., Calculation of Friction in High Performance Engines, Ricardo Software European User Conference, UK, 2010.
59. Taraza D., Henein N. ve Bryzik W., Frictional Losses in Multi-Cylinder Diesel Engines, SAE Paper No. 01, 0921,2000.
60. Wakuri Y., Soejima M., Ejima Y., Hamatake T., ve Kitahara T., Studies on Friction Characteristics of Reciprocating Engines, SAE Paper No. 952471.
61. Taylor C.M., Engine Tribology, Elsevier Science Publishers , 1993.
62. Richardson D.E., Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines, ASME Journal of Eng. For Gas Turbines and Power, 122, (2000) 506-519.
63. Adatepe H., Cengil M. ve Güneş B., Statik Yük Altındaki Kaymalı Yataklarda Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 9,1(2012) 25-34.
64. BAŞ H., Katkı Maddeli Yağların Kam Mekanizmalarındaki Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2001.
65. Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
66. LIU Q., Friction in Mixed and Elastohydrodynamics Lubricated Contacts Including Thermal Effects, Phd Thesis, Twente University, China, 2002.
67. Brajdic-Mitidieri P., Advanced Modelling of Elastohydrodynamic Lubrication, Phd Thesis, Tribology Section and Thermouids Section Department of Mechanical Engineering Imperial College London, England, 2005.
68. http://en.wikipedia.org/wiki/Continuum_mechanics, 19.11.2012.
69. http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_mechanics, 18.11.2012.
70. http://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations, 11.12.2012.
71. Bloch H.P., Practical Lubrication for Industrial Facilities, Second Edition, Fairmont Pres, 2009.

72. Durak E., Kurbanoglu C. ve Tunay R.F., Experimental study of effects of oil additives into coefficient of friction in journal bearings at different temperatures, Industrial Lubrication and Tribology, 58,6(2006)288 – 294.
73. Stachowiak G. W., Batchelor A. W., Engineering Tribology, Elsevier Books, Oxford, 2001.
74. Ji-Young K., Jee-Woon K., Myung-Rae C. ve Dong-Chul H., Friction Characteristics of Piston Ring Pack with Consideration of Mixed Lubrication: Parametric Investigation, KSME International Journal, 16, 4(2002) 468- 475.
75. Magyar B., Sauer B. ve Horák P., Tribological Investigation of K Type Worm Gear Drives, Acta Polytechnica Hungarica, 9,6 (2012).
76. Hironaka S., Boundary Lubrication and Lubricants, Three Bond Technical News, 1984.
77. T53 Slim Multipurpose Test Machine Catalogue, 1994

ÖZGEÇMİŞ

31.08.1983 tarihinde Trabzon'un Akçaabat ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Akçaabat'ta tamamladı. 2005 yılında K.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2006 yılında vatani görevini ifa edip bir müddet özel sektörde çalıştıktan sonra Çaykur Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğüne Mühendis olarak atandı. 6 yıldır bu kurumda çalışmakta olup Yüksek Lisans çalışmalarına ve diğer konulardaki araştırmalarına devam etmektedir. İngilizce bilmektedir.