

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIN YAŞLANMASININ MOTOR SÜRTÜNME
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can TALI

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Otomotiv

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞIN YAŞLANMASININ MOTOR SÜRTÜNME
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Can TALI
(503071703)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Özgen AKALIN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin ERGENEMAN (İTÜ)
Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen “İçten Yanmalı Motorlarda Piston Grubu Sürtünme Kayıplarının Azaltılması” başlıklı ve 104M274 numaralı proje kapsamında tamamlanmıştır. Bu çalışmada verdiği büyük desteklerden dolayı Yrd. Doç. Dr. Özgen Akalın hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalar sırasındaki teknik desteklerinden dolayı Federal Mogul Türkiye’den Mithat Uludağ, Ford Otosan A.Ş.’den Kaan Özdemir, ve Opet Madeni Yağ Sanayi ve Ticaret A.Ş.’den Doç. Dr. Vedat Akgün’e teşekkürlerimi borç bilirim. Çalışmalarım sırasında yardımlarından dolayı Burak Gullaç ve Sabri Çakır’a teşekkür ederim...

Mayıs 2009

Can Talı

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Yağın Yaşlanması.....	2
1.2. Yağın Yaşlanmasının Takip Edilmesi ve Gözlemlenmesi	5
1.2.1. Titrasyon Metodu.....	6
1.2.2. İnfrared Spektroskopi (Fourier Dönüşümü)	7
1.3. Yağın Yaşlanmasında Katı İS Partiküllerinin Etkisi.....	10
1.3.1. Yağın Fiziksel Özelliklerine Etkisi.....	10
1.3.2. Yağın Kimyasal Özelliklerine Etkisi	12
1.3.3. Yağlama Performansına Olan Etkisi	15
1.3.4. İS Partiküllerinin Özelliklerinin Etkisi.....	19
1.4. İS Partiküllerine Model Oluşturabilecek Kurum Maddeleri.....	21
1.4.1. Karbon Siyahı	22
1.4.2. Karbon Siyahı ile İS Partiküllerinin Karşılaştırılması.....	23
1.4.3. Karbon Siyahının Seçimi	24
2. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYİN HAZIRLANMASI	29
2.1. Deney Düzenegi	29
2.2. Deneyin Hazırlanması	31
3. DENEY SONUÇLARI	35
3.1. Katkısız yağ sonuçları	35
3.2. Katkılı yağ sonuçları.....	58
3.3. Motor Yağları Sonuçları.....	63
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	69
KAYNAKLAR	73
EKLER	75
ÖZGEÇMİŞ	79

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BET	: Brunauer, Emmett, Teller
EGR	: Egzoz Gaz Resirkülasyonu
FTIR	: Fourier Transformation Infrared Spectroscopy
SEM	: Scanning Electron Microscope
TAN	: Toplam Asit Numarası
TBN	: Toplam Baz Numarası

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.1 : Deney matrisinin oluşturulması.....	32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yağın kalan yararlı ömrünün antioksidan ve oksidasyon seviyesine göre değişmesi. [2]	3
Şekil 1.2 : Yağın kalan yararlı ömrüne göre yağın viskozitesinin ve asit seviyesinin değişimi. [3].....	4
Şekil 1.3 : FTIR analizi ile yağdaki oksidasyon, nitrasyon, sülfürizasyon ve is partiküllerinin ölçülmesi. [6].....	9
Şekil 1.4 : Yakıt seyreltilerinin FTIR analizi ile saptanması ve yakıt bileşenlerinin absorpsiyon seviyelerinin ölçülmesi. [6].....	9
Şekil 1.5 : Yağın relatif viskozitesinin dispersan yüzdesine ve is konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi. [8]	11
Şekil 1.6 : Farklı is partikül konsantrasyonlarında yağın viskozitesinin kayma gerilmesine bağlı olarak değişimi. [9].....	12
Şekil 1.7 : Uzun süreli yaşlanan yağda is partiküllerinin konsantrasyonu ile asit ve baz seviyelerinin değişimi. [11]	13
Şekil 1.8 : Katkısız yağlarda yaşlanmanın artması ile beraber is partikülleri ve dispersanların aşınmaya olan etkisi. [12]	14
Şekil 1.9 : Stribeck Eğrisi.[16]	16
Şekil 1.10 : Sürtünme katsayısının değişik is miktarlarındaki yağların sıcaklıklarına göre değişimi. [17].....	17
Şekil 1.11 : EGR yüzdesinin sürtünme kuvvetine etkisi. (is partikülleri dahil) [18].	18
Şekil 1.12 : EGR yüzdesinin sürtünme kuvvetine etkisi. (is partikülleri dahil değil) [18]	18
Şekil 1.13 : İs partiküllerinin yüzdesine bağlı olarak aşınma izinin gelişmesi. [19].	20
Şekil 1.14 : Farklı iki yağ örneğinde birincil is partikül çaplarının dağılımı. [20]....	21
Şekil 1.15 : BET yüzey alanı, porozite ve partikül çapları açısından karbon siyahlarının is partikülleri ile kıyaslanması. [7]	26
Şekil 1.16 : İs partikülleri ile çalışmada seçilen iki farklı karbon siyahının termogravimetrik analiz sonuçları. [7]	26
Şekil 1.17 : İs partikülleri ile Degussa S170 karbon siyahının (A) iyi karışmış yağda, (B) kötü karışmış yağda kümelenme dereceleri. [7]	27
Şekil 2.1 : Bench test sistemi : (A) servo motoru; (B) ısıtıcı; (C) krank mili mekanizması; (D) segman tutucu; (E) yükleme kolu; (F) yük sensörü; (G) yükleme valfi; (H) gömlek tutucu ;(I) Karter.	30
Şekil 2.2 : Piston segmanı ile silindir gömleğinin birbirine teması. [24]	31
Şekil 3.1 : Katkısız yağda 20°C sıcaklık ve 160N sabit yükte hızın sürtünme katsayısına etkisi.....	37
Şekil 3.2 : Katkısız yağda 20°C sıcaklık ve 500 dev/dak sabit hızda normal yükün sürtünme katsayısına etkisi.....	37
Şekil 3.3 : Katkısız yağda 70°C sıcaklıkta ve 160N sabit yükte hızın sürtünme katsayısına etkisi.....	38

Şekil 3.4 : Katkısız yağda 70° C sıcaklıkta ve 500 dev/dak sabit hızda normal yükün sürtünme katsayısına etkisi.....	39
Şekil 3.5 : Katkısız yağın alıştırma periyodu süresinde sürtünme katsayısının değişimi	39
Şekil 3.6 : Alıştırma periyodu sonrası 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi	40
Şekil 3.7 : Alıştırma periyodu sonrası 70°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yükte sürtünme katsayısının değişimi	41
Şekil 3.8 : Alıştırma periyodu sonrası 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yüklerde sürtünme katsayısının değişimi	41
Şekil 3.9 : Alıştırma periyodu sonrası 20°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yüklerde sürtünme katsayısının değişimi	42
Şekil 3.10 : 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte %1 karbon siyahı içeren yağ ile katkısız yağın karşılaştırılması.....	43
Şekil 3.11: 20°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yükte %1 karbon siyahı içeren yağ ile katkısız yağın karşılaştırılması.....	43
Şekil 3.12 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırmadan önceki değerleri katkısız yağın 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hızda 320N yükte kıyaslanması	44
Şekil 3.13 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu	45
Şekil 3.14 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırmadan sonraki değerleri ile katkısız yağın 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hızda 240N yükte kıyaslanması.....	45
Şekil 3.15 : %1 Karbon siyahı içeren yağın alıştırmadan sonraki değerleri ile katkısız yağın 70°C sıcaklıkta 80N yük 700 dev/dak hızda kıyaslanması.....	46
Şekil 3.16 : %2 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu	47
Şekil 3.17 : %4 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu	47
Şekil 3.18 : Hidrodinamik rejimde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 20°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükte karşılaştırılması.....	48
Şekil 3.19 : Karma rejimde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması	49
Şekil 3.20 : Sınır yağlama rejimine yaklaşılacak parametrelerde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N yükte karşılaştırılması.....	50
Şekil 3.21 : Katkısız yağa geri dönüşte 20°C'de 320N yük ve 300 dev/dak hızlarda alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ ile alınan değerlerin kıyaslanması	51
Şekil 3.22 : Katkısız yağa geri dönüşte 20°C'de 700 dev/dak hız 80N yüklerde alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ ile alınan değerleri kıyaslanması	51
Şekil 3.23 : Katkısız yağa geri dönüşte 70°C'de 300 dev/dak hız 320N yüklerde alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ ile alınan değerlerin kıyaslanması	52
Şekil 3.24 : Katkısız yağa geri dönüşte 70°C'de 700 dev/dak hız 80N yüklerde alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ ile alınan değerlerin kıyaslanması	53
Şekil 3.25 : Katkısız yağa geri dönüşte 1 saatlik çalıştırma periyodu	53

- Şekil 3.26** : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 70°C sıcaklıkta 80N yük 700 dev/dak hızda sürtünme katsayısının değişimi. 54
- Şekil 3.27** : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi 55
- Şekil 3.28** : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi 55
- Şekil 3.29** : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 20°C sıcaklıkta 80N yük 700 dev/dak hızda sürtünme katsayısının değişimi. 56
- Şekil 3.30** : Deneyleerde kullanılan tüm yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması 57
- Şekil 3.31** : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkı yağların 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması 59
- Şekil 3.32** : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkı yağların 70C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması 59
- Şekil 3.33** : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkı yağların 25C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükte karşılaştırılması . 60
- Şekil 3.34** : Katkılı yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N yükteki değerler ile alıştırma periyodu yapılan ilk katkı yağ değerlerinin kıyaslanması..... 61
- Şekil 3.35** : Katkılı yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükteki değerler ile alıştırma periyodu yapılan ilk katkı yağ değerlerinin kıyaslanması 62
- Şekil 3.36** : Deneyleerde kullanılan tüm katkı yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması. 63
- Şekil 3.37** : Sınır yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması..... 64
- Şekil 3.38** : Karma yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması..... 65
- Şekil 3.39** : Karma yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması..... 66
- Şekil 3.40** : 0 km yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N yükteki değerler ile alıştırması yapılan ilk 0 km yağ değerlerinin kıyaslanması 67
- Şekil 3.41** : 0 km yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükteki değerler ile alıştırması yapılan ilk 0 km yağ değerlerinin kıyaslanması 67
- Şekil 3.42** : Deneyleerde kullanılan tüm motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 3 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması. 68

SEMBOL LİSTESİ

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
cm	: santimetre
cm³/g	: santimetre küp/gram
cP	: santi poise
Cu	: Bakır
dev/dak	: Devir/dakika
Fe	: Demir
g	: gram
H	: Hidrojen
H₂SO₄	: Sülfürik Asit
KOH	: Potasyum Hidroksit
m²/g	: metrekare/gram
mg	: miligram
ml/h	: mililitre/saat
mm	: milimetre
MPa	: Mega Paskal
nm	: nanometre
N	: Newton
NO_x	: Azot oksit emisyonu
NO₂	: Azot (II) oksit
N₂O₄	: Azot (IV) oksit
O	: Oksijen

Pa	: Paskal
Pa.s	: Paskal saniye
pH	: Hidrojen Gücü
R_a	: Yüzeydeki ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_z	: Yüzeydeki beş maksimum noktanın yüzey pürüzlülüğü
R_t	: Yüzeydeki en yüksek nokta ile en düşük noktanın arasındaki uzaklığın yüzey uzunluğuna oranı
R_{sk}	: Yüzeyin simetrisini hesaplayan yüzey pürüzlülüğü
R_p	: Yüzeyin tepe noktalarının ortalama yüzey pürüzlülüğünden uzaklığı
S	: Kükürt
SO₂	: Di-sülfat
SO₃	: Tri-sülfat
ZnDTP	: Çinko-dialkiltriofosfat
µl	: mikron litre
°C	: derece santigrat

YAĞIN YAŞLANMASININ MOTOR SÜRTÜNME KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Yağın yaşlanmasında en büyük etkenlerden biri, motorda kısmi yanma sonucu oluşan is partiküllerinin silindir gömleği ve piston segmanı arasından yağa karışmasıdır. Bu proses sonucu yağın viskozitesinde bir artış gözükür, bu da yağın performansını etkilemesinde rol oynar. Ayrıca is partikülleri, temas ettiği yüzeylerde mekanik deformasyonlara olanak sağlayarak sürtünme ve aşınma üzerine değişik etkiler göstermektedir. Bu çalışmada kullanılmış motor yağından çıkarılması maliyetli bir proses olduğundan is partiküllerini taklit edecek şekilde morfolojik özellikleri, yağ içindeki davranışını karakterize eden yüzey alanı ve porozite değerleri ve is partiküllerinin yağ içinde kümelenme derecesine göre kıstas alınmış bir karbon siyahının, belli konsantrasyonlarda katkısız ve katkılı yağlara katılıp, piston segman ve silindir gömleği modeli kurulmuş bir bench test düzeneği üstünde değişik yüklerde, devir sayılarında ve sıcaklıklarda sürtünmeye olan etkisi incelenmiştir. Test düzeneğinde silindir gömleği ve segman arasında oluşan sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı, yağlama rejiminin değişimi de göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Bulunan değerlere göre segman ile gömlek arasındaki sürtünmeye karbon siyahının nasıl etkilediği, yağın viskozitesini ve silindir ve segman arasındaki temas yüzeyinde ne gibi değişikliklere yol açtığı incelenmiştir. Bulunan sonuçlar, katkısız yağda karbon siyahı içeren yağların karma yağlama rejiminde sürtünme katsayısında belirgin bir azalma, hidrodinamik yağlama rejiminde ise üst ölü noktalarda küçük boyutlarda bir artma olduğunu göstermiştir. Karbon siyahı ile çalışıldıktan sonra gömlek yüzeyinde bir grafit filminin varlığı, deney sonuçlarına bakılarak yorumlanmıştır. Katkılı yağda bulunan karbon siyahlarının konsantrasyon arttıkça sürtünme katsayısını düşürdüğü gözlenmiştir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında kullanılmamış ve belli sürelerde kullanılmış gerçek motor yağları kullanılarak yağın yaşlanma derecesine göre gerçek motor yağlarının sürtünmeye etkisi incelenmiştir. Gerçek motor yağlarında is partiküllerinden farklı mekanizmaların da sürtünmeye etkisi olacağından bu noktada sadece yağın yaşlanmasıyla sürtünme katsayısının nasıl değiştiği hakkında bir öngörü elde edilmiştir.

EFFECT OF OIL DEGRADATION ON FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF AN ENGINE

SUMMARY

One of the major factors in the process of oil degradation is soot contamination from unburnt fuel in an engine contaminating the lubricant between the cylinder liner and piston ring contact surface. This leads to an increase in lubricant viscosity, affecting the performance of the lubricant. Soot particles allows mechanical deformations in contact areas, leading to changes in friction and wear. In this study, since the extraction of soot particles from an used engine oil is a costly process, a carbon black, which is morphologically similar, having the same parameters like BET surface area and porosity which characterizes the particles' behaviour in oil and having the same agglomeration characteristics in oil, is selected to be a surrogate for soot particles. These particles are added to non-formulated and formulated oils in different concentrations, and used in a simulated piston ring cylinder liner contact bench test system for friction measurements at different load, speed and temperature values. In the bench test system, depending on the lubrication regime, friction forces and friction coefficients between the ring and the liner are measured. Carbon black's effect on the contact area between the ring and the liner, viscosity and the mechanical changes on the liner are investigated. The results indicate that in mixed lubrication regime, the non-formulated oils contaminated with carbon black showed a significant decrease in the friction coefficient, while in hydrodynamic lubrication regime, there is a slight increase in the friction coefficient at the top dead center with increasing carbon black levels. The results also show that at the cylinder liner surface, there may be a thin graphite film formed during the tests with carbon black. Formulated oils contaminated with carbon black showed a rapid decrease with increased carbon black concentrations.

On the next stage of the study, unused and used real engine oils with different levels of degradation have been compared and effect of oil degradation on friction have been investigated. Since there are several different mechanisms affecting the friction beside soot particles, only a limited study with the real engine oils have been carried out here and effect of different levels of degradation on friction coefficient have been anticipated.

1.GİRİŞ

Otomobil, motor ve yağlayıcı üreticileri aracın uzun ömürlü maliyetlerini ve aracın dış çevreye olan etkilerini azaltmak ve atılan yağ miktarlarını azaltmak amacıyla yağ değişim aralıklarını ve yağ ömrünü uzatmak için yoğun çaba harcamaktadırlar. Yağ değişim aralıklarının kısalması aynı zamanda yağın yoğun is partikülleriyle kirlendiğini ve yağın bozulduğu anlamını taşır. Bununla beraber egzoz gazlarının bir kısmının tekrar emme manifolduna gönderilmesini sağlayan egzoz gaz resirkülasyonunun (EGR) artması ile birlikte yağın yaşlanması artmaktadır. Bu sayede maksimum yanma sıcaklığı düşmekte ve NO_x emisyonları azalmaktadır.

EGR ile beraber çok sayıda yanma yan ürünleri oluşmasından dolayı yağın yaşlanmasında belirgin bir rol üstlenecektir. Emme havası ile beraber gelen egzoz gazı tüm silindir gömlek yüzeyini egzoz gazlarında bulunan kirli maddelere ve katı partiküllere maruz bırakır. Bu kirli maddelerde yüzlerce hidrokarbon, asit, is ve diğer kısmi yanma ürünleri mevcuttur. Bu maddeler silindir gömleğiyle etkileşime girerler ve yağlayıcının ani şekilde bozulmasını sağlarlar. Bu maddeler aynı zamanda kaçak gazlar üzerinde de bulunurlar ve krank mili yataklarında bulunan yağlayıcıları da etkilerler.

Hava kalitesini artırmak amacıyla, birçok hükümet, is ve NO_x oluşumunu içeren egzoz emisyonlarını sınırlamak amacıyla standartlar geliştirmiştir. Bu standartlara uymak için, egzoz gazından çıkan is partiküllerini azaltmak amacıyla motor üreticileri yağ içinde is partiküllerini artıracak modifikasyonlara yönelmişlerdir. İs oluşumuna etkileyen parametreler yanma odası tasarımı, direkt veya indirekt püskürtme, yakıt enjeksiyon süresi, motorun iki veya dört stroklu olması ve motor yüküdür. Bu etkilerin beraber gelişmesiyle beraber yağ içindeki is konsantrasyonu artmaktadır.

Bu çalışmada temel hedef, yağa bahsedilen belli mekanizmalar sonucu karışan is partiküllerinin gerçek motor parçalarının ve motor şartlarının simule edildiği segman ve silindir kısmında oluşan sürtünmeye nasıl bir etkisi olduğunu gözlemlemektir.

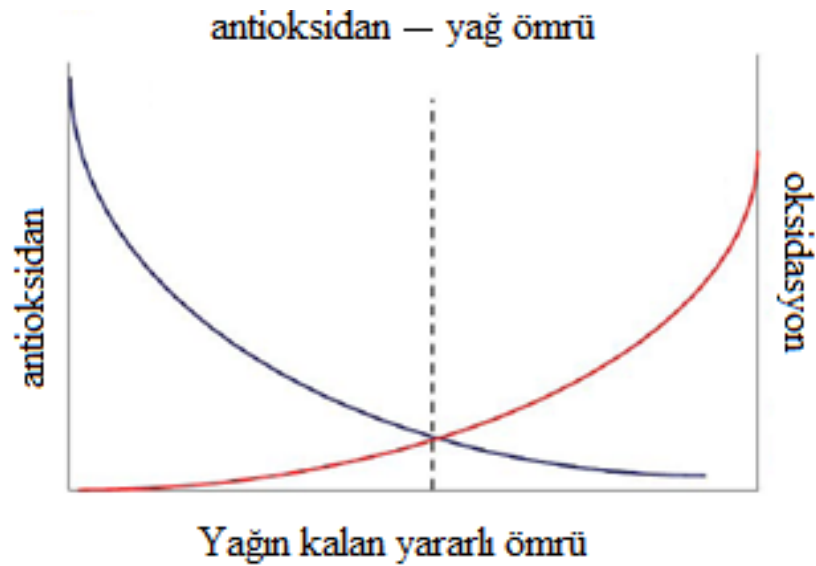
1.1. Yağın Yaşlanması

Bulunduğu ortama, yağın derecesine ve çalışma koşullarına göre her yağ kullanıldığı sürece yaşlanmaya başlar. Yağ yaşlandığı zaman kimyasal bileşimi ve işlevi değişime uğrar. Yaşlanma sonucunda yağda vernik ve tortu oluşumunu tetikleyen istenmeyen maddeler oluşur. Bu maddelerin oluşmasıyla beraber yağın bulunduğu yüzeylerde korozyon ve aşınma gibi makine sistemlerine zarar verecek ve makine ömrünü düşürecek zararlı değişimler gözlenir. Yağın yaşlanması hidrolik ve yağlama sistemlerinde görünen sık problemlerden biridir. Yaşlanmanın başlıca temelinde oksidasyon, hidroliz ve termal bozulmalar gibi kimyasal reaksiyonlar baş gösterir. Bunların yanında malzeme aşınması veya erimesi sonucu oluşan metaller (Al, Cu, Fe vb.), katı partiküller (kurum vb.) ve yüksek basınç faktörleri de yaşlanmayı ilerleten diğer proseslerdir. [1]

Oksitlenme sonucu oksijenle reaksiyona giren kimyasal maddelerin oluşturduğu asitler ve polimer bileşikler, yüksek miktarda birikmeleri halinde bir film oluşturarak vernik ve tortu birikintileri oluşturmaya başlarlar. Yağın oksitlenmesi üç farklı kademedен geçer; ilk oksitlenme inhibisyon evresidir. Bu evrede yağın özellikleri büyük ölçüde değişmemekte ve oksitlenme seviyesi çok azdır. İnhibisyon evresinin süresi, yağın sıcaklığı ve oksitlenmeyi önleyici yağın içinde bulunan antioksidanların seviyesine bağlıdır. Antioksidanlar yağın içinde kullanıldıkça tükendikleri için yağın içindeki antioksidan konsantrasyonu ne kadar fazla ise yağın oksitlenmesi o kadar gecikir, antioksidanlar tamamen tüketilince de inhibisyon evresi sona erir. Oksitlenmenin ikinci evresi bozulma evresidir. Bozulma evresinde antioksidanların etkisi ortadan kalkar, artık yağın kompozisyonu ve yağın içindeki oksitlenmeyi yavaşlatıcı maddelerin konsantrasyon olarak azalmasıyla orantılı bir hızlanma evresi gözlenir. Bu evrede yağın özellikleri yavaş yavaş bozulmaya başlar. Üçüncü ve son oksitlenme evresinde yağın viskozitesindeki yükselmeden dolayı oksitlenme yavaş gelişir. Bunun nedeni yağın yüksek viskozitesinden ve oksitlenme sonucu oluşan polimerleşmiş oksit ürünlerden dolayı hava veya oksijen gibi maddelerin artık yağın içine girmesinin zorlaşmasındandır. [1] Yağın yaşlanmasındaki ikinci etken, yağın suyla reaksiyona girip hidrolize neden olmasıdır. Oksitlenmeye benzer şekilde, hidroliz sonucunda da asit ve vernik oluşmaktadır. Hidro peroksitler, karboksil asitler, aldehitler, ketonlar ve diğer oksitlenme ürünler su içinde yüksek derecede

çözünürlüğe sahip oldukları için hidroliz prosesini hızlandırırlar. Yağın termal bozulmaya uğraması yağın yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla orantılıdır. Termal bozulmalar, bir motorda piston-silindir gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerde daha çok belirgindir. Termal bozulma aynı zamanda yağda çözünmeyen ve polimer bileşikler oluşturur. [2]

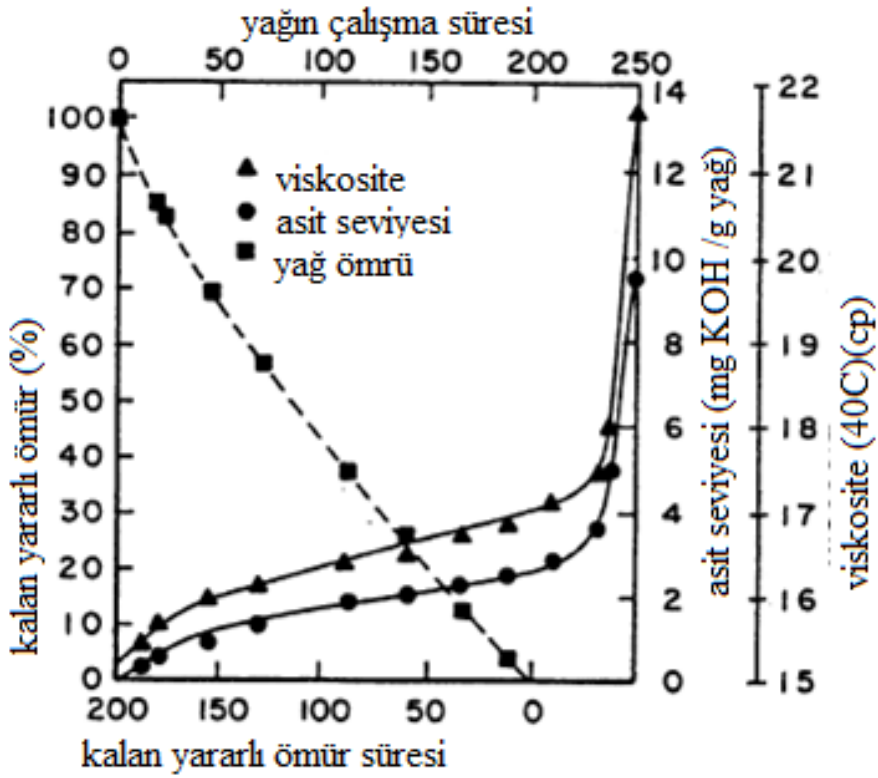
Yağların çalışma sıcaklıklarının yükselmesi, yağ değişim periyotlarının uzaması ve ekipmanın devreye girme süresinin gecikmesine bağlı olarak yağın oksidasyon stabilitesini gösteren yağın kalan yararlı ömrü parametresi önemlilik kazanmıştır. Bu parametre yağın kullanılabilirliğini göstermesi açısından temel bir parametredir. Antioksidanların tükenmeye başlaması ile paralel olarak kalan yararlı ömür de düşmeye başlar. Yağın kararlı ömrü tükenene kadar yağın yaşlanması sonucu baş gösteren viskozite ve asit yükselmesi gibi kritik faktörler, bu ömür tükenene kadar minimal seviyelerde ortaya çıkarlar. Yağın içinde bulunan antioksidanların tükenmesi ile beraber oksidasyon seviyesinin hızlı gelişmesi sonucu yağın kalan ömrü hızlıca azalır ve yağın yaşlanması ikinci bir evre olan reaktif evreye girer ve hızlıca artar. (Şekil 1.1.) [2]



Şekil 1.1 : Yağın kalan yararlı ömrünün antioksidan ve oksidasyon seviyesine göre değişmesi. [2]

Yağın yaşlanması sonucu başlıca ortaya çıkan en büyük iki etken yağın viskozitenin ve toplam asit seviyesinin artmasıdır. Şekil 1.2’ deki grafikte yağın 200 saatlik çalışmasından sonra yağın kalan yararlı ömrü ve bunun tükenmesine bağlı olarak viskozite ve asit seviyelerinin değişimleri gösterilmiştir. Kalan yararlı ömrün

tamamen tükenmesi ile birlikte viskozite ve asit seviyelerinde ani bir yükseliş göze çarpmaktadır. Bu noktada yağın içindeki antioksidan seviyesini bilmek, yağın kalan yararlı ömrünü tahmin etmek için iyi bir tahmin olacaktır. [3]



Şekil 1.2 : Yağın kalan yararlı ömrüne göre yağın viskozitesinin ve asit seviyesinin değişimi. [3]

Yağın yaşlanması dört farklı kategoride incelenebilir. [3] İlk kategoride yağdaki deterjanların tükenmesi göz önüne alınır. Bu noktada hidrolize bağlı olarak bozulma başlar. İkinci kategoride ise antioksidanlar tükenmeye başlaması ile oksitlenme süreci gelişmeye başlar. Bu evrede oksitlenme sonucu oluşan asitlerden dolayı asit seviyesinde bir kademeli yükseliş gözlenir. Üçüncü kategoride ise deterjan ve antioksidanların tamamen tükenmesi sonucu asitler, nitratlar ve sülfatlar oluşmasıyla beraber yağın asit seviyesindeki artış hızlanır ve vernik, tortu gibi maddelerin oluşmaya başlamasından dolayı yağın viskozitesi de yükselmeye başlar. Dördüncü ve son kategoride ise yağ artık tamamen kullanılabilirliğini yitirmiş, asit seviyesinde ve viskozitesinde ani artışlarla beraber tamamen yaşlanma veresine girmiştir. Bu kategoride yaşlanma viskozitenin aşırı yükselmesinden dolayı daha yavaş gelişmektedir.

Yağın yaşlanması başlıca etkileri şunlardır;

1. Yağda asit bileşiklerinin oluşması ve bu bileşiklerin yağı korozyona uğratması;
2. Yağın viskozitesindeki yükselme ile beraber sürtünme ve aşınmada kayda değer yükselmelerin gözlenmesi;
3. Yağın yaşlanmasıyla beraber oluşmaya başlayan bileşikler yağın içindeki diğer katkı maddeleriyle de tepkimeye girip bu maddelerin hızlıca tükenmesine veya performanslarının düşmesine neden olması;
4. Vernik birikintileri son derece yapışkan olması ve katı atıkları tutmasıyla beraber zımpara kağıdına benzeyen bir yüzey yaratması, bu yüzeyin de sürtünme ve aşınmayı artırıcı bir etki yaratması;
5. Yağın ömrünün ve performansının (yağlama yeteneği, akışkanlığı vb.) azalması;
6. Motorlarda ilk harekette hızlı yağlama istenen bölgelere yeterince hızlı yağlama yapılmaması sonucu bu bölgelerde sürtünme ve aşınmaların gözlenmesi;
7. Motorda sürtünme kayıplarını artırması;
8. Yağ filtresi değişimini hızlandırması ve yağlama bölgelerine verilen mekanik hasarların artması.

1.2. Yağın Yaşlanmasının Takip Edilmesi ve Gözlemlenmesi

Yağın yaşlanmasını gözlemek amacıyla yapılan en basit testlerden biri viskozite ölçümüdür. Yağ, uç kesiti belli bir orifisten geçirilerek yağın orifisin içinden geçme süresine göre kinematik viskozite değeri hesaplanır. Bir başka bilinen yöntemlerden biri renklendirme analizidir. Bu deneyde yağı kirleten maddelerin renklerine bakılarak yağın yaşlanma seviyesi ölçülür. Vernik gibi malzemelerin seviyesini belirlemek amacıyla da verniği tutmaya yarayan bir milipor diyafram kağıdı kullanılır. Yağdaki katı partiküllerin ölçülmesi için de gravimetrik ve ultrasantrifüj analizleri yapılır.

Ancak bu testler yağdaki yaşlanmayı ancak belirli seviyelerde gözlemleyebilirler. Daha detaylı bir gözleme için yağdaki asitlik, oksidasyon vb. seviyelerini bilmek daha mantıklıdır.

1.2.1. Titrasyon Metodu

Titration metodu ile yağın asit ve baz seviyeleri ölçülür. Kademelendirme, yağ tarafından nötrale eden veya edilen potasyum hidroksit (KOH) miktarına göre belirlenir. Asit seviyesi, 1 g yağ içindeki asitleri nötrale etmeye yarayan mg KOH miktarına göre belirlenir. Özellikle katkısız yağlar için önemli bir kriterdir. Asit seviyesi, katkısız yağın arıtılma derecesini ve korozyon etkisi yaratma potansiyelini gösterir. Genelde yağdaki korozyon problemini yaratan naftenik asitlerdir. Asit seviyesi temelde iki türlü titration yöntemiyle bulunur. Bunlar renk belirleme titrationu ve potansiyometrik titrasyondur. Potansiyometrik titrasyonda, yağ örneği küçük kap içinde bir su içinde toluen ve propanol ile çözündürülür ve alkollü KOH ile titre edilir. Kap içine bulunan bir referans elektrot ve cam elektrot daldırılır ve bir potansiyometreden ölçülür. Çıkan sonuç milivolt birimindedir ve titre eden çözelti hacmi ile bir grafik halinde okunur. Renk belirleme titrationunda ise uygun bir pH renk indikatörü (genelde Fenol-naftelin) ile yağ titre edilir. Yağ örneğinde belirgin değişime neden olan titre edici çözeltinin hacmi belirlenir. [4]

Baz seviyesi ise bir yağın alkaliliğinin (bazikliğinin) göstergesidir. Baz seviyesi, motorda yanma sonucu oluşan asitlerin ne derecede kontrol edildiğinin bir göstergesidir. Baz seviyesinin yüksek olması, yağın yaşlanmasına etken olan maddelerin etkisinin ve korozyon etkisinin az olmasına neden olur. Belirlenen ASTM D2896 ve ASTM D4739-06 standartlarına göre modern yağlayıcılarda bu miktar 6-80 mg KOH/g , benzinli motorlarda 7-10 mg KOH/g ve dizel motorlarında 10-15 mg KOH/g olarak belirlenmiştir. Baz seviyesinin ölçülmesinde de asit seviyesinin ölçülmesinde kullanılan metotlar geçerlidir. Baz seviyesi 2 mg KOH/g olarak ölçülen yağda, motorun korunması yetersiz ve korozyon etkisinin yüksek olması beklenir. Özellikle sülfür seviyesinin yüksek olması baz seviyesinde sülfürik asit (H_2SO_4) oluşmasından dolayı hızlı düşüslere neden olacaktır. [5]

1.2.2. İnfrared Spektroskopi (Fourier Dönüşümü)

Bu analizin temelinde moleküler spektroskopinin prensipleri yatmaktadır. Bu analizlerde yağın yaşlanma derecesi, yağ içindeki karboksil asit, keton, aldehit vb. türü kimyasal grupların belirlenmesiyle hesaplanır.

