İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER UYARMALI FLORESAN TEKNİĞİ İLE SİLİNDİR VE SEGMAN ARASI YAĞ FİLM KALINLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre AYRANCI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER UYARMALI FLORESAN TEKNİĞİ İLE SİLİNDİR VE SEGMAN ARASI YAĞ FİLM KALINLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre AYRANCI
(503141720)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özgen AKALIN

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503141720 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yunus Emre AYRANCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Lazer Uyarmalı Floresan Tekniği ile Silindir ve Segman Arası Yağ Film Kalınlığının Ölçülmesi " başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Özgen AKALIN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. H. Fatih Uğurdağ Özyeğin Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 22 Aralık 2016

Aileme ,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesine olanak sağlayan, tezimin her aşamasında beni değerli bilgileri ile yönlendiren ve katkılarını esirgemeyen, danışmanım Doç. Dr. Özgen Akalın'a gösterdiği ilgiden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması 214M300 nolu "İçten Yanmalı Motorlarda Silindir Yağ Film Hareketlerinin Ölçülmesi ve Analizi" adlı TÜBİTAK araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projenin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan mali destekleri ve bu proje kapsamında sağlanan burs için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin tamamlanmasında önemli katkıları olan Prof. Dr. Ali Serpengüzel, Prof. Dr. Gönül Özen Eryürek, Dr. Osman Taha Şen ve Ar. Gör. Onur Gezer'e de çok teşekkür ederim.

Bunun yanında deney çalısmalarım boyunca yardımlarını benden esirgemeyen Ar. Gör. Çağatay Yelkarası, Ar. Gör. Sevcan Tabanlı ve Ar. Gör. Gökhan Bilir'e teşekkür ederim.

Son ama en önemli olarak, tüm hayatım boyunca beni her yönden ve her konuda destekleyen aileme çok teşekkür ederim.

Aralık 2016

Yunus Emre Ayrancı
(Otomotiv Mühendisliği)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Projenin Amacı 1
1.2 Yağlama ve Yağlama Rejimleri 2
1.2.1 Hidrodinamik yağlama 3
1.2.2 Karma yağlama 4
1.2.3 Sınır yağlama 4
1.2.4 Elastohidrodinamik yağlama 5
1.3 Yağ Filmi Ölçüm Yöntemleri 5
1.3.1 Elektriksel yöntem 6
1.3.2 Akustik yöntem 6
1.3.3 Optik yöntem 6
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **9**
3. DENEYSEL YÖNTEM **23**
3.1 Ölçüm Yöntemi Seçimi 23
3.2 Ölçümde Kullanılan Ekipmanlar ve Seçimi 23
3.2.1 Lazer 23
3.2.2 Fotomultiplikatör (PMT) 25
3.2.3 Dalga boyu seçici (filtre) 28
3.2.4 Ayırıcı (splitter) 29
3.2.5 Birleştirici (kombiner) 29
3.2.6 Floresan boya ve motor yağı 30
3.3 Ölçüm Yöntemi Prosedürü 34
4. KALİBRASYON **41**
5. DENEY SONUÇLARI **55**
6. DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER **83**
KAYNAKLAR **85**
EKLER **89**
ÖZGEÇMİŞ **95**

KISALTMALAR

SAE : Society of Automotive Engineering (Otomotiv Müh. Topluluğu)
KMA : Krank Mili Açısı
LUF : Lazer Uyarmalı Floresan
PMT : Photomultiplier Tubes(Fotomultiplikatör)
PAO : Poly-Alpfa-Olefin
ZDDP : Zinc dialkyldithiophosphates
He-Cd : Helyum Katmiyum
rpm : Revolution Per Minute(Bir Dakikadaki Devir Sayısı)
N : Newton
FC/APC : Ferrule Connector/Angle Physical Contact
FC/PC : Ferrule Connector/Physical Contact
rms : Root Mean Square
cP : Santi Puaz
°C : Santigrad
cSt : Santistoks
Rz : Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
mV : Mili Volt
mW : Mili Watt
nm : Nanometre
µm : Mikro Metre
µl : Mikro Litre
mrad : Mili Radyan
mA : Mili Amper
lm : Lümen
g : Gram
s : Saniye

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Lazer Işını Dalga Boyu Aralığına Göre Renkleri..... **24**
Çizelge 3.2 : Spectra Physics Excelsior One Lazer Teknik Özellikleri. **25**
Çizelge 3.3 : PMT Teknik Özellikleri **27**
Çizelge 3.4 : PAO 6 Teknik Özellikleri..... **30**
Çizelge 3.5 : Hazırlanan Yağ Örnekleri. **33**
Çizelge 3.6 : Ekipmanların Kayıp Oranları. **39**
Çizelge 4.1 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (30°C, 160 N ve 150 d/dak). **47**
Çizelge 4.2 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (30°C, 160 N ve 150 d/dak). **47**
Çizelge 4.3 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (50°C, 160 N ve 150 d/dak). **47**
Çizelge 4.4 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (50°C, 160 N ve 150 d/dak). **48**
Çizelge 4.5 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (70°C, 160 N ve 150 d/dak). **48**
Çizelge 4.6 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (70°C, 160 N ve 150 d/dak). **48**
Çizelge 4.7 : Kalibrasyon Katsayıları. **54**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Orta Büyüklükte Binek Araç İçin Şehir İçi Enerji Kaybı (Taylor,1998)... **1**
Şekil 1.2 : Stribeck Eğrisi (Comfort,2003)..... **3**
Şekil 1.3 : Hidrodinamik Yağlama (Url-1)..... **4**
Şekil 1.4 : Karma Yağlama (Hamrock,1994). **4**
Şekil 1.5 : Sınır Yağlama (Url-1). **5**
Şekil 1.6 : Elastohidrodinamik Yağlama (Url-1)..... **5**
Şekil 2.1 : Optik Deney Düzeneği (Ting,1980)..... **12**
Şekil 2.2 : Quartz Pencere İle Lazer Işınlarının Piston Gömleğine Odaklanması (Wong ve Hoult, 1991)..... **14**
Şekil 2.3 : Lazer Uyarmalı Floresan Tekniği Bağlantı Şeması (Shaw,1992)..... **15**
Şekil 2.4 : Kalibrasyon İçin Kurulan Test Düzeneği (Phen vd.,1993)..... **17**
Şekil 2.5 : Kapasitans ve LUF Tekniğinin Birlikte Kullanıldığı 4 Kanallı Sistem (Stiyer and Ghandhi,1997)..... **18**
Şekil 2.6 : Quartz Pencereli Piston Gömleği İle LUF Ölçüm Düzeneği (Thirouard vd.,1998)..... **20**
Şekil 3.1 : Spectra Physics Excelsior One Lazer..... **24**
Şekil 3.2 : Fotomultiplikatör(PMT) Yapısı (Url-2)..... **26**
Şekil 3.3 : Hamamatsu H10722-20 Serisi PMT..... **26**
Şekil 3.4 : PMT Spektral Cevap Karakteristiği **27**
Şekil 3.5 : Lazer Çıkışında Kullanılan 445 nm Filtre..... **28**
Şekil 3.6 : Lazer Işınlarını 2 Kola Ayırmak İçin Kullanılan Ayırıcı..... **29**
Şekil 3.7 : Lazer Işınlarını 2 Kola Ayırmak İçin Kullanılan Ayırıcı..... **29**
Şekil 3.8 : Boya Konsantrasyonlarının Hassas Terazi İle Ayarlanması..... **32**
Şekil 3.9 : Etanol İle Çözülmüş Boyaların Floresan Spektrumları..... **32**
Şekil 3.10 : Coumarin 523 Floresan Spektrumu (Çözücü CH_2Cl_2)..... **33**
Şekil 3.11 : Coumarin 540A Floresan Spektrumu (Çözücü CH_2Cl_2)..... **34**
Şekil 3.12 : Test Sistemi..... **35**
Şekil 3.13 : Test Sistemi 3 Boyutlu Teknik Çizimi..... **35**
Şekil 3.14 : Tasarlanan LUF Yağ Film Kalınlığı Ölçme Sisteminin Bağlantı Şem.. **36**
Şekil 3.15 : LUF Yağ Film Kalınlığı Ölçme Sistemi..... **37**
Şekil 3.16 : Segman Tutucu..... **38**
Şekil 3.17 : Segman Üzerinde Açılan Fiber Optik Kablo Delikleri **38**
Şekil 3.18 : Segman İçine Monte Edilen Fiber-Optik Kabloların Mikroskop Görüntüleri. (1.kanal sol, 2. kanal sağ)..... **39**
Şekil 3.19 : Fiber Optik Işık Gücü Ölçer ve Sensörü..... **40**
Şekil 4.1 : Kalibrasyon İçin Kullanılan Lazerle Honlanmış Silindir Yüzeyi..... **41**
Şekil 4.2 : Kalibrasyon Gömleğinin Optik Profilometre Ölçümü..... **42**
Şekil 4.3 : Hesaplanmış Temsili Rezervuar Yüzeyi..... **43**
Şekil 4.4 : Hesaplanmış Temsili Rezervuar Kesit Profili..... **43**
Şekil 4.5 : Etching İşlemi Uygulanmış Kalibrasyon Gömleği **44**

Şekil 4.6 : 4 Numaralı Rezervuar İçin Profilometre Ölçüm Sonucu **44**
Şekil 4.7 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 160 N, 150 d/dak)..... **45**
Şekil 4.8 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 160 N, 150 d/dak)..... **46**
Şekil 4.9 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 160 N, 150 d/dak)..... **46**
Şekil 4.10 : PMT 1 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (30°C, 160 N, 150 d/dak) **49**
Şekil 4.11 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (30°C, 160 N, 150 d/dak) **49**
Şekil 4.12 : PMT 1 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (50°C, 160 N, 150 d/dak) **50**
Şekil 4.13 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (50°C, 160 N, 150 d/dak) **50**
Şekil 4.14 : PMT 1Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (70°C, 160 N, 150 d/dak) **51**
Şekil 4.15 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (70°C, 160 N, 150 d/dak) **51**
Şekil 4.16 : Normalize Edilmiş PMT 1 (30°C, 160 N, 150 d/dak)..... **52**
Şekil 4.17 : Normalize Edilmiş PMT 2 (30°C, 160 N, 150 d/dak)..... **52**
Şekil 4.18 : Normalize Edilmiş PMT 1 (50°C, 160 N, 150 d/dak)..... **53**
Şekil 4.19 : Normalize Edilmiş PMT 2 (50°C, 160 N, 150 d/dak)..... **53**
Şekil 4.20 : Normalize Edilmiş PMT 1 (70°C, 160 N, 150 d/dak)..... **54**
Şekil 4.21 : Normalize Edilmiş PMT 2 (70°C, 160 N, 150 d/dak)..... **54**
Şekil 5.1 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 160 N)..... **56**
Şekil 5.2 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 160 N)..... **57**
Şekil 5.3 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 160 N)..... **58**
Şekil 5.4 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 200 N)..... **59**
Şekil 5.5 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 200 N)..... **60**
Şekil 5.6 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 200 N)..... **61**
Şekil 5.7 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 240 N)..... **62**
Şekil 5.8 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 240 N)..... **63**
Şekil 5.9 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 240 N)..... **64**
Şekil 5.10 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 300 d/dak)..... **65**
Şekil 5.11 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 300 d/dak)..... **66**
Şekil 5.12 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 300 d/dak)..... **67**

Şekil 5.13 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 500 d/dak) **68**
Şekil 5.14 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 500 d/dak) **69**
Şekil 5.15 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 500 d/dak) **70**
Şekil 5.16 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 700 d/dak) **71**
Şekil 5.17 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 700 d/dak) **72**
Şekil 5.18 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 700 d/dak) **73**
Şekil 5.19 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 300 d/dak)..... **74**
Şekil 5.20 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 300 d/dak)..... **75**
Şekil 5.21 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N , 300 d/dak)..... **76**
Şekil 5.22 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 500 d/dak)..... **77**
Şekil 5.23 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 500 d/dak)..... **78**
Şekil 5.24 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N, 500 d/dak)..... **79**
Şekil 5.25 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 700 d/dak)..... **80**
Şekil 5.26 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 700 d/dak)..... **81**
Şekil 5.27 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N, 700 d/dak)..... **82**

LAZER UYARMALI FLORESAN TEKNİĞİ İLE SİLİNDİR VE SEGMAN ARASI YAĞ FİLM KALINLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

ÖZET

Son yıllarda teknolojinin büyük bir hızla gelişmesi sonucu otomotiv sektöründeki rekabet de hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır. Dünyada petrol ve türevi yakıtların rezervlerinin azalması ve dolayısıyla birim fiyatlarının artmasıyla başta otomotiv sektöründe olmak üzere tüm sektörlerde özgül enerji harcamasının azaltılmasına yönelik çok sayıda araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır. Ekonomik kaygıların yanı sıra teknoloji ilerledikçe yürürlüğe giren katı egzoz emisyon standartları motor üreticilerini egzoz emisyonlarını azaltma konusunda zorlamaktadır. Otomotiv sektöründe enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar ağırlık azaltma, sürtünmeleri azaltma ve ısıl verimi arttırma gibi başlıklar altında incelenmektedir. Motor kilometre ömrünün gittikçe arttığı günümüzde dinamik motor komponentlerinin yağlanması ömür açısından da oldukça büyük önem taşımaktadır. Yağlamanın iyileşmesi ile aşınmaların minimuma inmesini sağlanacak, bu da motor ömrünü uzatacaktır. Motordaki yağlama performansının geliştirilmesi; yakıt tüketimi, motor gücü, yağ tüketimi, motorun ömrü, verim ve egzos emisyonları üzerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Bu durum yatırımcı ve araştırmacıları silindir ve segman arasındaki yağ film kalınlığının ölçümü ve iyileştirilmesi konusu üzerinde araştırma yapmaya yöneltmiştir. Bu proje kapsamında içten yanmalı motorlarda yağ film kalınlığı ölçüm yöntemleri incelenmiş ve bu kapsamda ölçüm yöntemlerinden biri olan lazer uyarmalı floresan tekniği araştırılmıştır. İncelenen silindir-segman profili arasındaki yağ film kalınlığı, lazerle honlanmış silindir gömleği ile kalibre edilerek 1 motor çevrimi boyunca yağ film kalınlığının değişimi gözlemlenmiştir.

Çalışma başlangıcında deney düzeneğini kurmak için gerekli ekipmanlar tedarik edilmeye çalışılmış ve akabinde deney düzeneği çalışır hale getirilmiştir. Kurulan deney düzeneğindeki lazeri Labview Programı üzerinden kontrol etmek için RS232 portu üzerinden haberleşme yapılarak, kontrol algoritması geliştirilmiştir. Lazerin piston-segman arasındaki floresan boyalı yağdan yansıyan ışınları fotomultiplikatörde (PMT) gerilim sinyallerine çevirilip National Instruments veri toplama kartı vasıtası ile toplanarak Labview Programında grafik haline getirilip kaydedilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, yanmanın olmadığı bir deney düzeneği üzerinde yağ film kalınlığı krank açısının fonksiyonu olarak lazer uyarmalı floresan tekniği ile ölçülmüştür. Kurulan deney düzeneği ile motordaki yağ film kalınlığının değişimi yorumlanarak buradaki tribolojik olaylara ışık tutmasına katkı sağlanmış ve farklı piston gömleği, segman ve yağ tiplerine göre çalışmaların yapılmasına olanak tanıdığından çalışmanın bundan sonraki tribolojik çalışmalara da rehberlik etmesi amaçlanmıştır.

PISTON RING AND CYLINDER BORE LUBRICANT FILM THICKNESS MEASUREMENT USING LASER INDUCED FLORESCENCE TECHNIQUE

SUMMARY

In recent years, the rapid development of technology has led to a rapid increase in competition in the automotive sector. Unit prices increased in all sectors due to the reduction of oil and its derivative fuel reserves in the world, therefore especially in the automotive sector numerous researches are being carried out so as to reduction of specific energy consumption. Besides economic concerns, strict exhaust emission standards which apply because of technological progresses are forcing manufacturers to reduce engine exhaust emissions. Efforts to reduce energy consumption being examined as a title of weight reduction, friction reduction and improving thermal effiency in the automotive industry. Nowadays, getting increases the life of the engine mileage, lubrication of dynamic engine components is very important for engine life. As it is known, the total fuel energy cannot be taken as output energy from an internal combustion engine and there are several components of this power loss like heat, mechanical and pumping losses. The significant part of the total power loss is because of the piston ring and cylinder bore friction in a reciprocating engine. Oil film thickness is one of the effective element for reciprocating engines operation which is related to tribological performance. Wear is decreased by heal of lubrication which will extend the life of the engine. Improvement of lubrication performance ensures recruitment fuel consumption, engine power, oil consumption, engine life, efficiency, and exhaust emissions in engine. This lead investors and researchers to investigate the issue of measuring and improving the film thickness of the oil film between the cylinder and the ring.

Numerous studies about elasto-hydrodynamic and hydrodynamic lubricant film thickness measurements eventually guided engine technology towards tribology reduction losses, via the formulation of new lubricants (additive technology, physical properties enhancement), a more controlled oil transport through the ring pack and the formulation of the proper lubricant film in the piston-liner interface. Piston rings of internal combustion engines are required to slide smoothly with great speed variation, including zero-speed, at high temperatures and loads, and to have small friction and wear even under severe conditions without a sufficient lubricating oil supply. The role of piston rings is also becoming more complex in line with the recent requirements for lower oil consumption and friction. The role of piston rings is also becoming more complex in line with the recent requirements for lower oil consumption and friction. The role of piston rings is also becoming more complex in

line with the recent requirements for lower oil consumption and friction. The importance of piston rings is also increasing in terms of engine performance and durability. On the other hand, states of lubrication for individual piston rings have been steadily clarified, owing to efforts made by many researchers. However, further understanding and a more in-depth analysis of states of lubrication will be necessary in order to meet the requirements mentioned above which are becoming increasingly more complex and stringent.

In particular, up to the present in order to measure oil film thickness between piston ring and cylinder surfaces of a variety of methods have been tried. These methods are electric, acoustic and optical method can be divided into three groups. In the electrical method , oil film thickness is measured between cylinder and piston ring by using resistance, inductance or capacitance. Piston ring must be electrically isolated at resistance method. DC current is applied between cylinder and piston ring, small voltage changing is measured by a bridge according to oil film thickness changing. Obtaining a signal proportional to the oil film thickness is difficult due to short circuit in the mixed regime, surface coating and to influence the electrical resistance of the tribofilm. Inductance method based on inductance changing according to located near object. In this method, AC voltage signal is applied to coil and object location is determined due to voltage phase delay. In the capacitence method, engine oil between cylinder and piston ring is carried insulating task and OFT is measured according to changing of capaticance value. Accurate results can be taken at fully hydrodynamic lubrication however in the mixed regime short circuit, cavitation and tribofilm cause to measurement diffuculties. Oil film thickness is calculated according to reflection ratio of ultrasonic signals on the OFT by using ultrasonic waves in the acoustic method . Oil viscosity also can be measured in this method. Measurement is difficult due to high calculated time, engine noise and need to sensitive instumentation. In the literature, there are only measurements made in the drifting engines. Results obtained from the combustion engine is not available.

A new method has been developed for measuring the oil films on cylinder walls in engines that offers benefits in improved understanding of oil transport and oil consumption. A laser fluorescent diagnostic method was employed to measure lubricant film thickness on the cylinder wall/piston interface in engines. Laser induced florescence (LIF) technique which is a optical method, have been using for measuring oil film thickness (OFT) between cylinder and piston ring since1980's. This technique gives more accurate results according to other methods but this method also has complicated measurement system and need to comprehensive study for calibration. A laser source which is canalized to a surface film and obtain more long wavelength with florescence glow. Photons that are collected only excitation bant by photomultiplier (PMT), reflected beam after passed a filter. The system output signal was calibrated using lubricant samples of known thickness, and by comparison of a known piston ring profile to measured lubricant film calibration.

In this project, measuring methods of oil film thickness in internal combustion engine were investigated and laser induced florescence technique which is one of the measurement methods, was researched. The oil film thickness between the cylinder-piston ring profile was calibrated with the laser-honed cylinder in order to observe the oil film thickness changes for one engine cycle. The results were examined according to different temperature, engine speed and normal load due to compare the effect on each other.

Research were showed that photobleaching could be significant problem in laser induced florescence (LIF) technique. The system which needed to be design, has continous fresh oil and be exposed to laser beam a very short period of time in order to prevent photobleaching.

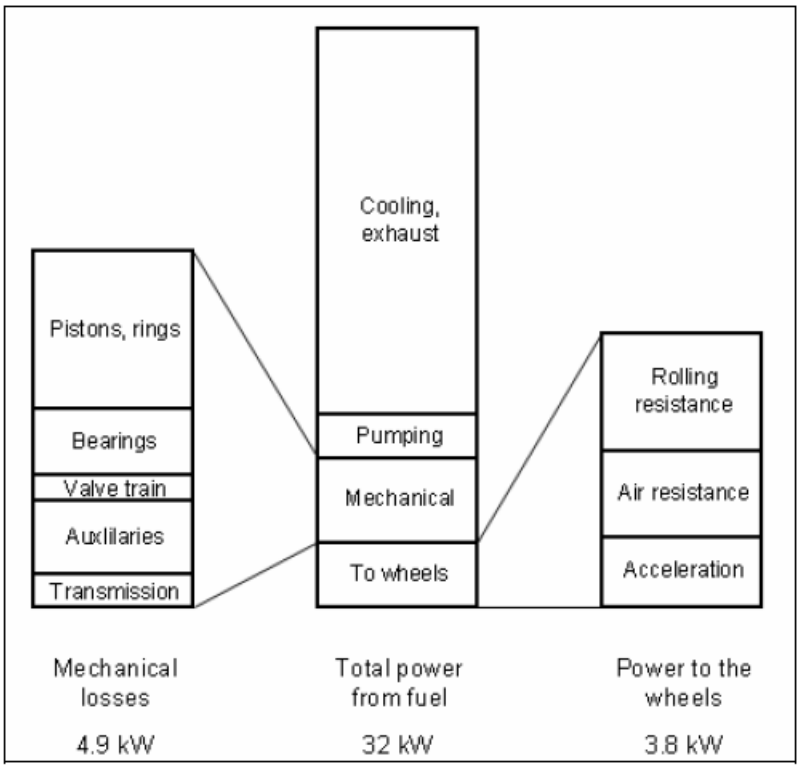
At the beginning of the experiment, necessary equipments were tried to supply and then experimental setup make functional. Controlling algoritm was developed in Labview for control the laser with RS232 port. Reflected beam from the florescence dye between the cylinder and piston ring which was converted voltage signals in PMT. Data were collected at National Instrument data acquisition card, subsequently data were recorded and graphed at Labview Program.

As a result of this study, oil film thickness was measured as a function of crank angle at constanst temperature and normal load by LIF technique. Measuring of oil film thickness contribute to solve tribological issues and provide possible measurements with different piston liner, piston ring and oil types. Thereby it is instrumental in doing future tribological researches.

1. GİRİŞ

1.1 Projenin Amacı

Yağ film kalınlığı; emisyon standartları, yağ tüketimi ve motor parçalarının ömrü açısından önemli olmasından dolayı otomotiv endüstrisinde öncelikli araştırma konularından birisidir. Motordaki yağlama kalitesine göre piston gömleği ve segman arasındaki motor sürtünme kayıpları, içten yanmalı motorlardaki mekanik sürtünme kayıplarının % 25-50'sini oluşturmaktadır (Priest ve Taylor,2000). Şekil 1.1'de orta büyüklükte bir binek araç için kayıplar gösterilmiştir (Taylor,1998). Ayrıca motordaki yağlamanın yakıt ekonomisi, yağ tüketimi, egzos gazı emisyonları, dayanıklılık ve gürültü emisyonlarına önemli bir etkisi vardır.



Şekil 1.1 : Orta Büyüklükte Binek Araç İçin Şehir İçi Enerji Kaybı (Taylor,1998).

Colvin vd. (1992) göre yüksek yağ tüketimi egzoz hattındaki katalitik konvertörlerin ve oksijen sensörlerinin performanslarının erken düşmesine ve yüksek hidrokarbon emisyonlarına neden olmaktadır. Ariga vd. (1992) göre ise iyi tasarlanmış ve düşük

emisyon değerlerine sahip bir motorda partikül emisyonlarının %20'si yağlayıcı tarafından gelmektedir. Bunun yanında Thirouard ve Tian'a (2003a) göre motordaki yağ tüketimini azaltmak, hidrokarbon emisyonlarını optimize etmek, is oluşumunu engelleyerek çevre sağlığına katkıda bulunmak ve servis maliyeti yönünden müşteriyi memnun etmek açısından çok önemlidir.

Yapılan araştırmalar piston-segman-silindir sisteminin motordaki yağ tüketiminin %40-80'sini oluşturduğunu göstermektedir. Bundan dolayı piston-silindir arasındaki yağ film kalınlığının değeri motor için hayati öneme sahiptir.

Projede lazer uyarmalı floresan tekniği ile silindir gömleği ve segman arasındaki yağ film kalınlığı farklı motor hız, sıcaklık, normal yük ve yağ tiplerinde bir motor çevrimi boyunca hesaplanması amaçlanmıştır. Proje kapsamında kurulan lazer uyarmalı floresan yöntemi (LUF) ile yağ film kalınlığı ölçme sistemi içten yanmalı motorların tasarımında ve analitik modellerin doğrulanmasında kullanılacaktır.

1.2 Yağlama ve Yağlama Rejimleri

Yağlama, iki yüzey arasında sürtünmeyi azaltmak amacıyla yüzeylerden birinin veya her ikisinin biribiri üzerinde hareketini sağlayan kaygan bir yağ filminin oluşmasına denilmektedir.

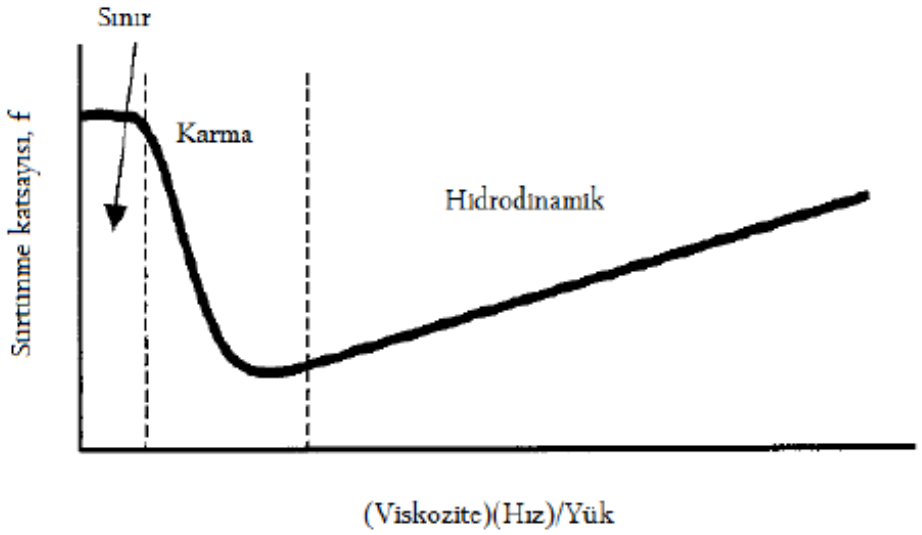
Yağlama yağları, çalışan motor parçalarını yağlayarak aşınma ve kırılmaları önleyen baz yağ ve koruyucu özelliği arttıran katkı malzemelerinden oluşmaktadır. Baz yağlar, katkısız olarak kullanıldıklarında motoru istenilen seviyede koruyamazlar. Bundan dolayı motor yağı formülasyonlarında farklı oranlarda ve miktarlarda, motorun farklı çalışma koşullarında değişik koruyuculuk fonksiyonları içeren katkı maddeleri bulunur.

Birbiri üzerinde kayan veya hareket eden iki malzeme, çalışma esnasından az veya çok birbirlerine temasta bulunurlar. Sürtünme yüzey alanı bağlı olmayıp, doğrudan doğruya yükle orantılıdır. Sürtünmeden kaynaklı hasarı ortadan kaldırmak veya minimize etmek için motora ve koşullara uygun yağlama yağı kullanmak gerekmektedir. Yağlama yağlarının, yağlama dışında da bazı önemli görevleri vardır;

- Yağlama yağları malzemeler arasındaki boşluğu ve kirleri ortadan kaldırıp, yüzeye yapışmaları engelleyerek temiz tutar,

- Hareketli elemanların sürtünmelerini önleyerek veya oluşan ısıyı absorbe ederek sıcaklığı düşürür, ısınmalarına engel olur,
- Dinamik bir conta vazifesi yaparak yağın kirlenmesini önler,
- Oluşan enerjiyi geniş yüzey alanıyla absorbe ederek, mekanik şoklara karşı yastık görevi yapar,
- Korozyonu engeller,
- Enerji transferine olanak tanır.

İki yüzey arasındaki yağlama mekanizması, yağın viskozitesi, hız ve temas yüküne bağlı olarak temelde üç farklı yağlama rejimine sahiptir. Şekil 1.2'de gösterilen Richard Stribeck'in kaymalı yataklar üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda bulduğu Stribeck eğrisi, iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının viskozite, hız ve temas yükü ile nasıl değiştiğini göstermektedir.



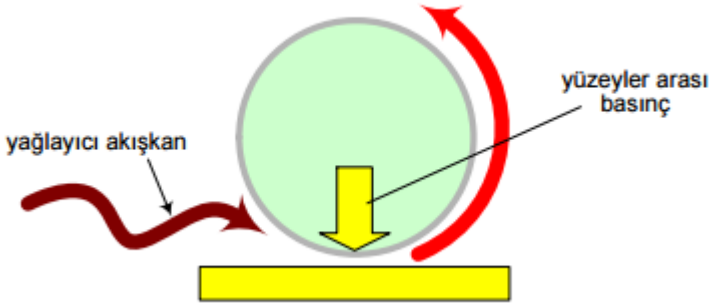
Şekil 1.2 : Stribeck Eğrisi (Comfort,2003).

Yağlama işlemi, hidrodinamik, sınır, karışık ve elestohidrodinamik yağlama olarak dört grup altında toplanabilir.

1.2.1 Hidrodinamik yağlama

Bu rejimde, birbiri üzerinde hareket eden iki yüzey tam temas halinde, sürekli bir yağlayıcı film tabakasıyla ile birbirinden ayrılmış haldedirler. Yağlayıcı viskozitesi, ikmal basıncı, malzemenin dönme hızı ve ağırlığı hidrodinamik yağlamayı etkileyen faktörlerdir. Hidrodinamik yağlamada; hız ve viskozite artışı yağ film kalınlığını

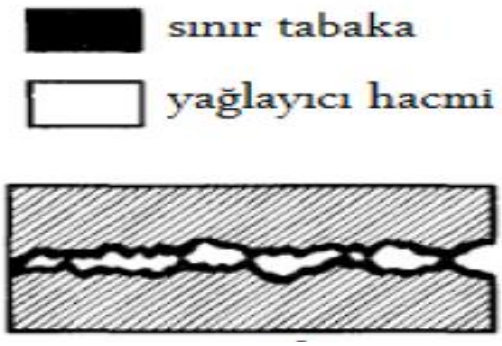
artırırken, yükün artması yağ filminin incelmesine neden olur. Şekil 1.3'de hidrodinamik yağlama gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : Hidrodinamik Yağlama (Url-1).

1.2.2 Karma yağlama

Karma yağlama, yükün arttığı ya da hızın düştüğü durumlarda yağ film kalınlığının azalarak iki yüzey arası kısmen yağ ile dolu olması sonucu oluşur. Bu durumda sistem hidrodinamik yağlamadan karma yağlama rejimine geçer. Yüzeyler üzerindeki metal tepeleri birbirine temas halinde iken vadiler yağ ile doludur. Belli bir noktadan itibaren sürtünmeden dolayı metal metale temas artar ve bu da sürtünme katsayısının hızla artmasına sebep olur. Şekil 1.4'de iki yüzey arasındaki yükün bir kısmının yağlayıcı tarafından bir kısmının da temas halindeki metal yüzeyler tarafından karşılandığı karma yağlama modeli gösterilmiştir.

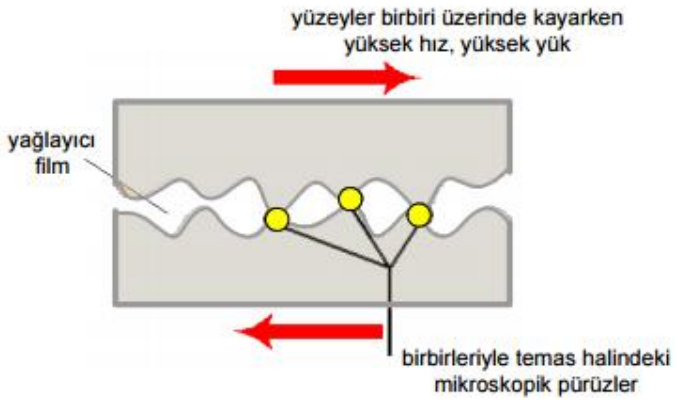


Şekil 1.4 : Karma Yağlama (Hamrock,1994).

1.2.3 Sınır yağlama

Sınır yağlama durumunda, yükün ve hızın fazla olması veya yağlayıcı akışkanın özelliklerindeki herhangi bir değişiklik yağ filminin incelmesine neden olur. Yüzeyler arasında bir yağ filmi oluşmamakla birlikte yağ, yüzeylerin pürüz tepeleri arasına girer ve yüzeylerin temasında pürüz tepeciklerinin teması etkin rol oynar. Bu

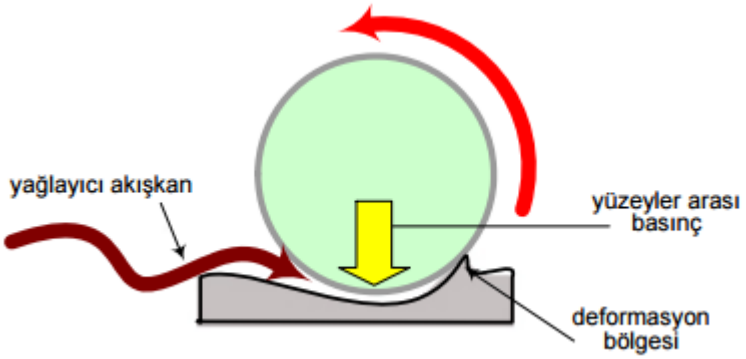
durumda sürtünme ve aşınmayı engellemek için yağ filmi olmadığından, kimyasal koruyucu katkı malzemelerine gerek olur. Şekil 1.5'de sınır yağlama gösterilmiştir.



Şekil 1.5 : Sınır Yağlama (Url-1).

1.2.4 Elastohidrodinamik yağlama

Elastohidrodinamik yağlamada; yağlayıcı üzerindeki yük ve basınç, üzerinde bulunduğu yüzeyden daha fazla kayma gerilmesine sebep olur. Bu durumda Şekil 1.6'da gösterildiği gibi kuvvet altındaki dinamik parçaların elastik şekil değişimi gözlemlenir. Bu koşullarda yağın yüzeyler üzerindeki temas alanını artırarak yağ filminin kopmasını engelleyen, yüksek basınç katkı maddeleri içeren yağlayıcılar kullanılmalıdır.



Şekil 1.6 : Elastohidrodinamik Yağlama (Url-1).

1.3 Yağ Filmi Ölçüm Yöntemleri

Piston, segmanlar ve silindir arasındaki yağ film kalınlığının ölçümü için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar elektriksel, akustik ve optik yöntemler olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

1.3.1 Elektriksel yöntem

Elektriksel yöntemde segman ve silindir arasındaki yağ film kalınlıkları direnç, indüktans veya kapasitans ölçülerek saptanmaktadır. Direnç ölçüm yönteminde segmanın elektriksel olarak iyi bir şekilde yalıtılması gerekmektedir. Segman ve silindir arasına bir doğru akım uygulanmakta ve yağ film kalınlıklarındaki değişim nedeniyle oluşan küçük gerilim değişiklikleri bir köprü aracılığı ile ölçülmektedir (Tung ve Gao, 2003). Bu yöntemde karma yağlama rejiminde sık sık görülen kısa devreler , yüzeylerdeki kaplama ve tribofilmlerin elektrik direncini etkilemesi nedeniyle yağ film kalınlığı ile orantılı bir sinyal elde edilmesi oldukça güçtür.

İndüktans metodu bobin gibi bir devre elemanının indüktansının, civarında bulunan bir manyetik cismin uzaklığına göre değişmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde bobine sürekli değişken bir gerilim sinyali(alternatif akım) uygulanmakta ve değişken akımdaki faz gecikmeleri ölçülerek cismin yakınlığı saptanmaktadır (Tamminen vd.2006).

Kapasitans metodunda da benzer şekilde segman ve silindir arasındaki yağ yalıtkan görevi yapmakta ve segman ve silindir arasındaki kapasite değişimi hesaplanarak yağ film kalınlıkları ölçülmektedir. Bu yöntemle hidrodinamik yağlama rejiminde iyi sonuçlar alınsa da, karma yağlama rejiminde sık sık gözlenen kısa devreler, kavitasyon ve yüzeyler üzerinde oluşan tribofilmler nedeniyle zorluklar yaşanmaktadır (Takiguchi vd., 2000; Dellis, 2010).

1.3.2 Akustik yöntem

Akustik yöntemlerde ultrasonik dalgalar yağ film kalınlıklarını ölçmekte kullanılmıştır. Bu yöntemde ultrasonik sinyallerin yağ filmi üzerinden yansıma oranına göre yağ film kalınlıkları hesaplanmaktadır. Bu yöntem ile yağın viskozitesi de ölçülebilmektedir. Yüksek hesaplama zamanı, motordaki gürültü ve hassas enstrümantasyon gerektirmesi nedeniyle ölçüm oldukça zordur. Literatürde sadece sürüklenen motorda yapılmış ölçümler bulunmaktadır. Yanmanın olduğu bir motordan alınmış sonuç bulunmamaktadır (Avan vd., 2012).

1.3.3 Optik yöntem

Lazerle Uyarmalı Floresan (LUF) yöntemi segman ve silindir arasındaki yağ film kalınlıklarının ölçülmesi amacıyla dünyada 1980'li yıllardan bugüne kadar birkaç

önemli araştırma grubu tarafından kullanılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Bu yöntemin yağ film kalınlıklarının ölçülmesi ve yağ hareketlerinin değerlendirilmesi için önemli bir potansiyeli bulunmaktadır. Ancak bu yöntem de oldukça karmaşık bir ölçüm sistemi gerektirmektedir ve sistemin kalibre edilmesi kapsamlı bir araştırma çalışmasını gerektirmektedir. Bu yöntemde bir lazer kaynağından çıkan belirli bir dalga boyuna sahip ışın ince yüzey filmine yönlendirilir ve filmin uyarılarak daha uzun bir dalga boyunda floresan ışıması sağlanır. Filmden geri yansıyan ışının bir filtreden geçirilerek sadece floresan uyarı aralığındaki fotonlar bir fotomultiplikatör (PMT) ile toplanır. Fotomultiplikatör'den alınan gerilim sinyali kalibre edilerek film kalınlığı hesaplanır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk olarak yağ konusunun içten yanmalı motorlardaki önemi ile alakalı bilgi verilecek ve daha sonra lazer uyarmalı floresan tekniği ile yağ film kalınlığı ölçümü ilgili literatür araştırmasının özeti verilecektir.

İçten yanmalı motorlar icatlarından günümüze kadar gerek sanayi kolunda gerekse toplumsal yaşamda önemli yer tutmuştur. İki asıra yakındır hayatımızda olan içten yanmalı motorlar, üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, sanayileşmenin artması ile birlikte tüm topluma ulaşarak kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir. Bu yaygınlaşma dünyada petrol ihtiyacı ve çevre kirliliğinin artışına sebep olmuştur.

İçten yanmalı motorların icadından sonra kullanım alanlarına göre büyük değişimler geçirdiklerini görebiliriz. Ancak içten yanmalı motorların çok yaygın hale gelmesini sağlayan teknolojik gelişme karayolu taşıtlarında kullanılmasıdır. İlk yıllarda ekonomik olarak sadece belli bir kesimin alabildiği bu araçlar, günümüzde yaygınlaşarak bütün sınıflara hitap edebilir duruma gelmiş ve dünyanın en büyük sektörlerinden biri olmuştur. Bu yaygınlaşma beraberinde petrol ihtiyacının artması ve petrolün yanması sonucu atmosfere salınan sera gazları ve kirletici egzoz emisyon değerlerinin artmasına neden olmuştur. Özellikle atmosferimizin kirlenmesi iklim değişiklikleri riskini doğurmaktadır. Buradaki en büyük etkiye sahip bileşenler ise sanayi merkezleri ve taşımacılıktan kaynaklanmaktadır.

Enerji gereksiniminin sanayileşmeyle artması ve kaynakların git gide azalması insanların çevre üzerindeki hassasiyetlerin gelişmesine yol açmıştır. İçten yanmalı motorlar ve petrol kaynaklı yakıtlar mevcut şartlar altında vazgeçilmezliğini korumaktadır. Bu durum bilim insanları ve mühendisleri bahsedilen iki faktörü iyileştirmeye dönük araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Bunun sonucunda daha verimli motorlar elde edilmiş ve özgül yakıt sarfiyatı düşürülerek egzos emisyonlarının azaltılması sağlanmıştır. Fakat yine de, bu iyileşme yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple çeşitli protokoller ve regülasyonlar ortaya atılmıştır. Özgül emisyonların daha da daha da düşük değerlere çekilmesi farklı yöntemlerle

sağlanmıştır. Bunlar büyük oranda yanma sonrası önlemler, yanma parametreleriyle oynanması ile sağlanmıştır. Ancak belli bir noktadan sonra bu önlemlere ek olarak motorun efektif verimini ve buna bağlı olarak organik verimini arttırmak da oldukça büyük önem kazanmıştır. Bu da motordaki kayıpların azaltılması ile mümkündür.