İnfrared spektroskopilerde “glow-bar” adı verilen bir infrared kaynağı kullanılır. Bu infrared kaynağı, genelde gaz ocaklarında ısıtıcı olarak kullanılmaktadır. Yağ örneği içindeki kimyasal bileşenler, tekrar edilmeyen spesifik dalga numaralarında bu infrared ışığını absorbe eder. Temel yöntemde bir prizma yardımıyla ayrı dalga numaralarını ayıran ve yağ örneği üzerinden geçerken zaman içinde ne kadarının absorbe edildiği incelenir ve bu absorpsiyon seviyesi ile dalga boyunun bir grafiği çıkarılır. Modern FTIR de Michelson interferometresi adı verilen, hızlı bir lazer yardımıyla gözlenen bir hareketli ayna kullanılır. Bu ayna, aynı zamanda bir dalga boyu referansıdır. Bu detektör, interferogram adı verilen cihazla tüm frekansların toplamının zamana oranını hesaplar. Fourier dönüşümü adı verilen bir algoritma ile de detektöre gelen sinyaller absorpsiyon spektrumuna çevirir. Bu spektrum da karbondioksit ve su buharı gibi atmosferik bileşenleri elimine etmek için boş hücredeki bir geçmiş spektruma oranlanır. Bu cihaz sayesinde tek bir analizde 10 dakikaya kadar çıkabilen analiz süreleri 1.5 s gibi çok daha kısa bir sürede hesaplanabilmektedir. [6]

FTIR analizi, yağın oksidasyonunun derecesini 1800 cm^{-1} civarında dalga boylarındaki karbonil (C=O) bölgesindeki absorpsiyon derecesine göre belirler. Bu bölgede infrared enerjisinin çoğunun karbon ile oksijen arasındaki bağlar tarafından absorbe edildiği varsayılır. Bu bölgenin analiz edilmesi, oksidasyon seviyesinin ölçümünde en temel kriterdir ve yağdaki asitliğe bağlı olarak oksidasyon seviyesini ölçen titrasyon metodu ile yakın sonuçlar vermektedir. [6]

Oksidasyon ürünlerinin yanı sıra, yağ içindeki organik bileşiklerden yüksek sıcaklık ve basınca bağlı olarak nitrasyon ürünleri de oluşmaktadır. Bu ürünler, genelde NO, NO₂ ve N₂O₄ gibi nitrojen oksit formlarındadır. Yağdaki asitlerin neden olduğu yağ filminin kalınlaşmasının yanı sıra nitrasyon ürünleri de yağdaki vernik ve tortu oluşumunda bir numaralı faktördür. Yağdaki nitrasyon oranının yükselmesi, düzensiz bir ateşleme zamanı ya da hava/yakıt oranındaki ani değişimler olarak açıklanabilir. Aynı zamanda düşük çalışma sıcaklıkları ya da motorun yüksek

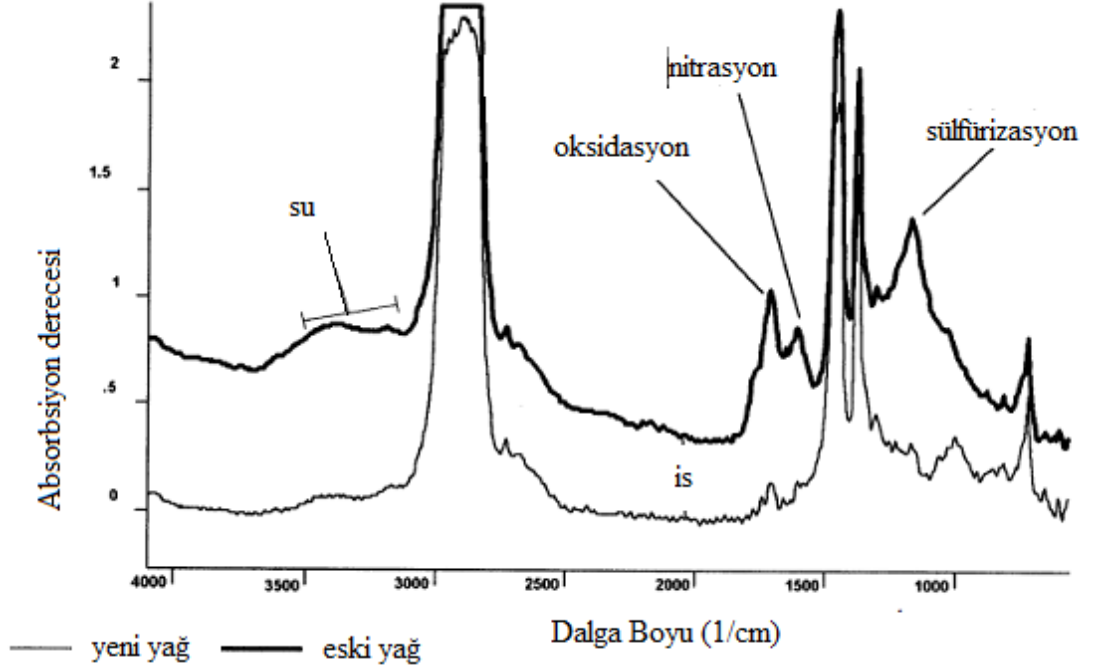
yüklerde çalışmasının bir sonucu olarak da göze çarpar. Nitrasyon ürünleri 1600-1650 cm^{-1} gibi, hemen oksidasyondan sonraki dalga numaralarında FTIR tarafından gözlemlenir. [6]

Sülfür bileşikleri genelde katkısız yağlarda bulunurlar ve yağın belli özelliklere kavuşması için yağ içine katkı maddesi olarak kullanılırlar. SO_2 ve SO_3 gibi sülfat yan ürünleri de sülfür bileşiklerinin oksidasyona uğraması ile oluşur. Akabinde piston segmanlarından yağlama sistemi içerisine kaçarlar ve zamanla birikirler. Bu ürünler vernik ve tortu oluşumunu artırır ve yağı yaşlandırır. Ayrıca yanma sonucu oluşan su buharı ile reaksiyona girip çok tehlikeli bir asit türü olan sülfürik asitleri (H_2SO_4) oluştururlar. Bu asitler yağdaki yedek alkaliliği normal asitlere göre daha hızlı tüketirler. Bu bileşiklerin ölçülmesi segman kısmındaki problemler hakkında da basit bir bilgi verir. Sülfatlar da aynı oksidasyon ve nitrasyon gibi FTIR analizi ile 1120-1180 cm^{-1} dalga numaralarında gözlemlenebilir. [6]

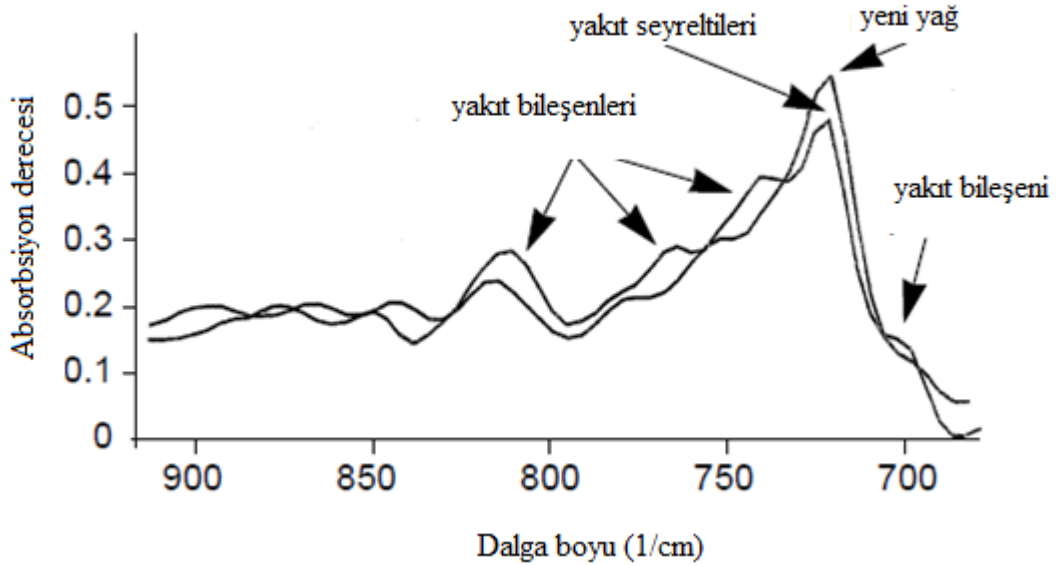
Çok zengin bir hava/yakıt karışımı yakıldığında is partikülleri oluşur. Yağ içindeki is partiküllerinin yükselmesi, yanma problemlerinin ya da yağ değişim aralığının uzamasının bir göstergesidir. Is partiküllerinin birikmesi ve kümelenmesi, yağlarda büyük bir problemdir; viskoziteyi yükseltir ve yağ filtresini ve yağ kanallarını tıkar. Is partiküllerinin FTIR analizinde kullanılmış ve kullanılmamış yağların absorpsiyon seviyeleri ölçülür ve karbon bağlarının olduğu dalga numaralarında bu iki yağın absorpsiyon seviyeleri arasındaki farka bakılır. Bu teknik, aynı zamanda “eğri altındaki net alan hesabı” olarak da tanımlanabilir. Is partikülleri genelde 2100 cm^{-1} dalga numaralarında FTIR analizi tarafında saptanabilirler. Şekil 1.3’teki grafikte, kullanılmış ve yeni yağ örneklerinin FTIR analizine göre oksidasyon, nitrasyon, sülfürizasyon, hidroliz ve is partiküllerinin absorpsiyon seviyesi belirlenmiştir. Buna göre 3500-3000 cm^{-1} dalga boylarında hidroliz, 1800-1100 cm^{-1} dalga boyları arasında kullanılmış yağda sırasıyla oksidasyon, nitrasyon ve sülfürizasyon gözlemlenebilir. [6]

Otomotiv yakıtları oktan, benzen gibi dallanmış yapıdaki alifatik bileşikler ve belli fiziksel özelliklere sahip olmak için karıştırılmış diğer bileşikler içerir. Buna bağlı olarak motorun çalışma şartlarına ve durumuna bağlı olarak motorda kısmi yanma sonucu yakıtın bileşiminde değişim gözlemlenebilir. FTIR analizleri, aynı zamanda yakıt seyreltilerinin gözlemlenmesinde önemli bir rol oynar. Yakıtın bağ yaptığı molekülleri, belli dalga numaralarında incelenir ve absorpsiyon seviyesine bakılır.

Şekil 1.4'te yakıtın 900 ile 700 cm^{-1} dalga numaralarında hangi noktalarda yakıtın bileşimine bağlı olarak absorpsiyon seviyesinin tepe yaptığı incelenmiştir ve yakıt seyreltileri yaklaşık 720 cm^{-1} dalga numaralarında gözlenmiştir. [6]



Şekil 1.3 : FTIR analizi ile yağdaki oksidasyon, nitrasyon, sülfürizasyon ve is partiküllerinin ölçülmesi. [6]



Şekil 1.4 : Yakıt seyreltilerinin FTIR analizi ile saptanması ve yakıt bileşenlerinin absorpsiyon seviyelerinin ölçülmesi. [6]

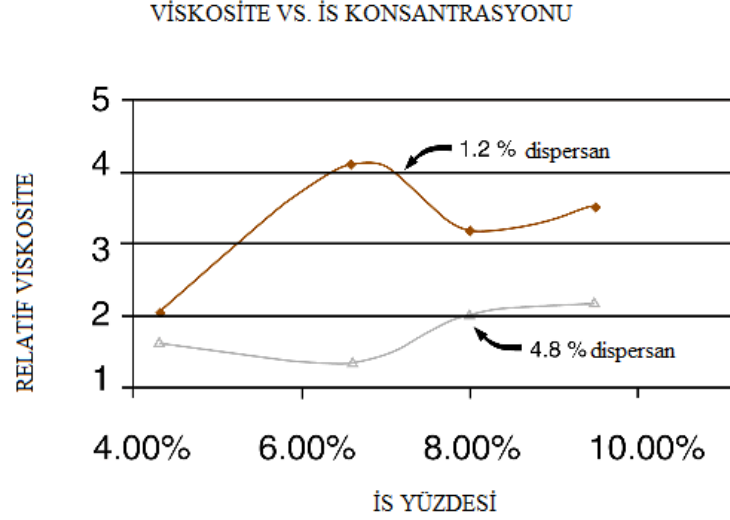
1.3. Yağın Yaşlanması Katı İis Partiküllerinin Etkisi

Motorlarda kısmi yanma sonucu oluşan katı is partikülleri C,H,O,N,S gibi atomlar ve bazı metaller içerir. Genelde motordan çekilen is partiküllerinde %90'a yakın miktarlarda karbon moleküllerine rastlanırken egzozdan çekilen is partiküllerinde bu oran %40'a kadar düşmektedir. Motordan çekilen is partiküllerinde az miktarlarda olsa da azot, kükürt ve oksijen gibi moleküller, yağın oksidasyon, nitrasyon ve sülfürizasyon gibi yaşlanmaya etki edecek prosesleri hızlandırır. Yağ içinde bulunan is partikülleri yağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişiminde çok aktif rol oynarlar. Yağın yağlama performansına düşürür ve yağın çok çabuk işlevliğini kaybetmesine neden olurlar. İis partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri de aynı zamanda yağın yaşlanmasında ve yağın akışkanlığı kaybetmesinde büyük rol oynarlar. [7]

1.3.1. Yağın Fiziksel Özelliklerine Etkisi

İis partiküllerinin yağ içinde bulunmasından dolayı fiziksel özelliklerini yitirmeye başlamış bir yağ zamanla fonksiyonlarını yerine getirememeye başlar. Bu da yağın viskozitesinin artmasına ve yağın pompalanamamasına, buna bağlı olarak yağın silindir yüzeylerini yağlayamamasına neden olur. Yağdaki antioksidan, anti-aşınma ve dispersan maddeleri yağın viskozitesinin artmasına engel olsa da is partiküllerinin yağ içindeki konsantrasyonunun yükselmesi ile beraber bu koruyucu maddeler tükenmeye ve anti-aşınma maddelerinin etkisi ihmal edilebilir konuma gelmektedir. Şekil 1.5'te yağın içindeki dispersan seviyesine bağlı olarak yağın relatif viskozitesinin is partiküllerinin yüzdesine göre değişimi görülmektedir. %5 civarında dispersan içeren yağda is partiküllerinin yüzdesine bağlı olarak bir viskozite yükselmesi görülmemektedir. [8]

İçinde katı is partikülleri bulunan yağın viskozitesindeki değişimler, partiküllerin morfolojik özelliklerine ve bu özelliklere bağlı olarak kimyasal ve fiziksel etkileşimler sonucu partiküllerin kümelenme derecesine bağlıdır. Küme halindeki partiküller hidrodinamik kuvvetler sonucu parçalandığında pıhtılaşmış şekilde daha kompakt bir yapı ortaya çıkar.

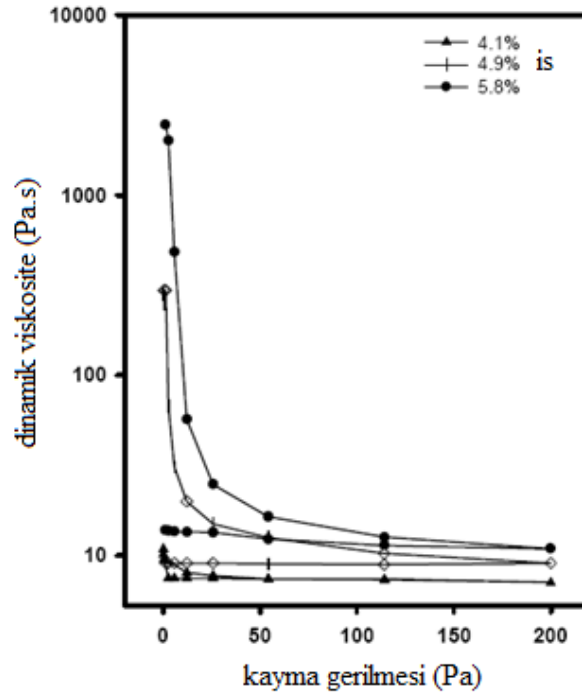


Şekil 1.5 : Yağın relatif viskozitesinin dispersan yüzdesine ve is konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi. [8]

Kümelenmeye uğrayan is partikülleri genelde yanma sonucu oluşan yüksek bağ kuvveti ile birleşmiş birincil seviyedeki partikülleridir. Bu partiküllerin kümelenmesi ile ikincil seviye partiküller oluşur. İkincil seviyedeki partiküllerin oluşumu durağan koşullarda gerçekleşir. İs partikülleri yağ içinde düzgün bir şekilde dağılmışsa belli hacimde daha az is partikülü bulunacağından bu noktalarda kümelenme daha az gelişir. Yani ikincil partiküllerin oluşma olasılığı, is partikülleri kötü dağılmış yağda daha yüksektir.

Yağın viskozitesi, kayma gerilmesinden bağımsız ya da bağımlı olarak gelişebilir. Selby (1998) tarafından yapılan bir çalışmada is partiküllerinin yüzdesine bağlı olarak farklı yağlarda yağın viskozitesinin değişimi ve kayma gerilmesine bağımlılığı incelenmiştir. Yüksek kayma gerilmelerinde (yaklaşık 10-20 Pa üzerinde) , yağın Newtonien bir akış sergilediği gözlenmiştir. (Şekil 1.6) Ancak is partiküllerinin yüzdesinin artması ile beraber kayma gerilmesinin düşük olduğu seviyelerde yağın viskozitesinde ciddi artışlar gözlenmiştir. Kayma gerilmesinin çok yüksek olduğu durumlarda is partiküllerinin yağın viskozitesine olan etkisi minimize edilmiştir. Yağın daha düşük viskozitelerde olduğu durumlarda akış Newtonien bir karaktere sahip olduğundan kayma gerilmesinden bağımsız gelişmiş ve kesme-deformasyon grafiği lineer olarak değişmiştir. Düşük is partikül konsantrasyonlarında viskozite değişimleri kayma gerilmesinden bağımsız olarak daha keskin görülmüştür. Ancak yüksek is partikül konsantrasyonlarında akış Non-Newtonien bir karaktere sahip

olacağından kayma gerilmesine bağlı olarak, kayma incelmesi oluşturacak düzeyde gelişir ve viskozite düşüğe geçmiştir. [9]



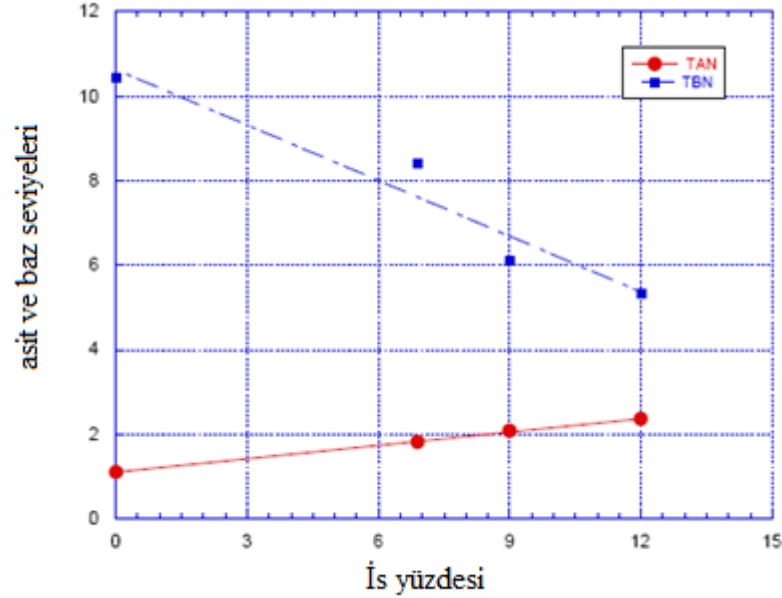
Şekil 1.6 : Farklı is partikül konsantrasyonlarında yağın viskozitesinin kayma gerilmesine bağlı olarak değişimi. [9]

Yağın viskozitesinin değişmesinde yağın sıcaklığının rolü çok büyüktür. Yağın sıcaklığının artmasıyla beraber viskozitesi düşer. Ancak yağ sıcaklığının artması, yağın içinde bulunan is partiküllerinin bağ yapma enerjisini artıracığından sıcak yağlarda kümelenme daha hızlı gelişir. Bu da yağın viskozitesinde artışa neden olur. Bu yüzden yaşlanan yağlarda sıcaklığın yaratacağı etkiler çok değişken olabileceğinden yağın normal çalışacağı bir optimum sıcaklığın seçilmesi büyük önem taşır. Yüksek viskoziteli yağlarda aşırı derecede kalınlaşma görülebilir. Durağan koşullarda çalışan yağlarda is partiküllerinin oluşturduğu katılaşma düşük sıcaklıklarda akma gerilmelerine neden olur. Akma noktası düşürücüler sayesinde bu etki geciktirilebilmesine rağmen is partiküllerinin konsantrasyonunun artması ile beraber çok daha düşük sıcaklıklarda kümelenmiş partiküllerin soğumasından dolayı oluşturacağı pıhtılaşmış kurum maddeleri akma noktasını düşürücü etki sağlar. [10]

1.3.2. Yağın Kimyasal Özelliklerine Etkisi

İs partikülleri bünyesinde bulunan azot, kükürt, oksijen ve hidrojen gibi moleküller, asit oluşumunda etkin rol oynarlar. Yağın oksijenle reaksiyonu sonucu asitler oluşur.

Bu asitler yağın yedek alkaliliğini de tüketeceğinden yağın yaşlanmasını hızlandırır. İş partiküllerinin konsantrasyonu arttıkça bünyesinde bulunan diğer bileşikler oksidasyon bölgelerini artıracığından yağın asitliği artar, baz seviyesi düşer. S.Aldajah ve diğ. (2006), motor yağı uzun süreli kullanıldıkça is seviyesinin ve asit seviyesinin lineer şekilde geliştiğini gözlemlemiştir.[11](Şekil 1.7)



Şekil 1.7 : Uzun süreli yaşlanan yağda is partiküllerinin konsantrasyonu ile asit ve baz seviyelerinin değişimi. [11]

Yağın asitleşmesi yağın kimyasal bileşiminde de değişime yol açar. İş partiküllerinin bünyesinde bulunan sülfür moleküllerinin yanma sonucu oluşan su molekülleriyle reaksiyonu sonucu oluşan sülfürik asit, yağın koruyucu maddelerinin çabucak tükenmesine ve kimyasal dengesini bozmasına etkir.

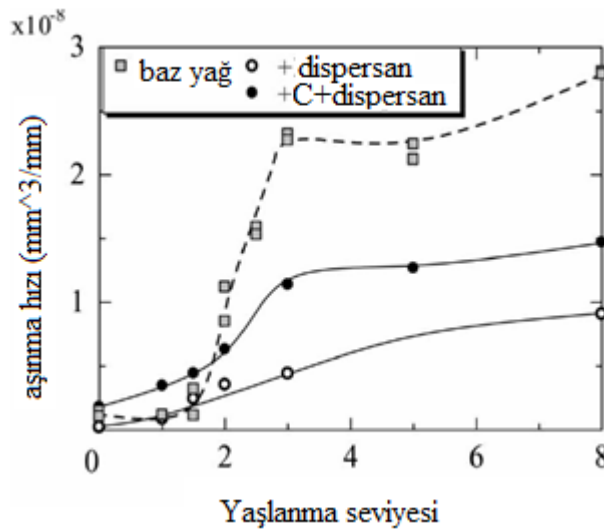
Yağı bu tarz etkilerden koruyan katkı maddelerinin yağda bulunma yüzdeleri çok önemlidir. İş partiküllerinin oluşturduğu asitler, antioksidanlar tarafından tutulabilir ancak her tutulan asitle beraber antioksidanların tükenmesi de yağın koruyucu özelliğinin azalmasının bir göstergesidir.

İş partiküllerinin etkisini azaltmadaki en iyi etkiyi sağlayan katkı maddeleri dispersanlardır. Dispersanlar, katı partiküllerin yüzeylerine tutunarak bu partiküllerin yağ içinde aktif rol oynamasını engeller. Dispersanların katı is partiküllerine tutunması sonucu partiküllerin kümelenmesi önlenir. Ancak yağ içindeki is miktarının artmasıyla dispersanların etkisi ortadan kalkar. Yüksek is miktarlarına

yaklaşıldıkça is partiküllerinin meydana getirdiği yağ yaşlanması daha belirgin görölür. Dispersanların yağın içindeki yüzdesinin artmasıyla yüksek is miktarlarındaki etki azaltılabilir ancak yüksek miktarda dispersanların oluşturduğu serbest amin moleküllerinden dolayı oluşan korozif etki yağın yaşlanmasında is partiküllerinden daha büyük rol oynamaya başlar. [8]

İs partiküllerinin yarattığı aşınma etkisini azaltan katkı maddeleri anti-aşınma maddeleridir. Bu maddeler bir anti-aşınma filmi oluşturarak is partiküllerinin yarattığı aşınma etkisini yavaşlatır. Ancak zamanla anti-aşınma filmi de dayanımını yitirip yırtılacağından is partiküllerin yarattığı aşınma etkisi bu filmin kırılmasından sonra daha da artar.

M. Masuko ve diđ. (2005) tarafından yapılan çalışmada katkısız yağlara katılan is partiküllerini represente eden bir karbon siyahının bir anti-aşınma maddesi olan ZnDTP yada ZDDP (inko-dialkiltriofosfat) miktarının aşınmaya olan etkisi incelenmiştir. [12] Oksidasyon yaşlanması sonucu bozulan anti-aşınma filminin performansında dūřuř, aynı zamanda yüzeyin sūlfürizasyonundan dolayı yüzeylerde korozif aşınma gözlenmiştir. Yařlanan yağlarda dispersan eklenmesi ile birlikte aşınmanın etkisi azaldığı, aynı zamanda dispersan moleküllerinin ZDDP maddesinin yaşlanmasını geciktirdiği ve buna bağlı olarak ZDDP'nin aşınma üzerinde daha aktif bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. (şekil 1.8)



şekil 1.8 : Katkısız yağlarda yaşlanmanın artması ile beraber is partikülleri ve dispersanların aşınmaya olan etkisi. [12]

1.3.3. Yağlama Performansına Olan Etkisi

Yağın yağlama performansı olarak görevi, yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınmaları önlemektir. Yağın yaşlanması ile beraber yağın performansı düşer. Yağın güvenli basınç ve sıcaklıkta temas eden yüzeylere aktarılması sürtünme ve aşınmanın gelişiminin yavaşlaması açısından büyük önem taşır. Motorlarda özellikle sürtünmeden dolayı oluşan mekanik kayıplar en çok piston segman ve silindir gömleği bölgesinde gözlenmektedir.

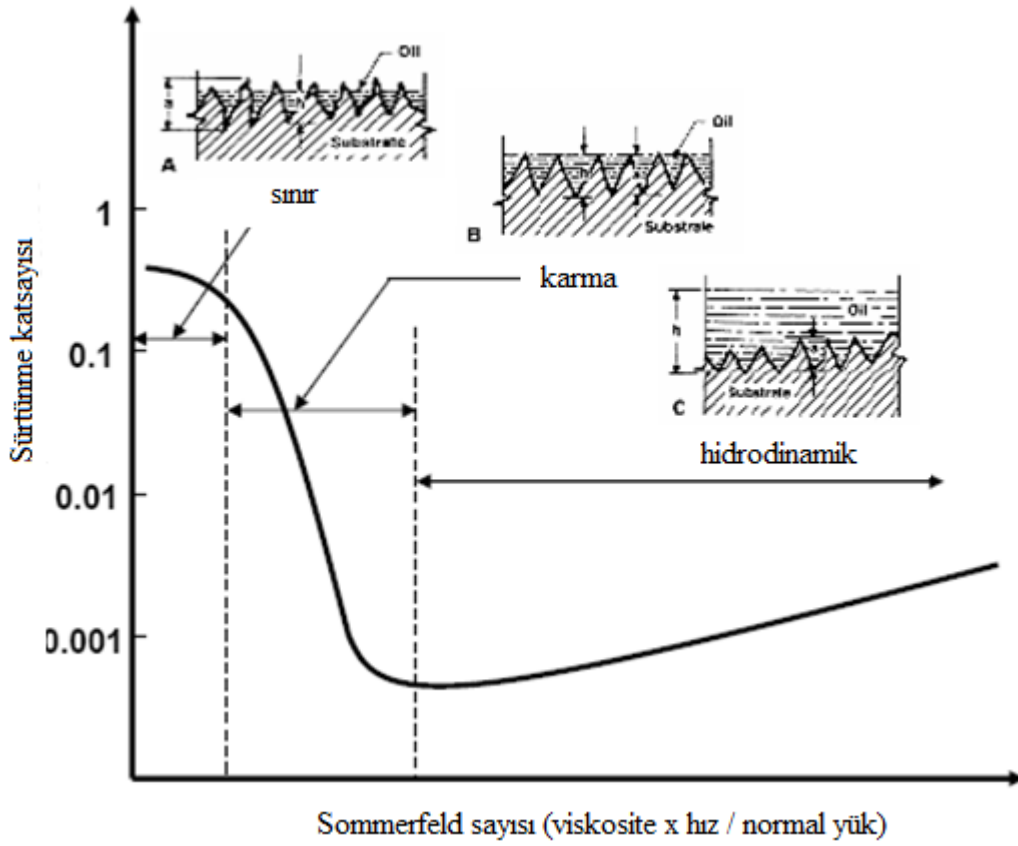
Pistonlardan silindirlere iyi bir ısı transferinin gerçekleşmesi için, minimum yağ tüketimi, uygun bir sızdırmazlık ve minimum yağ filmi kalınlığı olmalıdır. Motorlarda yağ filminin kalınlığını minimum tutan faktör yağ kontrol segmanıdır. Bu segman diğer piston segmanlarının arkasında yağ kaçaqlarını önlemek için kullanılır. Piston segmanı ve silindir gömleği arasında motor elemanlarını korumak açısından daima hidrodinamik yağlama mevcuttur. Hidrodinamik yağlamada yağ kalınlığı yüzey pürüzlülüğünden yüksek olduğundan yüzeylerin teması söz konusu değildir. Bu yağlama rejiminde piston ile silindir arasındaki yağ moleküllerinin kayma hızı yüksek, yüklemesi ise düşüktür. Yağ viskozitesindeki artışla beraber sürtünmede artış gözlenir. (bkz. Şekil 1.9)

İs partikülleri, yağlama koşullarına göre potansiyel bir sürtünme düzenleyici olarak yağlarda kullanılabilir. Bunun nedeni is partiküllerinin iç yapısının grafitle örtüşmesinden kaynaklanmaktadır. [13] Grafitler, katı yağlayıcılar olarak yaygın kullanılmaktadırlar. Karma ve sınır yağlama koşullarında grafitler, birbirleri üzerinde kayarak sürtünmeyi azaltıcı rol oynamaktadırlar. Bu yağlama koşullarında yağlanan yüzeylerin teması söz konusu olduğundan aşınma kaçınılmazdır. Sınır yağlama koşulları düşük kayma hızları ve yüksek yüklerde gerçekleştiğinden dolayı bu yağlama koşullarında motorun çalışması istenilmez.

S. Aldajah ve diğ. (2006) karma yağlama rejiminin hakim olduğu dört bilya yöntemi ile yapılan testlerde yağda is konsantrasyonunun artması ile birlikte sürtünme katsayısının düştüğünü gözlemiştir. [11] Green ve Lewis (2008) karma yağlama rejiminin daha hakim olduğu düzlem üstünde bilya testlerinde is partikülü yerine kullandıkları karbon siyahı ile %1 konsantrasyonda sürtünmenin azaldığını, bu değerden sonra daha yoğun is konsantrasyonlarında sürtünmenin progresif şekilde

arttığını, %2 konsantrasyondan sonra sürtünme katsayısının katkısız yağdan da üst seviyede bir değerde olduğu gözlenmiştir. [14,15]

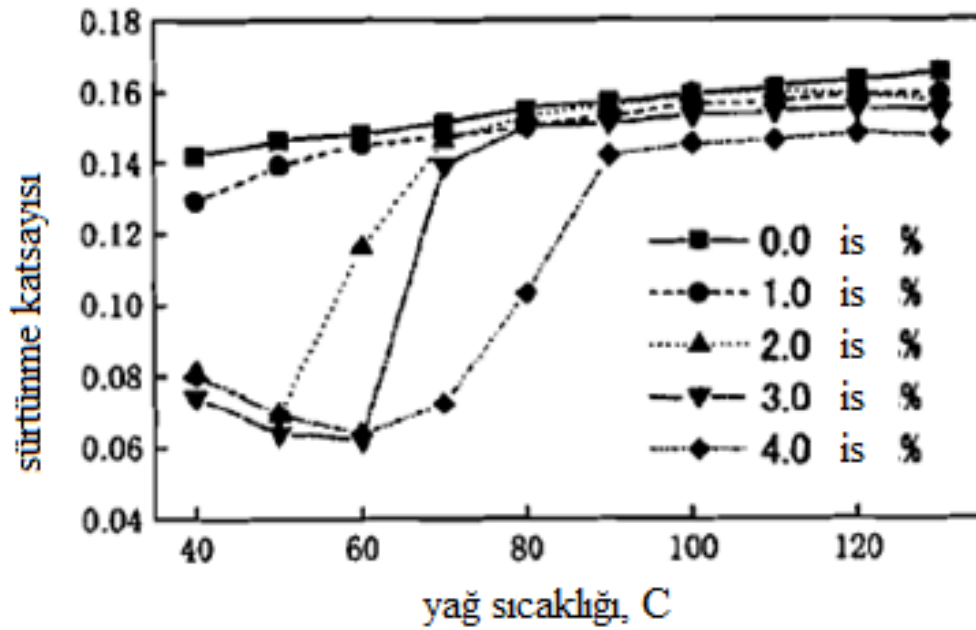
Yağlama koşullarının en belirgin şekilde açıklanması Stribeck eğrisi ile mevcuttur. Stribeck eğrisi, sürtünme katsayısının viskoziteye, kayma hızına ve yüke bağlı olan Sommerfeld sayısına göre değişimini gösterir. (Şekil 1.9) Karma ve sınır yağlama koşullarında yağın viskozitesindeki ve kayma hızındaki artışa bağlı olarak yükün azalması ile beraber sürtünme katsayısı azalmaktadır. Hidrodinamik yağlamada ise bu değerlerin değişimi ile beraber sürtünme katsayısı artmaktadır.



Şekil 1.9 : Stribeck Eğrisi. [16]

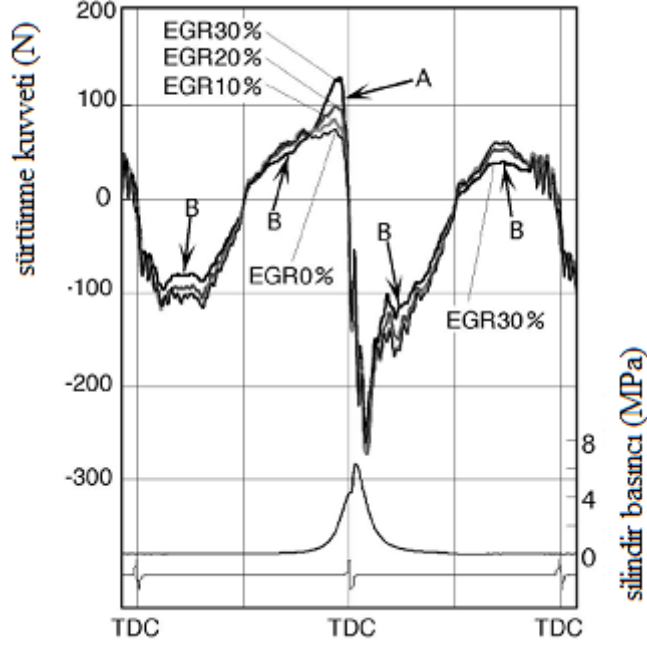
İs partiküllerinin konsantrasyonunun artması ile birlikte yağın viskozitesinde artış gözleneceğinden gerçek motorda görünen hidrodinamik yağlama koşullarına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve sürtünmenin artması beklenir. Ancak yağ filmi kalınlığının is partiküllerinin kümelenmesine bağlı olarak hidrodinamik yağlama için yetersiz kalmasından dolayı karma ve sınır yağlama koşullarına bir geçiş olacağından is partiküllerinin konsantrasyonunun artması ile birlikte sürtünme katsayısı düşebilir. Liu, ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada is partikülleri katılmış ve katılmamış

yağların sürtünme ve aşınma karakteristikleri incelenmiştir. [17] Yağ sıcaklığının değişimine bağlı olarak 40 ile 70°C yağ sıcaklıkları arasında sürtünme katsayısının belirgin derecede düştüğü gözlenmiştir. Karma yağlama rejiminin daha hakim olduğu disk üstünde silindir test sisteminde yağ filmine katılan is partiküllerin yoğunluğu arttıkça daha düşük sürtünme katsayısının elde edildiği, yüzeylerle temas eden is partiküllerinin bir katı yağlayıcı gibi davrandığı ve sürtünme katsayısının is partikülü içermeyen yağdan bile daha düşük bir değerde olduğu kanısına varılmıştır. (Şekil 1.10) Yağ sıcaklığı arttıkça viskozite düşmüş, ve sürtünme katsayısı artmıştır.

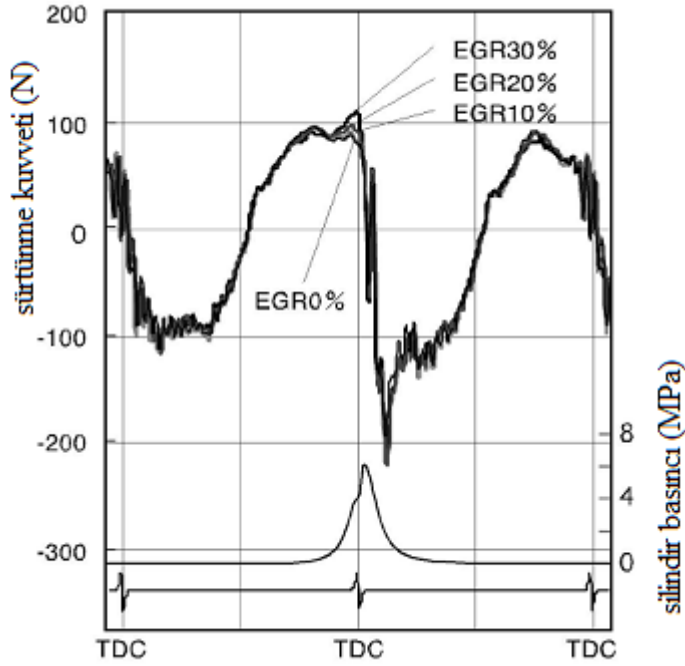


Şekil 1.10 : Sürtünme katsayısının değişik is miktarlarındaki yağların sıcaklıklarına göre değişimi. [17]

Sürtünme karakteristiklerini incelemek açısından yapılan bir diğer çalışmada ise değişik EGR seviyelerinde sürtünme kuvvetinin değişimi incelenmiştir. EGR bünyesinde bulunan is partiküllerinin sürtünme ve aşınmanın gelişmesi konusunda önemli rol oynadığı gözlenmiştir. Şekil 1.11 ve 1.12’de sürtünme kuvvetinin krank pozisyonuna ve silindir basıncına göre değişimi farklı EGR seviyelerinde çizilmiştir. 35°C sıcaklık ve 2000 dev/dak motor hızı parametreleri gibi daha hidrodinamik yağlama rejimi şartlarında, bünyesinde is partikülleri bulunduran EGR gazının yüzdesinin artmasıyla sürtünme kuvvetinin üst ölü noktalarda is partikülleri toplandığı zaman yükseldiği, is partikülleri çıkarılmış EGR gazının yüzdesinin artmasıyla sürtünme kuvvetinde büyük bir değişim gözlenmediği görülmüştür. [18]



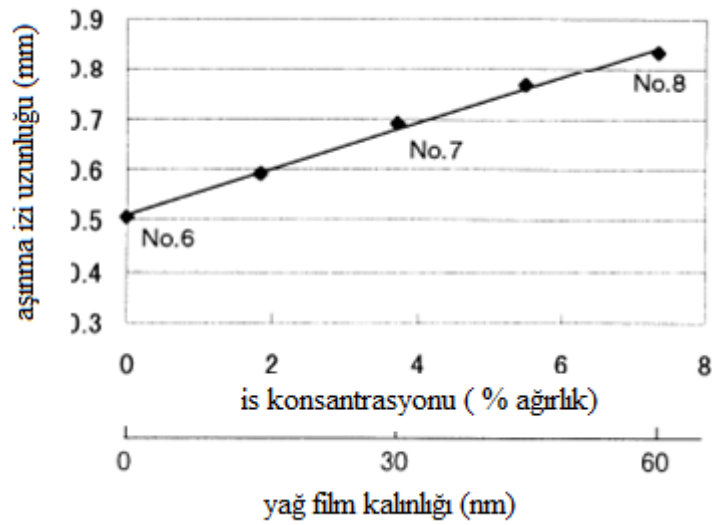
Şekil 1.11 : EGR yüzdesinin sürtünme kuvvetine etkisi. (is partikülleri dahil) [18]



Şekil 1.12 : EGR yüzdesinin sürtünme kuvvetine etkisi. (is partikülleri dahil değil) [18]

Motor elemanlarında temas eden yüzeylerde yüksek çalışma hızlarından dolayı aşınmanın gelişmesi kaçınılmazdır. Katı is partikülleri genelde çoğu malzemelere göre daha kompakt ve dayanıklı bir yapıya sahip olduğundan katı yüzeylerle temas ettiğinde aşınması çok zordur. İis partiküllerinin domine ettiği aşınma türü temel olarak abrazif aşınma, ikincil olarak da korozif aşınmadır. Yağ ile is partiküllerinin

karakterleri aynı olduğu zaman yağın içindeki is partiküllerinin artmasıyla beraber aşınma artar. Yağ filmi kalınlığı yüzey pürüzlülüğü ve is partiküllerinin çapından büyük olduğu zaman aşınma daha yavaş düzeyde gelişir. Yağ filmi kalınlığı azaldıkça aşınma hızlanmaya başlar. Ancak is partiküllerinin yağın viskozitesini artırmasıyla yağ film kalınlığının yükselmesinden dolayı bazı durumlarda yağ filminin kalınlığı is partiküllerinin yarattığı aşınma etkisini azaltacak derecede artar. Şekil 1.13'te yağ filminin kalınlığı ve is partiküllerinin yüzdesi arasındaki farka bağlı olarak oluşan aşınma izinin is partiküllerinin konsantrasyonunun artmasıyla beraber arttığı gözlenebilir.[19]



Şekil 1.13 : İS partiküllerinin yüzdesine bağlı olarak aşınma izinin gelişmesi. [19]

İS partiküllerinin zamanla okside olması da korozyonun oluşmasında önemli rol oynar. Gerek is partiküllerinin yağ içinde oluşturduğu, gerekse is partikülleri bünyesinde oluşan oksitlenmeler sonucu oluşan kimyasal bileşikler, temas yüzeylerinde kalıcı hasar bırakabilecek kadar tehlikeli bir aşınma yaratabilirler. Ayrıca zamanla piston segmanı ile silindir gömleği üstüne yerleşen ve aşınmayla oluşan talaş birikintileri de yağ akışını azaltır, yağ filmini inceltir. Bu şekilde yağ filminin incilmesiyle aşınmanın artması beklenir.

1.3.4. İS Partiküllerinin Özelliklerinin Etkisi

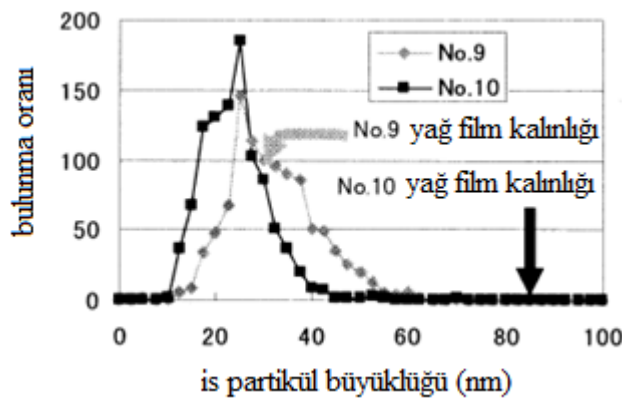
İS partiküllerinin morfolojik özellikleri, motordaki sürtünme karakteristiklerinin değişmesinde önemli kriterdir. Bu nedenle is partiküllerinin çapını,şekli,

yoğunluğunu ve ikincil partikül büyüklüklerini bilmek, motor elemanlarının aşınmasının nasıl geliştiği hakkında geniş bir yorum yapılması olanağını verir.

Motorlarda kısmi yanma sonucu oluşan is partiküllerinin çapının bilinmesi, yağ filmi kalınlığının aşılması durumunda aşınmanın hızlı gelişebileceğine yönelik fikir verir. Is partiküllerinin çapının büyümesi ile birlikte yağ film kalınlığı aşılabileceğinden daha büyük çaptaki is partikülleri katı yağlayıcı olarak görev yapmaya başlayacağından sürtünme katsayısını azaltıcı etki yaratacaktır. Yani sürtünmenin azalması istendiğinde daha büyük çaptaki karbon bileşikleri katı yağlayıcılar olarak motorlarda kullanılabilirler.

Birincil seviyedeki is partiküllerinin çapı genelde 20 ile 50 nm arasında değişmektedir. Is partiküllerinin kümelenme yeteneğine bağlı olarak ikincil seviyedeki partikül çapları 500 nm ye kadar çıkabilmektedir.[7] Is partiküllerinin yağ içinde boyutlarına göre bulunma yüzdeleri, histogram adı verilen diyagramlarla özetlenir. Histogram diyagramlarında apsis kısmında partikül boyutları, ordinat kısmında da bulunma yüzdesi ile sınırlama yapılır. Şekil 1.14'te iki farklı yağ örneklerindeki birincil seviye is partikül çapları gösterilmiştir. Buna göre birincil is partikül çapları çoğunlukla 10 ile 40 nm çaplarında değişik yüzdelerde bulunmaktadır. [20]

Is partikülleri, yüksek bağ yapma enerjisi bulunan karbon atomları içerdiğinden bağ yapmamış karbon atomları, diğer yüksek enerjili bağ yapmamış karbon atomları ile bağ yapmaya çalışırlar. Bu bağın kuvveti oldukça yüksektir ve bozulması çok zordur. Is partiküllerinin kümelenmesindeki temel etken budur. Özellikle is konsantrasyonu yüksek olan yağlarda kümelenme daha hızlı boyutlarda gelişir.



Şekil 1.14 : Farklı iki yağ örneğinde birincil is partikül çaplarının dağılımı. [20]

İs partiküllerinin kümelenmesini engellemek yağ içinde bulunan dispersanların görevidir. Dispersanlar is partiküllerinin yüzeylerine tutunup bağ yapmasını engellerler. Ancak is konsantrasyonunun yükselmesi ile partiküllerin kümelenmesinin önleyecek yeterli dispersan yağ içinde bulunamadığından belli bir is konsantrasyonundan sonra partiküller kümelenmeye başlar. [8]

İs partiküllerinin kümelenmesi ile ikincil partiküller oluşur. İkincil partiküllerin çapları bir mikrona kadar çıkabilmektedir. Bu durum kümelenmiş bir is partikülünün ne derecede tehlikeli olduğunun bir göstergesidir. Özellikle yağ filmi kalınlığının çok düşük olduğu yağlanan yüzeylerde abrazif aşınımı hızlandırıcı etkisi vardır. Kümelenmiş is partikülleri, yağ akışını engelleyen tortu maddelerini oluştururlar. Bu tortu maddeleri özellikleri filtrelerin tıkanmasında ve kirli yağın motor içinde sirküle edilmesinde etkili olurlar. Kümelenmiş is partikülleri aynı zamanda piston segman kıvrımlarına yerleşip segman ile silindir gömleği arasındaki sızdırmazlığın bozulmasına yol açarlar. Bu da motor yanma ürünlerinin daha yüksek miktarlarda yağın içine karışmasına ve yağın daha çabuk yaşlanmasına neden olur. Bu durum aynı zamanda motor veriminde ve pistondan silindire olan ısı transferinde düşüğe sebep verir.

İs partiküllerinin kümelenmesi ortam koşullarına çok bağlıdır. Ortam sıcaklığının yüksek olduğu koşullarda karbon atomlarının aktivasyon enerjileri artacağından bağ yapma istekleri ve yetenekleri artmaktadır, bu da kümelenmede artışa neden olur. Düşük sıcaklıklarda ise is partikülleri birbirinden bağımsız ve yağ içinde düzgün dağılmış şekildedir. Bu konumda yağ akışkanlık özelliğini büyük ölçüde kaybetmez. [21]

1.4. İS Partiküllerine Model Oluşturabilecek Kurum Maddeleri

Motordan çıkarıldığı noktaya göre is partiküllerinin birleşimi değişmektedir. Motorda ilk yanmanın olduğu noktadan is partikülleri elde edilmesi durumunda karbon oranları % 90 civarlarına yaklaşmaktadır. Ancak egzozdan alınan is partiküllerindeki karbon oranları %50'lere kadar düşmektedir. Yağın ilk is partikülleri ile kirlendiği nokta tam yanma odasında olduğu için yağa bu noktada giren is partiküllerinin karbon oranları %90'a yakındır. Ancak is partiküllerini bu noktada motordan çıkarmak oldukça güçtür. Pahalı ve ancak zor bulunan ekipmanlarla bu mümkündür. Bu yüzden is partiküllerinin yağ içindeki davranışını

taklit edebilecek bir kurum maddesi bulmak, bu tarz maliyet problemlerini düşürmek açısından uygun bir yöntemdir. [7]

İs partiküllerini taklit etmek açısından kurum maddeleri yapay yollardan üretilebilmektedir. Yapay kurum maddeleri, özel odalarda hazırlanmış grafit elektrotlardan kıvılcım oluşturma metoduyla, özel olarak hazırlanmış standart yanma alevi üretimi gibi özel üretim düzenekleriyle üretilirler. Bu yolla üretilen kurum maddelerinde partikül büyüklükleri ve çapları üretim metodunda yapılan modifikasyonlarla değiştirilip is partiküllerin morfolojik özelliklerine benzetilebilir. Ancak bu kurum maddelerinin yağ içindeki davranışı bu çalışmadaki temel parametrelerden biri olduğundan diğer kurum maddelerinin is partiküllerine benzer bir davranış sağlayamadığı bilinmektedir.

Bu noktada morfolojik açıdan is partikülleri ile çok benzeyen ve üretim metoduna göre kimyasal bileşimi ve yağ içindeki davranışı daha fazla is partiküllerine benzeyen bir kurum maddesi bulmak esastır. Bu amaçla karbon siyahlarının kullanımı daha yaygındır. Karbon siyahı, atom kafes yapısı açısından da is partiküllerine çok benzemektedir. Bu nedenle bu çalışmada is partiküllerinin yağ içindeki davranışına uygun bir karbon siyahı seçilmiş ve deneylerde uygulanmıştır.

1.4.1. Karbon Siyahı

Dizel motorunda oluşan is partiküllerini taklit edebilme yeteneğiyle karbon siyahı, aşınma ve yağın yaşlanmasını analiz eden deneylerde en çok kullanılan kurum maddelerinden biridir. Karbon siyahı, ağır petrol ürünlerinin ya da doğalgaz gibi yakıtların kısmi yanması ile üretilir. Amorfik bir yapıya sahip olmasından dolayı yüksek bir yüzey alanı / hacim oranına sahiptir, aktif karbon türlerine daha düşük olsa da bu değer is partiküllerinin yüzey alanı / hacim oranından daha yüksektir. Karbon siyahı en yaygın olarak taşıt lastiği üretiminde dayanımı artırıcı bir madde olarak kullanılır. Karbon siyahı, lastiğin abrazif dayanımını güçlendirir, aynı zamanda sırt ve alın kısımlarından yüksek ısıların çekilmesi ve tekerleğin termal zarardan korunmasıyla tekerleğin ömrünü artırmak için kullanılır. Karbon siyahının bir başka kullanım alanı da bilgisayar yazıcılarındaki tonerlerdedir. Karbon siyahı üretiminde en yaygın olarak kullanılan yöntem, hidrokarbon yağlarının kısmi yanması ile elde edimesidir. Fırınlanmış karbon siyahları, hidrokarbon yağlarının kısmi yanması ile elde edilir. Kanal karbon siyahları, hidrokarbonların kısmi yanması

ile oluşturulan difüzyon alevinden bir u-demiri üstünde soğurularak elde edilir. Termal karbon siyahları ise hidrokarbonların ısıll yollarla bileşenlerine ayrılması sonucu elde edilirler. Bu üretim yöntemleri karbon siyahının temel yapısını etkiler ve grafit benzemesini sağlar. Karbon siyahının kafes yapısı son derece komplekstir, kafes yapısı içinde lineer ya da dallanmış şekilde karbon atomlarının bir ya da üç boyutlu yapı oluşturmuş şekildedir. [22]

Karbon siyahı, sağlık açısından is partiküllerine göre daha büyük tehlikeler arz etmektedir. Işık geçirmeyen, tozlanmamış ve kuru bir kapalı kaptta saklanması, aynı zamanda oda sıcaklığında ve yüksek ısıllara maruz kalmadan muhafaza edilmelidir. Karbon siyahı hava akımıyla beraber çabuk yayıldığı için karbon siyahı ile vücudun temas etmemesi açısından vücudun önemli kısımlarının korunması önemlidir. İis partiküllerine göre daha aktif bir yapıya sahip olduğu için kanser riski taşımaktadır. Yüzeylere yapıştığında uygun bir filtre kullanılarak vakumlama yapılması ile yüzeyden çıkarabilirler.

Karbon siyahı vücuda temas etmesi ile deride kuruluk yaşanması gözlenir. Bu etki yoğun suyla sürekli yıkama ve uygun sabunla temizlenmesi ile giderilir. Su içermeyen pürel gibi temizleyiciler de kullanılabilir. Karbon siyahının nefesle içine çekilmesi durumunda da öksürme ve inhalasyon problemleri gözükmeştir. Ama bu problemler karbon siyahının zamanla vücuttan atılmasıyla uzun süreli bir etki sağlamamaktadır. Gözle temas hali durumunda da gözlerin sudan geçirilmesi ve birkaç kez göz kapaklarının açılıp kapanması ile bu etki hafifletilebilir. Bu nedenle karbon siyahı ile deney yaparken koruyucu maske ve temiz eldiven takılması gerekir.

Karbon siyahları da is partikülleri gibi katıldığı yağın kalınlaşmasını sağlar. Bu nedenle karbon siyahı greslerde yaygın şekilde kalınlaştırıcı olarak kullanılmaktadır. %15-22 civarı greslere katılırlar. Petrol yağından üretilen karbon siyahı içeren gresler çok yüksek ısıll dayanımlara sahiptirler. Termal açıdan düzgün bir stabiliteye sahip karbon siyahı içeren gresler 250°C' ye kadar kullanılabilirler.[22]

1.4.2. Karbon Siyahı ile İis Partiküllerinin Karşılaştırılması

Karbon siyahı ile is kelimeleri genelde dönüşümlü olarak kullanılabilirler. Ancak karbon siyahı ile is arasında benzerliklerin yanında farkların olduğu da görülür. Karbon siyahlarının %97'sinden fazlası asini form partikül şeklinde dizilmiş elementsel karbonlardan oluşmaktadır. İis partiküllerinin tipine göre karbon oranları

%40'lara kadar düşebilmektedir. [7]. Bu oran genelde egzozdan alınan is partikülleri için geçerlidir. Motordan alınan is örneklerinde ise karbon oranları %80-90 civarlarında değişim göstermektedir. Karbon siyahlarının %90'dan fazla karbon içerdiği düşünülürse bu açıdan karbon siyahı ile is partikülleri benzer noktalar taşırlar. İs partiküllerinde geri kalan elementler ise genelde oksijen, hidrojen, azot ve kükürt gibi maddelerdir. Motordan alınan örneklerde hidrojen ve oksijen elementlerinin bulunma oranı genelde %3-4, azot ve kükürt bulunma oranı ise %1-2 arasındadır. Karbon siyahlarında ise bu oranlar %1'i aşmamaktadır. Bu da is partiküllerinin daha polar yapıya sahip olduğunun bir göstergesidir.

Morfolojik özellikleri açısından is partikülleri ile karbon siyahları büyük benzerlikler göstermektedir. Birincil seviyedeki is partikül çapları 20-40 nm arasında değişmekte iken karbon siyahları da genelde 30-50 nm arasında partikül çaplarına sahip olmaktadır. [7,22] İki kurum maddesinin de kafes yapısı grafit benzemektedir.[23] Grafitin en belirgin özelliği iki boyutlu düzlemsel şekilde bir kafes yapısı olmasından dolayı levha şeklindeki grafit molekülleri birbirleri üzerinden rahatlıkla kayarlar. Bu da her iki maddenin de katı yağlayıcı olma potansiyelini göstermektedir.

Karbon siyahı ve is partiküllerinde bulunan diğer elementler genelde karbon partiküllerinin bünyesinde bulunmaktadır. Karbon siyahlarında kül miktarları is partiküllerine göre daha düşüktür. [7] Organik bileşikler özel çözücü biyolojik sıvılarla is partikülleri yüzeyinden çıkarılabilmektedir. Ancak karbon siyahının güçlü bir absorpsiyon özelliğinin olması bu tarz moleküllerin çıkarılmasına olanak vermemektedir. Bu yüzden karbon siyahı sağlık açısından is partiküllerine göre daha tehlikelidir ve özellikle karbon siyahı ile çalışırken vücudun korunması esastır.

1.4.3. Karbon Siyahının Seçimi

Karbon siyahını seçerken is partikülleri ile benzer özellikler taşıması özen gösterilir. Özellikle katı moleküller için önemli olan BET (Brunauer, Emmett, Teller) yüzey alanı ve porozite gibi parametreler, is partikülleri ile örtüşmelidir. BET yüzey alanı, gaz moleküllerinin katı yüzey üzerinde tutulması prensibine göre belirlenmektedir. Bu teori de aslında tek katmanlı tabakalar üstünde gaz moleküllerinin adsorpsiyonunu belirleyen Langmuir teorisinin bir uzantısı olarak çıkmaktadır. BET teorisinde katı yüzeylerde nitrojen moleküllerinin adsorpsiyonu esas alınır. Yağ

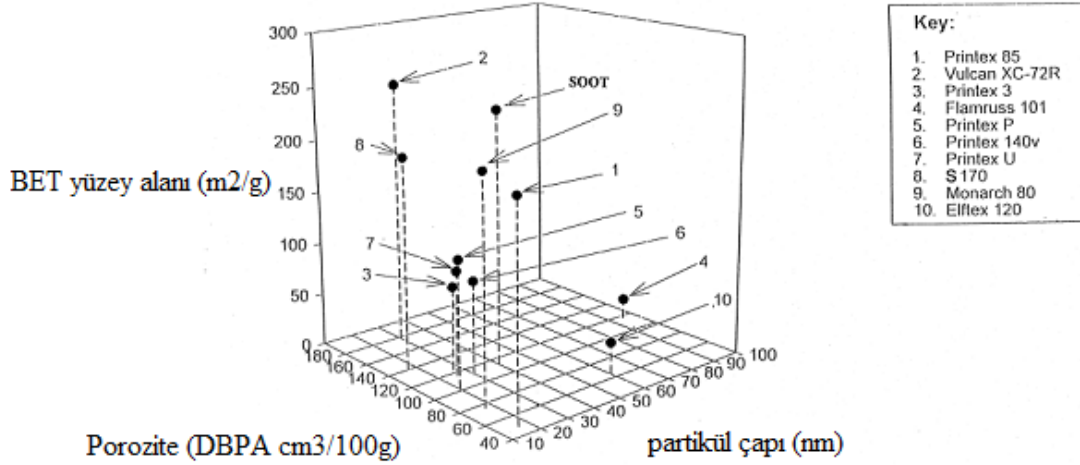
içindeki is partikülleri için bahsederek bu aslında yağ içindeki bazı moleküllerin ya da yanma sonucu oluşan bazı moleküllerin is partikülleri tarafından ne kadar tutulduğunun bir göstergesidir. BET teorisine göre yüzey alanı büyük olan moleküllerde, kimyasal reaksiyon hızları daha yüksek, adsorbsiyon dereceleri daha fazladır. Aktif karbonlarda BET yüzey alanı $3000 \text{ m}^2 / \text{g}$ civarlarındadır. Amorfik yapıya sahip olan karbon siyahlarında ise bu değer $60-700 \text{ m}^2 / \text{g}$ arasında değişmektedir. İS partikülleri ise genelde daha düşük bir BET yüzey alanına sahiptir.

Karbon taneciğinin yüzeyi gaz, sıvı ve katı maddeleri çeker ve yüzeyde ince bir film tabakası oluşturur, yani adsorbe eder. Karbon siyahının seçilmesinde etkili olan diğer bir parametre de porozite ya da gözenek büyüklüğüdür. Gözenek büyüklüğünün belirlenmesi, karbonun özelliklerinin anlaşılmasında oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Gözenekler silindirik veya konik şeklinde olabilir. Karbon ve adsorplanan moleküller arasındaki çekim kuvveti, molekül büyüklüğü gözeneklere yakın olan moleküller arasında daha büyüktür. Porozite değerlendirmesi karbonlarda DBP (di-butil pthalat) adı verilen bir dispersan türünün 1 g karbon tarafından absorbe edilmesi olarak tanımlanır. Genelde karbon siyahlarında bu değer fırınlanmış karbon siyahları için $0.6 \text{ cm}^3 / \text{g}$, difüzyon alevinde üretilen karbon siyahlarında ise $1.3-1.6 \text{ cm}^3 / \text{g}$ arasında değişim göstermektedir. [22]

Karbon siyahı seçerken aynı zamanda kimyasal bileşimi, birincil partikül çapları, polaritesine ve kümelenme derecesine göre is partiküllerine benzer özellikler de taşınması istenir. Bünyesinde daha çok oksijen bileşiği bulunduran karbon siyahları genelde daha polar bir davranış sergilerler.

Clague ve diğ. (1999) tarafından yapılan çalışmada dizel is partikülleri ile karbon siyahları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Analizlerde önce çeşitli karbon siyahları ile farklı noktalardan alınan is partiküllerinin kimyasal bileşimleri karşılaştırılmış ve is partiküllerinin daha polar özelliği olduğu kanısına varılmıştır. [7] Aynı çalışmada BET yüzey alanı, porozite ve partikül çapları açısından is partiküllerinin bulunduğu pozisyon seçilmiş, buna göre seçilen farklı karbon siyah türlerine bakılarak hangi karbon siyahının is partikülleri ile daha yakın parametreler içerdiği araştırılmıştır. (Şekil 1.15) İS partiküllerine en yakın parametreyi taşıyan Vulcan XC72R karbon siyahı ile Degussa S170 karbon siyahı, karbon yüzdesi ve polaritesi belirlenmesi açısından termogravimetrik analizle incelenmiştir. Daha sonra da bu maddeler, yağ içine iyi karışmış ve kötü karışmış şekilde katılarak is partiküllerinin gösterdiği

kümelenme dereceleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Bulunan sonuçlara göre termogravimetrik analizlere bakıldığında Degussa S170 örneğinin daha polar bir yapıda olduğu, ve daha düşük bir pH değeri içerdiği görülmüştür. (Şekil 1.16)



Şekil 1.15 : BET yüzey alanı, porozite ve partikül çapları açısından karbon siyahlarının is partikülleri ile kıyaslanması. [7]

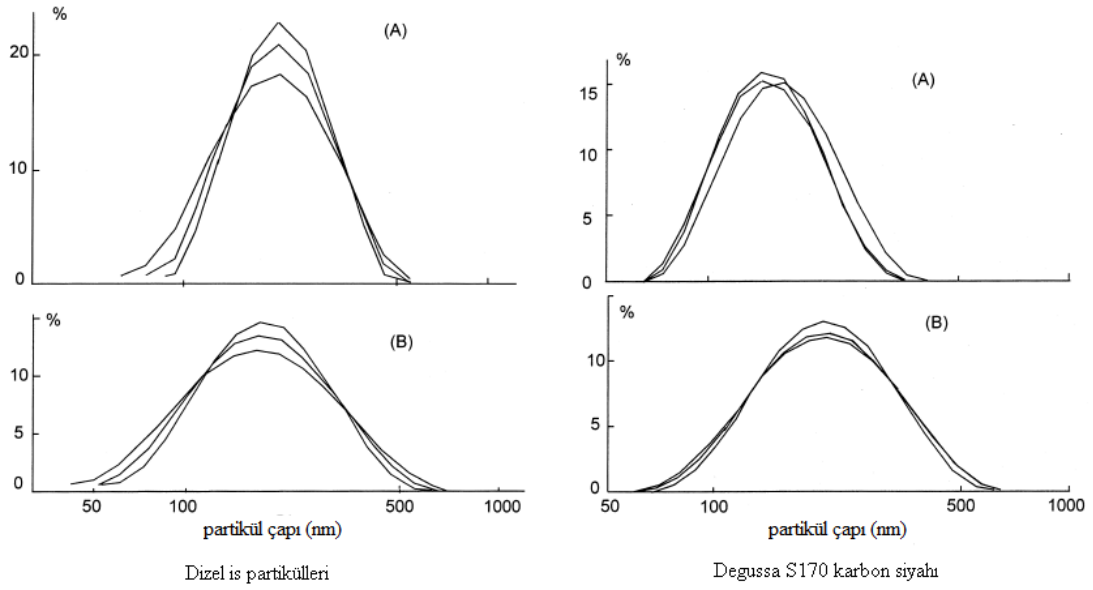
Çalışmada kurum maddelerinin yağ içine katılarak kümelenmesini ölçen analizler sonucunda, bir örnekte kurum maddeleri yağ içinde iyi karışmış iken diğer örnekte kötü karışmış durumdadır. Is partiküllerine bakıldığı zaman iyi dağılmış yağ örneğinde is partiküllerinin ortalama partikül çapları 150 nm civarında, en yüksek ikincil partikül çapının ise 350 nm civarında olduğu gözlenmiştir. Kötü dağılan yağda ise ikincil partikül çapları 200 nm civarında, en yüksek partikül çapı da 500 nm olarak gözlenmiştir. Degussa S170 örneklerinde ise iyi dağılmış yağ örneğinde kümelenme derecesi çoğu noktada benzerlik göstermekte, kötü dağılmış yağ örneğinde kümelenme derecesinin is partikülleri ile çok örtüşmekte olduğu görülmüştür. (Şekil 1.17)

Thermogravimetric analysis of soots and carbon blacks

Sample	Carbon content (%)	Ash content (%)	Volatile content (%)
Engine soot A	75.6	2.2	22.2
Extracted A	86.7	1.8	11.5
Engine soot B	79.8	1.8	18.4
Extracted B	88.4	1.2	10.4
Exhaust soot	57.7	27.1	15.2
Extracted	35.1	53	11.9
Furnace black: XC72R	98.8	0.9	0.3
Channel black: S170 ^a	94.8	0.02	5

^a Courtesy Degussa Ltd.

Şekil 1.16 : Is partikülleri ile çalışmada seçilen iki farklı karbon siyahının termogravimetrik analiz sonuçları. [7]



Şekil 1.17 : İs partikülleri ile Degussa S170 karbon siyahının (A) iyi karışmış yağda, (B) kötü karışmış yağda kümelenme dereceleri. [7]

Bu çalışmadan yola çıkarak deneye en uygun olarak kullanabileceğimiz karbon siyahının Degussa S170 olduğuna karar verilip sipariş edilmiştir. Çalışmada is partiküllerinin yerine karbon siyahları yağ içine karıştırılıp testleri yapılacaktır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında motor kısmından elde edilmesi güç ve maliyetli olduğundan kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından is partiküllerinin yerine model oluşturabilecek bir kurum maddesi aranmıştır. Bu çalışma için en uygun karbon siyahı Degussa S170 olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın amacı, kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından is partiküllerini taklit edebilecek bir karbon siyahının yağı yaşlandırması ile birlikte motor sürtünme karakteristiklerine etkisini incelemektir. İs partiküllerinin yağı yaşlandırması, yağın viskozitesini değiştirmesi ile olmaktadır. Yağın yaşlanması, is ile birlikte bir çok farklı faktörlere bağlı olduğundan bu noktada yağın yaşlanmasında sadece is partiküllerinin etkisi incelenmiştir. İs partikülleri ile karbon siyahı, grafitte benzer bir iç yapıya sahiptir. Bu da sürtünme açısından iki kurum maddesinin de benzer özellikler taşıması gerektiğini gösterir. Motor sürtünme karakteristiklerine etkisinin anlaşılması için bir bench test düzeneği üstünde segman ve gömlek arasındaki sürtünmeyi incelemek açısından karbon siyahı belli konsantrasyonlarda katkısız yağlara katılmış, belli bir süre çalıştırdıktan sonra sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısına bakılarak karbon siyahının etkisi araştırılmıştır. Bu sistem, motor şartlarının ayrı şekilde kontrol edilebildiği ve gerçek motor parçalarının kullanıldığı

bir test sistemidir. Bu yüzden sistem, gerçek motor parçalarının çok kullanılmadığı diğer standart sürtünme ve aşınma testlerine göre daha gerçekçi sonuçlar verecektir. İs partikülleri ile karbon siyahları arasında bileşiminden dolayı bazı farklılıklar mevcuttur. İs partiküllerinin daha polar yapıya sahip olması, bu maddelerin karbon molekülleri yanında karbon siyahına göre daha çok hidrojen, oksijen, azot ve kükürt gibi maddeler içerdiğini gösterir. Yağ içindeki davranışı karakterize etmesi açısından karbon siyahının BET yüzey alanı ve porozite değerlerinin is partiküllerine daha yakın olmasına dikkat edilmiştir. Ama bu değerler de karbon siyahının yağın içindeki davranışını incelemek açısından yeterli kalmayabilir. Bu nedenle karbon siyahının yağın yaşlanmasına etkisini incelemek açısından belli sürelerde çalıştırılan karbon siyahı içeren yağ örneklerinin yağ analizleri daha doğru sonuçlar verecektir.

Deneyin son kısmında Ford Otosan A.Ş.'den temin edilen ve Ford Transit taşıtlarında kullanılan Opet 5W30 gerçek motor yağları test edilmiştir. Yağlar, hiç kullanılmamış ve 7250 ile 15000 km'de kullanılmış yağlar halinde üç farklı numune şeklinde alınmıştır. Bu noktada bu yağlar, yeni bir silindir gömleği üstünde çalıştırılmış ve bu yağların gömlek yüzeyinde yarattıkları etkiler sürtünme açısından incelenmiştir. Kullanılmış yağlarda is partikülleri dışında farklı kimyasal reaksiyonlar ve mekanizmaların da sürtünme katsayılarına etkisi olacağından bu noktada sadece yağın yaşlanmasıyla birlikte sürtünmenin nasıl değiştiği yorumlanmıştır.