İçten yanmalı motorları çalışma prensibine göre dönel pistonlu ve öteleme pistonlu olarak ikiye ayırabiliriz. Dönel pistonlu motorlar Wankel motorları olarak adlandırılır. Bu motorların aşınmaları yüksektir ve yağlama performansları daha kötüdür. Bunun sonucunda ömürleri kısa olan bu motorlar pek tercih sebebi olamamıştır. Yaygın olarak kullanılan motorlar gidip-gelme hareketi yapan bir pistona sahip olan motorlardır.

Konvansiyonel motorlarda, öteleme hareketi yapan piston biyel yardımıyla krank mili üzerinde dönme hareketi yaratmaktadır. Bu esnada belli bir strok boyunu kat ederken pistonun hızı sürekli değişmektedir. Günümüzde kullanılan taşıt motorlarının yüksek hızlarda çalıştığını göz önüne aldığımızda, pistonun oldukça büyük ivmelenmeye sahip olduğunu görürüz. Bu durum atalet kuvvetlerinin doğmasına yol açarak, yanma sonucu oluşan yüksek basınçla birlikte piston pernosunun yukarı yönlü kesme gerilmesine maruz kalması sonucu kayıplara neden olur.

Piston hızındaki değişimlerden motorun yağlama rejimi doğrudan etkilenmektedir. Piston hızının düşük olduğu şartlarda karışık film ve sınır yağlama şartları gözlemlenirken yüksek hızlarda hidrodinamik yağlama şartı gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak sürtünme kuvveti katsayısı değişkenlik gösterir. Bunun dışından motorlar birbiri ile temas eden bir çok parçaya sahip kompleks yapılar olduğundan, sürtünme kayıpları motor gücünün önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Burada elde edilecek geri kazanımlar oldukça büyük öneme sahiptir. Öyle ki motor toplam sürtünmesinde %6 düşüş sağlandığında yakıt tüketimi takriben %1 dolaylarında azalmaktadır (Organisciak vd.,2005). Fakat üzerine en çok değinilmesi gereken sürtünme kaybı, piston-segman-silindir sistemindeki sürtünmelerdir. Çünkü içten yanmalı motorlardaki sürtünme kayıplarının takriben %50'lik kısmı bu sistemde meydana gelmektedir (Ryk vd., 2002).

Sürtünmenin yanı sıra motorlardaki piston hareketi sonucu metal metale temas sonucunda aşınmaların artış göstermesidir. Aşınmalar sonucunda sistem nominal

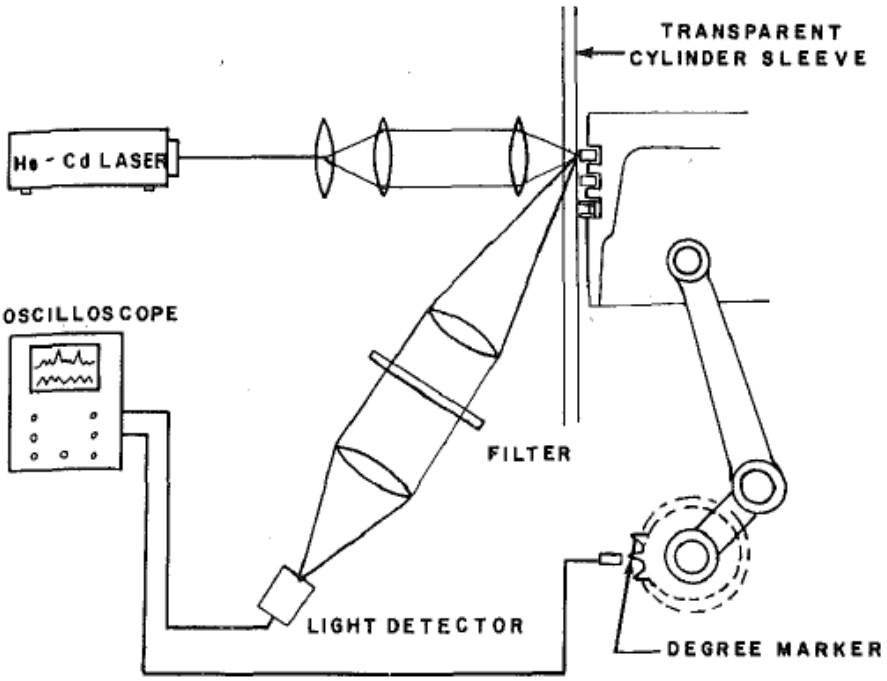
ölçülerinden uzaklaşmaktadır. Bu sebeple yağlama yağ filmi bozulabilmekte, kartere doğru gaz kaçakları artmaktadır. Bunun sonucu olarak bir yandan kompresyon kayıpları artmakta ve etkin sıkıştırma oranı azalmaktadır. Böylece motor veriminde düşüş gözlemlenmektedir. Öte yandan da yanmamış yakıt buradan kartere gidebilmekte ve özgül yakıt sarfiyatı artmaktadır. Bir başka sorun ise yakıtın yağlama yağına karışma riskinin artması ve yağlama yağının yağlama kabiliyetinin bozulmasıdır.

Belirtilen tribolojik problemlerden dolayı bilim insanları ve mühendisler bu sorunları çözmeye dönük olarak çeşitli yöntemler denemişlerdir. Bu yöntemler yağlama yağının veya motor konstrüksiyonunun modifikasyonuyla mümkündür.

Smart ve Ford (1974), dönen bir silindir üzerindeki yağ filminin floresan ışıması için 100W gücünde civalı lamba kullanmıştır. Alınan sinyali kalibre edebilmek için farklı hacimlerde yağlar kullanmış ve toplanan gerilimin ince filmlerde kalınlık ile oldukça doğru orantılı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu deneylerde 0,1 μm hassasiyette ölçümler yapabilmiş, ayrıca stroboskopik fotoğraflar ile dönen silindir üzerindeki yağın akışını gözlemlemiştir. Kalibrasyon için gaz türbinlerinde kullanılan bir yağ ile iki farklı silindir yüzeyi üzerinde yaptığı çalışma sonucunda, çelik yüzeyde 17mV/μm ve krom kaplı yüzeyde 10 mV/μm kalibrasyon değerlerini elde etmiştir. Toplanan sinyalin kalibrasyonunun yağın cinsi, ışımanın şiddeti, yüzey pürüzlülüğü ve yansıtıcılığı ile ışınların dağılma oranı gibi etkilere bağlı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bundan sonra segman ve silindir arasındaki yağ film kalınlığının ölçülmesinde LUF metodu çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

Ting (1980), saydam gömleğe sahip tek silindirli bir araştırma motorunda segman yağlaması ve yağ tüketimi üzerine araştırmalar yapmıştır. 441.6 nm dalga boyuna ve 18 mW güce sahip He-Cd lazer kaynağından çıkan ışının saydam gömlekten yansıyan bileşenlerini filtreleyerek bir ışın detektörü ve osiloskop yardımıyla yağ film kalınlıklarını ölçmüştür. He-Cd lazerden önce interferometre kullanmayı düşünmüş, ancak yüksek yüzey pürüzsüzlüğünün gerekliliği, deney setini kurmanın zorluğu ve maliyetlerin yükselmesinden ötürü He-Cd lazer ile ölçüm yapmıştır. Şekil 2.1'de verilen deney düzeneğinde silindir duvarının saydamlığı için ilk başta pleksiglass denemiş, ancak daha iyi ısı transferi ve aşınma dayanıklılığından dolayı polikarbonat kullanmıştır. Çalışmada SAE 30'un yağ film kalınlığını daha iyi gözlemlemek için kırmızı renkli zyglo eklemiştir. 200,400 ve 600 rpm motor

devirlerinde çalışmaları tekrarlamış, osiloskopta testere diş sinyallerinin krank açısına karşılık gelen genliklerine göre segman, segmanlar arası bölgeler ve piston eteğindeki yağ film kalınlıkları ölçmüştür. Bu çalışmada kalibrasyon yapılmamış olsa da farklı işlenmiş adımlara sahip segmanlar ile kalibrasyon yapılması önerilmiştir.



Şekil 2.1 : Optik Deney Düzeneği (Ting,1980).

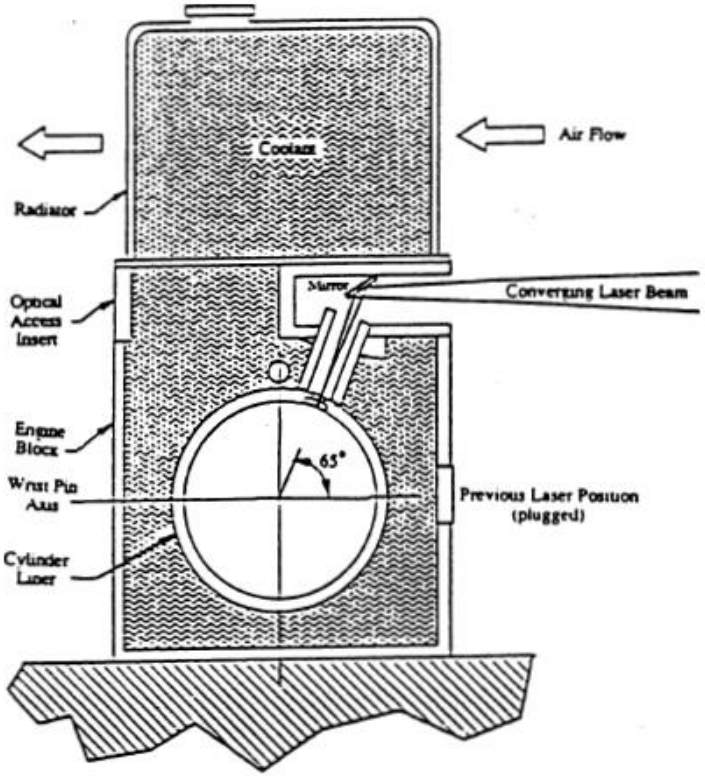
Hoult vd. (1988), silindir üzerinde quartz optik pencere bulunan tek silindirli bir dizel deney motorunda LUF yöntemini kullanmıştır. Bu çalışmasında 14 mW gücünde, 443 nm kaynak dalga boyunda He-Cd lazer kullanmıştır. Floresan ışımayı artırmak amacıyla SAE 15W40 ve 30W motor yağları içerisine Coumarin 523 floresan boyayı ve solvent olan diklorometan enjekte etmiştir. Yağ film kalınlığının dalga boyu ile lineer orantılı olarak arttığı optimum konsantrasyonu bulabilmek için çalışmalar yapmış ve bu deneyde 10^{-4} mol/litre konstrasyonunu kullanmıştır. Bu sayede 500 nm dalga boyunda ışıma elde etmiştir. Deneyde üç farklı katkı maddesi içeren yağlar yapılmış, sistemin çıkış gerilimi mikroskop lamelleri arasına oluşturulan yağ film kalınlıkları ve ölçülmüş segman profilleri ile karşılaştırılarak kalibrasyon yapılmıştır. Farklı motorlar ve devir sayılarında yaptığı çalışma sonucunda fotomultiplikatörden gelen sinyal değerleri ve ölçülen yağ film kalınlıklarına göre mV/μm kalibrasyon değerlerini elde etmiştir. Deneyler lazer ışını nedeniyle yağ filminde oluşan sıcaklık artışının yağın floresan ışımasını azalttığını ve

floresan açılma (bleaching) meydana geldiğini göstermiştir. Floresan açılma olayına maruz kalmamak ve güvenilir bir kalibrasyon için lazer ve segman geometrisi arasında bir sınır belirlemiştir. Takip eden çalışmada piston eteği üzerinde oluşturulan belirli derinliğe sahip izler yardımı ile LUF sistemi kalibre edilmiştir.

Lux ve Hoult (1991), LUF ölçümü için quartz pencereye sahip tek silindirli dizel motoru üzerinde kalibrasyon için piston eteği girişine işaret koymuşlar ve bunun periyodik iz ile olan senkronizasyonunu sağlamışlardır. Voltajın 200 μm'ye kadar yağ film kalınlığıyla lineer olarak değiştiğini gözlemlemişler, ancak statik ve dinamik kalibrasyon katsayıları arasında büyük farklılıklar olduğunu görmüşlerdir. Farklı hız ve yüklerin, farklı sıcaklık değerlerine göre değişimi sonucu dinamik kalibrasyon katsayıları elde etmişlerdir.

Konomi vd. (1993), saydam ve quartz penceli silindir üzerine 2-10 μm aralığında, 2,2 μm adımlarla oyuklar açıp bunlara nikel kaplama yaparak kalibrasyon yapmışlardır. Derinliği bilinen bu oyuklarla yüksek sıcaklıklarda fotomultiplikatör çıkış gerilimi ile yağ film kalınlığının lineer olarak değişeceğini söylemişlerdir.

Wong ve Hoult (1991), LUF yağ film kalınlığı ölçümü ve radyoaktif yağ tüketimi ölçümü birlikte kullanılarak segman ve silindir arasındaki yağ film kalınlıkları, segman üzerinde biriken yağ miktarı, yağ film kalınlığının silindir etrafındaki dağılımı, segman eksenel dönüşü ve piston eteğinin pompalama mekanizması incelemişlerdir. Deney kapsamında iki ayrı dizel motorunda; farklı yağlar, segman profilleri ve radyal gerilmelerinde deneyler yapmışlardır. Radyal gerilme değişiminin iki parçalı ve üç parçalı yağ kontrol segmanı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde 14-17 mW gücünde, 441,6 nm dalga boyunda He-Cd lazer ışınlarını, ayna ve çift dışbükey achromatic lens ile Şekil 2.2'de gösterilen silindir duvarına açılan kuvars pencere üzerinden piston üzerine odaklamışlardır. Pistondan yansıyan ışınları tekrar lens ile bir noktaya odaklamışlar, cam filtre ve monokromatör üzerinden fotomultiplikatörde toplayarak krank açısına bağlı gerilim sinyali değerlerini elde etmişlerdir. Monokromatik filtrenin yansıyan ışınlardaki ses gibi bozucu etkileri önlemesinden ötürü, deneyde kullanılması gerekliliğinin önemine değinmişlerdir. Deneylerde SAE 15W40, SAE 30 ve SAE 20W50 yağ tipleri için farklı motor yük koşulları ve devir sayıları için ölçümler yapmışlardır. Sonuçlar yağ tüketiminin taşınan yağ miktarının çok altında olduğunu göstermiştir.

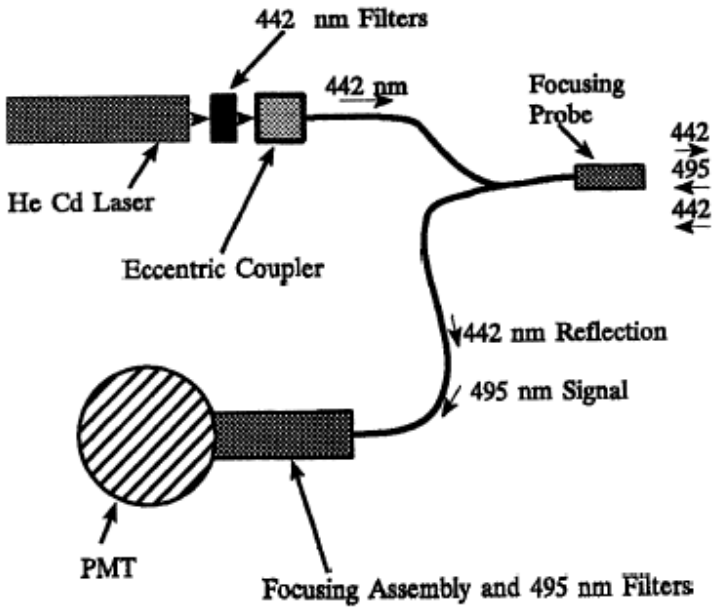


Şekil 2.2 : Quartz Pencere İle Lazer Işınlarının Piston Gömleğine Odaklanması (Wong ve Hoult, 1991).

Richardson ve Borman (1991), ilk defa fiber optik ve LUF teknolojisini birleştirerek bir yağ film kalınlığı ölçme yöntemi geliştirmiş ve bir dizel motorun yanma olduğu durumda yağ film kalınlıklarını ölçmüştür. Fiber optik teknolojisinin kullanılması ile motorda silindir üzerinde optik pencere açılması gibi kapsamlı modifikasyonların yapılmasına gerek kalmamış, lazer ışının fiber optik içerisinde ilerlemesi ile deneyler standart test odasında yapılabilir hale gelmiştir. Deneyde mavi renkte 442 nm dalga boyuna sahip He-Cd lazer kullanılmış ve dikroik filtreden geçirilip yağın içerisine koyulan floresan boya ile 500 nm dalga boyunda yeşil renkte ışıma yapılması sağlanmıştır. Lazer ışınlarının geçişi için 50 μm iç çekirdek çapında, 125 μm'ye kadar cam ile kaplanmış ve 185 μm'ye kadar da alüminyum koruyucusu bulunan fiber optik kablo kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kalibrasyon yapılırken sistemden kaynaklı gürültüler, yağın fazla lazer ışınlarına maruz kalması sonucu oluşan bleaching olayı, sıcaklık ve yağlarda bulunan katkı maddelerinin oranlarının farklılığı gibi etmenlerin değişiminin etkisi deneysel olarak gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen verilerle yağ film kalınlığının 40 μm ye kadar lineer, daha sonrasında ise lineer olmayan sinyaller ürettiği gözlemlenmiştir. Deneyler segman üzerinde oluşturulan 15-20 μm derinliğindeki adımların kalibrasyon için yeterli

olmadığını göstermiştir. Lazer ışınının şiddeti değiştirilerek ve açılıp kapatılarak floresan açılma incelenmiş ve motor çalışma şartlarında önemli bir etki gözlenmemiştir. Motor şartlarında yağın sürekli tazelenmesinin açılma etkisini azalttığı saptanmıştır. Ayrıca yanma nedeniyle oluşan ışımanın floresan açılma üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve bunun nedeninin fiber optik ucun piston tablasının gölgesinde kalmış olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

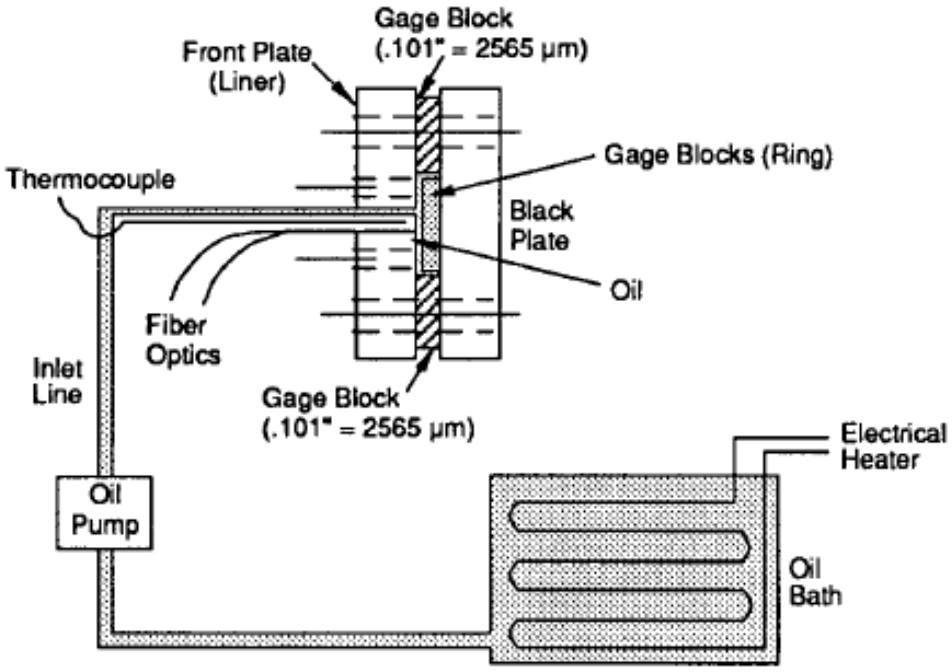
Shaw vd. (1992), benzer şekilde fiber optik teknolojisini kullanarak tek silindirli bir deney motorunda yağ film kalınlıklarını ölçmüştür. Fiber optik sistemin konvansiyonel optik sisteme göre çok daha pratik olduğunu, gürültü/sinyal oranının düşük olduğunu, motor titreşimlerinden etkilenmediğini ve kolaylıkla taşınabilir olduğunu belirterek kuru yüzeylerdeki profilometre ölçümleri ile aynı hassasiyette sonuç verdiğini göstermişlerdir. Şekil 2.3'de gösterilen bağlantı şemasına göre deney için 14 mW gücünde, 442 nm kaynak dalga boyunda He-Cd lazer ışınlarını 2 adet bantta geçirgen filtreden geçirmiş ve silindir gömleğine odaklamıştır. Yağın içerisine 10^{-4} mol/litre oranında enjekte ettiği Coumarin 523 floresan boya ile yağın 495 nm dalga boyunda ışıma yapmasını sağlamıştır. Deneyde 125 µm yağ film kalınlığına kadar elde edilen sinyallerin lineer olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca bir mikrometre kullanarak statik bir kalibrasyon sistemi geliştirmişlerdir.



Şekil 2.3 : Lazer Uyarmalı Floresan Tekniği Bağlantı Şeması (Shaw,1992).

Brown (1993), yılında ağır vasıta dizel motoru için, LUF tekniğini kullanarak iki farklı yağ cinsi (15W40 ve 10W30) için silindir ve piston gömleği arasındaki yağ film kalınlığının değişimini 4 segmanlı piston üzerinde farklı motor hızları ve tork değerlerinde incelemiştir. Ayrıca iki farklı yağ türü için yağ hacmi değişimi gözlemlemiştir. Test için 20 mW güce, 488 nm kaynak dalga boyuna sahip hava soğutmalı Argon-Ion lazer kullanmış ve lazer ışınlarının gömleğe nüfus etmesi için silika penceresi açmıştır. Yağa eklenen floresan boya ile 488 nm dalga boyundaki ışınlar 525 nm dalga boyunda ışıma yaparak dikroik filtre ile fotomultiplikatöre, oradan da analog verileri dijital olarak işlemek için veri toplama merkezine iletmişlerdir. Deney kapsamında ayrıca lazerin gücüne bağlı olarak yağın içine koyulan floresan boyada oluşan bleaching olayını, boyaya farklı güç değerlerinde ışınlar gönderilip incelemiştir. Piston eteği üzerindeki oyukları kullanarak yağ film kalınlıklarını kalibre etmeyi denemiştir. Ancak deney sonuçları bu oyukların çalışma sırasında tam dolmadığını ve kalibrasyon amacıyla kullanılamayacağını göstermiştir. Bu nedenle motor şartları yerine tezgah üstü bir kalibrasyon yöntemi kullanılmıştır.

Phen vd. (1993), daha önce geliştirilen fiber optik LUF sistemini kullanarak sürüklenen bir motorda hız, gömlek sıcaklığı ve doldurucu basıncının yağ film kalınlıkları üzerine etkilerini incelemiştir. Proje kapsamında 442 nm dalga boyunda mavi renkte ışıma yapan multimode He-Cd lazer kullanmışlar ve SAE 15W40 yağın içine koydukları floresan boya ile 500 nm dalga boyunda yeşil renkte ışıma yaptırmışlardır. Farklı noktalardan ölçüm alabilmek ve yağı fazla ısıtıp bleaching sebebiyet vermemek için çift ayırıcı (splitter) kullanmışlardır. Bunlardan 1.si gücü sınırlarken, 2.si dalgayı iki farklı noktadan ölçüm yapmak için %50-%50 ikiye ayırmada kullanılmıştır. Deneyde gömlekten yansıyan ışınları filtrelemek amacıyla dikroik filtre kullanılmıştır. Filtrelenen sinyaller Hamamatsu marka fotomultiplikatörde toplanarak uygun gerilim üretilmiş ve veri toplama sistemine aktarılmıştır. Şekil 2.4'de statik kalibrasyon için kurulan test düzeneği verilmiştir. Deneysel ölçümlerle teorik hesaplamaları karşılaştırmışlar ve teorik hesaplarda deneysel hesaplardan daha ince bir yağ film kalınlığı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aradaki bu farkın sebebini ise lazer fiber kablolarının ölçüm için yeterli hassasiyette montajının yapılamaması ve lazer ışınlarının tam olarak gömlek üzerine odaklandırılamamasına bağlamışlardır.

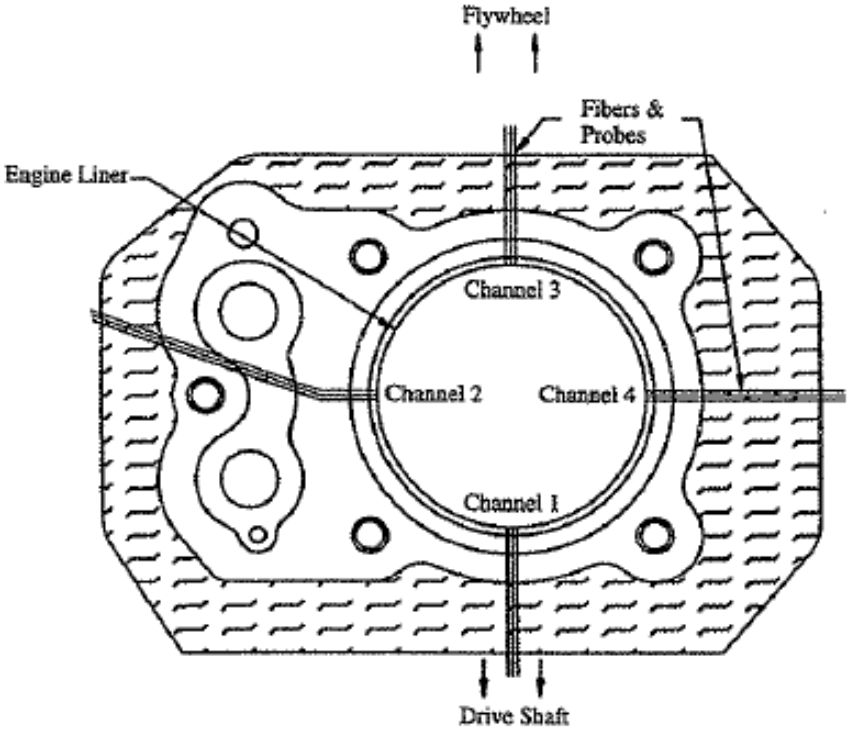


Şekil 2.4 : Kalibrasyon İçin Kurulan Test Düzeneği (Phen vd.,1993).

Dearlove and Cheng (1995), daha önce geliştirilen fiber optik LUF sistemini bir hareketli segman ve sabit silindir segmentinden oluşan test sistemine entegre ederek orta strokta sürtünme kuvvetleri ve yağ film kalınlıklarını birlikte ölçmüştür. Ölçme işlemi için 442 nm dalga boyunda He-Cd laser kullanılmış, yağ içine koyulan Coumarin 523 sayesinde 495 nm dalga boyunda yağ filminden ışıma yapması sağlanmıştır. Bu ölçüm için 5 ayrı 49-357 cP arasında değişen viskozitelere sahip yağ kullanmışlardır. Ayrıca ölçümleri 3 ayrı piston hızı ve segman normal yüküne göre yapmışlardır. Kalibrasyon amacıyla segman üzerine açılmış oyuklardan yararlanılmıştır. Testler sırasında segman üzerine açılan oyuğun aşındığı ve standart bir kalibrasyon sağlayamadığı görülmüştür.

Stiyer ve Ghandhi (1997), LUF yöntemini kalibre edebilmek amacıyla tek silindirli bir benzin motorunda segman ve silindir arasındaki yağ film kalınlıklarını, segman ve silindir duvarı arası mesafeyi fotomultiplikatör gerilimine referans alarak kapasitans yöntemi ile sürekli olarak ölçmüştür. Şekil 2.5'de gösterilen sistem ile ölçüm için piston üzerindeki 4 noktadan ikisinde LUF ve diğer ikisinde de kapasitans ölçümü için fiber kablo ve problar kullanılmıştır. En düşük film kalınlığındaki değer referans olarak alınmış ve sonuçlar farklı motor devir sayıları ve segman profillerine göre yapılan statik ölçümlerle karşılaştırılmıştır. LUF ile ölçüm için 50 mW gücünde, 442 nm kaynak dalga boyunda He-Cd lazer tercih etmişler, segman üzerinde iki

farklı noktadan ölçüm alabilmek için ayırıcı kullanmışlardır. Yağ filminden yansıyan ışınları sırasıyla dikroik ve band geçiren filtreden geçirip iki fotomultiplikatörde toplamışlardır. Lazer ışınlarını silika kaplı ve alüminyum korumalı fiber optik kablo ile iletmişlerdir. Kapasitans ile kalibrasyonu birkaç adımda gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle işlenmemiş kapasitans gerilim sinyallerini kapasite değerine çevirmişlerdir. Daha sonra paralel levha formülüne göre kapasitansa tekabul eden mesafeyi bulmuşlardır. LIF sinyalleri ve kapasitans tekniği ile bulunan değerler krank açılarına göre karşılaştırmışlardır. Deneyde elde edilen veriler ile yapılan hata analizi sonucunda, segman profiline göre yapılan kalibrasyonda kapasitans tekniğine göre önemli derecede hatalı sonuçlar olduğu tespit edilmiştir.

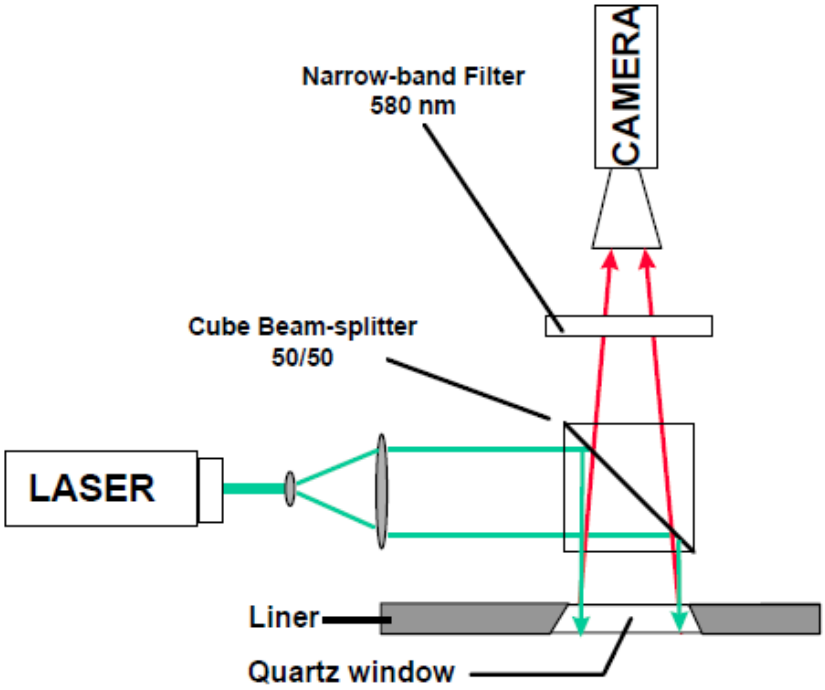


Şekil 2.5 : Kapasitans ve LUF Tekniğinin Birlikte Kullanıldığı 4 Kanallı Sistem (Stiyer and Ghandhi,1997).

Froelund ve Jesper Schramm (1997), 4 silindirli bir benzin motorunun ilk çalışması ve ısınması sürecindeki silindir, segman ve silindir duvarı arasındaki yağ film kalınlığını, tek noktadan rölanti çalışmada lazer uyarmalı floresan tekniği ile ölçmüşlerdir. Bu kapsamda He-Cd lazer kullanmışlardır. 442 nm dalga boyundaki lazer ışınını filterden geçirip, fiber optik kablo kullanarak kuvars silika penceresinden yağ filmi üzerine odaklamışlardır. 10W30 multigrade yağın içerisine Coumarin bazlı boya eklenerek, 442 nm dalga boyundaki ışınları 495 nm dalga

boyunda ışıma yaptırıp, bunları tekrar bir filtreye sokup sadece 495 nm dalga boyundaki ışınları fotomultiplikatöre iletmişlerdir. Fotomultiplikatör ışının dalga boyu ve gücüne orantılı olarak bir gerilim değeri üretmiş ve bu değeri de bilgi toplama sistemleri ile bilgisayara iletmişlerdir. Ölçüm yeri olarak, iletim verimi, düşük sıcaklık, yağın bozulma oranının azlığı gibi sebeplerden ötürü üst ölü noktanın %83 aşağısı seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda piston gömleği ve segmanlardaki yağ film kalınlığının sıcaklıkla exponansiyel olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. 1.segmanda ortam sıcaklığı olan 28ºC'de 6,8 µm iken motor ısındıktan sonra 95 ºC'de 3,5 µm değerine düşmüştür. Bu değerlere paralel olarak yağ segmanındaki yağ film kalınlığı, 7,2 µm değerinden 3,4 µm değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca silindir gömleğindeki sıcaklık değişiminin eğrisine göre viskozitedeki değişimi gösteren formülü türetmişlerdir.

Thirouard vd. (1998), Şekil 2.6'da verilen deney düzeneği ile iki boyutlu lazer uyarmalı floresan ışıma(LUF) tekniğini kullanarak tek silindirli bir dizel motorunun piston-segman-silindir yüzeyindeki yağ dağılım mekanizmasını, silindirde oluşturdukları kuvars penceresi(üst ölü nokta ile alt ölü nokta arasına 88° KMA'lık bir bölgeye) kanalıyla incelemişlerdir. Bu teknikle piston tacı ve ikinci yüzeyindeki farklı yağ transfer mekanizmaları, belirli motor çalışma noktalarında incelenmiş ve son olarak segmanın yuvası içinde dönmesinin yağ transfer mekanizmalarına etkisi araştırılmıştır. Yağı pistonun üst yüzeyine (piston tacına) taşıyan iki mekanizma tanımlamışlardır: tüm motor çalışma şartlarında ikinci segman yüzeyi ve yuvasından birinci segman yüzeyi ve yuvasına oradan da birinci segmanın emme stroğunda segman yuvasının üst yüzeyine doğru hareketi ile yağın sıkışarak piston tacına doğru taşınması, ikinci ve en önemli mekanizma yüksek motor hızlarında ve düşük yüklerde birinci segmanın silindir yüzeyinden yağı kazımasıdır. İkinci segman yüzeyindeki yağ hareketlerinin ise birinci ve ikinci segman açıklıklarının yerlerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Yüksek motor hızlarında atalet kuvvetleri ile taşınan yağın baskın olduğu, düşük motor hızı ve yükünde ise ikinci segman yüzeyindeki yağ birikiminin temel kaynağının birinci segmanın yağı geri kazıması olduğu gösterilmiştir. Düşük hız ve yüklerde, yağ segmanı tarafından silindir yüzeyinde tutulan yağ birinci segman tarafından ters yönde kazınarak ikici segman yüzeyine taşındığı ve ikinci segman yüzeyinde biriken bu yağ segman yuvasından sıvı olarak ya da buhar halinde birinci segman açıklığından piston tacına taşındığı belirtilmiştir.



Şekil 2.6 : Quartz Pencereli Piston Gömleği İle LUF Ölçüm Düzeneği (Thirouard vd.,1998).

Arcoumanis vd. (1998a, 1998b), farklı yağlar kullanarak LUF yöntemi ile tek silindirli bir dizel araştırma motorunda yağ film kalınlıklarını ölçmüş ve bu yöntemin yeni yağ geliştirme çalışmalarındaki önemini vurgulamıştır. Deney için 488 nm dalga boyunda su soğutmalı Argon-ion lazerden çıkan ışınları, dikroik ayna ile silindirin orta stroğu, alt ve üst ölü noktasına açılan oyuklardan multimode fiber kablolar ile odaklamıştır. Buradan yansıyan ışınları iki filtreden geçirip fotomultiplikatörde gerilim sinyallerine çevirmiştir. K tipi termocupl ile karterdeki ve silindir gömleğindeki sıcaklıkları ölçmüştür. Kalibrasyon için çözünürlüğü 1 µm hassasiyete kadar artırılmış mikrometre kullanmıştır. Sıcaklıktan kaynaklı etkileri kompanze etmek için tezgahüstü kalibrasyon da uygulamıştır. Devamı olan motorun soğuk çalışmadaki ilk 200 çevrimi için yaptığı çalışmada, yağ film kalınlığı oluşumunun karmaşık segman hareketleri nedeniyle oldukça düzensiz olduğunu gözlemlemiştir.

Nakayama vd. (2003), krank yataklarında yatak genişliği boyunca fiber optik alıcılar yerleştirmiş ve LUF yöntemini kullanarak yağ film kalınlıklarını ölçmüştür. Deneyde ilk olarak statik yük altında kalibrasyon yapmıştır. Deney için 100 mW gücünde, 442 nm kaynak dalga boyunda He-Cd lazer kullanmış ve yatak üzerinde 4 ayrı noktadan ölçüm almak için ayırıcı(splitter) kullanmıştır. Lazerden gelen dalga boyundaki kaynak ışınlarını $5x10^{-4}$ mol/litre oranında floresan boya ile karıştırdığı yağa

göndermiş ve 500 nm dalga boyunda ışıma elde etmiştir. Gelen bu ışınları fotomultiplikatörde toplamıştır. Deneye göre şaftın ölçüm için merkezlemesi tam yapılmazsa yani açılı bir şekilde ölçüm yapılırsa, ortalama yağ film kalınlığının daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre yatağın dışa daha yakın bölgelerinde yağ film kalınlığının merkeze göre daha ince olduğu görülmüş ve bu sonuçların elastohidrodinamik yağlama teorisi ile örtüştüğü görülmüştür. Bu yüzden aşırı yük altında yağ film kalınlığının önemli derecede elastik deformasyon etkisinde olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Thirouard ve Tian (2003), 2 boyutlu lazerli floresan ışıma (LUF) tekniğini kullanarak tek silindirli dizel ve benzinli motorda farklı yük ve hızlarda piston – segman – silindir sistemini resimleyerek bu sistem içindeki yağ film kalınlığını belirlemişler ve yağın geçiş mekanizmalarını, eksenel ve çevresel hareketini, segman yuvası ve segman aralıklarındaki yağ akışını tanımlamışlardır. Buna göre piston yüzeylerinde yağın eksenel ve çevresel olarak taşındığı ve eksenel taşınımın atalet kuvvetinin, çevresel yöndeki taşınım ise gaz akışının etkisi altında olduğu vurgulanmıştır. Pistonun birincil hareketleri sebebiyle ortaya çıkan segmanın pompalama hareketinin ve segman ile yuvası arasında biriken yağda pistonun ikincil hareketi sebebiyle meydana gelen kesme kuvvetinin geçen yağ miktarı açısından etkili olduğu, ayrıca bir segmanın hızlı titreme hareketi yaptığında gaz akışı ile gerçekleşen yağ geçişinin arttığı belirtilmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Ölçüm Yöntemi Seçimi

Tez kapsamında piston gömleği-segman arası yağ film kalınlığı ölçümü için optik yöntem olan lazer uyarmalı floresan tekniği kullanılmıştır. Burada test sisteminde kullanılacak olan ekipmanlar lazerin dalga boyu ve gücüne göre değişiklik göstereceğinden, hangi lazerin kullanılacağı önem arz etmektedir. Yapılan literatür araştırmaları lazer uyarmalı floresan (LUF) tekniği ile yağ film kalınlığı ölçümü için daha önceki çalışmalarda ışık kaynağı olarak genellikle 445-488 nm dalga boylarında mavi-yeşil multi-mode lazerler kullanıldığını göstermiştir. Deneyde kullanılan diğer tüm optik ekipmanlar bu lazer tipine göre seçilmiştir. Araştırmalar LUF yönteminde kullanılan floresan boyaların uzun süre lazer ışınına maruz kalması sonucunda açılma (bleaching) oluşumuna sebebiyet verdiği ve önemli bir problem olduğunu göstermiştir. Açılmanın önüne geçebilmek amacıyla yağın sürekli tazelendiği ve çok kısa bir süre lazer ışınına maruz kaldığı bir sistemin tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

3.2 Ölçümde Kullanılan Ekipmanlar ve Seçimi

3.2.1 Lazer

Çok şiddetli, koherent ve tek renk ışık elde etmek için geliştirilmiş optik düzeneklere lazer denir. Lazerler, fotonları uyumlu bir hüzme şeklinde oluşturan optik kaynaklardır. Çizelge 3.1'de farklı dalga boyu ve frekans bandında lazer ışınlarının renkleri gözükmektedir. Kullanılan aktif ortamın fiziksel doğasına bağlı olarak lazerleri, yalıtkan lazerler, yarı iletken lazerler, gaz ve boya lazerleri olmak üzere dört gruba ayırabiliriz. Lazer tipleri:

- Katkılanmış yalıtkan lazer
- Yakut lazer
- Alexandrite lazer
- Nd:YAG lazer
- Yarı iletken lazer

- He-Ne lazer

Çizelge 3.1 : Lazer Işını Dalga Boyu Aralığına Göre Renkleri.