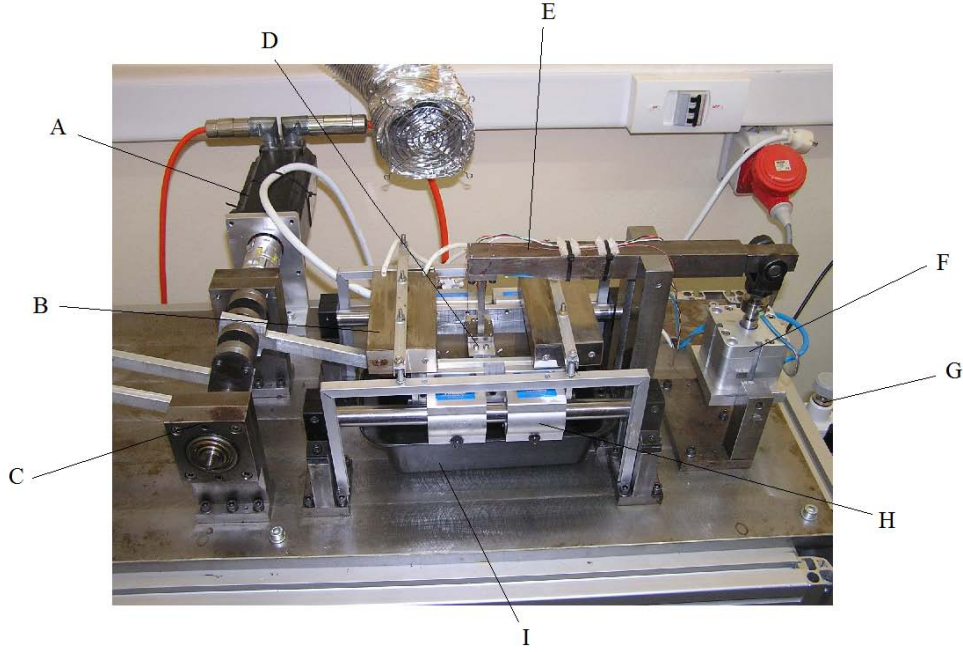
2. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYİN HAZIRLANMASI

2.1. Deney Düzenegi

Deneyde sürtünme etkisini incelemek amacıyla bench test düzenegi ile çalışılmıştır. (Şekil 2.1) Bu sistem Akalın ve Newaz (1998) tarafından geliştirilen bir test sistemidir.[24] Bu test sisteminde gerçek motordaki segman ve gömlek teması ve sürtünmesi simule edilmektedir. Sistemde silindir gömleği, piston segmanları ve yağların farklı çalışma koşullarında test edilmesi mümkündür. Sistem Stribeck Eğrisinin pratikte bir uygulaması şeklinde tasarlanmıştır. Sistemde Sommerfeld sayısına etkiyen kayma hızı, normal yük ve yağın viskozitesi gibi parametreler sistem üzerinden değiştirilebilmekte bir program yardımıyla sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve yükleme değerleri elde edilebilmektedir. Silindir gömleği bir hazne içinde vidalarda hazneye bağlanmıştır. Bu düzenleme, silindir gömleğinin hızdan dolayı hazne içinde yer değiştirmesini ve deneylerde kayma hızına bağlı hatalı sonuç çıkma olasılığını engeller. Silindir gömleğini tutan bu hazne, lineer pozisyonda rahat hareket etmesi için sıcaklığa dayanıklı yataklarla yataklanmıştır. Haznenin alt ucu, bir biyel mekanizması oluşturacak şekilde krank mili mekanizmasına bağlanmıştır. Gömleğin hızı doğru akımla çalışan bir servo elektrik motoru ile kontrol edilmektedir. Gömlek ile segman arasındaki temas kuvveti, bir yükleme kolu ve buna bağlı regülatörle kontrol edilen bir hava silindiri ile sağlanmaktadır.

Gömleğin hareket etmesiyle beraber sistemde atalet kuvvetlerinin dengelenmesi gerekir. Bunun için de krank mili mekanizmasının arkasına karşı ağırlıklar eklenmiştir. Sistemde ikincil harmonik atalet kuvvetlerini de dengelemek amacıyla biyelle 180° açı yapacak şekilde iki karşı piston bulunmaktadır. Daha ağır silindir gömleklerini dengelemek için ekstradan sisteme ek karşı ağırlık eklenebilmektedir. Krank mili kollarında ise karşı ağırlıklar bulundurularak dönme atalet kuvvetleri dengelenmiştir.

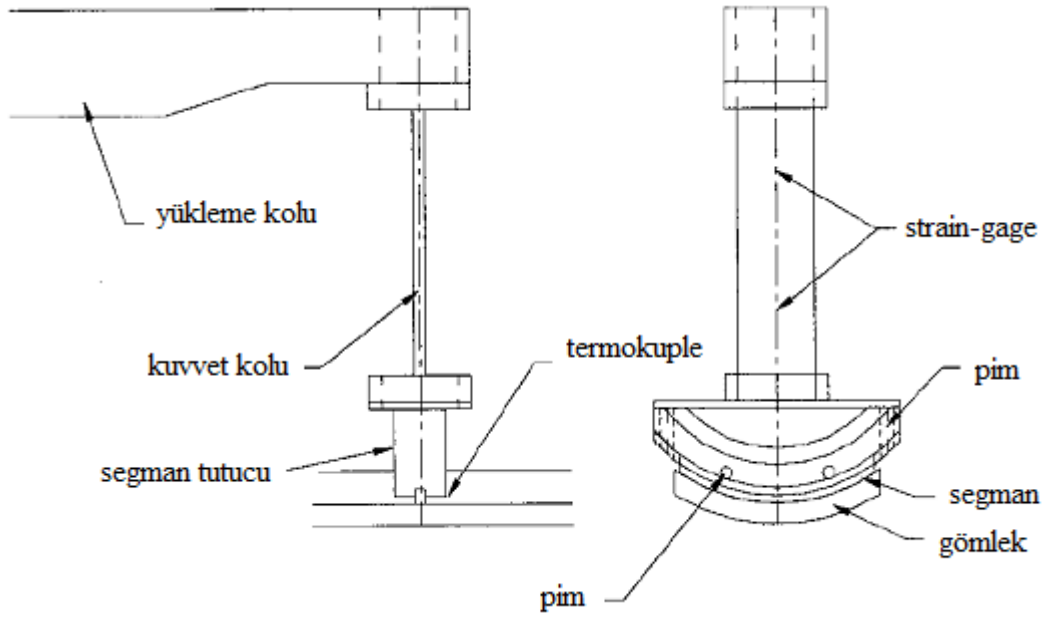
Krank milinin dönme hızı bir servo motoru ile ayarlanır. Krank açısı ve segman pozisyonu ise bir kodlayıcı ile ölçülmektedir. Dönme hızı sinyali ise bir servo sürücünden alınmaktadır. Yüzey sıcaklığı ise segman tutucuya bağlanmış bir termokuple ile ölçülmektedir. Bir ısıtıcı sistemi ile yüzey sıcaklığı 100°C'ye kadar artırılabilir.



Şekil 2.1 : Bench test sistemi: (A) servo motoru; (B) ısıtıcı; (C) krank mili mekanizması; (D) segman tutucu; (E) yükleme kolu; (F) yük sensörü; (G) yükleme valfi; (H) gömlek tutucu ;(I) Karter

Yağlayıcının akış hızı bir şırınga pompası ile kontrol edilmektedir. Akış hızı 0.2µl/h ile 500 ml/h arasında +/- 0.2 hassasiyetle ayarlanabilmektedir. Yağ, 60 ml'lik bir şırınga içinde muhafaza edilmekte ve bir hortum sayesinde yükleme kolunun altından silindir gömleği üzerine akacak şekilde akmaktadır. Fazla yağ ise silindir gömleğinin bulunduğu hazne altında bulunan bir delik ile kartere alınmaktadır.

Segman tutucu tasarımı, piston segman ve silindir gömleği arasında bir temas yüzeyi oluşturmak amacıyla yapılmıştır. (Şekil 2.2) Gerçek piston ve segman parçaları kullanılmıştır. Segman tutucu üzerinde bulunan iki pim sayesinde segmana yükleme yapılır. Pimler segmana bastırarak ve segmanın elastik davranışı göz önünde bulundurularak segman ve gömlek arasındaki temas yüzeyi artırılır. Segmanın tutucu üstünde serbest hareket etmesine izin verilir.



Şekil 2.2 : Piston segmanı ile silindir gömleğinin birbirine teması. [24]

Segman tutucusu ise yüklem koluna bir manivela ile bağlıdır. Bu manivela üzerinde de segman ile gömlek arasındaki sürtünme kuvvetlerini ölçmek için strain gage devreleri bulunur. Bu devreler ısıya dayanıklıdır. Manivela üzerindeki gerilmeler elastik bölgede gerçekleştiği için bu devreler sürtünme kuvvetine bağlı bir voltaj üretirler. Uygulanan dinamik normal yük ise yüklem kolu üzerinde bulunan bir sensör ile ölçülmektedir. Strain gage ve yük sensörlerinden gelen sinyaller bir sinyal düzenleyici tarafından yükseltilir. Bir veri toplayıcısı ile elde edilen datalar toplanır ve bilgisayar üzerinde proses edilir. Bilgisayarda bulunan MATLAB programı yardımıyla sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve yük değişimleri hesaplanmaktadır. Bu deney düzeneğinin özelliği, büyük stroklarda çalışmak için simüle edilmiş olmasıdır. Bu da gerçek motordaki segman – gömlek sürtünmesine yaklaşmak için bir yöntemdir. Sistemde maksimum dönme hızı 900 dev / dak, maksimum çalışma sıcaklığı 100, maksimum normal yük ise 360 N olarak belirlenmiştir.

2.2. Deneyin Hazırlanması

Deney hazırlanırken Degussa S 170 karbon siyahı örneklerinden % 4 ağırlık oranında (yaklaşık 8 g), 92 g'lık Opet 15W 40 katkısız yağı ile karıştırılıp ilk örnek hazırlanmıştır. Daha sonra bu % 4'lük örnek üzerinden 30 g alınıp 30 g katkısız yağı ile seyreltilip %2 ağırlık oranında yeni bir yağ örneği oluşturulmuştur. Yeni yağ

örneğinden de 20 g alınıp 20 g katkısız yağı ile seyreltilmesiyle % 1 ağırlık oranında yeni bir yağ örneği elde edilmiştir ve deneyde bu örnekler kullanılmıştır. Aynı zamanda her yağ örneği için deney matrisleri oluşturulmuş ve değişik viskozite, yük ve hızlar altında sürtünme katsayısının nasıl değişime uğradığı gözlenmiştir. Her 20°C ve 70°C sıcaklık değerleri için 300,500 ve 700 dev/dak dönme hızlarında 80,160,240 ve 320 N normal yük değerlerinde sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Enjektörden gömlek üstüne akıtılan yağın debisi 2.5 ml/h olarak ayarlanmıştır. Aşağıdaki çizelgede deney matrisinin nasıl oluşturulduğu gösterilmiştir. Matris üstünde belirtilen yük ve hız parametreleri, 20°C ve 70°C de uygulanan parametrelerdir. (+) sembolleri çalışılan parametreleri, (-) sembolleri de çalışılmayan parametreleri göstermektedir.

Çizelge 7.1 : Deney Matrisinin oluşturulması

Dönme hızı (dev/dak)	Normal Yük Değerleri (N)			
	80	160	240	320
300	-	+	+	+
500	+	+	+	+
700	+	+	-	-

Test sistemi üstünde ilk çalıştırma katkısız yağı ile yapılmıştır. 20°C’de matriste belirtilen değerlerde sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Bu sıcaklık değerinde yağlama rejimi genellikle hidrodinamik yağlama rejiminde kalmaktadır. Daha sonra ısıtıcı vasıtasıyla sıcaklık 70°C’ye çıkarılmıştır ve bu noktada yağlama rejimi değişmiş ve artık karma yağlama rejiminde seyredilmiştir. Bu sıcaklık değerinde de deney matrisinde belirtilen değerlere göre sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Daha sonra bu süreçte kullanılan silindir gömlek örneğinin de yüzey pürüzlülüğü azaltılmaya ve sürtünme katsayısı belli değerde sabit tutulmaya çalışılmıştır. Yaklaşık 4 saatlik bir alıştırma süresinden sonra sürtünme katsayısı sabit bir değerde kalmıştır. Bu değeri sabitlemenin önemi, karbon siyahı katılan yağlarda yağlama rejiminin değişimine göre sürtünme katsayılarını karşılaştırmayı kolaylaştırmaktır ve

deneyde hata oranını azaltmaktır. Sürtünme katsayısının sabit kaldığı değerlerde yeniden 70°C için deney matrisinde belirtilen değerlerde sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Çünkü 4 saatlik alıştırma periyodundan sonra alınan değerler sürtünme katsayısı daha stabil değerlerde kaldığı için daha az hata oranına sahip sonuçlar verecektir.

Bu şekilde katkısız yağ ile yapılan prosesler, aynı şekilde % 1, % 2 ve % 4 karbon siyahı içeren yağlarla da gerçekleştirilmiştir, daha sonra tekrar katkısız yağa dönülerek silindir gömleği yüzeyinde bir tribofilm oluşturup oluşturulmadığı araştırılmıştır.

Deneyin ikinci aşamasında katkılı yağlar üzerinde karbon siyahının etkisi incelenmiştir. Bu aşamada katkılı yağlara sırayla %1, %2 ve %4 konsantrasyonlarında karbon siyahları eklenerek katkılı yağlar üzerinde sürtünme testi yapılmıştır. Bu deneyde yeni bir silindir gömleği ve segman seçilmiştir. Yeniden 4 saate yakın katkılı yağ ile birlikte bir alıştırma periyodu yapılarak sürtünme katsayısının değişimi incelenmiş, karbon siyahı içeren yağlar ile bir saatlik çalıştırmalar yapılarak sürtünme katsayısının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. 25°C de alınan değerlerle hidrodinamik yağ rejimindeki sürtünme değişimlerine, 70°C alınan değerler ile de karma ve sınır yağlama rejimindeki mekanik değişimler incelenmiş, daha sonra tekrar katkılı yağa dönülerek bir tribofilm oluşma ihtimaline ve bu filmin yüzeyden sökülme ihtimaline bakılmıştır.

Deneyin üçüncü aşamasında gerçek motor yağları ile deneyler yapılarak sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. Burada amaç yağın uzun süreler çalışması ve daha çok yaşlanması ile sürtünme katsayısının nasıl değiştiğini incelemektir. Burada is partiküllerinin dışındaki diğer faktörlerin de sürtünme katsayısı üzerine etkilerinin görülmesi beklenmiştir. 0 km de hiç kullanılmamış gerçek motor yağı ile 7500 km ve 15000 km çalışmış motor yağları birbiri ile kıyaslanmış ve sürtünme katsayısı üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Bu noktada tekrar 0 km deki gerçek motor yağı ile çalıştırılarak bir tribofilm oluşma ihtimaline ve varsayılan bu filmin sökülme ihtimaline bakılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Katkısız yağ sonuçları

Deneyleerde kullandığımız karbon siyahının da bu noktada is partikülleri gibi yağın viskozitesine etkimesi, yüzeyle temas halinde olduğu yağlama rejimlerinde ise mekanik değişimler yaratması beklenmiştir.

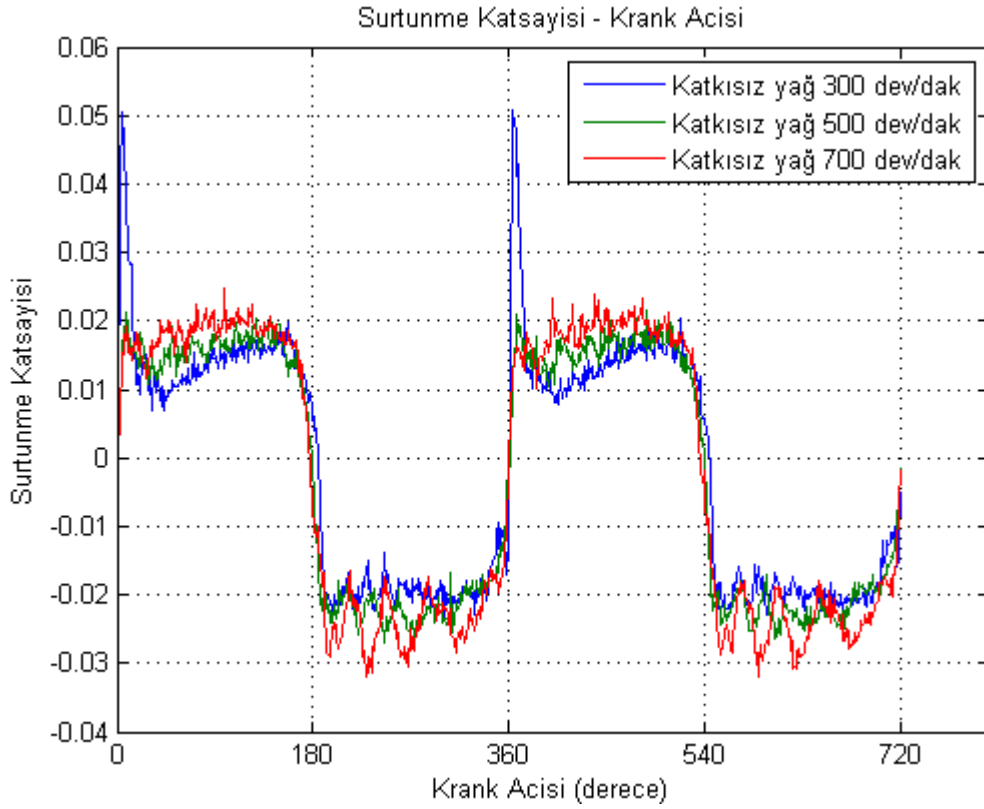
Test sonucu olarak verilen grafiklerde sürtünmenin pozitif değerlerde olduğu durumlarda üst ölü noktadan alt ölü noktaya, sürtünmenin negatif olduğu değerlerde de alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru bir gömlek hareketi mevcuttur. Sürtünme grafiğinin ölü noktalarda artan parabol şeklinde değişmesi ile ölü noktalarda hidrodinamik yağlama rejiminin gerçekleştiği, azalan parabol şeklinde gerçekleşmesi ile ölü noktalarda karma yağlama rejiminin hakim olduğu, sürtünme katsayısı 0.1 den üst seviyelere geliyorsa ve sürtünme katsayısının değişimi azalan bir parabol şeklinde ise o bölgede sınır yağlama rejiminin hakim olduğu söylenebilir.

Çalışmada 5 önemli parametre gerek yağlama rejiminin değişmesi, gerek de üst ve alt ölü noktalarda farklı yağlama rejimlerinin oluşmasından dolayı sonuçlarda tartışılmıştır. 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yük parametreleri, hem üst hem de alt ölü noktada karma yağlama rejimini karakterize ettiğinden dolayı standart çalışma parametresi olarak belirlenmiştir ve yapılan katkısız yağ alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotları bu parametrelerde yapılmıştır. 70°C sıcaklık, 300 dev/dak ve 320N normal yük parametreleri hem üst hem de alt ölü noktada sınır yağlama rejimini temsil ettiğinden ve bu noktada yüzeyler arası temasın yoğun gerçekleşmesinden dolayı mekanik etkilerin en belirgin görülebileceği noktalardan biri olarak bu parametrelerde alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. 20°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N normal yük değerlerinde is hem üst hem de alt ölü noktaya doğru giderken hidrodinamik bir yağlama rejimi görülmektedir. Bu rejim özellikle karbon siyahı içeren yağlardaki viskozite değişimlerini görmek açısından seçilmiş bir parametredir. 20°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N normal yük parametrelerinde özellikle üst ölü noktalarda karma yağlama rejimi, alt ölü noktalarda ise karma

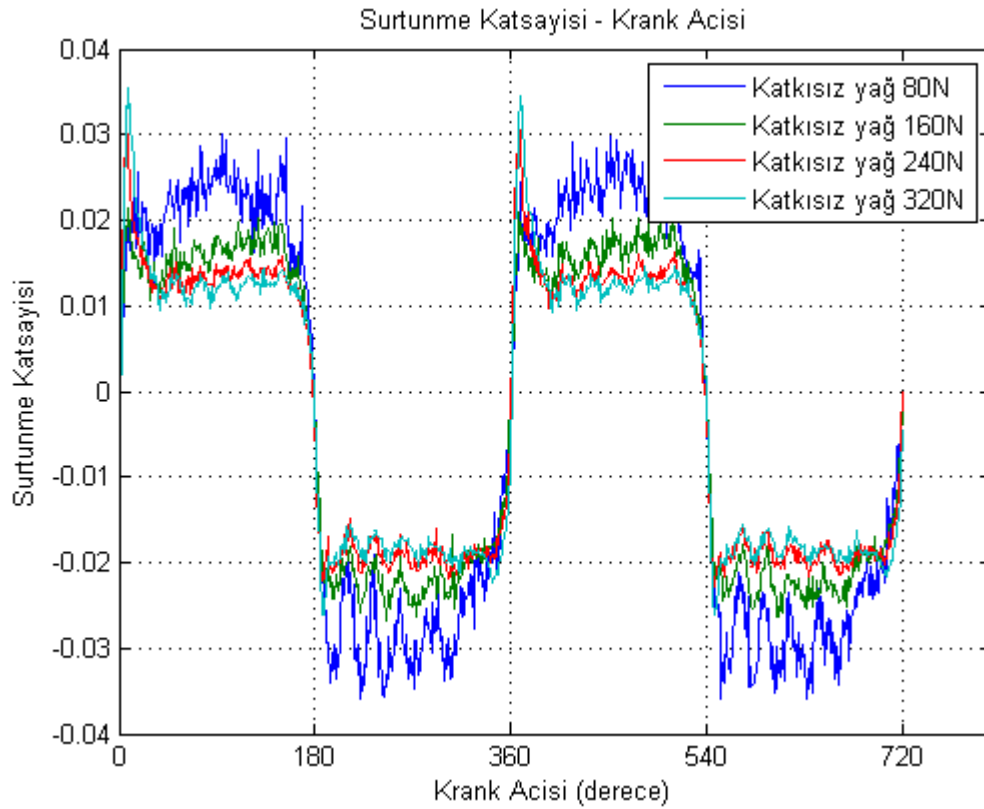
yağlama rejimi ile hidrodinamik arasında değişebilen bir rejim olması açısından seçilmiş bir parametredir. 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N normal yüklerde ise ölü noktalara yaklaşırken karma yağlama rejiminin hidrodinamik yağlama rejimine doğru geçişin yaşandığı parametrelerdir. Özellikle gerek karbon siyahından gelen gerek de yüzey pürüzlüğünden dolayı ölü noktalara doğru meydana gelen yağlama rejiminin değişimlerini görmek açısından bu parametrelerdeki sürtünme katsayılarını incelemek önemlidir.

Deney sonuçlarında ilk katkısız yağ ile çalışırken alıştırma periyodunun yapılma amacı, karma bir yağlama rejiminde seyredildiği için yüzey temasının olduğu noktalarda yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve sürtünme katsayısının sabitlenmesi hedeflenmiştir. Çünkü yüzey pürüzlülüğü sürtünme katsayılarını önemli derecede değiştirmektedir. Daha sonra %1 karbon siyahı içeren yağ ile alıştırma periyodu yapılmış katkısız yağların değerleri karşılaştırılarak karbon siyahının viskozitede ve yüzeylerde mekanik değişimlere olan etkisi görülmeye çalışılmıştır. %1 Karbon siyahı içeren yağların 70°C sıcaklık 500 dev/dak 160N normal yük parametrelerinde 1 saatlik çalıştırma periyodu yapılarak sürtünme katsayısı üzerinde yaptığı değişimler incelenmiştir. Daha sonra bu 1 saatlik çalıştırma periyodu %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlar için de yapılarak karbon siyahının karma ve hidrodinamik yağlama rejiminde sürtünme katsayısı üzerine olan etkisine bakılmıştır. Daha sonra katkısız yağa dönülerek ilk alınan değerler ile alıştırma periyodu yapılmış ilk katkısız yağ değerleri karşılaştırılarak yüzeyde bir grafit filminin oluşma ihtimaline bakılmıştır. Katkısız yağa döndükten sonra 1 saatlik çalıştırma periyodu yapılarak yüzeydeki bir grafit filminin olması durumunda bu periyot boyunca bu filmin yüzeylerin teması sonucu sökülme ihtimaline bakılmıştır.

Katkısız yağ ile yapılan ilk sürtünme testlerinde 20°C’de sıcaklıkta deney matrisindeki parametrelerle sürtünme katsayıları ölçülerek hız ve yük değişimlerinin sürtünme üzerindeki etkisine bakılmıştır. 20°C sıcaklıkta hızın artmasıyla alt ölü noktaya doğru karma yağlama rejiminden hidrodinamik rejime geçilmektedir. Üst ölü noktada hız artmasıyla sürtünme azalmış, alt ölü noktada hızın artmasıyla sürtünme artmıştır. (Şekil 3.1) Yükün artmasıyla üst ölü noktada sürtünme katsayısı azalmış, alt ölü noktada ise sürtünme katsayısı artmıştır. Alt ölü noktalara doğru yaklaşıldıkça yağlama rejiminin karma bir yağlama rejiminden hidrodinamik bir yağlama rejimine geçiş olduğu görülmüştür. (Şekil 3.2)

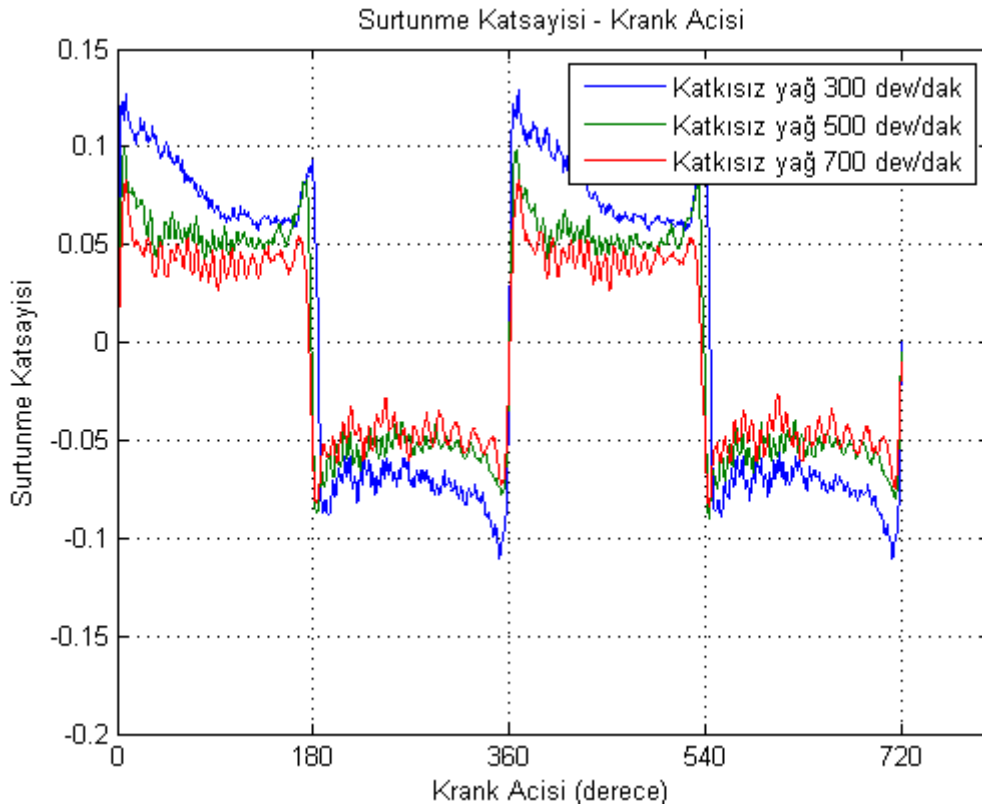


Şekil 3.1 : Katkısız yağda 20°C sıcaklık ve 160N sabit yükte hızın sürtünme katsayısına etkisi.



Şekil 3.2 : Katkısız yağda 20°C sıcaklık ve 500 dev/dak sabit hızda normal yükün sürtünme katsayısına etkisi.

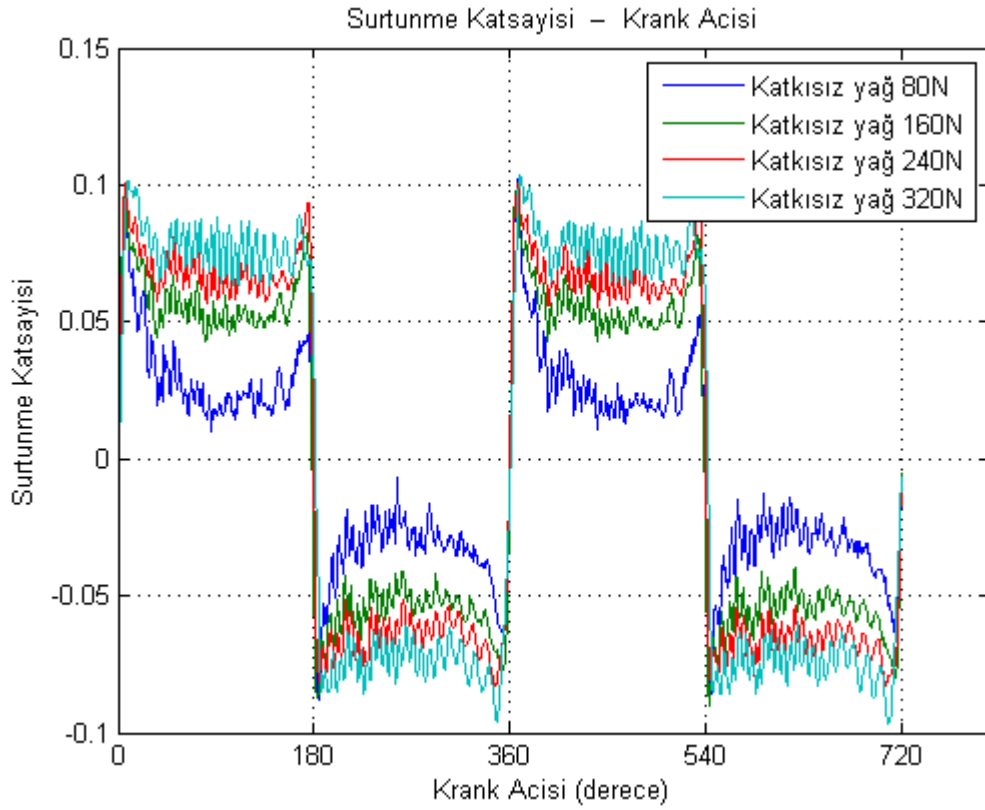
Daha sonra ısıtıcı devreye sokulup 70°C sıcaklığa gelene kadar sistem çalıştırılmıştır. Bu sıcaklık değerinde deney matrisindeki parametreler kullanılarak yeniden ölçümler alınmıştır. Bu sıcaklıktaki sürtünmenin özelliği hidrodinamikten karma ve sınır yağlama rejimine geçmiştir. Bu noktada hızın ve normal yükün sürtünme katsayısına etkisi değişir. Şekil 3.3 ve 3.4'te görüldüğü üzere hızın artmasıyla sürtünme katsayısı azalmış, yükün artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı artmıştır. Bu parametrelerde hem üst hem de alt ölü noktalarda karma bir yağlama rejimi mevcuttur.



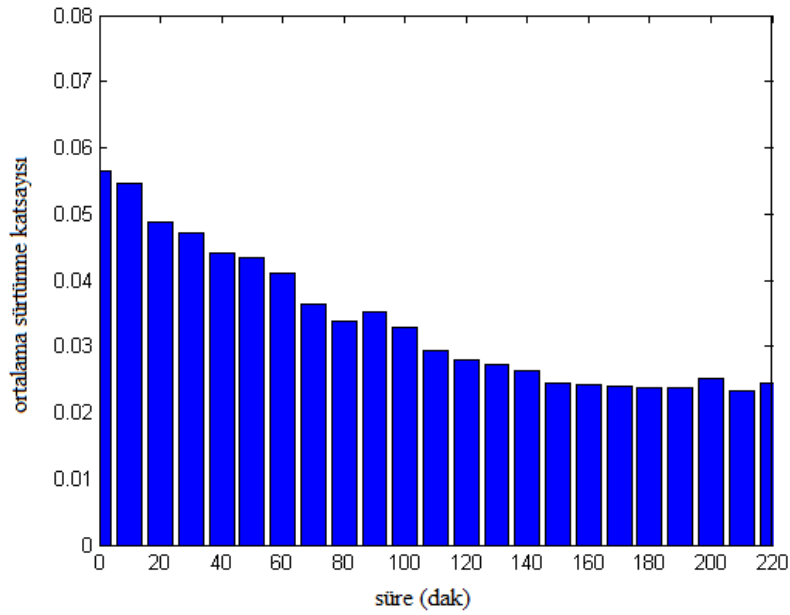
Şekil 3.3 : Katkısız yağda 70°C sıcaklıkta ve 160N sabit yükte hızın sürtünme katsayısına etkisi.

Bu noktada değerler alındıktan sonra yaklaşık 4 saat süren bir alıştırma periyodu yapılmıştır. Bu alıştırmanın amacı yüzey pürüzlülüğünden dolayı sürtünme katsayısının sabit kalmasıdır. Alıştırma periyodu, 70°C sıcaklıkta, 500 dev/dak hızda ve 160N'luk normal yük değerlerinde yapılmıştır. Çünkü silindir gömleği üstünde yüksek yüzey pürüzlülüğü olan kısımlar sürtünme katsayısının yüksek değerlerde çıkmasına neden olurlar. Bu nedenle sürtünme katsayısı belli bir noktadan sonra sabit kalacak şekilde bir alıştırma periyodu yapmak katkısız yağdaki değerlerin daha sağlıklı sonuçlar vermesi açısından çok önemlidir. Yaklaşık 220 dakika boyunca her 10 dakikada bir değer alınarak sürtünme katsayısını sabit bir değere ulaşması

hedeflenmiştir. 0.0565 ten başlayan sürtünme katsayısı değeri 0.0240 değeri civarlarında sabitlenmiştir.(Şekil 3.5)

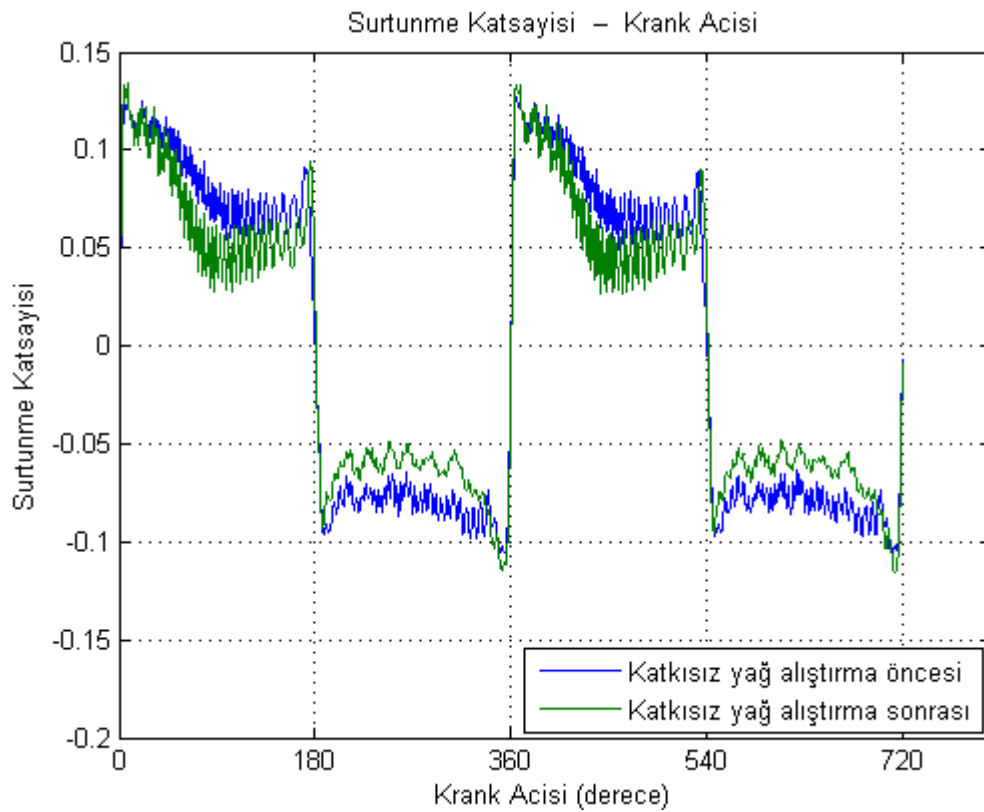


Şekil 3.4 : Katkısız yağda 70° C sıcaklıkta ve 500 dev/dak sabit hızda normal yükün sürtünme katsayısına etkisi.



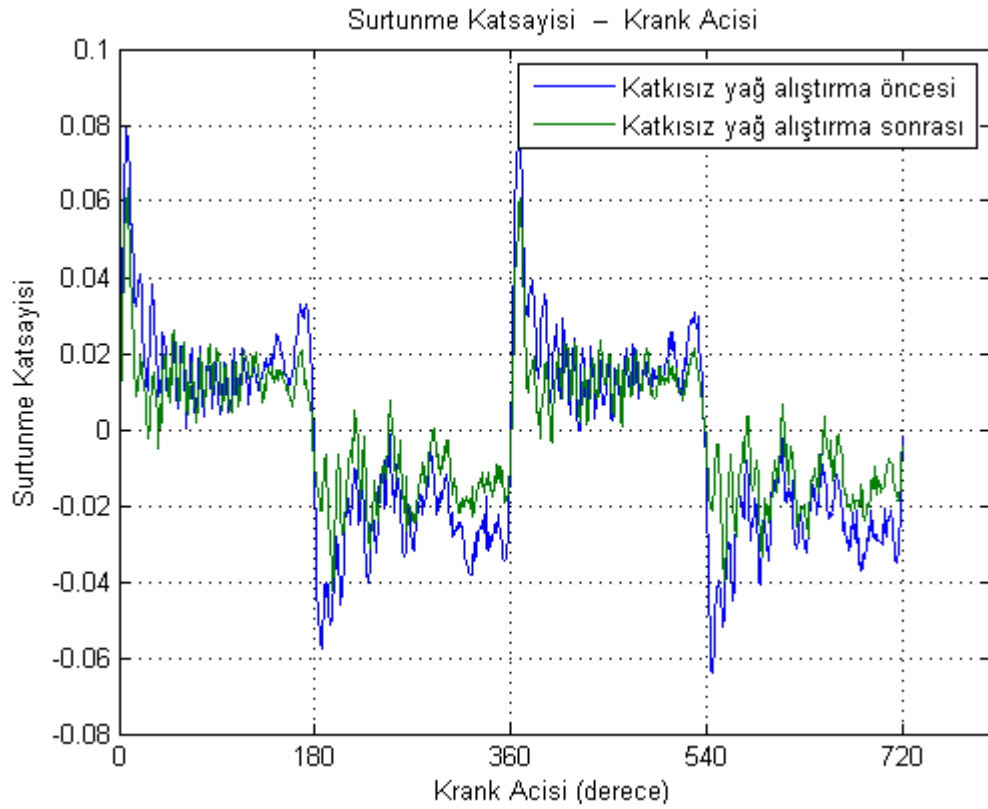
Şekil 3.5 : Katkısız yağın alıştırma periyodu süresinde sürtünme katsayısının değişimi.

Bu noktadan sonra aynı sıcaklık değerinde deney matrisindeki parametreler kullanılarak sürtünme katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Bu noktada dikkat çeken ilk durum, alıştırma periyodunun önemidir. İlk alınan değerlerle kıyaslanınca sürtünme katsayısında belirgin bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Özellikle bu değişimler düşük hız ve yüksek yüklerde çok daha belirgin gözükmemektedir. (Şekil 3.6) Düşük yük yüksek hızlarda ise karma yağlama rejiminden dolayı bir azalma görülmüştür. (Şekil 3.7) Şekildeki değerler, alıştırma periyodundan sonraki katkısız yağda alınan değerler ile alıştırma periyodundan önceki katkısız yağda alınan değerleri göstermektedir.

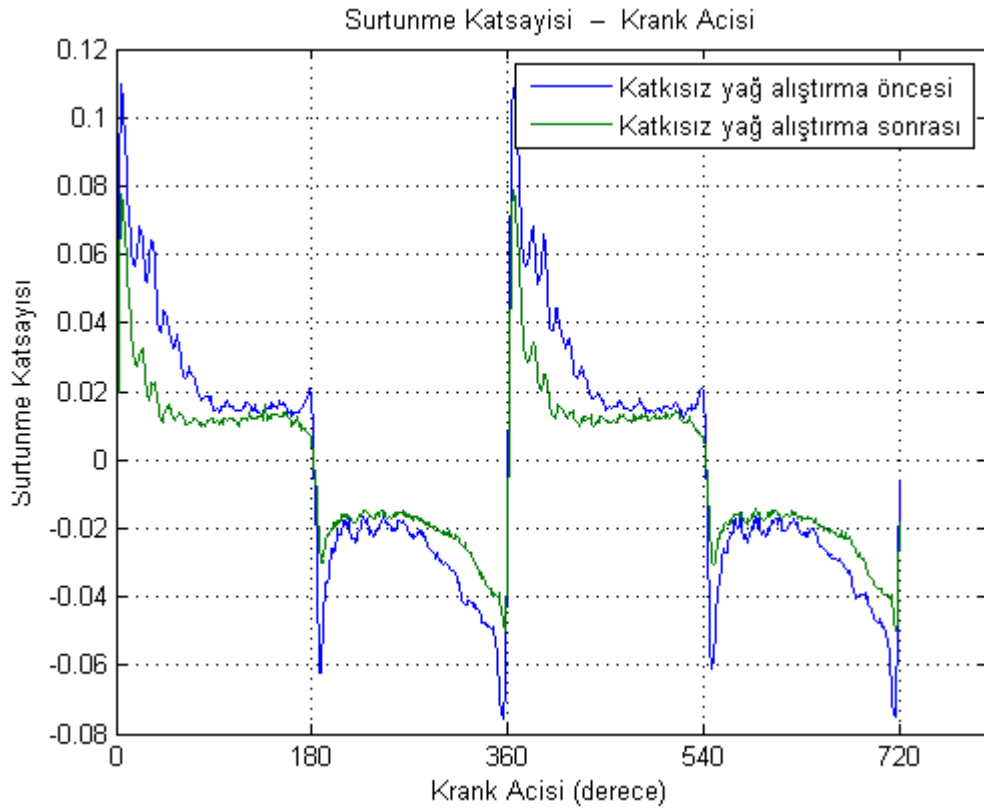


Şekil 3.6 : Alıştırma periyodu sonrası 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi.

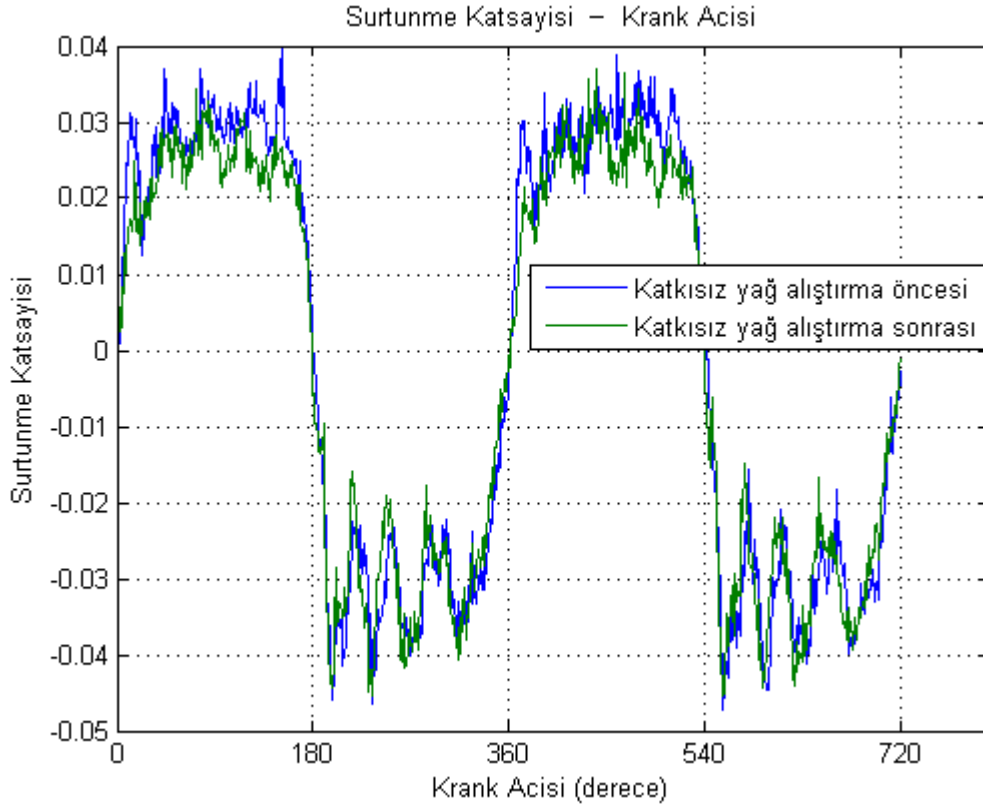
Sistem daha sonra tekrar oda sıcaklığı olan 20°C'ye soğumaya bırakılarak tekrar deney matrisindeki parametreler kullanılarak sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Bu noktada gene alıştırma periyodunun önemi ortaya çıkmıştır. Düşük hız yüksek yüklerde alıştırma periyodundan sonra alınan sürtünme değerlerindeki düşüş daha belirgindir. Düşük yük yüksek hızlarda ise aradaki fark daha azalmaktadır ve üst ölü noktada yağlama rejimi karma rejimden hidrodinamik rejime geçmektedir. (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9)



Şekil 3.7 : Alıştırma periyodu sonrası 70°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yükte sürtünme katsayısının değişimi.

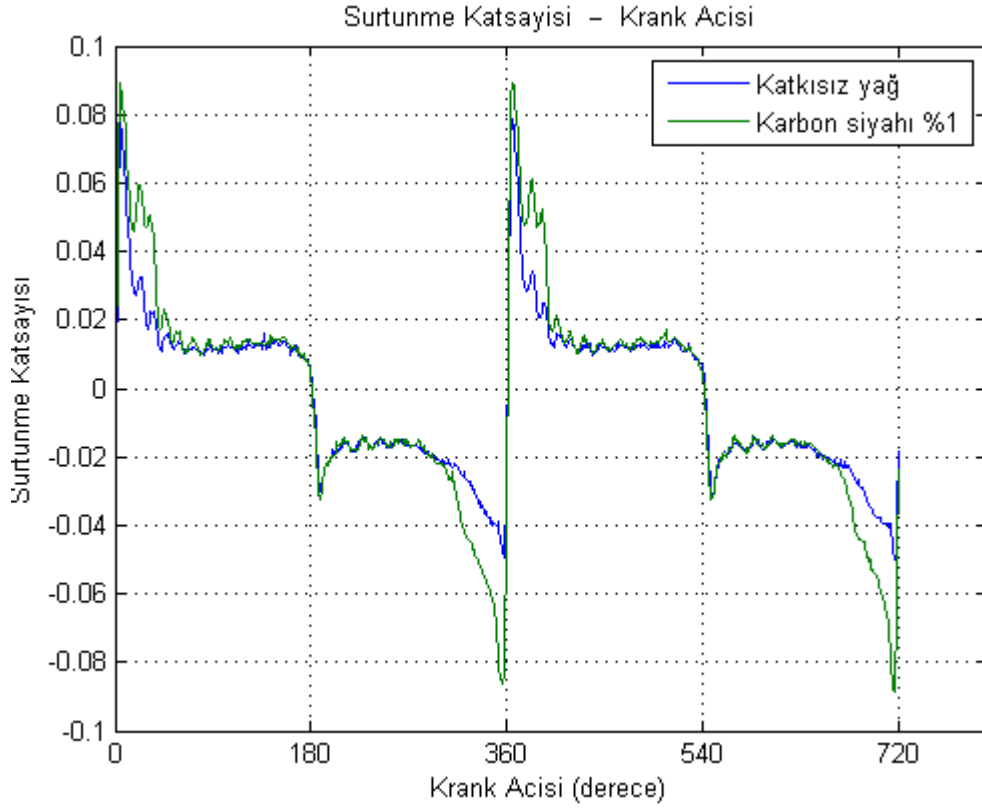


Şekil 3.8 : Alıştırma periyodu sonrası 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yüklerde sürtünme katsayısının değişimi.

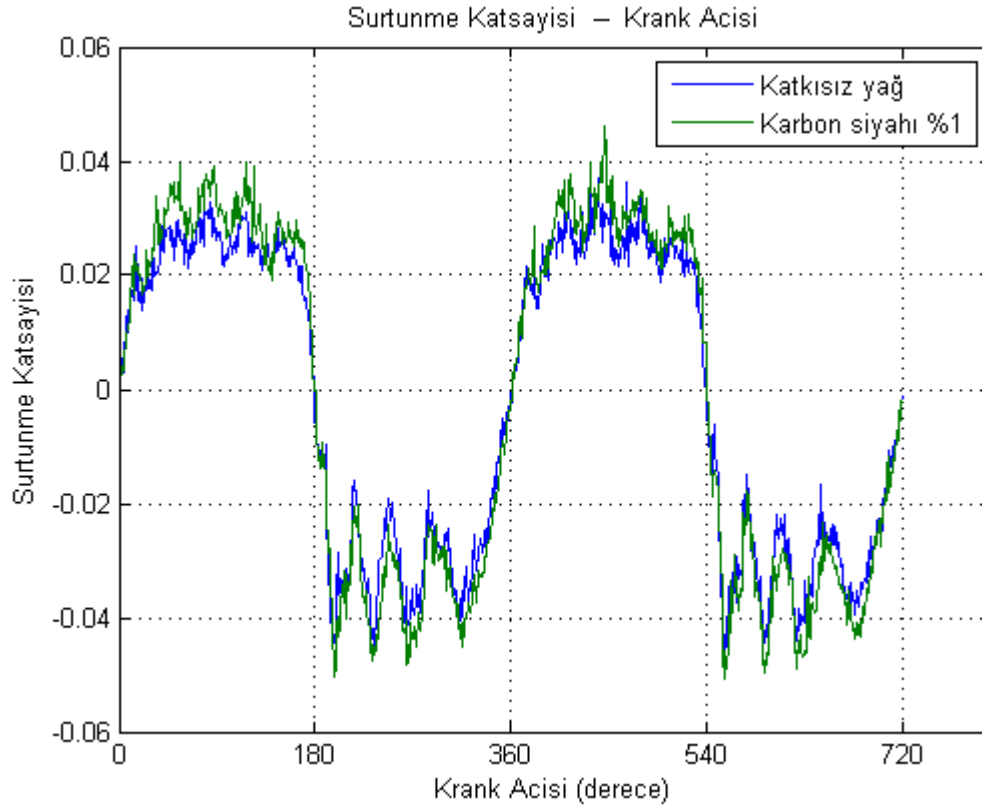


Şekil 3.9 : Alıştırma periyodu sonrası 20°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yüklerde sürtünme katsayısının değişimi.

Deneyin ikinci aşamasında enjektör kısmındaki katkısız yağ değiştirilip yerine % 1 konsantrasyonda karbon siyahı içeren katkısız yağ ile çalışılmıştır. Bu noktada oda sıcaklığı olan 20°C de deney matrisindeki parametrelerle sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Burada dikkat edilecek nokta hidrodinamik yağlama rejiminde sadece viskoziteye bağlı bir değişimin gerçekleşebileceğidir. Bu yüzden en uygun kıyaslama alıştırma periyodundan sonra 20°C de alınan katkısız yağ değerleri ile %1 lik karbon siyahı arasında olacaktır. Yüksek yükte düşük hızlarda 20°C sıcaklıkta %1 karbon siyahı içeren yağın, üst ölü noktalarda katkısız yağdan daha yüksek sürtünme katsayıları içerdiği görülmüştür. Alt ölü noktalarda ise sürtünmenin değişmediği gözlenmiştir. Bunun nedeni yağ beslemesi üst ölü noktadan yapıldığından dolayı o bölgede partiküllerin yoğun derecede bulunarak üst üste binmesi ve partiküllerin, silindir yüzeyine üst ölü noktada tam olarak yayılmaması olabilir. (Şekil 3.10) Aynı sıcaklıkta düşük yük ve yüksek hızlarda hidrodinamik yağlama rejimine geçişle birlikte karbon siyahı içeren yağdaki viskozite değişimi net bir şekilde görülmektedir. (Şekil 3.11) Viskozitenin artması ile beraber sürtünme katsayısı da artmıştır. Burada alıştırma periyodundan sonra alınan katkısız yağdaki değerleri ile %1 karbon siyahı içeren yağın sürtünme değerleri karşılaştırılmıştır.

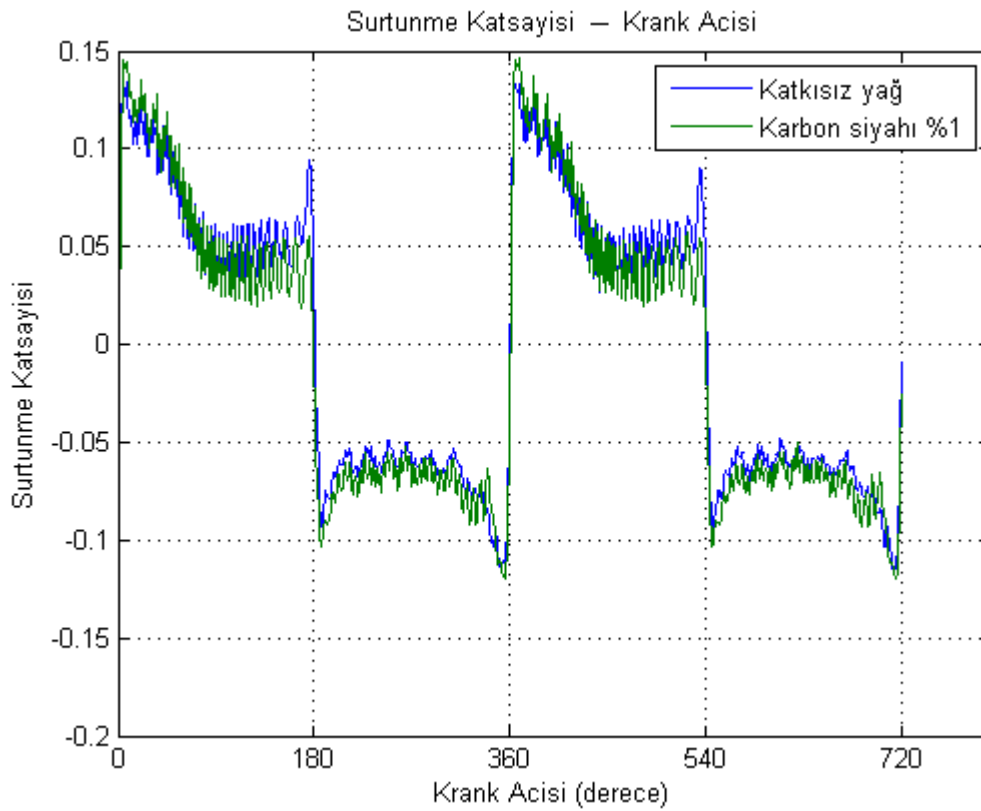


Şekil 3.10 : 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte %1 karbon siyahı içeren yağ ile katkısız yağın karşılaştırılması.

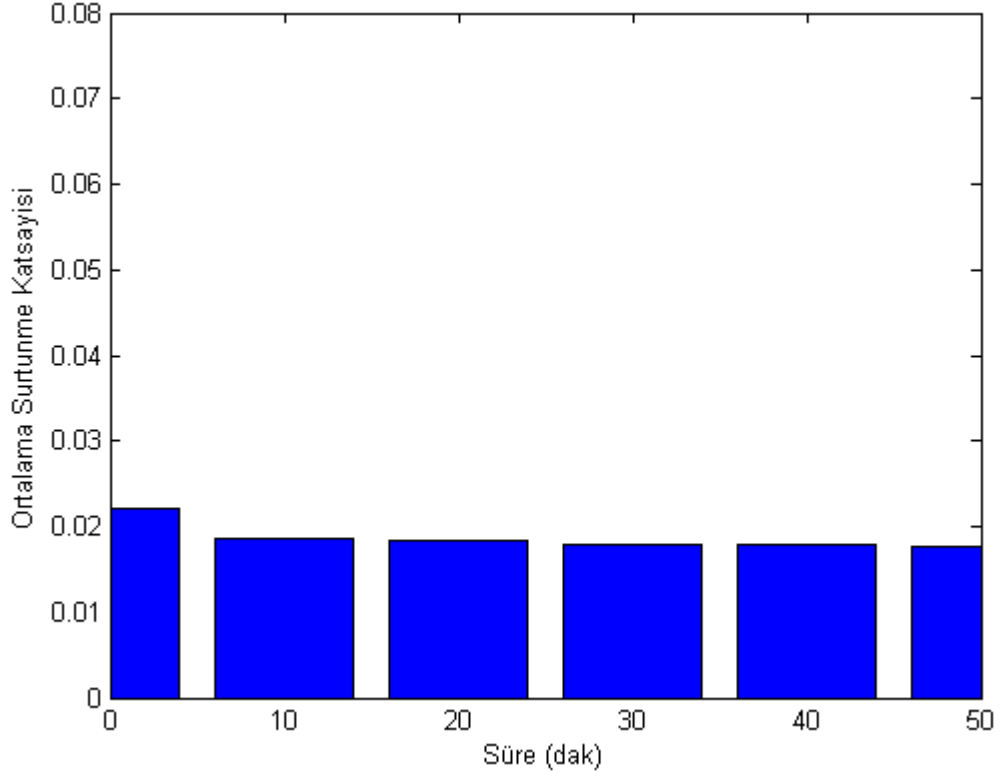


Şekil 3.11: 20°C sıcaklıkta 700 dev/dak hız 80N yükte %1 karbon siyahı içeren yağ ile katkısız yağın karşılaştırılması.

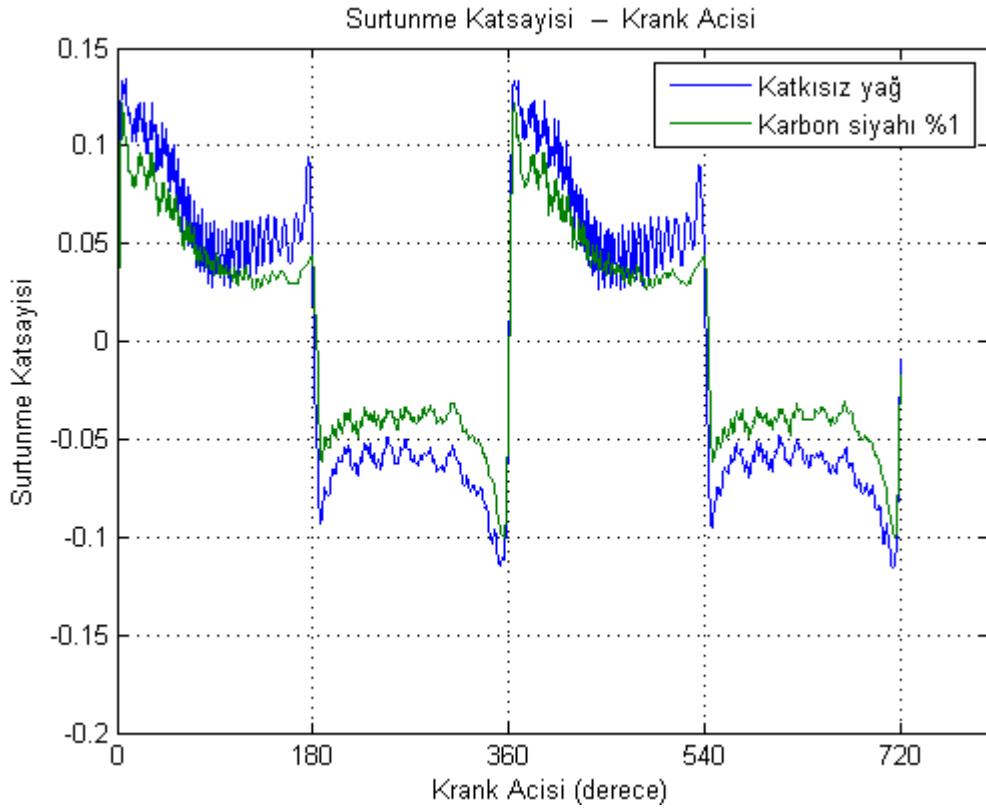
Sistem daha sonra 70°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Bu noktada tekrar deney matrisindeki parametrelerle sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. (Şekil 3.12) Bu noktada ilk dikkat edilecek durum, yağ değişimi sırasında viskozitedeki değişimin yanı sıra yağlama rejiminde karma bir yağlama rejimine geçtiği düşünülürse, sürtünme yüzeyinde gerçekleşecek mekanik değişimlerdir. 70°C sıcaklıkta 1 saatlik bir alıştırma periyodu sonrası sürtünme katsayısında bir değişim olup olmayacağı gözlenmiştir. (Şekil 3.13) Yaklaşık 0.0222 lik bir sürtünme değerinden 0.0180 değerine kadar bir sürtünme katsayısından düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni grafit yapısına benzeyen karbon siyahının yüzeye teması esnasında silindir yüzeyinde partiküllerin birbiri üstünde kayması ve bir sürtünme düzenleyici gibi hareket etmesi olabilir. Daha sonra 70°C, 500 dev/dak ve 160N yükte 1 saatlik çalıştırmadan hemen sonra %1 karbon siyahı içeren yağdan alınan sürtünme değerleri ile alıştırma periyodundan sonra katkısız yağ ile alınan sürtünme değerleri arasındaki farkın gittikçe açıldığı gözlenmiştir. (Şekil 3.14) 70°C sıcaklıkta düşük yük yüksek hızda ise alt ölü noktalarda hidrodinamik bir yağlama rejimine geçiş olduğundan dolayı sürtünme katsayıları neredeyse aynı kalmıştır. (Şekil 3.15)



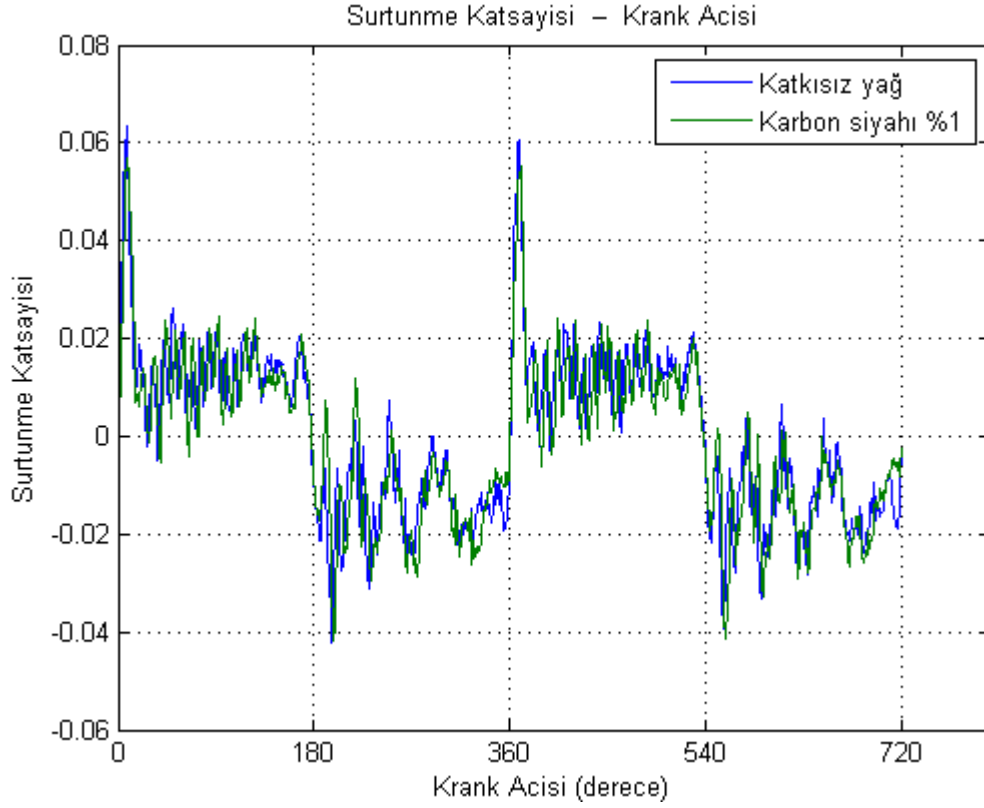
Şekil 3.12 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırmadan önceki değerleri ile alıştırma periyodu yapılmış katkısız yağın 70°C sıcaklık 300 dev/dak ve 320N yükte kıyaslanması.



Şekil 3.13 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu.

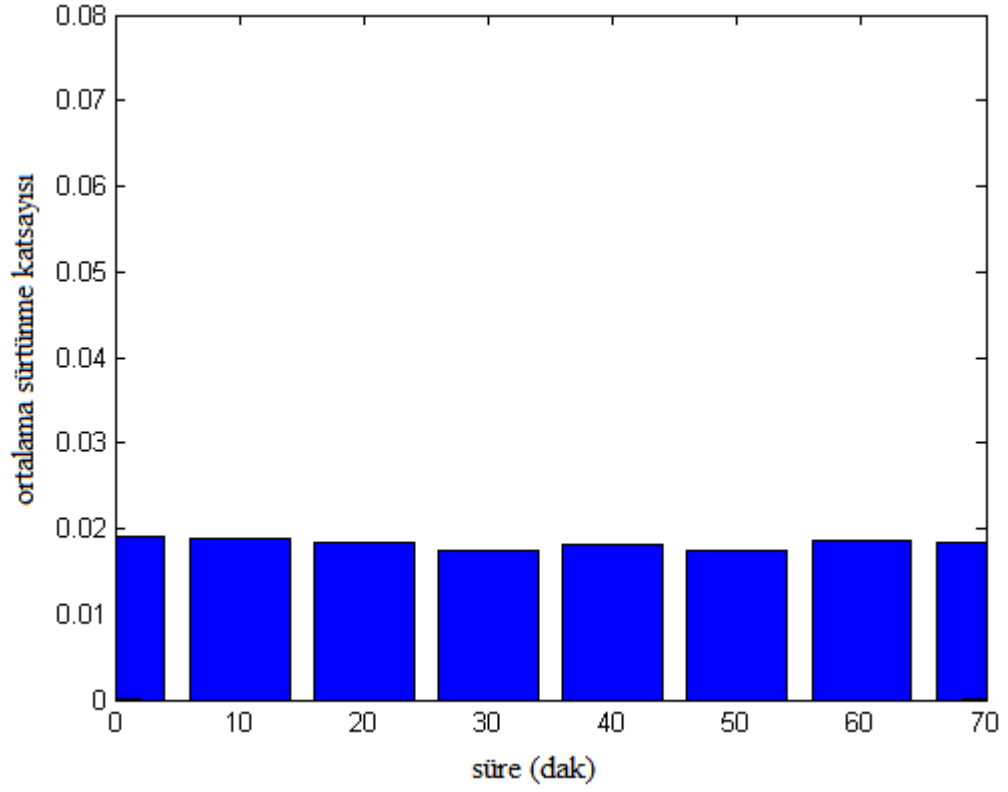


Şekil 3.14 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırmadan sonraki değerleri ile katkısız yağın 70°C sıcaklık 300 dev/dak hız 320N yükte kıyaslanması.

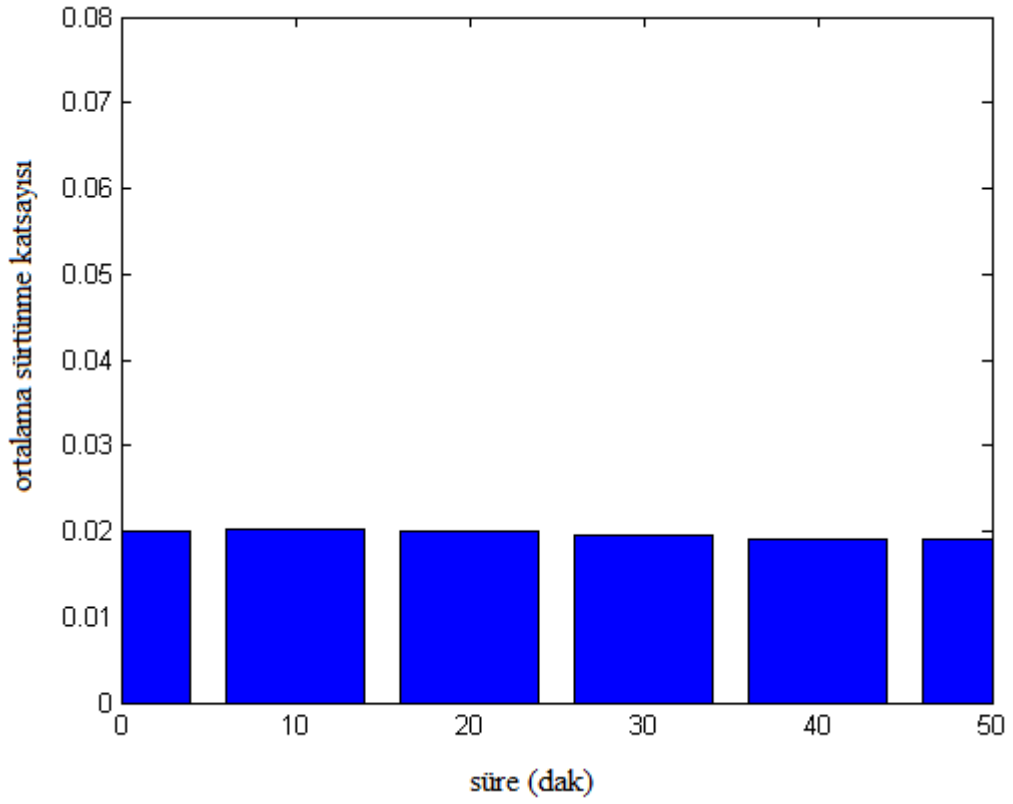


Şekil 3.15 : %1 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırmadan sonraki değerleri ile katkısız yağın 70°C sıcaklık 80N yük 700 dev/dak hızda kıyaslanması.