Renk	Dalgaboyu Aralığı	Frekans Aralığı
Kırmızı	625-740 nm	480-405 THz
Turuncu	590-625 nm	510-480 THz
Sarı	565-590 nm	530-510 THz
Yeşil	525-565 nm	580-530 THz
Turkuaz	500-520 nm	600-580 THz
Mavi	430-500 nm	700-600 THz
Mor	380-430 nm	790-700 THz

Literatür araştırması ve benchmark çalışması sonucunda Şekil 3.1'de verilen Spectra Physics Excelsior One, Fiber Coupled, Multi-mode 70 mW gücünde lazer kaynağı kullanılmıştır. Lazer kaynağında doğrudan fiber optik çıkış bulunmaktadır ve FC/APC bağlantıya sahiptir. Diğer tüm optik elemanların seçimi bu lazer tipine göre yapılmıştır. Çizelge 3.2'de lazerin teknik özellikleri verilmiştir.



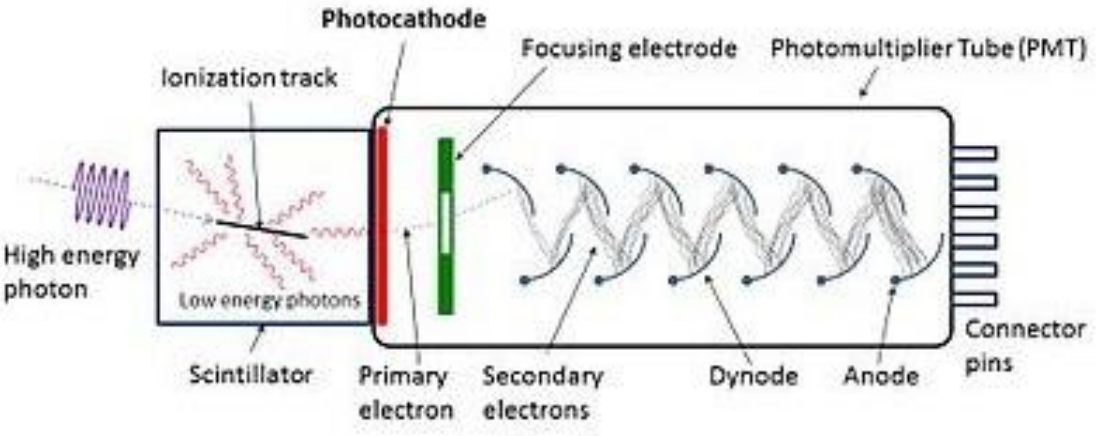
Şekil 3.1 : Spectra Physics Excelsior One Lazer.

Çizelge 3.2 : Spectra Physics Excelsior One Lazer Teknik Özellikleri.

Özellikler	Değerler
Dalga boyu	445±5 nm
Çıkış gücü	100 mW
Modu	Multi
Spektral hat genişliği	<1 nm
Teknoloji	Direk Diyot
Işın kalitesi	<1.3
Işın çapı ($1/e^2$)	0.7±0.07 mm
Işın farkı	<1.2 mrad
Işın eliptikliği	1±0.1
Polarizasyon oranı	>100:1
Işın odaklama stabilitesi	<6 μrad/°C
Gürültü(20 Hz-20 Mhz)	<0.2% rms
Güç stabilitesi(8 saat üzeri)	<±%2
Isınma süresi	<5 dakika
Işın yüksekliği	19 mm
Çalışma voltajı	5 VDC
Maksimum güç tüketimi	< 10W
Çalışma sıcaklığı	10-40°C(%80 bağıl nem)
Maksimum lazer kafası çıkış sıcaklığı	50°C
Saklama sıcaklığı	-20°C ve 60°C aralığı
Boyutlar	100 x 40 x 40 mm

3.2.2 Fotomultiplikatör (PMT)

Fotomultiplikatör tüpler (PMT) vakum tüp ailesinin bir üyesidir. Vakum tüplerden özel olarak çok daha hassas bir ışığın ultraviyole, görülebilir ve yakın kızılötesi dalga boylarındaki elektromanyetik spektrumunu kapsayan sensöre sahiptir. Bu dedektörler gelen ışıktan kaynaklanan akımı Şekil 3.2'de gösterilen yapı ile 100 milyon kat kadar katlarlar. Dinot katlama sürecinde fotonların tek tek gözlemlenmesi mümkün olur ve ışığın akısı çok düşüktür.

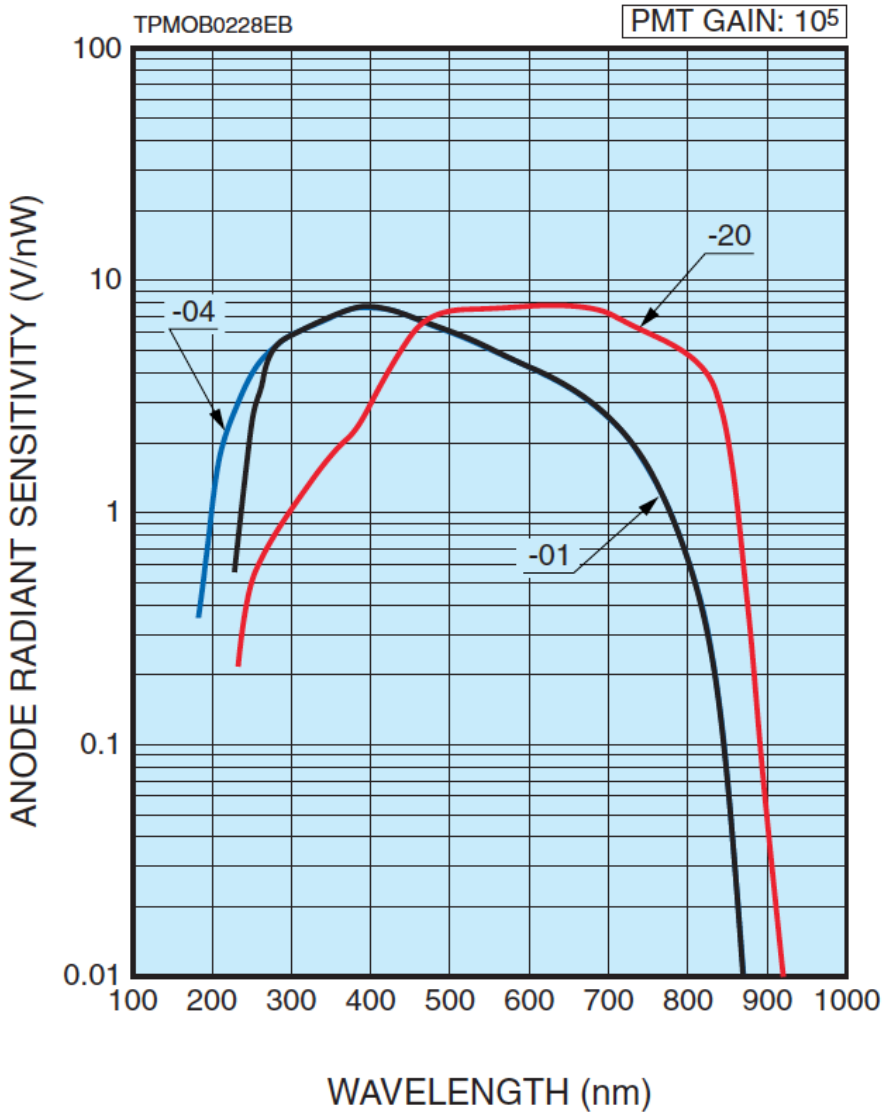


Şekil 3.2 : Fotomultiplikatör (PMT) Yapısı (Url-2).

Fotomultiplikatör genel olarak fotokatot, birkaç tane dinot ve bir anot içeren tahliye cam gövdesiyle kurulur. Gelen fotonlar, genellikle ince bir buhar birikmiş olan cihazın giriş penceresindeki iletken katmana yani fotokatot malzemeye çarparlar. Elektronlar fotoelektrik etkinin bir sonucu olarak yüzeyden fırlatılırlar. Bu elektronlar ikincil emisyon işleminin parçası olarak elektron katlayıcıları boyunca elektroda odaklanarak yönelirler. Şekil 3.3'de deney düzeneği için seçilen Hamamatsu H10722-20 Serisi PMT gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.3'de seçilen PMT'nin teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Hamamatsu H10722-20 Serisi PMT.



Şekil 3.4 : PMT Spektral Cevap Karakteristiği.

Çizelge 3.3 : PMT Teknik Özellikleri

Özellikler	Değerler	Birim
Giriş Voltajı	±4,5 - ±5,5	V
Max giriş voltajı	±5,5	V
Max. giriş akımı	6,2/-3,5	mA
Max. sinyal çıkış voltajı	+4(yük direnci 10Ω)	V
Max. kontrol voltajı	1,1(giriş direnci 1Ω)	V
Kontrol voltajı aralığı	0,5-1,1(giriş direnci 1Ω)	V
Efektif alan	Ø8	mm
Dalga boyu hassasiyeti	630	nm
Katot ışık hassasiyeti(min/typ)	350/500	µA/lm
Katot mavi hassasiyet indexi	-	-
Katot Kırmızı/Beyaz oranı	0,45	-
Katot radyant hassasiyeti	78	mA/W

Çizelge 3.3 devamı : PMT Teknik Özellikleri.

Özellikler	Değerler	Birim
Akım-Gerilim çevirme faktörü	1	V/µA
Çıkış offset voltajı	±1	mV
Gürültü(Tepeden tepeye)	0,5	mV
Ayarlama süresi	10	s
Çalışma sıcaklığı	-45	°C
Saklama sıcaklığı	-70	°C
Ağırlık	90	g
Anot ışık hassasiyeti(min/typ)	3,5x108 / 1x109	V/lm
Anot radyant hassasiyeti	150	V/nW
Frekans bandı(3 dB)	20 kHz	-

3.2.3 Dalga boyu seçici (filtre)

Enstrümantal analizlerde, polikromatik ışının sadece sınırlı dalga boyu aralığını kapsayan bantlarına gereksinim vardır. Böyle bantların elde edilmesi için "dalga boyu seçici" denilen aletler veya sistemler kullanılır. Dalga boyu seçiciler dalga boyunu istenilen dar bir aralıkta sınırlarlar; cihazın seçiciliğini ve hassasiyetini yükseltirler. Ancak tek bir dalga boyunda ışın verebilecek ideal dalga boyu seçiciler bulunmaz, ancak etkin bant genişliği farklı dalga boyu dağılımları söz konusudur. Etkin bant genişliği, pik yüksekliğinin yarısına karşı gelen genişliktir ve bu amaçla kullanılan sistemin kalitesiyle ters orantılıdır; bandın genişliği azaldıkça sistemin performansı yükselir. Tez kapsamında deneylerde lazer çıkış ışını için Şekil 3.4'de verilen 445 nm ve piston gömleğinden yansıyan lazer dönüş ışınları için ise 495 nm dalga boyunda bant geçiren filtre kullanılmıştır.



Şekil 3.5 : Lazer Çıkışında Kullanılan 445 nm Filtre.

3.2.4 Ayırıcı (splitter)

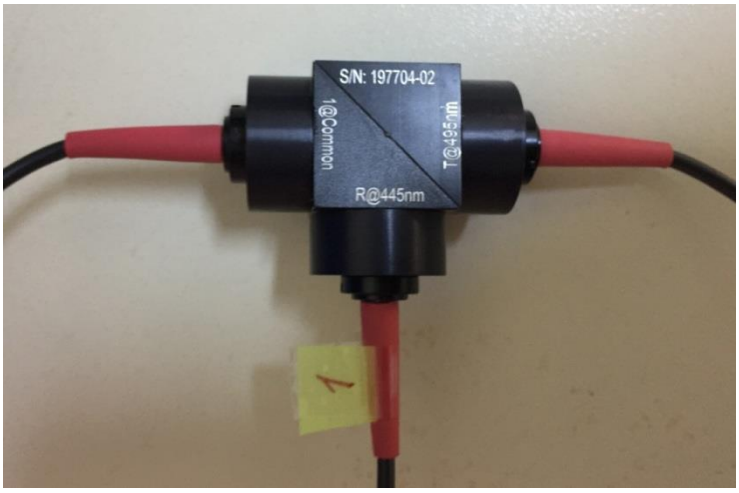
Ayırıcılar (splitter) bir noktadan gelen ışınları çoklamaya yarar. Bu işlemi yaparken giriş ışın gücü çıkış sayısına göre oranlı bir şekilde bölünür. Ölçümlerin doğruluğunu arttırmak ve değişik noktalardan ölçüm alabilmek için Şekil 3.5'de verilen çift çıkışlı splitter vasıtası ile ışın ikiye ayrılarak segman üzerinden iki noktadan ölçüm almaya çalışılmıştır.



Şekil 3.6 : Lazer Işınlarını 2 Kola Ayırmak İçin Kullanılan Ayırıcı.

3.2.5 Birleştirici (kombiner)

Tez kapsamında kullanılan birleştirici 3 kola sahip olup, 1 kolu giriş 2 kolu ise çıkış olarak kullanılmaktadır. Birleştirici lazerden gelen 445 nm dalga boyunda ışınları yağ filmine yönlendirir ve yansıyan 495 nm dalga boyundaki ışınları 495 nm band geçiren filtreye iletir. Şekil 3.6'da test sisteminde kullanılan birleştirici gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Lazer Işınlarını 2 Kola Ayırmak İçin Kullanılan Ayırıcı.

3.2.6 Floresan boya ve motor yağı

Segman-silindir yağlama simülasyonlarında kullanılacak yağ ve floresan boya maddesinin seçimi de tezin önemli aşamalarından birini oluşturmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan yağlarda yaklaşık % 25 oranında, motoru çeşitli etkilerden korumak amacıyla katkı maddeleri eklenmektedir. Mineral baz yağlar çok çeşitli petrol türevlerinden oluşur ve jeolojik yapının bölgeden bölgeye farklılık göstermesinden dolayı kimyasal yapılarının kontrol edilmesi oldukça güçtür. Ayrıca ZDDP vb. aşınma önleyici katkı maddeleri segman ve silindir üzerinde ince tribofilmler oluşmasına sebep olmakta ve floresan ışıma özelliklerini değiştirebilmektedir. Bundan dolayı koruyucu maddelerin floresan ışıma karakteristikleri üzerine etkilerini azaltmak amacıyla deneyde motor yağı olarak Çizelge 3.4'de teknik özellikleri verilen sentetik motor yağlarının bazı olan PAO 6 (Poly-alpha-olefin) ve Opet firmasından temin edilen katkısız 15W40 mineral motor yağı kullanılması planlanmıştır.

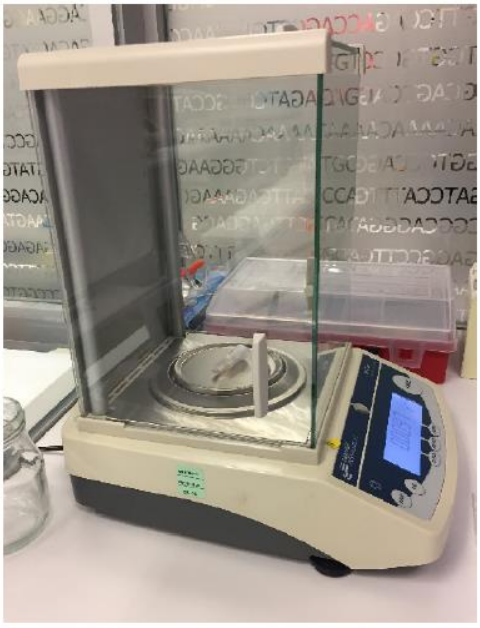
Çizelge 3.4 : PAO 6 Teknik Özellikleri.

Özellikler	Değerler
Kinematik Viskozite,cSt @212ºF,100 ºC	5.9
Kinematik Viskozite,cSt @104°F,40°C	30.5
Kinematik Viskozite,cSt @-40°F,-40°C	7.712
Viskozite İndexi	137
Akma Noktası, °F,°C	-78(-61)
Alevlenme Noktası°F,°C	473(245)
Yanma Noktası, °F,°C	529(276)
Uçuculuk (%)	6.6
Özgül Ağırlık,60°/60°F,15.6°/15.6°C	0.8278
Yoğunluk, lb/gal	6.893
Toplam Asit Sayısı	<0.03
Brom İndexi	<200
Koku	Normal
Görünüş	Temiz ve Berrak
Renk	0

Floresan boya seçimi yapılırken hem test düzeneğinde kullanılan lazerin dalga boyu hem de boyanın ışığı yutma ve ışıma frekansı göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer lazerin dalga boyu boyanın yutma frekans bandına girmez ise boya ışıma yapmayacaktır. Aynı zamanda floresan boyalar "solvochromatic" özellik gösterdiğinden, içinde çözündüğü sıvıya bağlı olarak yutma ve ışıma dalga boyları kayar. Genellikle polar bir sıvıdan polar olmayan bir sıvıya geçildiğinde dalga boyları yeşilden maviye doğru kayar. Hazırlanan deney düzeneğinde yağ içerisine katılacak olan floresan boyanın yağda çözünerek, lazer kaynağından gelen 445 nm dalga boyunda lazer ışınını yutması ve 495 nm dalga boyunda ışıması beklenmektedir. Boyaların solvochromatic özellikleri ve literatürdeki motor yağı uygulamaları göz önünde bulundurularak Exciton firmasından 1'er gram Coumarin 540A ($C_{16}H_{14}F_3NO_2$) ve Coumarin 523 ($C_{16}H_{14}N_2O_2$) floresan boya alınmıştır.

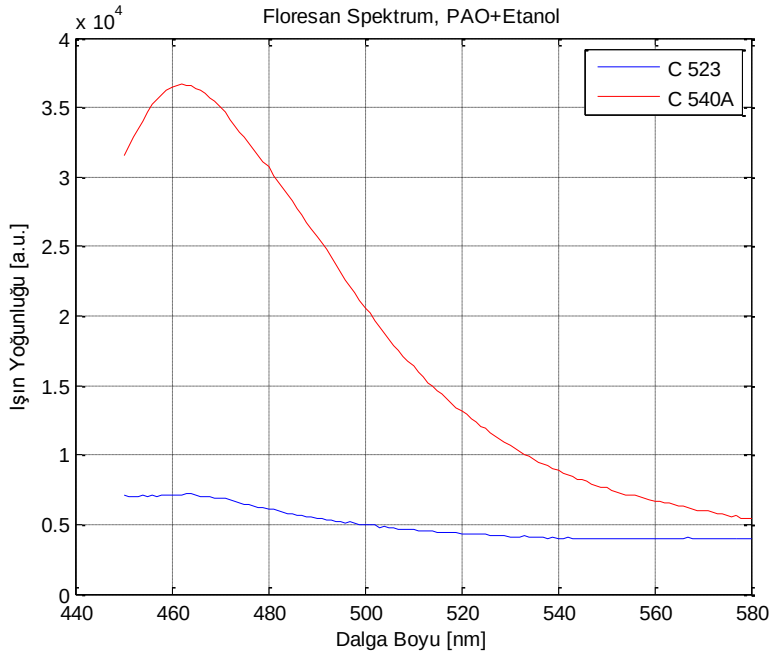
Literatürde boya ve motor yağı karışım oranı $1x10^{-4}$ ile $5x10^{-4}$ arasındadır. Ancak literatürde floresan boyaların çeşitli çözücüler içerisinde yutma ve ışıma dalga boyları bilinse de PAO ve motor yağı içerisindeki davranışlarına dair bir bilgiye rastlanmamıştır. Bundan dolayı floresan boya ve yağ karışımlarının yutma ve ışıma dalga boylarının floresan spektrometresi ile ölçülmesi gerekmektedir. Coumarin 540A ($C_{16}H_{14}F_3NO_2$) ve Coumarin 523 ($C_{16}H_{14}N_2O_2$) boyalarının molekül ağırlıkları sırası ile 309,29 gram ve 266,30 gram'dır. Boya konstrasyonları Şekil 3.7'de gösterilen hassas terazi ile ayarlanarak, öncelikle Coumarin 523 ve Coumarin 540A, PAO-6 ve 15W40 içerisinde $2x10^{-4}$ mol/litre oranında karıştırılmıştır. Boyaların yağ ile çözücü olmadan homojen olarak karışmadığı ve belirli bir süre sonra toz halinde dibe çöktüğü gözlenmiştir. Bunun üzerine her iki boya önce 80 µL etanol içerisinde çözdürülerek, PAO-6 ve 15W40 motor yağı içerisine $2,4x10^{-4}$ mol/litre oranında katılmıştır. Ancak Coumarin 523'ün yine belirli bir süre sonra dibe çöktüğü, Coumarin 540A'nın ise göreceli olarak daha iyi bir çözünme sağladığı görülmüştür. İki adet karışımın olmadığı ve dört adet de etanolde çözdürülen floresan boyalı yağ karışımı olmak üzere altı adet numunenin floresans spektrumları İTÜ Fizik Mühendisliği laboratuvarlarında ölçülmüştür.

Floresans spektrum ölçümü için tez kapsamında alınan 445 nm, multi-mode lazer kullanılmıştır. Lazer ışınları dört tarafı da şeffaf bir quartz küvet üzerine açılı bir şekilde düşürülerek, küvetten yansıyan ışının bir spektrofotometre üzerine yansıtılması sağlanmıştır.



Şekil 3.8 : Boya Konsantrasyonlarının Hassas Terazi İle Ayarlanması.

Spektrofotometre cihazından alınan ham data bir MATLAB programı aracılığı ile normalize edilmiştir. Ancak Şekil 3.8'den görüleceği gibi boyanın yağ içerisinde yeterince çözünmemesinden dolayı Coumarin 523'den sağlıklı bir sinyal alınamamıştır. Coumarin 540A, PAO-6 içerisindeki en yüksek değerini mavi bölgeye kayarak 465 nm dalga boyunda göstermiş, planlanan ölçüm aralığı olan 495 nm'de sinyalin oldukça düşük olduğu görülmüştür.

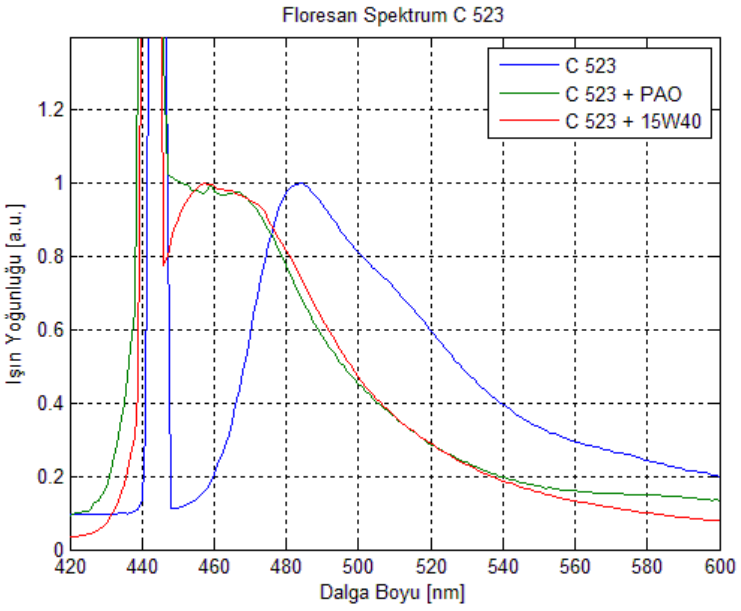


Şekil 3.9 : Etanol İle Çözülmüş Boyaların Floresan Spektrumları.

Boyaların etanol ile çözüldüğünde istenilen dalga boyunda ışıma vermemesi üzerine çözücü olarak diklorometan (CH_2Cl_2) kullanılarak yeni karışımlar hazırlanmıştır. Çizelge 3.5'de hazırlanan yağ örneklerinin konsantrasyonları görülmektedir. Her bir yağ için birer boya ve saf boya-çözücü karışımı olmak üzere altı karışım hazırlanmış ve spektrofotometre kullanılarak floresan spektrumları çıkarılmıştır. Şekil 3.9'da Coumarin 523'ün saf diklorometan, PAO-6 ve katkısız 15W40 yağ içerisindeki davranışı görülmektedir. Şekildeki 445 nm bölgesindeki tepe, lazer kaynağını göstermektedir. Coumarin 523'ün saf diklorometan içerisinde dahi 485 nm dalga boyunda ışıdığı ve yağ içerisinde önemli ölçüde maviye doğru (465 nm) kayma gösterdiği gözlenmiştir. Test sistemi 495 nm dalga boyuna göre tasarlandığı için Coumarin 523'ün diklorometan içerisinde kullanıldığında seçilen filtreler için uygun olmadığı görülmüştür.

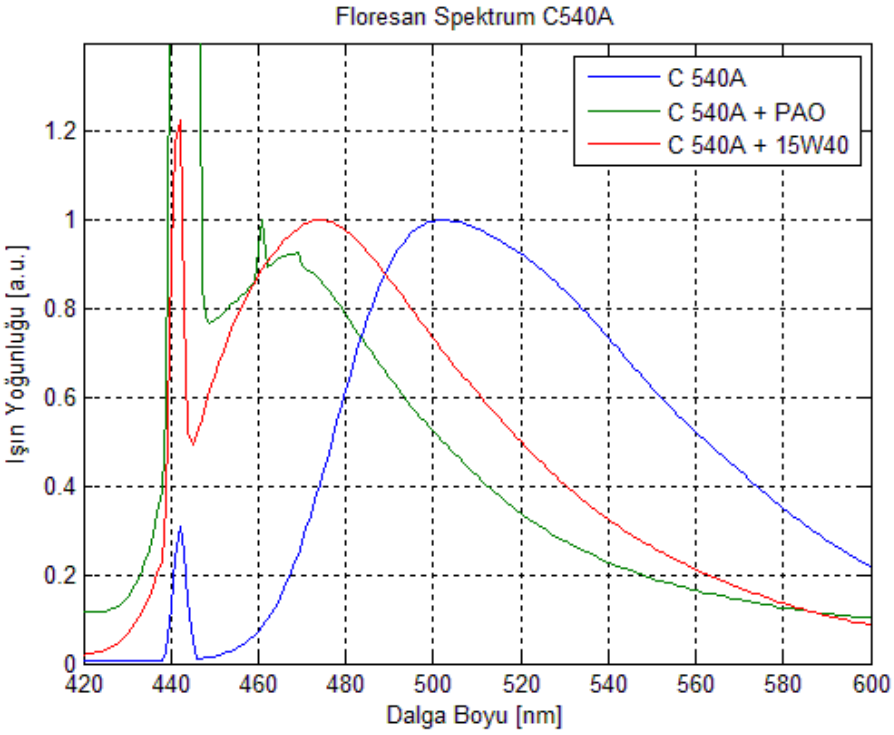
Çizelge 3.5 : Hazırlanan Yağ Örnekleri.

Örnek	Boya	Çözücü	Yağlayıcı	Konstrasyon
1	C 523 – 3,7 mg	CH_2Cl_2 1,625 ml	-	$8{,}6x10^{-3}$ mol/L
2	C 523 – 7,3 mg	CH_2Cl_2 3,25 ml	PAO 6- 100 ml	$2{,}7x10^{-4}$ mol/L
3	C 523 – 7,4 mg	CH_2Cl_2 3,25 ml	15W40 – 100 ml	$2{,}8x10^{-4}$ mol/L
4	C 540A – 3,7 mg	CH_2Cl_2 1,625 ml	-	$7{,}4x10^{-3}$ mol/L
5	C 540A – 7,4 mg	CH_2Cl_2 3,25 ml	PAO 6 – 100 ml	$2{,}4x10^{-4}$ mol/L
6	C 540A – 7,4 mg	CH_2Cl_2 3,25 ml	15W40 – 100 ml	$2{,}4x10^{-4}$ mol/L



Şekil 3.10 : Coumarin 523 Floresan Spektrumu (Çözücü CH_2Cl_2).

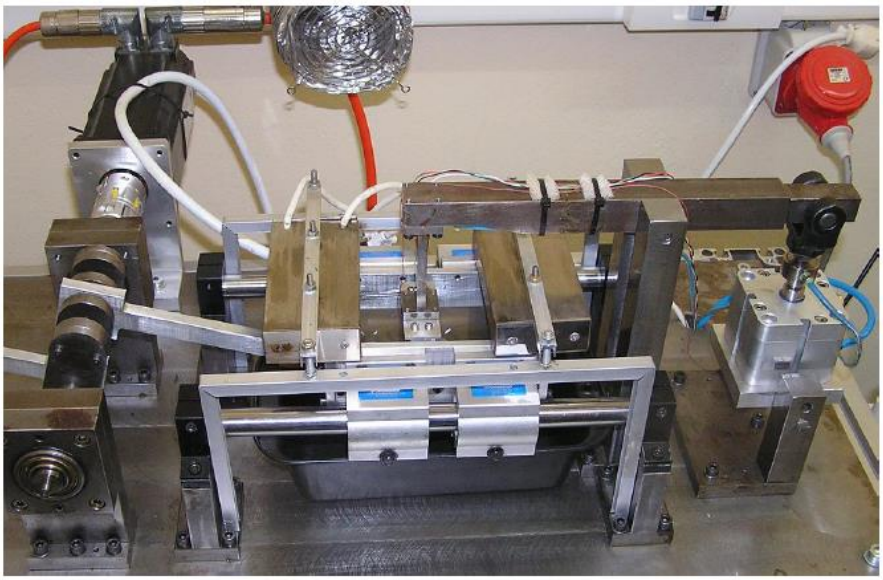
Şekil 3.10'da ise Coumarin 540A'nın saf diklorometan çözücü, PAO-6 ve 15W40 motor yağı içerisindeki floresan spektrumları görülmektedir. Coumarin 540A diklorometan içerisinde 505 nm (yeşil) bölgesinde en yüksek floresan ışıma sağlamasına rağmen, motor yağı içerisinde hem PAO-6 hem de 15W40 maviye doğru kayma göstermektedir. Coumarin 540A, 15W40 içerisinde her ne kadar en yüksek ışımasını 475 nm dalga boyunda gerçekleştirse de, 495 nm bölgesinde kuvvetli bir floresan ışıma yaptığı görülmektedir. Bu nedenle test sistemindeki ekipmanlarla olan uyumluluğundan dolayı, diklorometan içerisinde çözülmüş Coumarin 540A ve 15W40 katkısız motor yağı ile deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. Yağ içerisindeki diklorometan konsantrasyonunun artışı spektrumu yeşil bölgeye doğru öteleyerek ışıma gücünü artırsa da, yağın özelliklerini tahrip etmesinden ötürü diklorometan miktarı sınırlı tutulmuştur.



Şekil 3.11 : Coumarin 540A Floresan Spektrumu (Çözücü CH_2Cl_2).

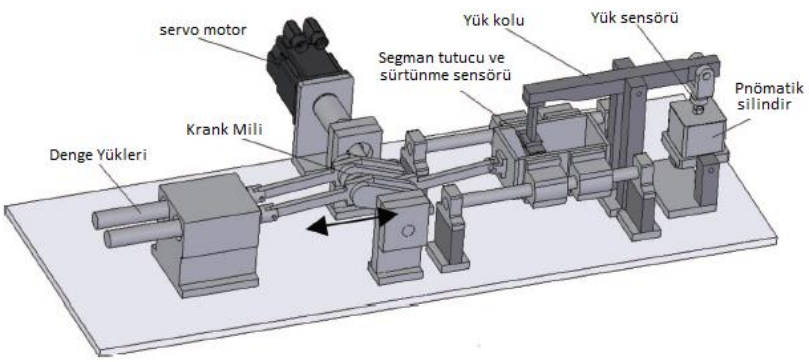
3.3 Ölçüm Yöntemi Prosedürü

Tez kapsamında yapılmak istenen yağ film kalınlığı ölçüm sistemi, daha önce kurulmuş olan segman-silindir sürtünme test sistemine entegre edilmiştir. Şekil 3.11'de gösterilen segman-silindir sürtünme test sistemi sabit bir segman tutucu ve bir servo motordan tahrik alan hareketli bir silindir segmentinden oluşmaktadır.



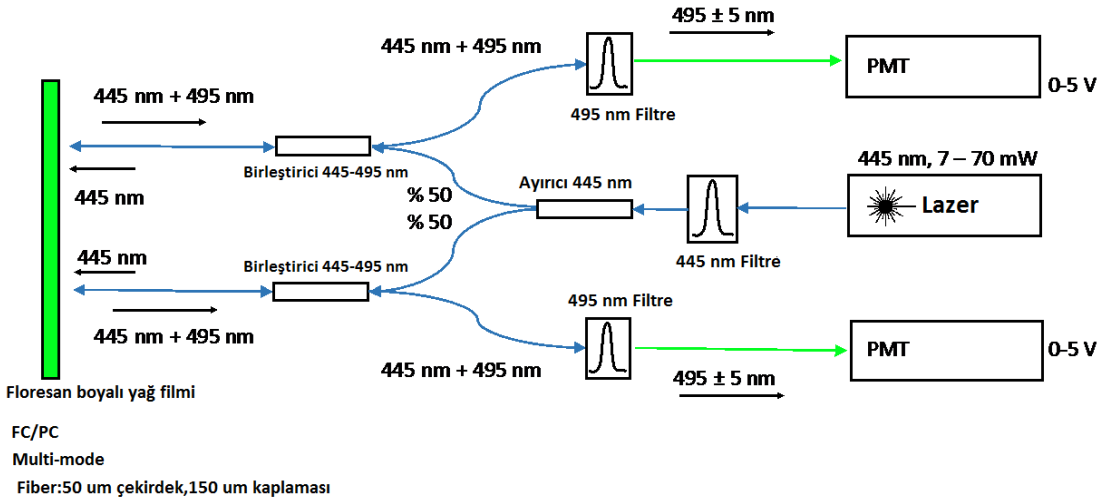
Şekil 3.12 : Test Sistemi.

Sistemde bir ağır hizmet motoruna ait segman ile plato ve farklı satır aralıklarında lazer ile honlanmış silindir segmentleri kullanılmaktadır. Test sistemi titreşim dengeleme sistemi ile gerçek motor strok ve hızlarında çalışabilmektedir. Pnömatik silindir, kompresör ve hassas bir basınç regülatörü yardımıyla yük koluna kuvvet uygulanıp segman silindir segmentine bastırılmaktadır. Yağ sıcaklığı silindir segmenti üzerine portatif olarak konumlandırılmış ısıtıcılar ile kontrol edilirken, yağ debisi ise zaman ayarlı infüzyon pompası ile kontrol edilmektedir. Sensörlerden alınan bilgiler ve Labview veri toplama programı yardımıyla sürtünme kuvveti ve baskı yükü(normal yük) krank mili açısının fonksiyonu olarak çizdirilip kaydedilebilmektedir. Şekil 3.12'de test sisteminin 3 boyutlu teknik çizimi verilmiştir. Test sisteminde servo motor hızı, lazerin gücü, lazerin açık kalma süresi ve toplanan verilerin kaydedilmesi işlemi RS232 portu üzerinden Labview programı ile yapılmaktadır.



Şekil 3.13 : Test Sistemi 3 Boyutlu Teknik Çizimi.

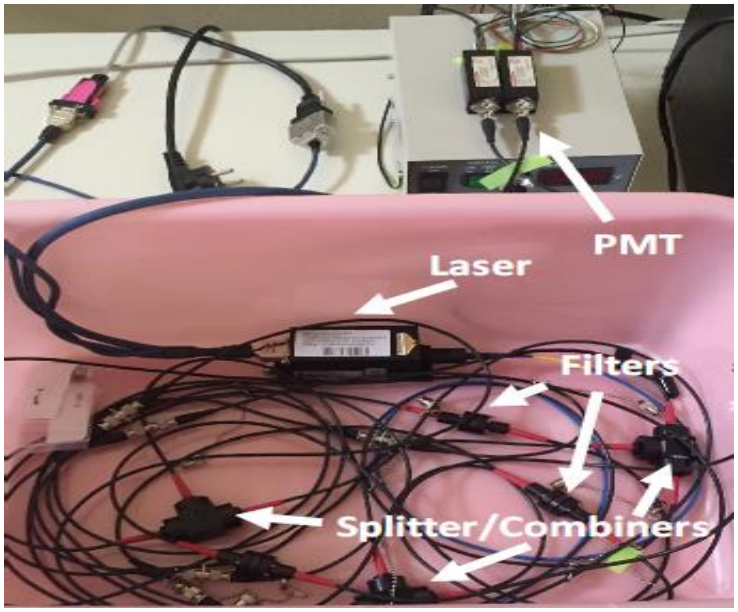
LUF ölçümü için Şekil 3.13'de verilen bağlantı şemasına göre ekipmanların montajı yapılmıştır. Burada 445 nm, multi-mode lazer kaynağından çıkan 35-70 mW gücünde ışınlar bir FC/APC – FC/PC adaptör ile 445 nm dalga boyundaki bant geçiren filtreye bağlanarak 445 nm ±10 nm aralığında temiz bir sinyal elde edilmiştir. Lazerin çıkış ucu geri yansıyan ışınların etkisinden ve zararından korunmak amacıyla, 8 derecelik eğim açısına sahip APC ferrül ile sonlandırılmıştır. Diğer fiber optik eleman bağlantıları FC/PC olarak (düz) seçilmiştir.



Şekil 3.14 : Tasarlanan LUF Yağ Film Kalınlığı Ölçme Sisteminin Bağlantı Şeması.

445 nm dar bant filtreden çıkan ışın segmanda açılmış olan iki delikten iki ayrı noktada ölçüm yapabilmek amacıyla bir fiber optik ayırıcıya (splitter) girer. Bu ayırıcı ile lazerden gelen ışın %50-%50 ikiye ayrılır. Ayrılan her bir kol 445 nm giriş, ölçüm çıkışı ve 495 nm dönüş çıkışı olmak üzere üç kollu birleştiricinin (combiner) 445 nm giriş koluna bağlanır. Birleştiriciden gelen fiber optik kolların FC/PC bağlantı ile fiber optik kablolara (patchcord) bağlantıları yapılmıştır. Bu fiber optik kablolar bir ucu FC/PC, diğer ucu ise segman deliğinden geçirebilmek amacıyla açık olarak sonlandırılmış, ışın segman-silindir sürtünme test sisteminde segman üzerine açılmış olan delikler içerisinden yağ filmine yönlendirilmiştir. 445 nm dalga boyundaki ışın, floresan boyalı yağdan ışıma yapıp birleştiricinin 495 nm çıkışından çıkarak 495 nm bant geçiren filtreye girer. 16 nm bant genişliğine sahip bu dar bant filtrede ışının 445 nm dalga boyundaki bileşenleri filtrelenerek sadece 495 nm dalga boyundaki bileşenlerin geçirilmesi sağlanır. 495 nm de filtrelenen ışın yağ film kalınlığı ile orantılı olarak gerilim üreten fotomultiplikatöre (PMT) giriş yapar. Fotomultiplikatörden çıkan elektrik sinyali güç kaynağına bağlanır. Güç

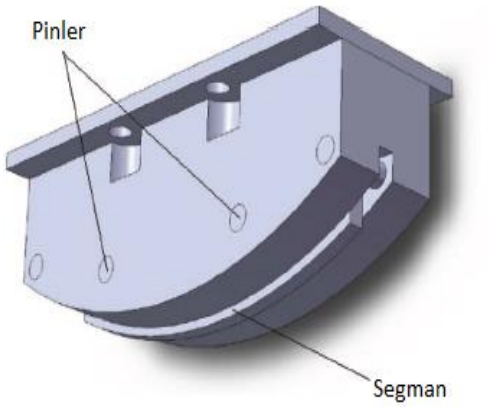
kaynağı hem foto-multiplikatörün giriş gerilimini üretir, hem de 0-5 V değer aralığında yağ film kalınlığı ile doğru orantılı bir çıkış gerilimi sağlar. Güç kaynağı üzerinden fotomultiplikatörün kazancını değiştirmek mümkündür. Yüksek güçlü ışığa maruz kaldığında fotomultiplikatörler kolaylıkla yanabilmektedir. Düşük kazançlarda ise sinyal/gürültü oranı düşük kalabilmektedir. Bu nedenle fotomultiplikatör kazancı (gain) ayarı çok önemlidir. Bağlantı şemasına uygun olarak yapılan lazer uyarmalı floresan yağ film kalınlığı ölçme sisteminin montajı Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : LUF Yağ Film Kalınlığı Ölçme Sistemi.

Güç kaynağından alınan gerilim sinyalleri segman-silindir simülatörünün National Instruments veri toplama kartına bağlanır. LabView programında hazırlanan block diagram ile kullanıcı arayüzünden test sistemi kontrol edilerek; sürtünme kuvveti, normal yük ve yağ film kalınlığı ölçülerek kaydedilebilmektedir.

Segman-silindir test sisteminde segman, gerçek motorda pistona tekabül eden bir segman tutucu yardımı ile silindir üzerine bastırılır. Şekil 3.15'de verilen tutucu modelinde ortadaki pimler, yük uygulandığında segmanın deforme olarak alan teması ve tekdüze bir basınç dağılımı oluşturmasını sağlar. Yanlardaki pimler ise segmanın gerçek motorda olduğu gibi segman yuvası içerisinde dönebilmesini sağlar ve dışarı çıkmasına engel olur. Silindirin orijinal segmanı açıldığında daha büyük bir çapa sahip olup alan teması sağlayamayacağı için burada silindir çapına göre bir miktar küçük segmanlar kullanılmıştır.



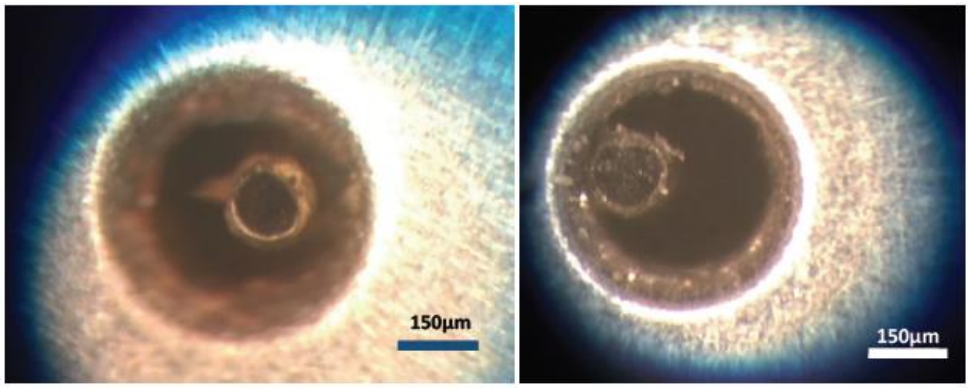
Şekil 3.16 : Segman Tutucu.

LUF sisteminde ölçme için kullanılan birleştiriciye bağlı fiber optik kablo 50 µm çekirdek, 125 µm kaplama ve dış kaplaması ile birlikte 145 µm çapındadır. Test sisteminde gerçek yağ sıcaklıklarına ulaşılabilmesi için silindir yüzeyi iki adet ısıtıcı ile yaklaşık 90°C'e kadar ısıtılmaktadır. Bundan dolayı segman ve tutucu ile temas eden fiber optik kablolar 110°C sıcaklığa dayanabilecek şekilde seçilmiştir. Lazer uyarmalı floresan test sisteminde yağ film kalınlığı ölçümü için segman-silindir test düzeneğinde kullanılan Şekil 3.16'daki segmana birbiri ile segman merkezine göre simetrik olan 200 µm çapında iki adet tel erozyon yöntemi ile delik açılmıştır. Fiber optik delme işlemi için katı modeli hazırlanmış, ışınların saçılmaması için deliğin silindir yüzeyine dik açıda konumlandırılması sağlanmıştır. Herbir delikten fiber optik kablolar geçirilip, çalışma esnasında yansıyan ışınların segman içerisine girmemesi için epoksi(UHU Plus–Schnellfest) ile sabitlenmiştir. Epoksinin kuruması ile birlikte fiber optik kablonun segman yüzeyinden çıkan kısmı fiber optik kesme kalemi ile kesilmiştir.



Şekil 3.17 : Segman Üzerinde Açılan Fiber Optik Kablo Delikleri.

Kesilen fiber optik ucu temizlemek ve parlatmak için 1 µm, 0,3 µm fiber optik zımparaları kullanılmış ve parlatma zımparası ile son olarak parlatma işlemi yapılmıştır. Düzgün bir zımparalama için zımpara üzerinde sekiz şeklinde hareketlerle işlem yapılmıştır. Daha sonra fiber optik temizleme bezi (lint free pad) ve izopropil alkol ile tozları alınmıştır. Yapılan zımpara ve parlatma işlemleri sonrasında fiber uçları mikroskopta bakılarak, fiber çekirdeği ve çevresinin istenen düzeyde ışın çıkışına izin verip vermediğine kontrol edilmiştir. Segman üzerindeki deliklere yerleştirilmiş olan fiber optik kabloların mikroskop görüntüleri Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.18 : Segman İçine Monte Edilen Fiber-Optik Kabloların Mikroskop Görüntüleri. (1.kanal sol, 2. kanal sağ).

Fiber optik kablo, filtre ve ayırıcı/birleştiricilerde oluşan kayıplar ve bağlantıların temizliği segman yüzeyine gelen ışığın gücünü değiştirebilmektedir. Bundan dolayı sistemin verimli çalışabilmesi için önem taşımaktadır. Test düzeneğinde kullanılan ekipmanlar, kayıpsız çalışmayacağından lazerden çıkan ışın gücü segman çıkışına ulaşana kadar belli kayıplara uğrar. Çizelge 3.6'da LUF sisteminde kullanılmış olan ekipmanların kayıp oranları verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Ekipmanların Kayıp Oranları.

Ekipman	Giriş Gücü(mW)	Çıkış Gücü(mW)	Kayıp(%)
Lazer	40	40	0
Filtre(445 nm)	40	37	7,5
Ayırıcı(Splitter)-%50-50	37	12(1.çıkış)	35,1
		11(2.çıkış)	40,5
Birleştirici(Kombiner)	12	9,5	20,8
	11	8,5	29,4
Segman Çıkışları	9,5	6	36,8
	8,5	6,2	27

Segmandan çıkan lazer ışın gücünün kontrol edilmesi için ışık ölçer gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 3.19'da gösterilen ışık ölçer ve sensörü ile sistem üzerindeki her bir elemanın kayıpları ayrı ayrı ölçülmüştür. Sisteme 40 mW güç verildiğinde her bir segman kanalına yaklaşık 6 mW güç düştüğü görülmüştür.

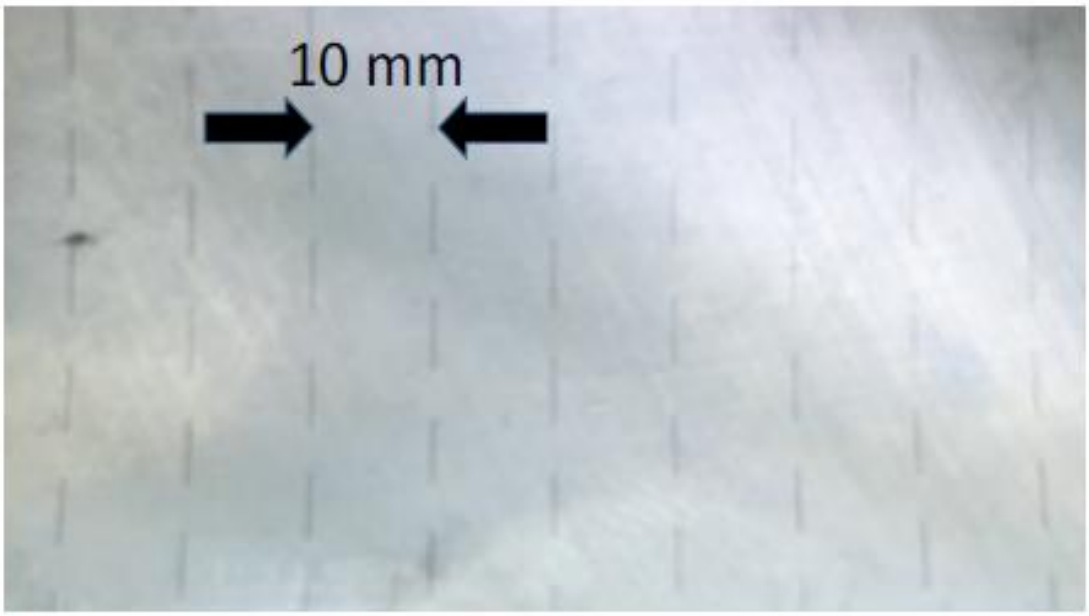


Şekil 3.19 : Fiber Optik Işık Gücü Ölçer ve Sensörü.

Fotomultiplikatörlerden (PMT) gelen yağ film kalınlığı ile orantılı elektrik geriliminin kaydedilebilmesi için LabView arayüzünde PMT1 ve PMT2 ölçümleri için iki analog kanal eklenmiştir. Segman silindir test sisteminin kontrolü ve veri toplanması için hazırlanmış olan LabView programına RS232 portundan otomatik komut yazarak lazeri kontrol eden program eklenmiştir. Bu program ile lazer gücü, lazer açma-kapatma işlemi, açık kalma süresi ve toplanan verilerin kaydedilmesi kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen arayüz deney sırasında yağ film kalınlıklarını görüntüleyecek ve bir dosyaya yazdıracak şekilde tasarlanmıştır. Floresan boyalı yağın uzun süre lazer ışınlarına maruz kalması "foto-bleaching"e neden olduğundan dolayı kullanıcı arayüzüne zamanlayıcı eklenmiştir. Veriler toplanırken, zaman bazında değil krank açısı bazında toplanması istendiği için ve ham veriler herhangi bir filtreden geçirilmediğinden 10 motor çevriminin ortalaması alınarak veriler kaydedilmektedir. Böylece bozucu etkilerden en az düzeyde etkilenilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Geliştirilmiş kullanıcı ara yüzü EK B'de verilmiştir.

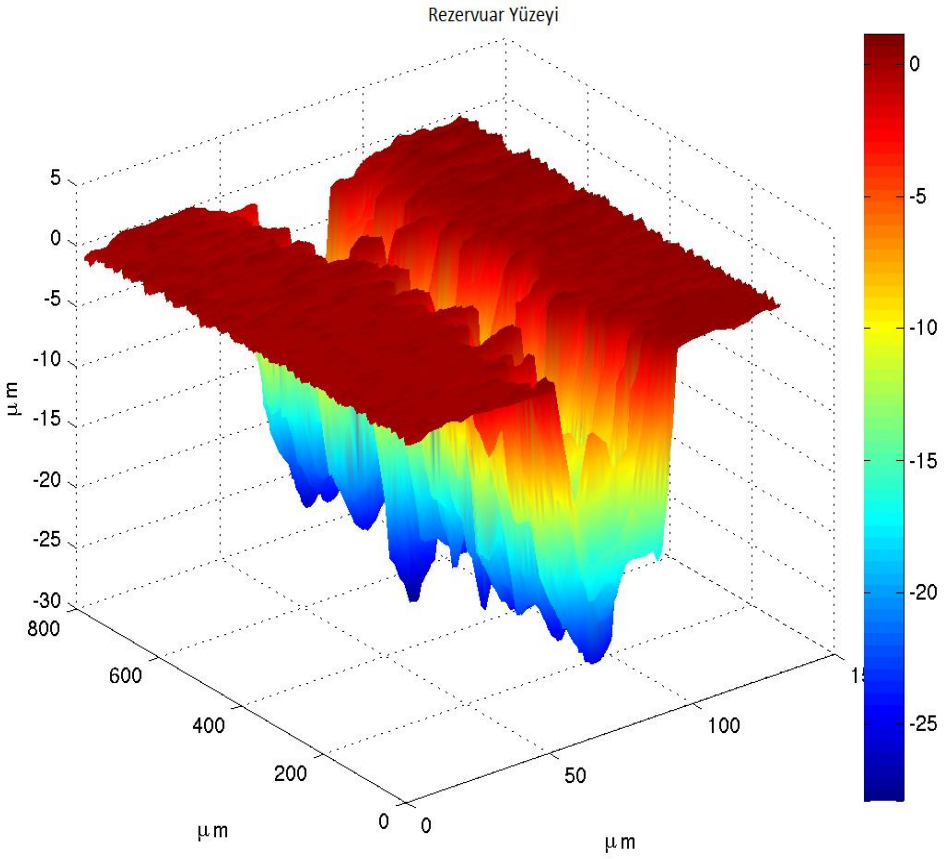
4. KALİBRASYON

LUF yöntemi ile yağ film kalınlıklarının ölçülmesinde fotomultiplikatörden alınan elektrik sinyallerinin geriliminin ne kadarlık bir yağ film kalınlığına karşılık geldiğinin bulunması için kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Literatürde kalibrasyon işlemi statik veya dinamik olarak iki farklı şekilde yapılmaktadır. Ancak kalibrasyonun doğruluğunun artırılması adına dinamik kalibrasyon tavsiye edilmektedir. Bu amaçla ilk aşamada bir endüstri projesi kapsamında Almanya'da hazırlanmış olan lazer ile honlanmış, gerçek silindirlerden kesilmiş bir gömlek segmenti segman silindir test sistemine monte edilmiş ve yükseklik, konum ve doğrultu ayarları bir komparatör yardımı ile yapılmıştır. Kalibrasyon amacıyla kullanılan gömleğin iç çapı 116 mm, yüzey pürüzlüğü 1-2 μm Rz ve 45°-60° honlama açısına sahiptir. Yüzeye dönme ve ilerleme hareketi yapan lazer ışını ile helisel rezervuarlar açılmıştır. Rezervuarların uzunluğu 3 mm, radyal aralıkları 2 mm ve eksenel aralıkları 10 mm'dir. Test sistemine monte edilen gömlek Şekil 4.1'de görülmektedir.

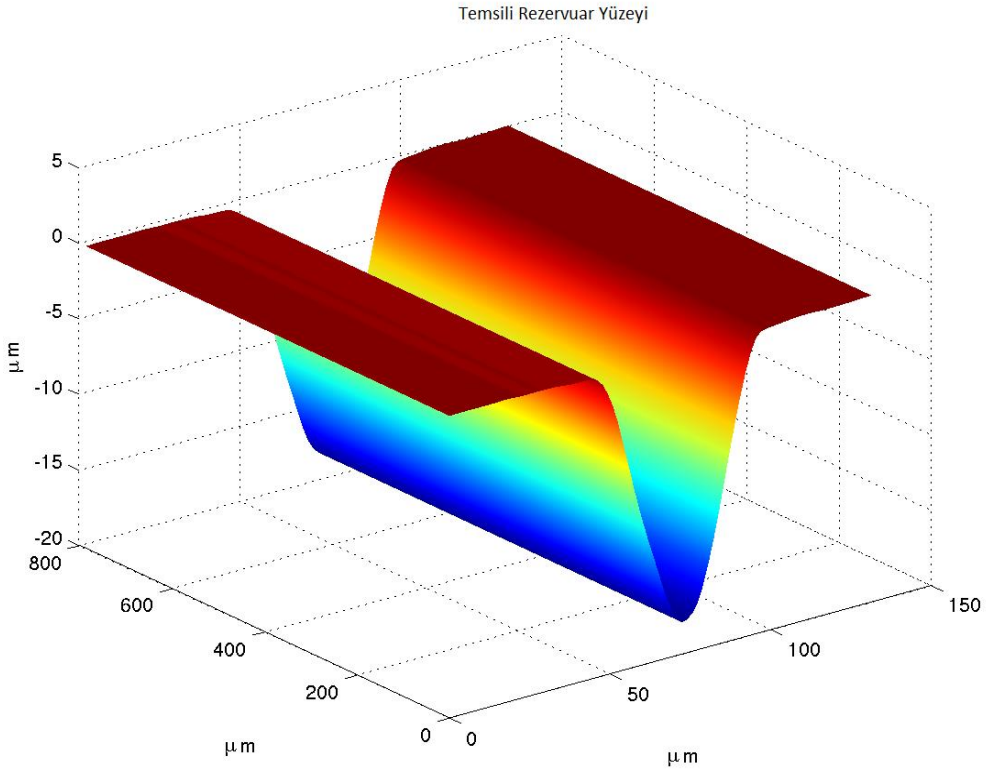


Şekil 4.1 : Kalibrasyon İçin Kullanılan Lazerle Honlanmış Silindir Yüzeyi.

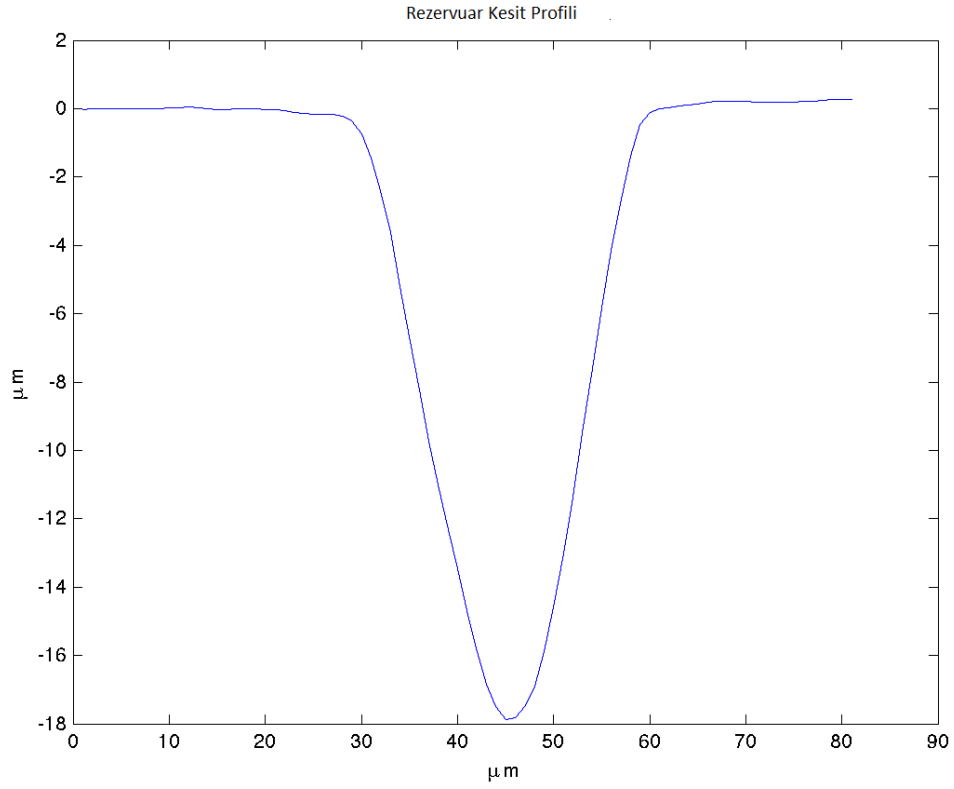
Lazer ile silindir yüzeyine açılmış rezervuarların yaklaşık 50-60 µm genişliğinde, 15-20 µm derinliğinde olduğu imalatçı firma tarafından verilmiştir. Lazer ile honlanmış yüzeylerdeki oyukların kalibrasyon için değerlerinin optik profilometre ile ölçülmesi gereklidir. Bu amaçla İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Veeco Wyco NT1100 optik profilometre kullanılmıştır. Şekil 4.2'de kalibrasyon gömleği üzerinde bulunan rezervuarın optik profilometre ile kaydedilmiş olan yüzey profili görülmektedir. Detaylı analizler yapabilmek amacı ile cihazdan alınan ham dosyadan yüzey profili oluşturan bir MATLAB kod yazılmıştır. Yüzey profilometre analizleri lazer ile yakılmış rezervuar profilinin radyal ve eksenel yönde konuma bağlı olarak değişiklikler gösterdiği saptanmıştır. Bu nedenle LUF sinyallerinin kalibrasyonunda kullanılabilecek temsili bir rezervuar geometrisi hesaplanmıştır. Yüzey profili matrisinin radyal yönde her bir satırının ortalaması alınarak temsili bir rezervuar geometrisi oluşturulmuştur. Temsili rezervuar geometrisi ve kesiti Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.2 : Kalibrasyon Gömleğinin Optik Profilometre Ölçümü.

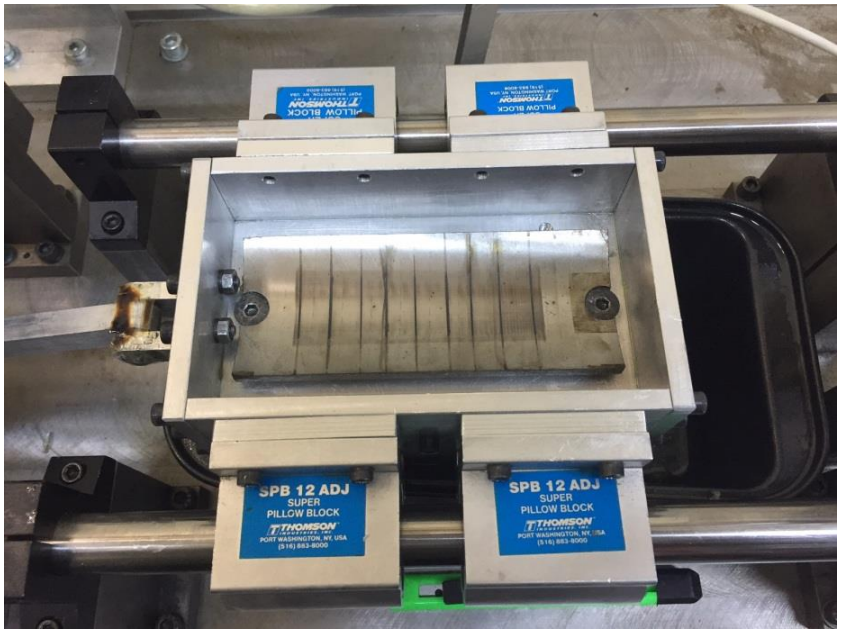


Şekil 4.3 : Hesaplanmış Temsili Rezervuar Yüzeyi.



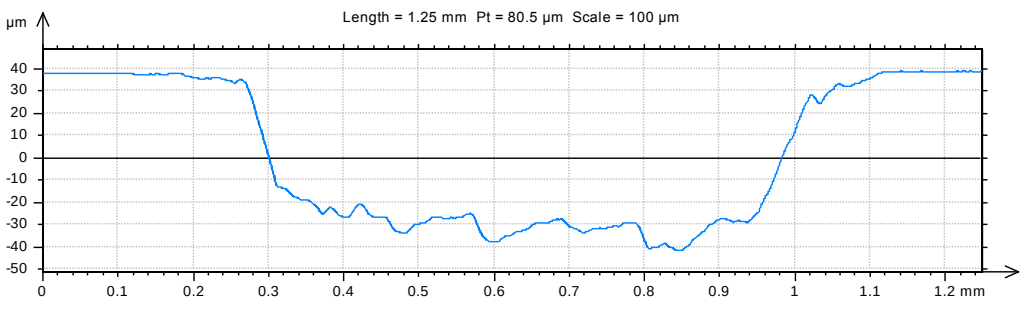
Şekil 4.4 : Hesaplanmış Temsili Rezervuar Kesit Profili.

Ancak test sisteminde yağ film kalınlığının değişimi gözlemlenirken, kalibrasyon için kullanılan lazer honlu silindir gömleğindeki rezervuarlar görülememiştir. Bunun üzerine daha sık satır aralıklı başka silindir gömlekleri denenmiş ve sonuç olarak bu gömleklerde de rezervuarlar görülememiştir. Rezervuarların görülememesi oyukların derinliğinin ve genişliğinin yeteri kadar olmamasına ve veri toplama hızının düşüklüğüne bağlanmıştır. Bundan dolayı hem veri toplama hızı on katına çıkarılmış hem de 10 mm satır aralıklı lazer honlu gömleğe dokuz farklı derinlik ve genişliklerde aşındırma(etching) işlemi ile oyuklar açılmıştır. Şekil 4.5'de etching işlemi ile üzerine oyuk açılmış olan lazer honlu gömlek gösterilmiştir.



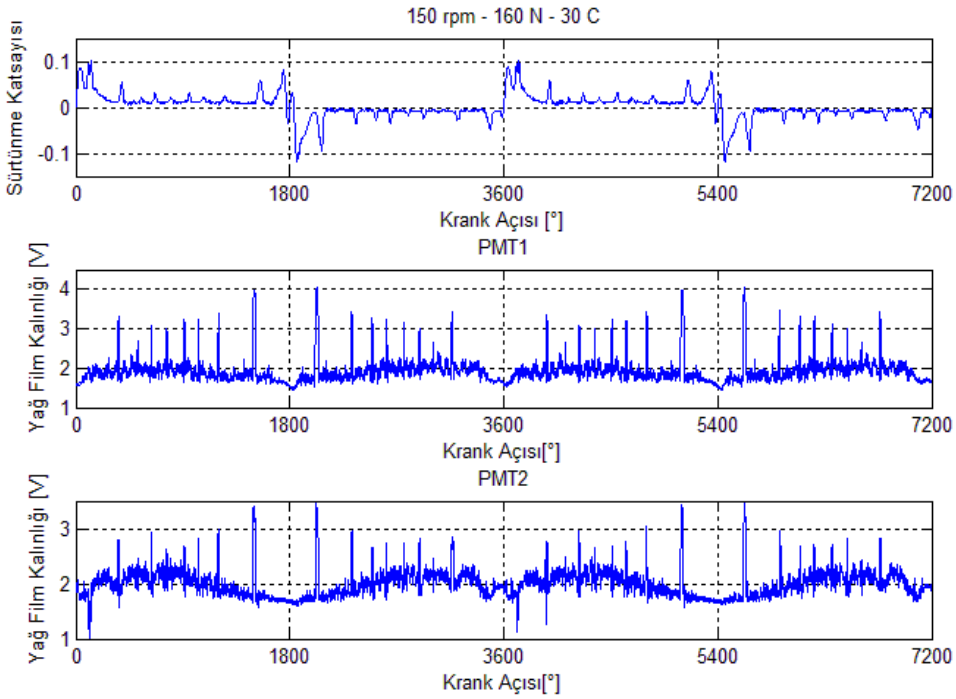
Şekil 4.5 : Etching İşlemi Uygulanmış Kalibrasyon Gömleği.

Bu oyuklar profilometre ile ölçülerek kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Profilometre ölçümleri segmanda tel erozyonla açılmış olan iki delik hizası boyunca toplamda on sekiz oyuk için yapılmıştır. EK A'da profilometre ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 4.6'da örnek bir profilometre sonucu gösterilmiştir.

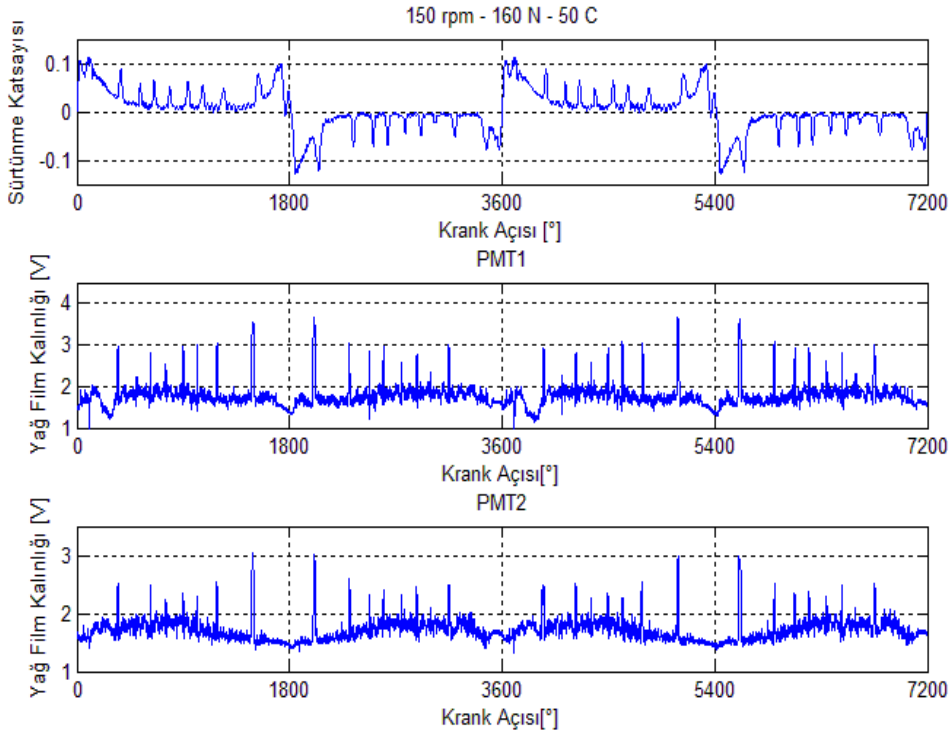


Şekil 4.6 : 4 Numaralı Rezervuar İçin Profilometre Ölçüm Sonucu.

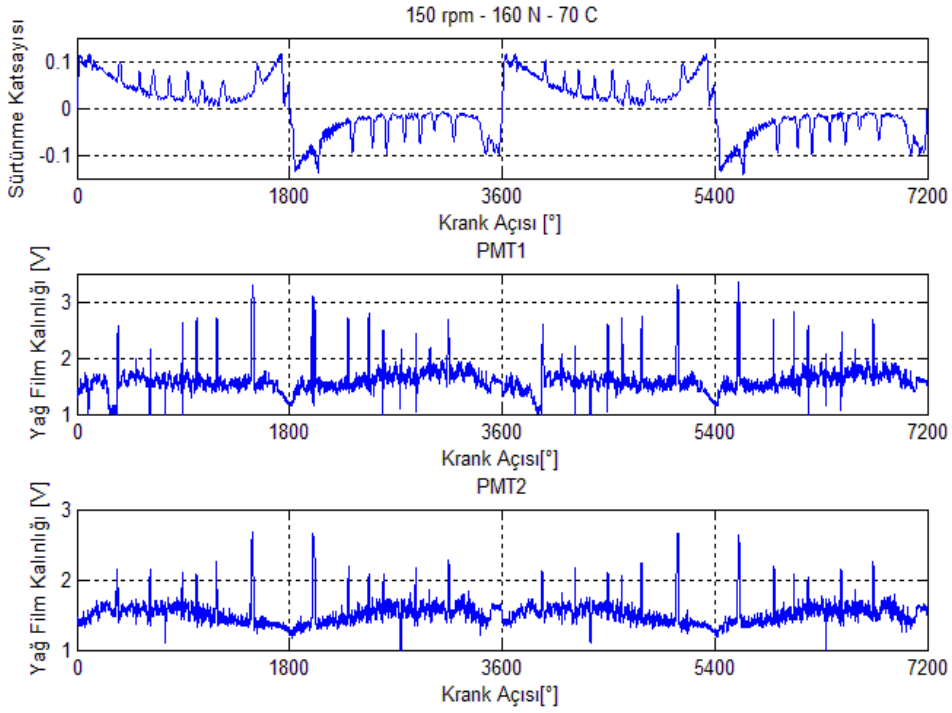
Profilometre ölçüm sonuçlarından sonra, kalibrasyon gömleği test sisteminden çıkarılıp yerine yine 10 mm satır aralıklı aşındırma (etching) işlemi yapılmamış lazer honlu gömlek takılmıştır. Öncelikle PMT kazancı (gain) ayarı yapılmıştır. Kazanç test sisteminde kullanılan ekipmanların farklı olmalarına göre değiştiği için yapılan denemeler sonucunda PMT 1 için 0,4 V ve PMT 2 için 0,415 V değerinin uygun olduğu görülmüştür. Kazanç ayarı yapılırken en önemli gözönünde bulundurulan husus, PMT'nin 4 V'luk maksimum çıkış limitini aşmaması olmuştur. Aksi takdirde PMT devresi bozularak kullanılamaz hale gelebilmektedir. Bu gömlek üzerinde 150 rpm, 160 N referans hız ve yük olarak alınıp, 30, 50 ve 70°C'de üç ayrı kalibrasyon katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sürtünme, PMT 1 ve PMT 2'nin krank mili açısına göre kalibrasyon grafikleri verilmiştir. Burada 0° krank mili açısı üst ölü noktaya tekabül ederken, 180° alt ölü noktayı göstermektedir. Ölçüm doğruluğunu arttırmak adına hem alt ölü noktadan üst ölü noktaya hem de üst ölü noktadan alt ölü noktaya harekette, rezervuar derinliklerine karşılık gelen PMT çıkış gerilimlerinin maksimum noktası hesaplanmış ve kalibrasyon için ortalaması dikkate alınmıştır.



Şekil 4.7 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.8 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.9 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Ham Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri(15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 160 N, 150 d/dak).

Üst ölü noktaya yakın olması ve rezervuar derinliğinin düşük olmasından dolayı 1 numaralı rezervuardan PMT ölçümü alınamamıştır. Bundan dolayı hesaplamalara dahil edilmemiştir. Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (30°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT1 [V]	PMT1' [V]	Ortalaması [V]
1	69,5	3,359	3,43	3,3945
2	46,5	2,651	2,648	2,6495
3	60,5	3,08	3,013	3,0465
4	38,5	3,006	3,112	3,059
5	80,5	3,218	3,303	3,2605
6	72,5	3,205	3,325	3,265
7	70,8	3,429	3,475	3,452
8	95	3,966	4,038	4,002

Çizelge 4.2 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (30°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT2 [V]	PMT2' [V]	Ortalaması [V]
1	67	2,777	2,817	2,797
2	37	2,476	2,388	2,363
3	80	2,957	2,826	2,8915
4	51,7	2,656	2,72	2,688
5	73,5	2,68	2,71	2,695
6	65,2	2,77	2,672	2,721
7	71,5	3,044	2,95	2,997
8	108	3,424	3,465	3,4445

Çizelge 4.3 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (50°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT1 [V]	PMT1' [V]	Ortalaması [V]
1	69,5	2,983	2,993	2,988
2	46,5	2,241	2,342	2,2915
3	60,5	2,8	2,771	2,7855
4	38,5	2,538	2,574	2,556
5	80,5	2,962	2,948	2,955
6	72,5	2,989	2,847	2,918
7	70,8	3,024	3,044	3,034
8	95	3,542	3,654	3,598

Çizelge 4.4 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (50°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT2 [V]	PMT2' [V]	Ortalaması [V]
1	67	2,513	2,491	2,502
2	37	1,982	2,101	2,0415
3	80	2,486	2,446	2,466
4	51,7	2,25	2,325	2,2875
5	73,5	2,348	2,408	2,378
6	65,2	2,289	2,331	2,31
7	71,5	2,536	2,596	2,566
8	108	3,036	3,005	3,0205

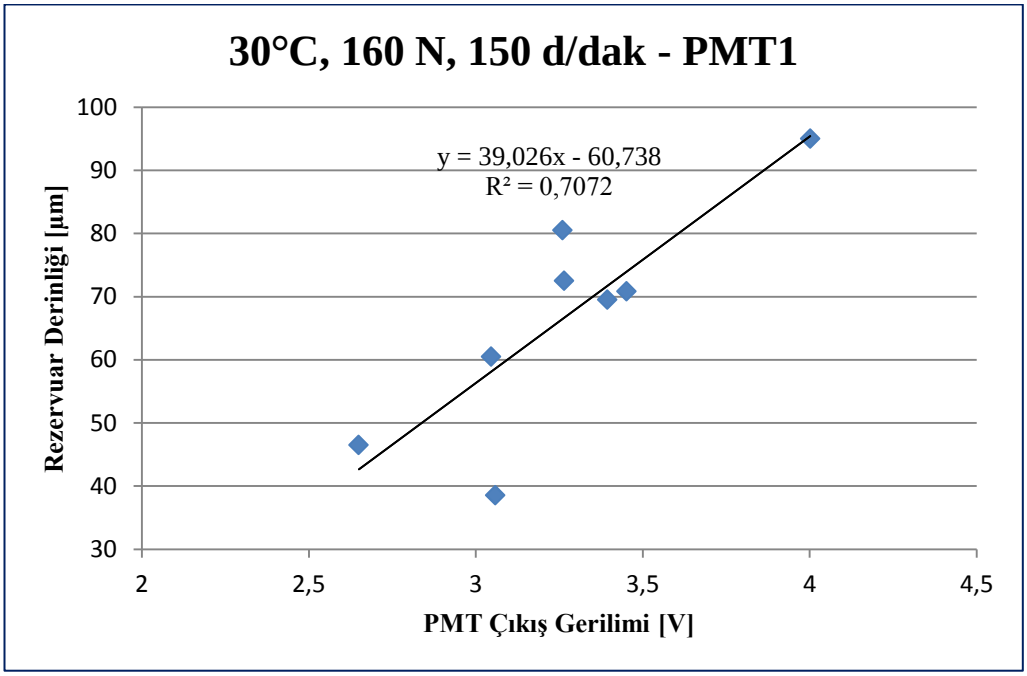
Çizelge 4.5 : PMT 1 Ölçüm Sonucu (70°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT1 [V]	PMT1' [V]	Ortalaması [V]
1	69,5	2,572	2,677	2,6245
2	46,5	1,982	2,174	2,078
3	60,5	2,158	2,44	2,299
4	38,5	-	2,154	2,154
5	80,5	2,625	2,489	2,557
6	72,5	2,717	2,797	2,757
7	70,8	2,665	2,695	2,68
8	95	3,287	3,108	3,1975

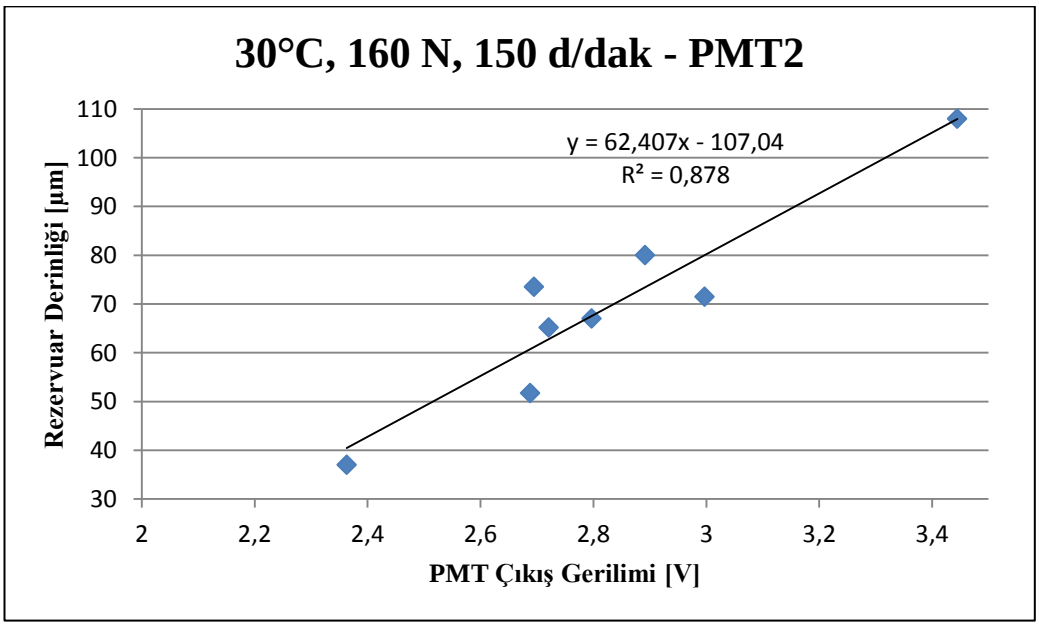
Çizelge 4.6 : PMT 2 Ölçüm Sonucu (70°C, 160 N ve 150 d/dak).

Rezervuar No	Rezervuar Derinliği [µm]	PMT2 [V]	PMT2' [V]	Ortalaması [V]
1	67	2,153	2,274	2,2135
2	37	1,722	1,865	1,7935
3	80	2,147	2,165	2,156
4	51,7	-	-	-
5	73,5	2,098	2,072	2,085
6	65,2	2,075	2,087	2,081
7	71,5	2,265	2,197	2,231
8	108	2,679	2,657	2,668

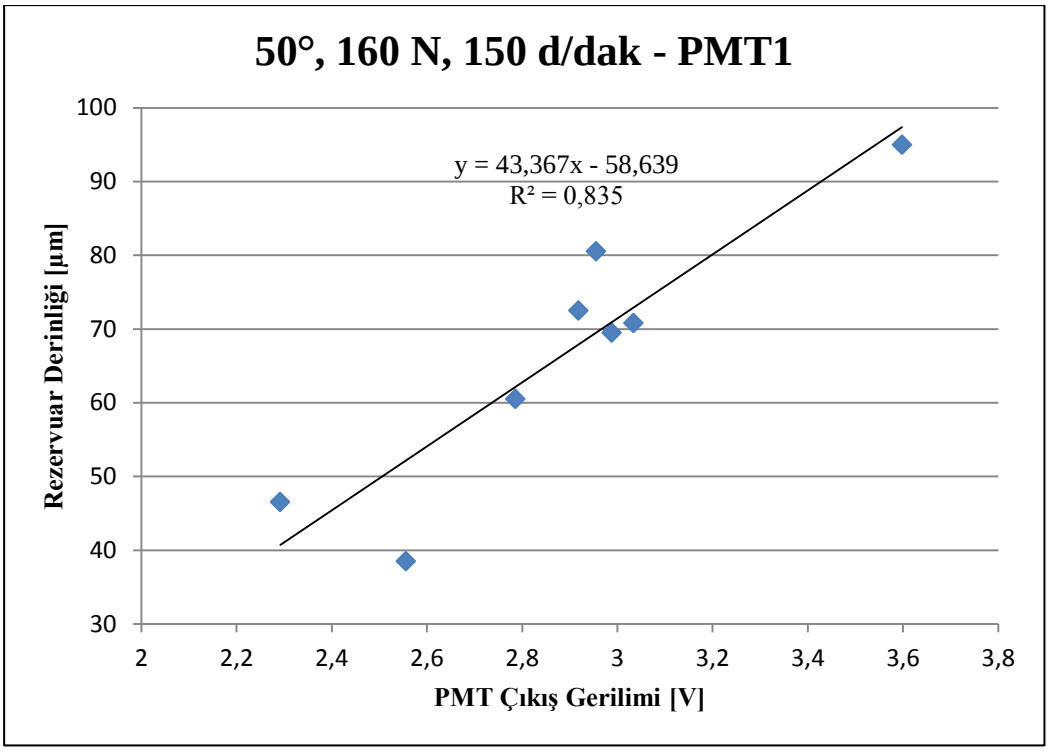
Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'daki verilere göre Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15'de gösterilen kalibrasyon grafikleri çıkartılmıştır. Burada doğruların eğimine bakıldığında "0 V" değerinde belli bir yağ film kalınlığı olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin segman yüzeyine düz yapılan fiber optik kablonun bir miktar içeri girmesinden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bundan dolayı grafikler normalize edilip, kalibrasyon katsayıları bu değerlere göre hesaplanmıştır.