Deneyin bir sonraki aşamasında enjektördeki %1 karbon siyah içeren yağ değiştirilip %2 karbon siyahı içeren yağ eklenmiştir. Bu noktada 20°C oda sıcaklığında deney matrisindeki parametrelerle sürtünme katsayısı değerleri alınmıştır. Daha sonra 70°C ye ısıtılıp yeniden matristeki değerlere göre ölçümleri alınmıştır. Bir sonraki kademedede 70°C sıcaklıkta, 500 dev/dak hızda ve 160N yükte 1 saatlik çalışma periyodundan sonra tekrar aynı sıcaklıkta matristeki değerlere göre ölçümler alınmıştır. (Şekil 3.16) Aynı işlemler %2 karbon siyahı içeren yağ değiştirilip %4 karbon siyahı içeren yağ ile sistem çalıştırıldıktan sonra da yapılmıştır ve aynı değerlerdeki 1 saatlik çalışma periyodu da dahil edilerek ölçümler alınmıştır. (Şekil 3.17) En son olarak da katkısız yağ ile %1, %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlar arasındaki sürtünme katsayıları kıyaslanmıştır. Kıyaslamada kullanılan değerler, her bir yağ için 1 saatlik çalışma periyodu yapıldıktan sonra alınan ölçümlerdir. Bu ölçümler bize daha keskin sonuçlar vermiştir. %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlarda yapılan 1 saatlik çalışma periyotlarındaki önemli nokta, periyot boyunca sürtünme katsayısının belirgin derecede değişmemesidir. Ancak %2'den %4 karbon siyahına geçildiğinde sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir.

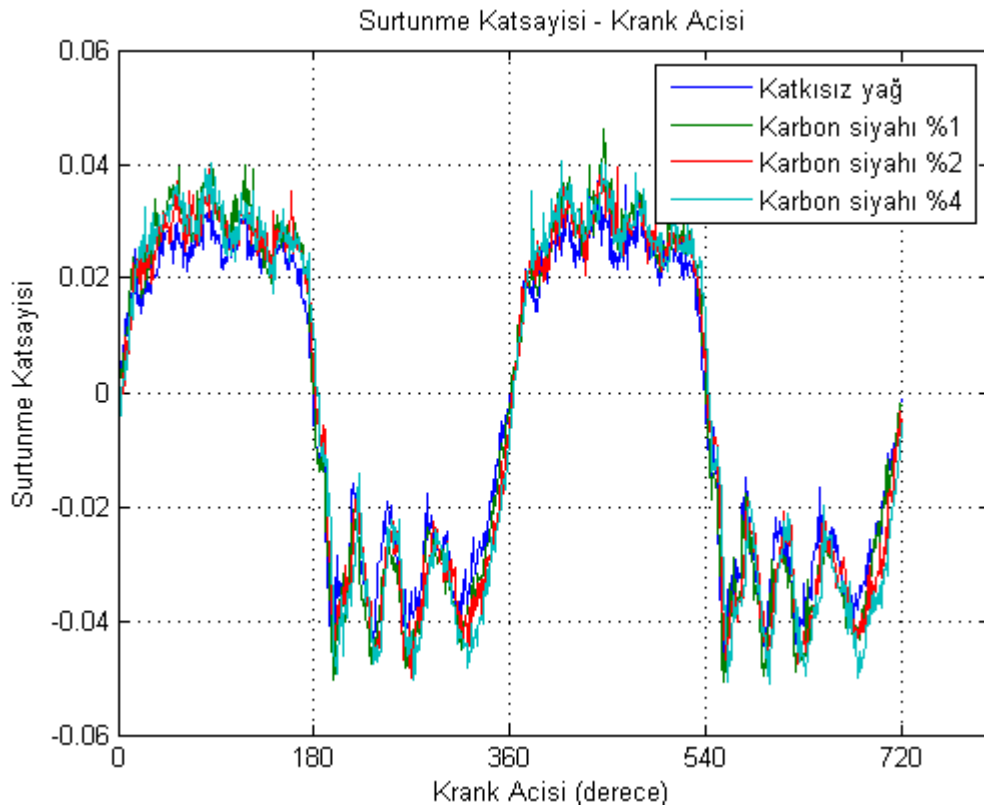


Şekil 3.16 : %2 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu.



Şekil 3.17 : %4 Karbon siyahı içeren yağın 1 saatlik çalıştırma periyodu.

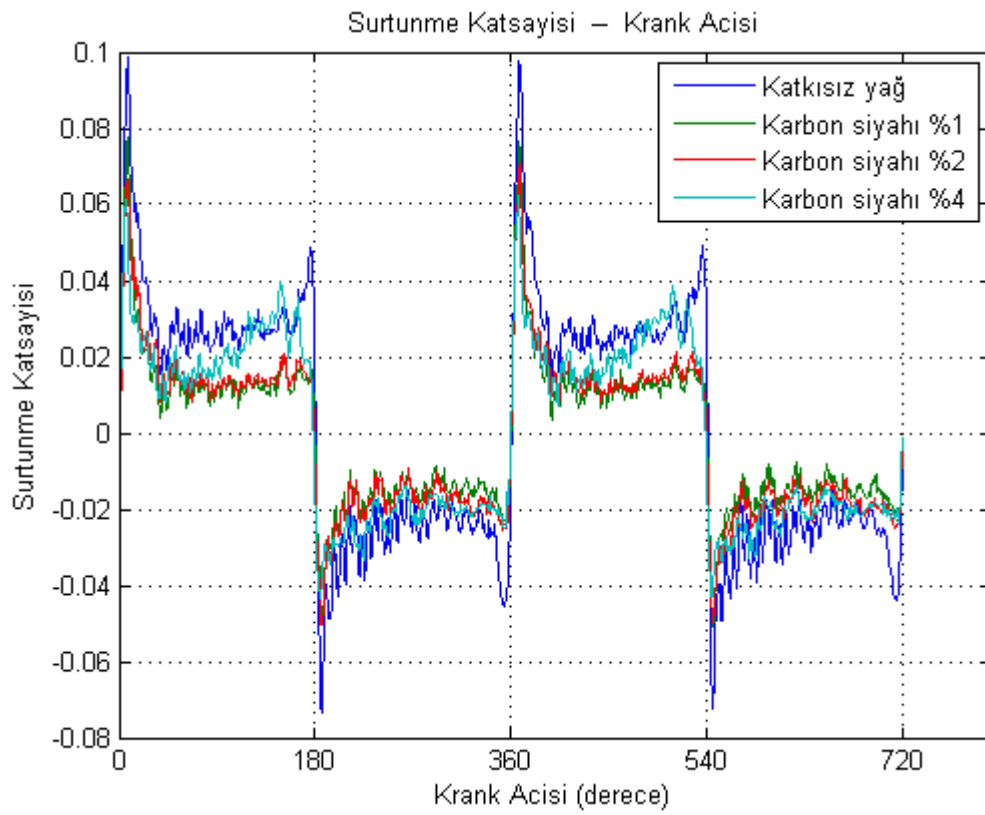
Burada 3 yağlama koşulu daha detaylı incelenmiştir. 20°C, 700 dev / dak ve 80N' luk parametrelerde hidrodinamik bir yağlama rejimi seyredilmektedir. 70°C, 500 dev/dak ve 240N' luk parametrelerde karma yağlama rejimine, 70°C, 300 dev/ dak ve 240N' luk parametrelerde ise daha sınır yağlama rejimine yaklaşıldığı varsayılmıştır. Buna göre katkısız yağlar ile karbon siyahı içeren yağlar bu yağlama rejimlerinde kıyaslanmıştır. Hidrodinamik şartların gerçekleştiği 20°C, 700 dev / dak ve 80N' luk değerlerde sadece viskozitenin etkisinden dolayı bir değişimlerin gözlenebileceği düşünülmüştür. Şekil 3.18'de karbon siyahının konsantrasyonunun artması ile sürtünme katsayısında çok ufak hatta ihmal edilir derecede üst ölü noktaya doğru artışlar olduğu görülmüştür. Bu rejim altında karbon siyahının sürtünme katsayısına etkisi minimum seviyelerdedir. Şekilde %1 ve %2 karbon siyahı içeren yağların sürtünme katsayılarının üst ölü noktaya doğru çok yakın olduğu ve %4 karbon siyahı içeren yağın sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3.18 : Hidrodinamik rejimde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 20°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N karşılaştırılması.

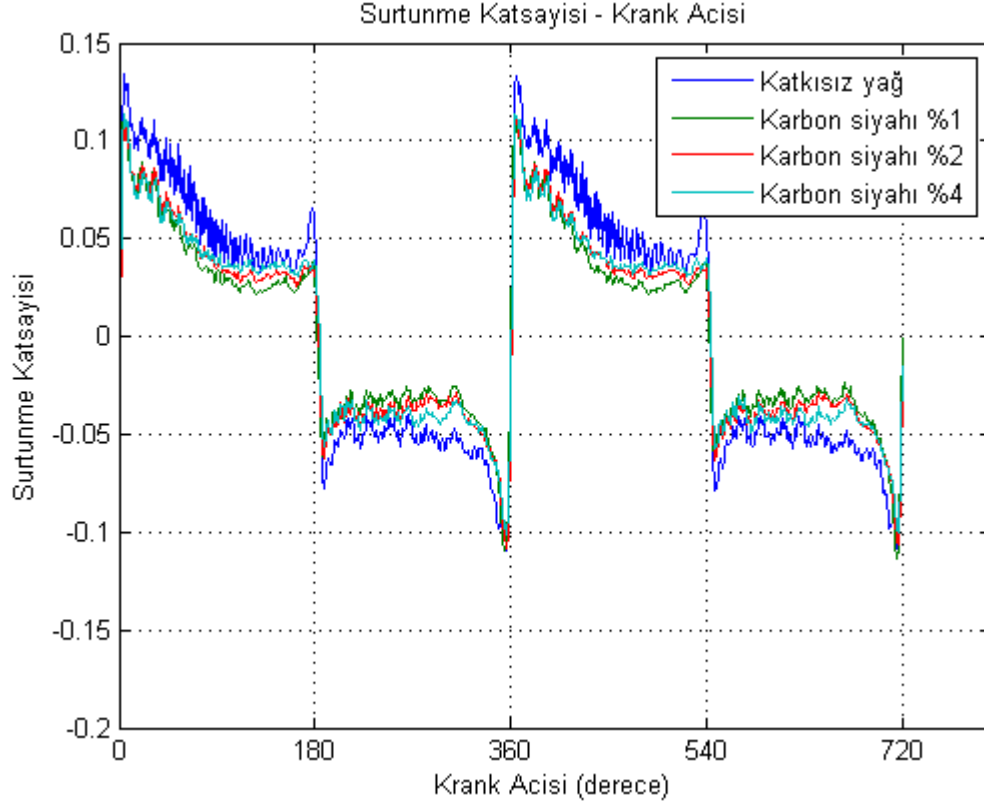
Karma rejimin gerçekleştiği 70°C, 500 dev/dak ve 160N' luk parametrelerde karbon siyahı içeren yağlarda katkısız yağa göre daha düşük sürtünme katsayıları elde

edilmiştir. %1 karbon siyahı içeren yağda en düşük sürtünme katsayılarına rastlanırken, sürtünme katsayısı karbon siyahının konsantrasyonuyla birlikte artmaya başlamıştır.(Şekil 3.19) Şekilde %4 karbon siyahı içeren yağın sürtünme katsayısının üst ölü noktalarda azaldığı, alt ölü noktaya doğru daha hidrodinamik bir rejime geçişle beraber sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Alt ölü noktada %4 karbon siyahı, yüzeyden daha çok viskoziteyi etkileyerek yağ film kalınlığını artırmıştır. Alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru ise daha karma rejimin hakim olduğu ve karbon siyahı konsantrasyonunun artmasıyla sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Yük artmasıyla yağ filminin, artan karbon miktarı ile birlikte bozulduğu söylenebilir.



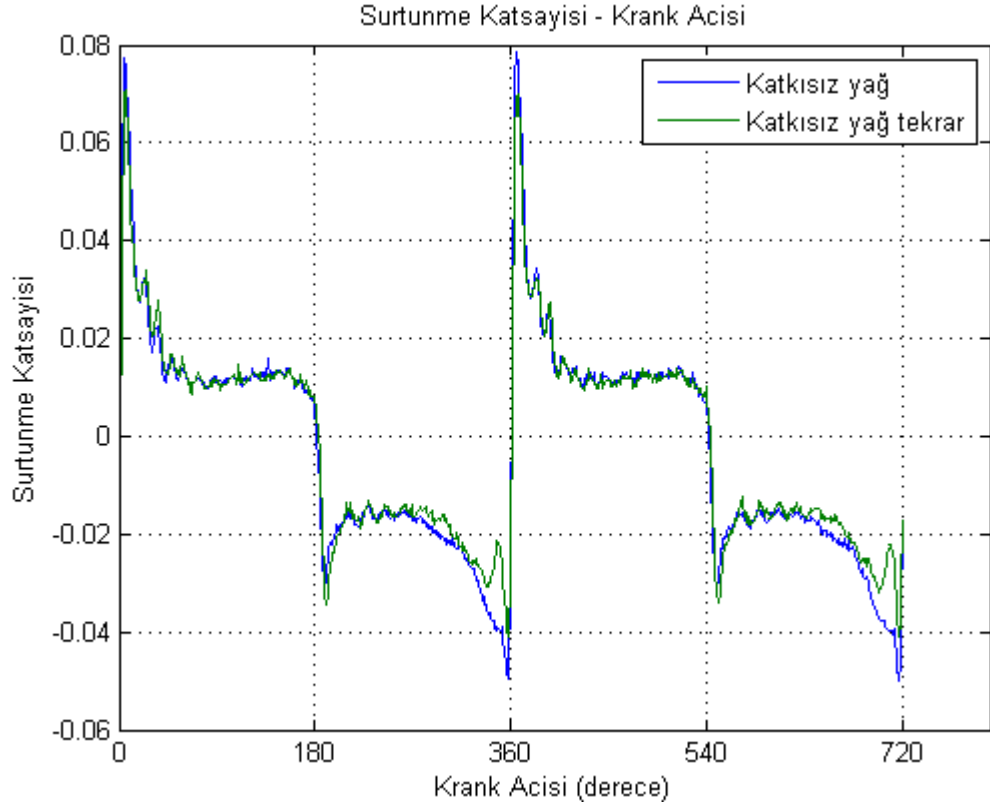
Şekil 3.19 : Karma rejimde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması.

Sınır yağlama rejiminde ise gene %1 karbon siyahı içeren yağda en düşük sürtünme katsayıları görülürken konsantrasyonun artması ile sürtünme katsayısı artmaya başlamıştır. Bunun nedeni yüksek yüklerde yağ filminin bozulmaya başlaması olarak gösterilebilir. Aynı zamanda daha fazla partikül, segman ile temas ederek bir stres yaratarak sürtünme katsayısını da artırdığı varsayılabilir. Karbon siyahı içeren üç farklı yağ da katkısız yağın sürtünme katsayısının altında kalmıştır. (Şekil 3.20)

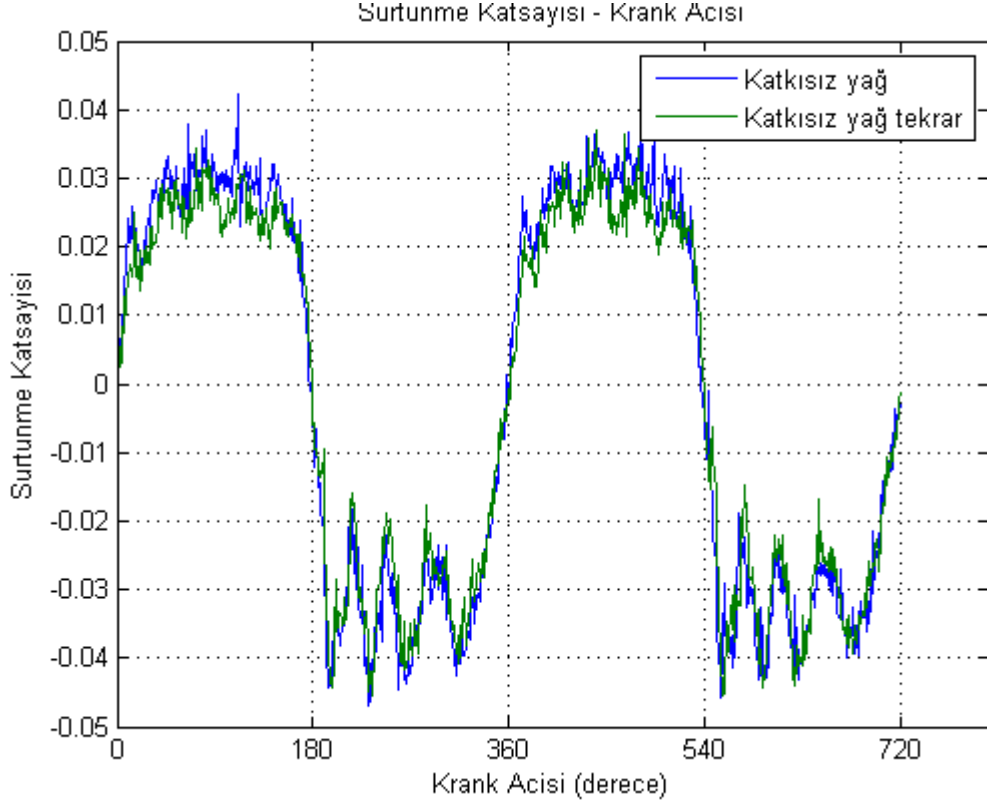


Şekil 3.20 : Sınır yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde katkısız yağ ile farklı konsantrasyonlardaki karbon siyahı içeren yağların 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması.

Daha sonra katkısız yağ ile tekrar ölçümler yapılarak silindir yüzeyinde bir tribofilm oluşma ihtimaline bakılmıştır. Oda sıcaklığında 20°C’de deney matrisindeki parametrelerle ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm, deneyin başında yapılan alıştırmaya periyodundan sonra 20°C’deki katkısız yağı ile karşılaştırılmıştır. 20°C’de yüksek yük ve düşük hızlarda yapılan kıyaslamada sürtünme katsayılarında belirgin bir farka rastlanmamıştır. Sadece üst ölü noktaya yaklaşırken sürtünme katsayısının düştüğü gözlenmiştir.(Şekil 3.21) Burada üst ölü noktaya doğru karma yağlama rejiminin hakim olmasından dolayı bir grafit filminin olabildiği yorumlanabilir. Daha hidrodinamik koşulların elde edildiği 20°C’de yüksek hız ve düşük yüklerde de bu fark belirgin bir şekilde ortaya çıkmamıştır. (Şekil 3.22) Bunun nedeni hidrodinamik şartlarda grafit filminin etkisinin ortadan kalkması olarak yorumlanabilir. Şekilde alıştırmaya periyodu yapılmış ilk katkısız yağ ile alınan değerler ile katkısız yağa dönüş ile alıştırmaya periyodu yapılmamış katkısız yağ ile alınan değerler gösterilmiştir. Sistem daha sonra ısıtılıp 70°C’ye çıkarılmış ve burada da matristeki parametrelere göre ölçümler alınmıştır. Bu noktada alınan değerler ile alıştırmaya periyodu yapılmış ilk kullanılan katkısız yağda alınan değerler karşılaştırılmıştır.

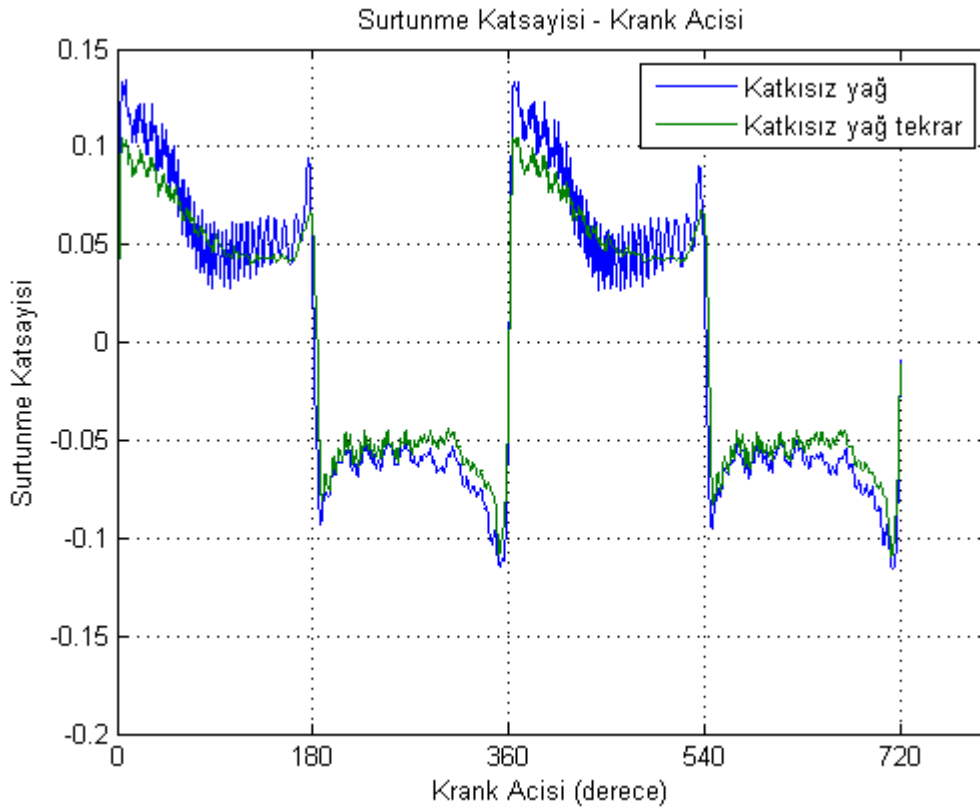


Şekil 3.21 : Katkısız yağa dönüşte 20°C'de 320N yük ve 300 dev/dak hızlarda alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ değerlerinin kıyaslanması



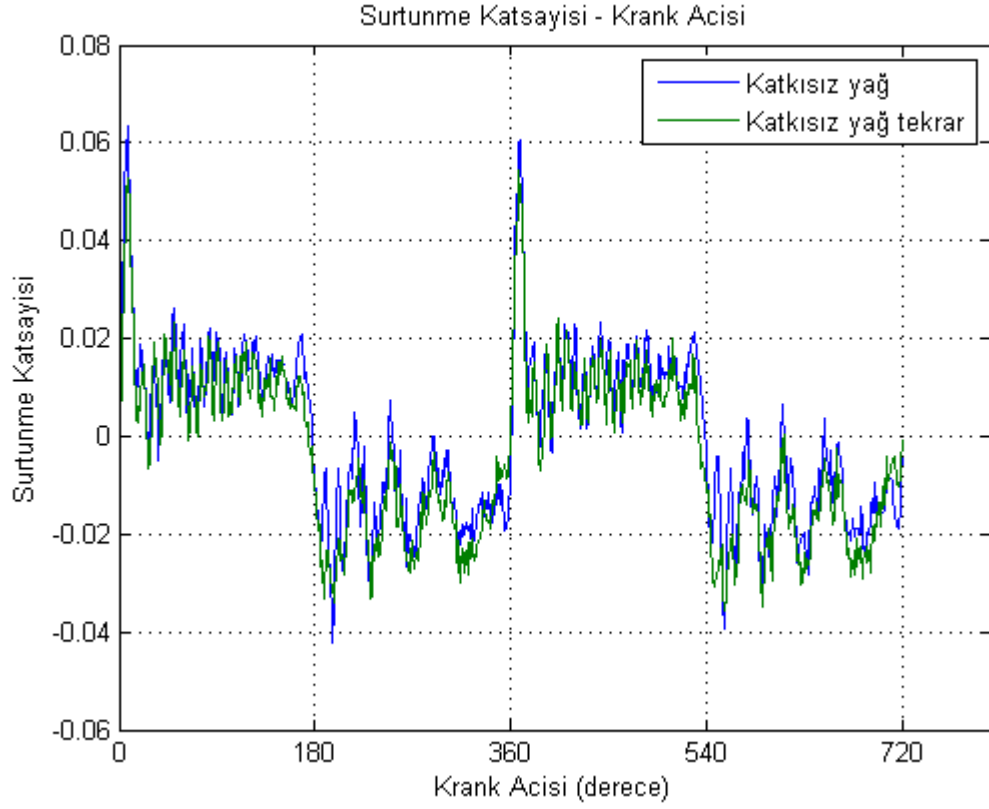
Şekil 3.22 : Katkısız yağa geri dönüşte 20°C'de 700 dev/dak hız 80N yüklerde alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ değerlerinin kıyaslanması

70°C’de düşük hız ve yüksek yüklerde alınan değerler kıyaslandığında katkısız yağa geri dönüşte kullanılan katkısız yağdan alınan değerlerin alıştırma periyodu yapılmış ilk kullanılan katkısız yağdaki değerlerden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu da gömlek yüzeyinde partiküllerin silindir yüzeyine düzgün yayıldığı ve bir grafit filmi oluşturmaya başladığına dair bir bulgudur. (Şekil 3.23) 70°C’de yüksek hız düşük yüklerde alınan parametrelerde alt ölü noktada hidrodinamik yağlama rejimine yaklaşıldığından bu noktada bir grafit filminin varlığından söz etmek yeterli değildir. Üst ölü noktada karma rejimden dolayı bir sürtünme azalması mevcuttur.(Şekil 3.24)

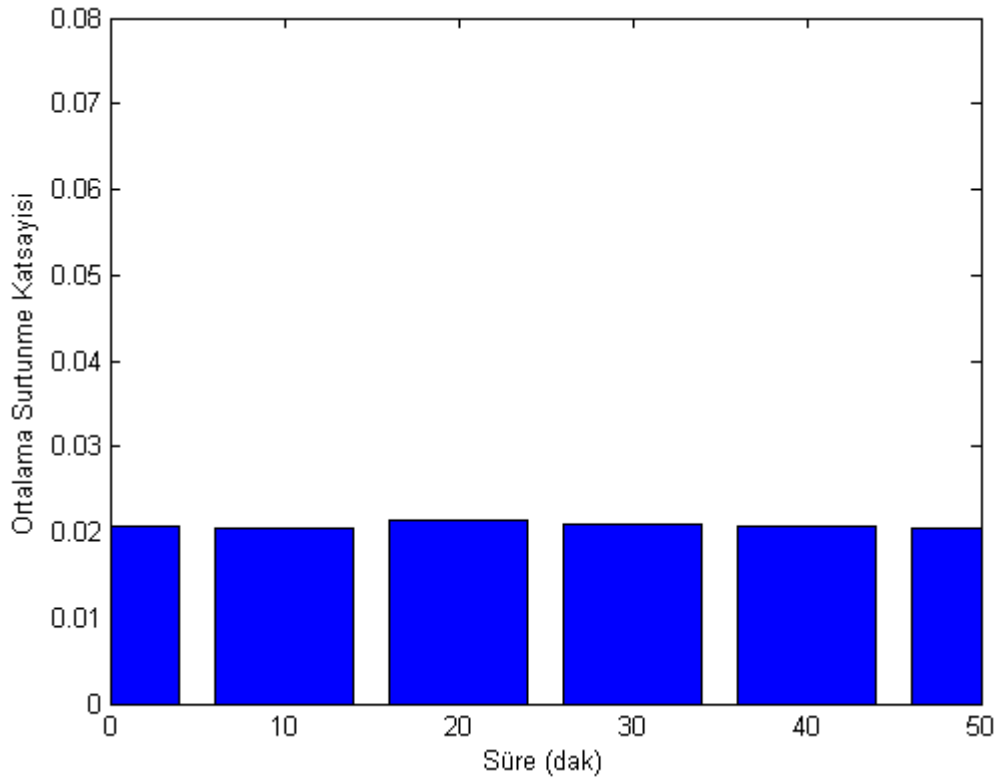


Şekil 3.23 : Katkısız yağa geri dönüşte 70°C’de 300 dev/dak hız 320N yüklerde alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ ile alınan değerlerin kıyaslanması.

Daha sonra 70°C’de 1 saatlik bir çalışma periyodu yapılmıştır. Bu periyotta ise grafit filminin yüzeyden sürtünme sonucu kalkabileceği ihtimaline bakılmıştır. Yapılan bir saatlik alıştırma periyodunda sürtünme katsayısı genelde sabit kalmıştır. İlk kullanılan katkısız yağ ile en sonda katkısız yağa geri dönüşte yapılan alıştırma periyotlarında bir fark olduğu gözlenmiştir. Katkısız yağa geri dönüşte alıştırma periyodundaki sürtünme katsayısı değerleri 0.0205 civarlarında kalmıştır ve alıştırma periyodu boyunca hiç değişmemiştir. (Şekil 3.25)

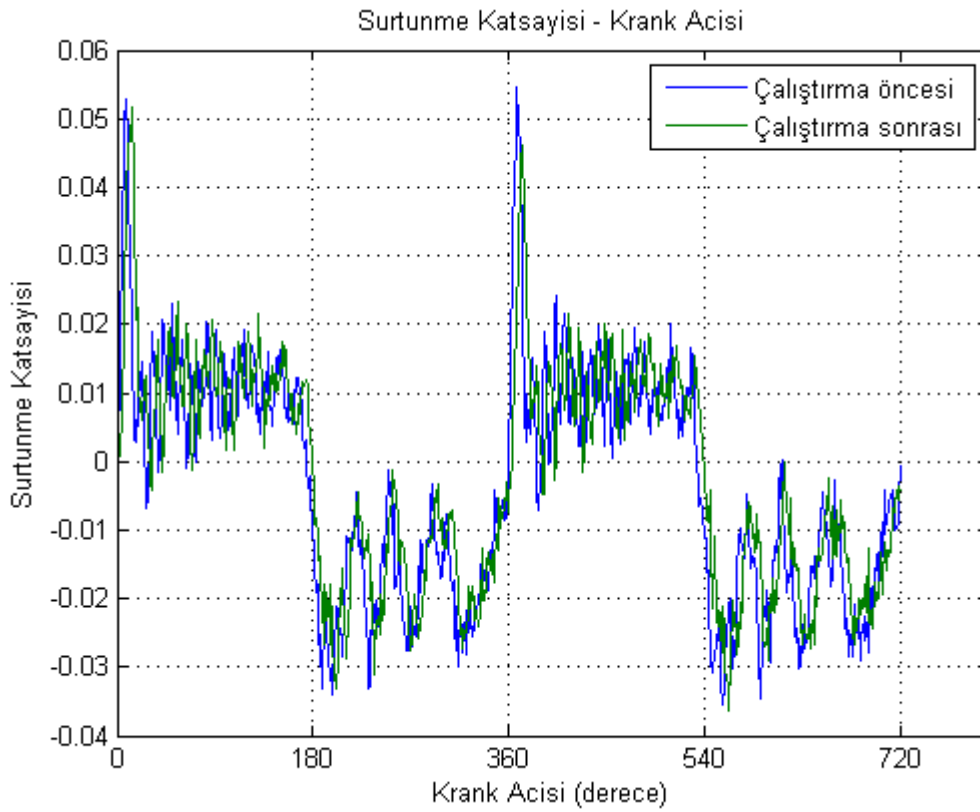


Şekil 3.24 : Katkısız yağa geri dönüşte 70°C'de 700 dev/dak hız 80N yükte alınan değerler ile alıştırma periyotlu ilk katkısız yağ değerlerinin kıyaslanması



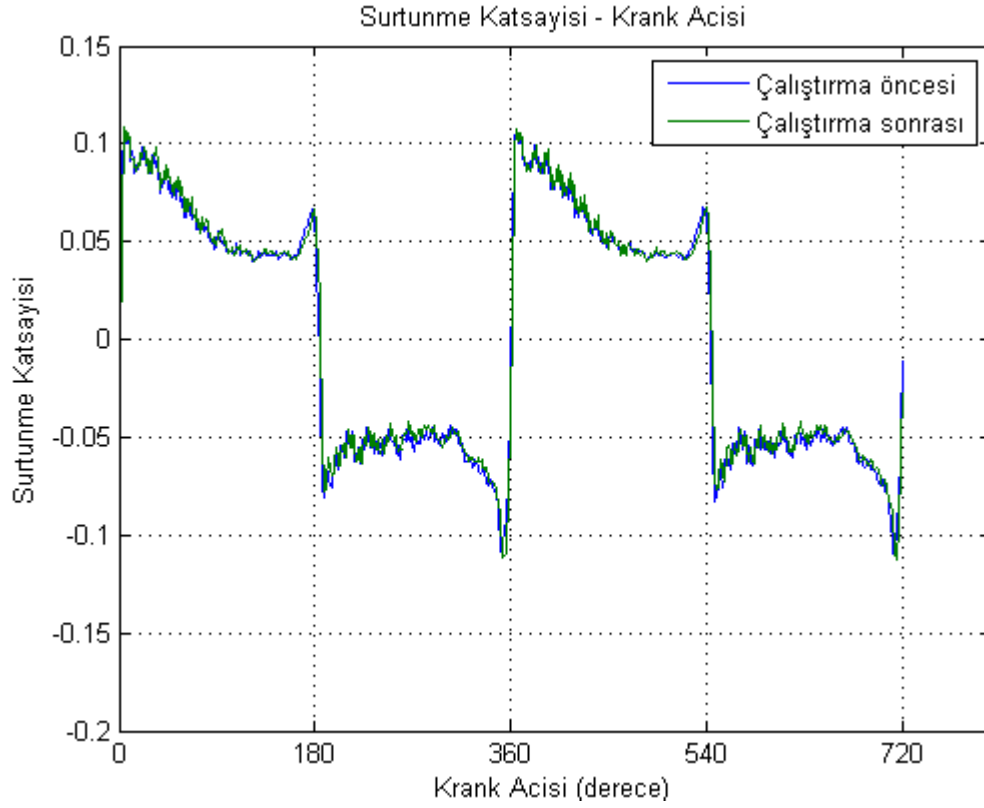
Şekil 3.25 : Katkısız yağa geri dönüşte 1 saatlik çalıştırma periyodu.

1 saatlik çalıştırma periyodundan sonra 70°C’de deney matrisindeki parametrelere göre ölçümler tekrardan alınmıştır. Daha sonra da oda sıcaklığına düşürülüp 20°C de deney matrisindeki parametrelere göre sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Burada alınan ölçümlerin önemi, grafit filminin alıştırma periyodu boyunca gömlek üzerinden ayrılma ihtimalini araştırmaktır. 70°C’de düşük yük yüksek hızlarda 1 saatlik çalıştırma periyodu öncesi ile sonrası arasında belirgin fark görülmemiştir. (Şekil 3.26) Burada katkısız yağa dönüşte alıştırma periyodu önce alınan değerler ile katkısız yağa dönüşte alıştırma periyodu sonrası alınan değerler kıyaslanmıştır. Aynı sıcaklıkta yüksek yük düşük hızlarda da aynı sonuçlarla karşılaştırılmıştır. (Şekil 3.27)

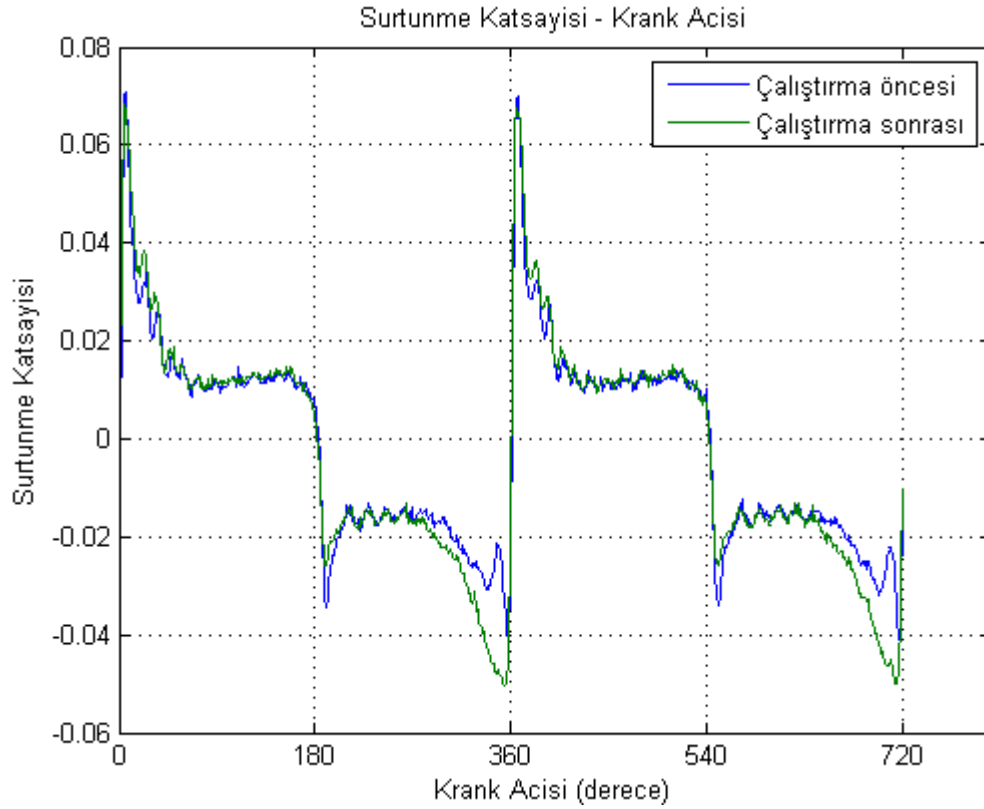


Şekil 3.26 : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 70°C sıcaklıkta 80N yük 700 dev/dak hızda sürtünme katsayısının değişimi.