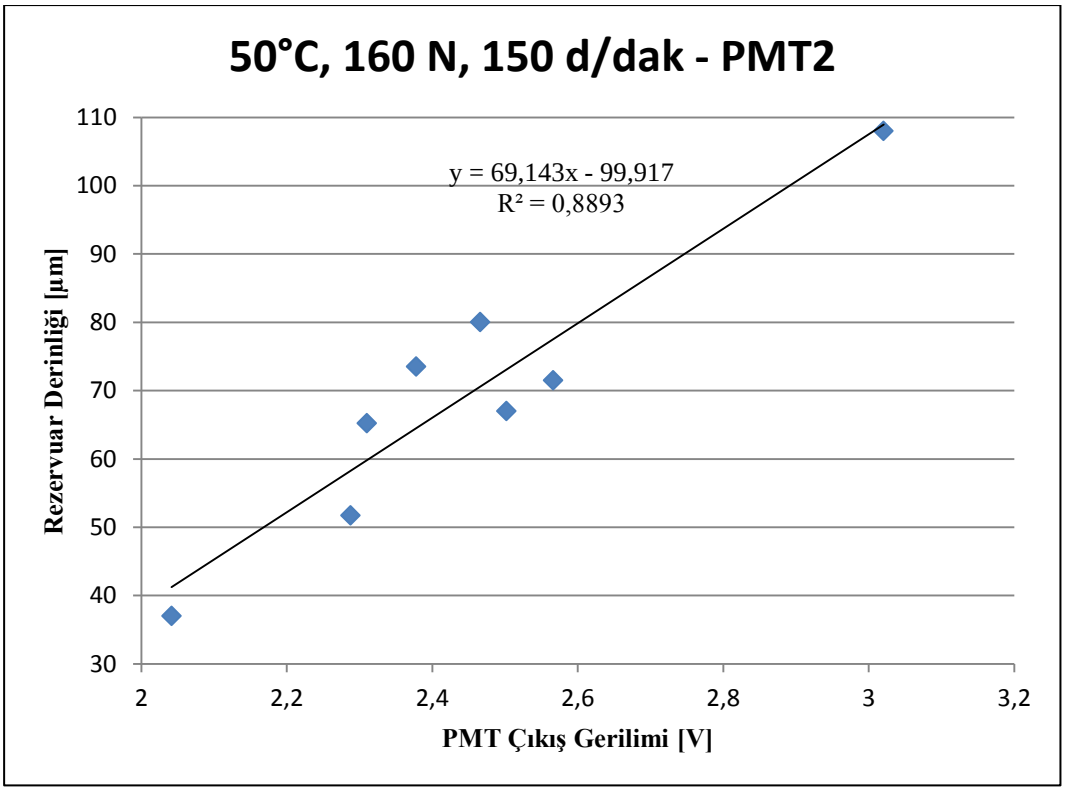
Şekil 4.10 : PMT 1 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (30°C, 160 N, 150 d/dak).



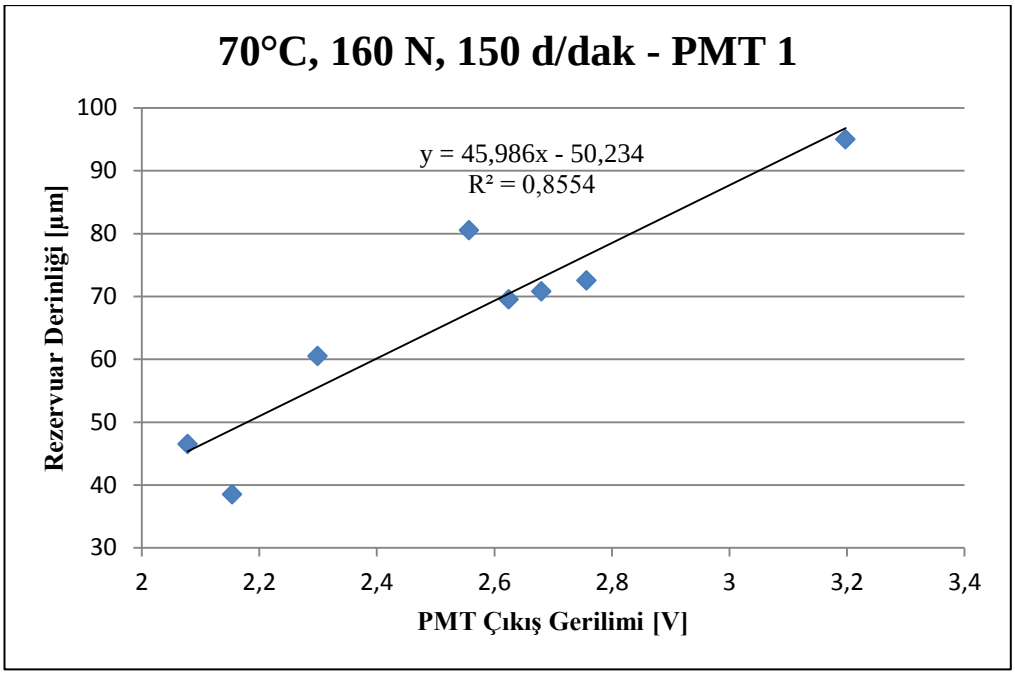
Şekil 4.11 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (30°C, 160 N, 150 d/dak).



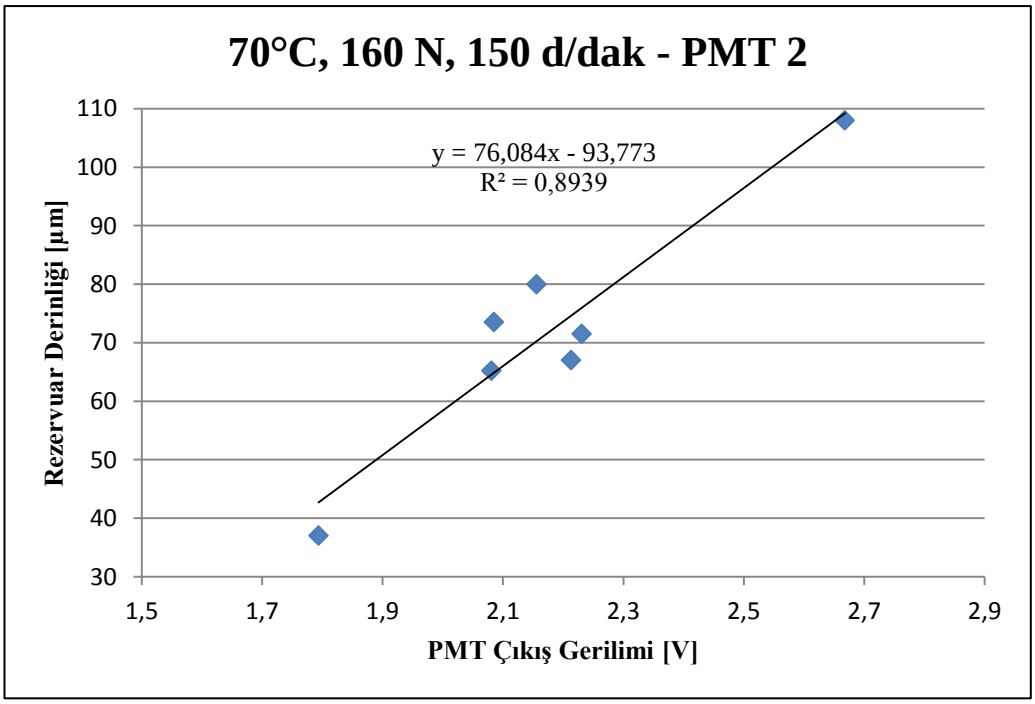
Şekil 4.12 : PMT 1 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (50°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.13 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (50°C, 160 N, 150 d/dak).

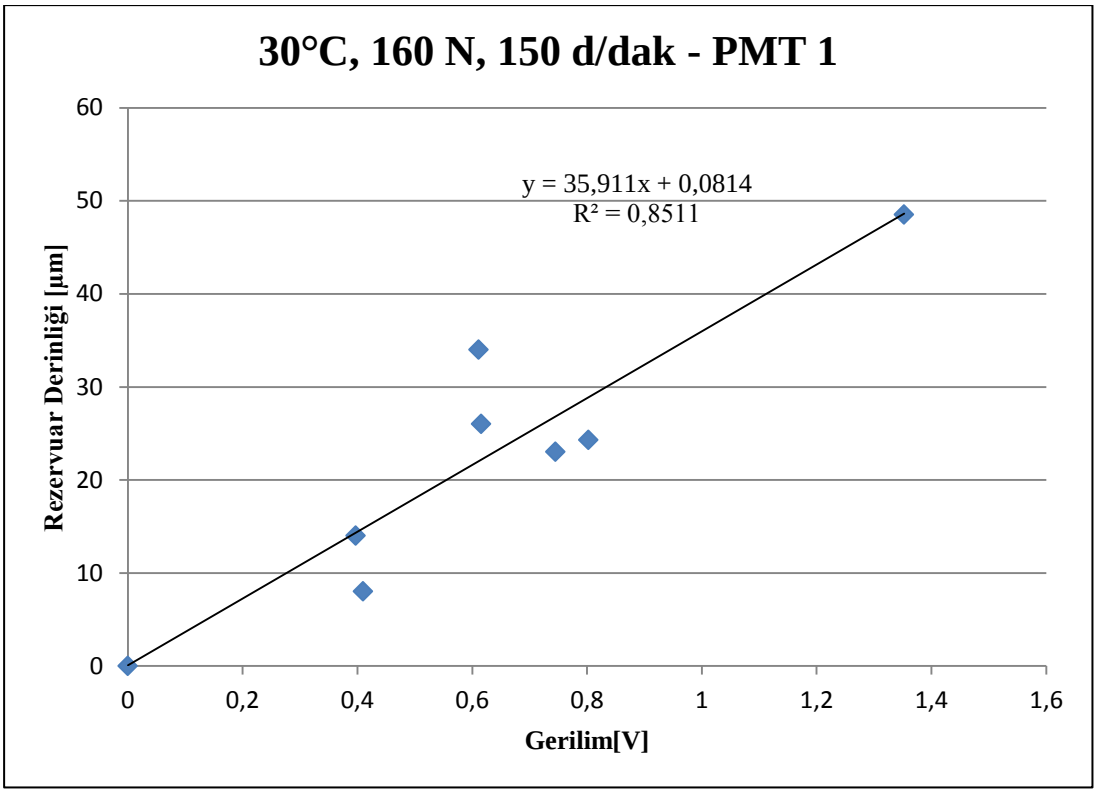


Şekil 4.14 : PMT 1Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (70°C, 160 N, 150 d/dak).

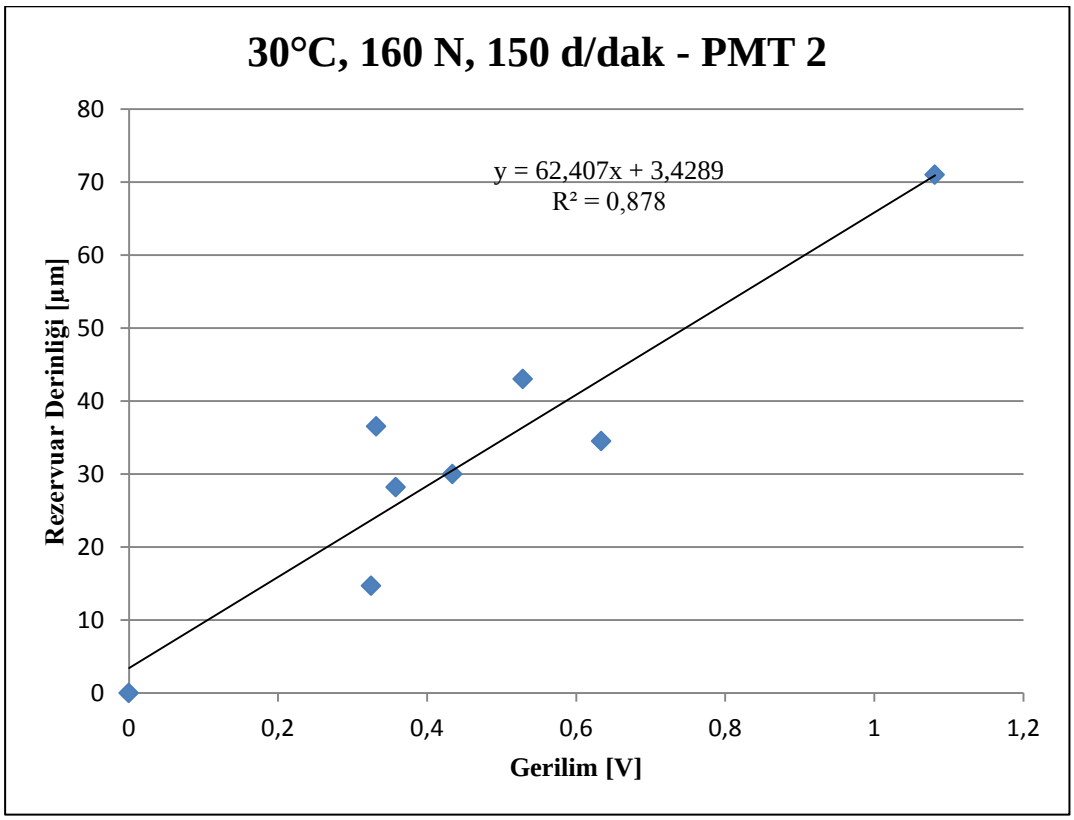


Şekil 4.15 : PMT 2 Çıkış Gerilimine Göre Rezervuar Derinliği (70°C, 160 N, 150 d/dak).

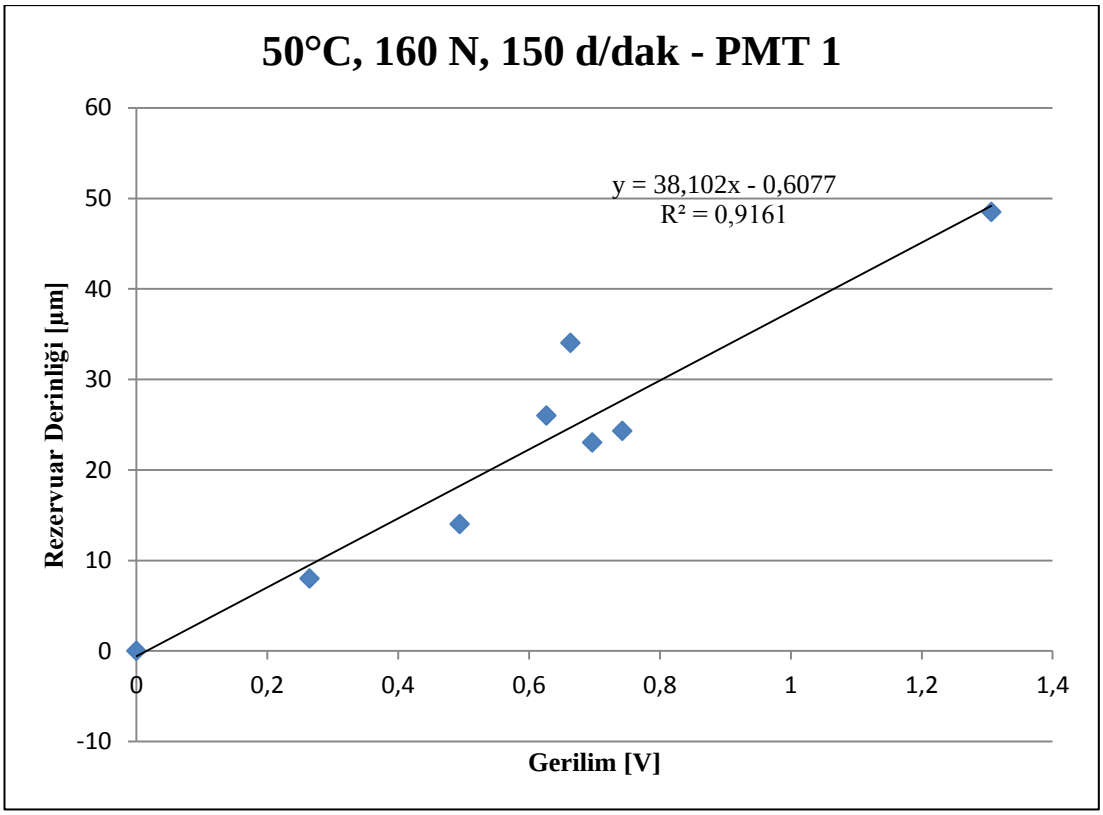
Fiber optik kablonun istendiği gibi segman yüzeyi ile düz olmayıp içeri kaçmasından dolayı oluşan hatayı gidermek adına verilerin normalize edilmiş hali Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 ‘de verilmiştir.



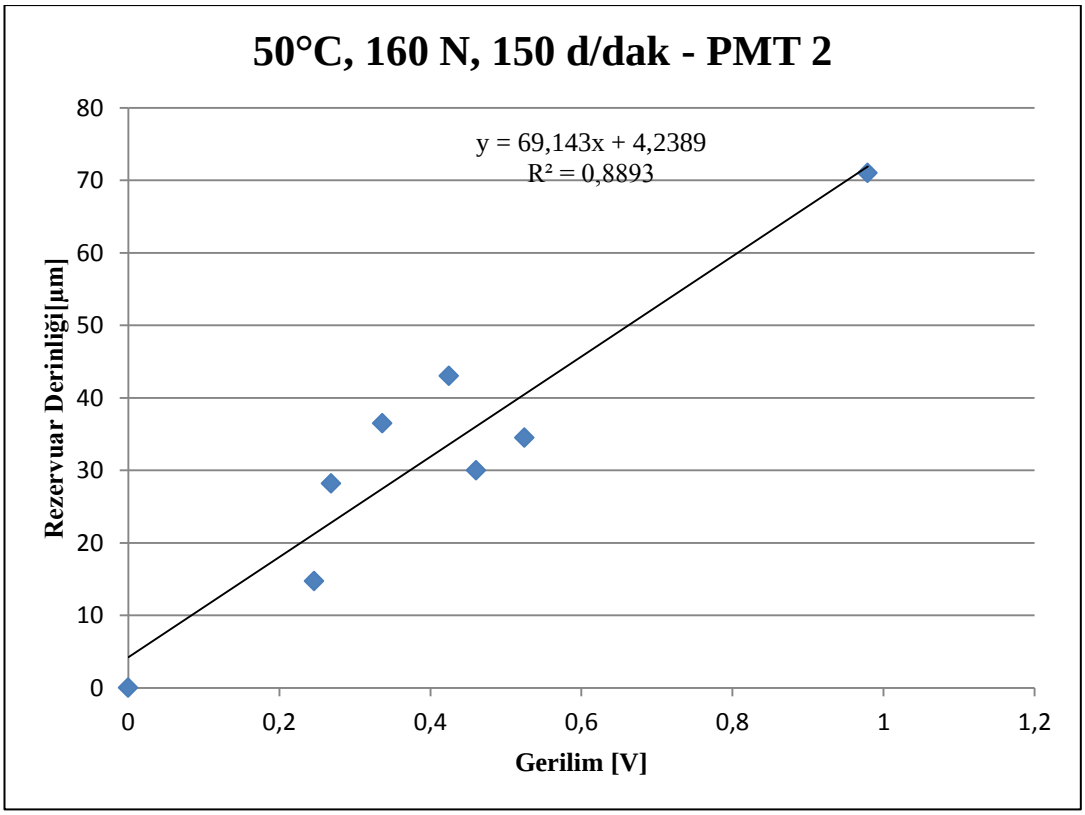
Şekil 4.16 : Normalize Edilmiş PMT 1 (30°C, 160 N, 150 d/dak).



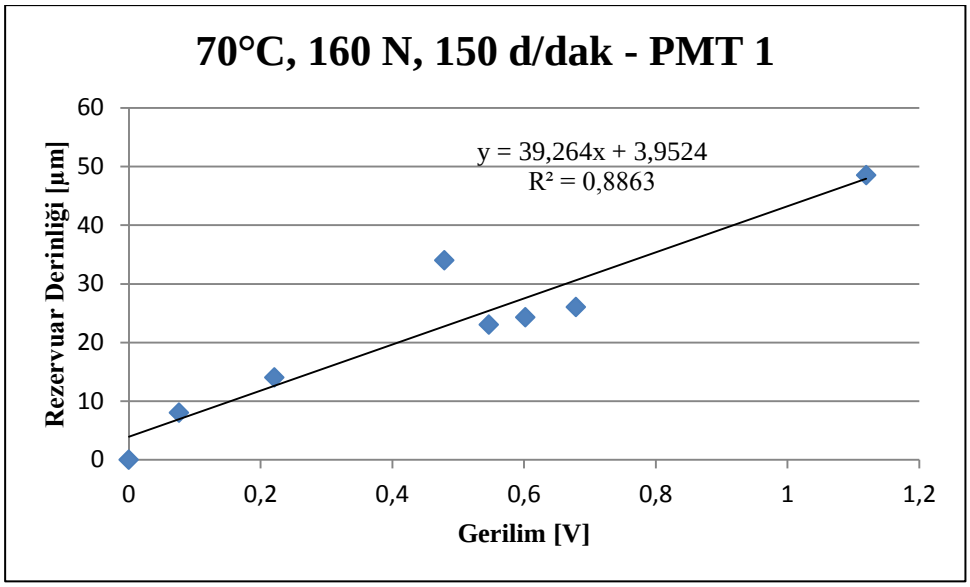
Şekil 4.17 : Normalize Edilmiş PMT 2 (30°C, 160 N, 150 d/dak).



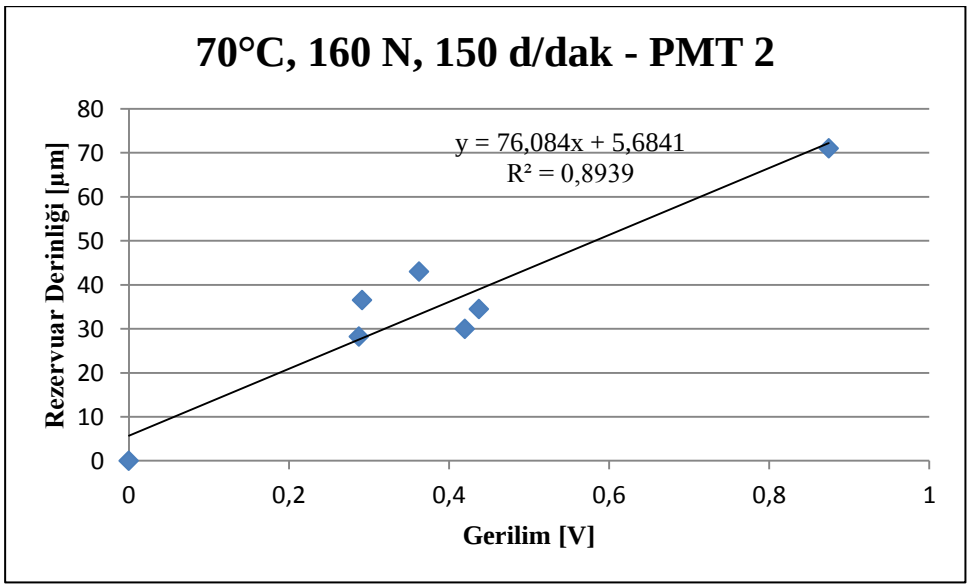
Şekil 4.18 : Normalize Edilmiş PMT 1 (50°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.19 : Normalize Edilmiş PMT 2 (50°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.20 : Normalize Edilmiş PMT 1 (70°C, 160 N, 150 d/dak).



Şekil 4.21 : Normalize Edilmiş PMT 2 (70°C, 160 N, 150 d/dak).

Bu grafiklere göre 30,50 ve 70°C için hesaplanan kalibrasyon katsayıları Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

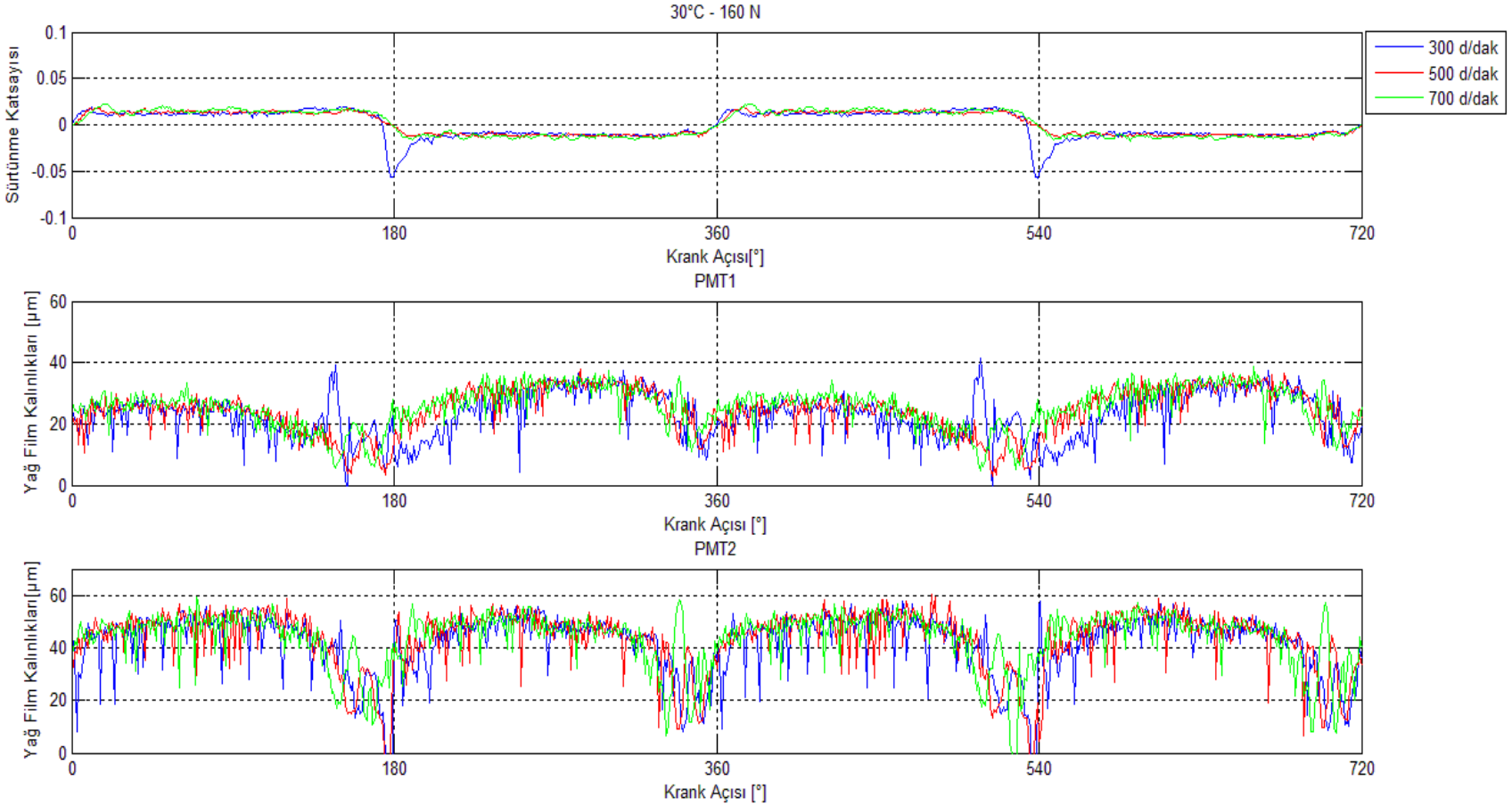
Çizelge 4.7 : Kalibrasyon Katsayıları.

	PMT 1 [µm/V]	PMT 2 [µm/V]
30°C	35,911	62,407
50°C	38,102	69,143
70°C	39,264	76,084

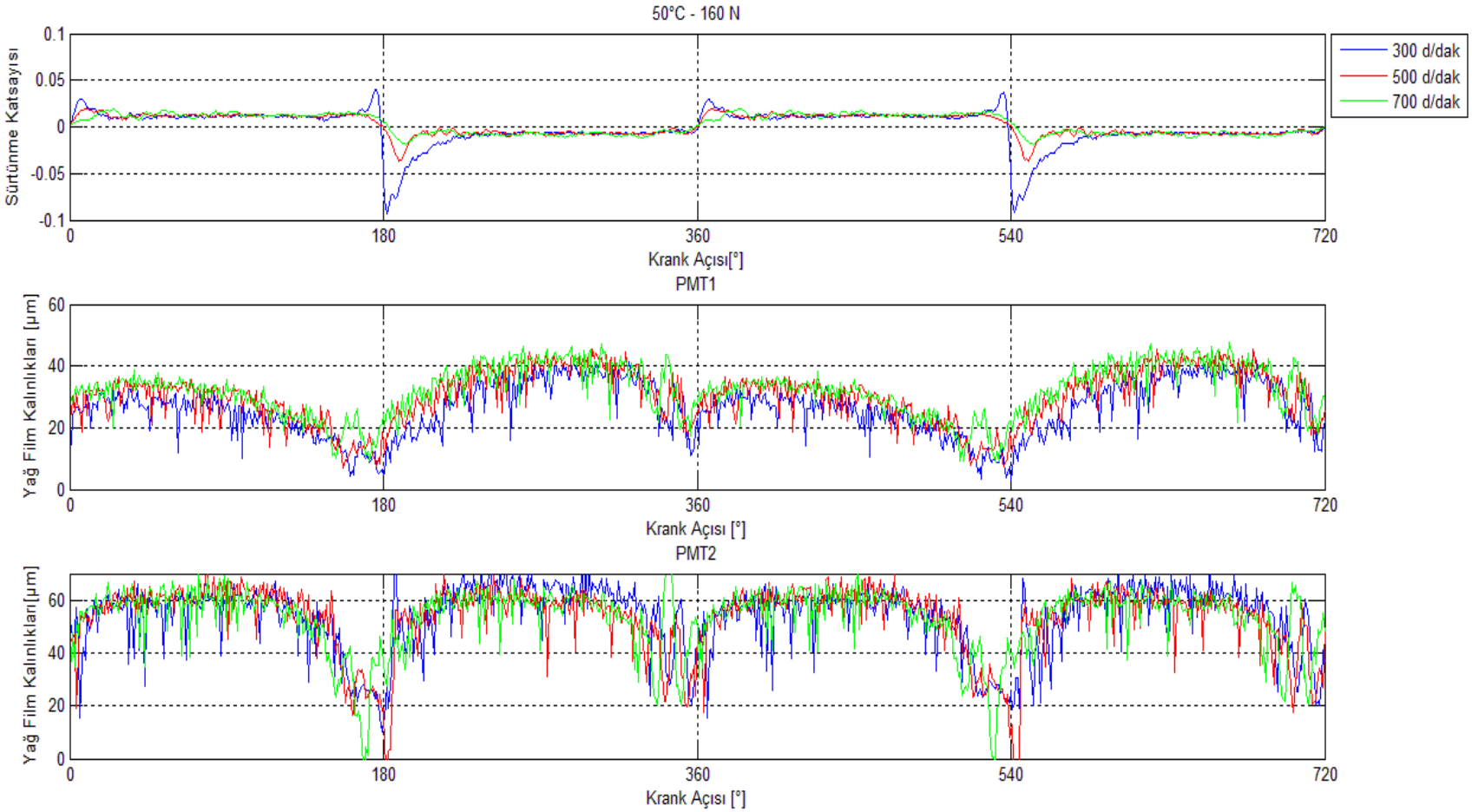
5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde elde edilen kalibrasyon katsayılarına göre lazer honlu gömlek için yağ film kalınlığı sonuçları incelenecektir. Kalibrasyon katsayılarının üç farklı sıcaklık değerine göre bulunmasından sonra PMT'de ölçülen gerilim değeri, kalibrasyon katsayıları kullanılarak μm cinsinden yağ film kalınlığına çevrilmiştir. Lazerle honlanmış gömlek için, 15W40 katkısız mineral motor yağı ve Coumarin 540A kullanılarak 30, 50, 70°C yağ sıcaklığı, 160, 200, 240 N normal yük ve 300, 500, 700 dev/dak motor hızı için sürtünme katsayısı ve yağ film kalınlığı ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak grafik haline getirilmiştir. Buradaki hız, yük ve sıcaklık parametrelerinin karşılaştırılması sonucunda, sürtünme katsayısının değişimi düşük hızda yağlamanın karma rejime doğru kaydığını göstermektedir.

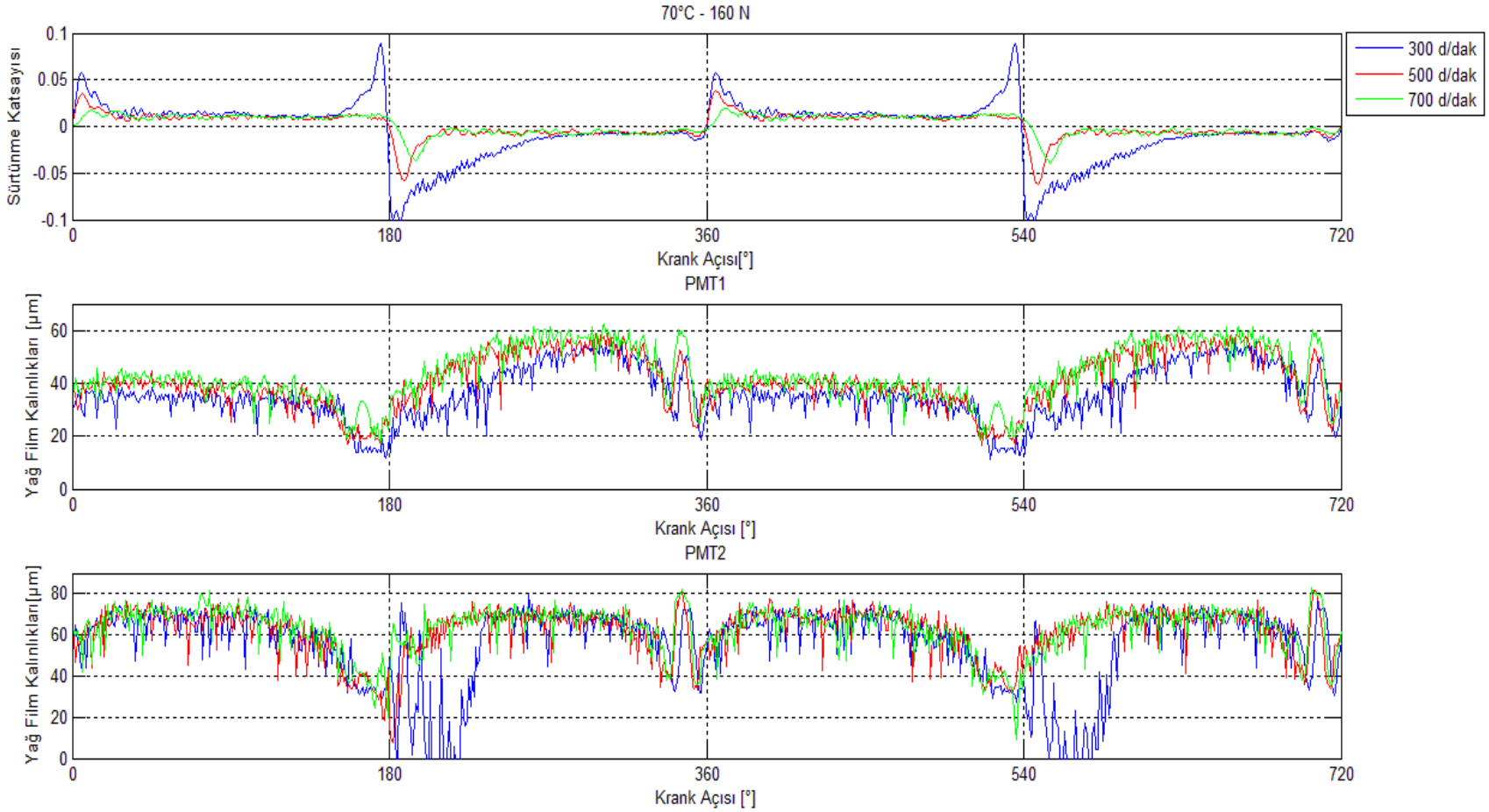
Grafikler incelendiğinde, yük ve hızın etkisinin yağ film kalınlığı üzerinde Stribeck eğrisine uygun şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Özellikle yükün arttığı ve hızın azaldığı durumlarda yağ film kalınlığının hidrodinamik yağlamadan karma yağlama rejimine kaymaya başladığı görülmektedir. Stribeck eğrisine paralel olarak hız arttıkça yağ film kalınlığının arttığı, hız azaldıkça yağ filminin azaldığı gözlemlenmiştir. Yükün artması yağ film kalınlığında azalmaya sebebiyet verse de, test edilen yük değerlerinde yağ film kalınlığına ciddi bir etkisi olmadığı görülmüştür. Sıcaklığın ise Stribeck eğrisine ters düşecek şekilde bir etki yaptığı belirlenmiştir. Üst ölü noktada squeze film (sıkıştırma) etkisinden dolayı bu noktada yağ film kalınlıkları sıfıra inmemiştir. Ayrıca krank milinin hareket prensibi gereği üst ölü noktayı daha hızlı ve alt ölü noktayı daha yavaş geçmesinden dolayı, üst ölü noktada yağ film kalınlıkları alt ölü noktaya göre daha yüksek ölçülmüştür.



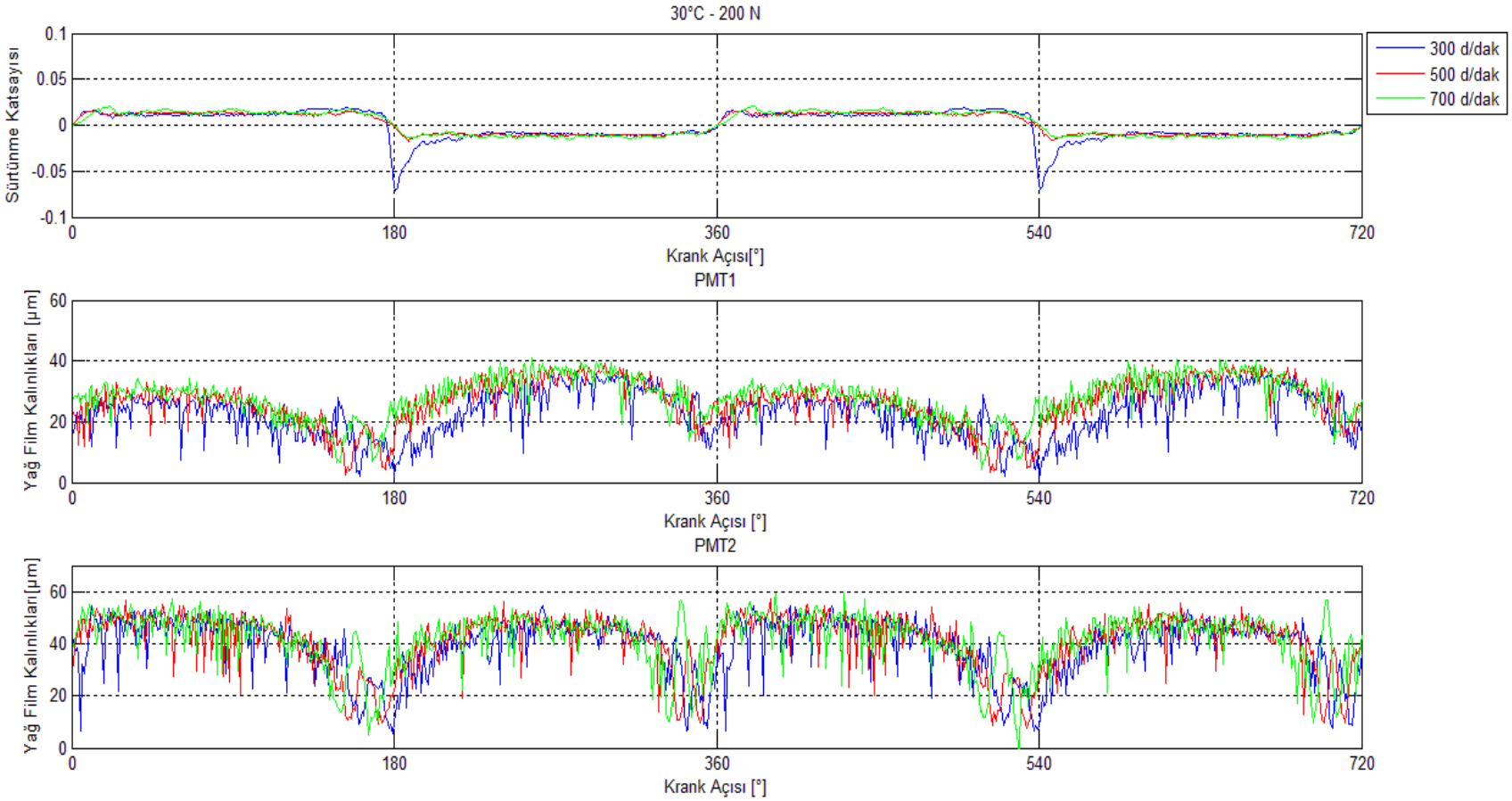
Şekil 5.1 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 160 N).