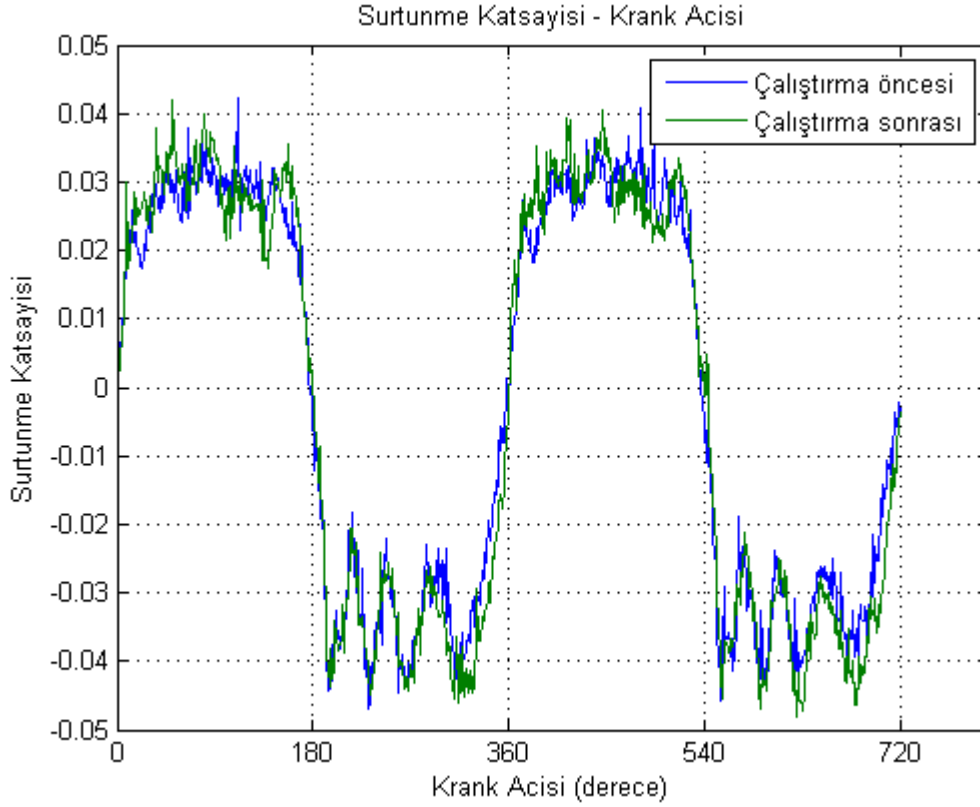
20°C yüksek yük düşük hızlarda genel manada sürtünme katsayısının değişmediği, gömlek üzerinde üst ölü noktalara yaklaşıldıkça karma yağlama rejiminden dolayı sürtünmede bir artış olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3.28) 20°C yüksek hız düşük yüklerde ise sürtünme katsayısında genel belirgin bir değişim olmadığı gözlenmiştir. (Şekil 3.29) Mevcut olduğu düşünülen grafit filminin sökülmeye başladığından söz edilebilir. 1 saatlik çalıştırma periyodu boyunca sürtünme katsayısı değişmemiştir.



Şekil 3.27 : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 70°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi.



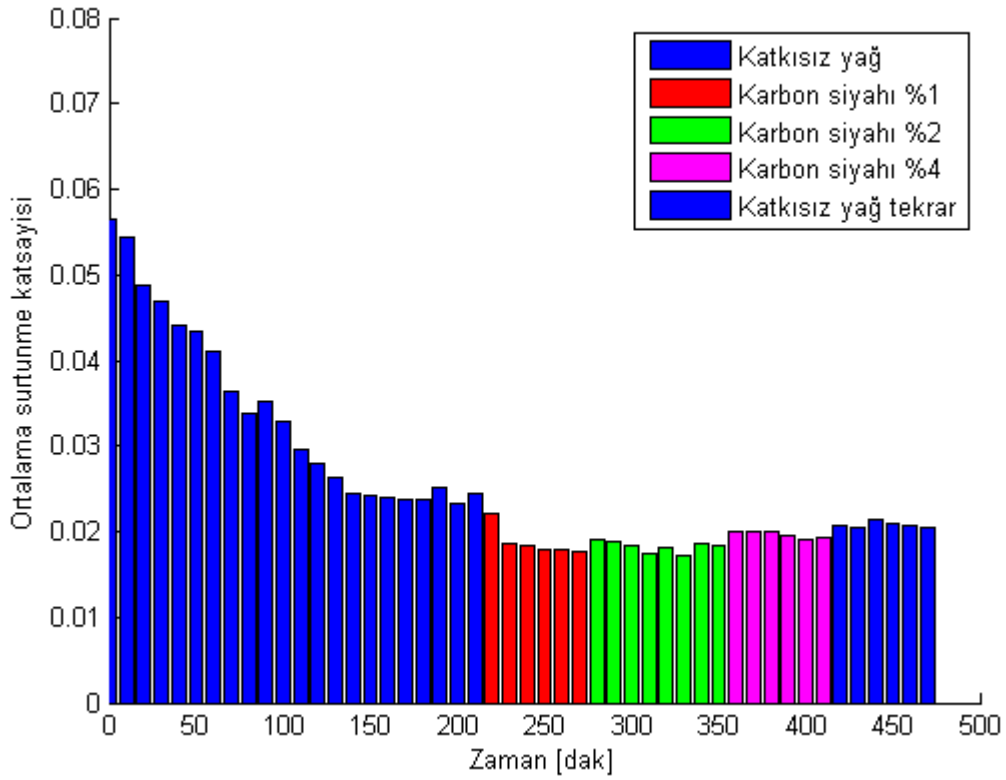
Şekil 3.28 : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 20°C sıcaklıkta 300 dev/dak hız 320N yükte sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 3.29 : Katkısız yağa geri dönüşte çalıştırma periyodu öncesi ve sonrası 20°C sıcaklıkta 80N yük 700 dev/dak hızda sürtünme katsayısının değişimi.

En son olarak alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotlarını karşılaştırarak ortalama sürtünme katsayısının nasıl geliştiği yorumlanabilir. Şekil 3.30'da deneyde kullanılan tüm yağlar için yapılan alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotları, ortalama sürtünme katsayısı-zaman grafiği şeklinde gösterilmiştir. Burada mavi renkteki sütunlar, katkısız yağı ile alınan değerleri, kırmızı renkli sütunlar %1 karbon siyahı içeren yağ ile alınan değerleri, yeşil renkteki sütunlar %2 karbon siyahı içeren yağ ile alınan değerleri, pembe renkteki sütunlar ise %4 karbon siyahı içeren yağ ile alınan değerleri göstermektedir. Alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotları 70°C sıcaklıkta, 500 dev/dak hızda ve 160N normal yükte yapılmıştır. Grafikte ilk olarak katkısız yağı ile yapılan 4 saatlik alıştırma periyodunda sürtünmenin 0.0565 değerinde 0.0240 değerine düştüğü görülebilir. Daha sonra %1'lik karbon siyahı ile yapılan 1 saatlik çalıştırma periyodunda katkısız yağa göre 0.0180 ile daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. %2'lik karbon siyahı ile yapılan 1 saatlik çalıştırma periyodunda ise değerin çok hafif yükseldiği ve 0.0185 civarlarına geldiği görülmektedir. %4 lük karbon siyahı içeren yağdaki sürtünme katsayısı artışı daha belirgindir ve yaklaşık 0.0195 civarlarında sürtünme katsayılarının elde edildiği görülmüştür. Katkısız yağa

geri dönüşte ise sürtünme katsayısı değeri 0.0210 değeri civarında sabit kalmıştır. Bu değer ilk katkısız yağ alıştırma sonunda alınan değer ile karşılaştırılırsa silindir gömleği yüzeyinde bir grafit filminin olduğu kanısına varılabilmektedir. Bu noktada en düşük sürtünme katsayılarının %1'lik karbon siyahında yaklaşık olarak 0.0180 değerlerinde elde edildiği görülmektedir. Aynı zamanda grafikte 220 ve 230 dakika süre değerleri arasında bir tribofilmin oluşmaya başladığı, ve bu filmin geri kalan zaman boyunca katkısız yağa geri dönüşte silindir gömleği ve segmanın hegzanla temizlenmesine rağmen filmin 1 saatlik çalıştırma periyodu boyunca sökülmediği yorumlanabilir.



Şekil 3.30 : Deneysel olarak kullanılan tüm katkısız yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması.

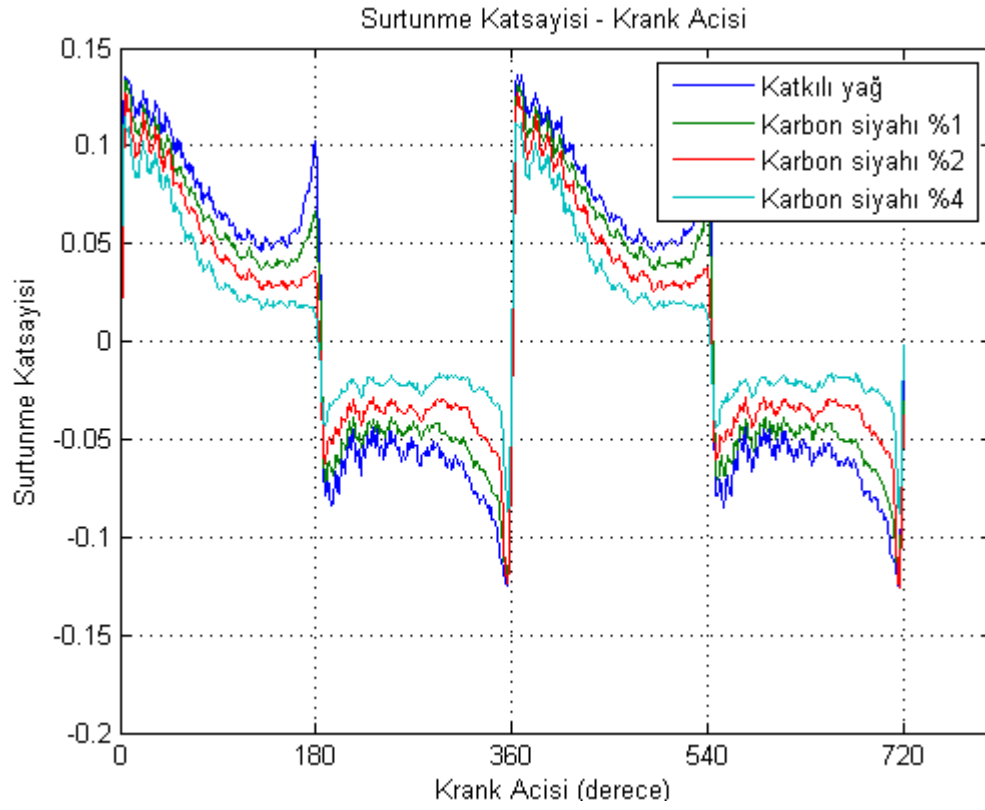
Bulunan sonuçlar genel manada özellikle yüzeyler arası temasın hakim olduğu yağlama rejimlerinde karbon siyahının sürtünmeyi düzenlemede etkin bir rol oynadığını, hidrodinamik rejimlere yaklaşıldıkça yüzeyler arasında temasın ortadan kalkmasından dolayı karbon siyahının sürtünme üzerine yarattığı etkiler daha minimal seviyelerde kalmıştır.

3.2. Katkılı yağ sonuçları

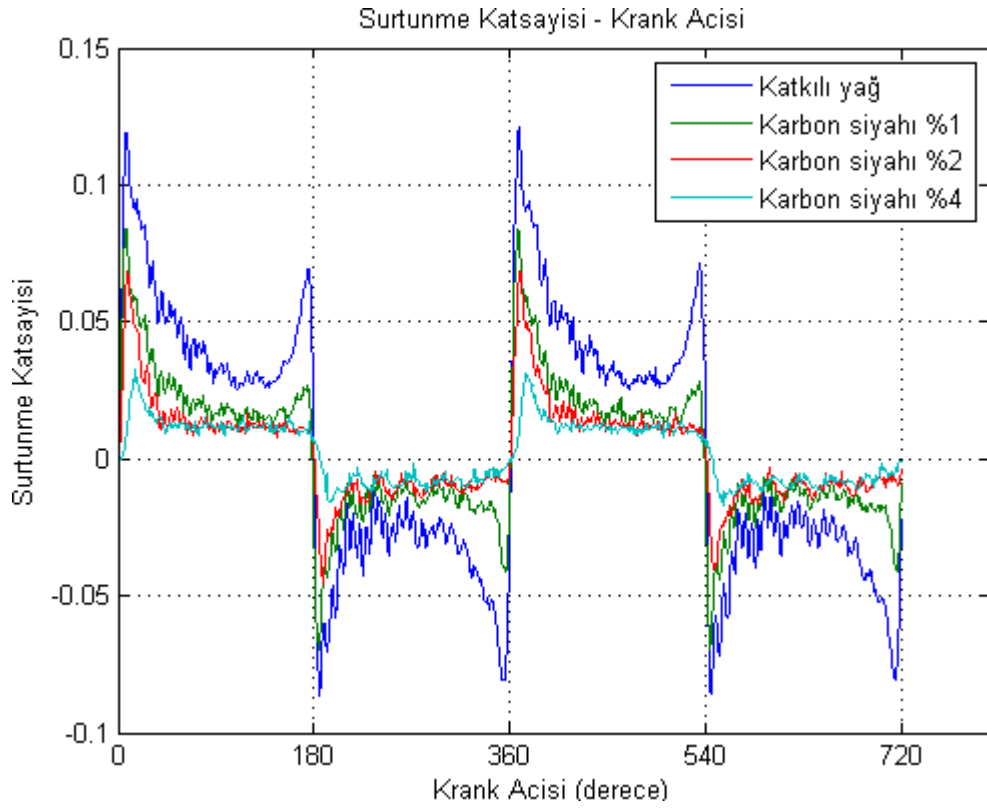
Deneyin ikinci aşamasında katkılı yağlar içine karbon siyahları katılarak sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. Sistemde farklı bir silindir gömleği üstünde katkılı yağ kullanılarak alıştırma periyodu yaklaşık 4 saat boyunca yapılmıştır. Alıştırma periyodunda sürtünme katsayısının sabit bir değerde kalması hedeflenmiştir. Sürtünme katsayısının sabitlenmesinden sonra 70°C’de deney matrisindeki parametreler kullanılarak sürtünme katsayısı ölçümleri alınmıştır. Daha sonra sistem 25°C’ye soğutulup bu sıcaklıkta tekrar ölçümler alınarak hidrodinamik rejimdeki sürtünme katsayılarının ölçümleri alınmıştır. Daha sonra katkılı yağa %1 karbon siyahı katılarak önce 25°C’de deney matrisindeki parametrelerle ölçümler alınmıştır. Daha sonra sistem 70°C’ye ısıtılarak 1 saat boyunca sürtünme katsayısı belirli değerlerde sabit kalacak şekilde çalıştırılmıştır. Sürtünme katsayısı sabit kaldıktan sonra 70°C’de deney matrisindeki parametrelerle ölçümler alınmıştır. Aynı prosedür, %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlara uygulanmıştır. Daha sonra katkılı yağa geri dönülerek yüzeyde bir tribofilm oluşma ihtimaline ya da yüzey pürüzlülüklerinin azalması ihtimaline bakılmıştır. Katkılı yağ tekrar bir saat çalıştırılarak söz konusu bir tribofilmin sökölme ihtimali araştırılmıştır.

Bu noktada 3 farklı parametrelerdeki durumlar incelenmiştir. Sınır yağlama rejimine yaklaşıldığı 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N normal yük değerlerinde sürtünme katsayıları incelenmiştir. Karşılaştırma katkılı yağ ile karbon siyahı içeren yağlar arasında yapılmıştır. Bu parametrelerde artan karbon konsantrasyonu ile birlikte sürtünme katsayısının hızla düştüğü gözlemlenmektedir. (Şekil 3.31) Şekilde üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru ilerlerken %4 karbon siyahı içeren yağın daha hidrodinamik bir davranışa geçtiği gözlemlenmiştir.

Daha karma yağlama rejiminin hakim olduğu 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yük değerlerinde ise benzer bir şekilde artan karbon konsantrasyonu ile birlikte sürtünme katsayılarının düştüğü gözlemlenmiştir. (Şekil 3.32) Üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağların daha hidrodinamik bir rejimde çalıştığı görülebilmektedir. %4 karbon siyahında özellikle sürtünmenin daha yüksek olduğu üst ölü noktalarda sürtünmenin çok daha düşük değerlere geldiği görülmektedir.

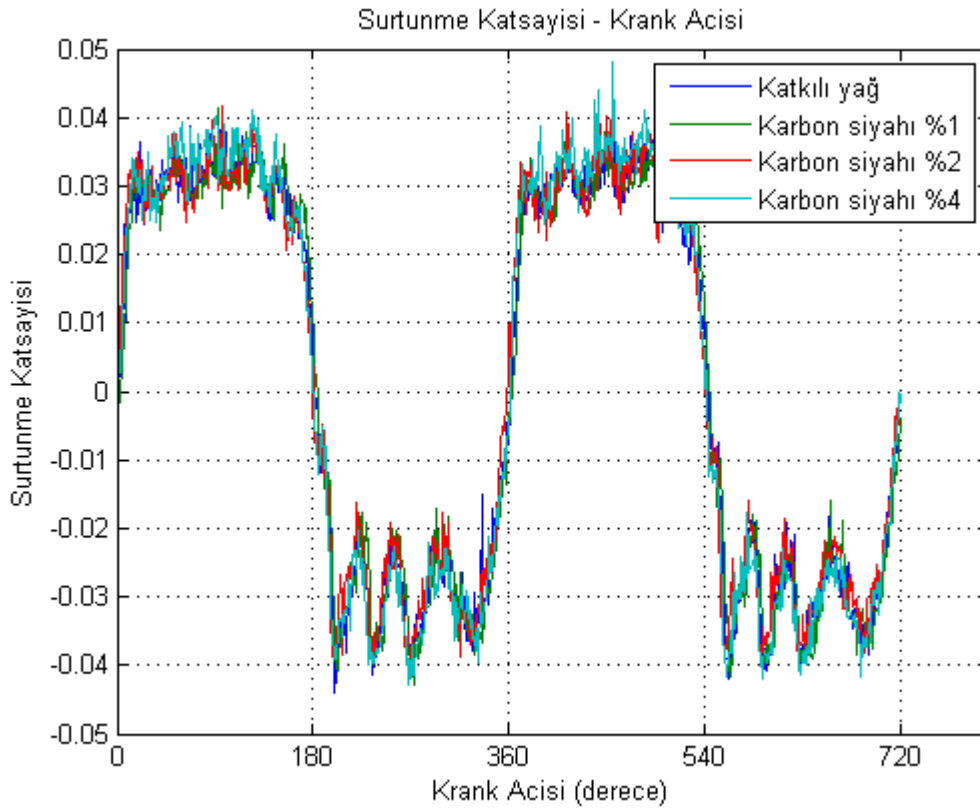


Şekil 3.31 : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkı yağların 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması



Şekil 3.32 : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkı yağların 70C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması

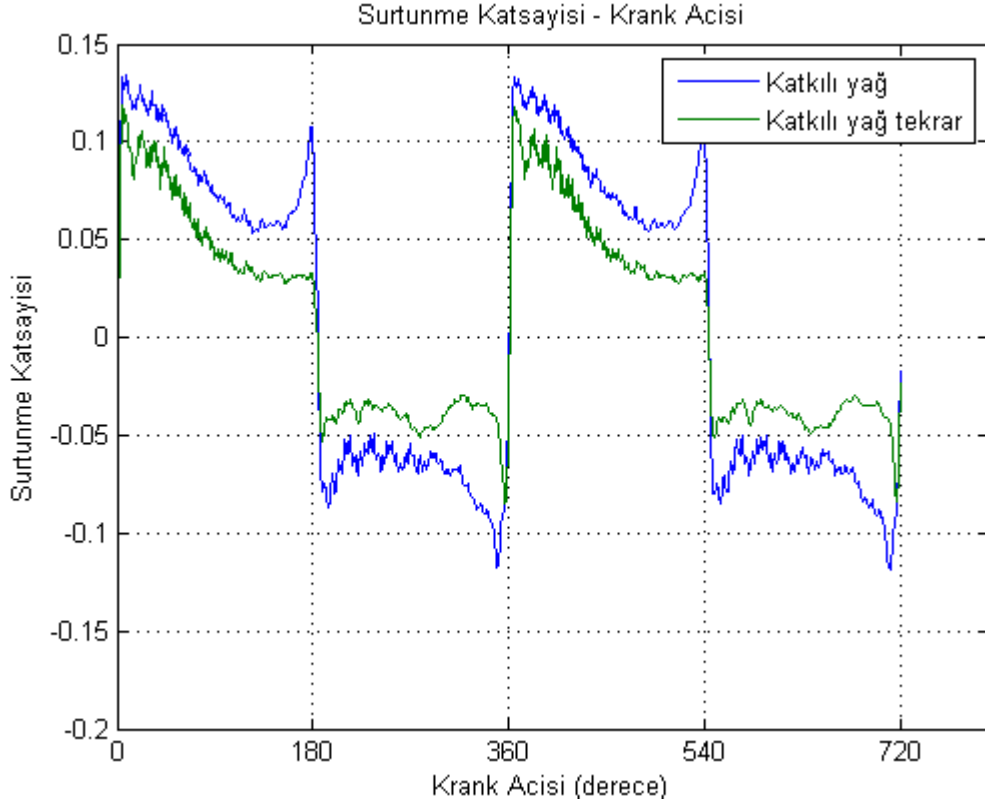
Daha hidrodinamik yağlama rejimi şartlarının elde edildiği 25°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N normal yük parametrelerinde ise katkılı yağ ile karbon siyahı içeren katkılı yağların arasında sürtünme katsayısı açısından belirgin bir fark görülmemiştir. Sadece %4 karbon siyahı içeren katkılı yağın sürtünme katsayısının biraz daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Bu rejimde sürtünme katsayısına sadece viskozite etkin olacağından bu sonuca bakılarak bu sıcaklıktaki katkılı yağ ve karbon siyahı içeren yağların viskozitesinin çok farklı olmadığı yorumlanabilir. (Şekil 3.33)



Şekil 3.33 : Katkılı yağ ile farklı konsantrasyonlarda karbon siyahı içeren katkılı yağların 25C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükte karşılaştırılması

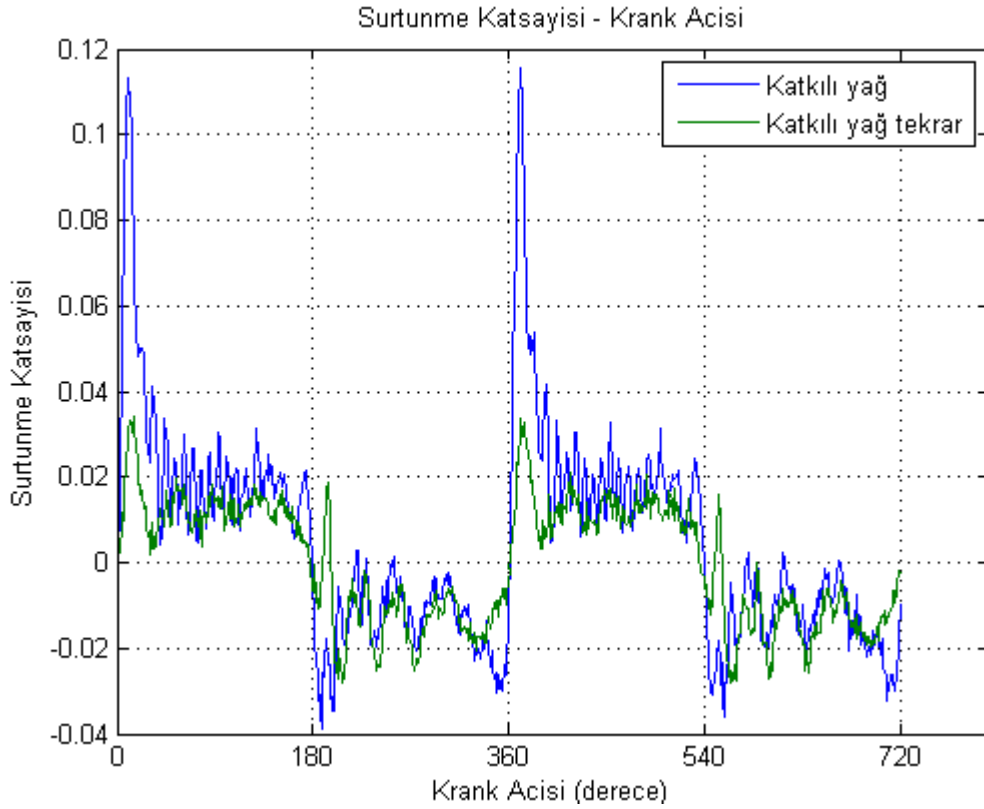
Deneyde katkılı yağa geri döndüğünde sürtünme katsayılarının belirgin derecede azaldığı, hatta üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru hidrodinamik rejimlerin hakim olduğu görülmektedir. (Şekil 3.34) Bu noktada bir tribofilmden daha çok yüzey pürüzlülüklerinin azalarak alt ölü noktalarda daha hidrodinamik bir rejim sağladığı görülmektedir. Segmanın yağı süpürerek hareket etmesinden dolayı segmanın önünde yağ film kalınlığı daha yüksek kalmaktadır ve yüzeyler alt ölü noktada tamamen birbirinden ayrılmaktadır. Alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru harekette ise segman arkasında yağ film kalınlığı daha az olduğundan yüzeyler birbiri ile temas

halindedir ve üst ölü noktaya doğru harekette üst ölü noktada yağ film kalınlığı yüksek olmasına rağmen hala karma bir rejimde kalmaktadır. Bu da üst ölü noktada yüzey pürüzlülüklerinin daha yüksek olduğunu, alt ölü noktada ise daha düşük olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülükleri ile ilgili detaylar Ek A'da daha detaylı olarak verilmiştir.



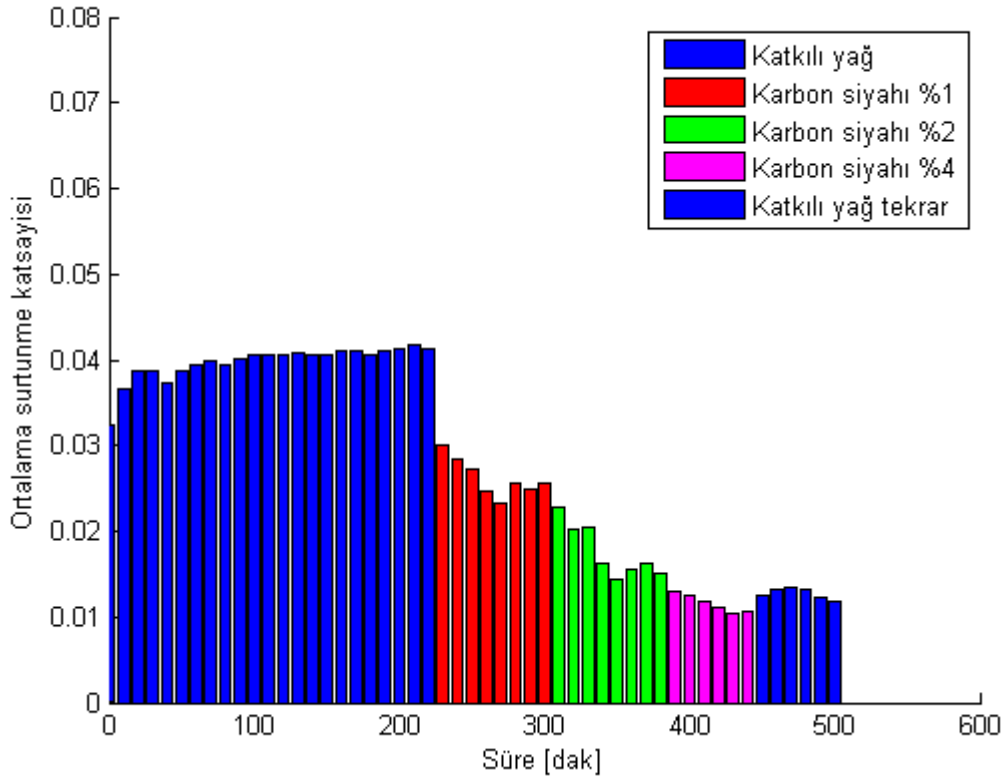
Şekil 3.34 : Katkılı yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N yükteki değerler ile alıştırma periyodu yapılan ilk katkılı yağ değerlerinin kıyaslanması

Benzer davranışlar 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N normal yüklerde de gözlenmiştir. Burada gene üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru bir hidrodinamik yağlama rejimine geçiş görülmektedir. (Şekil 3.35) Bu sonuca bakılarak ölü noktaların yüzey pürüzlülüklerinin daha da azaldığı sonucuna varılabilir. Ancak bu sonuçlara bakarak bir yüzey pürüzlülüğü azalmasının yanı sıra bir tribofilm oluşma ihtimali de göz önüne alınmalıdır. Katkılı yağların içinde sürtünmeyi düzenleyici maddeler olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 3.35 : Katkılı yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükteki değerler ile alıştırma periyodu yapılan ilk katkılı yağ değerlerinin kıyaslanması

Katkılı yağ ile yapılan deneylerde tüm alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotları 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde yapılmıştır. (Şekil 3.36) Bu periyotlardan katkılı yağın alıştırma periyoduna bakıldığında katkılı yağda sürtünme katsayısının 0.0325 değerinden 0.0410 değerinden sabitlendiği görülmüştür. Bunun nedeni katkılı yağlarda katkı maddelerinin temas yüzeylerine yapışarak moleküllerin kendi arasından sürtünmesi olabilir. Zaman içinde bu maddeler temas yüzeyine iyice yayılmış, ve sürtünmeyi sabitleştirmiş olabilir. Katkılı yağ içindeki karbon siyahı konsantrasyonu arttıkça sürtünme katsayısı hızlı bir şekilde düşmeye başlamıştır. Bunun nedeni katkılı yağın yüzeyde oluşturabildiği anti-aşınma filminin karbon siyahının konsantrasyonunun artması ile yırtıldığı ve yüzey pürüzlülüklerini azalttığı olarak gösterilebilir. Katkılı yağa tekrar dönüldüğünde sürtünme katsayısı önce artıp sonra azalmıştır.

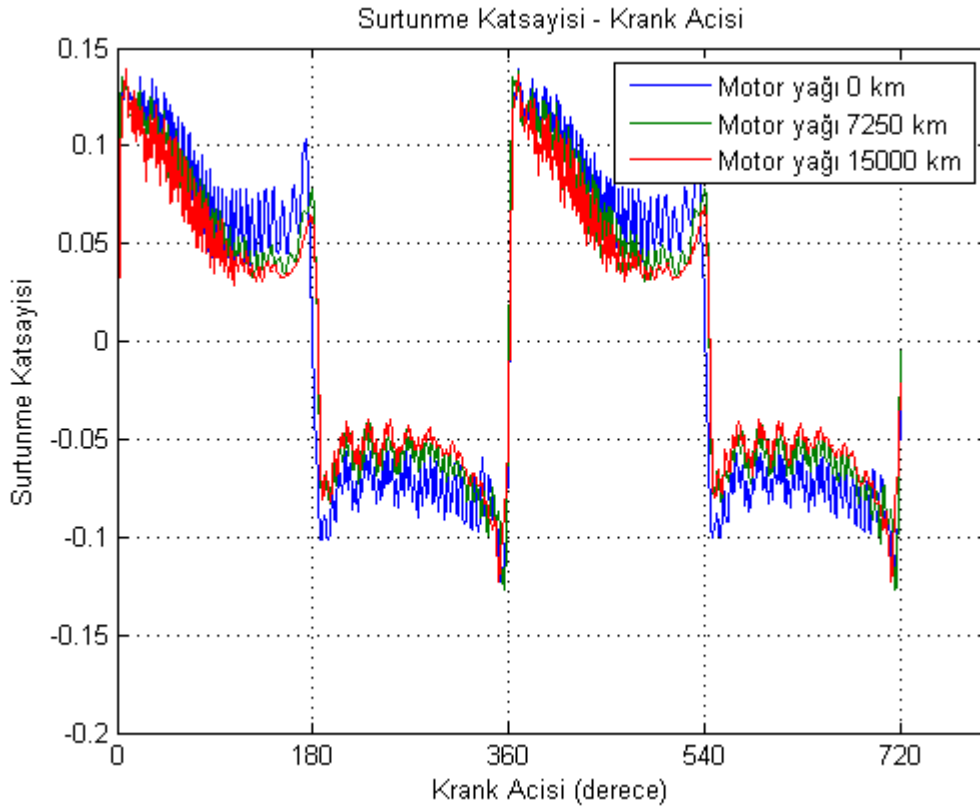


Şekil 3.36 : Deneylerde kullanılan tüm katkılı yağların 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 1 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması.

3.3. Motor Yağları Sonuçları

Deneyin son aşamasında Opet'ten temin edilen ve Ford Transit taşıtlarında kullanılan 5W30 motor yağlarından, kullanılmamış yağ, 7250 km'ye kadar kullanılmış yağ ve 15000 km'ye kadar kullanılmış yağ ile testler yapıp yağın yaşlanması ile birlikte sürtünme katsayısının nasıl geliştiği izlenmiştir. Gerçek motor yağlarında is partikülleri dışında farklı mekanizmaların da sürtünmede devreye girmesinden dolayı bu yağlar daha uzun sürelerde çalıştırılmıştır. Yeni bir silindir gömleği kullanılan deneyin bu aşamasında yaklaşık 4 saatlik 0 km'deki kullanılmamış motor yağı ile bir alıştırma yapıldıktan sonra sırayla 7250 ve 15000 km'deki yağlar 3 saat çalıştırılmıştır. Daha sonra tekrar 0 km'deki kullanılmamış yağa geri dönülerek sürtünme katsayıları incelenmiş ve yüzeyde bir tribofilm bırakılma ihtimaline bakılmıştır. Her yağ için 25°C ve 70°C'de deney matrisindeki parametrelere göre ölçümler alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

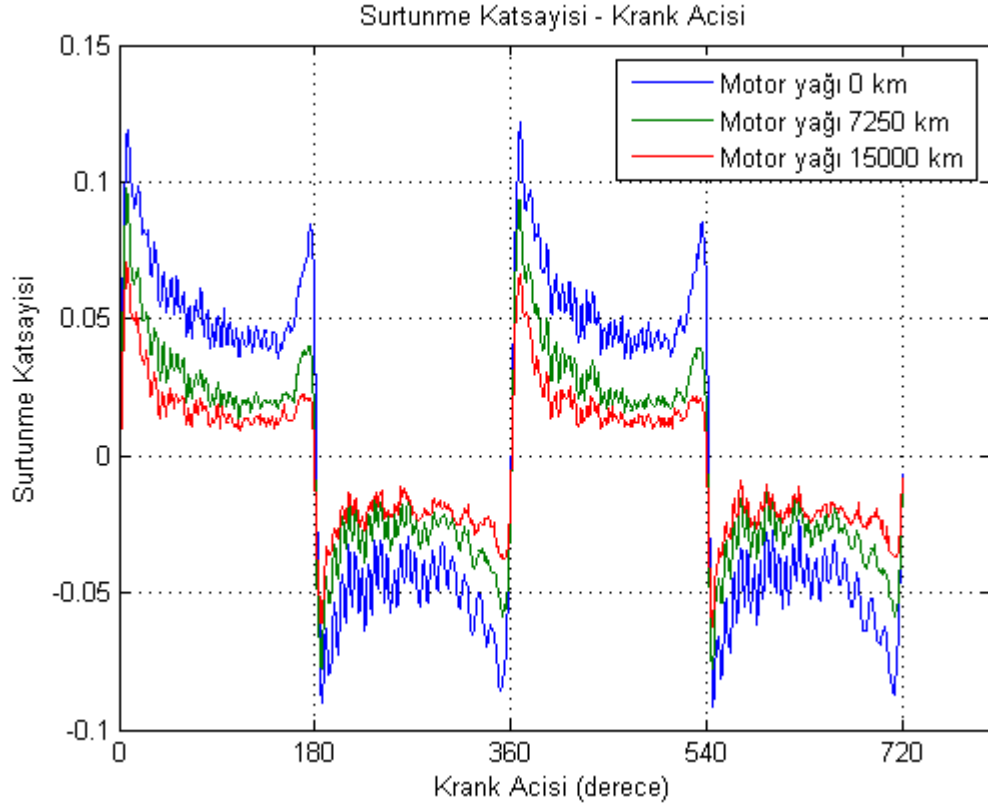
Daha sınır yağlama rejimine yaklaşıldığı 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N normal yük parametrelerinde daha yaşlı yağlarda sürtünmenin daha da azaldığı gözlenmiştir. Burada ilk dikkat çeken nokta bu parametrelerde strain gage'den okunan voltajın yüksek yüklerde gömlek yüzeyini kazımasından dolayı gerçekleşen bir anlık yükselme ve düşüşler gözükmektedir. Bunun nedeni daha düşük viskoziteli yağ ile çalışılmasından dolayı yağ filminin yüksek yüklerde yetersiz kalmasıdır. Ancak dikkat edilen bir nokta 7250 km'deki yağa bakıldığı zaman alt ölü noktadan üst ölü noktalara doğru bu kazımanın azaldığı, 15000 km'deki yağda ise neredeyse bu kazımanın hiç yaşanmadığı gözükmektedir. Üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru harekette ise alt ölü noktalara doğru kazımanın 7250 km'deki yağda daha az, 15000 km'deki yağda daha da azaldığı görülmüştür. (Şekil 3.37)



Şekil 3.37 : Sınır yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 240N yükte karşılaştırılması

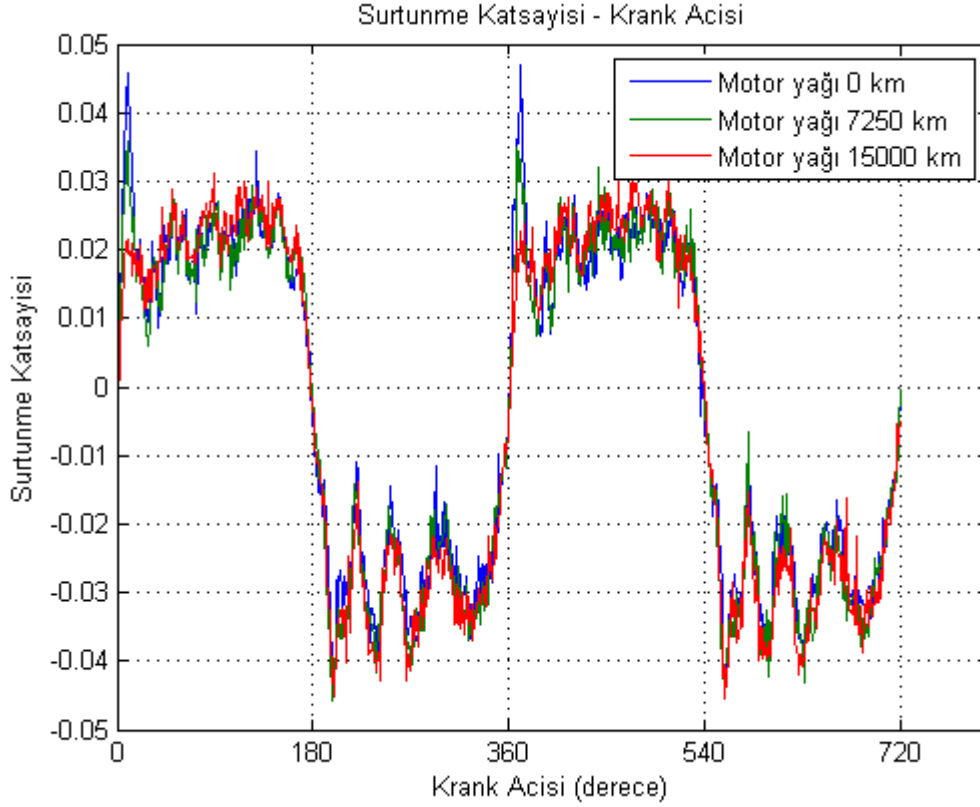
Karma yağlama rejimine yaklaşıldığı 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yük parametrelerinde benzer bir şekilde kullanılmış yağlarda daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. 7250 km'deki yağda sürtünme katsayıları büyük oranlarda düşmüş, 15000 km'deki yağlarda ise düşüş daha yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir.

Ölü noktalarda sürtünme katsayısının yüksek olması, pistonun hareketi boyunca karma yağlama rejiminin hakim olduğunu göstermektedir. Burada dikkat çeken nokta, hızın artması ve yükün azalması ile birlikte deneyde kullanılan yağlar arasında sürtünme katsayılarının arasındaki farkların artmasıdır. (Şekil 3.38)



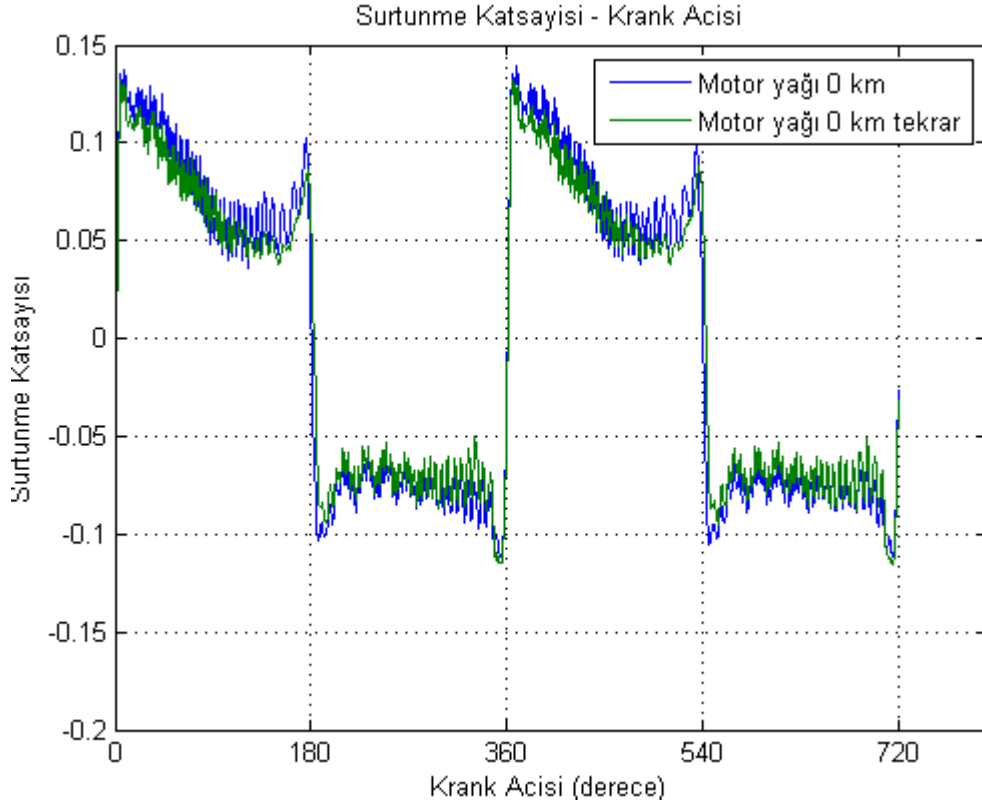
Şekil 3.38 : Karma yağlama rejimine yaklaşılacak parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması

Daha hidrodinamik şartların elde edildiği 25°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N normal yük parametrelerinde dikkat çeken ilk nokta, üst ölü noktalarda hidrodinamik bir davranışın görülemediği görülmüştür. Bunun nedeni, yağın daha düşük viskoziteye sahip olması ve yağ film kalınlığının 15W40 katkılı yağ ve katkısız yağa göre daha ince olması olabilir. Üst ölü noktada 7250 km'deki yağın sürtünme katsayısı, 0 km'deki kullanılmamış yağa göre daha az, 15000 km'deki yağın sürtünme katsayısı da 7250 km'deki yağa göre daha azalmıştır. Piston alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru ilerlerken her 3 yağda da tam hidrodinamik yağlama rejiminde çalıştığı görülmüştür. Bu noktada da 3 yağ arasında sürtünme katsayıları arasında belirgin farklar gözükmemiştir. Kullanılmış yağların sürtünme katsayıları, alt ölü noktadan üst ölü noktaya doğru çok az miktarda artmıştır. (Şekil 3.39)

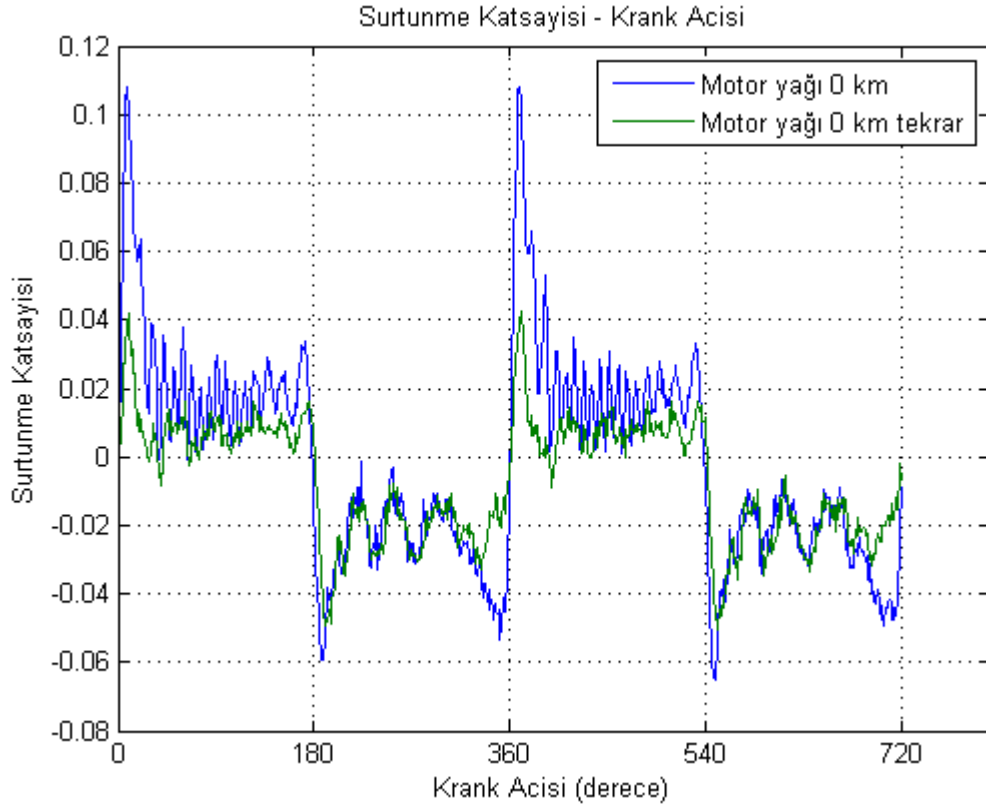


Şekil 3.39 : Karma yağlama rejimine yaklaşılan parametrelerde kullanılmış ve kullanılmamış gerçek motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N yükte karşılaştırılması

Daha sonra deneyde tekrar 0 km'deki kullanılmamış motor yağına dönülerek sürtünme katsayıları incelenmiştir. 0 km'deki motor yağına dönüldüğünde ilk dikkat çeken nokta, sürtünme katsayılarının daha düşük olduğudur. Bu da yüzeyde bir tribofilmin var olduğuna dair bir kanıt olabilmektedir. 70°C sıcaklıkta düşük hız ve yüksek yüklerde sürtünme katsayıları arasındaki fark daha az iken, aynı sıcaklıkta düşük yük ve yüksek hızda özellikle üst ölü noktalarda sürtünme katsayıları arasındaki bu farkın giderek arttığı gözlenmiştir. (Şekil 3.40 ve 3.41) Burada dikkat çeken nokta, ölü noktalara doğru sürtünmenin arttığıdır. Bu da yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir şekilde azalmadığının bir kanıtı olabilmektedir. Deneylerin bu kısmında kullanılan silindir gömleğinin yüzey pürüzlülük değerleri Ek A'da gösterilmiştir.

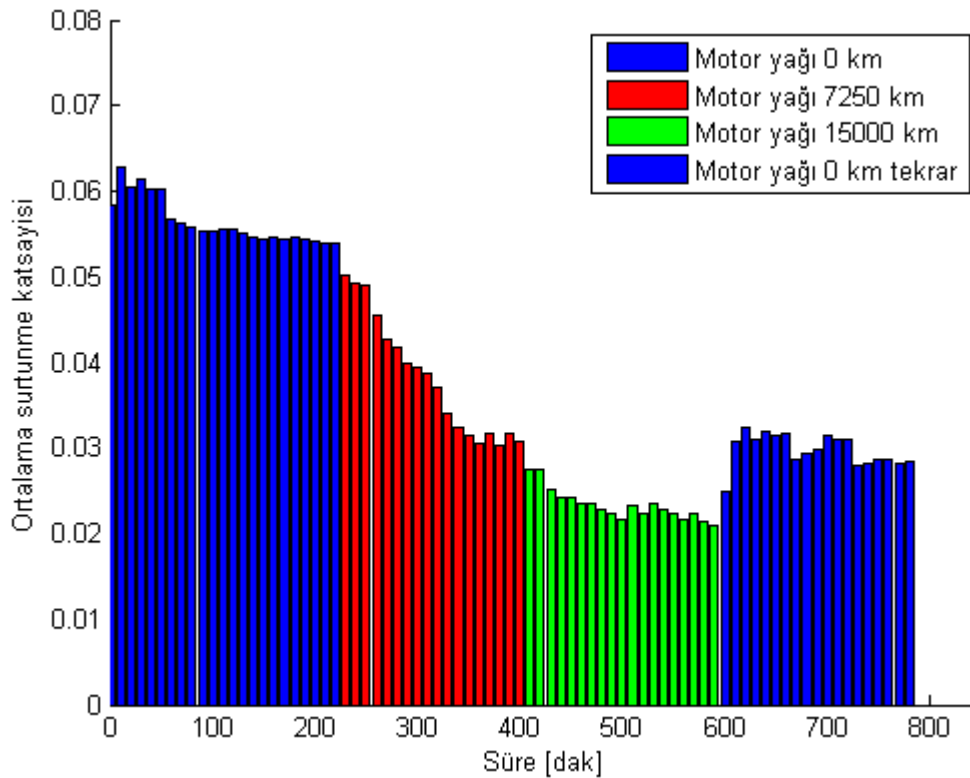


Şekil 3.40 : 0 km yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 300 dev/dak hız ve 320N yükteki değerler ile alıştırmayı yapılan ilk 0 km yağ değerlerinin kıyaslanması



Şekil 3.41 : 0 km yağa geri dönüşte 70°C sıcaklık, 700 dev/dak hız ve 80N yükteki değerler ile alıştırmayı yapılan ilk 0 km yağ değerlerinin kıyaslanması

Deneyde 0 km deki kullanılmamış yağın alıştırma periyoduna ve kullanılmış yağların 3 saatlik çalıştırma periyotlarına bakıldığında 0 km'deki yağın alıştırma boyunca ilk 1 saat içinde ortalama sürtünme katsayısının yükseldiği, daha sonra geriye kalan yaklaşık 3 saat boyunca azalmaya başladığı gözlenmiştir ve 0.0540 değerinde sabit kalmıştır. Bu değer katkılı yağda alıştırma periyodu sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerinden daha yüksek bir değerdir. 7250 km'deki kullanılmış motor yağında ise sürtünme giderek azalmaya başlamış ve yaklaşık 0.0310 değeri civarında sabit kalmıştır. 15000 km'deki kullanılmış motor yağında ise sürtünme katsayısı 3 saat sonunda 0.0210 değerinde kalmıştır. Daha sonra 0 km'deki motor yağına döndüğünde 3 saat çalışmanın ilk 2 saatinde ortalama sürtünme katsayısı yükselmiş 2 saatten sonra ortalama sürtünme katsayısı 0.0280 değerine azalarak sabit kalmıştır. Bu noktada sürtünme katsayılarının 7250 km'deki motor yağında daha fazla düştüğü, 15000 km'deki yağda ise düşüşün daha az ivmede gerçekleştiği görülmüştür. Motor yağlarında yağın yaşlanmasında farklı mekanizmaların rol almasından dolayı kesin bir yargıya varmak mümkün değildir. Detaylı bir yorum yapılabilmesi için yağ analizlerinin yapılması şarttır.(Şekil 3.42)



Şekil 3.42 : Deneylerde kullanılan tüm motor yağlarının 70°C sıcaklık, 500 dev/dak hız ve 160N normal yüklerde alıştırma ve 3 saatlik çalıştırma periyotlarının kıyaslanması.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yağı yaşlandırmada, özellikle viskozitesini artırmada etkili olan is partiküllerinin yerine kullanılan karbon siyahının piston segman ve silindir gömlek yüzeyinde oluşturduğu sürtünme karakteristiği incelenmiştir. Yüzey temaslarının orta seviyelerde olduğu ve karma yağlama rejimine yaklaşıldığı 70°C, 500 dev/dak ve 240N değerlerinde en düşük sürtünme katsayıları % 1 karbon siyahı içeren yağlarda elde edilmiştir. Daha sonra konsantrasyonun artması ile birlikte sürtünme katsayısı yükselmiş, ama katkısız yağın sürtünme katsayılarından daha düşük değerlerde kalmıştır. Bunun nedeni, karbon siyahının iç yapısının grafit benzemesinden ve karbon moleküllerinin birbiri üzerinde kayarak sürtünmeyi düzenlemesinden meydana gelmiş olabilir. Aynı zamanda yağların viskozitesindeki artışlardan dolayı yağ film kalınlığının arttığı ve temas noktalarının azaldığı varsayımı da yapılabilir. %1 karbon siyahı ile çalışılırken silindir üstünde çok kısa sürede sürtünme katsayısı belirgin derecede azalmıştır. %4 karbon siyahı içeren yağın alt ölü noktaya doğru hidrodinamik bir rejime kaydığı da tespit edilmiştir. Yüzey temaslarının daha da arttığı ve sınır yağlama rejimine yaklaşıldığı 70°C, 300 dev/dak ve 240N değerlerinde gene en düşük sürtünme katsayısı %1 karbon siyahı içeren yağ ile elde edilmiştir. Ancak %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlarda sürtünme katsayısı artmaya başlamıştır. %2 ve %4 karbon siyahı içeren yağlarda sürtünme katsayısının artma nedeni, yağ filminde bir bozulmadan dolayı olabilir. Kümelenmiş karbon siyahlarının yarattığı mekanik etkiden dolayı karbon siyahlarının segman üzerinde daha fazla stres yaratarak yüzeye temasın daha da artması da bir başka etken olabilir. Hidrodinamik yağlama rejiminde ise arada çok belirgin farklar olmamasına rağmen partikül konsantrasyonunun artması ile beraber sürtünme katsayısının üst ölü noktalara doğru arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni yağ beslemesi üst ölü noktadan yapıldığı için üst ölü noktalarda yağın daha viskoz olması olarak bakılabilir. Bu artışın bir başka nedeni de is partiküllerinin daha yüksek konsantrasyonlarda kümelenmeye başlaması ve bu noktada sadece viskoziteye etkimesi olarak bakılabilir. Bu kümelenmeye bağlı olarak yağın daha yüksek konsantrasyonlarda daha viskoz durumlara geldiği söylenebilir. Ancak bu artış, büyük oranlarda

gerçekleşmeyip sürtünme özelliklerini büyük ölçüde etkileyecek durumda olmamıştır. . Bu noktada karbon siyahı içeren yağlara yapılacak viskozite ölçümleri, karbon siyahının yağı ne derecede yaşlandırdığı ve yarattığı sürtünme katsayısındaki azalmanın mekanik etkiden ya da viskoziteden dolayı kaynaklandığı hakkında daha sağlıklı bilgiler edinmeye yarar sağlayacaktır.

Katkısız yağa geri dönüşün amacı, ilk katkısız yağ ile yapılan testlerde alınan sürtünme katsayısı ile kıyaslama yapmak olmuştur. Bu kıyaslama, yüzeyde bir grafit filmi olup olmadığı görmek için önemlidir. Daha sonra katkısız yağa dönüşte yapılan alıştırma periyodu ile bu grafit filminin yüzeyden sökülüp sökülmediği araştırılmıştır. 1 saatlik çalışma periyodu yapılmadan önce katkısız yağa geri dönüşte alınan değerler, deneyin başında kullanılan, alıştırma periyodu yapılmış katkısız yağda alınan değerlerden karma yağlama rejiminde daha düşük çıkmıştır. Bu da silindir gömleği üstünde bir grafit filminin var olduğuna dair bir fikir oluşturmuştur. Karbon siyahından katkısız yağa geri dönüşte silindir gömleği ve segmanı hegzanla temizlenmiş, yapılan 1 saatlik çalışma periyodu ile 70°C’de alınan sürtünme katsayısı değerlerinin sabit kaldığı görülmüştür. Bu da hegzanla temizlenmesine rağmen grafit filminin hala silindir gömleği üstünde bulunduğunu ve 1 saatlik alıştırma periyodunda bu filmin sökülmediği yorumlanmıştır. Ancak oda sıcaklığına dönüldüğü zaman 20°C sıcaklıkta alınan sürtünme katsayısı değerlerinde özellikle yüksek yüklerde üst ölü noktalara doğru sürtünme katsayısının keskin derecede arttığı görülmüştür. Burada üst ölü noktalarda karma yağlama rejimi meydana geldiğinden dolayı yüzeyle temas sonucu yüksek yükte bir film sökülmesinin gerçekleştiği yorumlanabilir. Daha sağlıklı sonuçlar almak için gelecek çalışmalarda Raman spektroskopisi SEM (Scanning Electron Microscope) gibi yöntemlerle yüzeyde oluşmuş film incelenmelidir.

Katkılı yağlara karbon siyahı katılması ile birlikte sürtünme katsayıları ciddi boyutlarda düşmeye başlamıştır. Karbon siyahı konsantrasyonunun artması ile birlikte bu düşüş paralel gerçekleşmiştir. Katkılı yağa geri dönüldüğünde sürtünme katsayısının ilk değerler ile kıyaslandığında aralarında ciddi farklar olduğu, ölü noktalarda sürtünme katsayısının azaldığı ve yağlama rejiminin giderek hidrodinamiğe döndüğü anlaşılmıştır. Bu noktada yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında katkısız yağa göre tepe noktalarında düşüşler daha belirgin gözükmektedir. Bu da karbon siyahı partiküllerinin yüzey pürüzlülüklerinin

alınmasında daha etkili olduğu, ve s¼rt¼nme katsayısının hem y¼zey p¼r¼zl¼l¼ğ¼nden hem de karbon molek¼llerinin birbirine s¼rt¼nmesinden dolayı azaldığı söylenebilir.

Gerçek motor yağlarında ise katkılı ve katkısız yağdaki alıştırma periyodu değerlerine g¼re daha y¼ksek s¼rt¼nme katsayıları, viskozitenin katkılı ve katkısız yağlara g¼re daha d¼ř¼k olmasından dolayı elde edilmiştir. Yağın yaşlanması ile birlikte s¼rt¼nme katsayısı giderek azalmaya başlamıştır. Burada kullanılmış yağlarda is partik¼llerinin de olması, s¼rt¼nme katsayısındaki azalmada etkin bir rol oynamış olabilmektedir. Daha sonra tekrar kullanılmamış yağa d¼n¼ld¼ğ¼nde bu yağın alıştırma periyodunda elde edilen s¼rt¼nme katsayılarından daha d¼ř¼k değerler elde edilmiştir. Bu da y¼zeyde bir tribofilmin var olduğuna dair g¼çlü bir kanıt olmuştur.

Katkılı yağda ve gerçek motor yağlarında g¼r¼len ortak nokta, yağın bir şekilde yaşlanmasının s¼rt¼nme katsayısını d¼ř¼rd¼ğ¼d¼r. Katkılı yağda sadece is partik¼lleri s¼rt¼nme katsayısının d¼řmesinde rol oynarken, motor yağlarında ise is partik¼lleri ile beraber farklı mekanizmaların da s¼rt¼nme üzerine etkidiği beklenmektedir. Aynı zamanda katkılı yağ ve gerçek motor yağlarında hangi t¼r katkı maddelerinin kullanıldığının bilinmesi, is partik¼llerinin yağ içindeki davranışı hakkında daha detaylı fikirler verebilir.

S¼rt¼nme karakteristikleri incelendiği zaman yağın viskozitesine etkiyerek yaşlandıran karbon siyahının karma yağlama rejiminde belirgin derecede s¼rt¼nmeyi d¼ř¼rd¼ğ¼, hidrodinamik yağlama rejiminde ise minimum derecede s¼rt¼nmeye etkidiği. Karma yağlama rejiminde segman ve g¼mlek y¼zeyiyle s¼rekli temas halinde olan karbon siyahının bu y¼zeylerde aşınmaya neden olması beklenmektedir. Bu y¼zden aynı karbon siyahları ile aşınma testlerinin yapılması silindir g¼mleęi y¼zerinde ne gibi mekanik değişimler olduğu hakkında daha açık fikirler verecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Cerny, J., Strnad, Z., Sebor, G.,** 2001: Composition and oxidation stability of SAE 15W-40 Oils, *Tribology International*, 34,127-134
- [2] **Basu, A., Berndorfer, A., Buelna, C., Campbell, J., Ismail, K., Lin, Y., Rodriguez, L., and Wang, S.S.** 2000: “Smart Sensing” of Oil Degradation and Oil Level Measurements in Gasoline Engines, *SAE Technical Paper Series*, 2001-01-1366
- [3] **Kaufmann, R.E., Myle, B.,** 2000: The Use of Cyclic Voltammetric Antioxidant Analysis for Proactive Engine Oil Condition Monitoring Program, *International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*, Paris, France, June 19-22
- [4] **Url-1** <http://en.wikipedia.org/wiki/Total_Acid_Number>, 22.10.2008
- [5] **Url-2** <http://en.wikipedia.org/wiki/Total_Base_Number>, 22.10.2008
- [6] **Robinson, N.,** 2000: Monitoring Oil Degradation with Infrared Spectroscopy, Wearcheck Division of Set Point Technology Group Technical Bulletin, Gauteng, South Africa
- [7] **Clague, A.D.H., Donnet, J.B., Wang, T.K., Peng, J.C.M,** 1999: A comparison of Diesel Engine Soot with Carbon Black, *Carbon*, 37 (1999) 1553–1565
- [8] **Troyer, D.D.,** 1999: Get Ready for More Soot, *Practicing Oil Analysis Magazine*, http://www.oilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=51 alındığı tarih 13.01.2009
- [9] **Selby, K.,** 1998: Rheology of Soot Thickened Diesel Engine Oils, *SAE Technical Paper Series*, 981369
- [10] **Url-3** <<http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/10873.aspx>> 17.12.2008
- [11] **Aldajah, S., Ajayi, O.O., Fenske, G.R., Goldblatt, I.L.,** 2006: Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Contamination of Diesel Engine Oil on Wear, *Wear*, 263 (2007) 93–98
- [12] **Masuko, M., Suzuki, A., Ueno, T.,** 2005: Influence of Chemical and Physical Contaminants on the Antiwear Performance of Model Automotive Engine Oil, *Proc. ImechE Vol.220 Part J: Journal of Engineering Tribology*, J00405
- [13] **Dippel, B., Jander, H., Heintzenberg, J.,** 1999: NIR FT Raman spectroscopy study of flame soot, *The Owner Societies Phys. Chem. Chem. Phys.*, 1, 4707E4712

- [14] **Green, D.A., Lewis, R.**, 2007: Effect of Soot on Oil Properties and Wear of Engine Components, *Journal of Physics, Applied Physics* 40, 5488-5501
- [15] **Green, D.A., Lewis, R.**, 2008: The Effect of Soot-contaminated Engine Oil on Wear and Friction: A Review, *Proc. ImechE Vol. 222 Part D: Journal of Automotive Engineering*, JAUTO468
- [16] **Akalin, O.**, 2008: Etkili Sunum Teknikleri, MAK596 Seminer ders notları <http://www.otomotiv.itu.edu.tr/~akalin/class/mak596/seminar1.pdf>, alındığı tarih 13.11.2008
- [17] **Liu, C., Nemoto, S., Ogano, S.** 2003: Effect of Soot Properties in Diesel Engine Oils on Frictional Characteristics, *Tribology Transactions*, **46:1**,12-18
- [18] **Urabe, M., Tomomatsu, T., Ishiki, K., Takiguchi, M., Someya, T.**, 1998: Variation of Piston Friction Force and Ring Lubricating Condition in a Diesel Engine with EGR, *SAE Technical Paper Series*, 982660
- [19] **Gautam, M., Chitoor, K., Balla, S., Keane, M.**, 1999: Contribution of Soot Contaminated Oils to Wear-Part II, *SAE Technical Paper Series*, 1999-01-1519
- [20] **Sato, H., Tokuoka, N., Yamamoto, H., Sasaki, M.**, 1999: Study on Wear Mechanism by Soot Contaminated in Engine Oil, *Society of Automotive Engineers Inc.*, 1999-01-3573
- [21] **Won, Y.Y., Meeker, S.P., Trappe, V., Weitz, D.A.**, 2004: Effect of Temperature on Carbon Black Agglomeration in Hydrocarbon Liquid with Adsorbed Dispersant, *Langmuir*, **Vol. 21**, No. 3, 2005
- [22] **Donnet, J.B., Bansal, R.C., Wang, M.J.**, 1993: Carbon Black:Science and Technology, CRC 2nd Edition, TP951, Pages 33-34, 38-39,221-224 <http://books.google.com/books?id=SPpx6MkRYwMC&pg=PA1&dq=carbon+black&hl=tr#PPP1,M1> alındığı tarih 09.11.2008
- [23] **Sadezky, A., Muckenhuber, H., Grothe, H., Niessner, R., Pöschl, U.**, 2005: Raman Microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: Spectralanalysis and Structural Information, *Carbon*, volume 43, Issue 8, Pages 1731-1742
- [24] **Akalin, O., Newaz, G.O.**, 2001: Piston Ring-Cylinder Bore Friction Modeling in Mixed Lubrication Regime: Part II—Correlation With Bench Test Data, *Journal of Tribology*, **Vol. 123**, 119-121

EKLER

EK A: Silindir G6mlekleri y6zey p6r6zl6l6k değerleri

Çizelge A.1 : Katkısız yağ deneylerinde kullanılan silindir gömleğinin alt, orta ve üst ölü noktada deneyden önce ve deneyden sonraki yüzey pürüzlülük değerleri

Alt ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.56	0.51
R _z	4.33	3.9
R _t	7.06	6.13
R _{sk}	-1.518	-2.005
R _p	1.16	0.9
Orta nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.48	0.48
R _z	4.13	4.3
R _t	7.83	7.23
R _{sk}	-2.929	-2.424
R _p	0.93	0.93
Üst ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.53	0.54
R _z	5.6	5.2
R _t	10.8	10.8
R _{sk}	-3.928	-2.706
R _p	1.0	1.0

Çizelge A.2 : Katkılı yağ deneylerinde kullanılan silindir gömleğinin alt, orta ve üst noktada deneyden önce ve deneyden sonraki yüzey pürüzlülük değerleri

Alt ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.48	0.42
R _z	3.83	3.6
R _t	5.8	5.76
R _{sk}	-1.947	-2.416
R _p	0.9	0.66
Orta nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.44	0.42
R _z	3.43	3.43
R _t	5.23	5.63
R _{sk}	-1.760	-2.510
R _p	0.9	0.73
Üst ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.49	0.43
R _z	4.16	4.03
R _t	6.76	5.96
R _{sk}	-1.955	-2.189
R _p	1.0	0.66

Çizelge A.3 : Gerçek motor yağları deneylerinde kullanılan silindir gömleğinin alt, orta ve üst ölü noktada deneyden önce ve deneyden sonraki yüzey pürüzlülük değerleri

Alt ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.40	0.44
R _z	3.66	4.16
R _t	7.8	8.6
R _{sk}	-3.507	-3.589
R _p	0.83	0.8
Orta nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.42	0.46
R _z	3.73	5.66
R _t	7.1	8.4
R _{sk}	-2.353	-3.237
R _p	0.93	0.93
Üst ölü nokta	Deneyden önce	Deneyden sonra
R _a	0.48	0.48
R _z	3.93	4.53
R _t	5.46	11.5
R _{sk}	-1.986	-4.178
R _p	0.93	0.83

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Can Talı

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul, 14.05.1984

Lise : Özel Kültür Fen Lisesi

Lisans Üniversite : Yıldız Teknik Üniversitesi

Çalışmaları : Üzüm Çekirdeğinin Diyet Lif Kaynağı Olarak Kullanılması, 2001,
TÜBİTAK Liselerarası Proje Yarışması Kimya Dalı

Benzinli Motorlarda Elektronik Püskürtme Sistemlerinin Araştırılması,
2006, Üniversite Lisans Tezi