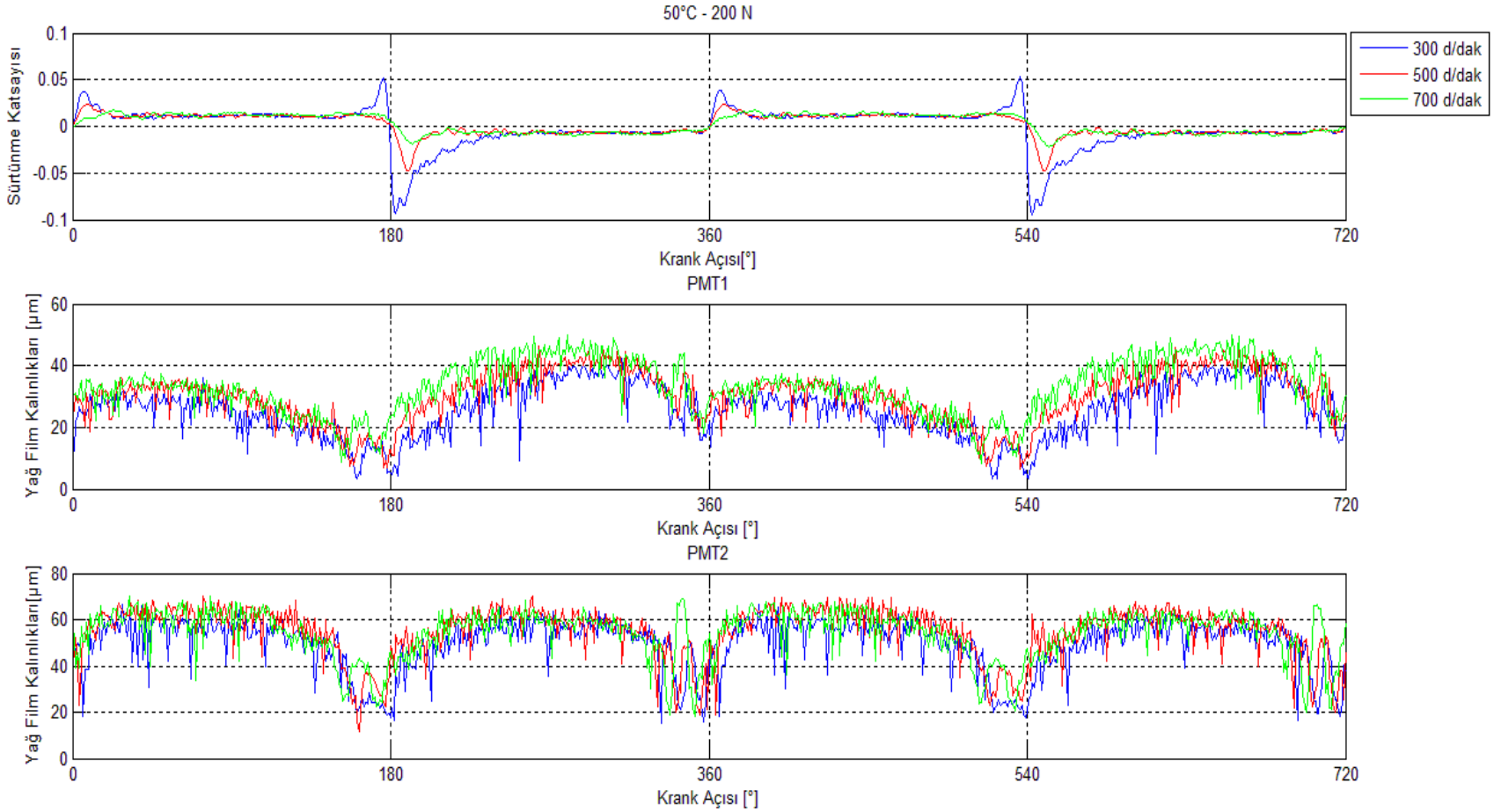
Şekil 5.2 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 160 N).



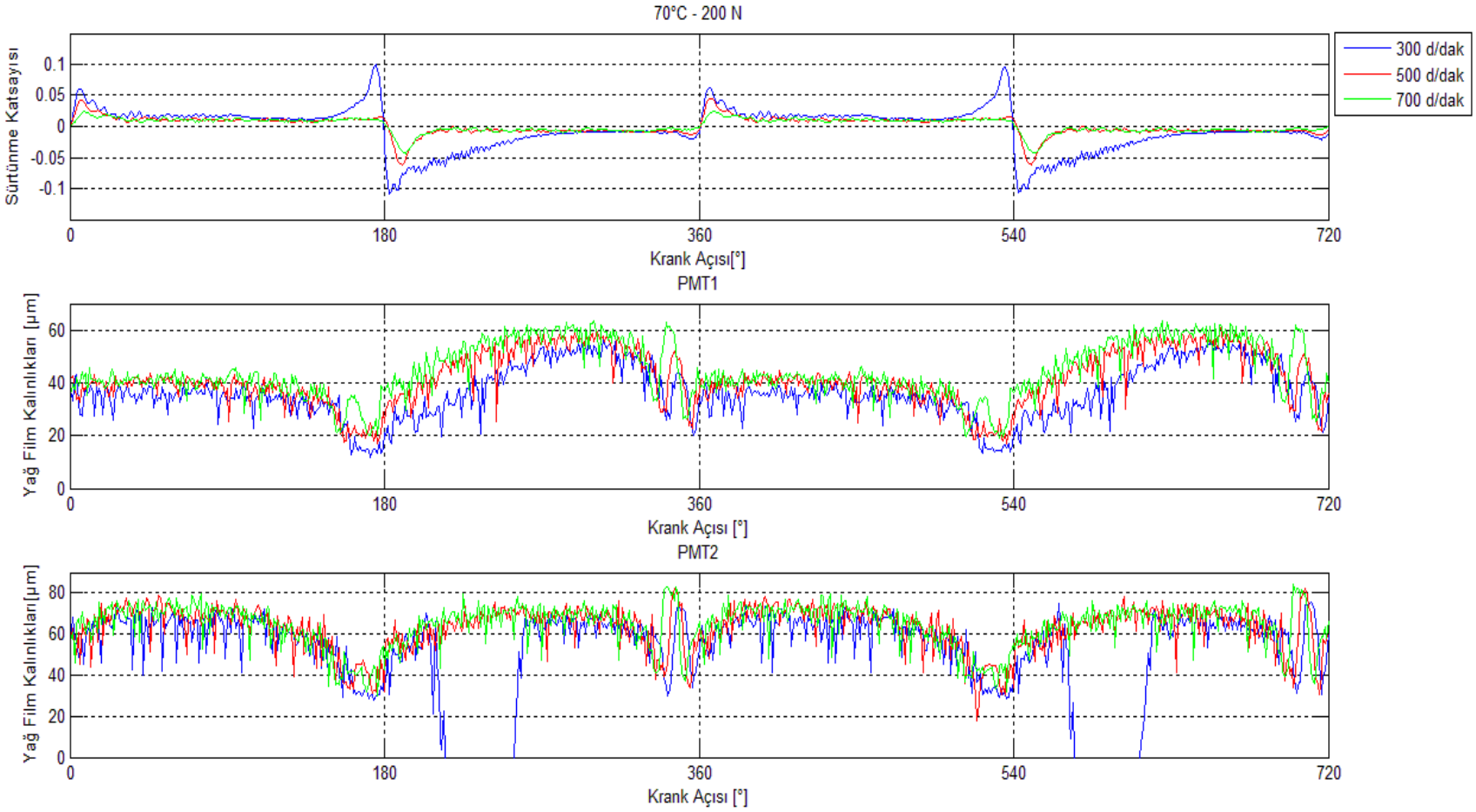
Şekil 5.3 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 160 N).



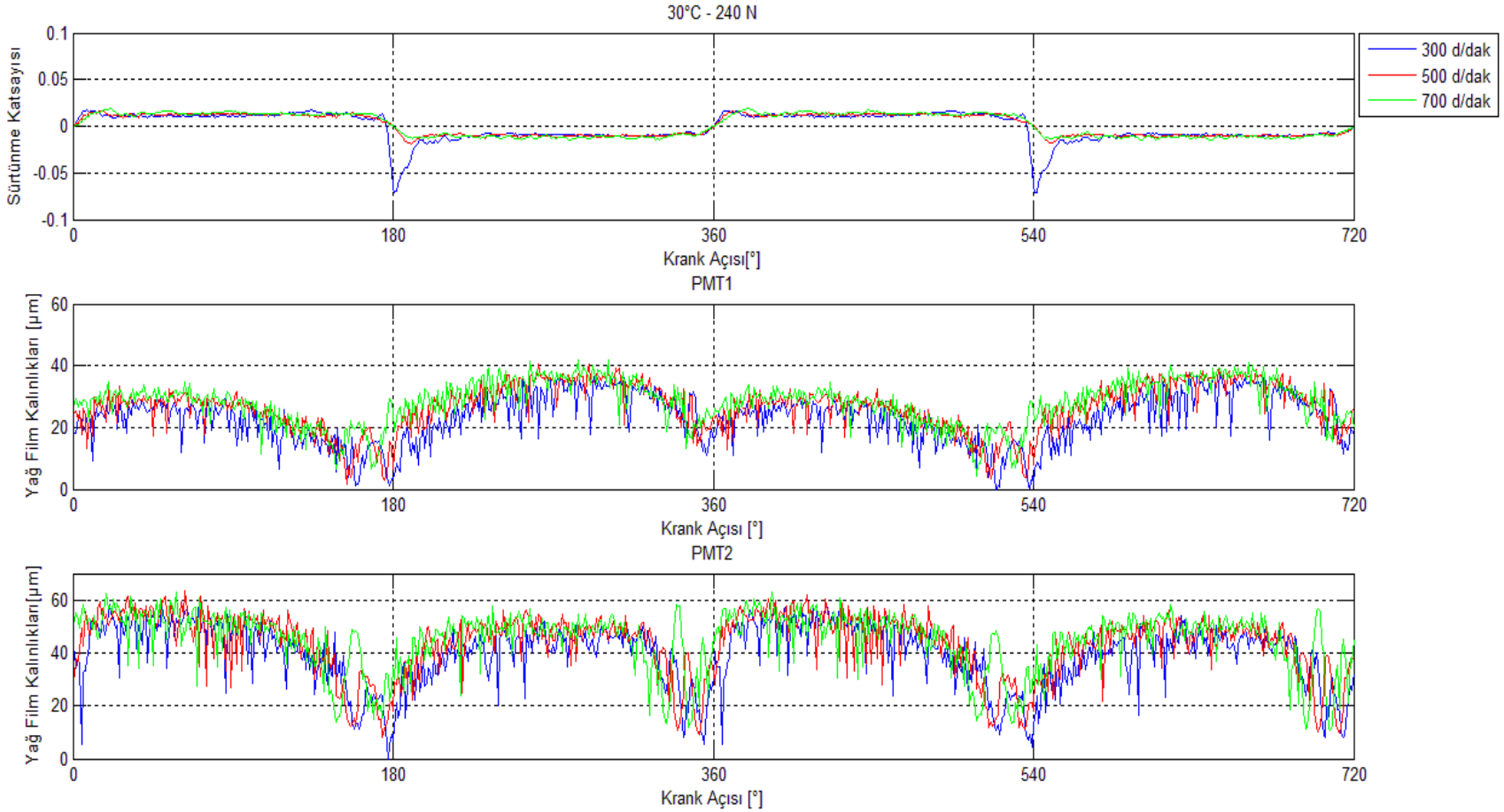
Şekil 5.4 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 200 N).



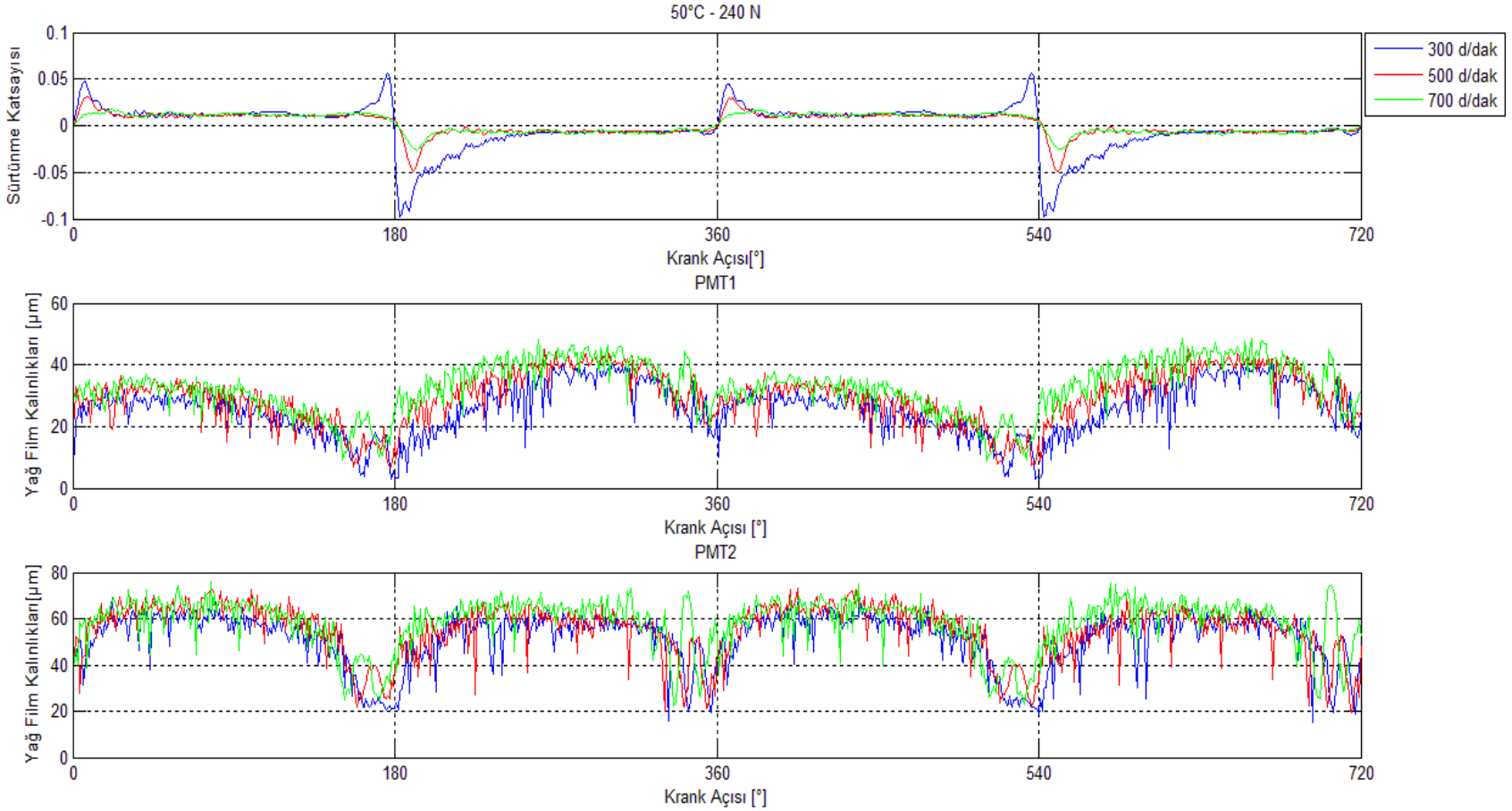
Şekil 5.5 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 200 N).



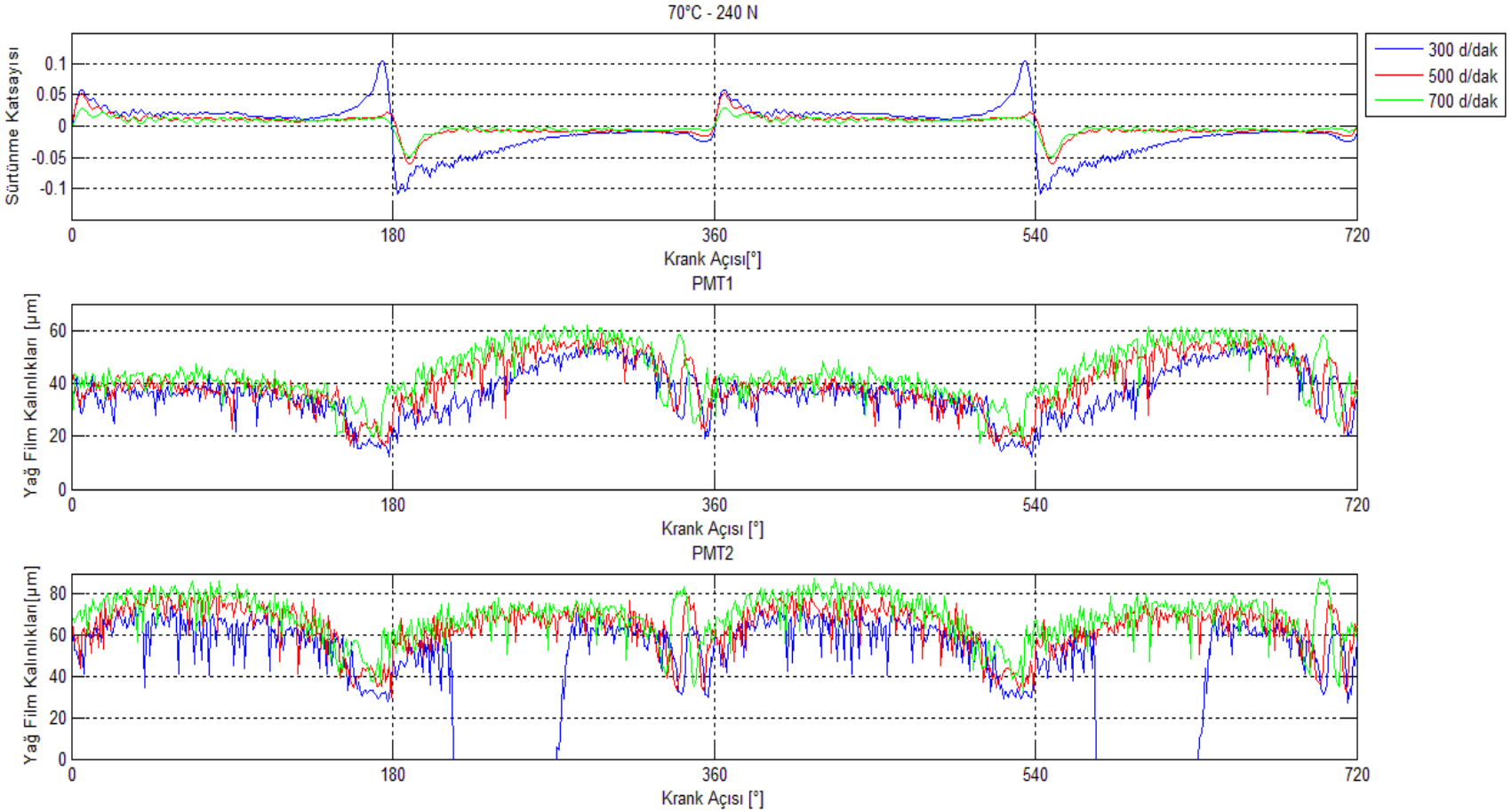
Şekil 5.6 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 200 N).



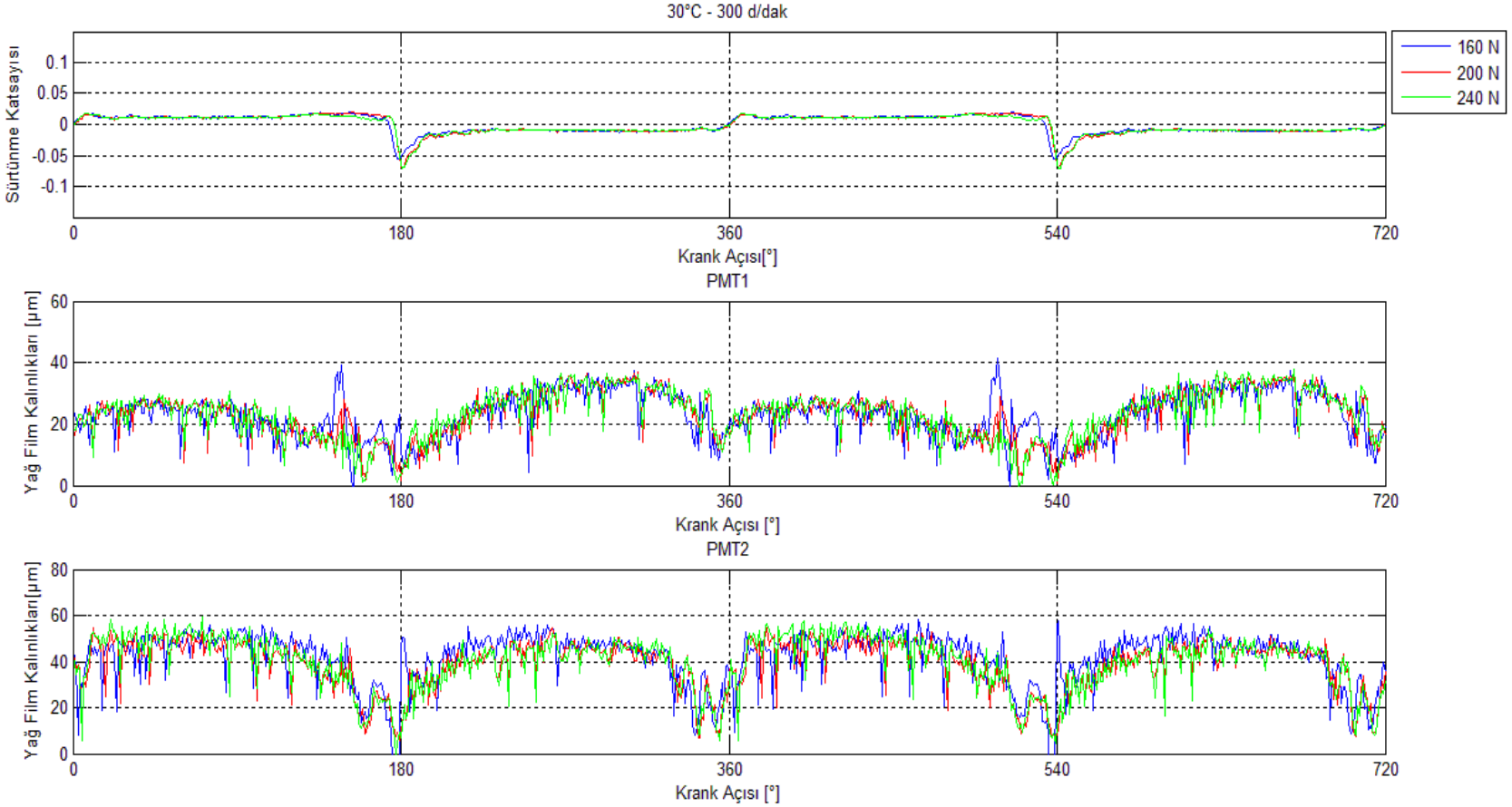
Şekil 5.7 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 240 N).



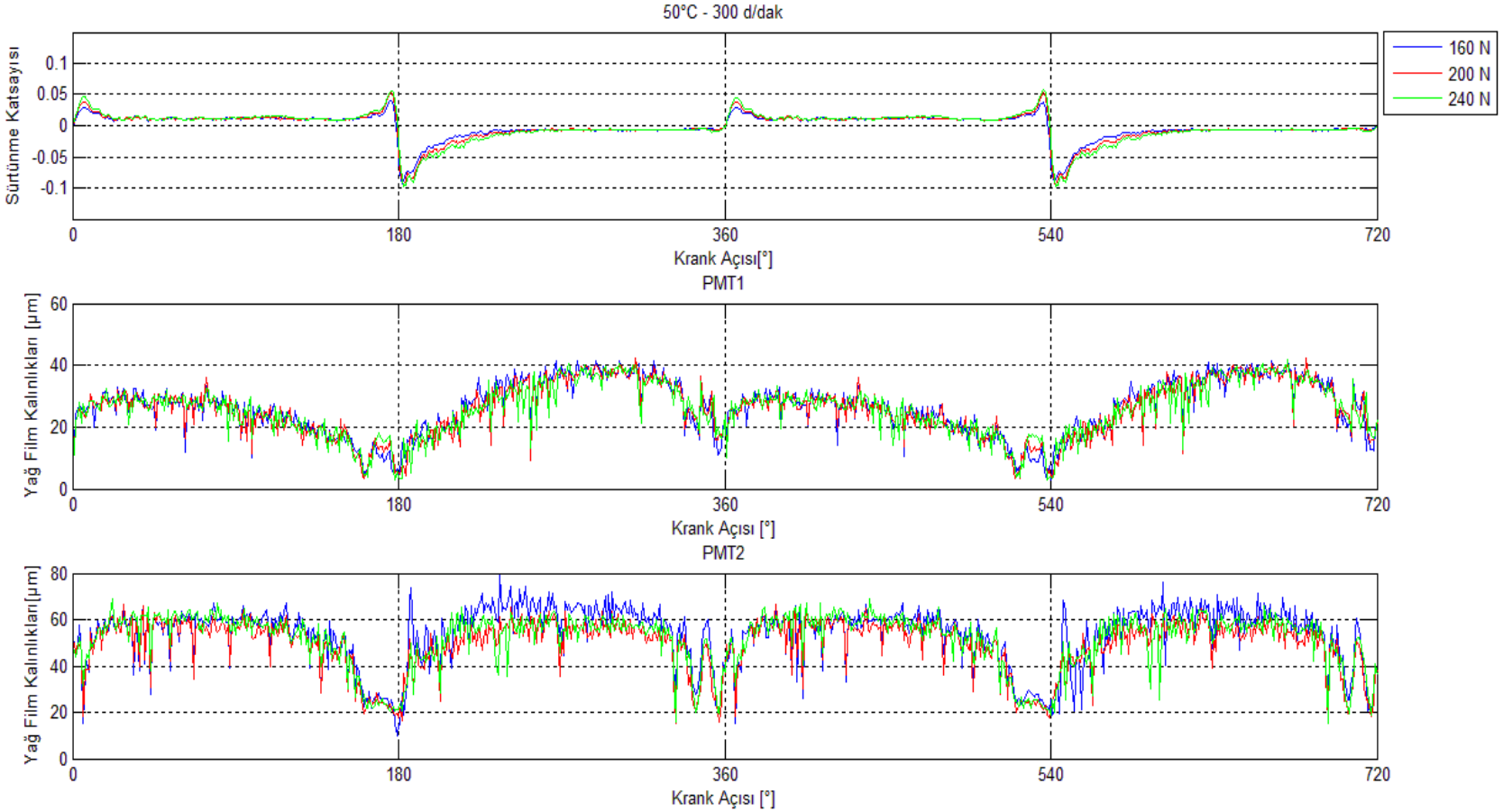
Şekil 5.8 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 240 N).



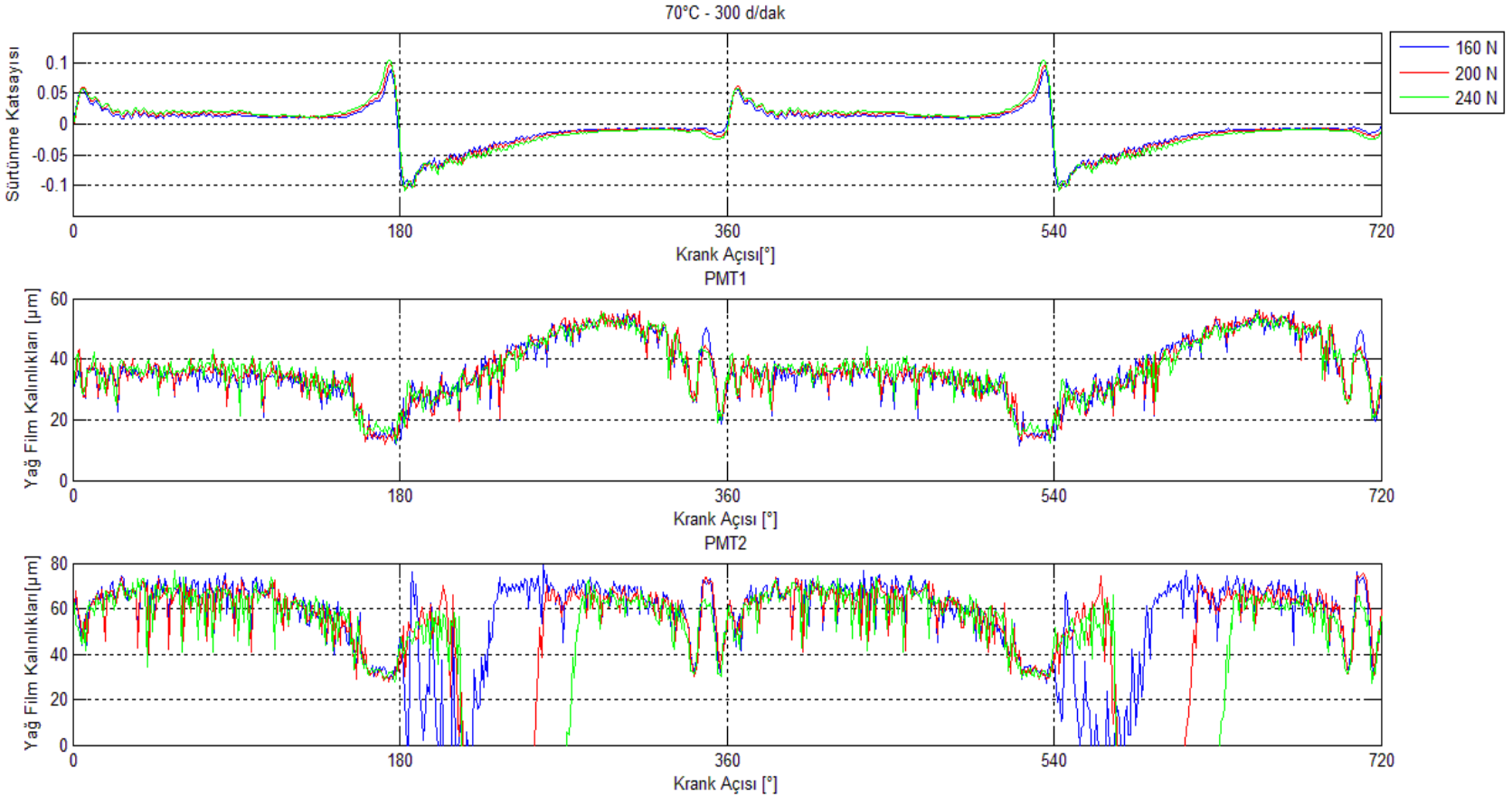
Şekil 5.9 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 240 N).



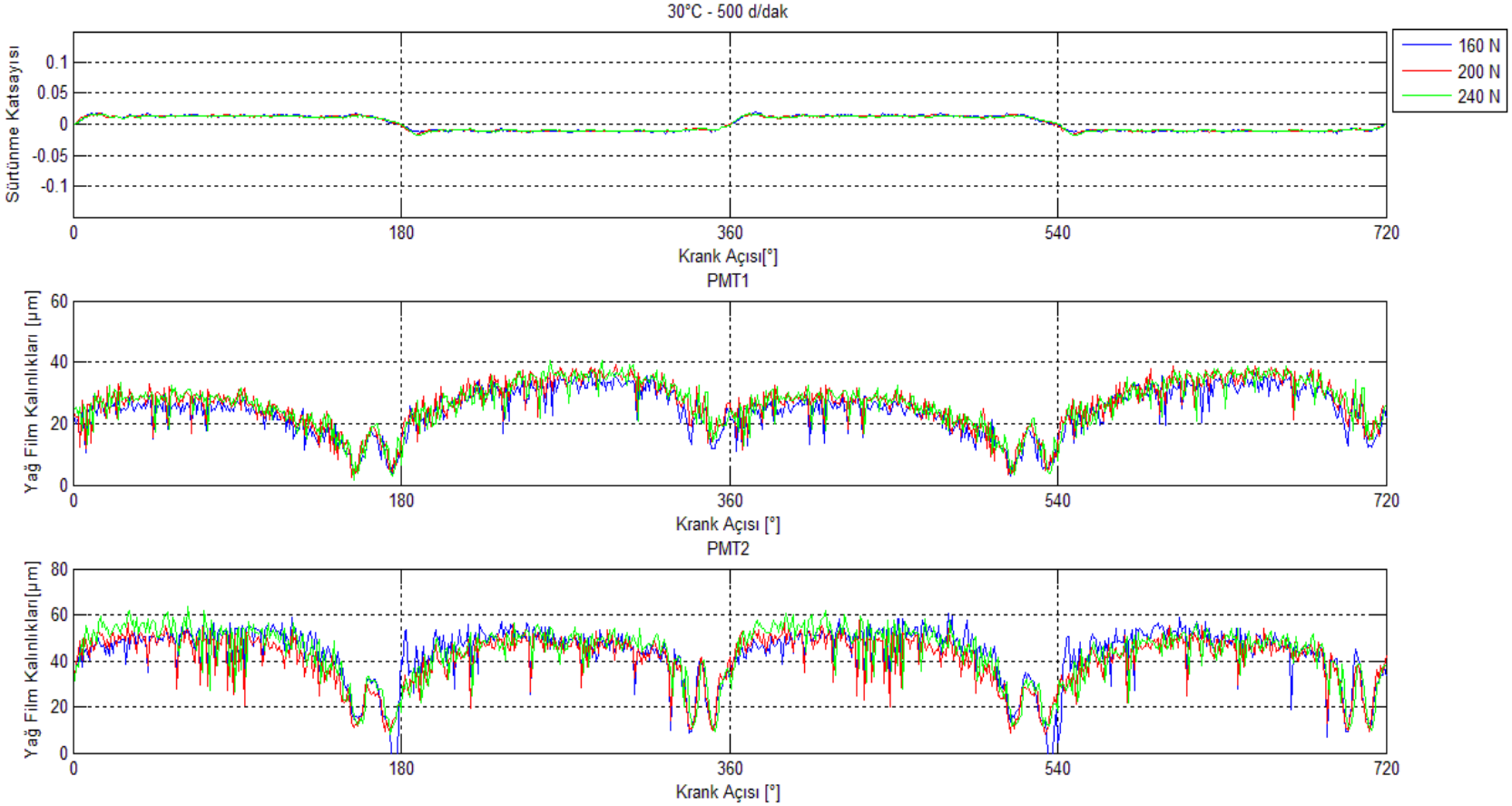
Şekil 5.10 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 300 d/dak).



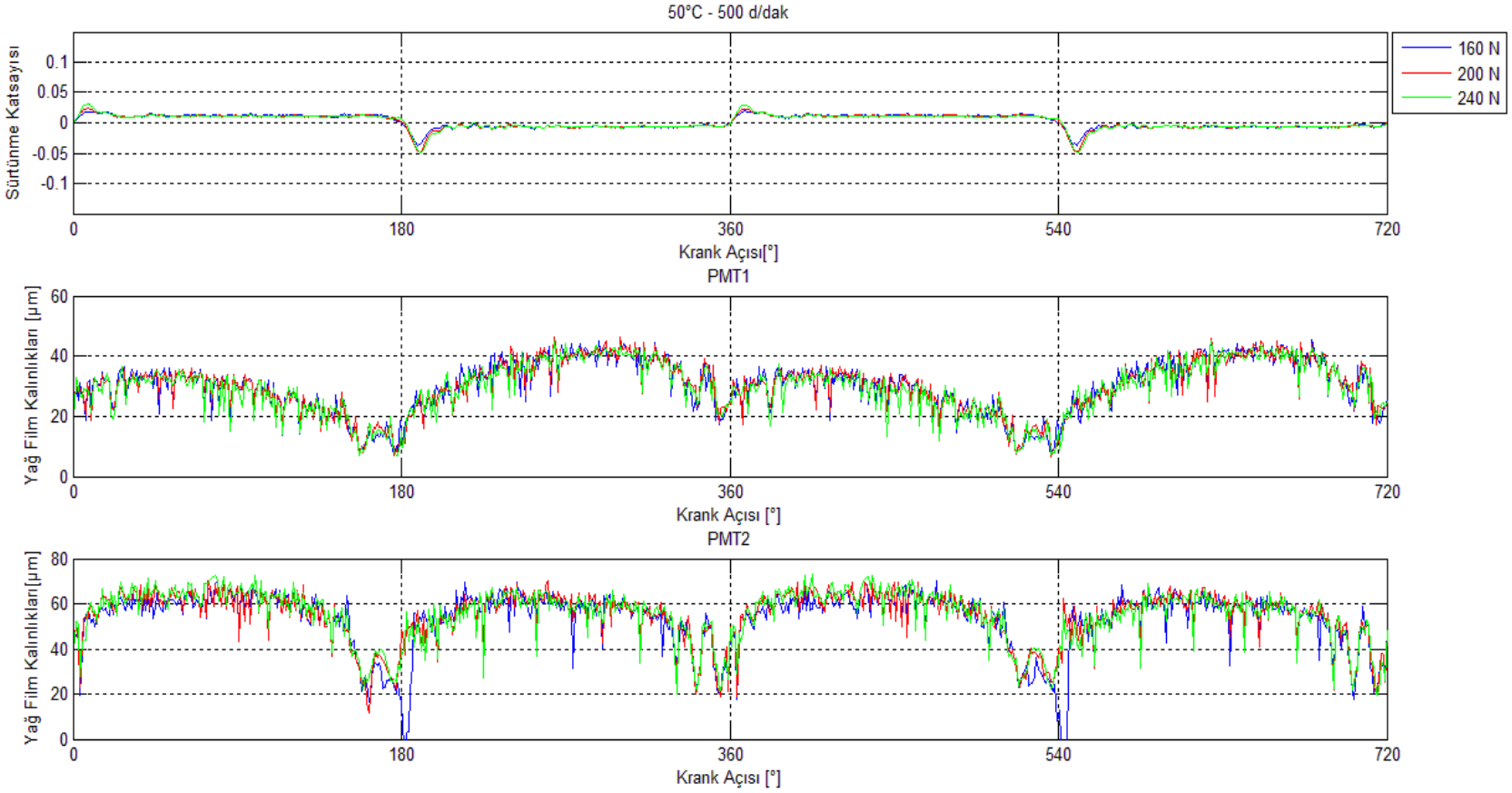
Şekil 5.11 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 300 d/dak).



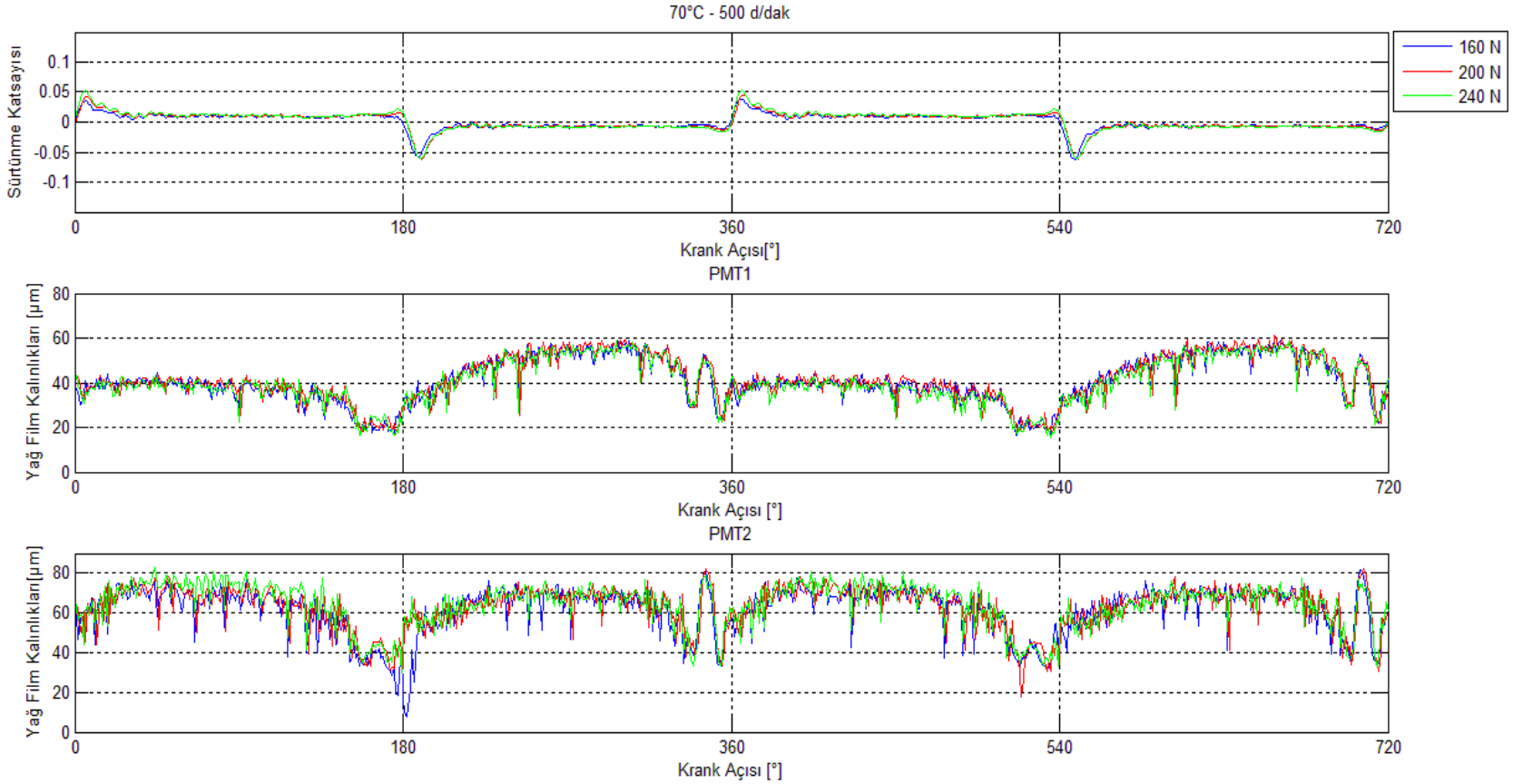
Şekil 5.12 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 300 d/dak).



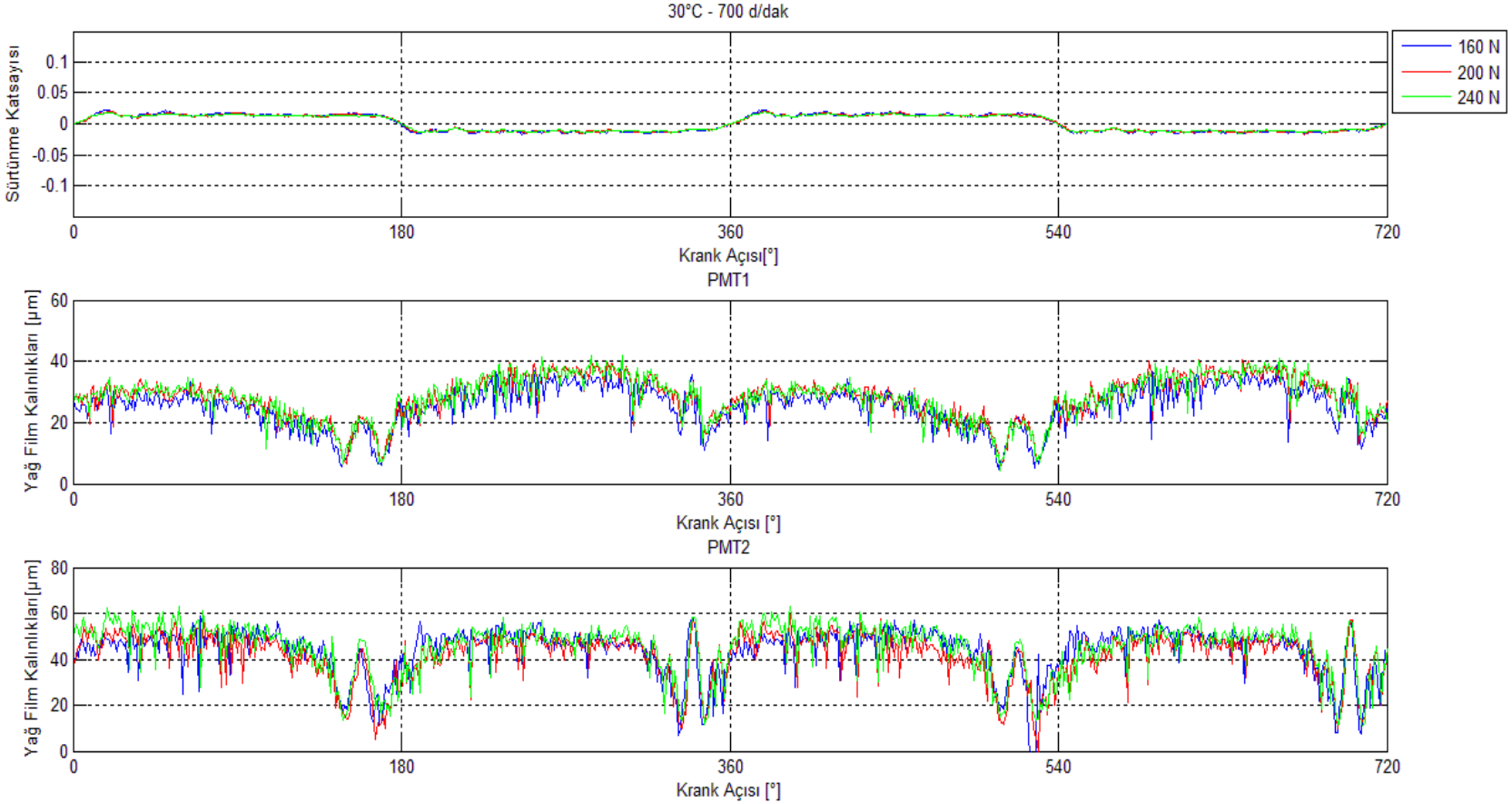
Şekil 5.13 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 500 d/dak).



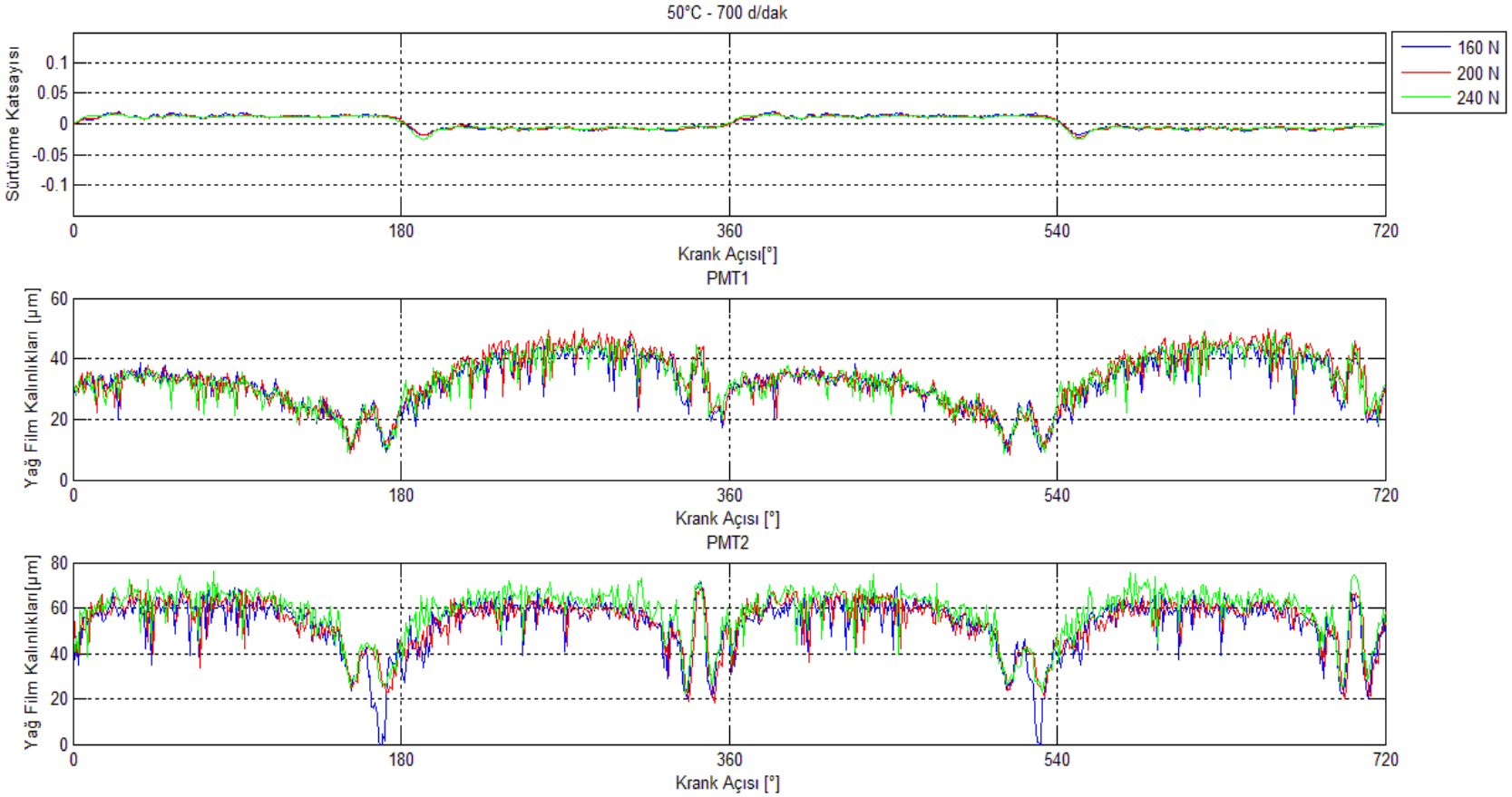
Şekil 5.14 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 500 d/dak).



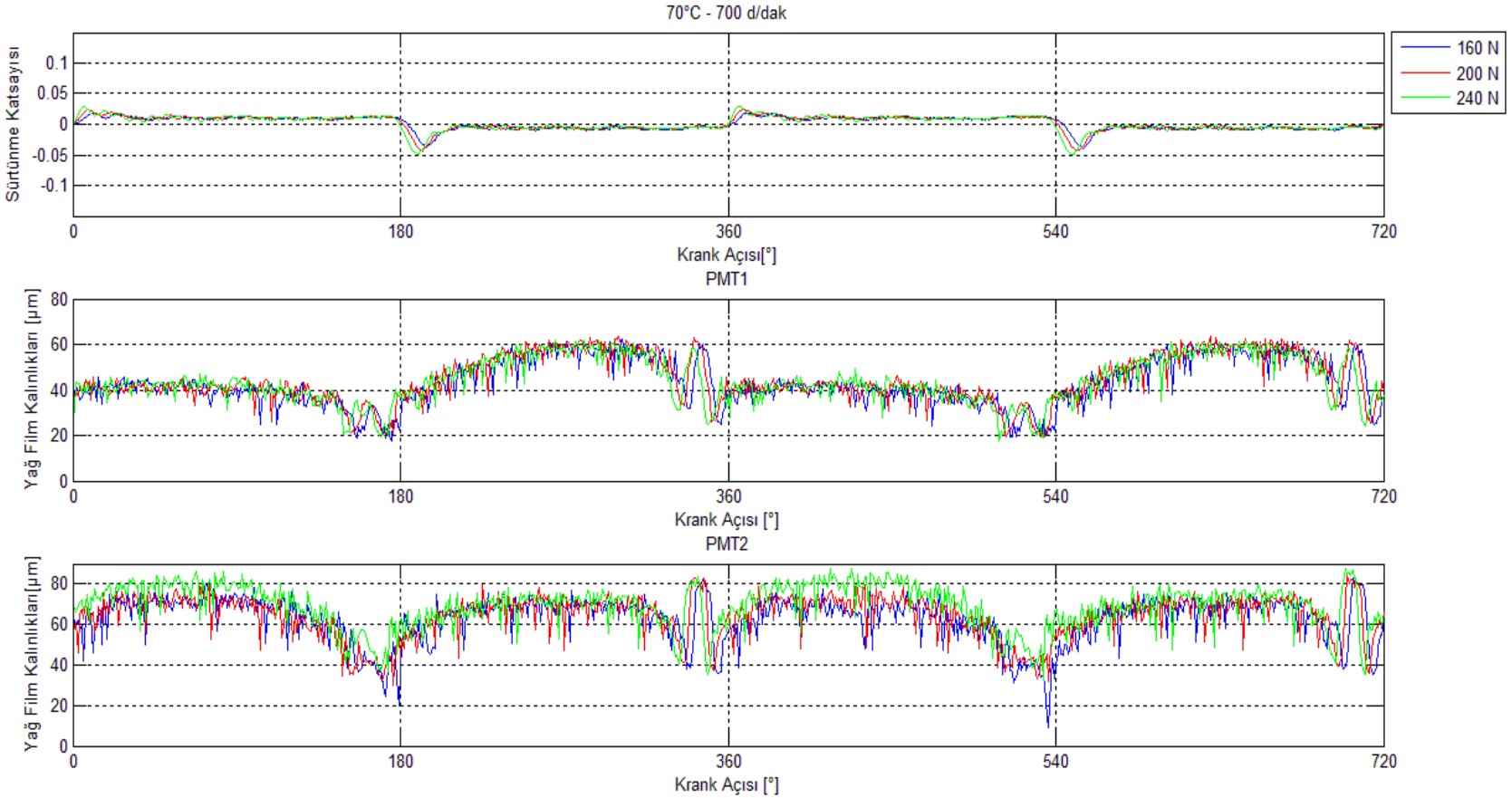
Şekil 5.15 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 500 d/dak).



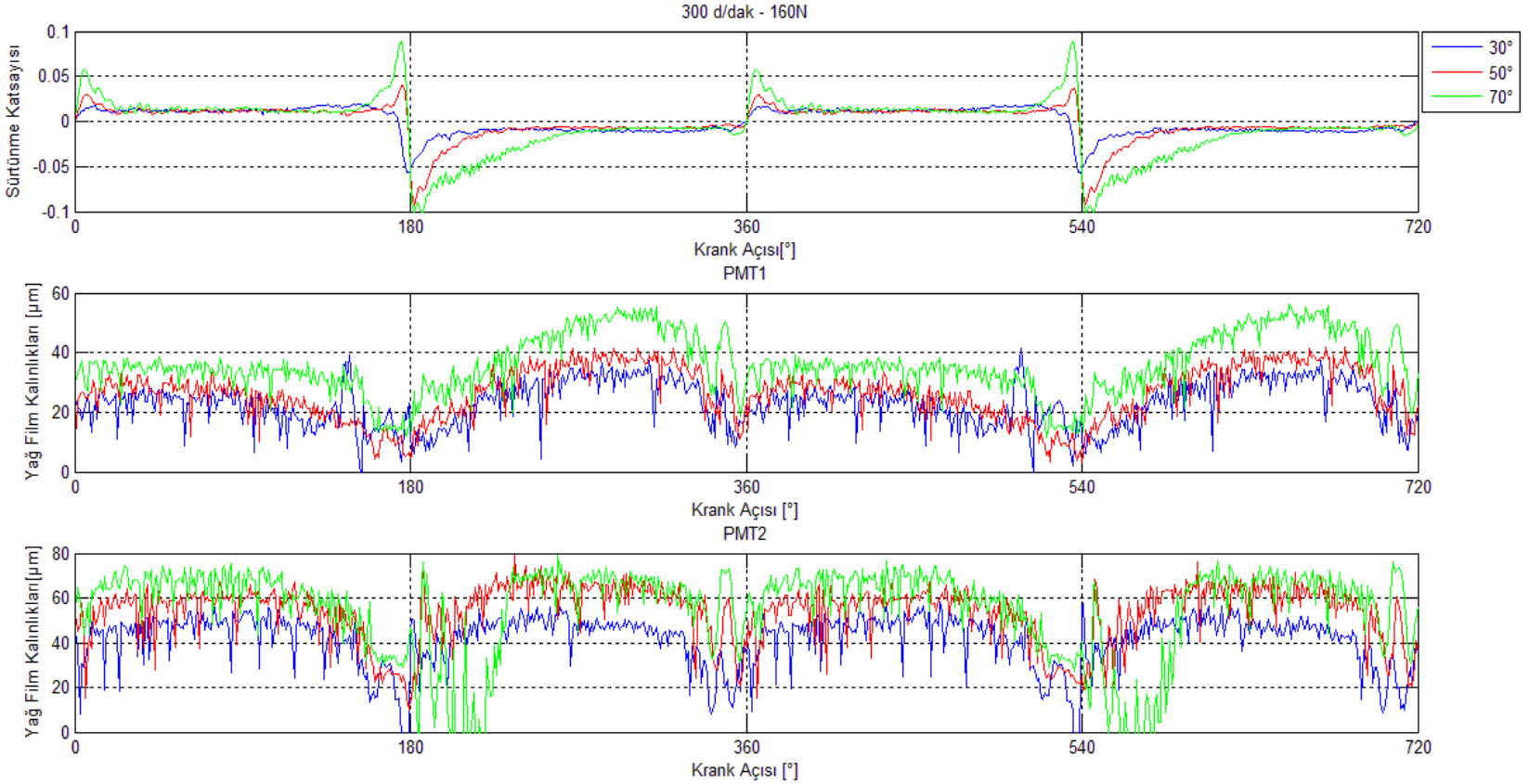
Şekil 5.16 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 30°C, 700 d/dak).



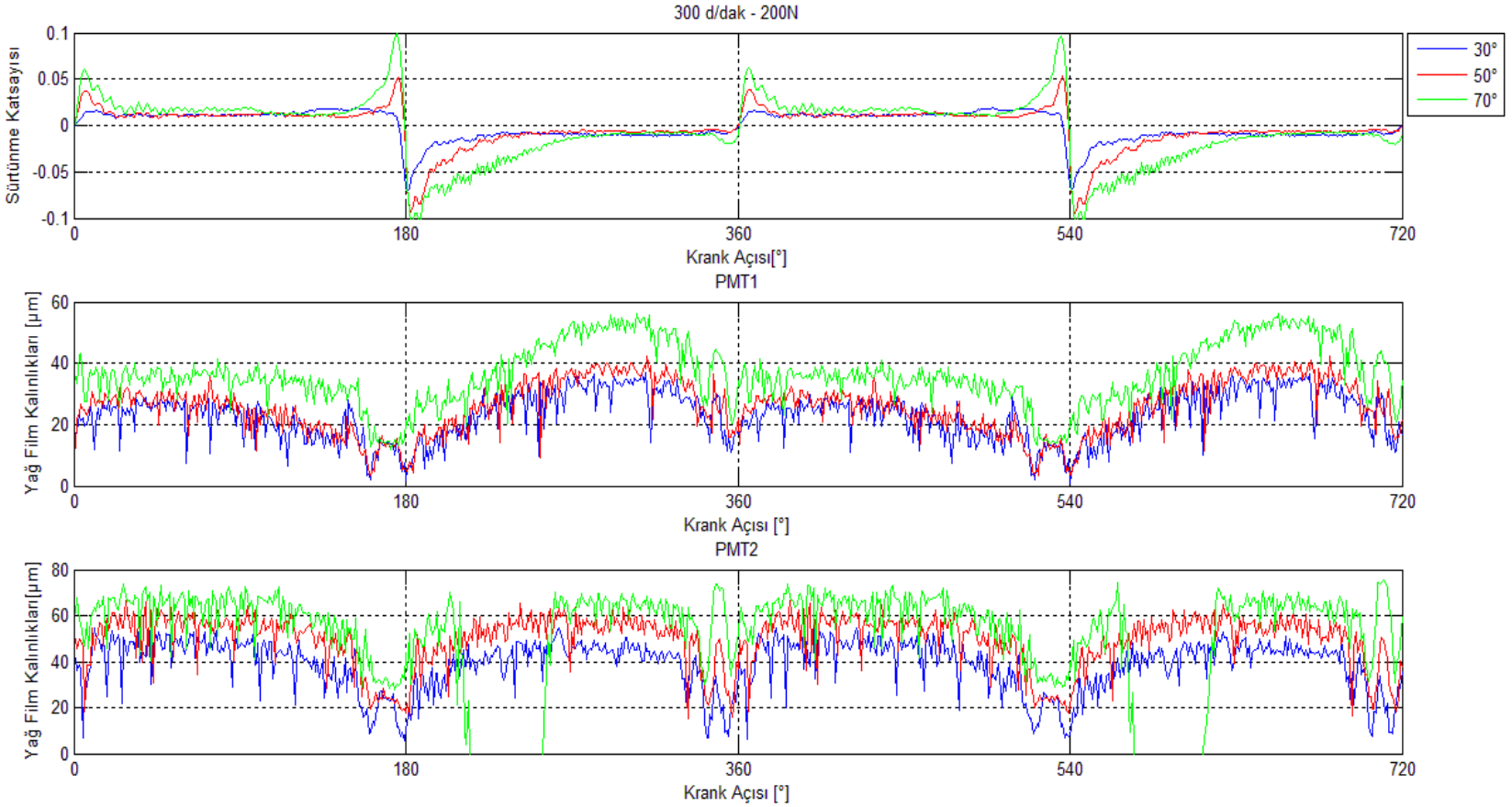
Şekil 5.17 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 50°C, 700 d/dak).



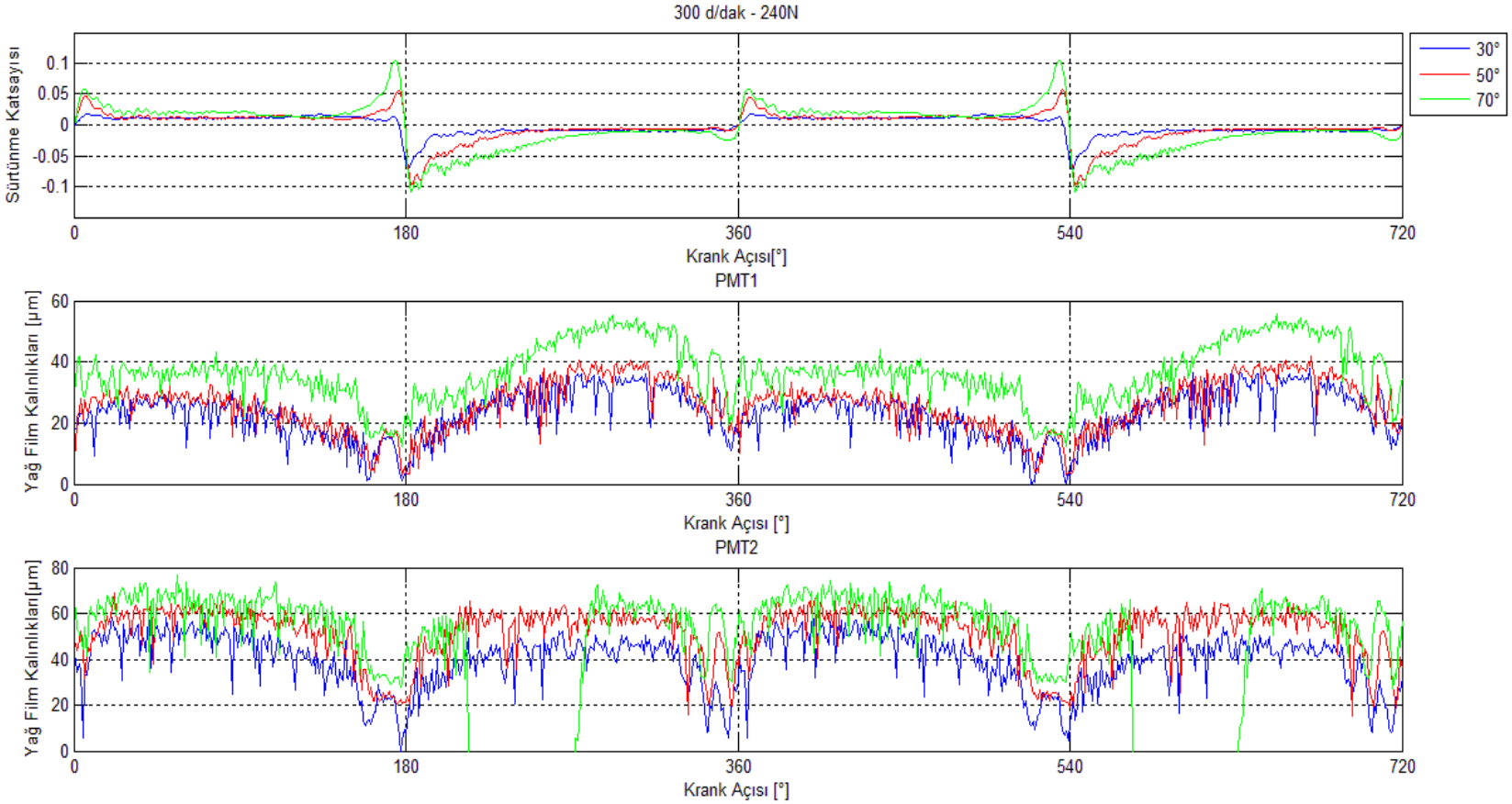
Şekil 5.18 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 70°C, 700 d/dak).



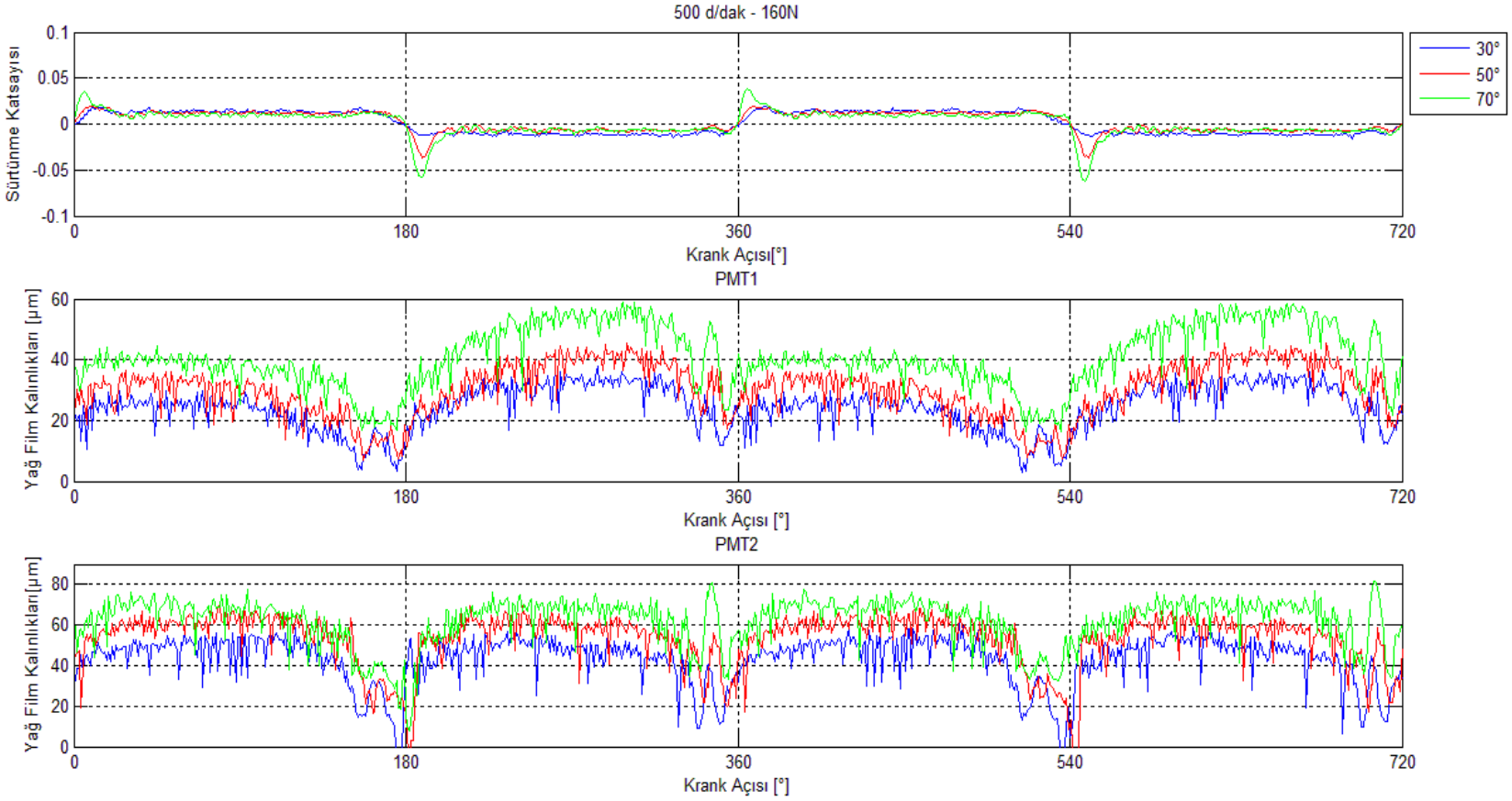
Şekil 5.19 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 300 d/dak).



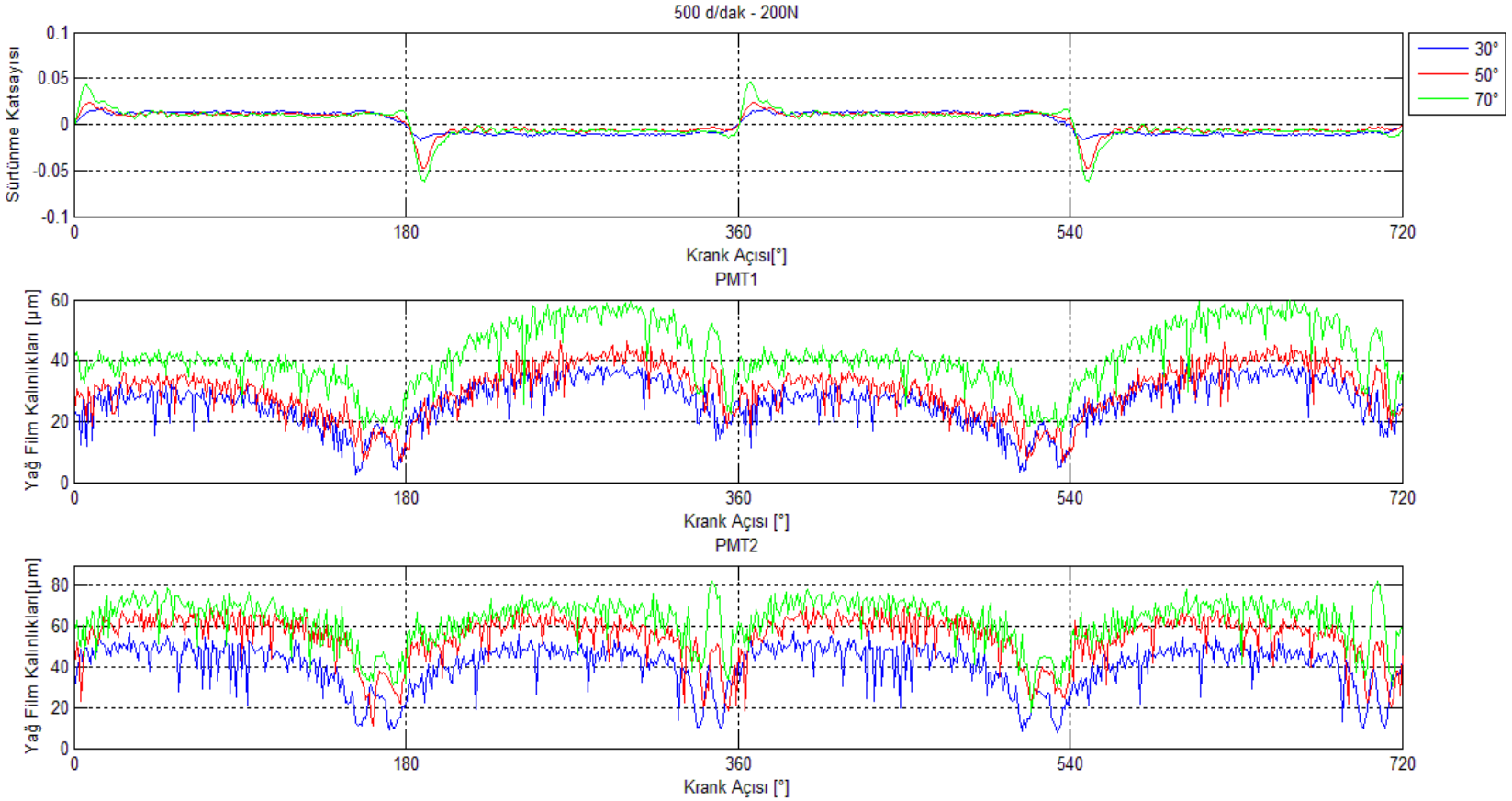
Şekil 5.20 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 300 d/dak).



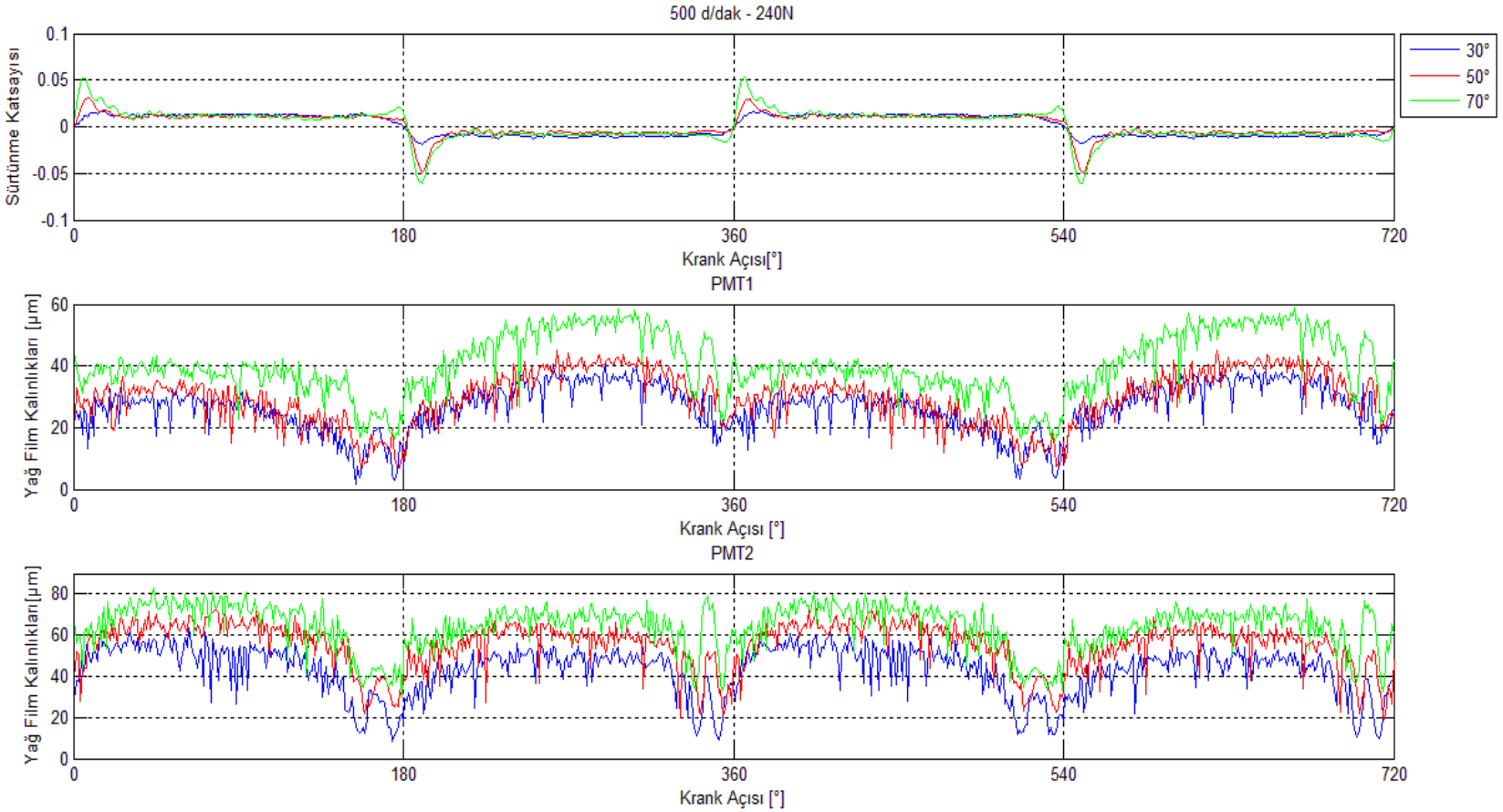
Şekil 5.21 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N , 300 d/dak).



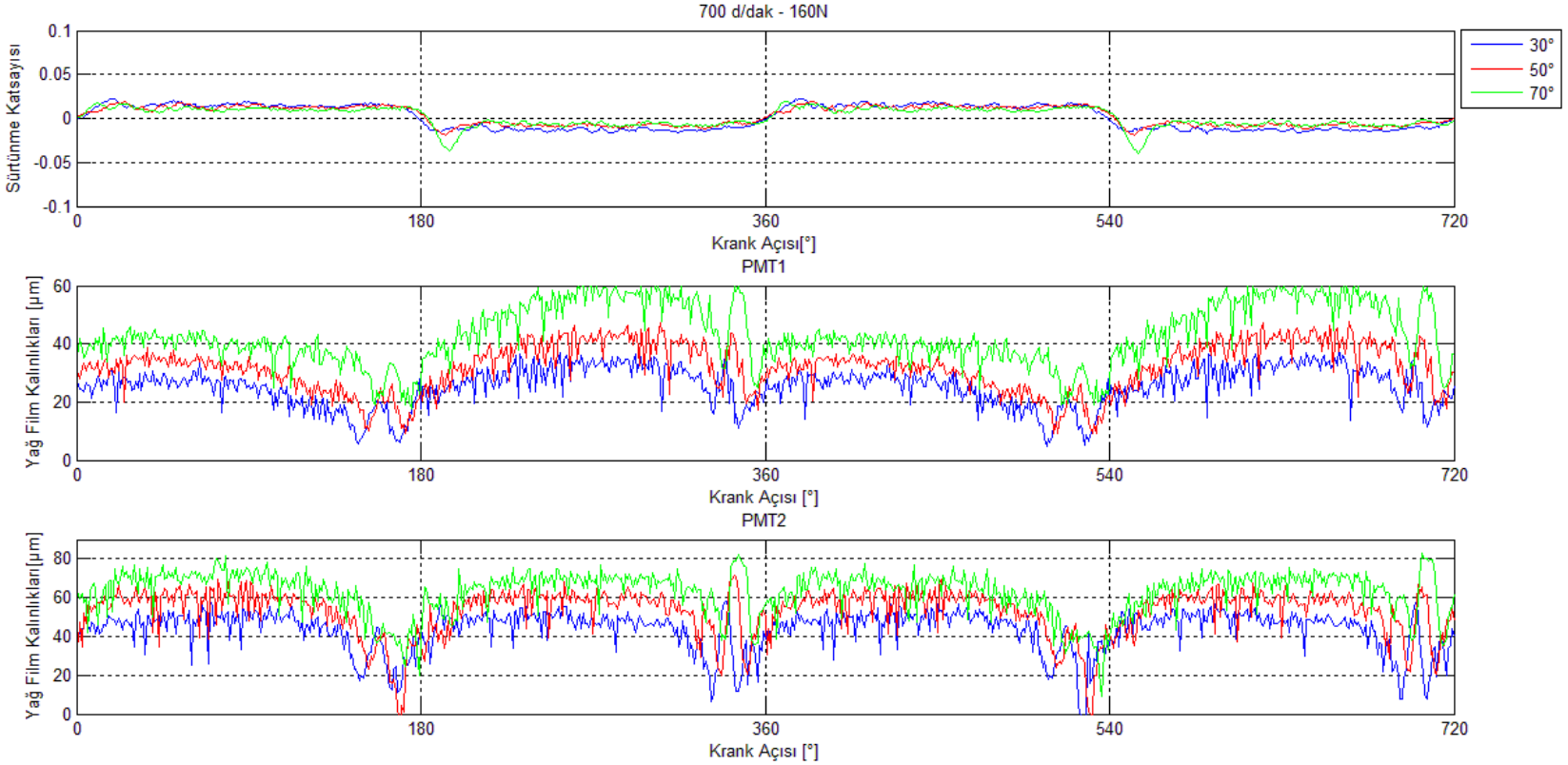
Şekil 5.22 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 500 d/dak).



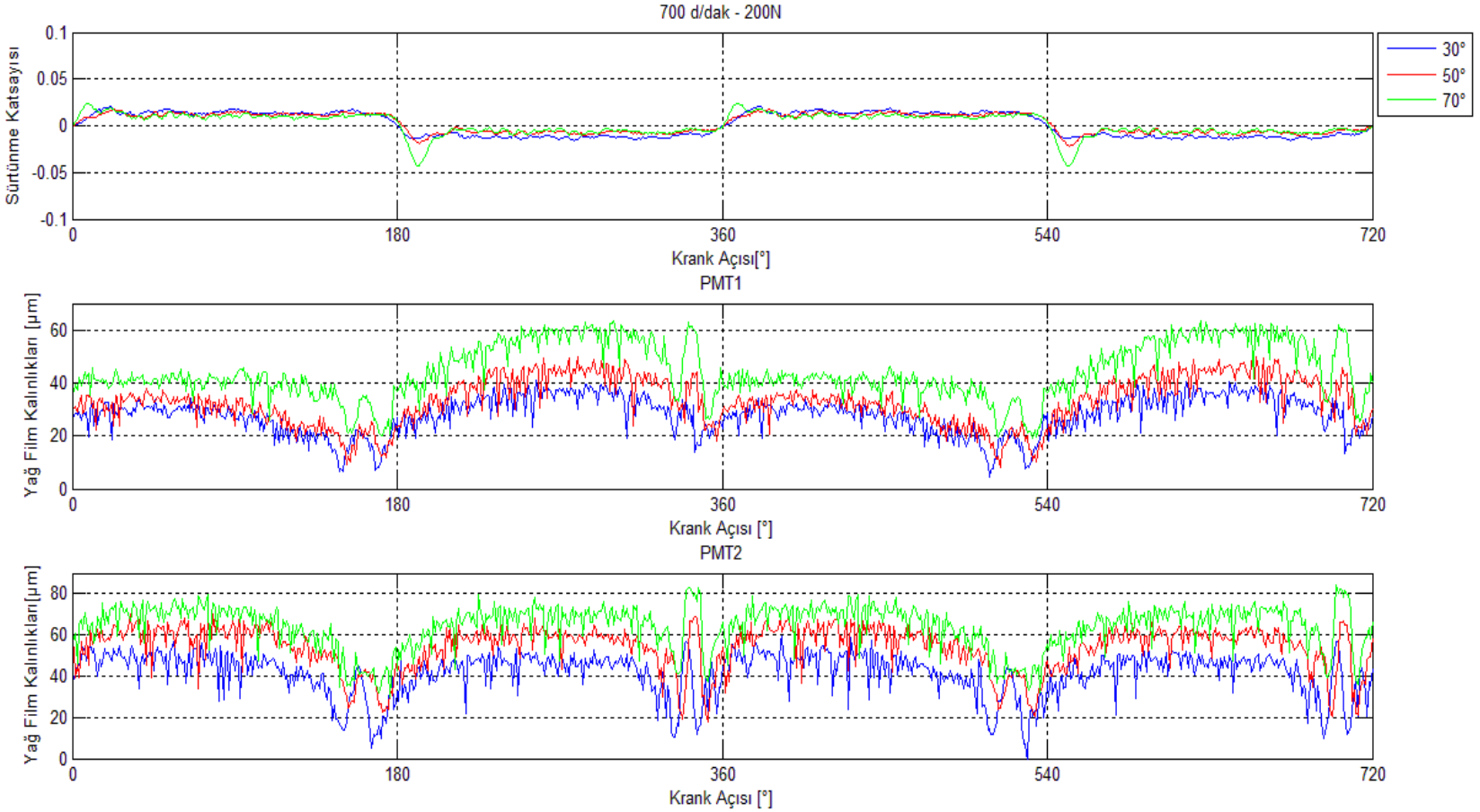
Şekil 5.23 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 500 d/dak).



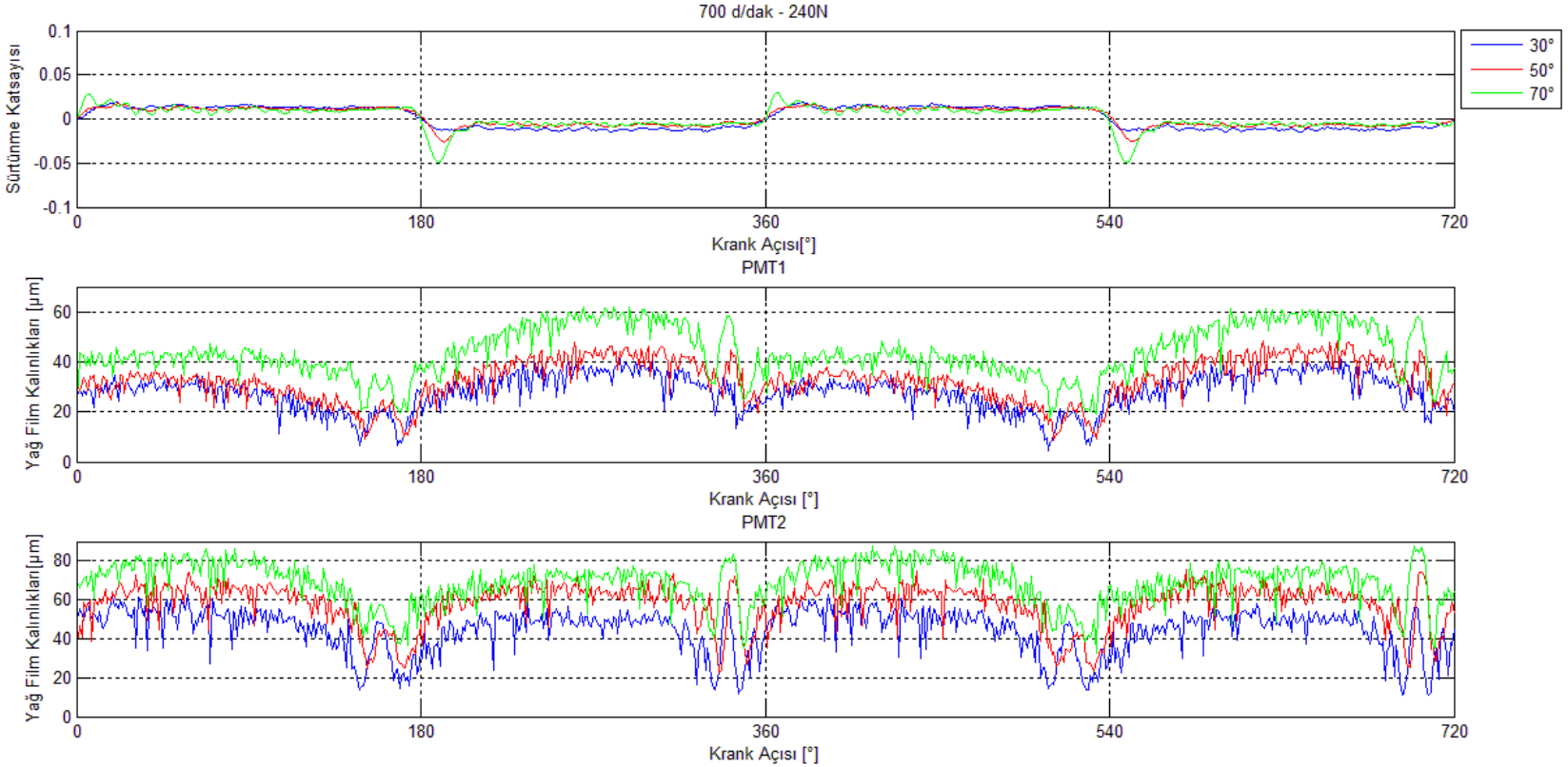
Şekil 5.24 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N, 500 d/dak).



Şekil 5.25 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 160 N, 700 d/dak).



Şekil 5.26 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 200 N, 700 d/dak).



Şekil 5.27 : Krank Mili Açısına Göre Sürtünme Katsayısı ve Yağ Film Kalınlığı Ölçümleri (15W40, Ra=0,2 µm, 240 N, 700 d/dak).

6. DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Motor içerisinde yanma sırasında birçok parametrenin değişken olmasından dolayı yağ film kalınlığını ölçmek oldukça zordur. Birkaç ölçüm yöntemi mevcuttur. Bunların içerisinde lazer uyarmalı floresan tekniği :

- yüksek sinyal/gürültü oranı (yüksek hassasiyet)
- motor titreşimlerinden etkilenmemesi
- sistemin taşınabilir olması
- farklı örnekler için farklı dalga boylarında uyarma yapılabilmesi
- diğer yöntemlere göre yapılan kalibrasyon sonunda daha doğru sonuçlar vermesi gibi avantajlarından dolayı bu tez kapsamında ölçüm yöntemi olarak seçilmiştir.

Sonuç olarak TUBİTAK 214M300 Projesi kapsamında yapılan bu çalışma sonucunda hızın, yağ film kalınlığına etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Motordaki piston gömleği-segman arası yağ film kalınlığını ölçmek için, lazer uyarmalı floresan tekniği ile gerçek zamanlı olarak yanmanın olmadığı bir test sistemi geliştirilmiştir. Bu tezde piston-segman arası yağ film kalınlığının krank açısı boyunca değişimi incelenmiştir. Bu ölçüm sistemi ile farklı gömlek ve segman yapılarında yağ film kalınlığı; değişik motor hız, sıcaklık ve normal yüklerde ölçülebilmektedir. Yöntem farklı honlama tiplerinin (lazer ve normal honlama) etkilerini görmek için de kullanılabilmektedir. Ayrıca farklı motor yağları için, onlara uygun floresan boyalar bulunması ve yağ film kalınlığının motor yağ tiplerine göre aynı şartlardaki farklılıklarını görmek için de kullanılabilir.

Gelecekte deney sistemi geliştirilerek, yanmanın olduğu bir motorda ölçüm yapılabilir duruma getirilebilir. Bu sayede gerçek yanma şartlarında motordaki yağ film kalınlığı değişimi görülüp, motor tasarımındaki gelişmelere ışık tutarak motordaki yağlama performansı, yakıt tüketimi, motor gücü, yağ tüketimi, motorun ömrü ve egzos emisyonları gibi konularda ilerleme sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Akalın, O. and Newaz, G. M., 2001. Piston ring-cylinder bore friction modeling in mixed lubrication regime: Part I-Analytical results, ASME Journal of Tribology, 123, 211-218.

Akalın, O. and Newaz, G. M., 2001. Piston ring-cylinder bore friction modeling in mixed lubrication regime: Part II-Correlation with bench test data, ASME Journal of Tribology, 123, 219-223.

Arcoumanis, C., Duszynski, M., Lindenkamp, H., Preston, H. 1998b. "Measurements of the Lubricant Film Thickness in the Cylinder of a Firing Diesel Engine Using LIF", SAE Paper 982435**.**

Arcoumanis, C., Duszynski, M., Pyke, E., Preston, H. 1998a. "Cold-start Measurements of the Lubricant Film Thickness in the Cylinder of a Firing Diesel Engine", SAE Paper, 982436.

Ariga, S., Sui, P.C. and Shahed, S.M., 1992. Instantaneous Unburned Oil Consumption Measurement in a Diesel Engine Using SO2 Tracer Technique, *SAE Technical Paper Series*, 922196.

Abrahart, Avan, E., Spencer, A., Dwyer-Joyce, R., Almqvist, A., Larsson, R. 2012. "Experimental and Numerical Investigations of Oil Film Formation and Friction in a Piston Ring–Liner Contact", Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology, 227(2), 126–140.

Brown, M. A., McCann, H., Thompson D. M. 1993. "Characterization of the Oil Film Behaviour Between the Liner and Piston of a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE Paper 932784.

Colvin, A.D., Carduner, K.R., Leong, D.Y., Ames, R. and Bissell, H., 1992. An Advanced Instrument for the Real Time Measurement of Engine Oil Economy, *SAE Technical Paper Series*, 920655.

Colvin, A.D., Carduner, K.R., Leong, D.Y., Ames, R. and Bissell, H., 1992. An Advanced Instrument for the Real Time Measurement of Engine Oil Economy, *SAE Technical Paper Series*, 920655.

Comfort, A., 2003. An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses And Lubricant Properties Affecting Fuel Economy – Part I, *SAE Technical Paper Series,* 2003-01 3225.

Dearlove, J., Cheng, W.K. 1995. "Simultaneous Piston Ring Friction and Oil Film Thickness Measurements in a Reciprocating Test Rig", SAE Paper 952470.

Dellis, P.C. 2010. "Effect of Friction Force Between Piston Rings and Liner: A Parametric Study of Speed, Load, Temperature, Piston-Ring Curvature, and High- Temperature, High-Shear Viscosity",

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,224, 411-425.

Froelund, K., Scramm, J., Noordzij, B, Tian, T, Wong, V.W. 1997. "An Investigation of the Cylinder Wall Oil Film Development During Warm-Up of an SI Engine Using Laser Induced Fluorescence", SAE Paper 971699.

Greenwood, I. A. and Tripp, J. H., 1971. The contact of two nominally flat surfaces, Proc. IMechE., 185, 625-633.

Hamrock, B.J., 1994. Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, New York.

Hoult, D.P., Lux, J.P., Wong, V.W., Bilian, S.A. 1988. "Calibration of Laser Fluorescence Measurements of Lubricant Film Thickness in Engines", SAE Paper 881587.

Konomi, T., Murakami, M. and Sanda, S., "Effects of piston skirt profile on friction loss and oil film behavior", in Experimental and Predictive Methods in Engine Research and Development, 17-18th November 1993, National Exhibition Centre, Birmingham, pages 147-154, 1993.

Lux, J. P., Hoult, D. P. and Olechowski, M. J., "Lubricant Film Thickness Measurements in a Diesel Engine Piston Ring Zone", Lubrication Engineering, Volume 47, Number 5, pages 353-364, 1991.

Nakayama, K., Morio, I., Katagiri, T., Okamoto, Y., 2003. "A Study for Measurement of Oil Film Thickness on Engine Bearing by Using Laser Induced Fluorescence (LIF) Method", SAE Paper 2003-01-0243.

Organisciak M., Cavallaro G., Lubrecht A.A., Starced Hydrodynamic Lubrication of the Piston Ring Cylinder Liner Contact: Preliminary Study of the Influence of Surface Texturing, ELSEVIER Life Cycle Tribology, 2005

Patir, N. and Cheng, H. S., 1978. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication, ASME Journal of Lubrication Technology, 100, 12-17.

Phen, R.V., Richardson, D., Borman, G. 1993. "Measurements of Cylinder Liner Oil Film Thickness in a Motored Diesel Engine" SAE Paper 932789.

Priest, M. And Taylor, C. M., 2000. Automobile engine tribology, Wear, 241, 193-203.

Richardson, D.E., Borman, G.L. 1991. "Using Fiber Optics and Laser Fluorescence for Measuring Thin Oil Films with Application to Engines", SAE Paper 912388.

Ryk G., Kligerman Y., Etsion I., Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components, Tribolg Transactions, 45, 2002

Shaw, B.T., Hoult, D.P., Wong, V.W. 1992. "Development of Engine Lubricant Film Thickness Diagnostics Using Fiber Optics and Laser Fluorescence", SAE Paper 920651.

Smart, A.E., Ford, R.A.J. 1974. "Measurement of Thin Liquid Films by A Fluorescence Technique", Wear, 29, 41-47.

Stiyer, M.J., Ghandhi, J.B. 1997. "Direct Calibration of LIF Measurements of the Oil Film Thickness Using the Capacitance Technique" SAE Paper 972859.

Takiguchi, M., Sasaki, R., Takahashi, I., Ishibashi, F. 2000. "Oil Film Thickness Measurement and Analysis of a Three Ring Pack in an Operating Diesel Engine," SAE Technical Paper, 2000-01-1787.

Tamminen, J., Sandstroma,E., Andersson, P. 2006. "Influence of load on the tribological conditions in piston ring and cylinder liner contacts in a medium-speed diesel engine", Tribology International, 39, 1643–1652.

Taylor C.M. (1998). Automobile Engine Tribology - Design Considerations For Efficiency And Durability, Wear 221, 1–8.

Ting, L.L. 1980. "Development of a Laser Fluorescence Technique For Measuring Piston Ring Oil Film Thickness", Journal of Lubrication Technology, 102, 165-170.

Thirouard, B., Tian, T., 2003a. Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part I): Identification and Characterization of the Main Oil Transport Routes and Mechanisms, *2003 JSAE/SAE International Spring Fuels & Lubricants Meeting,* Yokohama, Japan, May 19-22, 2003-01-1952.

Thirouard, B., Tian, T., Hart, D.P. 1998. "Investigation of Oil Transport Mechanisms in the Piston Ring Pack of a Single Cylinder Diesel Engine, Using Two Dimensional Laser Induced Fluorescence" SAE Paper 982658**.**

Tung, S.C., Gao, H. 2003. "A Study of Break-In Film Development with Different Piston Ring Coatings and Correlation with Electrical Contact Resistance Measurements", Tribology Transactions, 46(3), 326-331.

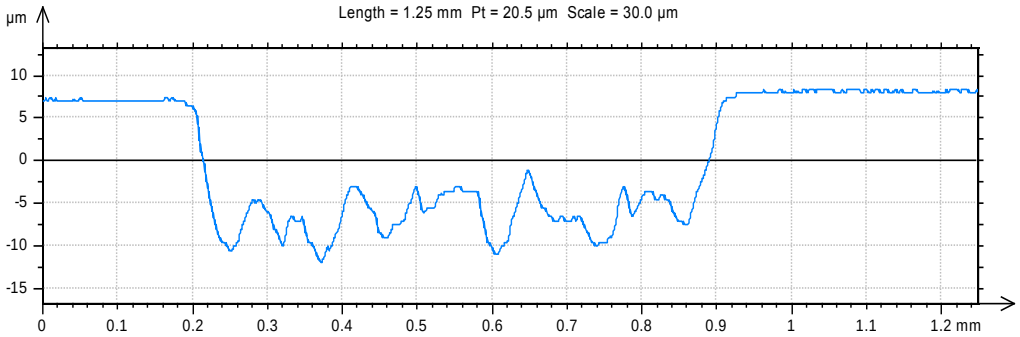
Wong, Victor W., Hoult, David P., 1991. "Experimental Survey of Lubricant Film Characteristic and Oil Consumption in a Small Diesel Engine"SAE Paper 910741.

Url-1 <http://www.bayar.edu.tr/besergil/yaglama.pdf >, erişim tarihi 22.11.2016

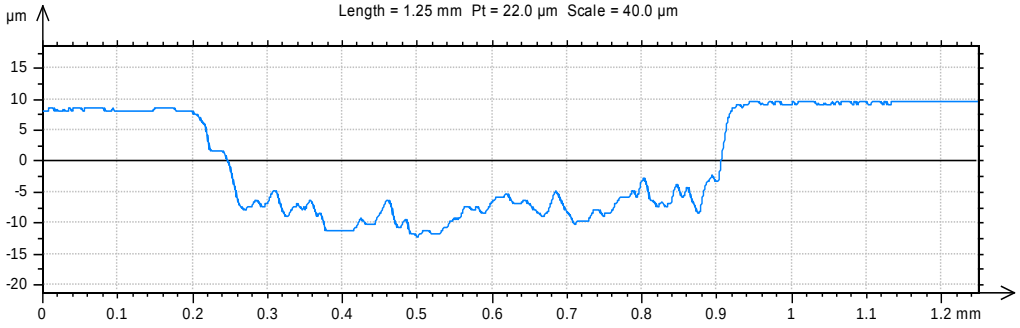
Url-2 < https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>, erişim tarihi 22.11.2016

EKLER

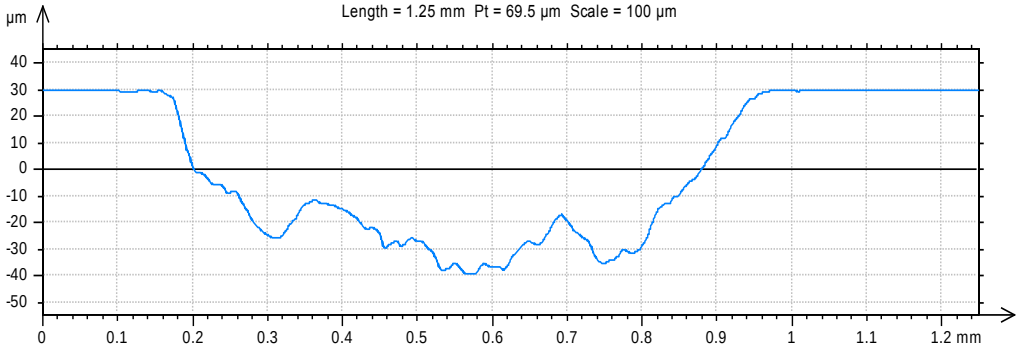
EK A : Kalibrasyon Gömleği Rezervuar Derinlikleri Profilometre Ölçüm Sonuçları.



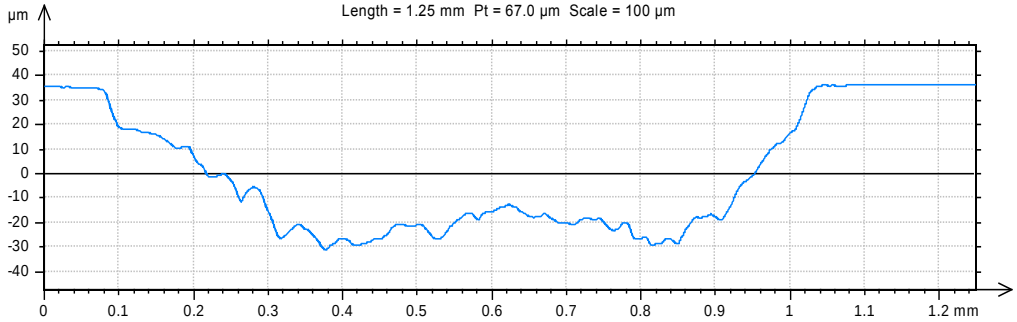
Şekil A.1: 1 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



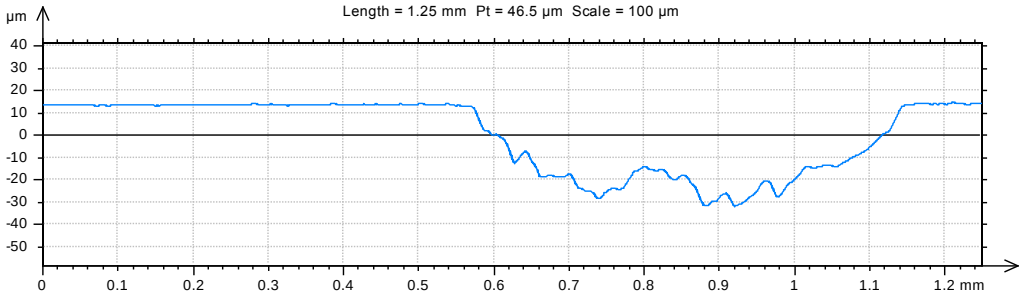
Şekil A.2: 1 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



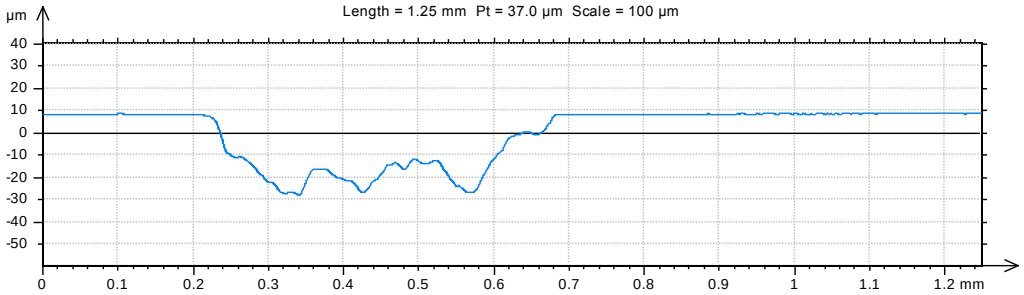
Şekil A.3: 2 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



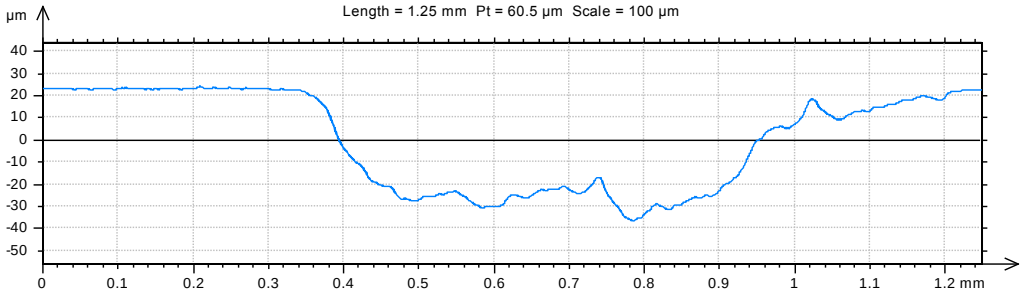
Şekil A.4: 2 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



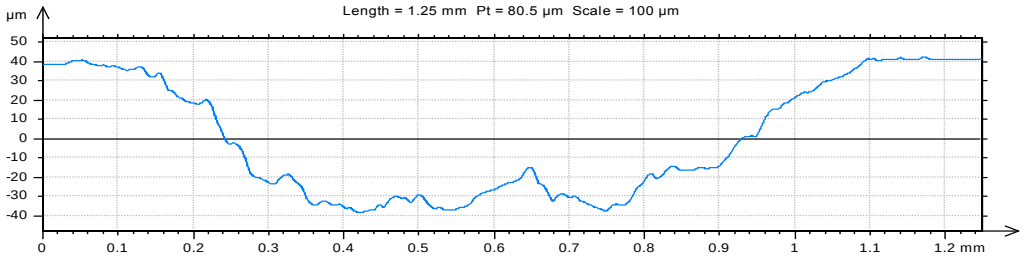
Şekil A.5: 3 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



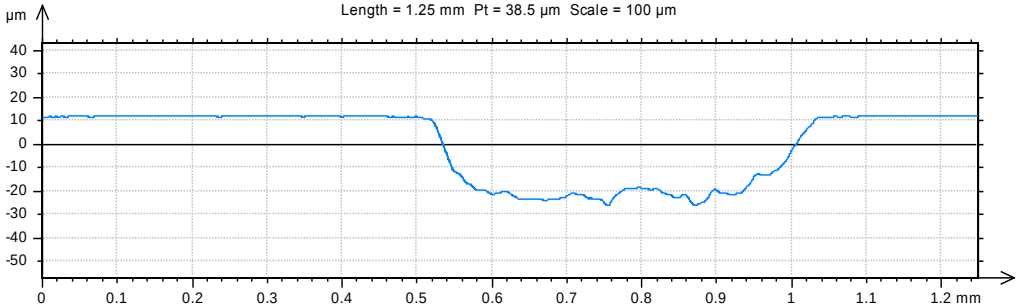
Şekil A.6: 3 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



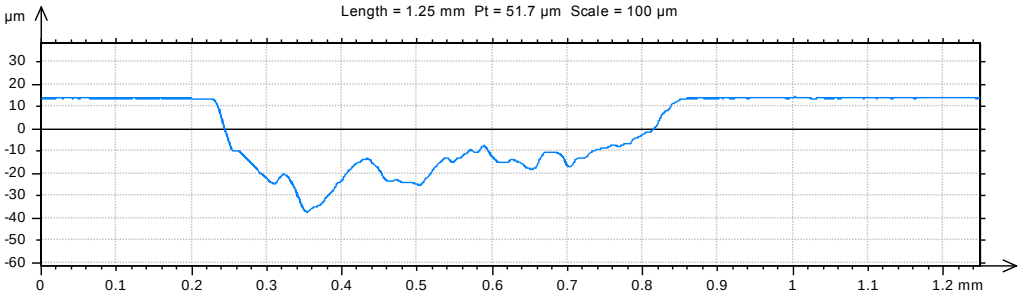
Şekil A.7: 4 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



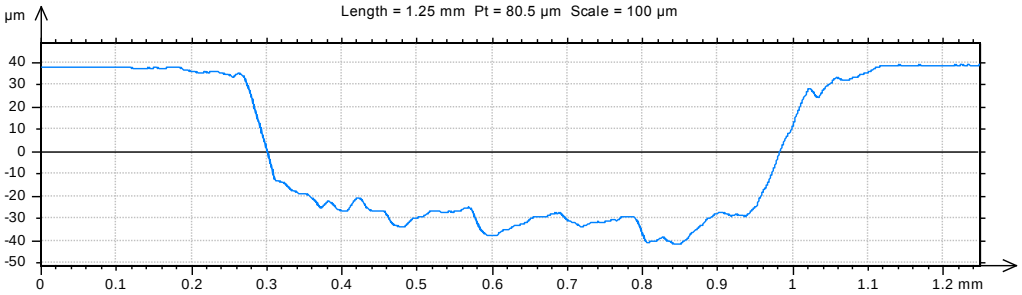
Şekil A.8: 4 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



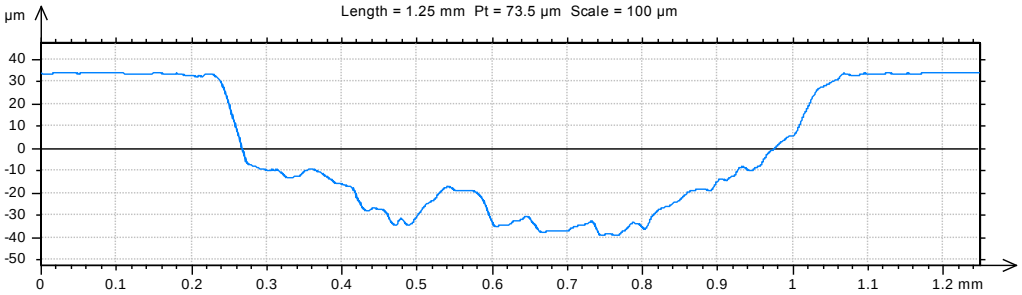
Şekil A.9: 5 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



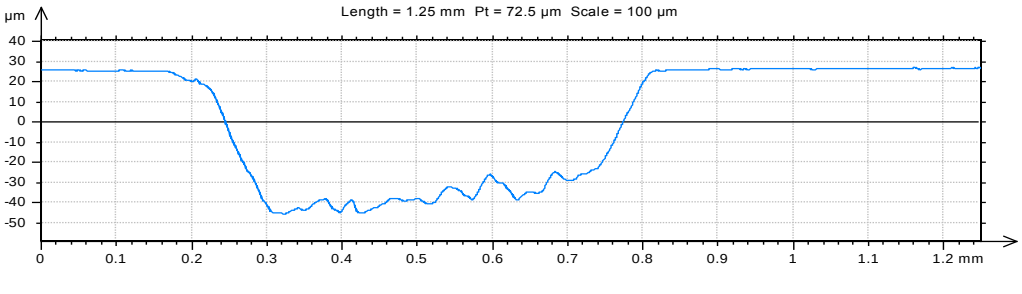
Şekil A.10: 5 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



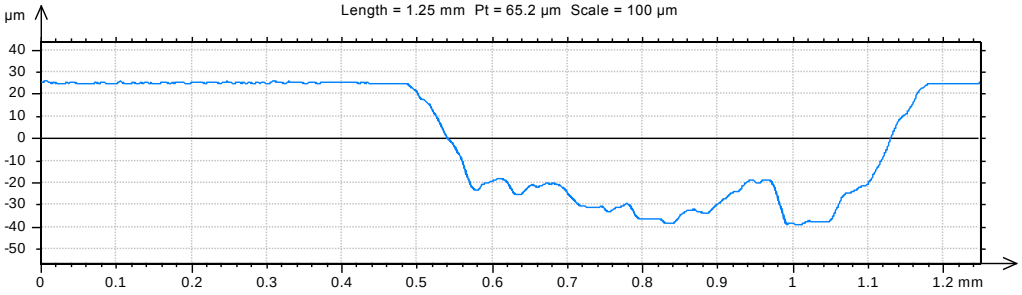
Şekil A.11: 6 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



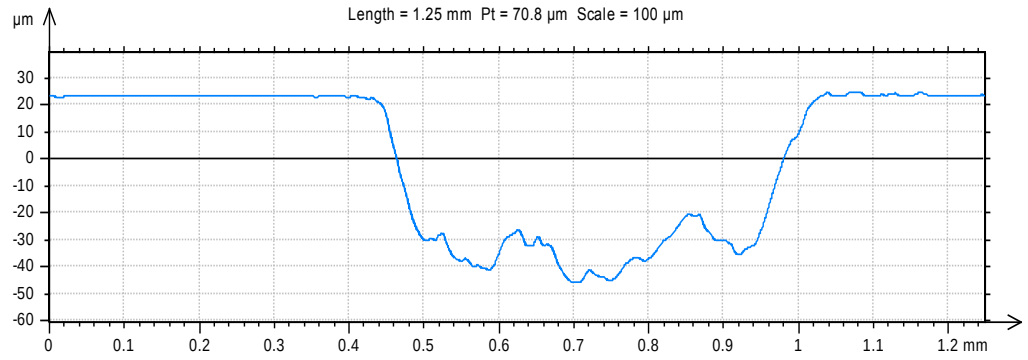
Şekil A.12: 6 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



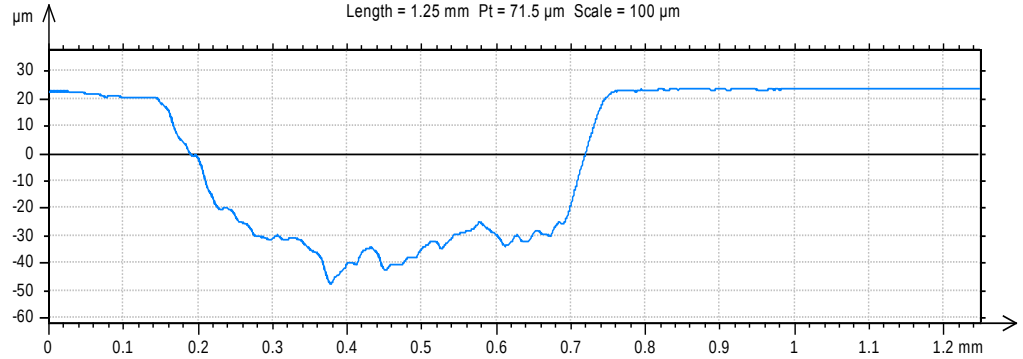
Şekil A.13: 7 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



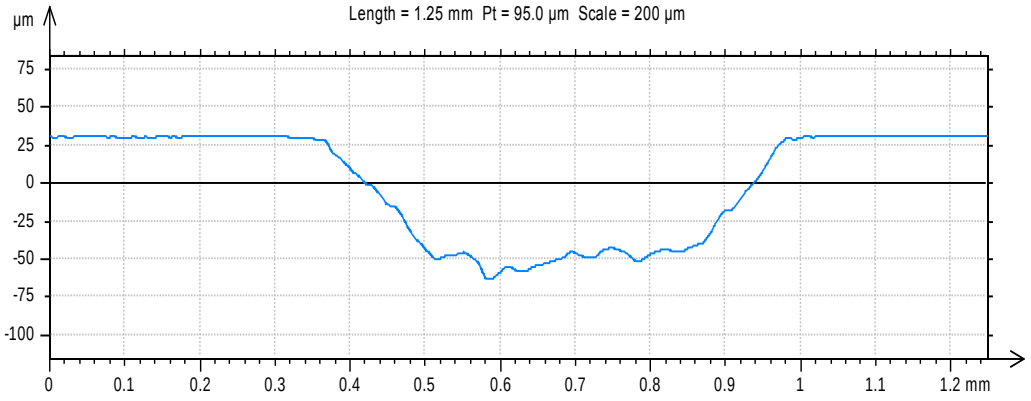
Şekil A.14: 7 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



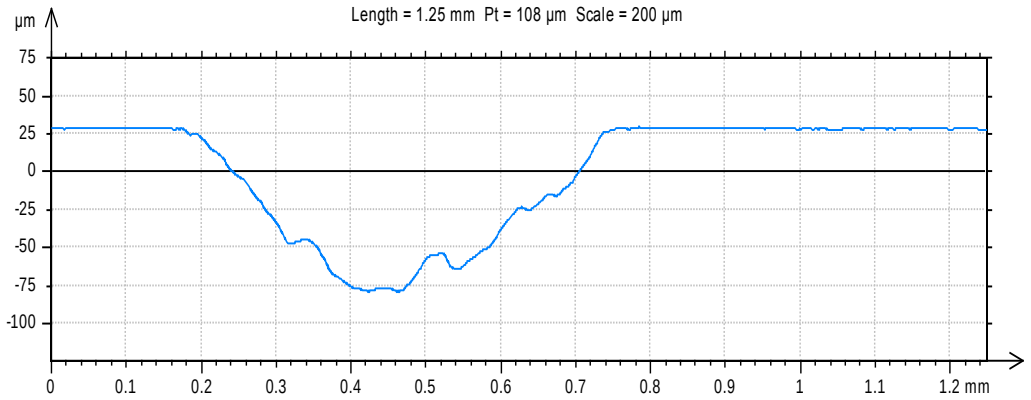
Şekil A.15: 8 Numaralı Aşındırma İşlemi, 1. Rezervuar Ölçüm Sonucu.



Şekil A.16: 8 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.

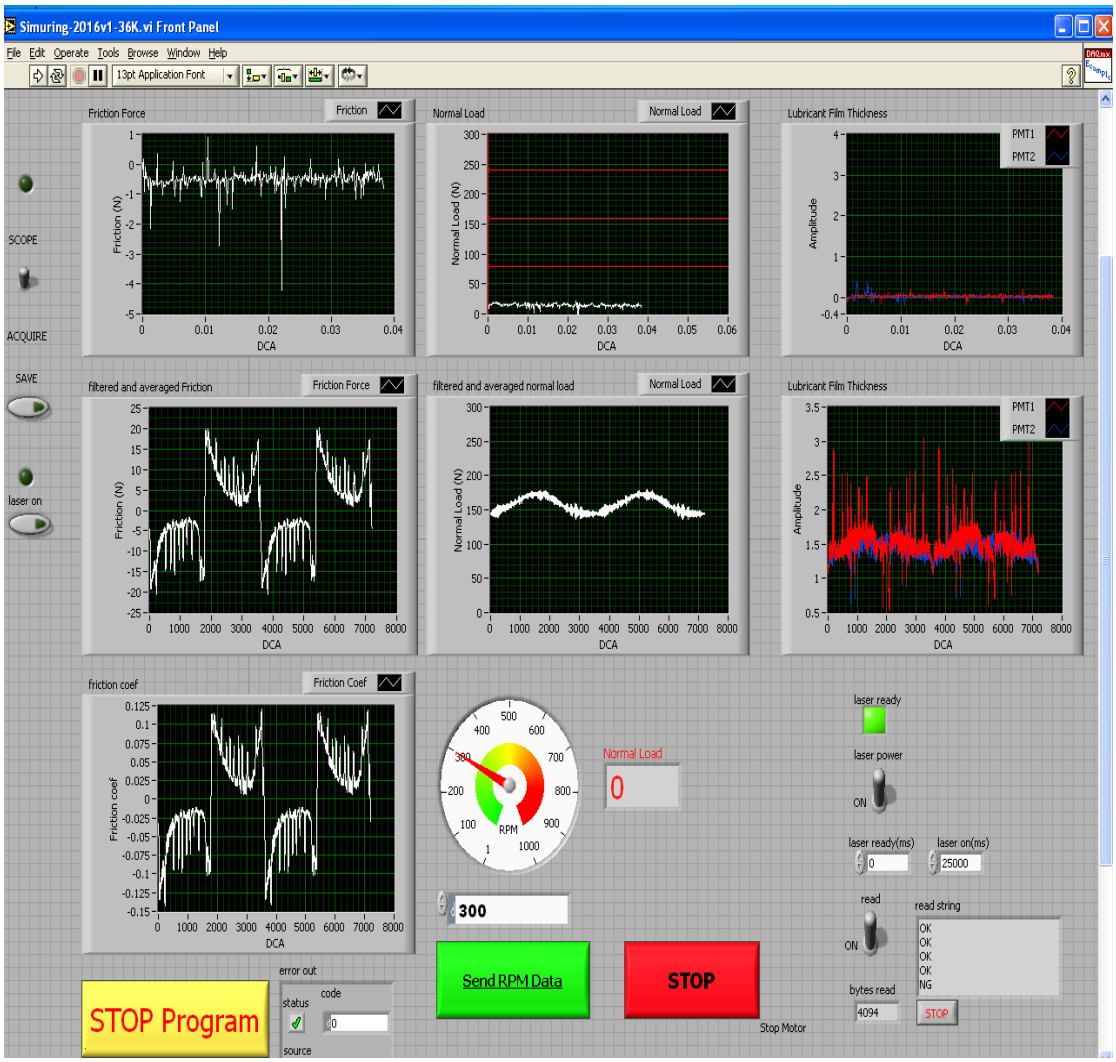


Şekil A.17: 9 Numaralı Aşındırma İşlemi, 9. Rezervuar Ölçüm Sonucu.

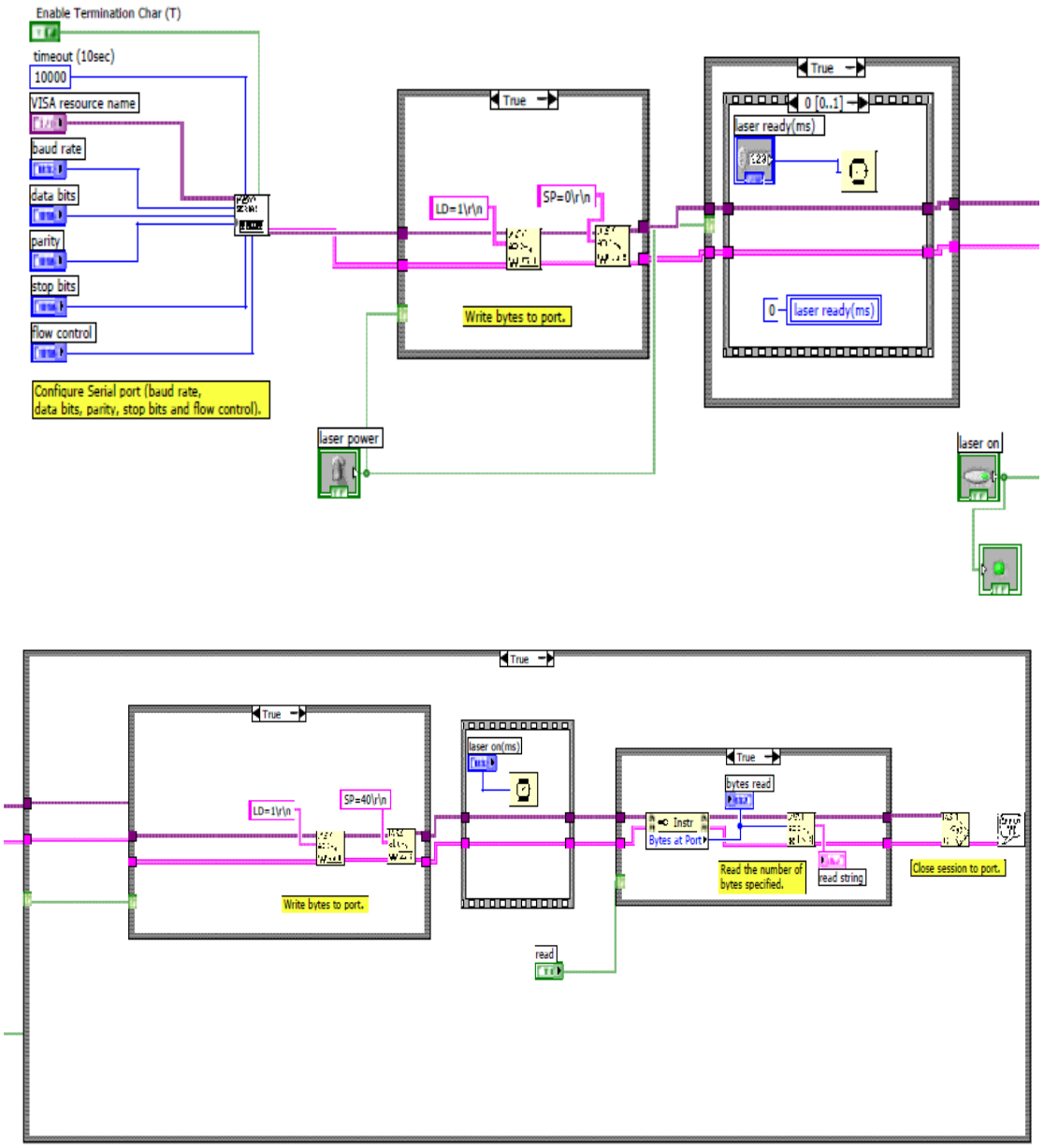


Şekil A.18: 9 Numaralı Aşındırma İşlemi, 2. Rezervuar Ölçüm Sonucu.

EK B : Lazer Kontrolü ve Veri Toplama İçin Geliştirilen Labview Arayüzü.



EK C : Lazer Kontrolü İçin Labviewda Hazırlanan Block Diagram.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Yunus Emre AYRANCI

Doğum Tarihi ve Yeri **:** İSTANBUL / 14.05.1991

E-posta **:** yunusemre.ayranci@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2014, İ.T.Ü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühen.
- **Lisans** **:** 2015, İ.T.Ü, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2017, İ.T.Ü, Makine Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği