

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MOTORLARDA YAĞLAMA SİSTEMİ ÜZERİNDE YAPILAN**  
**DEĞİŞİKLİKLERİN YAĞIN ISINMASI VE MOTOR PERFORMANSI**  
**ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODEL YARDIMIYLA**  
**ARAŞTIRILMASI**

**Yusuf KARTAL**

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN

Mayıs, 2019

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MOTORLARDA YAĞLAMA SİSTEMİ ÜZERİNDE YAPILAN  
DEĞİŞİKLİKLERİN YAĞIN ISINMASI VE MOTOR PERFORMANSI  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODEL YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI**

Yusuf KARTAL tarafından hazırlanan tez çalışması 16.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Övün Işın

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail Ahmet GÜNEY, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY, Üye

Bursa Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan 'Motorlarda Yağlama Sistemi Üzerinde Yapılan Değişikliklerin Yağın Isınması Ve Motor Performansı Üzerindeki Etkilerinin Model Yardımıyla Araştırılması' başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim

Yusuf KARTAL

İmza

*Tüm dostlarıma  
ve sevdiklerime.*

## TEŞEKKÜR

---

Bu doktora tez çalışması Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN yürütücülüğünde gerçekleştirilmiştir. İlk günden son güne kadar bana her türlü desteği sağlayan, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik çalışmalarım süresince kendisinde sürekli öğrendiğim ve öğrenmeye devam ettiğim değerli hocam Prof. Dr. İsmail Ahmet GÜNEY'e, akademik hayatım konusunda bana yol gösterici olan varlığını her zaman yanımda hissettiğim Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY'a, tez süreci boyunca yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Tarkan SANDALCI'ya teşekkür ederim.

Tez konumu olgunlaştırmamda ve doktora sürecimde bana sürekli destek olan, zor zamanlarımda güvenle devam etmemi sağlayan Ford Otosan'daki ekip liderim Şükrü Can ÇERKEZOĞLU'na, değerli yöneticim Dr. Ali Aslan EBRİNÇ'e ve Yağlama Sistemi Ekibinden çalışma arkadaşlarım Onur USUĞ, Ural TUNCA ve Hasan YAZGAÇ'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emek sahibi olan başta annem Zahire KARTAL ve babam Abdullah KARTAL olmak üzere aileme teşekkür ederim.

Son olarak bu zorlu süreci başından sonuna benimle birlikte yaşayan, fedakarlıklarını asla unutmayacağım, destekçim Narin SEVAT'a teşekkür ediyorum.

Yusuf KARTAL

## İÇİNDEKİLER

|                                                                  | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------|-------|
| SİMGE LİSTESİ .....                                              | viii  |
| KISALTMA LİSTESİ .....                                           | xiii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                               | xiv   |
| TABLO LİSTESİ.....                                               | xix   |
| ÖZET .....                                                       | xx    |
| ABSTRACT.....                                                    | xxiii |
| BÖLÜM 1                                                          |       |
| GİRİŞ .....                                                      | 1     |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                        | 1     |
| 1.1.1 Egzoz Gazının Yağın İlk Isınmasında Kullanılması .....     | 3     |
| 1.1.2 Yağ Hacminin Değiştirilmesi .....                          | 8     |
| 1.1.3 Yağ Isı Korunumu.....                                      | 10    |
| 1.1.4 Yağ Tipinin Etkisi .....                                   | 13    |
| 1.1.5 Yağ Soğutma Sistemi Optimizasyonu .....                    | 17    |
| 1.1.6 Termal Enerji Depolama ve Dışardan Aktif Isı Girişi.....   | 19    |
| 1.1.7 Çevresel Şartlar .....                                     | 20    |
| 1.1.8 Yağ Pompası Tipi.....                                      | 21    |
| 1.2. Tezin Amacı .....                                           | 22    |
| 1.3 Hipotez .....                                                | 22    |
| BÖLÜM 2                                                          |       |
| MOTORLARDAKİ SÜRTÜNME VE MOTOR YAĞLAMA SİSTEMİNİN TEMELLERİ..... | 24    |
| 2.1 Motor Sürtünmeleri.....                                      | 24    |
| 2.2 Sürtünme ve Yağlama Teorisi.....                             | 25    |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 2.3 Motorlarda Sürtünme Bölgeleri.....                      | 26 |
| 2.4 Motorlarda Görülen Sürtünme Türleri.....                | 28 |
| 2.5 Viskoziteye Etki Eden Faktörler .....                   | 32 |
| 2.5.1 Maddenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....        | 33 |
| 2.5.2 Viskoziteye Etki Eden Dış Kuvvetler .....             | 38 |
| 2.5.3 Viskoziteye Etki Eden Çevresel Faktörler .....        | 40 |
| 2.6 Motorlarda Yağlama Sistemi Elemanları Ve Çalışması..... | 45 |

### BÖLÜM 3

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| MODELİN TEORİSİ VE OLUŞTURULMASI.....                              | 51 |
| 3.1 Viskozite – Yağ Sıcaklığı İlişkisi .....                       | 53 |
| 3.2 Motor Sürtünmeleri Viskozite İlişkisi .....                    | 57 |
| 3.3 Yataklardan Sürtünme Yoluyla Yağa Geçen Isının Alt Model ..... | 58 |
| 3.4 Pistondan Yağa Geçen Isının Alt Modeli .....                   | 60 |
| 3.5 Kartlerden Transfer Edilen Isının Alt Modeli .....             | 62 |
| 3.6 Soğutma Modülü Alt Modeli .....                                | 67 |
| 3.7 Model Döngüsünün Oluşturulması.....                            | 68 |

### BÖLÜM 4

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| MODELİN DOĞRULANMASI .....                                                             | 71 |
| 4.1 Karterdeki Isı Transferi Alt Modelinin Doğrulanması .....                          | 71 |
| 4.2 Karterdeki Isı Transferi Alt Modelinin Motor Koşullarında Doğrulanması.....        | 75 |
| 4.3 Yanmanın Olmadığı Durumda Yağa Geçen Isı Alt Modelinin Doğrulanması.....           | 76 |
| 4.4 Yanmanın Olduğu Durumda Modelin Doğrulanması.....                                  | 79 |
| 4.5 Yanmanın Olduğu ve Olmadığı Durumlar için 13 L Motorda Modelinin Doğrulanması..... | 83 |

### BÖLÜM 5

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| YAĞLAMA SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN YAĞIN ISINMASINA ETKİSİ. 90 |     |
| 5.1 Karter Malzemesinin Etkisinin İncelenmesi.....                     | 91  |
| 5.2 Karter Cidar Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi .....              | 95  |
| 5.3 Windage Tray Uygulamasının Etkisinin İncelenmesi.....              | 97  |
| 5.4 Bölmeli Karter Uygulamasının Etkilerinin İncelenmesi .....         | 99  |
| 5.5 Karter İzolasyonunun Etkilerinin İncelenmesi .....                 | 101 |
| 5.6 Çeşitli Karter Kombinasyonlarının Karşılaştırılması .....          | 104 |
| 5.7 Yağ Tipinin Etkisinin İncelenmesi .....                            | 109 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.8 Yağ Miktarının Etkisinin İncelenmesi .....                                                 | 115 |
| 5.9 Yatak Boyutlarının Etkisinin İncelenmesi .....                                             | 119 |
| 5.10 Piston Yağ Galerisi Boyutlarının Etkisinin İncelenmesi .....                              | 123 |
| 5.11 Yağlama Sistemi Üzerinde Yapılan Geliştirmelerin Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkileri ..... | 124 |
| BÖLÜM 6                                                                                        |     |
| SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                                         | 130 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                | 136 |
| TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR .....                                                                | 142 |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                |                                           |
|----------------|-------------------------------------------|
| $A_{kafaaltı}$ | Piston Kafaaltı Isı Transfer Katsayısı    |
| $A_s$          | Karter Yüzey Alanı                        |
| $A_1$          | Karakteristik Sabit                       |
| $A_2$          | Boyutsal Sabit                            |
| $A_3$          | Malzeme Türüne Göre Belirlenen Sabit      |
| $A_4$          | Ampirik İfade                             |
| $A_5$          | Denklem Sabiti                            |
| $A_6$          | Denklem Sabiti                            |
| $A_7$          | Denklem Sabiti                            |
| $a$            | Motor Tipine Göre Değişen Sürtünme Sabiti |
| $B_1$          | Karakteristik Sabit                       |
| $B_2$          | Ampirik İfade                             |
| $B_3$          | Denklem Sabiti                            |
| $B_4$          | Denklem Sabiti                            |
| $B_5$          | Denklem Sabiti                            |
| $C$            | Yatak Radyal Boşluğu                      |
| $C_1$          | Karakteristik Sabit                       |
| $C_2$          | Ampirik İfade                             |
| $C_3$          | Denklem Sabiti                            |
| $C_4$          | Denklem Sabiti                            |
| $C_5$          | Denklem Sabiti                            |
| $c$            | Eksantriklik                              |
| $C_p$          | Yağın Özgül Isısı                         |
| $C_{Pc}$       | Soğutucu Akışkan Özgül Isısı              |
| $C_{Ph}$       | Yağın Özgül Isısı                         |
| $C_{yağ}$      | Yağ Özgül Isısı                           |

|                        |                                                 |
|------------------------|-------------------------------------------------|
| $D$                    | Yatak apı                                      |
| $D_{\text{piston}}$    | Piston apı                                     |
| $D_1$                  | Ampirik İfade                                   |
| $D_2$                  | Denklem Sabiti                                  |
| $E_1$                  | Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sabit                  |
| $E_2$                  | Malzeme Uyarınca Belirlenen Sabit               |
| $F$                    | Piston Kesit Alanı                              |
| $F_1$                  | Ölçüm Sonucu Elde Edilen Sabit                  |
| $F_2$                  | Malzeme Uyarınca Belirlenen Sabit               |
| $f$                    | Sürtünme Katsayısı                              |
| $F_{\text{ort}}$       | Ortalama Yatak Yüğü                             |
| $g$                    | Yerçekimi İvmesi                                |
| $Gr$                   | Grashof Sayısı                                  |
| $h$                    | Konveksiyon Isı Transfer Katsayısı              |
| $h_{\text{jet}}$       | Yağ Jeti Isı Transfer Katsayısı                 |
| $h_s$                  | Karterden Dışarıya Doğru Isı Transfer Katsayısı |
| $h_{\text{sıçrama}}$   | Yağ Sıçrama Isı Transfer Katsayısı              |
| $h_{\text{püskürtme}}$ | Yağ Püskürtme Isı Transfer Katsayısı            |
| $h_1$                  | Yağ-Cidar Konveksiyon Isı Transfer Katsayısı    |
| $h_2$                  | Hava-Cidar Konveksiyon Isı Transfer Katsayısı   |
| $i$                    | Motor Stroğu                                    |
| $J_1$                  | Denklem Sabit                                   |
| $K_1$                  | Denklem Sabiti                                  |
| $k$                    | Isı İletim Katsayısı                            |
| $L$                    | Yatak Uzunluğu                                  |
| $L_{\text{cidar}}$     | Karter Cidar Kalınlığı                          |
| $L_{\text{yüzey}}$     | Yüzey Uzunluğu                                  |
| $M$                    | Sürtünme Momenti                                |
| $M_{\text{moleküler}}$ | Moleküler Kütle                                 |
| $M_0$                  | Bekleyen Yağın Kütlesi                          |
| $M_1$                  | Moleküler Ağırlık                               |
| $m_{\text{piston}}$    | Piston Kütlesi                                  |
| $m_{\text{yağ}}$       | Yağ Kütlesi                                     |

|                 |                              |
|-----------------|------------------------------|
| $\dot{m}_c$     | Soğutucunun Debisi           |
| $\dot{m}_h$     | Motor Yağının Debisi         |
| $m_0$           | Dolaşan Yağın Kütlesi        |
| $n$             | Motor Devir Sayısı           |
| $Nu$            | Nusselt Sayısı               |
| $P$             | Basınç                       |
| $Pr$            | Prandl Sayısı                |
| $P_e$           | Efektif Güç                  |
| $P_i$           | İndike Güç                   |
| $P_{me}$        | Ortalama Efektif Basınç      |
| $P_{mi}$        | Ortalama İndike Basınç       |
| $P_{mr}$        | Ortalama Sürtünme Basıncı    |
| $P_R$           | Sürtünmede Kaybedilen Güç    |
| $P_{sürtünme}$  | Sürtünme Güç Kaybı           |
| $P_1$           | Buhar Basıncı                |
| $Q_{ısı kaybı}$ | Karterden Isı Kaybı          |
| $Q_{jet}$       | Yağ Jetlerinden Geçen Isı    |
| $Q_{piston}$    | Pistondan Geçen ısı          |
| $Q_{püskürtme}$ | Püskürtülen Yağdan Geçen Isı |
| $Q_{sıçrama}$   | Sıçrayan Yağdan Geçen Isı    |
| $Q_{yağ}$       | Yağa Geçen Isı               |
| $R$             | Yatak Yarıçapı               |
| $RD$            | Molar Refraksiyon            |
| $R_{gaz}$       | Gaz Sabiti                   |
| $R_{vogel}$     | Vogel Sabiti                 |
| $Ra$            | Rayleigh Sayısı              |
| $T$             | Sıcaklık                     |
| $T_a$           | Ortam Sıcaklığı              |
| $T_{gaz}$       | Yanma Odası Gaz Sıcaklıkları |
| $T_i$           | Yağ Giriş Sıcaklığı          |
| $T_o$           | Yağ Çıkış Sıcaklığı          |
| $T_{piston}$    | Piston Sıcaklığı             |
| $T_{yağ}$       | Yağ Sıcaklığı                |

|                     |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| $T_1$               | Ortam Sıcaklığı                                |
| $T_2$               | Anlık Yağ Sıcaklığı                            |
| $t_{cav}$           | Ortalama Soğutu Akışkan Sıcaklığı              |
| $t_{cin}$           | Giriş Soğutu Akışkan Sıcaklığı                 |
| $t_{co}$            | Çıkış Soğutu Akışkan Sıcaklığı                 |
| $t_{hav}$           | Ortalama Sıcak Yağ Sıcaklığı                   |
| $t_{hin}$           | Giriş Sıcak Yağ Sıcaklığı                      |
| $t_{ho}$            | Çıkış Sıcak Yağ Sıcaklığı                      |
| $U_{vap}$           | Buharlaştırma Enerjisi                         |
| $V$                 | Motor Süpürme Hacmi                            |
| $V_1$               | Özgöl Hacim                                    |
| $V_2$               | Molar Hacim                                    |
| $X$                 | Yağa Geçen Isı Oranı                           |
| $X_1$               | Denklem Sabiti                                 |
| $X_2$               | Denklem Sabiti                                 |
| $Y_1$               | Denklem Sabiti                                 |
| $Z_1$               | Denklem Sabiti                                 |
| $w$                 | Açısal Hız                                     |
| $\omega_{hacim}$    | Kritik Hacim                                   |
| $\omega_1$          | Eksentrik Faktör                               |
| $\rho$              | Yağ Yoğunluğu                                  |
| $\varphi$           | Akışkanlık                                     |
| $\theta_1$          | Vogel Sabiti                                   |
| $\theta_2$          | Vogel Sabiti                                   |
| $\eta$              | Dinamik Viskozite                              |
| $\eta_L$            | Sıvı Viskozitesi                               |
| $\eta_v$            | Buhar Viskozitesi                              |
| $\eta_{SL}$         | Sıvının Referans Basıncındaki Viskozitesi      |
| $\lambda$           | Piston termal kondaktivitesi                   |
| $\delta$            | Tepe Noktası ve Yağ Galerisi Arasındaki Mesafe |
| $\Psi$              | Boyutsuz Katsayı                               |
| $\Delta T_{piston}$ | Piston Sıcaklık Değişimi                       |
| $\beta$             | Termal Genleşme Katsayısı                      |

|             |                                                         |
|-------------|---------------------------------------------------------|
| $\varphi_1$ | Şekil Faktörü                                           |
| $\beta_1$   | Boyutsal Sabit                                          |
| $\gamma_N$  | Viskozitenin Sonsuza Gittiği Sıcaklıkta Yüzey Gerilmesi |
| $\dot{Z}$   | Dipol Moment                                            |
| $\alpha_1$  | Polarize olma kabiliyeti                                |
| $\mu_1$     | Çift kutup momenti                                      |
| $\phi$      | Şekil Faktörü                                           |
| $\Delta P$  | Kritik Basınç ve Buhar Basıncı Arasındaki Fark          |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| AR    | Artemis Road                                      |
| AU    | Artemis Urban                                     |
| BMEP  | Brake Mean Effective Pressure                     |
| CVT   | Continuously Variable Transmission                |
| DBDC  | Delhi Bus Driving Cycle                           |
| ECU   | Electronic Control unit                           |
| EGR   | Exhaust Gas Recirculation                         |
| ESC   | European Stationary Cycle                         |
| FMEP  | Friction Mean Effective Pressure                  |
| FTP75 | Federal Test Procedure                            |
| HwFET | Highway Fuel Economy Test                         |
| IMEP  | Indicated Mean Effective Pressure                 |
| MIDC  | Modified Indian Drive Cycle                       |
| NEDC  | New European Driving Cycle                        |
| NVH   | Noise Vibration Harshness                         |
| SA    | Soğutucu Akışkan                                  |
| WLTP  | Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure |

## ŞEKİL LİSTESİ

|            |                                                                                                                 |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | Yanma sonucu açığa çıkan enerjinin kullanımı .....                                                              | 25 |
| Şekil 2.2  | Motorlarda görülen sürtünme kayıplarının dağılımları .....                                                      | 27 |
| Şekil 2.3  | Motorlarda görülen sürtünme kayıplarının devir sayısına göre<br>...dağılımları .....                            | 28 |
| Şekil 2.4  | Striebeck sayısı- Sürtünme Katsayısı Grafiği ve Yağlama Türleri .....                                           | 29 |
| Şekil 2.5  | Striebeck Numarası ile Yağ Filmi Kalınlığı Arasındaki İlişki .....                                              | 31 |
| Şekil 2.6  | İki düzlem modeli .....                                                                                         | 32 |
| Şekil 2.7  | Kohezyon ve Yüzey Gerilmeleri .....                                                                             | 34 |
| Şekil 2.8  | Newtonian akışkan(1), kesme hızı ile incelen akışkan(2), kesme hızı ile<br>kalınlaşan akışkan(3) .....          | 39 |
| Şekil 2.9  | Farklı tipte yağların sıcaklık-viskozite ilişkisi .....                                                         | 40 |
| Şekil 2.10 | Mac Coull, Wright, Walter Eşitlikleri ile Viskozite-Sıcaklık İlişkisi .....                                     | 42 |
| Şekil 2.11 | Motor kesitinde yağlama sistemi elemanlarının görünüşü .....                                                    | 46 |
| Şekil 2.12 | Yağ Çekme Borusu Örneği .....                                                                                   | 47 |
| Şekil 2.13 | Yağ Karteri Örneği .....                                                                                        | 48 |
| Şekil 2.14 | Yağ Filtreleme ve Soğutma Elemanı Örneği .....                                                                  | 49 |
| Şekil 2.15 | Yağ Pompası Örneği .....                                                                                        | 49 |
| Şekil 3.1  | Motor yağının motorda izlediği yol .....                                                                        | 52 |
| Şekil 3.2  | Motor yağının ısınma ve soğuması kontrol modeli .....                                                           | 52 |
| Şekil 3.3  | Standart motor yağı için 10 farklı noktadaki sıcaklık-viskozite değerleri<br>.....                              | 54 |
| Şekil 3.4  | Standart motor yağı için gerçek sıcaklık - viskozite değerlerinin<br>eksponansiyel fonksiyona göre durumu ..... | 56 |
| Şekil 3.5  | Motor yataklarının görünüşü .....                                                                               | 59 |
| Şekil 3.6  | Pistondaki ısı dağılımı .....                                                                                   | 61 |
| Şekil 3.7  | Motor yağının piston yağ galerisinde dolaşımı .....                                                             | 61 |
| Şekil 3.8  | Denklem 3.24'de yer alan piston boyutları .....                                                                 | 62 |

|            |                                                                                                                                     |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.9  | Plastik Yağ Karteri Temsili Resmi.....                                                                                              | 63 |
| Şekil 3.10 | Yağ Karterinden Ortam Havaına Doğru Gerçekleşen Isı Geçişi için Dirençler .....                                                     | 64 |
| Şekil 3.11 | Birim zamanda yağın sıcaklık değişiminin hesaplanması için izlenen adımlar .....                                                    | 65 |
| Şekil 3.12 | Matematiksel model sonucu elde edilen yağın soğuma eğrisi.....                                                                      | 67 |
| Şekil 3.13 | Motor yağına ısınma ve soğuma döngüsünün temeli .....                                                                               | 69 |
| Şekil 3.14 | Modelin işleyişi konusunda temel adımlar .....                                                                                      | 69 |
| Şekil 4.1  | Karter yağ soğutma testi düzeneği .....                                                                                             | 72 |
| Şekil 4.2  | Motor karterindeki yağın soğuma eğrisi deneysel sonuçları .....                                                                     | 72 |
| Şekil 4.3  | Plastik karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması.....                                                                     | 73 |
| Şekil 4.4  | Plastik karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması-sıcaklık farkları .....                                                  | 73 |
| Şekil 4.5  | Metal karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması .....                                                                      | 74 |
| Şekil 4.6  | Metal karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması-sıcaklık farklar .....                                                     | 74 |
| Şekil 4.7  | Metal karter termocouple pozisyonları .....                                                                                         | 75 |
| Şekil 4.8  | Motor koşullarında karter soğumasının hesaplanması.....                                                                             | 76 |
| Şekil 4.9  | Deneylerin Yapıldığı Düzeneğin Şematik Görünümü .....                                                                               | 77 |
| Şekil 4.10 | 2000 d/d ve yanmanın olmadığı koşullarda motor yağının ısınması .....                                                               | 78 |
| Şekil 4.11 | 2000 d/d ve yanmanın olmadığı koşullarda motor yağının ısınması için deneysel ve model değerleri arasındaki sıcaklık farkları ..... | 78 |
| Şekil 4.12 | Motor yağ sıcaklığının 1000 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                            | 80 |
| Şekil 4.13 | Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                            | 81 |
| Şekil 4.14 | Motor yağ sıcaklığının 2000 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                            | 82 |
| Şekil 4.15 | Motor yağ sıcaklığının 2500 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                            | 82 |
| Şekil 4.16 | 13 L Motor yağ sıcaklığının 1200 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                         | 84 |
| Şekil 4.17 | 13 L 1200 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları.....                          | 84 |
| Şekil 4.18 | 13 L Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                         | 85 |

|            |                                                                                                                                                             |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.19 | 13 L 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları.....                                                  | 85  |
| Şekil 4.20 | 13 L Motor yağ sıcaklığının 2000 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                                                 | 86  |
| Şekil 4.21 | 13 L 2000 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları.....                                                  | 87  |
| Şekil 4.22 | 13 L Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması.....                                                 | 87  |
| Şekil 4.23 | 13 L 1500 devir/dakika ve yanmanın bulunduğu durumda şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları.....                    | 88  |
| Şekil 5.1  | Windage tray kullanımı.....                                                                                                                                 | 90  |
| Şekil 5.2  | Bölmeli Karter Uygulaması .....                                                                                                                             | 91  |
| Şekil 5.3  | Standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor ... yağı soğuması üzerindeki etkisi .....                                           | 92  |
| Şekil 5.4  | Standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları .....                           | 93  |
| Şekil 5.5  | Windage tray uygulaması durumunda standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi.....              | 94  |
| Şekil 5.6  | Windage tray uygulaması durumunda standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi.....              | 94  |
| Şekil 5.7  | Farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi .....                                                       | 95  |
| Şekil 5.8  | Farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları .....                                   | 96  |
| Şekil 5.9  | Windage tray uygulaması durumunda farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi.....                      | 96  |
| Şekil 5.10 | Windage tray uygulaması durumunda farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları ..... | 97  |
| Şekil 5.11 | Windage tray uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi ..                                                                                         | 98  |
| Şekil 5.12 | Windage tray uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları .....                                                                  | 99  |
| Şekil 5.13 | Bölmeli karter uygulaması ısı transfer yolu .....                                                                                                           | 100 |
| Şekil 5.14 | Bölmeli karter uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi.....                                                                                     | 100 |
| Şekil 5.15 | Bölmeli karter uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları .....                                                                | 101 |

|            |                                                                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.16 | Bölmeli karter uygulaması ısı transfer yolu .....                                                                                     | 102 |
| Şekil 5.17 | İzolasyon malzemesinin kalınlığının yağın soğuma evresi üzerindeki etkisi.....                                                        | 103 |
| Şekil 5.18 | İzolasyon malzemesinin kalınlığının yağın soğuma evresi üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları.....                                    | 103 |
| Şekil 5.19 | Farklı karter opsiyonlarının yağın soğuma evresinde kıyaslanması ...                                                                  | 105 |
| Şekil 5.20 | Farklı karter opsiyonlarının yağın soğuma evresinde kıyaslanması – çelik kartere göre sıcaklık farkları .....                         | 106 |
| Şekil 5.21 | Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeninden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması.....                       | 106 |
| Şekil 5.22 | Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeninden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması – viskozite değerleri..... | 107 |
| Şekil 5.23 | Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeninden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması – FMEP değerleri .....     | 107 |
| Şekil 5.24 | Farklı yağ tipleri için viskozite-sıcaklık grafiği .....                                                                              | 110 |
| Şekil 5.25 | Farklı yağ tipleri motorun ısınma evresinde ve sabit referans hızda yağ sıcaklığı grafiği.....                                        | 111 |
| Şekil 5.26 | Farklı yağ tipleri motorun ısınma evresinde ve sabit referans hızda yağ viskoziteleri grafiği .....                                   | 111 |
| Şekil 5.27 | Soğuk ilk çalışmada motor sürtünmelerinin değişimi.....                                                                               | 112 |
| Şekil 5.28 | Farklı yağ tipleri için viskozite-sıcaklık grafiği .....                                                                              | 113 |
| Şekil 5.29 | Farklı yağ tipleri için sıcaklık-zaman grafiği .....                                                                                  | 114 |
| Şekil 5.30 | Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında ısınma evreleri.                                                                 | 115 |
| Şekil 5.31 | Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında sıcaklık farkları                                                                | 116 |
| Şekil 5.32 | Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında viskozite değerleri.....                                                         | 117 |
| Şekil 5.33 | Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında ısınma evreleri.                                                                 | 118 |
| Şekil 5.34 | Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında viskozite değerleri.....                                                         | 118 |
| Şekil 5.35 | Farklı ana yatak çap değerleri için motor yağının ısınma eğrisi.....                                                                  | 119 |
| Şekil 5.36 | Farklı büyüklükteki yatak çapları için yağ viskozite değerler .....                                                                   | 121 |
| Şekil 5.37 | Farklı radyal açıklıklar için motor yağ sıcaklık değişimi.....                                                                        | 122 |
| Şekil 5.38 | Farklı radyal açıklıklar için motor yağ sıcaklık değişimi.....                                                                        | 122 |
| Şekil 5.39 | Farklı motor yağı piston yağ galerisi yüzey alanları için yağın ısınma eğrisi .....                                                   | 123 |
| Şekil 5.40 | Farklı motor yağı piston yüzey alanları için viskozite değerleri .....                                                                | 124 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.41 Referans sabit motor hızı ve yükü için yağ sıcaklığı ve yakıt tüketimi ECU ölçümleri.....                                    | 125 |
| Şekil 5.42 Referans sabit motor hızı ve yükü için yakıt tüketimi ve yağ sıcaklığı eğrisinin oluşturulması.....                          | 126 |
| Şekil 5.43 Farklı karter opsiyonları için 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden başlatılan motorlar için yakıt tüketim değerleri..... | 126 |
| Şekil 5.44 Farklı yağ hacimleri için yakıt tüketim eğrileri.....                                                                        | 128 |
| Şekil 5.45 Referans hacim ve %20 azaltılmış hacim için deneysel kümülatif yakıt tüketim değerleri.....                                  | 129 |

## TABLO LİSTESİ

---

|            |                                                                                                                                                 |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 3.1  | Farklı tipte yağların viskozite sıcaklık ilişkisini veren eğri denklemleri .....                                                                | 56  |
| Tablo 5.1  | Malzemelerin ısı iletkenlikleri .....                                                                                                           | 92  |
| Tablo 5.2  | Karter opsiyonlarının farklı kriterler bakımından kıyaslanması.....                                                                             | 108 |
| Tablo 5.3  | Soğuk ilk çalışmada motor sürtünmelerindeki kümülatif farklar .....                                                                             | 112 |
| Tablo 5.4  | İlk 10 dakika için için FMEP farkları .....                                                                                                     | 114 |
| Tablo 5.5  | Motor yağ hacmi değişikliklerinin FMEP üzerindeki etkileri .....                                                                                | 117 |
| Tablo 5.6  | Motor yağ hacmi değişikliklerinin FMEP üzerindeki etkileri .....                                                                                | 119 |
| Tablo 5.7  | Farklı büyüklükteki yatak çapları için FMEP değerleri.....                                                                                      | 121 |
| Tablo 5.8  | Farklı büyüklükteki yatak radyal açıklıkları için yağ viskozite değerleri.....                                                                  | 123 |
| Tablo 5.9  | Farklı büyüklükteki piston yüzey alanları için yağ viskozite değerleri.....                                                                     | 124 |
| Tablo 5.10 | Farklı karter opsiyonları için 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden başlatılan motorlar için kümülatif yakıt tüketimi yüzdesel farklar ..... | 127 |
| Tablo 5.11 | Yakıt tüketim kıyaslamaları.....                                                                                                                | 128 |

## ÖZET

---

# **MOTORLARDA YAĞLAMA SİSTEMİ ÜZERİNDE YAPILAN DEĞİŞİKLİKLERİN YAĞIN ISINMASI VE MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODEL YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI**

Yusuf KARTAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Övün IŞIN

Günümüzde yakıt kaynaklarının azalması, otomotiv sektöründeki rekabetçi yapı ve regülasyonların çevreyi koruma amacıyla emisyon kısıtlarını giderek artırması motor performansını önemli hale getirmiştir. Motor performansını iyileştirmenin en önemli yollarından bir tanesi motor sürtünmelerini azaltmaktır. Bu sayede aynı motor çıktıları için yakıt tüketimi azalacak, motor verimi artacak, aynı yakıt tüketimi içinse güç artacaktır. Bunun yanında motor sürtünmelerinin azaltılması motor ömrünü de olumlu yönde etkileyecektir.

Motor sürtünmelerinin en yüksek seviyede görüldüğü zaman dilimleri genelde motor yağının soğuk olduğu başlangıç çalışmasıdır. Bu dönemde motor yağı rejim

sıcaklığına ulaşınca kadar motor verimsiz bir çalışma evresi geçirir. Bu evreler istatistiksel çalışmalar göre motor ömründe önemli bir yer kaplar. Bu süreci iyileştirme adına yapılacak geliştirmeler, motor performansı bakımından önemli bir katkı olarak dönecektir.

Motor yağının hızlı ısıtılması ve bu verimsiz başlangıç çalışması evresinin hızlı geçilmesi, yağ viskozitesini daha hızlı düşürecektir. Bu durum da hidrodinamik yağlama gerçekleşen bölgelerde sürtünmeler hızla azalacaktır. Çalışmaların temelinde yatan ilke budur.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalar genel olarak iki grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi yağın rejim sıcaklığına ulaşana kadarki süreçte motor yağına geçen ısının matematiksel olarak modellenmesi ve doğrulanmasıdır. Bu amaçla kurulmuş olan matematiksel model döngüsü 2L ve 13L'lik motorlardan alınan deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Doğrulama işlemi sırasıyla, motor karteri alt modeli, karterin motor üzerinde bağlı iken bulunduğu şartların durumu, motor yanmasının olmadığı durum ve yanmanın olduğu durum için gerçekleşmiştir. Doğrulamanın yapılması ile matematiksel model, yağlama sistem elemanları üzerinde yapılan değişikliklerin bu süreçte yağın ısınması üzerindeki etkilerini araştırabileceğimiz bir araç haline gelmiştir. İkinci grupta ise model yardımıyla gerçekleştirilmiş olan araştırmalar yer almaktadır. Bu bölümde karter geometrisinin motor yağının ısınması ve soğuması üzerindeki etkileri, yağ tipinin ve miktarının etkileri, yatak ve piston boyutlarının etkileri, sürtünmeler üzerinden yapılan kıyaslamalar ile irdelenmiştir. Bunun yanında karter geometrisi ve yağ hacmi için yakıt tüketim değerlendirmesi de gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre motor yağ karterinin malzemesinin değiştirilmesi, cidar kalınlığının artırılması, windage tray uygulamalarının yapılması, yüzeyden izolasyonu ve bölmeli karter uygulamaları motor durduktan sonraki soğuma evresini yavaşlatmada önemli ölçüde etkilidir. Bu durum bir sonraki çalışma için önemli bir avantaj teşkil etmektedir. İyileştirme potansiyelleri göz önünde bulundurularak önerilen motor karter opsiyonları motor duruş sırasındaki soğuma sürecini önemli ölçüde yavaşlatmıştır. Motor sürtünmeleri üzerinden yapılan kıyaslamalara göre 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden çalışma yapılması durumunda sürtünmeler önerilen karter opsiyonuna göre %7,6 ile %19 arasında azalmaktadır. Ağırlık ve performans gözetildiğinde en uygun bulunan opsiyon ise windage tray uygulamalı plastik karter %43 ağırlık azaltma ve %12,5 FMEP azaltma değerleri ile ön plana çıkmaktadır. Karter geometrisi dışında yapılan kıyaslamalardan bir diğeri ise motor yağ tipidir. Motorun yüksek viskoziteli yağ ile çalışması yağın genel olarak hızlı ısınmasını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın hızlı ısınma yüksek viskozitenin yarattığı olumsuz sürtünme değerlerini önleyememiştir. Motor yağ hacminin azaltılmasının motor sürtünmeleri ve yağın ısınması üzerindeki etkisidir. Buradan elde edilen sonuçlara göre motor yağ hacminin %20 ve %40 azaltılması 2L motor için sırasıyla %4 ve %8,5'lik sürtünme azalmalarını sağlamıştır. Bunun yanında aynı kıyaslamalar 13L motorda yapıldığında elde edilen sonuçlar sırasıyla %5,6 ve %11,3'tür.

Bunların yanında motor yatak boyutlarındaki sürtünmeyi azaltacak nitelikteki büyümelerin motor yağının ısınmasını yavaşlattığı fakat toplam sürtünmeleri azalttığı saptanmıştır. Piston yüzey alanı üzerindeki artmalar da yağa geçen ısı hızını

artıracağından yağın hızlı ısınmasını ve sürtünmelerin azalmasını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ayrıca karter geometrisi ve yağ hacmi parametreleri yakıt tüketimi bazında da değerlendirmeye alınmıştır. Kartar opsiyonları üzerinde yapılan kıyaslamalarda 2 saat sonunda yeninden başlatma durumu için elde edilen yakıt tasarrufları opsiyonlara göre %3,7 ile %6,7 arasında değişmektedir. En uygun seçilen opsiyon için yakıt tüketim iyileştirme değeri %5,4'tür. Motor yağ hacminin %20 azaltılması durumu için %2.06 %40 azaltılması durumu içinse %3,8'lik yakıt ekonomisi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** motor yağı, motor yağının ısınması, motor yağının soğuması, yağlama, motor yağ karteri

## **ABSTRACT**

---

# **MODEL AIDED INVESTIGATION OF LUBRICATION SYSTEM COMPONENT CHANGES ON OIL HEAT UP AND ENGINE PERFORMANCE**

Yusuf KARTAL

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Övün IŞIN

Today's decreasing of fuel sources, competition in automotive and emission restrictions due to regulation increases importance of engine performance. One of the most important way to improve engine performance is decreasing of engine frictions. With this case, fuel consumption can be decreased for same engine output, higher engine efficiency is provided or higher power output is provided for the same fuel consumption. Moreover improvement of engine friction means longer engine lifetime.

Higher level engine friction is generally during the engine cold start time period. In this time period until oil reaches the regime temperature, engine runs an inefficient cycle. This period of time takes an important part of engine lifecycle time. Studies to improve this period of time brings good benefit in terms of engine performance.

Faster heating up of the engine oil or passing this inefficient period quickly helps to decrease oil viscosity. This situation makes the friction in hydrodynamic lubrication location within the engine decreased. This is the main idea behind the study.

In this thesis, studies can be composed of two group. First one is the mathematical modelling and its validation of oil heating up during cold start period. Mathematical model loop which is created for this purpose has been validated for 2 L and 13 L engine experimental results. Validation process contains sequences that; pure oil pan sub-model validation, oil pan sub-model for engine condition, no combustion engine run and in state of combustion presence engine run. This validated numerical model became a tool to investigate lubrication system component effect on engine oil cold start heating up performance. Second group is the investigation which is done by mathematical model. In this section, oil pan geometry effects on oil warm up and cool down period, oil type and volume effects, dimensions of bearings and pistons have been investigated in terms of frictions and oil heating up trends.

According to results, oil pan material changes, oil pan wall thickness, windage tray applications, oil pan surface isolation and dual chamber oil pan applications have been found as effective ways to slow down the oil cool down during the engine key off period. This situation brings an important advantage for next start of engine. Oil pan options that are proposed by considering improvement potentials effected on cool down period in key off time. According to comparison on engine frictions for engine restart after 2 hours cool down period, frictions have been decreased in range of %7.6 and %9 for different options. In terms of performance and weight status, best option seems as plastic oil pan with windage tray application which brings %43 weight and %12.5 friction reduction. Another comparison point is the oil type. Engine running with higher level viscosity brings faster oil heat up performance. Contrary to this, faster heating up could not prevent the negative effect of higher viscosity on engine friction. Moreover, oil volume reduction is another point which has been investigated in terms of oil warm up and engine friction. According to results %20 oil volume reduction brings %4 friction benefits whereas %40 volume reduction provides %8.5 friction reduction for 2 L engine. When these comparison is done for 13 L engine, this friction benefits are %5.6 and %11.3 in sequence.

Furthermore, dimensional increasing on engine bearing which tends to decrease engine friction slow the engine oil warm up down but improve the engine friction. Also dimensional increasing on heat transfer surface of engine piston provides faster heat transfer rate from piston to oil. This lead to quicker oil warm up and decrease engine frictions together.

Some of the parameters are also compared in terms of fuel consumption. According to comparisons on oil pan options for restart of the engine after 2 hours cool down period fuel consumption improvements changes in range of %3.7 and %6.7. Best option which selected accordingly performance and weight reduction brings %5.4 fuel consumption benefit. Moreover %20 oil volume reduction provides %2.06 fuel consumption benefit whereas %40 oil volume reduction brings %3.8.

**Key words:** engine oil, engine oil heat up, engine oil cool down, lubrication, engine oil pan

# 1 GİRİŞ

---

## 1.1 Literatür Özeti

Günümüz dünyasında gerek enerji kaynaklarının tükenme riski, gerekse çevreye yayılan emisyonlar için yasalarla belirlenen kısıtların artması nedeniyle yakıt tüketimi ve enerji verimliliği otomotiv sektörünün önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bu bağlamda en kritik alanlardan birisi de motorların soğuk ilk çalışması ve motor yağ sıcaklığının optimum rejim sıcaklığına ulaştırılması süreçleridir. Soğuk çalışma koşullarında ulaşılan maksimum sıcaklıkların düşük oluşu, yanmanın verimsizliği ve yüksek yağ viskozitesi ile bağlantılı olarak yüksek sürtünme değerleri verimi düşüren başlıca etmenlerdir. Motorun soğuk ilk çalışmadaki verimsizliğinin önüne geçmek amacıyla bu süreci kısaltmak veya bu süreci daha verimli hale getirmek oldukça önemlidir. Bu süreci iyileştiren önlemlerden bir tanesi yağ sıcaklığını kısa sürede artırarak; yağ viskozitesini düşürmektir. Bu yolla da sürtünmelerin ve yakıt tüketiminin azalmasının böylelikle motor performansının artırılmasının yolu açılacaktır.

Literatürde araçların çalışma çevrimleri ve kullanıcı alışkanlıkları konusunda yapılmış olan araştırmalar, motorun ilk çalışma sürecinin ve ısınma performansının tüm kullanım ömrü boyunca ne denli önemli bir yerde olduğunu vurgulamaktadır. Goettler vd. yaptığı çalışmalarında Amerikadaki araç seyahatlerinden %80'in 15 km'den daha kısa mesafeler için yapıldığını ortaya koymuştur. Bu mesafeler bir binek aracın ömrü boyunca yaptığı yolun %32'sini oluşturmaktadır. Ayrıca taşıtın ömrü boyunca tüketilen yakıtın %50 sinin bu kısa mesafeli sürüşlerde olduğu

kaydedilmiştir. Bu da yapılan yolculukların önemli bir bölümünün motor ve motor yağı henüz optimum sıcaklığa ulaşmadan sonlandığı anlamına gelmektedir [1].

Andre ise 55 binek araç üzerinde yapmış olduğu istatistiksel çalışmasında araç yolculukların üçte birinin 15 dakikadan az, üçte birinin 15 dakika ve 2 saat aralığında ve diğer üçte birinin de 2 saatten fazla sürdüğü sonucuna varmıştır. Bu da sürüşlerin binek taşıtlar açısından 3 de 1'inden daha fazlası için motor yağı henüz optimum sıcaklığa ulaşmadan seyirin sonlandığı anlamına gelir. Yine aynı çalışmada motor yağ sıcaklığı verileri de toplanarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan araçların yaklaşık 3'de 1 i kadarının seyiri sonlandığında yağ sıcaklıklarının 60°C'nin altında kaldığı saptanmıştır [2].

Andrews vd. ise yine bir başka istatistiki çalışma yaparak 35 araçtan veriler toplamışlardır. Yapılan yolculukların %52 sinin 3 km ve daha kısa mesafelere yapıldığı, bunun yanında yolculukların %67 sinin 11 dakikadan az sürdüğünü belirtmişlerdir. Bu sonuç yine araçların önemli bir bölümü için motor yağının rejim sıcaklığına ulaşmasından önce yolculuğun tamamlandığı fikrini destekler [2],[3].

Liu vd. 1851 yolculuk ve 292 farklı araç ile yapmış oldukları araştırmalarında yolculukların %50'den fazlasının 10 km'den daha kısa mesafelerde yapıldığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu mesafe ve süre araçların tamamen rejim sıcaklığına ulaşmadan yolculukların önemli bir kısmının tamamlandığını gösterir [4].

2017 yılında İngilteredeki seyahat alışkanlıklarını içeren araştırmada elde edilen sonuçlar, eğilimlerin yıllar içersinde kısa mesafeleri araçlarla katetme yönünde devam ettiğini ortaya koymaktadır. 8,05 km altındaki yolculuklarda, %56 oranının araçların kullanıldığı belirlenmiştir [5].

Bu istatistiki çalışmalar motorun soğuk başlangıç çalışması periyodunun araç ömrü açısından önemli olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca yine bu çalışmalar motor yağının rejim sıcaklığına hızlı ulaştırılması ile ilgili çalışmaların etkin bir uygulama sahasına sahip olduğunu da ortaya çıkararak son 20 yılda bu konudaki çalışmaların hızlanmasına zemin hazırlamıştır.

Kullanıcı istatistiklerinin yanı sıra motorun ve motor yağının soğuk ve sıcak çalışma durumlarında gerçekleşen sürtünmeler ve tüketilen yakıt miktarlarını kıyaslar

nitelikteki bilgiler de çalışmacılar için bir diğer motivasyon kaynağını oluşturmaktadır. Will ve Borette'ye göre aracın ilk çalışması sırasındaki motor sürtünme kayıpları, yağın rejim sıcaklığında çalışması sırasında yaşanan sürtünme kayıplarından yaklaşık 2,5 kat daha fazladır [6]. Kunze vd. ise çalışmalarında başlangıç yağ sıcaklığının 25°C ve 90°C olması durumlarında aradaki farkın yakıt tüketimi açısından %10 dolaylarında azalmaya neden olduğunu vurgulamışlardır [7]. Trapy ve Damiral da soğuk ilk çalışmada yakıttaki enerjinin yalnızca %9'luk bir kısmının efektif işe dönüştürülebildiğini belirtmişlerdir. Bu durumda motordaki su ve yağ gibi akışkanların yanı sıra motor elemanlarının da kendi optimum sıcaklıklarının uzağında olması ana neden olarak kabul edilmiştir [8]. Bunun yanında Lee vd. FTP 75 çevriminde yaptığı kıyaslamada, çevrimin soğuk ilk çalışma olan ilk kısmının, sıcak koşullarda koşulan son kısmına göre oldukça verimsiz olduğunu ve kötü bir yakıt ekonomisine neden olduğunu ortaya çıkarmıştır [9].

Araçlarda soğuk ilk çalışmanın önemi konusunda ortaya koyulan verilerden hareketle, araştırmacılar süreci kısaltmak ya da daha verimli hale getirmek için birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar genelde düşük viskoziteye daha hızlı ulaşmak amacıyla yapılan; yağı optimum rejim sıcaklığına hızlı ulaştırmayı amaç edinen yöntemlerden oluşmaktadır. Bunun yanında sıcaklıklardan bağımsız olarak doğrudan yağın tipi ve içeriği üzerinde değişiklik yaparak viskoziteyi düşürmek de metotlardan biri olarak araştırmacıların konusu olmuştur.

#### **1.1.1 Egzoz Gazının Yağın İlk Isınmasında Kullanılması**

Yanma sonucu açığa çıkan ısının yaklaşık %60 dolaylarında bir kısmı soğutucu akışkan ve egzoz gazlarına geçmektedir. Özellikle egzoz gazları yolu ile kaybedilen ısı önemli bir potansiyel teşkil etmektedir. Araştırmacıların önemli bir bölümü bu gazların farklı metodlar yardımıyla; soğuk ilk çalışmada yağı ısıtmak amacıyla kullanılabileceği fikrini desteklemişlerdir.

J. Kim vd. yağın ısınma sürecini irdelemek adına GT Suite programı yardımı ile bir model ortaya koymuşlardır. Bu modelde, motor modeli, yağlama sistemi modeli ve soğutma modeli birbirine entegre çalışmaktadır. Entegre modeli 2L dizel motorundan aldıkları test verileri ile doğrulamışlardır. Bunun yanında ilk çalışma

sırasında egzoz gazları ile yağ arasında ısı transferini sağlamak üzere bir ısı değiştirici tasarlamışlardır. Tasarlanan ısı değiştiricinin Matlab yardımıyla GT suite'deki modele entegre edilmesi sağlanmıştır. Çalışma sonucu elde edilen yağ sıcaklık trendi sürtünme modeli içersinde irdelenmiştir. Model iki farklı koşul için NEDC çevriminde kullanılmıştır. Isı değiştiricinin yağ ısınma performansına olan etkisi ile 28°C'lik normal çevresel koşullar için % 0,54 lük bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır. İlk 100 sn için EGR'nin by-pass edilmesi özelliğinin de ortadan kaldırılmasıyla yağ bu süre içersinde de egzoz gazları yardımıyla ısıtıp, bu sayede % 1,08 seviyesinde yakıt ekonomisi sağlanmıştır. Araştırmacılar aynı analizi -7 °C'lik soğuk hava koşulları için tekrarlayıp elde ettikleri sonuçlara göre bunun yakıt ekonomisine katkısının % 2,78 civarında olduğunu göstermişlerdir [10].

Grimaldi vd. de benzer bir çalışmayı 2,8 litrelik dizel motor için yapmışlardır. İlgili motor yağının ısınması ve sürtünme modellerini GT-Suite programı içersinde kurmuşlardır. Modellerini farklı devir sayıları, yük koşullar, FMEP ve yağ sıcaklıkları için doğrulamışlardır. Burada FMEP motordan çıktı olarak alınan iş şeklinde kabul edilebilir. Doğrulama sonrasında egzoz gazının belirli oranda ısı vereceği kabulü yapılarak; egzoz gazı ve yağ arasında ısı değiştirici tanımlanmıştır. Bu yaklaşım sonrası standard model ve ısı değiştiricili model karşılaştırılmıştır. Buna göre ısı değiştirici uygulaması olan motor modelinde yağ rejim sıcaklığına 335 saniyelik bir sürede ulaşırken, standart motorda bu süre 875 saniyedir [11].

Wenzel vd. ise benzer bir araştırmayı farklı test çevrimleri için deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmanın temel amacı; soğuk ilk çalışmada egzoz gazlarındaki faydalı ısıların çevrimlere göre kıyaslanmasıdır. Çalışma içersinde soğutucu akışkanın motor yağından daha hızlı ısındığı bu nedenle motor yağının ısınmasına önemli bir katkı sağladığı fikrinden yola çıkılmıştır. Soğutucu akışkanın hızlı ısınmasının temel nedeni egzoz sistemini soğutmada kullanılmasıdır. Motor yağının; soğutucu akışkanın işini yerine getirmesiyle daha hızlı ısıtılması amaçlanmaktadır. Bu noktada yapılan bir diğer vurguda motor yağının rejim sıcaklığına ulaşmasından sonra yağın bir valf yardımıyla by-pass edilmesinin gerekliliğidir. Çünkü yağın by-pass edilmemesi halinde istenenin üzerinde yağ sıcaklıklarına neden olur. Çalışma içersinde ilk olarak yağın optimum sıcaklıkta başlaması ile ortam sıcaklığında

başlaması arasındaki farklar ölçülerek elde edilebilecek maksimum faydalar karşılaştırılmıştır. Test ölçümleri NEDC, WLTP ve FTP75 için yapılmıştır. Buna göre motor yağı ve soğutucu akışkan rejim sıcaklığında başlatıldığında, soğuk çalışmaya göre en büyük yakıt ekonomisi farkı NEDC çevriminde elde edilmiştir. Sıcak başlamada % 10 dolaylarında bir tasarruf sağlanmaktadır. NEDC çevriminin diğerlerine göre normal şartlarda motoru daha geç ısıtacak bir karakteristikte olması bu farkı ortaya koymaktadır. Bu çevrimde egzoz gazı sıcaklıkları ise 5 dakika içerisinde 200°C'ler dolaylarında ölçülmüştür. WLTC ve FTP75 çevrimlerinde ise elde edilen yakıt tasarrufları sırasıyla % 5,8 ve %4,7'dir. Egzoz gazlarının bu iki çevrimin karakteristikleri nedeniyle 3 dakika içerisinde 400°C'ler civarına taşındığı söylenebilir. Bu da egzoz gazlarının yağın ısınmasında daha kullanılabilir olduğunu göstermektedir. İlgili testler yağın egzoz gazı ile ısıtılması durumu için tekrarlandığında NEDC çevrimi için kayda değer bir artış ölçülemese de WLTP çevriminde yüksek egzoz gazı sıcaklıkları nedeniyle % 1,2'lik bir yakıt ekonomisi elde edilmiştir. Özellikle bu oran ilk 600 saniye için % 3,9'a çıkmaktadır. Bu testler WLTP ve FTP75 çevrimleri için -7 °C'de tekrar edildiklerinde ise elde edilen yakıt tasarrufları sırasıyla % 2,1 ve % 3,9 olmuştur. Bu çevrimlerden soğuk çalışma esnasında yüksek fayda görülmesi faydalı egzoz gazı sıcaklıklarına hızla ulaşılması ile açıklanmıştır [12].

S. Uppuluri vd. egzoz gazı ısı geri kazanım sisteminin motor sürtünmeleri ve yakıt ekonomisi üzerindeki etkilerini 1,2 L'lik bir benzinli binek araç için araştırmışlardır. Araştırmalarında sürücü davranışlarının, kullanım çevrimlerinin ve araç özelliklerinin yer aldığı bir araç modeline yer vermişlerdir. Matlab simulink yardımıyla kurulan bu model; motor, aktarma organları, şasi ve sürücü modelleri gibi alt modellerin integrasyonundan oluşmaktadır. Bunun yanında araç modelinden bağımsız olarak yağ ve soğutucu akışkanların sıcaklıklarını sağlayabilecek bir termal model de kurmuşlardır. Termal modelden elde edilen sıcaklık verileri araç modelinde kullanılarak, sürtünme ve yakıt ekonomisi üzerinde etkinlikleri gözlemlenmiştir. Çalışmada ortaya koyulan fikir; egzoz gazından ısı geri kazanımının aktif olduğu bir çalışma senaryosunun pasif olduğu çalışma senaryosuna göre motor sürtünmeleri bakımından daha verimli koşullar sağlayacağıdır. Egzoz ısısı geri kazanım sistemi ile; gazların soğutucu akışkanın

sıcaklık trendini artırması ve dolaylı yoldan ilk çalışma için yağa geçen ısı üzerinde etkili olması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda egzoz gazından ısı geri kazanımının; MIDC için % 0,72'lik bir yakıt ekonomisi katkısı gözlenirken, rejim sıcaklığına ulaşma süresi 893 saniyeden 543 saniyeye düşmüştür. Aynı analizler hindistanda kullanılan Pune Sürüş çevrimine göre tekrarlandığında da yakıt ekonomisine katkısı % 0,36'ya düşerken rejim sıcaklığına ulaşma süresi 641 saniyeden 341 saniyeye ulaşmıştır. Aradaki önemli farkın nedeni Pune çevriminin daha sert karakteristikli olmasıdır. Bu da çevrim tipinin ilk ısınma konusundaki etkisinin önemini ortaya koyar [13].

Will ve Boretti ise egzoz gazının motor soğutucu akışkanı ısıtmada kullanılmasının dolaylı yollardan yağın ilk ısınması için verimli bir yöntem olmadığı fikri üzerinde durmuşlardır. Bir çok araştırmacı tarafından desteklenen bu fikrin temelinde egzoz gazları ile ısıtılan soğutucu akışkan; daha yüksek sıcaklıklara ulaşacağı için silindiri yeterince soğutamayacak, bu sayede silindir cidarlarını yüksek sıcaklıklarda kalacak ve bunun sonucunda da motor yağının ısınması sağlanmış olacaktır. Bu metotta ısı transferi egzozdan yağa ulaşana kadar soğutucu akışkan ve blok cidarına uğrayacağı için kayıplar yüksektir. Çalışma içersinde yer alan hesaplamalara göre bu tür bir etki ile yağ sıcaklığını artırmanın yakıt ekonomisi üzerindeki etkisi % 0,2'den daha fazla değildir. Buna karşın doğrudan egzoz gazı ve motor yağı arasında ısı değiştirici tasarlanması durumunda yakıt ekonomisi daha yüksektir. NEDC çevriminde 6 silindirli 4 L dizel araçta yapılan ve 5 kez tekrar edilen testlerde elde ettikleri sonuçlara göre tasarlanan ısı değiştiricisinin aktif olması durumunda %7 dolaylarında yakıt ekonomisi sağlanmıştır. Bu rakam NEDC'inin şehir içi çevrimi kısmında %8 civarındadır [6].

Boretti ve Watkins turbo buharlaştırıcı sistemi yardımıyla motor soğutucu akışkanının soğuk ilk çalışma sırasındaki ısıtılmasını incelemişlerdir. 1,8 litrelik benzinli motor için oluşturdukları ve doğruladıkları modeli; aracın hibrit modelini yeniden düzenleyerek GT Suite programında yeniden çalıştırmışlardır. HEV araç için motorun ilk ısınması sırasında motorun diğer kısımlarında olduğu gibi yağ sıcaklığı için de önemli bir gelişim gözlemlemişlerdir. Bu sayede motor yağı sıcaklıklarının daha hızlı artması sağlanmıştır. %6 lık bir yakıt ekonomisi değerine ulaşmış olsalar

da bu gelişimin nedeni motorun elemanlarının daha hızlı sıcak çalışmaya başlamasıdır. Sürtünmeler üzerindeki etki çalışmada ihmal edilmiştir [14].

Burke vd. ise soğuk ilk çalışma periyodundaki kayıpları azaltmanın yolu olarak yanma, soğutma ve yağlama proseslerinin termal yönden etkileşiminin irdelenmesi gerektiğini düşünmüşlerdir. Bu kapsamda dizel motorda soğutucu akışkanın çektiği ısıyı motor ilk çalışma periyodunda azaltmak için elektrikli soğutucu akışkan pompasının debisini motor çalışma parametrelerinden bağımsız olarak azaltacak şekilde ayarlamışlardır. Bu şekilde soğutucu akışkana geçen ısının ilk çalışma periyodu için yağ ve diğer elemanlarda daha fazla kalması sağlanmıştır. Bunun yanında egzoz gazlarının tasarlanmış olan ısı değiştirici yardımıyla motor elemanlarının ve yağının ısıtılmasında kullanılması amaçlanmıştır. Alınan bu önlemler sonucunda dizel motorda elde edilen sonuçlara göre soğuk ilk çalışma periyodunda motor sıcaklıklarının ortalama 50°C'den 80°C'ye yükselmesi sağlanmıştır. Bu artış yağ viskozitesinin ortalama olarak %67, motor sürtünmelerinin ise %44 dolaylarında azalmasını sağlamıştır. Yakıt tüketimindeki azalma ise %0,7 olarak vurgulanmıştır. Elde edilen verilere rağmen özellikle motor sıcaklıklarının artmış olmasının yanma gecikmesini azaltacağı, bunun yakıt tüketim değerlerini düşüreceği vurgulansa bile Nox emisyonlarını yükseltmesi beklenir. Bu durum kurulmuş olan modelin bir eksikliği olarak araştırılmalıdır. Yapılan çalışma yanma modeli bazlı olmadığı için bu etki sonuçlar üzerinde gözardı edilmiş durumdadır [15].

Di Battista ve Cipollone ise 3L motor üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında egzoz gazları yardımıyla ısıtılan motor yağında standarda göre 2-5 °C'lik bir artış sağlandığını bunun karşılığında %2,6'lık bir tasarruf sağlandığını bildirmişlerdir [16].

Rai S. vd. egzoz gazlarını motor soğutucu akışkanını ısıtmada kullanmışlardır. SA vasıtasıyla motor yağının soğuk ilk çalışmada daha hızlı ısıtılması amaçlanmıştır. Bu sayede motor yağının 90°C sıcaklığa standart duruma 685 saniyede gelmesi sağlanmıştır. Bu süre standart motor için 740 saniyedir. Süredeki kısalmanın yanısıra yaklaşık %7lik bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır [17].

### 1.1.2 Yağ Hacminin Değiştirilmesi

Andrews vd. motorun soğuk ilk çalışması esnasında yağı rejim sıcaklığına daha kısa sürede ulaştırmaya yönelik olarak yapmış oldukları çalışmalarında, ilk çalışma sırasında toplam yağ miktarının yalnızca belirli bir kısmının motor içersinde dolaştırılmasının ilk ısınmayı olumlu etkileyebileceğini bildirmişlerdir [18].

Zammit vd. ise yapmış oldukları çalışmalarında yalnızca yağ hacmini azaltmanın yakıt ekonomisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada simülasyon modeli ile soğuk çalışma konusunda analizler yapılmıştır.. Bu analizleride yağ miktarının farklı oranlarda azaltılmasının yakıt ekonomisi üzerindeki etkilerini incelemiştir. NEDC çevrimi için yapılan analiz sonuçlarına göre yağ miktarını %20 azaltmanın % 0,83'lük bir yakıt ekonomisi sağladığı görülmüştür. Aynı simülasyon yağ miktarı %40 azaltılarak uygulandığında ise sonuç % 1,08 civarındadır. Yağı azaltmış olmak ısınma döngüsüne katılacak olan kütleyi azaltmak anlamına gelecektir. Yağa sabit ısı girişi yapıldığı dikkate alınırsa kütlenin azalması sıcaklık artışlarının daha hızlı gerçekleşmesine olanak sağlayacaktır [19].

Reveraud vd. ise yaptıkları çalışmalarında diğerlerinden farklı olarak hibrit araçlarda kabinin ve yağın soğuk ilk çalışmadaki performansları üzerine yoğunlaşmışlardır. Özellikle hibrit araçlarda elektrikli çalışma opsiyonunun ve start stop özelliklerinin yağın optimum sıcaklığa ulaşma süresini olumsuz etkilediklerini ve bu süreçte motor sürtünmelerinin oldukça arttığı hipotezini ortaya koymuşlardır. Çalışmalarının ilk kısmında flowmaster analiz programındaki program kalıpları yardımıyla soğutma, yağlama gibi döngüleri içeren bir 1,6 L 1D motor modeli ve 1D araç modeli kurarak; modelleri NEDC çevrimi için doğrulamışlardır. Çalışmada modeller ilk olarak aynı tür aracın hibrit ve dizel versiyonları için 45 km/h'lık sabit hızla 30 dakikalık çevrim çalıştırmışlardır. Çevrimin sonunda ölçtükleri yağ sıcaklığı klasik motor için 84°C iken elektrikli motor opsiyonu için 60 °C'dir. Motor soğutucu akışkanları için bu fark 46°C dolaylarındadır. Yağın ilk ısınması konusundaki dezavantajı ortadan kaldırmak üzere ortaya atılan önerilerden biri yağ miktarının organize edilmesi stratejisidir. Ortaya atılan fikirde yağ emiş borusunun etrafı çok delikli bir pota ile çevrelenerek küçük bir yağ hacmi oluşturmaya amaçlanmıştır. Bu sayede yağın lokal bir

bölgesindeki yağ kütlesi sürekli olarak motor içerisindeki döngüye katılacak ve bu bölge rejim sıcaklığına daha çabuk ulaşacaktır. Bu sırada karterin diğer kısımlarındaki yağ göreceli olarak daha yavaş ısınır. Kurulmuş olan model NEDC, AU ve AR çevrimleri için çalıştırılmıştır. Analizler karterdeki yağın % 20'sinin ve %40'ının delikli yapı ile çevrelenmesi durumları için tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yalnızca %20'lik bir kısmın aktif olarak motorun ilk çalıştırılmasında döngüye katılması durumunda; NEDC çevriminde yaklaşık %4-5 AU çevriminde yaklaşık %4-4,5 ve AR çevriminde %2-3 dolaylarında bir yakıt tüketimi, yağın %40 dolayında ayrılması durumunda sırasıyla NEDC çevrimi için %3,5-4 AU çevrimi için % 3-3,5 ve AR çevrimi için ise % 2-2,5 lik bir yakıt ekonomisi katkısı sağlandığı gösterilmiştir [20].

Chisaki vd. araştırmalarında yağ miktarının yağın ısınma performansına olan etkisini irdelenerek ortaya çıkan ısının motor elemanları, motor yağı ve soğutucu akışkan ısıtarak depolandığı fikrinden yola çıkılmıştır. Bu üç elemanın kütleleri üzerinde değişiklikler yapmak açığa çıkan ısı sabit kabul edildiğinde sıcaklıkların yükselmesi anlamına gelecektir. Çözüm önerileri arasında yer alan motor elemanlarının ağırlıklarını azaltmak fikri diğer araştırmacılarca da sürekli değerlendirilmektedir. Soğutucu akışkanın miktarı ile oynamak da çözüm yaklaşımı kabul edilebilir fakat bu yaklaşım motorun soğutma kapasitesi hedefiyle ters düşer. Buna karşın yağ miktarını azaltmak bir çözüm olarak sunulabilir. Ortaya koyulan hipoteze göre yağ miktarını düşürmek hızlı ısınmayı sağlasa da yağ ömrünü kısaltacaktır. Ortaya koyulan çözümde yağ karteri iki bölmeden oluşmaktadır. Buna göre yeterli miktarda yağ; motorun ilk çalışmasında ilk bölmeden çekilmektedir. Motor durduktan sonra motor döngüsü içerisinde dolaşan yağ iç bölmeyi dolduracak iki bölme arasındaki boşluk yolu ile dış bölmedeki yağa karışacaktır. Bu sayede yağ içerisindeki atık maddelerin motor yağının tüm hacmi tarafından homojen olarak paylaşılması sağlanarak, yağın ömrünü erken doldurmasının da önüne geçileceği bildirilmiştir. Aynı çalışmada bu homojenliğin sağlandığı çok sayıda start-stop yaptırıldıktan sonra alınan ölçümlerle gösterilmiştir. 100 start-stop sonrası iki bölme arasındaki yağın %70 oranında 400 start stop sonrasında ise %100 oranında karıştığı görülmektedir. Araştırmada 2,0 L dizel motor için yapılan testlerde bölmeli tip karterin yağ ısınma performansına olan etkileri irdelenmiştir. NEDC çevriminde

yapılan testin sonuçlarına göre, iç bölmedeki yağ sıcaklığı çevrim sonunda 90°C dolaylarına ulaştığı halde, dış bölmede yalnızca iletimden kaynaklı ısınma ile yağ sıcaklığı 40° C dolaylarına ulaşabilmiştir. Bu sayede ısınma prosesinde önemli bir gelişme gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yakıt ekonomisinde %0,8'lik bir iyileşme elde edilmiştir. Bunun yanında dış bölmenin izole edici etkisi üzerinde durulmuş olsa da bu konuda herhangi bir analiz ya da test yapılmamıştır [21].

Law vd. de 2,4 L motor üzerinde yapmış oldukları çalışma ile yağ miktarını azaltmaya yardımcı olan bir akıllı karter uygulamasının yağ sıcaklıkları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu karter uygulamasında yağın önemli bir bölümü kapalı bir haznede bekletilerek düşük hacimli bir kısmın motor içersinde dolaşması hedeflenmiştir. Dolaşan yağ miktarı bir valf yardımıyla ayarlanmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda motor yağ sıcaklığının standart kartere göre 5°C daha yüksek seyrettiği ve bunun etkisiyle motor sürtünmelerinin %10 dolaylarında azaltıldığı tespit edilmiştir [22].

Çerkezoğlu 2,2 L dizel motorda yapmış olduğu deneysel çalışmasında standart karter üzerinde yağ hacmindeki azaltmanın soğuk ilk çalışmadaki yakıt ekonomisi üzerindeki etkisini irdelemiştir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlara göre, %0,5-0,75 dolaylarında bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır [23].

### **1.1.3 Yağ Isı Korunumu**

Motor yağını istenilen rejim sıcaklığına ulaştırma metotlarından bir tanesi de motorun çalışması tamamlandıktan sonra ortam sıcaklığına ulaşma süresini uzatmaktır. Böylelikle aracın çalışmadığı sürede motoru ve motor yağını aynı süreler için de daha sıcak bir seviyede tutulması sağlanacaktır. Bu düşünceyle özellikle soğuk koşullarda ve de kısa yolculuklarda ulaşılması zor olan optimum yağ sıcaklığına ulaşma süresi kısılacak motor sürtünmelerinde de önemli gelişmeler sağlanacaktır.

Muscio ve Mataranni yaptıkları çalışmada motorun soğuma sürelerini ve soğuma trendlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar yağ sıcaklıkları ile sürtünmeler arasında ilişkiyi ortaya koyan bir modele yer vermişlerdir. Daha sonra ise motor soğuma trendlerini motor elemanlarının malzemeleri ve ağırlıkları

temelinde araştırmışlardır. Ortaya koydukları motor soğuma modeli ile standart bir 1,4 L'lik benzinli motorun 2-3 saatlik bir sürede ortam sıcaklığına döndüğünü, polüretan malzeme kullanılarak tümüyle izole edilmiş bir motor için ise bu sürenin 10 saat dolaylarında olduğunu belirtmişlerdir. 2-3 saat sonunda yeniden başlatılan iki motor için yakıt tüketimleri arasında kış koşullarında % 8-9 yaz koşullarında ise % 5 dolaylarında bir fark oluşacağı sonucuna varılmıştır. Aynı analiz 10 saat sonunda ve 0°C ortam koşulları için tekrarlandığında motor çalışmaya başlama sıcaklıkları arasında 30°C'lik bir fark ortaya çıkmış, bu farkın etkisi ile de yakıt tüketimleri üzerinde %15 dolaylarında bir iyileştirme elde edilmiştir. Bunun yanında kullanılan polüretan izolasyon malzemesinin kalınlığının motorun ortam sıcaklığına dönmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yine elde edilen sonuçlara göre izolasyon malzemesinin 30 mm'den daha fazla kalınlaştırılmasının kaydedeğer sonuçlar vermediği sonucuna varılmıştır. Çalışmada vurgulanan bir diğer konu ise motoru tümüyle izole etmenin maksimum sıcaklıkları yukarılara taşımamasını engellemek adına yağ soğutma modülünün kapasitesinin artırılması gerekliliğidir. Soğutma modülü daha yüksek kapasite sağlayacak şekilde fazla yüzey alanına ya da fazla soğutucu debisi katkısına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle bu tür bir izolasyon çalışmasına motor tasarımının en erken fazlarında karar verilmesi gerekmektedir [24].

Bent vd. boşa ve soğuk ilk çalışmadaki yakıt ekonomisini artırma amaçlı olarak deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Üzerinde durmuş oldukları temel nokta motorun bir önceki çalışmasından depoladıkları enerjiyi bir sonraki çalışmada yağın ve soğutucu akışkanın ısıtılması sırasında kullanma fikridir. Soğutucu akışkanı sıcak tutmak için tasarladıkları su deposunda bir sonraki çalışma için korudukları sıcak soğutucu akışkanın kullanımı ile %2,3 dolaylarında yakıt ekonomisi sağladıklarını göstermişlerdir. Bunun yanında motorun farklı kısımlarını izole ederek yağı bir sonraki çalışma için daha yüksek sıcaklık seviyelerinde tutma amaçlı karşılaştırmalı ölçümler alınmıştır. Çalışmada akışkanların soğuma süreleri ve ulaşılan sıcaklıkların karşılaştırılması yapılmıştır. 25 mm kalınlığında 0,04 W/m.K termal iletkenliği olan keçe ile motor üzerinde farkı opsiyonlar ile kaplamalar yapıldığında yağın ısınması ve soğuması konusunda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Opsiyonlar arasında, izole edilmemiş standart motor, yalnızca karteri

izole edilmiş motor, karteri ve aktarma organları izole edilmiş taşıt ile tümüyle izole edilmiş motor seçenekleri bulunmaktadır. 1,6 L 4 silindirli benzinli motor için yapılan ölçümlerde 1500 rpm ve 2 bar BMEP koşullarındaki soğuk ilk çalışma ölçümü ile çalışma sonlandıktan sonraki soğuma için karterdeki yağ sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Motor durduktan 2,25 saat sonra izole edilen motor için yağ sıcaklığı standart motordan yaklaşık 15°C daha fazladır. Yalnızca karterin izole edildiği opsiyonda ise bu süre sonunda elde edilen sıcaklık farkı 7-8°C dolaylarındadır. Buna karşın tüm opsiyonların aynı sıcaklıktan başlamasıyla gerçekleştirilen soğuk ilk çalışmadaki ısınma trendleri arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Araştırmacılar bu durumu izolasyon malzemelerinin termal kütle teşkil etmemelerine dayandırmışlardır. Termal kütle teşkil eden ve ısıyı üzerinde tutan malzemelerin ilk çalışmadaki ısınma periyodunu olumsuz etkileme durumu söz konusu olabileceği bildirilmiştir [25].

Kamo vd. ise 2,3 Litrelik tek silindirli motor üzerinde, izolasyonun motorun sıcak çalışmasına ve sürtünmelere olan katkısını deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Bu çalışmalarında standart motor, yalnızca silindiri izole edilmiş motor ve tümüyle izole edilmiş motor seçeneklerini kıyaslamışlardır. İzolasyon ısı iletkenliği 2,404 W/m.K olan seramik kompozit malzeme 0,51 mm kalınlığında yapılmıştır. Deneyler farklı sabit motor devirleri için tekrar edilmiştir. 1400 devir için yapılan çalışmada elde edilen sürtünme değerlerine göre standart motorda 33,8 psi'lik bir FMEP elde edilirken bu değer yalnızca silindirin izole edilmesi durumunda 32,1 psi motorun tümüyle izole edilmesi durumunda ise 26,7 psi olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu veriler motorlardaki ısı korunumunun, motor yağı sıcaklığına dolayısı ile de motor sürtünmelerine olan etkisi olarak ele alınmıştır [26].

Salunkhe ve Shembekar da motoru izole etmenin enerjiyi depolama ve sonraki çalışma katkıları üzerinde durmuşlardır. Yaptıkları araştırma ile izolasyon malzemesinin boyutlarının, malzeme özelliklerinin ve geometrisinin enerji korunumuna etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre en önemli faktörlerden birinin ana motor kütesinin izolasyon malzemesi kütesine oranı olduğunu saptamışlardır. Bu oranın düşmesiyle kaplamanın ısı direncinin arttığı ve motorun, yağın ve SA'nın ısınma performansının düşürüldüğü vurgulanmıştır. Buna

karşın kaplama mazemesinin termal iletkenliği düşük bir malzeme olarak seçilmesi oldukça etkin bir yol olarak bildirilmiştir [27].

Fabian vd. motorun soğuma evresindeki yağ sıcaklıklarını farklı izolasyon durumları için deneysel ve nümerik olarak irdelemişlerdir. Bu amaçla motorun 16 mm köpük izolasyonu ve 9 mm'lik fiber katmanlı sandviç yapı durumları için kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre soğuma başladıktan 4 saat sonra standart motor yağ sıcaklığı 30°C seviyesine geldiğinde izolasyonlu motor 55°C dolaylarındadır. Ayrıca izolasyonlu motor yağ sıcaklığı 13 saat sonra 30°C seviyesine ulaşmaktadır [28].

Völker vd. ise yapmış oldukları çalışmalarında 1,4 L benzinli motorda motor soğuma süresini 3 saat olarak tespit etmiş, bu sürenin poliüretan malzeme izolasyonu ile 14 saate yükseldiğini saptamışlardır. Soğumaya bırakılan standart ve izolasyonlu motorlar 3 saat sonunda yeniden çalıştırıldığında elde edilen sonuçlara göre kış koşullarında %8-9, yaz koşullarında ise %5 dolaylarında bir yakıt ekonomisi sağlandığı belirlenmiştir. Çalışma motor sıcaklığı ile ilgili de olsa bu verimlilikte motor yağ sıcaklığı ve sürtünmelere etkisinin rolü büyüktür [29].

Minovski vd. 5°C ortam koşullarında yapmış oldukları çalışmalarında soğuma süreçleri için standart motoru, kısmi izolasyonlu motoru ve tam izolasyonlu motoru kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre motor yağ sıcaklıkları yarı izolasyonlu motorda 20°C, tam izolasyonlu motorda ise yaklaşık 40°C daha yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu farklar yeniden çalışma zamanına ve ortam sıcaklığına göre değişmekle beraber %1,5-2,5 dolaylarında bir yakıt ekonomisi getirmektedir [30].

Stouffer vd. ise yapmış oldukları çalışmada 11 mm kalınlığındaki izolasyon malzemesinin soğuma sürecindeki etkisini incelemişlerdir. Buna göre motor yağının referans sıcaklığa standart motorda 6 saatte ulaştığı gözlemlenirken, izolasyonlu motorda bu süre 10 saate yaklaşmaktadır. Bu durum bir sonraki çalışma için avantaj teşkil etmektedir [31].

#### **1.1.4 Yağ Tipinin Etkisi**

Yağın rejim sıcaklığına daha hızlı ulaştırılarak düşük viskozite baremine daha çabuk gelmesini temin etmek; soğuk ilk çalışmada düşük motor sürtünmelerine ve düşük

yakıt ekonomisine olanak sağlayacaktır. Bunun yanında yağ tipi ve yağın iç yapısı üzerinde değişiklikler yaparak doğrudan viskoziteler üzerinde etkili olmak da motor sürtünmelerini azaltan bir başka metottur.

Kumar vd. yaptıkları çalışmada düşük viskoziteli ve farklı kimyasal bileşime sahip motor yağı kullanımının, küçük kamyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 15W40'lık yüksek viskoziteli yağ ile farklı içeriklerdeki 10W30'luk düşük viskoziteli yağın kıyaslamasını 3,7 Litrelik dizel araç için dinamometre testinde, soğuk ilk çalışma koşulları için gerçekleştirmişlerdir. DBDC için yapılan dinamometre testinden elde edilen sonuçlara göre düşük viskoziteli yağ kullanımının %1,08 dolaylarında bir yakıt ekonomisi katkısı sağladığı görülmüştür. Yağ içeriğindeki vizkozite düzenleyiciler arttırıldığında yakıt ekonomisinin %3,42'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Bunun yanında sürtünmelerin azalması ve ihtiyaç duyulan motor gücünün düşmesi ile emisyonların genelinde bir düşüş olduğu da belirtilmiştir [32].

Viskozite düzenleyiciler genelde polimer moleküllerden oluşurlar. Polimerlerin yüksek sıcaklıkta daha çözünür olması sebebiyle; akışkanın yapısına katılarak viskoziteyi artırır ve böylelikle yüksek sıcaklıklardaki film incelmesini önleyici etki yaparlar. Yüksek sıcaklıklarda düşük viskoziteyi önleyebilme etkisi sayesinde, düşük sıcaklıklar düşünülerek düşük viskoziteli bir yağ seçmek mümkün olacaktır. Michlberger vd. farklı yağ tipleri ve vizkozite düzenleyicilerin kombinasyonları şeklindeki farklı yağları sürtünme performansları bakımından kıyaslamışlardır. 3,6 litre motorlu dizel araç için yapmış oldukları araç ve motor testlerinde elde ettikleri sonuçlara göre uygun oranda viskozite düzenleyici eklemenin yakıt ekonomisine %0,47 dolaylarında bir katkı verdiği sonucuna varılmıştır. Bunun yanında 10W40'lık yüksek viskozite yağ kullanımından 0W16 düşük viskozite yağ kullanımına geçilmesi % 0,35 dolaylarında bir başka katkı getirmektedir. Testlerde kullandıkları çevrim FTP-75 ve HwFET çevrimlerinden türetmiş oldukları özel bir çevrimdir [33].

Carden vd. düşük viskozitede yağ kullanımlarının yakıt ekonomisini düşürse de aşınmalar üzerinde olumsuz etkileri olabileceği fikrinden yola çıkarak yaptıkları testlerde bu iki durumu karşılaştırmalı olarak ele almışlardır. Çalışmalarında

diğerlerinden farklı olarak soğuk çalışma yerine sabit sıcaklıkta ölçümler almışlardır. ESC çevrimi ile elde ettikleri test sonuçlarıyla viskozite değerlerindeki %23'lük bir azalmanın % 0,6'lık bir yakıt ekonomisi, %36'lık bir azalmanın ise % 0,9'luk bir yakıt ekonomisi sağladığını bildirmişlerdir. Fakat düşük viskoziteli yağ kullanımının özellikle piston kafası civarında aşınmaları artırması ise bu yöntemin olumsuz tarafıdır. Yine aynı çalışmada ortaya koyulan bir diğer fikir de ise yağ rejim sıcaklığının 90°C'den 130°C ye çıkarılması uzun seyirlerde yine viskoziteyi ve dolayısıyla da yakıt tüketimini % 0,2 civarlarında daha fazla azalttığıdır [34].

Ashok ise 1,2 litrelik dizel motor için yapmış oldukları çalışmalarında, farklı tiplerde yağları ve soğutucu akışkanları dışardan şartlandırıcı yardımı ile farklı sıcaklıklara ayarlayarak karşılaştırmalardır. Alınan ölçümlere göre 15W40 yağ için sıcaklığı 60°C'dan 130°C'a ve soğutucu akışkan su sıcaklığı ise 25°C'den 90°C'a çıkartıldığında aynı özellikteki yağ için sağlanan yakıt ekonomisinin % 3,6 olduğu görülmüştür. Yağ tipi 5W30 olarak seçildiğinde ise eklenen viskozite düzenleyicilerin de katkısıyla; sıcak koşullarda elde edilen yakıt tüketimlerindeki azalma % 7,2 mertebelerindedir. Ömür testlerinde ise viskozite düzenleyici kullanmanın yüksek sıcaklık ve tam yüklerde minimum film kalınlığını arttırdığı ve bu sayede aşınmaların çok yüksek seviyelere ulaşmasını önlediği sonucuna varılmıştır [35].

Claudio vd. ise soğuk ilk çalışma sırasındaki yüksek seviyedeki motor sürtünmelerinin bir diğer nedeninin de yağda yer alan kirletici maddeler olduğunu vurgulamışlardır. Benzin ve ethanol karışımı içersindeki ethanolün buharlaşma oranı ile yağ içersindeki kirletici madde miktarı arasında bir korelasyona ulaşmışlardır. Bu oran yakıtın yanması sırasında kendi içersindeki ethanolün buharlaşma miktarının ölçülmesiyle elde edilmiştir. Farklı deneylerden elde ettikleri sonuçlarda %1-8 arasında bir hata oranı ile bu ilişkiyi doğrulamışlardır. Farklı ortam sıcaklıklar ve kullanıcı davranışları ile yaptıkları testler sonucunda zor koşullar için elde edilen kirletici miktarının diğer koşulların yaklaşık iki katına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yağ karterindeki kirletici miktarı zor kullanım durumunda; aracın boşta çalışması durumunun yaklaşık 5 katına ulaşmaktadır. Bu veriler kullanım koşullarının atık madde miktarına, dolayısı ile yağ viskozite seviyesine ve bu sayede de motor sürtünmelerine etki ettiğini göstermektedir [36].

Shayler vd. yapmış oldukları çalışmada motor yağının kimyasal bileşiminin yağ sıcaklığı, viskozite ve motor sürtünmeleri üzerindeki etkilerini deneysel ve matematik model ile incelemişlerdir. 1,8 Litrelik dizel motor üzerinde yapılan çalışmada her çevrim sonrasında yağ değiştirilirken, dış etkileri önleme amaçlı olarak yağ filtresi de her bir yağ performansı öncesinde değiştirilmiştir. Motor testleri motor test düzeneğinde farklı sabit devirler için -25°C, -10°C ve laboratuvar sıcaklıkları için tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ; yağ kimyasal bileşiminde yapılan değişiklikler özellikle düşük sıcaklıklar için efektif viskoziteyi önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu da motor sürtünmelerinde kaydadeğer azalmalara neden olur. Bunun yanında teorikte katkı maddeleri nedeniyle viskozitenin yağın yaşlanması ile birlikte artması beklenirken yaşlandırılmış yağın aynı tür kullanılmamış yağ ile kıyaslamasında kaydadeğer bir fark tespit edilememiştir. Ayrıca bir diğer önemli saptama ise Vogel ifadesinin efektif viskoziteyi büyük bir hassasiyetle ortaya koyduğudur [37].

Dam vd. ise, yağın kimyasal bileşimindeki değişikliklerin ağır vasıta dizel motorların yakıt ekonomisini nasıl etkilediği konusunda çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı kimyasal bileşime sahip motor yağları ESC çevriminde test ederek yakıt tüketimleri üzerine olan etkileri karşılaştırılmıştır. 4 farklı yağ içeriği için yapılan testlerde çevrimin farklı tork-devir kombinasyonlarından oluşan 13 farklı noktadan yakıt tüketim ölçümleri alınmıştır. İçeriklerden birincisinde, viskozite indeksi 120'den düşük bir yağ, ikincisinde birinci gruba ek olarak %0,03'ün altında oranda kükürtlü karışım, üçüncüsünde ikincisinden farklı olarak indeksi 120'den büyük bir yağ, dördüncü grupta ise Poly Alpha Olefins katkı maddesi kullanılmıştır. Yapılan testlerde eklenen katkı maddelerinin grup 3 ve grup 4 yağlar için farklı sıcaklıklarda farklı viskozite trendleri gözlemlenmiştir. Aynı yağdaki farklı katkı maddeleri sayesinde grup 4 için 40°C'de 100 cSt viskozite ölçülürken bu değer grup 2 için 118 cSt'dir. Değerler 100°C için ise aynı seviyede 15-16 cST bandında toplanır. İki yağ için ortaya koyulan yakıt tüketim değerleri arasındaki farklar çevrimin bazı noktalarında %3 dolaylarına ulaşmaktadır. Bu sonuçlar katkı maddelerinin yağın sıcaklık-viskozite trendlerini değiştirebileceği fikrini doğrulamıştır. Ayrıca farklı viskozite düzenleyicilerin sıcaklık-viskozite trendlerine olan etkileri incelenmiştir. Yalnızca katkı maddesi kullanımı ile 40°C de ölçülen viskozite değeri 82 cSt'den 73

cSt'ye kadar düşürülmüştür. Bu fark 100°C de aynı seviyede yağlar ve 12 cSt'dir. Bunların yanında ölçümlerden elde edilen bir diğer sonuç ise zaman içerisinde is dolayısı ile gerçekleşen viskozite artışı, katkı maddeleri ile gerçekşeltirilen düşüşten çok daha büyüktür ve yakıt ekonomisine olumsuz etkileri olmuştur [38].

### **1.1.5 Yağ Soğutma Sistemi Optimizasyonu**

Motorun soğuk ilk çalışması sırasındaki yüksek motor sürtünmelerinin azaltılması için araştırmacıların yönelmiş olduğu konulardan bir diğeri de motor soğutma sisteminin ve yağı şartlandırmaya yarayan yağ soğutma modülünün optimizasyonudur. Özellikle yağın ve motorun ilk çalışma durumunda soğutulmasını ya da başka bir deyişle ısınmasının yavaşlamasına neden olan etmenler bu grup altındaki çalışmalar arasında gösterilebilir.

Koichi vd. su soğutmalı motora alternatif olarak doğrudan yağ soğutmalı motor tasarımı üzerinde çalışmış ve farklı koşullarda motorun ve yağın ısınma performanslarını incelemişlerdir. Yağ soğutmalı motor tasarımıyla; yüksek yük ve devir gibi yüksek sıcaklık koşullarında su soğutmalı sistem kadar soğutma performansı sağlayabilmeyi, soğuk ilk çalışmada ise daha iyi bir motor-yağ ısınma performansına ulaşarak emisyonları ve yakıt tüketimini azaltmayı hedeflemişlerdir. Yağ motoru yağlama görevi dışında -ki bu görevde yağ az miktarda da olsa soğutma rolü üstlenmektedir- ikincil olarak ana soğutmayı gerçekleştirme görevi de verilmiştir. Deneysel çalışmada tek silindirli ve 339 cc hacminde benzinli motor kullanılmıştır. Motorda su cepleri yerine yağ cepleri tasarlanarak oluşturulan alternatif yağ soğutmalı motor ile su soğutmalı motoru karşılaştırmışlardır. Yapılan kıyaslamalarda öncelikle iki sistemin soğutma performanslarına ve sürekli ve maksimum devir-yük koşullarında vermiş olduğu maksimum işe yer verilmiştir. Buna göre yağ soğutmalı sistemdeki mekanik kayıplar daha fazla bulunmuş iş çıktıları ise aynı yakıt tüketimi için %2 daha az olarak tespit edilmiştir. Bu durum sürekli ve maksimum koşullar için sistemlerin birbirine oldukça yakın performanslarda olduklarını göstermektedir. Konu doğrudan soğutma performanslarına geldiğinde yağ soğutmalı motor maksimum koşullarda su soğutmalıya göre daha sıcak çalışmaya neden olmuştur. Egzoz valflerinde 130 K

emme valfinde 60 K silindirin üst kısımlarında 80 K alt kısımlarında ise 50 K daha sıcak çalışma gözlemlenmiştir. Motor yağının 350 K sıcaklığa gelmesi için geçen süre yağ soğutmalı motorda %20 daha kısadır. Bunun yanında ısınma periyodu boyunca yağ sıcaklıkları daha yüksek seviyelerdedir bu da düşük viskozite ve düşük sürtünmeleri beraberinde getirmiştir. Tüm bunlara ek olarak yağ şartlandırma sistemi ısınma sürecinde yağın soğumasını, yağı by-pass ederek ve böylelikle yağ sıcaklıklarının 6-7 °C daha yüksek seyretmesini sağlayarak yağın rejim sıcaklığına ulaşma süresine de önemli bir katkı sağlamıştır [39].

Azmi vd. ise çalışmalarında motor soğutma devresi üzerinde bazı değişiklikler yaparak motorda ve aktarma organlarında kullanılan yağları soğuk çalışmada daha hızlı ısıtmayı hedeflemişlerdir. Yeni nesil klasik soğutma sistemlerinden bazılarında soğutucu akışkan; yağ ve motor ısınana kadar by-pass edilir ve böylece ilk çalışma sürecinde motorun ve yağın soğumasının önüne geçilir. Azmi vd. yapmış oldukları tasarımlarında bunun aksine soğutucu akışkanın sürekli olarak motordan aldığı ısı sayesinde CVT şanzımanın yağının ve kabinin ilk ısınmasında da kullanmanın daha avantajlı bir yaklaşım olduğunu vurgulamışlardır. Bu sistemde motordan çekilen ısının standart tipte olduğu gibi radyatörden atılması yerine diğer kısımlarda kullanılmasıyla kazanım amaçlanmıştır. 1561 cc lik 4 silindirli benzinli motor üzerinde boşa çalışma durumu ve NEDC çevrimleri için önermiş oldukları soğutma sistemi ile mevcuttaki soğutma sistemini karşılaştıran deneysel ölçümler yapmışlardır. Boşa çalışma durumundaki ısınma deneyinden elde edilen sonuçlara göre önerilen soğutma sisteminde motor soğutucu akışkanının ve yağının standart sisteme göre daha geç ısındığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın CVT yağındaki ısınma performansı çarpıcı şekilde artmıştır. Bunun nedeni motor yağına giden ısının soğutucu akışkan yardımıyla efektif olarak CVT şanzıman yağına geçirilmesidir. Aynı ölçümler her iki opsiyon için NEDC çevriminde yapıldığında ise benzer karakteristiklerin tekrarlandığı gözlemlenmiştir. Yağın rejim sıcaklığına ulaşması; standart soğutma sistemine sahip motorda 930. saniyeye kadar daha azdır. Aralarında ortalama 3-4°C'lik bir farktan söz edilebilir. Buna karşın CVT şanzıman yağındaki fark çevrimin sonlarına doğru 20°C lere ulaşmakla birlikte çevrim boyunca ortalama 10°C seviyelerindedir. Çevrim sonunda motor yağı her iki opsiyonda da optimum sıcaklık olan 90°C ye ulaşmıştır. Önerilen sistemdeki yağ

sıcaklığı çevrim sonunda; optimum seviye olan 70°C’de iken bu sıcaklık standart opsiyonda 55°C olarak ölçülmüştür. NEDC çevriminde yakıt tüketimleri arasında ise önerilen sistem lehine %4 dolaylarında bir fark elde edilmiştir. Kısmi olarak incelendiğinde çevrimin şehiriçi kısmında %3, şehir dışı kısmında ise %5 yakıt tasarrufu sağlandığı ortaya konulmuştur [40].

#### **1.1.6 Termal Enerji Depolama ve Dışarıdan Aktif Isı Girişi**

Revereaud vd. hibrit araçlarda motor yağının ilk ısınma performansı üzerine yapmış oldukları çalışmada yağın rejim sıcaklığına ulaşmasının önceki çevrimde depolanan enerjinin kullanımı ile hızlanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Kurmuş oldukları modelde bunu iki farklı yöntem ile denemişlerdir. Bunlardan birincisi ısı bataryası yardımıyla soğutucu akışkandan elde edilen ısının depolanarak soğuk ilk çalışmada tekrar ortaya çıkarılmasıdır. Bu metotta batarya sac metal yapı ve içersinde tuz-su karışımı sıvıdan oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki soğutucu akışkan ilgili bataryanın etrafında dolaşarak bu bölgenin ısınmasını sağlar. Isınan bataryadaki tuzun sıvılaşma sıcaklığına ulaşması ile bataryaya sabit sıcaklıkta yüklü bir ısı girişi olur. Bu şekilde gerçekleşen depolama işlemi soğutucu akışkanın yeniden çalışmayla birlikte batarya etrafında kullanılmasıyla akışkana, oradan da yağa geçerek yağın ısınmasında kullanılır. Bu tasarıma alternatif olarak çalışmada yağın depolanan enerji ile doğrudan ısıtılması üzerinde de durulmuştur. Fakat bu tür bir yaklaşımda batarya diğer yöntemdeki bataryadan daha küçük olmak durumundadır. Bunun temel nedeni ise bataryanın yağlama sistemindeki yağ miktarı ve motor yağlama sistemindeki paket kısıtları olarak gösterilmiştir. Model yardımıyla elde edilen sonuçlara göre soğutucu akışkanı ısıtan batarya opsiyonunda sırasıyla NEDC çevrimi için % 4-4,5 AU çevrimi için % 5,5-6 AR çevrimi için ise %2-2,5 dolaylarında bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır. Doğrudan yağı soğutan batarya opsiyonunda ise, sırasıyla NEDC’de % 3-3,5 AU’da % 4-4,5 AR’de ise yaklaşık % 2’lik bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır. Batarya büyüklüklerindeki 1’e 4’lük orana karşın yağın doğrudan ısıtılması opsiyonunun önemli yakıt tasarrufu değerlerine ulaşıldığı görülmüştür [20].

Zbigniew Kneba tasarlamış olduğu 2 farklı ısı akümülatörü yardımıyla depoladığı ısıyı bir sonraki çevrimde soğutucu akışkanı ısıtmada kullanma fikri üzerinde durmuştur. Öne sürülen konseptlerden birinde su tankının dış kısmı tamamen izolasyon malzemesi ile çevrelenmiş; diğerinde ise su tankı kanallar ve riplerden oluşan bir metal levha şeklindedir. Yalnızca soğutucu akışkan sıcaklıkları üzerinde yapılan değerlendirmede ısı akümülatörü kullanılan motordaki soğutucu akışkanın ısınma süresinin standart motordaki soğutucu akışkanın ısınma süresinin yaklaşık yarısı kadar olacağı saptanmıştır. Bu da motor yağının rejim sıcaklığına ulaşma süresini olumlu yönde etkilemektedir [41].

Kunze vd. kurdukları 1D modelde üç temel eleman olan motor bloğu, dişli kutusu ve aksa yer vermişlerdir. Bunun yanında modelde yağ ve soğutucu akışkan döngüleri yer almaktadır. Çalışmanın başında tamamen soğuk araç elemanları ve tamamen ısınmış motor elemanları için NEDC çevrimi koşturulmuş, ve %10'luk bir yakıt ekonomisi potansiyeli gösterilmiştir. Daha sonra bu elemanlardan hangilerinin daha etkili olduklarını gözlemleyebilmek için bu 3 elemanın 25°C (soğuk) ve 90°C (sıcak) olmaları durumlarını barındıran 8 farklı kombinasyonda testleri tekrar etmişlerdir. Dişli kutusu ve motor bloğunun sıcak, aksın soğuk olması durumunda NEDC çevriminde yakıt ekonomisinde % 5.2'lik tasarruf sağlanmışır. Bunun yanında aks ve motor bloğunun sıcak başlaması durumunda da yakıt ekonomisi %5.1'dir. Bununla motor bloğunun sıcak olmasının yakıt ekonomisi için en önemli bir faktör olduğu fikri ortaya koymuştur. Ayrıca benzer sıcaklık kombinasyonlarını bu kez, motor yağı, dişli kutusu yağı, soğutucu akışkan, ve differansiyel yağı için ısıyı belirli miktarda paylaşdırmak suretiyle yapmışlardır. Analizi yapılmış 35 farklı kombinasyondan en kötü sonuca ısının tamamen soğutucu akışkana verildiği durumda ulaşılmıştır. Bu durumdaki yakıt tasarrufu % 1,2 dolaylarındadır [7].

### **1.1.7 Çevresel Şartlar**

Li vd. çevresel koşulların motorun soğuk ilk çalışması üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. 1,8 Litre 4 silindirli benzinli motora sahip olan araç üzerinde yaptıkları çalışmada; ortaya koymuş oldukları deneyleri Leeds çevriminde

gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sırasında Leeds çevrimi 31°C'lik yaz koşulları ve -2°C lik kış koşulları için tekrarlanmış ve başta karterdeki motor yağı olmak üzere motorun bir çok farklı noktasından sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yaz koşullarında yağın rejim sıcaklığına ulaşma süresi 10 dakika iken bu süre kış şartları için 16 dakika olarak tespit edilmiştir. 4 kez kendisini tekrar eden hız-zaman grafiğinden oluşan Leeds çevriminde yaz koşullarında yağın istenen sıcaklığa ulaşması çevrimin sonuna denk gelirken, kış koşullarında çevrim tamamlanmış olsa bile sıcaklığın henüz istenen değere ulaşmamış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum gözününde bulundurularak yapılacak kısa yolculukların önemli bir bölümünde yağ ve su sıcaklıkları optimum noktaya ulaşmadan seyir sonlanmaktadır. Bu nedenle yüksek emisyon ve yakıt tüketimlerinin ardındaki önemli faktörlerden bir tanesi motorun ve yağın yavaş ısınmasıdır. Tüm çevrim boyunca kış koşullarında egzozdan kaybedilen ısı ilk 200 saniye boyunca 747 kJ iken yaz şartlarında bu miktar 488 kJ dır. Buna ek olarak toplam yakıt tüketiminde yaz koşulları %1,4 daha avantajlı görünmektedir [42].

#### **1.1.8 Yağ Pompası Tipi**

Rundo ve Squarcini yağ pompası tipinin ve çalışma prensibinin motorun soğuk ilk çalışmasındaki, yağın ısınma periyodu üzerinde oldukça etkili olduğu fikri üzerinde durmuşlardır. Yapmış oldukları çalışmada NEDC çevriminde farklı pompa tipleri ile ölçümler yaparak, soğuk ilk çalışma için enerji tüketimlerini ve yağ sıcaklık profillerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada standart ve değişken deplasmanlı tip pompa, dıştan dişli tip pompa ve gerator pompayı karşılaştırmışlardır. Ayrıca yağlama çevrimindeki akış-basınç karakteristiğini farklı sıcaklıklarda ve farklı yağ ısınma hızlarında incelemişlerdir. Pompa, yağlama devresi ve motordaki yağın ısınmasını simüle eden ısı değiştiriciden kurmuş oldukları test düzeneğini gerçek motor üzerinden almış oldukları test verileri ile doğrulamışlardır. Daha sonra ise deneyleri test düzeneği üzerinden sürdürmüşlerdir. Diğerlerinden farklı olarak sistem ve çalışma koşulları üzerindeki değişikliklerin motor yağ pompasının çektiği güç üzerinde de etkili olacağı fikrinden yola çıkmışlar, ilk deneysel verilerde referans gerator pompanın 5,5 bar basınçta yağ çıkış yaparak çalışması durumunda NEDC çevriminde 449 kJ enerji harcarken; 6,5 yağ basıncı ile çalışma durumunda

483 kJ enerji harcamış olduğu tespit etmişlerdir. Daha sonra 5,5 bar çalışma basıncı için farklı ilk sıcaklıklarda (9-20-30 °C) NEDC çevrimleri koşturulmuş, elde edilen sonuçlara göre 9°C ortam sıcaklığı durumunda yağ pompasından çekilen enerji 20°C lik standart koşullara göre; 33 kJ artmış bu da yakıt tüketimine %0,34 artış olarak yansımıştır. 30°C ortam sıcaklığında ise pompa tarafından çekilen güç 28 kJ azalmıştır. Bunun yakıt tüketimindeki olumlu etkisi ise %0,29 dolaylarındadır. NEDC çevrimleri farklı yağ pompaları için yeniden çalıştırıldığında; pompa tiplerinin yağın viskozluğundan kaynaklanan ataletlerinin farklı olduğu bu nedenle de aynı işler için farklı güçler çektikleri görülmüştür. Bu farklılıklardan kaynaklı olarak NEDC çevrim sonuçlarına göre standart deplasmanlı tip pompa gerator tip pompa'ya göre %0,5 daha az yakıt tüketirken bu oran external gear pump'da % 0,7 dolaylarındadır. Fakat değişlen deplasmanlı tip pompa soğuk ilk çalışma bölümünde daha efektifken, dıştan dişli pompanın rejim sıcaklıklarında daha verimli çalıştığı saptanmıştır. Buna bağlı olarak; soğuk çalışma ve kısa yolculuklarda değişken deplasmanlı yağ pompası önerilirken; yüksek devirlerde ve yüksek motor sıcaklıklarında daha çok çalışan tip motor ve araçlar için dıştan dişli tipi yağ pompası uygun bulunmuştur [43].

## **1.2 Tezin Amacı**

Tez çalışması kapsamında temelde amaçlanan iki konu vardır. Bunlardan birincisi motorun soğuk başlangıç çalışması sırasında motor yağına geçen ısının ve motor yağ sıcaklığı artışının matematiksel olarak ortaya konulması ve deneysel sonuçlar ile doğrulanmasıdır. İkincisi ise ortaya konulan ve doğrulanan model yardımıyla yağlama sistem elemanları üzerindeki değişikliklerin yağın ısınma performansı ile motor performansına etkilerinin karşılaştırmalı olarak araştırılmasıdır. Karşılaştırmaların motor yağ sıcaklığı değişimleri, viskozite değişimleri ve sürtünme değişimleri üzerinden yapılması amaçlanmaktadır.

## **1.3 Hipotez**

Soğuk ilk çalışma periyodunda motor yağının soğuk olması nedeniyle viskozitelerin düşük, hidrodinamik yağlama rejimlerinde sürtünmelerin yüksek olduğu bilinmektedir. Viskozitenin hızlı düşürülmesi veya bir önceki çalışma sonrasında

yağın sıcak tutulmasının sağlanmasıyla sürtünmeler daha hızlı azalacak bu da soğuk ilk başaltma sürecini daha verimli hale getirecektir. Çalışma kapsamında motor yağının ısı transfer alanları ortaya konulduğunda sürece etki eden parametrelerin belirlenmesi ve etkinlik derecelerinin irdelenmesi sağlanacaktır. Bu irdeleme sayesinde belirlenen tasarım parametreleri ile başlangıç çalışması periyodunun motor performansı bakımında iyileştirileceği öngörülmektedir.

## 2

# MOTORLARDAKİ SÜRTÜNME VE MOTOR YAĞLAMA SİSTEMİNİN TEMELLERİ

---

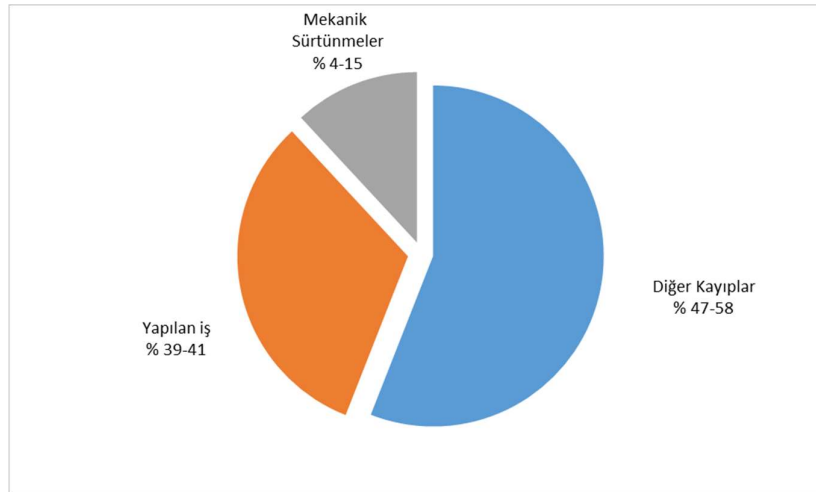
### 2.1 Motor Sürtünmeleri

Günümüz dünyasında petrol kaynaklarının tüketiminde önemli bir artış gözlenmektedir. Bu artış kaynakların tükenme riskini ortaya çıkarmasının yanında; çevreye yayılan emisyon miktarlarının artması ve maliyetlerin yükselmesi gibi olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda kullanılan makinelerde verimliliğin artırılması önemli bir hedef niteliğindedir. Motorlarda verimliliğin artırılması ile elde edilen birim iş için daha düşük yakıt tüketimleri sağlanacak bunun yanında da daha düşük emisyon değerlerine ulaşılabilecektir. Motorlarda görülen sürtünme kayıpları verimi düşüren başlıca faktörlerden biridir. Yanma sonucu ortaya çıkan enerjinin bir kısmı sürtünme kayıpları yoluyla tüketilerek verimin düşük olmasına sebep olur. Dolayısı ile sürtünme kayıplarının azaltılması yakıt tüketimini ve emisyonları da azaltacaktır.

Sürtünme günlük yaşamda karşılaşılan fiziksel olayların önemli bir bölümünde kendine yer edinir. Mekanik hareketleri sürtünme olmaksızın düşünmek mümkün değildir. Sürtünmenin bir çok avantaj sağlamasının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Hareket sırasında gerçekleşen enerji kayıplarının kaydadeğer bir kısmı sürtünmeler yoluyla olur. Bunun yanında sürtünmeler nedeniyle oluşan aşınmalar makine ve malzeme ömrünü kısaltmaktadır. 1960'larda İngiltere Eğitim ve Bilim Komisyonu tarafından yapılan araştırmalarda sürtünmelerden kaynaklı kayıpların dünyada yıllık 515 milyon pound dolaylarında bir zarara neden olduğu ortaya konulmuştur. Böyle büyük bir kaybın ortaya konulması, sürtünme

kayıplarını azaltmaya yönelik araştırmaları özellikle o yıllardan itibaren önemli bir hedef ve çalışma konusu haline getirmiştir. 20. Yüzyılın sonlarına doğru konuyla ilgili çalışma eğilimleri artmıştır [44].

Özellikle içten yanmalı motorlar düşünüldüğünde sürtünme kayıpları yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi çalışmalarında önemli bir engel ve aynı zamanda da hedef teşkil etmektedir. Ortalama olarak bir binek taşıtın yanma sonucu açığa çıkan tüm enerjisinin yaklaşık % 4-15'lik bir bölümü; toplam motor kayıplarında % 6-25'lik bir bölümü mekanik sürtünme kayıplarına harcanmaktadır. Sürtünme kayıplarının toplam enerjideki payının özellikle motorun ilk hareketi gibi belirli spesifik çevrimlerinde daha da yukarılara taşınması söz konusudur. Yanma sonucu açığa çıkan enerjinin motordaki kullanım alanları Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Buna göre sürtünmenin tüm kayıplar içerisinde ne denli önemli bir yere sahip olduğu ortadadır [45].



**Şekil 2.1** Yanma sonucu açığa çıkan enerjinin kullanımı [45]

## 2.2 Sürtünme ve Yağlama Teorisi

Eski çağlarda sürtünme bağlı hareket yapan yüzeylerdeki pürüzlülüklerin kendi aralarında oluşturdukları kilitlenme durumu olarak bilinir ve pürüzlülük teorisi olarak adlandırılırdı. Bu teori yüzey pürüzlülüğünün artmasının her koşulda sürtünme kuvvetlerini artıracığı düşüncesini benimsemektedir. Ayrıca yine bu teori sürtünme katsayısının yüzey pürüzlülüğü ile ilişkili olduğu gerçeğini ilk kez gösteren teoridir.

Sonrasında ortaya konulan bir diğer teori olarak bilinen adhezyon hipotezine göre ise sürtünme iki yüzey arasındaki adhezyon kuvveti olarak kabul edilmektedir. Fakat daha sonra kimyasal çalışmalar ve yapılan ölçüm sonuçlarının incelenmesiyle adhezyon kuvvetlerinin yalnız başına sürtünmeyi tanımlamakta yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır. Bu teori önceleri temas yüzey alanı ile sürtünme kuvvetinin korelasyonu üzerine kurulmuştur. Fakat mikroskop teknolojisinin gelişmesi ve inceleme imkanlarının artmasıyla temas ettiği kabul edilen yüzey ile gerçek yüzeyler arasında önemli farkların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu farkların temel nedeni ise yüzey pürüzlülüklerinin düşünülenden çok daha etkili olmasıdır.

Çalışmalar neticesinde modern sürtünme kuvveti tanımı adhezyon ve pürüzlülük teorilerinin karışımı şeklinde düşünülebilir. Buna göre pürüzlerin deformasyonu, kazınması, kayma ve adhezyon etmenlerinin tamamı hesaba katılmalıdır.

Ortaya konulan teorilerden çıkarılan sonuçlara göre sürtünme kayıpları; genellikle malzeme seçimi, yüzey kalitesi, yüzey kaplamaları ve yağlama performansının bir fonksiyonu şeklindedir. Yağların bir çok görevi olmasına karşın en önemlisi hidrodinamik yağlama koşullarını oluşturarak bağıl hareketi gerçekleştiren yüzeylerin tam olarak birbirinden ayrılmasına olanak sağlamaktır.

### 2.3 Motorlarda Sürtünme Bölgeleri

İçten yanmalı motorlarda krank milinden alınan güce kullanılabilir veya efektif güç denir. Efektif güç ( $P_e$ ) yanma sonucu açığa çıkan indike güçten ( $P_i$ ) daha küçüktür. Aradaki güç farkı motor sürtünmelerine ( $P_R$ ) giden kayıplardan oluşmaktadır.

$$P_R = P_i - P_e \quad (2.1)$$

Sürtünme kayıplarındaki artmalar efektif gücün, dolayısı ile de krank milinden alınan işin azalmasına neden olmaktadır. Aynı işi sağlamak için daha fazla yakıt tüketmek gerektiğinden yakıt ekonomisi olumsuz etkilenecektir.

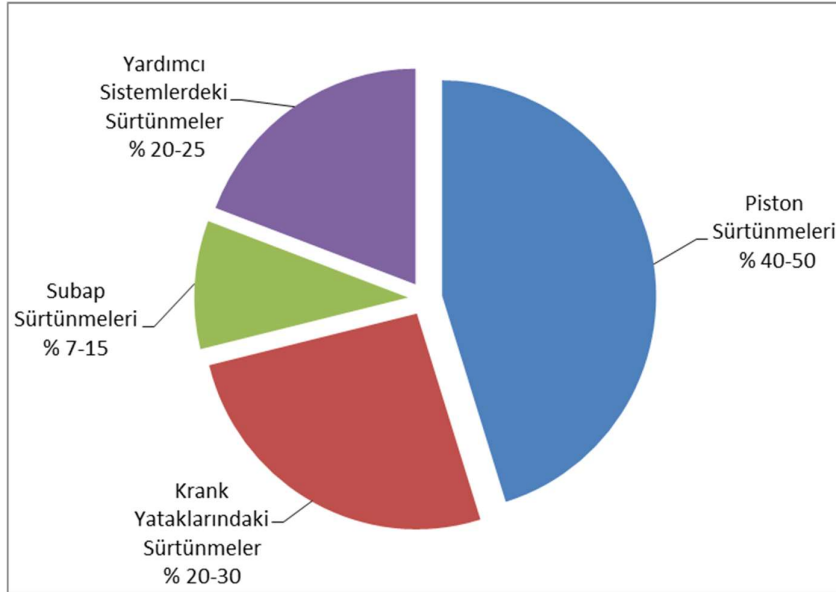
Ortalama sürtünme basıncı indike basınç ve efektif basınç arasındaki farktan yola çıkılarak hesaplanır. Burada motor stroğu, devir sayısı ve süpürme hacmi diğer önemli etmenlerdir [46].

$$P_{mr} = P_{mi} - P_{me} = \frac{P_i - P_e}{i. n. V_H} = \frac{P_R}{i. n. V_H} \quad (2.2)$$

Motorlarda görülen sürtünme kayıpları biyel - krank mekanizması, pistonlar gibi farklı komponentlerdeki kayıplarından oluşmaktadır. Bunun yanında subap mekanizmaları ve kam milleri gibi yardımcı sistem elemanları da motor sürtünmelerinin bir parçası kabul edilebilir. Tüm motorda görülen sürtünme kayıpları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

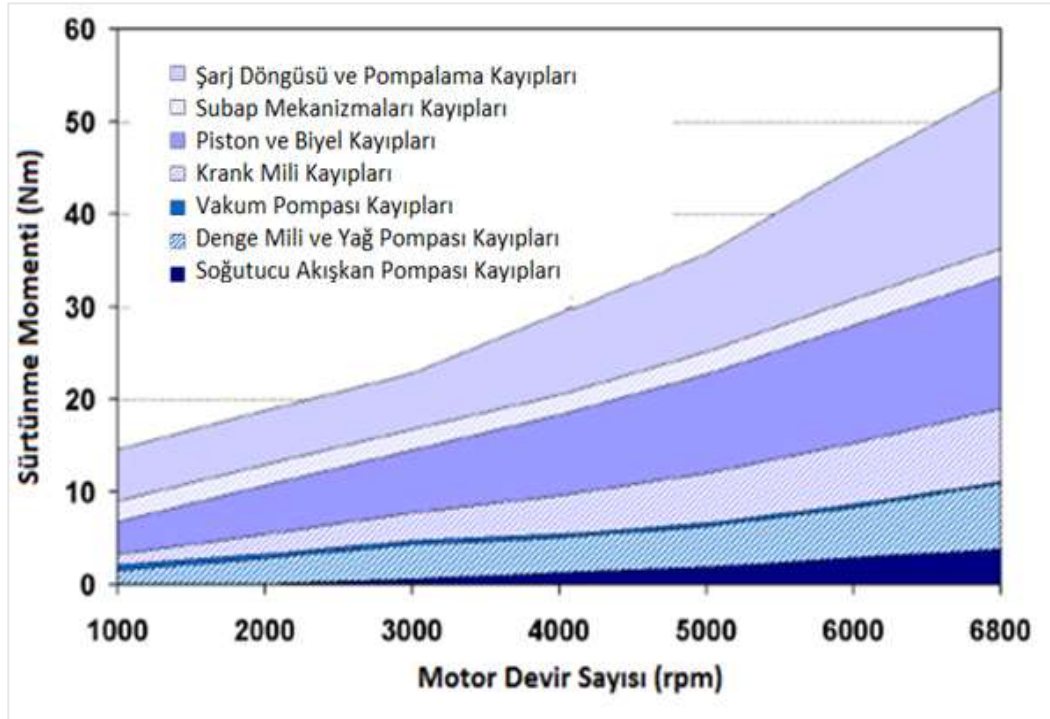
- Krank mili ana yatağı ve radyal mil yatakları
- Krank kolu ve piston takımı ;pistonlar, segmanlar, piston pimleri
- Kütle dengeleme sistemleri
- Subaplar ve kam milleri
- Tüm yardımcı sistemler

Motorlardaki bu sürtünme kayıplarının dağılımı Şekil 2.2’de verilmiştir. Buna göre motor sürtünme kayıplarının % 40-50’lik bir kısmı pistonlarda, %20-30’luk bir kısmı krank yataklarında, % 7-15’lik bir kısmı subap mekanizmalarında ve % 20-25’lik bir kısmı ise motor yardımcı sistemlerinin çalışması sırasında ortaya çıkmaktadır [45].



**Şekil 2.2** Motorlarda görülen sürtünme kayıplarının dağılımları [45]

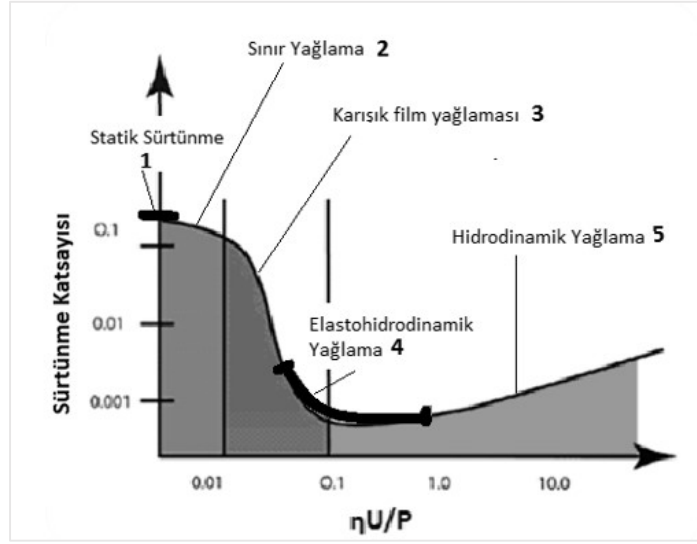
Literatürde motor sürtünme kayıplarının görüldüğü bölgeler ve sürtünmelerin bütün motor kayıpları içindeki oranı konusunda farklı araştırmacıların yapmış olduğu deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Blaxill vd. yapmış oldukları çalışmalarında Şekil 2.3’de yer alan farklı motor bölgelerindeki sürtünme momenti değerlerinin ölçümünü 2 L’lik benzinli motor için gerçekleştirmişlerdir. Piston, biyel ve krank yataklarındaki sürtünme kayıplarının toplamı tüm motor kayıplarının yaklaşık %40’ını oluşturmaktadır. Bunun yanında düşük devirlerde subap mekanizmalarındaki sürtünme kayıplarının ise tüm kayıplara oranı %16 dolaylarında ölçülmüştür. Bu oran yüksek devirlerde oldukça düşük seviyelerdedir. Diğer kayıpların ise önemli bir bölümünü de yanma odasındaki dolgunun oluşması ve tahliyesi olan şarj döngüsü ve dolgunun oluşumunda gerekli olan pompalama kayıpları oluşturmaktadır [47].



**Şekil 2.3** Motorlarda görülen sürtünme kayıplarının devir sayısına göre dağılımları [47]

#### 2.4 Motorlarda Görülen Sürtünme Türleri

Motor yağının ve yüzey malzemelerinin sürtünme katsayısı Stribeck diyagramı denilen eğri yardımı ile incelenebilir. (Şekil 2.4)



**Şekil 2.4** Stribeck sayısı- sürtünme katsayısı grafiği ve yağlama türleri

Stribeck eğrisinde dikey eksen sürtünme katsayısı; ( $f_{\text{sürtünme}}$ ) ve yatay eksen ise Hersey sayısı ( $\eta U/P$ ) ifadesinden oluşur. Stribeck numarasının yağ filmi kalınlığı ile paralellik gösterdiği söylenebilir. Bu sayıda ( $\eta$ ), dinamik viskozite; ( $U$ ) hareketli yüzeyler arası bağıl hız, ( $P$ ) ise yükten kaynaklanan basıncı ifade eder [48].

Herhangi bir bağıl hareketin gerçekleşmediği 1 numaralı duruma statik sürtünme adı verilir ve bu rejim türünde yüzeylerde aşınma söz konusu değildir. Stribeck numarasının çok küçük değerlerine karşı sürtünme katsayısının göreceli olarak 0,1 gibi daha büyük değerlerde olması durumu sürtünme koşulları için risk teşkil eder. Bu tür yağlama rejimlerine sınır sürtünme adı verilir. Bu durum eğri de yer alan 2 numaralı bölgeye denk düşer; hareket düşük hızlarda gerçekleşir. Yüzey yüzeye, yani metal metale temas etme koşulları ve aşınmalar oluşabilir. Temaslar sürtünme katsayısını belirlemede ve yüksek değerlere ulaştırmada en önemli faktördür. Yüzeyler temas ettikçe sınır sürtünme ortaya çıkar ve sürtünme katsayısı sabit kalır [48].

Yağlama koşulları sınır yağlamadan karışık yağlama bölgesine doğru kaydıka Stribeck sayısı artar. Karışık yağlama bölgesi içerisinde kısmi olarak pürüzlü bölgelerde yüzey yüzeye temaslar olsa da yüzeylerin büyük oranda yağ filmi ile birbirinden ayrılmış olduğu söylenebilir. Karışık yağlama durumunda sürtünme katsayısı oldukça keskin bir düşüş gösterir. Katsayılar 0,001 ila 0,0002 dolaylarına

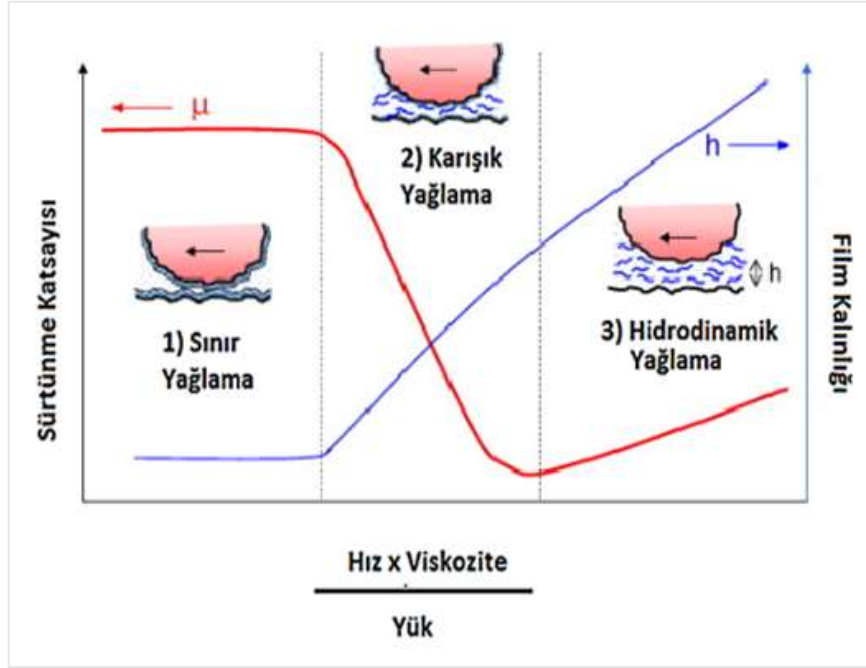
kadar inebilir. 3 numaralı bölge ile gösterilmiş olan karışık film yağlamasında hızların ve aşınmaların orta seviyededir [48].

Karışık yağlama şartlarından sonra Stribeck sayısının artmasıyla Şekil 2.4'de 5 numaralı bölgeyle gösterilen hidrokinamik yağlama koşulları oluşur ve yüzeyler arasında yağ filmi ile kesin bir ayrım meydana gelir. Bu rejim türü için teorikte aşınmanın olmadığı, hareket hızlarının yüksek olduğu kabul edilir. Bunun yanında kimi kaynaklar mutlak yağ filminin oluştuğu fakat oldukça ince olduğu hidrokinamik yağlama türü için elastohidrokinamik yağlama tanımlamasını yapmışlardır. (Şekil 2.4 -4 numaralı bölge)

Hidrokinamik yağlama rejim türünde sürtünme katsayısı yağlama yasası uyarınca oldukça hızlı bir şekilde yükselir. Bu artışın logaritmik lineer olduğu söylenebilir [48]. Stribeck numarası ile film kalınlığı paralellik gösterdiği yine Şekil 2.4'deki eğriden gözlemlenebilir. Buna göre film kalınlığının artması ile sürtünme katsayısındaki düşüş; karışık yağlama rejiminin ortalarına kadar devam edecek, fakat belirli bir seviyeden sonra, özellikle de yağ filmi yüzeyler arasında kesin bir ayrım oluşturduktan sonra yani hidrokinamik yağlamada artışa dönüşecektir. Hidrokinamik yağlama rejiminin başlamasıyla birlikte ise film kalınlığının artması sürtünmeyi artıracaktır. Stribeck eğrisinin ilk yarısında yağ filminin oluşturulabilmesi sürtünme üzerindeki en önemli faktör iken; ikinci yarısında yani yağ filmi oluştuğundan sonra yağın viskozitesi en belirleyici faktör olarak kabul edilebilir.

Teorikte ideal çalışma bölgesi Şekil 2.5 'de de gösterildiği gibi hidrokinamik yağlamada gerekli olan yağ filminin oluştuğu fakat sürtünmenin en düşük olduğu bölgedir.

Yağ filmi kalınlığı ve Stribeck numarasında yer alan parametrelerden yük ve hız motor çalışma koşullarından gelir. Özellikle düşük hız ve yüksek yük en yüksek sürtünme katsayısını ve en kötü sınır yağlama koşullarını meydana getirir. Bu durumda sabit seyreden sürtünmeleri belirli seviyelerin altında tutmak yağ içerisinde katkı maddesi olarak kullanılan sürtünme düzenleyiciler ile mümkündür. Bununla birlikte sürtünme katsayısının en düşük seviyeye ulaşması



**Şekil 2.5** Stribeck numarası ile yağ filmi kalınlığı arasındaki ilişki [49]

ve hidrodinamik yağlama koşullarının sağlanmasından sonra film kalınlığının artması ile sürtünme katsayısı yeniden artar, motorlarda görülen ve/veya çalışma koşulu olarak amaçlanan hidrodinamik yağlama bölgesinde, sürtünme katsayısının düşük tutulması amaçlanır. Bu da hidrodinamik yağlama bölgesinde kalmak koşulu ile viskozitenin düşük seçilmesi sayesinde mümkün olmaktadır. Sonuç olarak yüksek yük-düşük hız koşullarında düzenleyicilerle düşük sürtünmeyi; yüksek hız-düşük yük koşullarında ise düşük viskoziteyi sağlamayı hedefleyen bir amaç fonksiyonundan söz edilebilir.

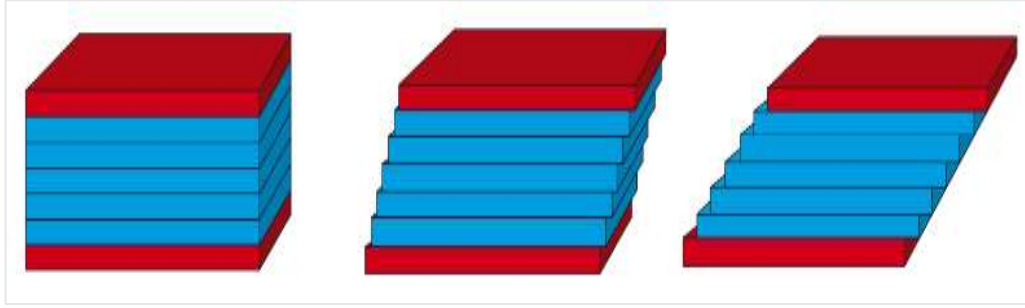
İçten yanmalı motorlarda bölgelere göre farklı sürtünme türü görülebileceği gibi özellikle motor krank yataklar bölgesinde hidrodinamik yağlama türü gözlemlenmektedir. Bunun yanında piston segmanları her üç yağlama türünde de; subap mekanizmalarının ise daha çok sınır ve karışık yağlama aralığında çalıştığı söylenebilir [50].

Özetle; Stribeck eğrilerine göre; motor yağlama sistemlerinde amaç yeterli yağlama debisini ve basıncını sağlayarak motor sürtünmelerinin karışık ve hidrodinamik yağlama sınırları içerisinde kalmasını sağlamaktır. Bu şartların

sağlanması durumunda düşük viskozite, daha düşük sürtünme katsayısı anlamına gelecektir.

## 2.5 Viskoziteye Etki Eden Faktörler

Viskozite bilimsel dille, akışkanın iç akışa karşı olan direncinin ölçüsüdür. Bu tanımlı matematiksel olarak iki düzlem modeli ortaya koyar. (Şekil 2.6)



Şekil 2.6 İki düzlem modeli [51]

Akışkanların viskozite ölçümü genel olarak viskometri ile belirlenir. Viskometri ölçümleri, akışkan davranışlarını inceleyen bilim dalı olan reolojinin bir parçası olarak görülür. Her malzemenin katıdan sıvıya kadar olan akışkanlık davranışı için skalası mevcuttur. Bu skalada bilimsel olarak katıların akışı elastiklik, sıvıların akışı ise viskozluk olarak nitelendirilir. Buna karşın malzemelerin çoğu ne tümüyle viskoz ne de tümüyle elastiktir. Malzemelerin çoğu kendi fiziksel özelliklerine göre viskoelastik katılar ya da viskoelastik sıvılar olarak nitelendirilirler. Eğer bir akışkan kolayca akarsa onun deformasyona olan direnci düşüktür ve düşük viskoziteli sıvı olarak anılır. Tersine şekilde deformasyona olan direnci yüksek ise hızlı akamaz ve yüksek viskoziteli sıvı grubunda yer alır. Bu model akışkanın aralarında olduğu varsayılan iki plakadan oluşmaktadır. Viskozite ile ilgili değişkenlerin doğru hesaplanması iki koşulun sağlanmasına bağlıdır. Bunlardan birincisi sıvı iki plakaya yapışır ve plakalar boyunca kaymaz. İkincisi ise laminar akış koşullarının olmasıdır. Buna göre akışkan ince tabakalar şeklini alır ve türbülans yoktur.

Bir maddenin viskozite özelliğini etkileyen faktörler genel olarak 3 grupta toplanır. Bunlar; maddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, maddenin üzerine etki etmekte olan dış kuvvetler ve çevresel koşullardır.

Maddenin yapısını oluşturan moleküller arası bağlar kuvvetlendikçe maddenin deformasyona olan direci giderek artacaktır. Bu sayede akmaya olan eğilimi de giderek azalacaktır. Maddenin üzerine uygulanmakta olan dış kuvvetler ise maddenin deforme olması ya da akması üzerinde önemli rol oynar. Kuvvetin büyüklüğü ve uygulandığı alan ile uygulama süresi bu etkinliğin derecesini belirler. Yalnızca Newtonian akışkanlar dış kuvvetlerden bağımsız bir viskoziteye sahiptir. Dış kuvvetlerin malzeme üzerine, sürtünme, itme, ya da kopma formlarında etkinlikler gösterdiği bilinmektedir. Bu etkinlik formlarından en geneli yer çekimidir. Viskometrilerde dış kuvvetler kesme hızı ya da kesme gerilmesi olarak ortaya koyulmaktadır. Bunların yanında sıcaklık ve basınç faktörleri maddenin viskozite davranışına doğrudan etki eden çevresel faktörler olarak kabul edilmektedir.

### 2.5.1 Maddenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bir madde için A faktörü ile viskozitesi artıyorsa, A faktörünü içinde barındıran katkı maddelerinin yağa eklenmesi ya da A faktörüne göre daha iyi bir viskozite şartı sağlayan yağın seçimi; çözümcül bir yaklaşım olarak kabul edilmelidir. Örneğin moleküler yapıdaki dipol momentinin artması viskozitede artış gösterir sonucuna göre; dipol momentini daha yüksek bir yağ seçmek, daha yüksek bir viskozite sağlayacağı gibi; dipol momentini artıracak katkı maddesi önlemi almak da bir başka çözüm yaklaşımıdır. Faktörler irdelenirken bu yaklaşım gözönünde bulundurulmalıdır.

#### 2.5.1.1 Viskozite – Yoğunluk İlişkisi

Yoğunluk maddeler için ölçülebilir ve kıyaslanabilir bir fiziksel özelliktir. Viskozite ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi kuran bazı methodlar bulunmaktadır. Bu sayede ikisinin birbirine bağımlı değişkenler olduğu tezine varılabilir.

Bachinski'ye göre sıvıların yoğunluğu ile viskozitesi arasında aşağıdaki ilişki kuralabilir. Buna göre ikisi arasında karşılıklı lineer bir bağımlılık söz konusudur.

$$(1/\eta) = (A_1/\rho) - B_1 \quad V_1 = \omega_{\text{hacim}} + C_1\varphi \quad (2.3)$$

Burada  $\eta$  viskozite  $\rho$  ise yoğunluktur. Burada  $A_1$ ,  $B_1$  ve  $C_1$  ölçümler sonucu belirlenmiş olan karakteristik sabitlerdir.  $V_1$  özgül hacim,  $\phi$  akışkanlık ( $1/\eta$ ) olarak da düşünülebilir.  $\omega_{\text{hacim}}$  ise kritik hacim ile bağlantılı olan ve yaklaşım sonucu ulaşılan bir sabittir. İlişkiye göre yoğunluğun artmasıyla viskozitenin lineer olarak arttığı kabul edilebilir.

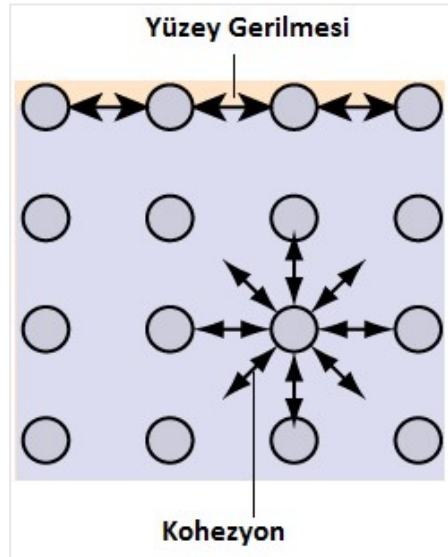
Bu ilişkiyi açıklamada kullanılan bir diğer formülde yine Bachinski tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Buna göre de  $x$  ve  $y$  viskozite sıcaklık ölçümlerinden elde edilerek tanımlanmıştır.  $J_1$  ve  $K_1$  de ilişkiyi oluşturmada kullanılan diğer sabitlerdir.  $V_2$  ise molar hacimdir [52].

$$\eta V_2^x = J_1 \exp (K_1/V_2 y T) \quad (2.4)$$

Buna göre de yoğunluğun artmasıyla viskozitenin lineer orantılı bir artışından söz edilebilir.

#### 2.5.1.2 Yüzey Gerilimi -Viskozite İlişkisi

Sıvıların yapısında yer alan moleküllerün komşu moleküller ile aralarında kohezyon kuvvetleri bulunmaktadır. Yüzeyde yer alan moleküller ise yalnızca aynı yükseklikteki moleküller ile bu tür bir etkileşim içersindedirler. Bu etkileşim yoluyla oluşan kuvvetler yüzey gerilmelerini ortaya çıkarır. (Şekil 2.7)



**Şekil 2.7** Kohezyon ve yüzey gerilmeleri [53]

Yüzey gerilmeleri sıvılar için karakteristik bir fiziksel özelliktir. Bunun yanında viskozite ise bilindiği gibi akış kapasitesinin ölçümü niteliğindedir. Yapılan bazı ölçümler bu iki fiziksel özellik arasında anlamlı bir ilişkiyi ortaya çıkarmaktadır.

Pelofsky eşitliğine göre;

$$\gamma = A_2 \cdot e^{(\beta_1/\eta)} \ln \gamma = \left( \frac{\beta_1}{\eta} \right) + \ln A_2 \quad (2.5)$$

$A_2$  ve  $\beta_1$  boyutsal sabitlerdir.;  $M_{\text{moleküler}} \cdot k / R_{\text{gaz}}$ 'nin bir fonksiyonu kabul edilebilir. Burada  $M_{\text{moleküler}}$  moleküler kütle,  $k$  ısı iletkenlik ve  $R_{\text{gaz}}$  ise gaz sabitidir. Schonhorn'a göre ise viskozite ve yüzey gerilmeleri arasında aşağıdaki ilişki söz konusudur.

$$\gamma = \gamma_N \cdot \exp \left[ - \frac{X_2}{(\eta_L - \eta_V)} \right] \quad (2.6)$$

Buna göre  $\gamma_N$ ; viskozitenin sonsuza gittiği sıcaklıktaki yüzey gerilmesi değeridir.  $\eta_L$  ve  $\eta_V$  ise buhar ve sıvının viskozitelerini ifade etmektedirler. Her iki ilişkiden de anlaşılacağı gibi yüzey gerilmeleri ile viskozite arasında ters orantı söz konusudur. Yüzey gerilmelerinin artmasıyla viskozite azalır [52].

### 2.5.1.3 Viskozite -Moleküler İç Yapı İlişkisi

Viskozitenin kendisini oluşturan moleküllerin fiziksel yapısı ile doğrudan ilişkili olması beklenir. Bu fiziksel özellikler; molar hacim; ( $V_2$ ) şekil faktörü; ( $\phi_1$ ) moleküler kütle; ( $M_1$ ), polarize olma kabiliyeti ( $\alpha_1$ ) ve çift kutup momenti ;( $\mu_1$ ) dır Bu özelliklerin hepsinin viskozite üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir [52].

#### 2.5.1.3.1 Viskozite-Moleküler Ağırlık İlişkisi

İzotop atomlardan oluşan ve yalnızca kütsel olarak farklılık gösteren iki malzemenin viskozitesi kıyaslanırsa; viskozitelerin moleküler ağırlığın karekökü ile doğrudan orantılı olduğu söylenebilir. Bu kıyaslama için sıvılaştırılmış metan ve döteryum metan ikilisi örnek teşkil edebilir. Bu ilişki aşağıdaki şekilde formülize edilebilir.

$$\eta_{P,T,\varphi 1,\mu 1,\alpha 1} = A_3 \sqrt{M_1} \quad (2.7)$$

Buna göre  $A_3$  malzeme türüne göre değişen bir sabit  $M_1$  ise moleküler ağırlığı ifade etmektedir. Atom numarası aynı olan malzemeler için kimyasal ya da fiziksel müdahaleler ile moleküler ağırlığı artırmak ya da bu tür bir maddeyi seçmek viskoziteyi artırmada bir method kabul edilebilir [52].

#### 2.5.1.3.2 Viskozite ve Molar Refraksiyon İlişkisi

Molar refraksiyon; maddelerin ışıkla olan etkileşimlerini ortaya koyan kimyasal bir özelliktir. Her malzeme için bir molar refraksiyon sayısı hesaplanabilir.

Lutski'ye göre viskozite ve moleküler ağırlık oranı ile  $\eta/M_1$  ile RD molar refraksiyon arasında bir ilişki kurulabilir. Bu ilişki aşağıdaki ifadede belirtilmiştir.

$$\left( \frac{\eta}{\sqrt{M_1}} \right)_{P,T,\varphi 1,\mu 1} = A_3 (R.D). \frac{3}{2} \quad (2.8)$$

Bu ilişkide  $A_3$  malzeme türüne göre belirlenen bir sabittir.  $\eta/M$  ile RD arasındaki ilişki çizilirken ortaya çıkan noktalar, benzer şekil faktörüne sahip bileşenler için yakınlık gösterir [52].

#### 2.5.1.3.3 Viskozite - Dipol Moment İlişkisi

Dipol moment, moleküler yapı içersindeki kutuplar arasındaki çekim kuvveti olarak kabul edilir. Bu çekim kuvveti molekülün içinde bulunduğu elektrik alan uyarınca değişebilmektedir. Bu tür bir etki sonucu değiştirilen dipol moment, viskozitede artma ve azalmaya neden olmaktadır.

Aynı moleküler kütle, benzer moleküler şekil ve aynı molar refraksiyon RD, değerine sahip olan bileşenler arasında, doğrudan dipol moment;  $\dot{Z}$ , ile viskozite arasında aşağıdaki lineer ilişki kurulabilir.

$$\eta = E_1 \dot{Z} + F_1 \quad (2.9)$$

Burada ve  $E_1$  ve  $F_1$  ölçüm sonuçlarından elde edilen sabitlerdir,  $\mu$  dipol momenti,  $\eta$  ise dinamik viskoziteyi ifade etmektedir. Buna göre viskozite dipol momentin artması ile lineer bir artış gösterir [52].

#### **2.5.1.3.4 Viskozite ve Şekil Faktörü İlişkisi**

Viskozitenin molekül şekil faktörü; ( $\phi$ ) ile viskozite; ( $\eta$ ) arasındaki ilişkiye göre 3 boyutlu olan molekül yapılarının viskoziteleri düz zincir yapısına sahip moleküler yapıdaki malzemelerin viskozitelerine göre yaklaşık olarak %20 daha büyüktür. Halkalı moleküler yapıya sahip bileşenlerin viskoziteleri ise düz zincir yapısına sahip moleküllere göre 2 ila 4 katı kadar daha büyük bir viskoziteye sahiptir. Bu bağlamda sıvıların içersine halkalı moleküler yapıya sahip olan katkı maddeleri eklemek viskoziteyi artırmada kullanılabilecek önemli bir yöntem olarak kullanılabilir [52].

#### **2.5.1.3.5 Bağların ve Halkalı Yapıların Viskozite ile İlişkisi**

Maddelerdeki gözlemlenebilir düzenlilik; bağların varlığı veya yokluğu ile ilişkili kabul edilir. Bunun temel nedeni ilgili bağların molekül içersindeki serbest dönmeye izin vermesi ya da vermemesidir. Çok halkalı moleküler yapıya sahip olan maddeler göreceli olarak daha rijittir. Bu da içersinde hareketli yapıları barındırmayan belirli bir şekle sahip olması anlamına gelmektedir. Bu tür çok halkalı yapılara sahip moleküler yapıda olan sıvılar yüksek viskozitelere sahiptirler. Düz zincir yapısına sahip olan moleküler yapıdaki sıvılarda ise viskoziteler daha düşüktür. Normal hidrokarbonlar bu grup içersinde yer alabilir.

Sonuç olarak bir maddede çok sayıda bağın olması, moleküllerin diğerlerine göre dönme hareketi yapmasına olanak sağlayacaktır. Bu durum da moleküllerin kendilerine uygun pozisyonu sağlayarak sabitlenirler. Bu da akış prosesinin kolaylaşması açısından önem arz eder. Bu bakımdan moleküler bağların özellikleri viskoziteyi artırıcı ya da azaltıcı etki yapabilir [52].

#### **2.5.1.3.6 Aynı Şekil Faktörüne Sahip Maddeler Arasındaki Moleküler Özellik - Viskozite İlişkisi**

Lutski'nin yapmış olduğu analize göre aynı şekil faktörüne; ( $\phi$ ) sahip maddeler arasında aşağıdaki ilişki bulunmaktadır.

$$\left(\frac{\eta}{\sqrt{M(RD)^{3/2}}}\right)_{P,T,\phi} = E_2 + F_2\mu \quad (2.9)$$

Burada  $E_2$  ve  $F_2$  malzemeler uyarınca belirlenmiş sabitlerdir. Bu ilişki  $C_6H_5X$  genel formülüne sahip olan bileşik serisi için doğrulanmıştır. İlgili formülde yer alan X yerine  $CH_3$  – (Metil)  $OCH_3$  (Metoxy benzen) – F (Florür) – Br (Bromür) – Cl (Klorür) – I (İyodür) –  $N(CH_3)_2$  (dimetilamino) –  $COOC_2H_5$  (meperidin) –  $COCH_3$  (asetik) – CN (siyanit) – NC (isosiyanit) –  $NO_2$  (Azotdioksit) –  $NH_2$  (amin) – OH (hidroksit) gelebilir. Buna karşın bazı bileşikler için beklenen lineer ilişkiden sapma gözlenmektedir. Özellikle içeriğinde –OH, –COOH ve – $NH_2$  bulunan bileşikler büyük sapma göstermektedir. Lutski; verilen ilişkiden sapan bu değerleri; hidrojen moleküllerinin intermoleküler; moleküller arası ya da daha kuvvetli olan intramoleküler; molekül içi bağlar kurmuş olması ile açıklamıştır. Bu tür sıvıların viskozitesi yukarıdaki ilişkide hesaplanarak öngörülenden 5 ila 10 kat arası fazla çıkabilmektedir [52].

### 2.5.2 Viskoziteye Etki Eden Dış Kuvvetler

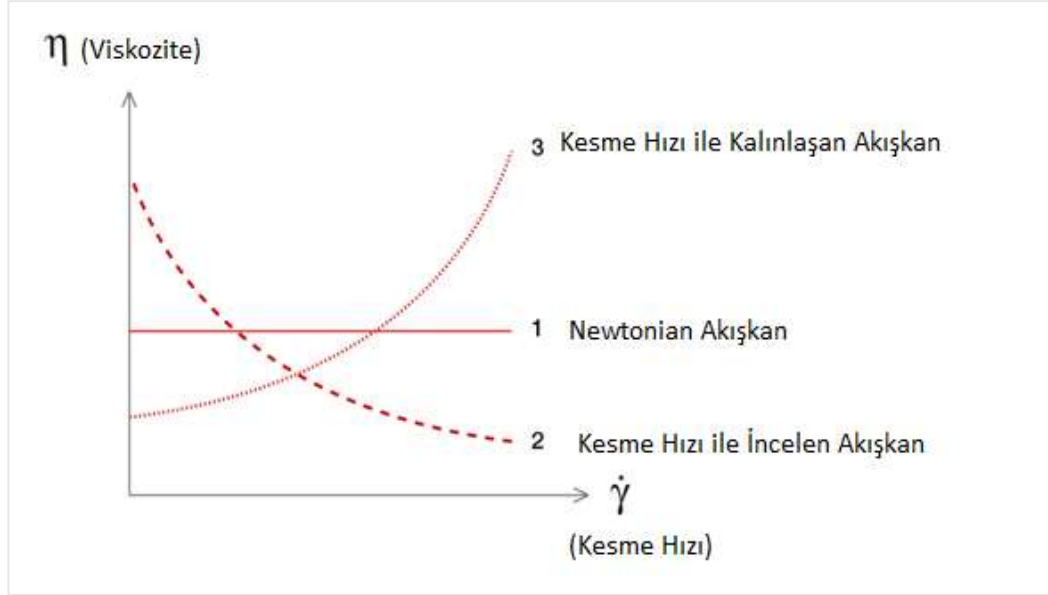
Bir akışkanın viskozitesini belirlemede akış şartları oldukça önemlidir. Akışkan laminar akış sağlayacak özelliklere sahip olmalıdır. Laminar akışta, moleküllerin tabakadan tabakaya değişiklik göstermediği ince katmanlarda gerçekleşir. Akış düzenli bir yapıya sahiptir.

Türbülanslı akışta ise düzenli bir yapı ya da katmanlar gözlenemez. Moleküller serbestçe hareket eder ve akış vorteks formundadır. Türbülanslı akış şartlarında viskozitenin kontrollü biçim seyretmesi ya da ölçülebilir olması zordur. Alınan ölçümlerde viskozitenin yanlış tespit edilmesi ihtimali fazladır, bunun yanında ölçüm sonuçlarının laminar akışa göre yüksek olması öngörülür.

Kesme hızı iki plaka modeli göz önünde bulundurulduğunda bir diğer önemli parametredir. Bununla birlikte maddenin akış davranışını da belirler. Kesme hızı ile

doğrudan viskozite arasında korelasyon kurmak bazı şartlara bağlı olmakla birlikte mümkündür. Bu şartlar akışkanın Newtonian akışkan olup olmaması ile ilgilidir.

Bir akışkanın akmaya karşı olan direnci dış kuvvetlerden tamamen bağımsız ise bu akışkanın ideal viskoz ya da Newtonian akışkandır. Newtonian akışkanların kesme hızı ile viskozite değişimleri Şekil 2.8’de yer alan eğride görülebilir.



**Şekil 2.8** Newtonian akışkan(1), kesme hızı ile incelen akışkan(2), kesme hızı ile kalınlaşan akışkan(3) [54]

Buna göre akışkana uygulanan kuvvetten bağımsız olarak viskozite sabit kalmaktadır. Bu gruptaki akışkanlara, su, hava, alkol, gliserin ve belirli seviyenin altındaki incelikte yağlardır. Otomotiv ve motor yağları göz önünde bulundurulduğunda belirli incelikte olan yağlar bu grubun içersinde yer alır. Genel olarak deneysel çalışmalar ve hesaplamalarda yağda gerçekleşen bu değişim dikkate alınmaz. Ama gerçek çalışma koşullarında yağda yer alan incelmeye ve kalınlaşmalar nedeniye oldukça küçük de olsa yağın Newtonian akışkanların aksine davranışlar gösterebileceği de göz ardı edilmemelidir.

Eğer bir madde ideal viskoz değilse ya da viskozitesi kesme hızı ile değişiyor ise bu tür akışkanlar için görünür viskozite terimi tanımlanmıştır. Bu gruptaki akışkanların kesme hızından iki türlü de etkilenmeleri mümkündür. Yine Şekil 2.8’de görülebileceği gibi kesme hızının artması ile incelmeye yani viskozitenin

azalması ya da kesme hızının artması ile kalınlaşma yani viskozitenin artması davranışları gösterilebilmektedir [54].

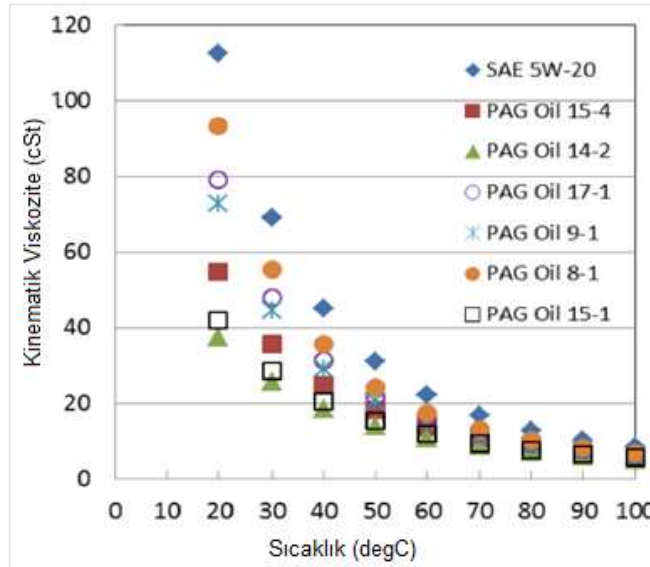
### 2.5.3 Viskoziteye Etki Eden Çevresel Faktörler

Viskoziteye etki eden çevresel faktörler sıcaklık ve basınçtır.

#### 2.5.3.1 Sıcaklık

Bir akışkanın viskozitesi güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. Kesme hızı ile birlikte sıcaklığın diğer etmenlere göre ağırlığı oldukça yüksektir. Genel olarak yüksek sıcaklıklar düşük viskozite, düşük sıcaklıklar ise yüksek viskoziteye neden olmaktadır. Anlaşılabileceği gibi viskozite ve sıcaklık arasında ters bir orantı mevcuttur. Sıcaklıktaki değişim viskoziteyi her zaman değiştirmektedir. Değişimin büyüklüğü maddenin cinsine ve moleküler yapısına göre farklılık göstermektedir. Örneğin kimi akışkanların sıcaklığında meydana gelen 1°C'lik artma, viskozitenin yaklaşık %10 oranında artmasına neden olmaktadır.

Cuthbert'de yapmış olduğu çalışmasında farklı yağ tipleri için sıcaklık-viskozite ilişkisini incelemiş ve ölçüm sonuçlarını paylaşmıştır. Sıcaklık trendleri farklılık gösterse de viskozitedeki değişimin boyutları aşağıdaki grafikte gözlemlenebilir [55].(Şekil 2.9)



Şekil 2.9 Farklı tipte yağların sıcaklık-viskozite ilişkisi [55]

Sıvıların viskozitesinin sıcaklıkla olan ilişkisini ortaya koymada kullanılabilecek tam kapsamlı bir teori bulunmamaktadır. Bunun nedeni sıvıların kompleks yapısıdır. Buna karşın Kirkwood tarafından önerilmiş hesaplama ve Cummings-Evans ikilisi tarafından ortaya koyulmuş olan moleküler yaklaşım; her ne kadar büyük sapmalara neden olsa da kullanışlı sayılabilir. Ayrıca yarı ampirik ve ampirik metotlar tüm sıvılar için genelleştirilmeseler de daha tutarlı sonuçlar vermektedirler. Korelasyon metotları iki sabitli, üç sabitli ve çok sabitli formlar olarak gruplandırılırlar.

Farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulan eşitlikler için sabitlerin tespiti yapılırken, çok sayıda ölçümden yararlanılmıştır. Sıcaklık-viskozite grafiği üzerindeki ölçümler ile tespit edilmiş noktalara en yakın geçen eğriyi belirleme adına yapılan çalışmalarda bu eğriler 2, 3 ya da çok sayıda sabit içeren eşitliklerle ifade edilmişlerdir. Örneğin 2 sabitli eşitliklerde genelde sıcaklıktan bağımsız olan  $A_4$  sabitleri -2 ile -5 aralığında seyrederken sıcaklık ile bağımlı olan  $B_2$  sabitleri 700 ile 1200 dolaylarında değişmektedir. Sabit değerleri eşitlikteki sabit sayısı, üzerinde çalışılan malzemenin karakteristiği ve tespiti yapılmak istenen sıcaklık aralığına göre değişiklik gösterir.

#### **2.5.3.1.1 İki sabitli eşitlikler**

Aşağıdaki yaklaşıma göre sıvıların viskozitesinin logaritması, mutlak sıcaklık değişimi ile lineer olarak azalmaktadır. Bu eşitliklerden ilki ve en çok kullanılan Duhne tarafından ortaya koyulmuştur.

$$\ln(\eta) = A_4 + \frac{B_2}{T(^{\circ}\text{C})} \text{ ya da } \eta = A_4 \exp\left(\frac{B_2}{T}\right) \quad (2.11)$$

$A_4$  ve  $B_2$  ampirik olarak belirlenen sabitlerdir. Kaynama noktasının üzerinde yer alan sıcaklıklarda  $\ln(\eta)$  ve  $1/T$  arasında lineer olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Bu sıcaklıklar için yarı ampirik methodalar kullanılarak viskozite-sıcaklık değerleri belirlenmektedir.

Bunun yanında Viswanath ve Natarajan ise buna benzer şekilde dinamik ve kinematik viskoziteler için aşağıdaki eşitiği çıkarmışlardır.

$$\eta = C_2[T(^{\circ}C)]^{D_1} \text{ ya da } \nu = C_2'[T(^{\circ}C)]^{D_1} \quad (2.12)$$

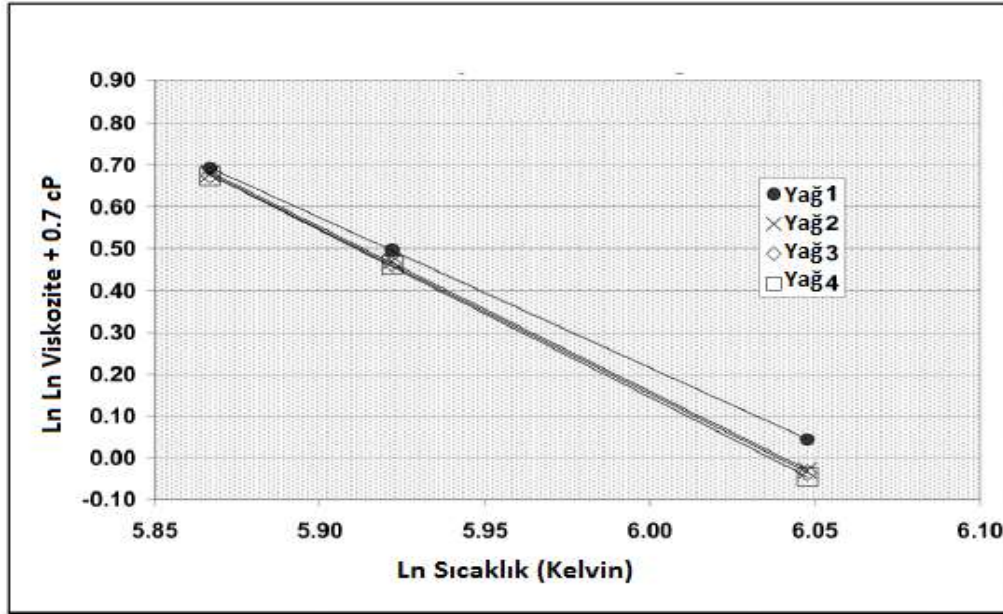
Qung-Fang ise bunlardan farklı olarak buharlaşan sıvılar için oldukça geniş bir aralıkta aşağıdaki yaklaşımı ortaya koymuştur.

$$\ln(\eta V_2/RT) - (P_1 V_2/RT) = \ln(1/\gamma) + \alpha(\Delta U_{\text{vap}}/RT) \quad (2.13)$$

Burada  $\alpha$  ve  $\gamma$  sabitlerdir. Bunun yanında  $P_1$  buhar basıncı,  $V_2$  molar hacim,  $U_{\text{vap}}$  buharlaşma enerjisini göstermektedir.

Theodore'un çalışmasında yer verdiği; MacCoull, Wright, Walter eşitliği iki sabitli eşitlikler yaklaşımına örnek verilebilir. Bu yaklaşımda eğrinin çizimi denklem 2.15'deki bağıntı ile yapılır. 2 farklı sıcaklıktaki değeri bilinerek elde edilen eğrinin farklı yağ tipleri için diğer ölçümlere yakınsadığı gözlemlenebilir [56]. (Şekil 2.10)

$$\ln(\ln(\text{viskozite} + 0,7)) = \ln(\text{sıcaklık}(^{\circ}K) \times \text{eğim} + \text{ksen kesim noktası}) \quad (2.15)$$



**Şekil 2.10** Mac Coull, Wright, Walter eşitlikleri ile viskozite-sıcaklık ilişkisi yaklaşımı [56]

#### 2.5.3.1.2 Üç sabitli eşitlikler

Bu tür eşitliklerin en önemlisi Vogel tarafından ortaya koyulmuştur.

$$\ln(\eta) = A_5 - \frac{B_3}{T(^{\circ}\text{C}) + C_3} \quad (2.16)$$

Burada  $A_5, B_3$  ve  $C_3$  sabitleri oluşturmaktadır. Bu yaklaşım formu 2 sabitli formların tümünden daha doğru yani daha az sapmalı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle de mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilenidir. Dutt ve Prasad; Vogel bağıntısını yaklaşık 100 madde üzerinde doğrulama gerçekleştirmişlerdir. Bu doğrulamaya göre %0,62'lik bir sapma görülmektedir. Bu yönüyle sapma değerleri %1,4 olan 2 sabitli eşitliklere karşı üstünlük göstermektedir.

Thorpe ve Rodger ise viskozite ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi aşağıdaki fonksiyon ile ortaya koymaktadır.

$$\eta = \frac{C_4}{1 + A_6 T(^{\circ}\text{C}) + B_4 T^2(^{\circ}\text{C})} \quad (2.17)$$

Bu yaklaşım diğerlerinden daha az sapmalı daha doğru bir sonuç ortaya koysada yalnızca 20-25 dolaylarında madde için kullanılabilir olması, Vogel eşitliğinin gerisinde kalmasına neden olmuştur [52].

#### 2.5.3.1.3 Çok sabitli eşitlikler

Bu tür eşitliklerde 3'den fazla sabit kullanılarak yaklaşımın doğruluğunu ve hitap ettiği sıcaklık aralığını geliştirmek amaçlanmıştır. Literatürde çok sayıda polinom formda eşitlikler yer alsa da bunların en temeli Reid tarafından verilmiş olandır.

$$\ln(\eta) = A_7 + \left( \frac{B_5}{T(^{\circ}\text{C})} \right) + C_5 T + D_2 T^2(^{\circ}\text{C}) \quad (2.18)$$

Yaws da aynı eşitlik yardımıyla 355 adet sıvının viskozitesine olan yaklaşımı doğrulamıştır.

#### 2.5.3.2 Basınç

Çoğu durumda basıncın artması ile birlikte akışkanların viskozitesi artar. Sıcaklığa oranla, madde üzerindeki basıncın viskoziteye etkisi oldukça azdır. Bunun sebebi

gaz dışındaki akışkanların düşük ve orta seviyedeki basınçlarda genellikle sıkıştırılmaz kabul edilmeleridir. Yüksek seviyedeki basınç değişimleri ise viskozite üzerinde etkilidir. Etkinliğin sıcaklık faktörüne göre ne denli düşük olduğunu anlamak için şu yargı göz önünde bulundurulabilir; basıncın 1 bar'dan 300'bar'a çıkarılması viskozitenin %10 oranında artması anlamı taşımaktadır.

1 bardan 2000 bar'a artış şeklinde gerçekleşen bir basınç artışı; küçük moleküllü akışkanlarda viskoziteyi yalnızca 3 birim faktörden 7 birim faktöre artırmış olsa da , yüksek viskoziteli ve mineralli yağlarda bu faktör 20000'e sentetik yağlarda ise 8 milyona kadar çıkabilmektedir..

Akışkanların çoğunda ise artan basınç ile viskozitenin önemli ölçüdeki artışı, serbest akışkan hacminin yüksek oluşundandır. Basınca bağlı hacmin azalması ile moleküllerin hareket alanı kısıtlanır. Bu durumda iç sürtünmeler artar, bu da akışa olan direncin yani viskozitenin artması şeklinde sonuçlanır.

Stefan ve Lucas yaptıkları deneysel çalışmaları için ortaya koydukları viskozitenin basınca bağlı fonksiyonunu doğrulamışlardır.

$$\frac{\eta}{\eta_{SL}} = \frac{1 + Y_1 \left( \frac{\Delta P}{2,118} \right) Z_1}{1 + X_1 \cdot \omega_1 \cdot \Delta P} \quad (2.19)$$

Bu eşitliğe göre,  $\eta$  sıvının P basıncındaki viskozitesi,  $\eta_{SL}$ , sıvı buharının ilgili sıcaklıktaki viskozitesi,  $\Delta P$  kritik basınç ile buhar basıncı arasındaki fark,  $\omega_1$  eksantrik faktör,  $Z_1, X_1$ , ve  $Y_1$  sabitler olarak alınır. Bu methodla elde edilen sonuçlar genelde deneysel sonuçlar ile %10 dolaylarında farklılıklar gösterir.

Basınç altındaki suyun değerlendirmesinde durum diğerlerinden biraz farklıdır. Su en yüksek yoğunluğuna 4°C'de ulaşır. Bu durum suyun basınç altındaki akışına da etki eder. 32°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda su da diğer sıvılar gibi davranır. Viskozitesi basınç ile birlikte artar. Fakat bu seviyenin altındaki sıcaklıklarda 20MPa altındaki basınç artışlarıyla suyun viskozitesi düşmektedir. Bu düşüşün suyun moleküler yapısında yer alan hidrojen köprüsünün 3 boyutlu bağlantılarının bozulmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir [54].

## **2.6 Motorlarda Yağlama Sistemi Elemanları Ve Çalışması**

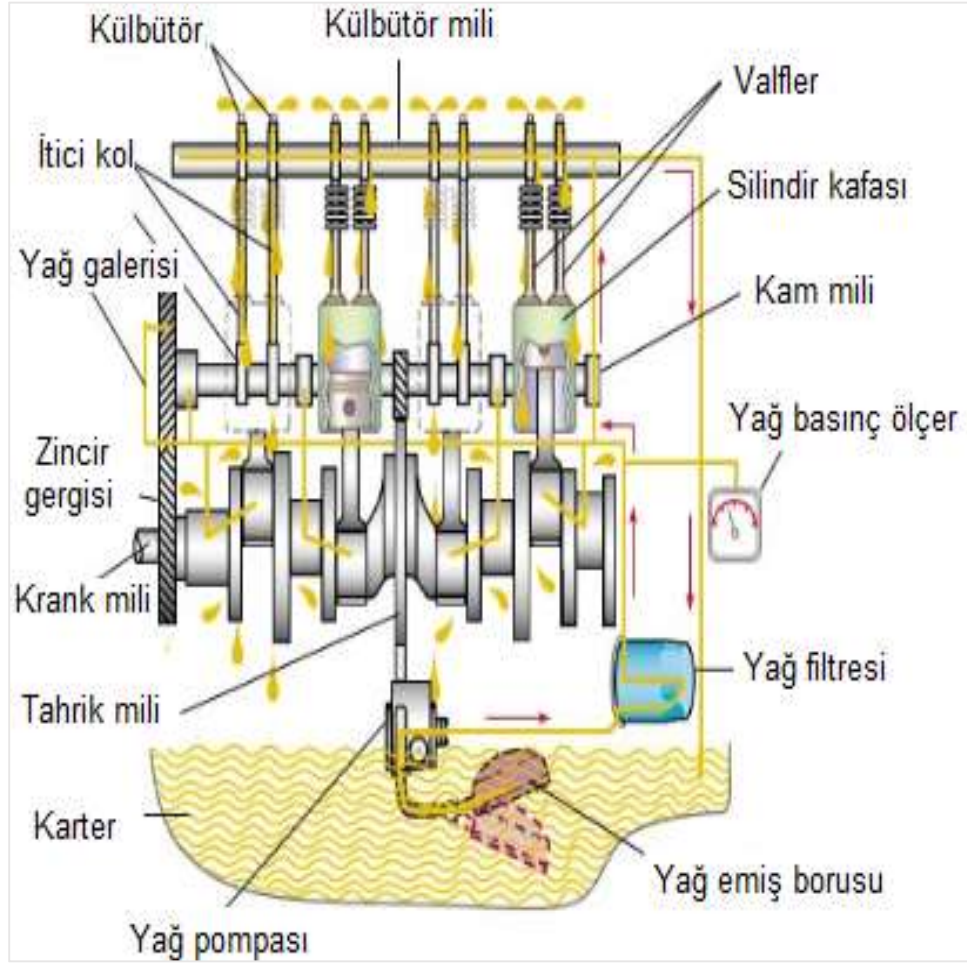
Motor yağlama sistemleri motorun iş yapması sürecinde; çalışmanın sürekliliğini sağlamak, hareket sırasında oluşabilecek negatif etkileri önlemek ya da azaltmak, çalışmanın verimliliğini artırmak gibi temel görevler üstlenir. İçten yanmalı motorların hepsinde bağıl hareketin yapıldığı tüm bölgelerde yağlama gereksinimi doğmaktadır. Sistemler de genellikle bu bölgelerin istenilen performans ile yağlanması amaçlanarak tasarlanmaktadır. Bölüm 2.1’de motor içerisinde gözlemlenen sürtünme kayıplarına yer verilmişti. Özellikle bu kayıpların görüldüğü kısımlar yağlamanın ana hedefi olan bölgelerdir. Bu bölgeler; piston-segman-silindir bağıl hareketinin gerçekleştiği bölgeler, krank yatakları ve subaplar olarak kabul edilir. Bunun yanında bazı yardımcı sistemlerin yağlanması da özellikle yeni jenerasyon motorlarda yağlama sisteminin fonksiyonu kapsamında olmalıdır. Bunlara için en önemli örnek turbo sistemlerinin yağlanması olarak kabul edilebilir.

Yağlama sistemi; yağ karteri, yağ çekme borusu, yağ pompası, ana yağ galerisi, turbo yağ besleme boruları ve bunların yardımcı parçalarından oluşmaktadır. Sistematik olarak yağ karterden pompa ve çekme borusu yardımıyla emilir, daha sonra ana yağ galerisine iletilir. Buradan piston yatakları, krank yatakları, subap sistemleri, turboşarj sistemi vb.iletilerek yağlama her bir çevrim için tamamlanır. Yağın rejim sıcaklığına ulaşma ve istenen sıcaklıklarda çalıştırılması konularında potansiyel teşkil eden yağlama sistemi elemanları Şekil 2.11’deki gibi düşünülebilir.

### **2.6.1 Motor Yağı**

Motor yağı fonksiyonel olarak bir çok göreve sahiptir. Bunlardan en önemlisi bağıl hareketin olduğu bölgelere ulaşarak hareket sırasında sürtünmeyi azaltmak ve sürtünmenin olumsuz etkilerine en aza indirmektir. Yağlama yağının çok sayıda görevi olsa da temelde aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir.

- Bağıl hareketin gerçekleştiği bölgelerde sürtünmenin azaltılması
- Kimyasal yapı sayesinde korozyonun azaltılması
- Aşınmanın azaltılması
- Belli bölgelerin soğutulmasında yardımcı rol oynaması
- Sızdırmazlığın sağlanması



**şekil 2.11** Motor kesitinde yağlama sistemi elemanlarının görünüşü [57]

- Bağlı hareket yapılan bölgelerden katı partiküllerin uzaklatırılması ve motorun temiz kalması

Bunları yaparken yağın mümkün olan en uzun sürede ömrünü tamamlaması da amaçlanmaktadır. Zira araçların servise gitme süreleri yağ harcamı ve yağın bozulması ile paralellik gösterir. Buna bağlı olarak yağ toplam hacmi belirlenir.

Bunların yanında yağ toplam hacminin büyüklüğü ve yağın cinsi motor performansı ve motorun termal yönden yönetimi bakımından önemli bir potansiyel teşkil etmektedir. Yağın türü,   okluğ , katkı maddeleri ve de yönlendirilmesi uyarınca sürtünmeleri azaltma, düşük viskozite sağlama ve de sonucunda motor performansını artırma etkileri gözlemlenebilir.

### 2.6.2 Yağ Çekme Borusu

Yağ çekme borusu motorun en zor koşullarında bile yağ pompasının karter içersinde yağı çekebilmesi görevine sahiptir. Burada belirtilen zor koşullar motorun ivmelenme-frenleme; yokuş çıkma-inme gibi durumlarda yağın pozisyonlanmasıdır. Bu durumlarda dahi borunun uç kısmının yağın içersinde kalması hedeflenmektedir. Bu nedenle genellikle motor karterinin tabanına oldukça yakın bir bölgede konumlanır. (Şekil 2.12)



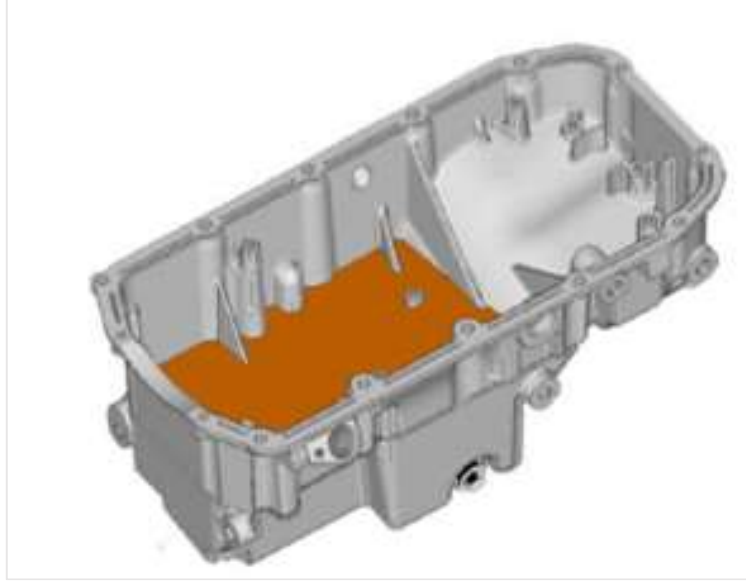
**Şekil 2.12** Yağ çekme borusu örneği [58]

### 2.6.3 Yağ Karteri

Yağ karteri motor yağının deposu niteliğindedir. Burada servis aralığı, motorun kullandığı yağ miktarı, yağ tüketimi ve bozunması gibi faktörler göz önünde bulundurularak belirlenen büyüklükte yağ depo edilir. Şekil 2.13’de yağ karteri örneği yer almaktadır.

Eski dönemlerde yalnızca yağ depolama görevine sahip olan yağ karteri; yeni jenerasyon motorlarda çok daha farklı rolleri de üstlenmektedir. Bu da motorun termal yönetimi bakımından önemli bir potansiyeli de beraberinde getirir. Bunlar genelde iki grupta toplanabilir. Birincisi karterin yağ sıcaklığının azaldığı bir bölge oluşundan doğan potansiyel olarak nitelendirilebilir. Özellikle bu soğumayı azaltma üzerinde etkili olabilecek; yeni karter malzemeleri, karter geometrileri, izolasyon eklentileri, karter cidar kalınlığı optimizasyonları bu gruba girer.

İkinci grup ise yağın daha hızlı ısıtılması ve rejim sıcaklığına daha hızlı ulaştırılması metodlarıdır. Bu durumda da bölmeli karter uygulamaları, yağın farklı stratejiler ile yönlendirilmesi, motor artık sıcaklıklarının entegre oluşumlarla kullanılmaları gibi örnekler verilebilir.

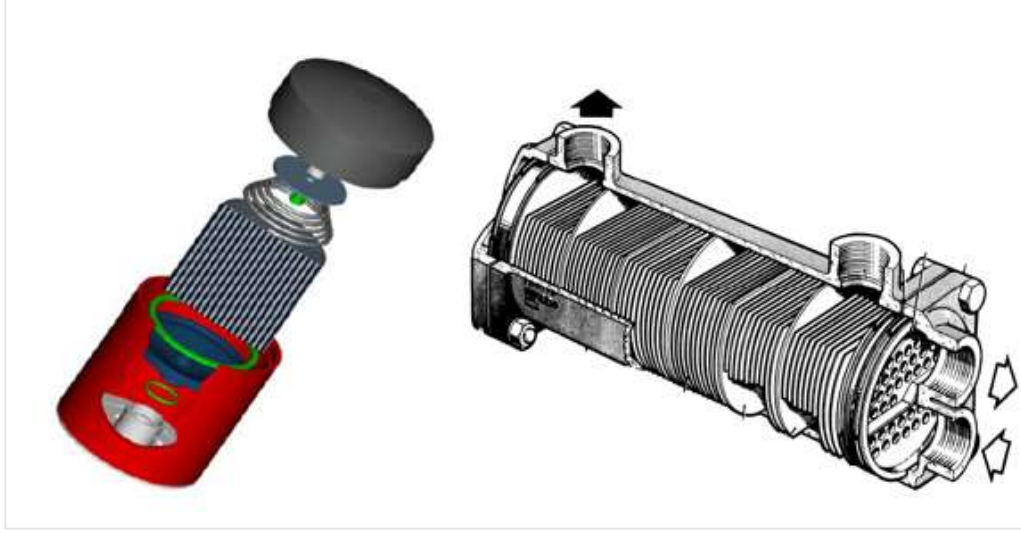


**Şekil 2.13** Yağ karteri örneği [59]

#### **2.6.4 Yağ Filtreleme ve Soğutma Elemanı**

Bu elemanın yağı pompadan alarak yataklara göndermeden önce soğutma ve katı partikülleri tutarak bağıl hareket bölgelerine ulaşmasını önleme fonksiyonları bulunmaktadır. Buna göre yağ ilk olarak pompadan alındıktan sonra eleman içersindeki plakalarda soğurucu akışkan yardımıyla soğutulur daha sonra ise soğumuş olan yağ yağ filtesinden geçirilerek ana yağ galerisine iletilir.

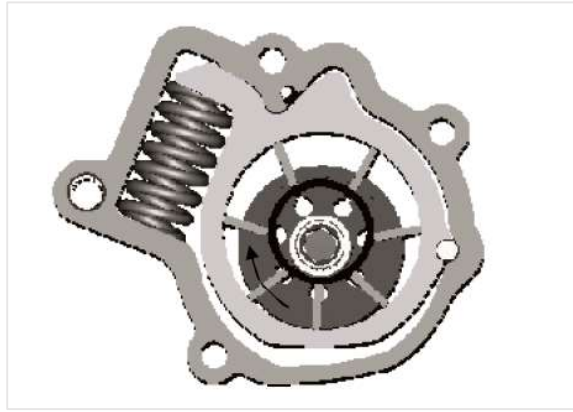
Bu elemanda da soğutma fonksiyonu gerçekleştirilmiş olduğundan yağın soğuma/ısıtma süreci üzerinde potansiyel teşkil etmektedir. Bu bağlamda motor çalışma koşullarına göre yapılacak otomasyonlar ısınma performansını geliştirebilecektir. Bunun yanında plaka sayısı ve geometrisi; çapraz akış-paralel akış niteliği, elemanın kapasitesine etkiyecek diğer tüm nitelikler yağın sıcaklığı üzerindeki etkileri bakımından ele alınabilir. (Şekil 2.14)



**Şekil 2.14** Yağ filtreleme [60] ve soğutma elemanı örneği [61]

### 2.6.5 Yağ Pompası

Yağ pompası genellikle hareketini kam milinden alarak motor devir sayısı ile bağlantılı biçimde yağ debisi ve basıncı sağlamaktadır. Yağın yağlı hareketlerin gerçekleştiği sürtünme yüzeylerinde yeterli basınca ve kalınlığa sahip olması temel görevidir. Pompa seçimi gereken koşullar belirlendikten sonra yapılır. ır. Yapısı dolayısı ile doğrudan motor devir sayısının fonksiyonu olarak yağ debisi sağlayan klasik modelinin yanında, motor koşulları uyarınca değişik debiler sağlayan gelişmiş türleri de bulunmaktadır. (Şekil 2.15) Bunların yanında yeni nesil yağ pompalarında elektrik kontrollü sistemler kullanılarak motor koşullarına uygun basınç ve debide yağın sağlanması hedeflenmiştir.



**Şekil 2.15** Yağ pompası örneği [62]

### **2.6.6 Yağ Ana Galerisi**

Bu eleman yağ pompasından alınan ısının doğru şekilde gereken yataklara iletilmesi rolünü üstlenir. Motor tasarımına uygun olarak ortaya koyulmaktadır. Yağ sıcaklığındaki kayıpların önemli bir kısmı bu bölgede yer almaktadır. İlgili bölgenin malzemesi, potansiyel izolasyonları yine yağ sıcaklığı üzerinde etkili olma potansiyeli göstermektedir.

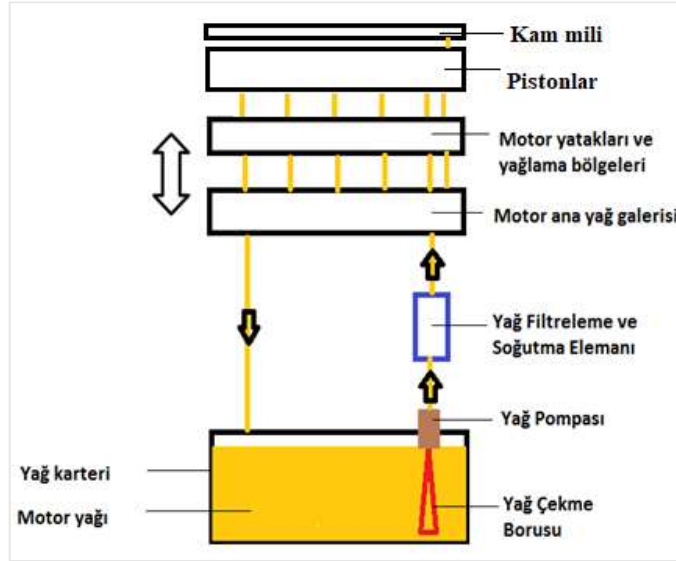
## MODELİN TEORİSİ VE OLUŞTURULMASI

---

Motorun soğuk ilk çalışması sırasında yağa ısı girişinin gerçekleştiği bölgeleri sıralamak; matematiksel yaklaşımın gerçekleştirilmesi açısından ilk adım olacaktır. Motor yağına ilk çalışma sırasında ısı geçişi temelde iki farklı prensiple gerçekleşir. Bunlardan birincisi ki araştırmacıların önemli bir kısmına göre en önemli ısı kaynağı olan sürtünme vasıtasıyla açığa çıkan ısının yağa geçmesidir [63], [64], [65], [66], [67], [68]. Bu sürtünmelerin içerisinde en önemlisi krank mili yataklarında gerçekleşmektedir. Çoğu analizler bu kaynağı yağ sıcaklık artışını gösteren en önemli kaynak olarak kabul etmektedir. Bunun yanında sürtünme yoluyla ısının açığa çıkarak motor yağı ile temas edebileceği bölgeler; krank ve kam mili yatakları, piston yatakları, subap mekanizması yatakları ve eğer varsa turbo yataklarıdır. Ayrıca yağ sıcaklığını artıran ikincil etkili faktör ise yanma odasında ve diğer sıcak yüzeylerden yağa geçen ısı enerjisidir.

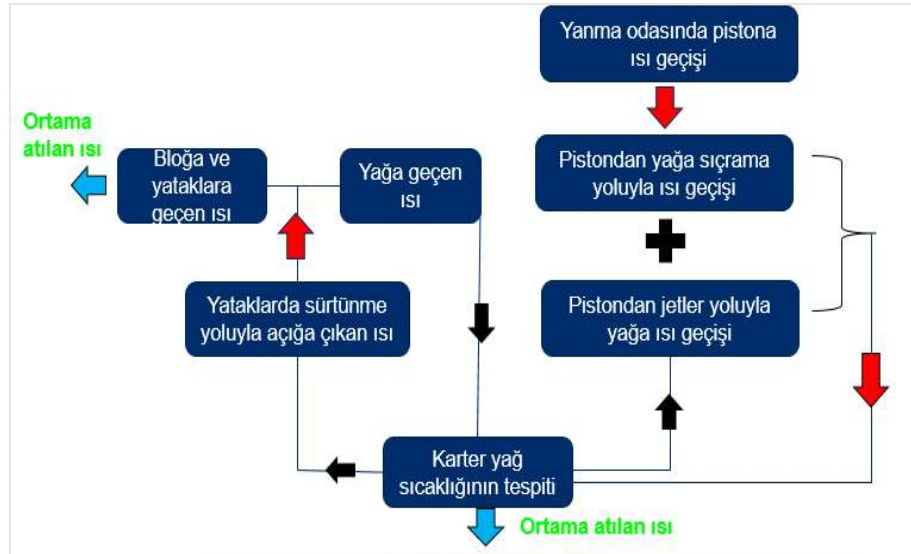
Bu bölge ve ısı geçiş türleri motor yağının sıcaklığının artırılmasında etkili olurken, bazı bölgeler de aynı süre zarfında yağın soğumasına neden olmaktadır. Motorun ilk çalışması ve sonraki sürecinde yağ karterinden atmosfere doğru bir ısı geçişi olur. Bu ısı geçişi, soğuk ilk çalışma için yağ sıcaklık artışının yavaşlamasına neden olmaktadır. Bunun yanında yağ soğutma modülü içerisindeki soğutucu akışkan ve motor yağının teması motor yağından SA'na doğru bir ısı geçişini dolayısı ile de sıcaklık artış hızının azalmasını ortaya çıkaracak, bu bakımdan motor karteri ile benzer bir etkiye neden olacaktır. Fakat yeni nesil motorların önemli bir kısmında soğutucu akışkan yağ modülü yağ sıcaklığı istenen düzeye ulaşmadan devreye girmemektedir. Bu da yağ soğutma modülünün kimi motorlar için gözardı edilebileceği anlamına gelmektedir. Bunun yanında motorun ilk çalışması sırasında

yağ kanalları ve galerilerde dolaşan yağın ısı kaybına neden olduğu ve dikkate alınması gerektiği de bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur [68]. Motor yağının dolaştığı alanlara aşağıda yer alan Şekil 3.1’de görülmektedir.



**Şekil 3.1** Motor yağının motorda izlediği yol

Aşağıdaki blok diyagramda ise karterde ortam sıcaklığına soğuma eğiliminde olan motor yağı, önce yağ modülüne oradan da ana yağ galerisi vasıtasıyla önce ısıyı alacağı krank mili yataklarına ve devamında pistonlar ile subap mekanizmalarına püskürtülecektir. (Şekil 3.2)



**Şekil 3.2** Motor yağının ısınma ve soğuması kontrol modeli

Bu matematiksel modellemede krank yataklarından sürtünme ile geçen ısı, yanma odasından konveksiyon ile geçen ısı, karterden ortama aktarılan ısı ve bloktan ortama atılan ısı hesaba katılmıştır.

### 3.1 Viskozite – Yağ Sıcaklığı İlişkisi

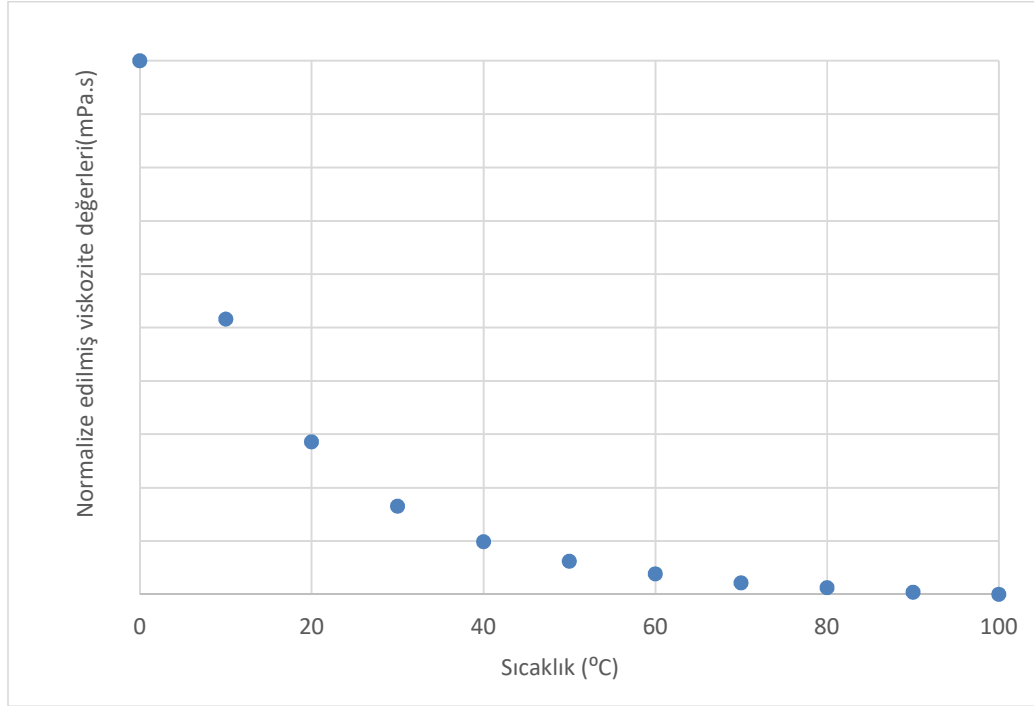
Viskozite değeri yağın ısınması ve ısı kaybetmesi sırasında sürekli olarak zamana bağlı değişecektir. Viskozite değerini sürekli olarak ölçmek mümkün olmadığından, sürekli ölçülebilen yağ sıcaklığı ile arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak model doğrulaması açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla yağ türüne göre sıcaklık-viskozite grafiğinden okunan değerler ilgili hesaplamanın bir girdisi olmalıdır. Bölüm 2’de belirtilmiş olduğu gibi yağın her bir sıcaklık değerindeki viskozitesini hesaplamak, eğri uydurma ya da 3. dereceden bir fonksiyon ortaya çıkarma ile mümkün olacaktır. Yağ sıcaklığı ile viskozite arasındaki ilişkiyi veren ifadenin ortaya çıkarılmasında araştırmacıların önemli bir kısmı Vogel eşitliğinden faydalanmışlardır [37], [70]. Vogel eşitliğine göre yağın üç noktadaki sıcaklık ve viskozite değerleri bilinirse; üç denklem ve üç bilinmeyen ile Vogel eşitlikleri oluşturulabilir. Bu sayede de ilgili yağ için eksponansiyel (üstel) bir denklem ortaya çıkarmak mümkündür.

$$\eta_{\text{vogel}} = R \exp\left(\frac{\theta_1}{\theta_2 + T}\right) \quad (3.1)$$

Burada  $\eta$  dinamik viskoziteyi,  $T$  sıcaklığı ifade ederken diğer terimler ilgili yağa ait sabitleri temsil eder.

Viskozite değerleri hiç bilinmeyen bir yağ sıcaklığı için ifade bu şekilde tespit edilirken, çok daha fazla sayıda bilinen noktaya sahip yağlar için durum daha kolaydır. Nokta sayısı arttıkça elde edilen ifadenin gerçek viskozite değerlerini yakınsama oranı da artacaktır. Bunun yanında yapılacak olan çalışmada en düşük yağ sıcaklığı ile en yüksek yağ sıcaklığı aralığındaki sonsuz tane noktanın yağ sıcaklığı değerine ihtiyaç duyulduğu gözetilirse; elde edilecek ifadenin hassasiyeti oldukça artar. Çalışmada hesaplanan her bir saniyelik yağ sıcaklığı değerine karşılık gelen viskozite değeri bir sonraki döngünün girdisi olarak kullanılmaktadır.

Şekil 3.3’de çalışmada kullanılacak olan standart yağ için 0-100 °C arasında 10°C’lik aralıklarla verilmiş 11 farklı sıcaklık için sıcaklık – viskozite değerleri görülmektedir. Bu aralıktaki tüm sıcaklıklara viskozite değerlerinin belirtilebilmesi için grafiğin sürekli bir eğriye dönüştürülmesi gereklidir.



**Şekil 3.3** Standart motor yağı için 10 farklı noktadaki sıcaklık-viskozite değerleri [71]

Deneyssel ölçüm verileri sonucu elde edilmiş olan değerler için yapılan eğri uydurmalarında en küçük kareler yöntemi daha uygundur. Şekil 3.3 te yer alan grafikte viskozitenin yağ sıcaklığı ile değişiminin exponansiyel olduğu görülmektedir. Bu nedenle eğrisi uydurulacak denklemin yüksek dereceden polinom ya da exponansiyel bir fonksiyon olma özelliği göstermesi gerekmektedir.

Bu metotta öncelikle denklem (3.2)’deki gibi bir yaklaşım polinomu belirlenir. Bu yaklaşım polinomunda daha sonra gerçek değerlere göre hata değerleri tespit edilerek bu değerlerin kareleri toplanır. Elde edilen değerlerin türevlerinin sıfıra eşitlenmesiyle hatanın en az hangi katsayıları için elde edildiği tespit edilmiş olur. Bu sayede eğri uydurma prosedürü tamalanarak, ilgili denklem belirlenmiş olur.

$$y = \sum_{j=0}^n a_j x^j = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \dots + a_n x^n \quad (3.2)$$

Gerçek değer ve eğri arası fark:

$$e_k = y - \sum_{j=0}^n a_j x^j \quad (3.3)$$

Hataların kareleri:

$$(e_k)^2 = \left( y - \sum_{j=0}^n a_j x^j \right)^2 \quad (3.4)$$

Karelerin toplamı:

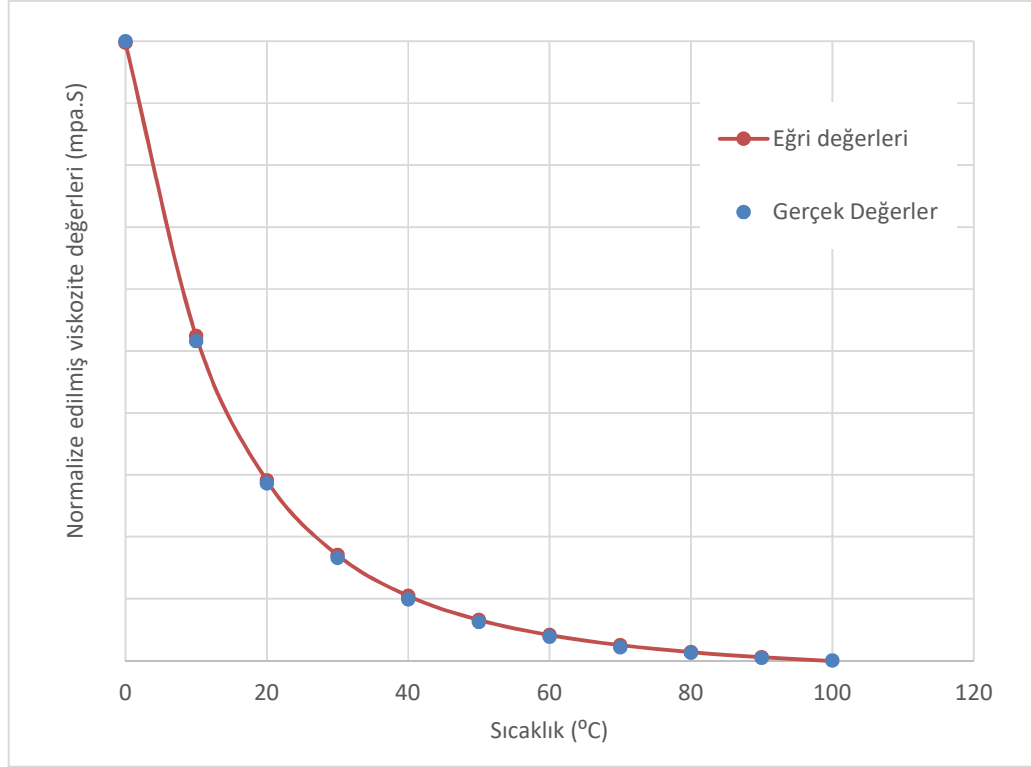
$$E = \sum_{k=1}^A \left( y - \sum_{j=0}^n a_j x^j \right)^2 \quad (3.5)$$

Türevin sıfıra eşitlenmesi:

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = \sum_{k=1}^A 2 \left[ y - \sum_{j=0}^n a_j x^j \right] \cdot [-x k_i] = 0 \quad (3.6)$$

Eğrinin gerçek değerlere yakınsaması polinom derecesinin artırılmasıyla artar. Denklem derecesi artırılarak yakınsama oranı daha da iyi bir seviyeye getirilse bile polinom yakınsaması bu tür bir eğri için yeterli hassasiyete sahip değildir. Bu nedenle eğri uydurma işlemi eksponansiyel fonksiyon için tekrar edilmektedir. Aynı işlemler  $y = a x e^{bx} + c x e^{dx}$  türünde bir denklem için gerçekleştirilir. Bu grafiğin polinom eğrisine göre daha iyi bir yakınsama gösterdiği ve % 98 dolaylarında bir doğruluk seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. (Şekil 3.4) Bu tür eksponansiyel fonksiyonlar için iki terimli bir fonksiyonun tek terimlere göre daha iyi bir yakınsama seviyesinde olduğu da gözardı edilmemelidir.

Bu eğri uydurma metodu modelde kullanılabilecek ve kullanılmakta olan bazı motor yağları için tekrarlanmıştır ve bu tekrarlar için Matlab programında yer alan 'eğri uydurma aracından istifade edilmiştir. Bu sayede elde edilen yağ tipleri ve denklemleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.4** Standart motor yağı için gerçek sıcaklık-viskozite değerlerinin eksponansiyel fonksiyona göre durumu

**Tablo 3.1** Farklı tipte yağların viskozite sıcaklık ilişkisini veren eğri denklemleri

| Motor Yağı<br>Tipi | Eğri Denklemi                                      |
|--------------------|----------------------------------------------------|
| Standart Yağ       | $\eta = 345 x e^{-x^{1T}} + 128 x e^{-x^{2T}}$     |
| Yağ 1              | $\eta = 606,4 x e^{-x^{3T}} + 129 x e^{-x^{4T}}$   |
| Yağ 2              | $\eta = 1006 x e^{-x^{5T}} + 321 x e^{-x^{6T}}$    |
| Yağ 3              | $\eta = 1082 x e^{-x^{7T}} + 370 x e^{-x^{8T}}$    |
| Yağ 4              | $\eta = 565 x e^{-x^{9T}} + 187 x e^{-x^{10T}}$    |
| Yağ 5              | $\eta = 865 x e^{-x^{11T}} + 258,5 x e^{-x^{12T}}$ |

### 3.2 Motor Sürtünmeleri Viskozite İlişkisi

Sabit koşullarda sürtünme üzerindeki en önemli faktör motor devir sayısı iken ilk ısınma koşullarında sürtünme kuvveti olan FMEP'in hesaplanmasında yağ viskozitesi önemli bir faktördür. Yağı, viskoziteyi daha hızlı düşürebilmek ve sürtünmeyi azaltmak için hızlı ısıtmak hedeflenmektedir. Ancak bunun yanında yağ ısındıkça sürtünme kuvvetleri düşer ve yağa ısı geçiş hızı azalır. Yağ karakteristiğindeki azalarak artan eğrinin nedenlerinden biridir. Sürtünme enerjisi Denklem 3.7 ile ortaya koyulmaktadır.

$$FMEP_i = \left[ a_i \left( \frac{n}{1000} \right)^2 + b_i \left( \frac{n}{1000} \right)^1 + c_i \right] \cdot \left( \frac{\eta}{\eta_{90C}} \right)^{d_i} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'de yer alan katsayılar deneysel ölçümler sonucunda belirlenmektedir. Jarrier vd.'ne göre eşitlikte yer alan di değeri bölgelerin yağlama rejimleri uyarınca kam mili yataklarındaki sürtünme için 0, piston ve segman kısımları için 0,5, krank yatakları için ise 1 olarak tespit edilmiştir. İlgili eşitlikte n motor devir sayısını  $\eta$  ise viskozite değerini ifade etmektedir [64].

Bunun yanında Leong tarafından ortaya konulan bir başka eşitlikte viskozite FMEP ve motor tipine göre değişen a sabiti arasında aşağıdaki eşitliğe ulaşılmıştır. (3.8)

$$FMEP = FMEP_{\text{fully warm}} \left( \frac{\mu}{\mu_{\text{fully warm}}} \right)^a \quad (3.8)$$

Bu eşitlik yağa geçen ısı modelinin içinde yer almasa da çalışma sonunda yağ sıcaklığı ve viskozitelere karşılık gelen göreceli sürtünme değerlerinin hesaplanmasında yardımcı olarak kullanılacaktır. Burada anlık ve tam ısınma durumundaki değerlerin yanında yer alan a sabiti benzin motorlarında 0,19 – 0,24 aralığında değişirken bu değer dizel motorlar için 0,25 – 0,32 dolaylarındadır. Daha önce bildirildiği gibi viskozitenin sıcaklıkla ters orantılıyken eşitlikte görüldüğü üzere sürtünmelerle hidrodinamik yağlama şartlarında doğru orantılıdır [70].

### 3.3 Yataklardan Sürtünme Yoluyla Yağa Geçen Isının Alt Model

Motor yağının ilk ısınması sırasında yağa geçen ısının önemli bir bölümünün sürtünme yoluyla elde edilir. Hidrokinamik yağlamanın görüldüğü yataklarda gerçekleşen sürtünme yağın ısınmasının başlıca kaynağıdır. Motor yataklarındaki sürtünmeler ısı enerjisine dönüşür. Isı enerjisi ise Denklem 3.9'da belirtildiği gibi motor yağına belirli bir oranda geçmektedir. Bu nedenle sürtünme gücünün ya da momentinin anlık olarak hesaplanması gerekmektedir.

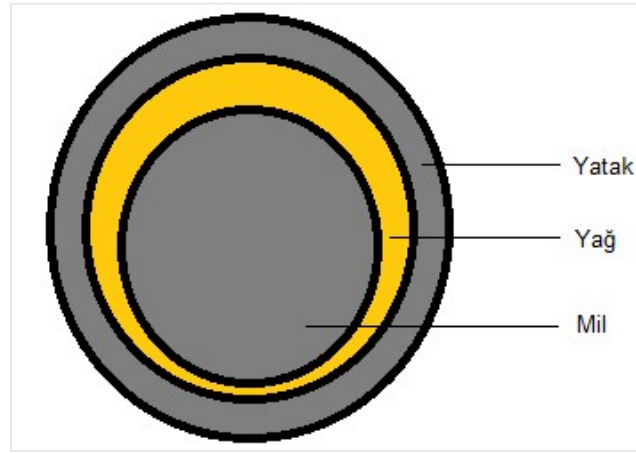
$$P_{\text{sürtünme}} \cdot X = Q_{\text{yağ}} \quad (3.9)$$

Sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısının önemli bir kısmı yataklara ve cidarlara iletilir. Trapy ve Damiral yapmış oldukları deneysel çalışmalarda yataklardaki sürtünme ile ortaya çıkan ısının yalnızca %40,'ının motor yağına geçtiği sonucuna varmışlardır [8]. İlgili kısım yukarıda yer alan Denklem 3.9'da yatak sürtünmelerinden ortaya çıkan ve yağa geçen ısıyı ifade etmektedir. Buradaki X katsayısı yağa geçen ısı oranıdır. Bu oranın yükselmesi durumunda oransal olarak yataklara geçen ısı azalır ve yağa geçen ısı artar. Bu değer Trapy ve Damiral'in çalışmalarında 0,4 civarındadır [8]. Yine Trapy ve Damiral'in çalışmasında yağa geçen ısı yalnızca yataklardaki sürtünmeden gelen ısı olarak hesaplanmış deneylerde elde edilen sonuçlara göre oluşan ısı farkı; diğer kaynaklardan geçen ısı olarak adlandırılmıştır. Diğer kaynaklar ile işaret edilenler; yanma odasından konveksiyon ile yağa geçen ısı, soğutucu akışkandan yağ soğutma modülü vasıtası ile geçen ısı, subaplar, piston ve yağın temasta bulunduğu tüm yüzeylerdir. Buna göre deneysel sonuçlar yağa geçen ısının %61'inin krank yataklarından; %39'unun diğer kısımlardan geldiğini göstermiştir. Bunun yanında pistona püskürtülen yağ soğutma nozülleri kapatıldığında sürtünmeden geçen ısı %91'e yükselirken diğerler ısı kaynakları ise %9'da sabitlenmektedir. Bu da göstermektedir ki standart motordaki yağa geçen ısıda diğerleri olarak nitelendirilen kısmın yaklaşık olarak %30-35'lik bir kısmı piston eteklerine püskürtülen yağın ısınması ile oluşur. Bu nedenle etek kısımlarında yağa geçen ısıyı hesaba katmak oldukça önemlidir [8].

Zammit vd. krank yataklardaki sürtünmelerin toplam sürtünmelerin 1/3 lük kısmını oluşturduğunu fakat yağı ısıtma özelliğinin baskın olarak krank yataklarındaki sürtünmeden geldiğini belirtmişlerdir [69].

Bunlar gözönünde bulundurulduğunda aşağıdaki metotlar kullanılarak sürtünme hesaplamasını Petroff veya Shayler tarafından verilen denklemlerden biri ile gerçekleştirmek mümkündür.

Petroff denkleminde ise r krank ve biyel yataklarının (Şekil 3.5) yarıçapı, L yatak genişliği, n motor devir sayısı,  $\mu$  viskozite ve C is radyal açıklıktır. (3.10) Bunun yanında Denklem (3.11)'de ise M sürtünme momenti ve w açısal hız yardımıyla sürtünme güç kaybı hesaplanır.



**Şekil 3.5** Motor yataklarının görünüşü

$$M = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^3 \cdot l \cdot n \cdot \mu}{C} \quad (3.10)$$

$$P = M \cdot w \quad (3.11)$$

Aynı zamanda f katsayısı kullanılarak da sürtünme momenti  $T_f$  hesaplanabilir bu durumda, f bir katsayı w ise yüküdür. (3.12 ve 3.13)

$$T_f = f \cdot w = 0,5 \cdot f \cdot (d \cdot l \cdot p) \cdot d \quad (3.12)$$

$$f = 2 \cdot \pi^2 \left[ \frac{\mu \cdot n}{p} \right] \left[ \frac{r}{c} \right] \quad (3.13)$$

Roberts'in [72]'in çalışmasında yer verilen Shayler [73]'in ampirik denklemine göre yataklardaki sürtünme denklem (3.14) ile hesaplanır. Burada F yataklardaki sürtünme kuvveti, D yatak çapı, L yatak uzunluğu,  $\mu$  viskozite, U yatak hızı, c eksantriklik,  $\beta$  ise sabittir.

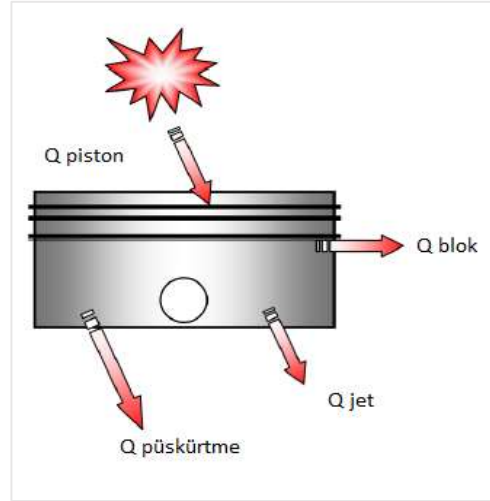
$$F = \beta \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \mu^{0,8} \cdot U^{0,6}}{C \cdot (1 - \mu^2)^{0,5}} \quad (3.14)$$

Trapy ve Damiral'ın yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlara göre motor devir sayısı yağın ısınma hızı konusunda etkin bir faktördür. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki devir sayısı 3 katına çıkarıldığında yağın ısınma eğrisi bundan büyük oranda etkilenmektedir. Buna karşın motor yükünün yağın ısınma eğrisi üzerindeki etkisi oldukça düşüktür. Yine deneysel sonuçlara göre, motor torkunun sabit devir için 10 Nm'den 60 Nm'ye çıkarılması, yağın ısınma hızını yalnızca 100 saniye dolaylarında artırmıştır [8]. Hızdaki değişimin büyük bir etki; yükteki değişimin de oldukça kısıtlı bir etki yapması konusu Roberts [72] tarafından diğer araştırmacılar da kanıt gösterilerek açıkça ortaya konulmuştur [8],[65],[74]. Dolayısı ile soğuk ilk çalışma için yataklardaki birim zamandaki toplam sürtünme yükten bağımsız değerlendirilebilir.

Bunun yanında devir sayısının büyük, yükün düşük etki yapıyor olması, yanma odasında yağa geçen ısının, yataklardaki sürtünmeden geçen ısıya oranla; yağın ısınmasında daha düşük bir paya sahip olduğu fikrini de destekler [72].

### 3.4 Pistondan Yağa Geçen Isının Alt Modeli

Motor yağı pistonun soğutulmasında önemli bir rol üstlenir. Eski nesil motorlarda yağın çarpması (splashing) ya da püskürtülmesi (spraying) metotları ile bu soğutma sağlanırken yeni nesil tasarımlarda daha çok piston soğutma jetleri vasıtasıyla yağın piston yağ galerisine yüksek hızlarda aktarılması ile de gerçekleştirilir. (Şekil 3.6) Burada motor yağına motor piston cidarlarından önemli bir ısı geçişi gerçekleşir.



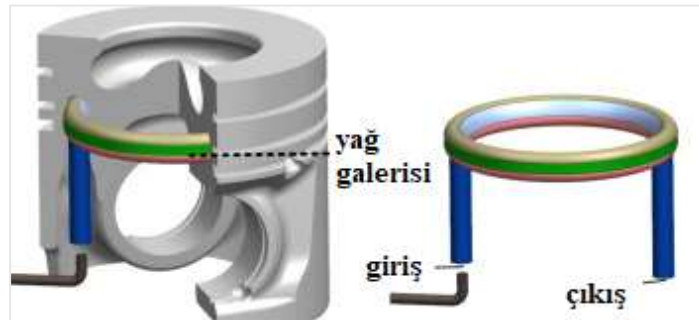
**Şekil 3.6** Pistondaki ısı dağılımı [75]

Bu ısı geçişinin hesaplanmasında piston ve yağ sıcaklığı arasındaki fark, yağın pistonla olan temas yüzeyi ve deneysel çalışmalar sonucu hesaplanmış olan yağın ulaştırılma tipine göre belirlenen ısı transfer katsayısı kullanılır. (Şekil 3.7)( 3.15,3.16 ve 3.17)

$$Q_{jet} = h_{jet} \cdot A_{kafaaltı} \cdot (T_{piston} - T_{yağ}) \quad (3.15)$$

$$Q_{püskürtme} = h_{püskürtme} \cdot A_{kafaaltı} \cdot (T_{piston} - T_{yağ}) \quad (3.16)$$

$$Q_{sıçrama} = h_{sıçrama} \cdot A_{kafaaltı} \cdot (T_{piston} - T_{yağ}) \quad (3.17)$$

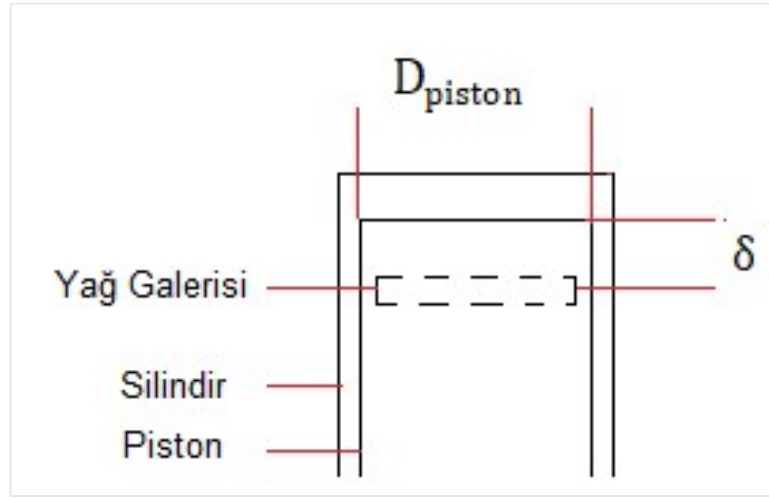


**Şekil 3.7** Motor yağının piston yağ galerisinde dolaşımı [77]

Burada motorda yağın pistonla ulaştırılma şekillerine göre bazı ısı transfer katsayıları belirlenmiş ya da ısı transfer katsayıları için hesaplama metotları

geliştirilmiştir. Isı transfer katsayısı jet püskürtmeler için 2050 W/m<sup>2</sup>K ve 3220 W/m<sup>2</sup>K dolaylarında değişirken, yağ sıçraması için 1200 -240 W/m<sup>2</sup>K civarındadır [77],[78].

Bunların yanında pistondan yağa geçen ısının soğuk ilk çalışmada hesaplanabilmesi için yanma odasından yağ galerisine doğru olan ısı transferinin hesaplanmasına da ihtiyaç vardır. Bu hesaplama denklem (3.18) yoluyla yapılabilir [79]. Bu eşitlikte;  $T_{piston}$  galeri bölgesindeki piston sıcaklığı,  $T_g$  yanma odasındaki ortalama gaz sıcaklığı,  $h_g$  konveksiyon ısı transfer katsayısı,  $F$  pistondaki kesit alanı,  $\lambda$  pistonun termal kondaktivitesi,  $\delta$  piston tepe noktası ile yağ galerisi arasındaki mesafe,  $D_{piston}$  piston çapı ve  $\Psi$  ise boyutsuz bir katsayıdır. (Şekil 3.8)



**Şekil 3.8** Denklem 3.18’de yer alan piston boyutları

$$Q_{\text{ısı transferi}} = \frac{(T_{piston} - T_{gaz}) \cdot F}{\left( \frac{1}{h_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{D_{piston}}{\lambda} \cdot \Psi \right)} \quad (3.18)$$

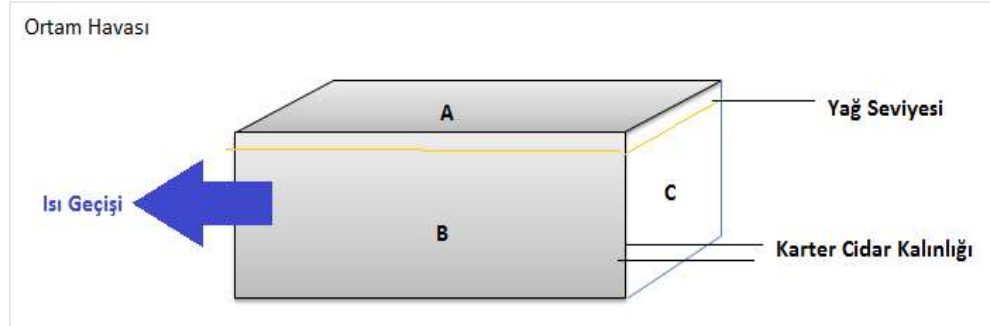
Bu geçiş yoluyla pistonun ısıısı zamana bağlı olarak denklem (3.19) ile hesaplanır.

$$Q_{piston} = c_{piston} \cdot m_{piston} \cdot \Delta T_{piston} \quad (3.19)$$

### 3.5 Karterden Transfer Edilen Isının Alt Modeli

Yeni nesil dizel motorlarda soğutma fonksiyonu yağ karterleri için birincil amaç olmasa da yağdan ortama doğru, motorun çalışması sırasında ve sıcak motorun duruşu sırasında bir ısı geçişi olmaktadır. Ortaya konulacak motor modeli için karterden gerçekleşecek olan soğuma bu bölümde matematiksel olarak verilecektir. Kartelden gerçekleşen soğuma alt modelinde, karter motordan bağımsız düşünülerek iç hacminde yer alan yağın ne kadar sürede rejim sıcaklığından ortam sıcaklığına soğuduğunu tespit etmek yağ karterinin kısmi modelini doğrulamak adına oldukça önemlidir. Bu sayede ana motor modeline entegre edilmiş olan karter modelinin doğruluğundan emin olunarak diğer kısımlar üzerinde kolaylıkla yorum yapılabilir.

Motor karterleri farklı araçlar için çok farklı geometrilere sahip olsa da bu çalışmada kullanılacak olan karterlerin düzgün olmayan dikdörtgenler prizması modeli şeklinde olduğu söylenebilir. Bu nedenle kurulacak olan yağ karterinde soğuma modeli için dikdörtgenler prizması şekli baz alınacaktır. Şekil 3.9'da karterin yüzey alanları, yağ seviyesi ve cidar kalınlıkları temsili olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.9** Plastik yağ karteri temsili resmi

Burada yağ karteri motordan bağımsız olarak soğumaya bırakılacağı için şekilde görülen A yüzeyi ısı transfer katsayısı oldukça düşük ve yüksek kalınlıkta bir levha olarak seçilmiştir. Bu bağlamda karter içersindeki sıcak yağdan ortama doğru gerçekleşecek olan ısı transferini hesaplamanın ilk adımı Şekil 3.10'da gösterildiği gibi ısı geçiş yolundaki dirençleri hesaplamaktır. İlk olarak yağdan kartere doğru doğal taşınım yardımıyla ısı geçişi; karter cidarından kondüksiyon yoluyla ısı geçişi ve karter yüzeyinden havaya doğru ise yine doğal taşınım ile ısı geçişi gerçekleşir. Doğrulama ve testler laboratuvar şartlarında durağan araç ve motor durumu

düşünülerek gerçekleştirildiği için hava akışları ihmal edilmiştir. Isı direncinin hesaplanmasının ardından birim zamandaki ısı transferi denklem (3.20-3.23) yardımıyla hesaplanabilir. Isı üretiminin olmadığı karter cidarı için ısı transferi denklem (3.20)'deki gibidir [80].

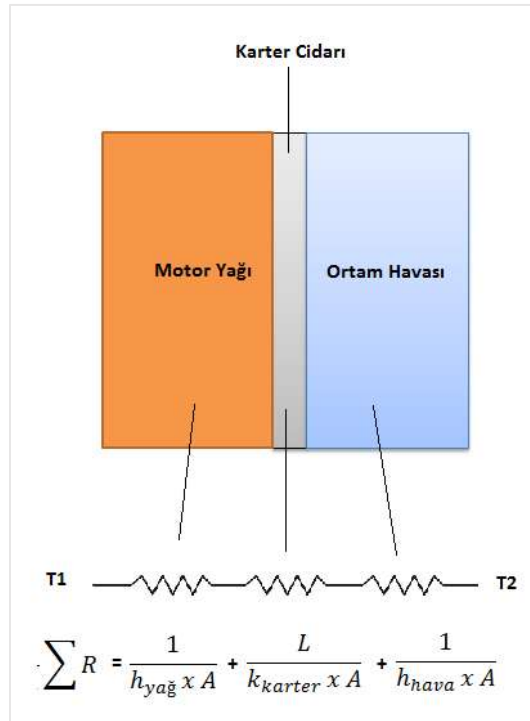
$$\frac{d}{dx} \left( k \cdot \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (3.20)$$

$$q_x = -k \cdot A \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.21)$$

$$\frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \quad (3.22)$$

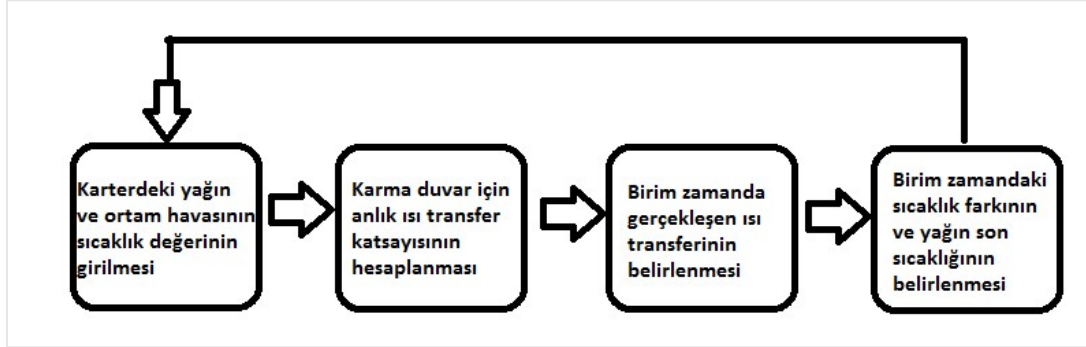
Bu tür karma cidarlar için ise

$$\sum R = \frac{\Delta T}{q} \quad (3.23)$$



**Şekil 3.10** Yağ karterinden ortam havasına doğru gerçekleşen ısı geçişi için dirençler

Bu doğrultuda birim zaman için sürekli olarak ısı transfer miktarı hesaplanacak, hesaplanan miktarın yağ kütlesindeki sıcaklık üzerinde yaptığı değişim ortaya çıkarılacaktır ve elde edilen yağ sıcaklık değeri bir sonraki birim zaman hesaplamasının girdisi olacaktır. (Şekil 3.11)



**Şekil 3.11** Birim zamanda yağın sıcaklık değişiminin hesaplanması için izlenen adımlar

Bu hesaplamalardan elde edilen ifadenin açık hali denklem (3.30) ve (3.31)'deki gibidir.

$$\frac{(T_2 - T_1)}{q_{\text{ısı kaybı}}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L_{\text{cidar}}}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \right)} \quad (3.24)$$

$$q_{\text{ısı kaybı}} = m_{\text{yağ}} \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.25)$$

Elde edilen ısı kaybı ile yağ kütlesi üzerinde yeniden sıcaklık hesaplaması yapılır. Burada yer verilmiş olan değişkenlerden  $T_1$  değeri laboratuvar ortamı sıcaklığıdır ve sabittir.  $T_2$  değeri yağ sıcaklığıdır, başlangıç koşulları için değeri bellidir ancak birim zamanda bir yapılan işlemlerle güncellenir.  $Q$  ısı kaybı için hesaplanan değerdir. Bunun yanında  $L_{\text{cidar}}$  karter cidarı kalınlığı,  $A$  karter yüzey alanı,  $m$  karterdeki yağın kütlesi ve  $k$  ise karter malzemesinin ısı iletim katsayısıdır ve tüm bu değerler sabittir. Bunun yanında  $h_{1-2}$ ; konveksiyon ısı transfer katsayısı değerlerinin düşey ve yatay cidarlar için yağ-karter ve karter-hava geçişleri uyarınca hesaplanması ve sıcaklık güncellemelerine göre birim zamanda tekrar hesaplanmaları gerekmektedir. Ayrıca  $c$  özgül ısı değeri de yağ sıcaklığına göre güncellenecektir.

Konveksiyon ısı transfer katsayılarını hesaplamak için bir takım ampirik ifadelerden yararlanılır. Bu hesaplamaların tümüyle her bir sıcaklık değeri için tekrar ediliyor olması soğuma alt modelinin doğruluğu açısından önemlidir. Denklem no (3.26, 3.27, 3.28, 3.29 ile 3.30 ya da 3.31)'nın ard arda çözülmesi sonucunda spesifik sıcaklıklar için konveksiyon ısı transfer katsayısına ulaşmak mümkündür. (3.26-3.31)

$$Nu = \frac{h \cdot L_{yüzey}}{k} \quad (3.26)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (3.27)$$

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \Delta T \cdot \beta}{\mu^2} \quad (3.28)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.29)$$

$$Nu = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right]^2 \quad (3.30)$$

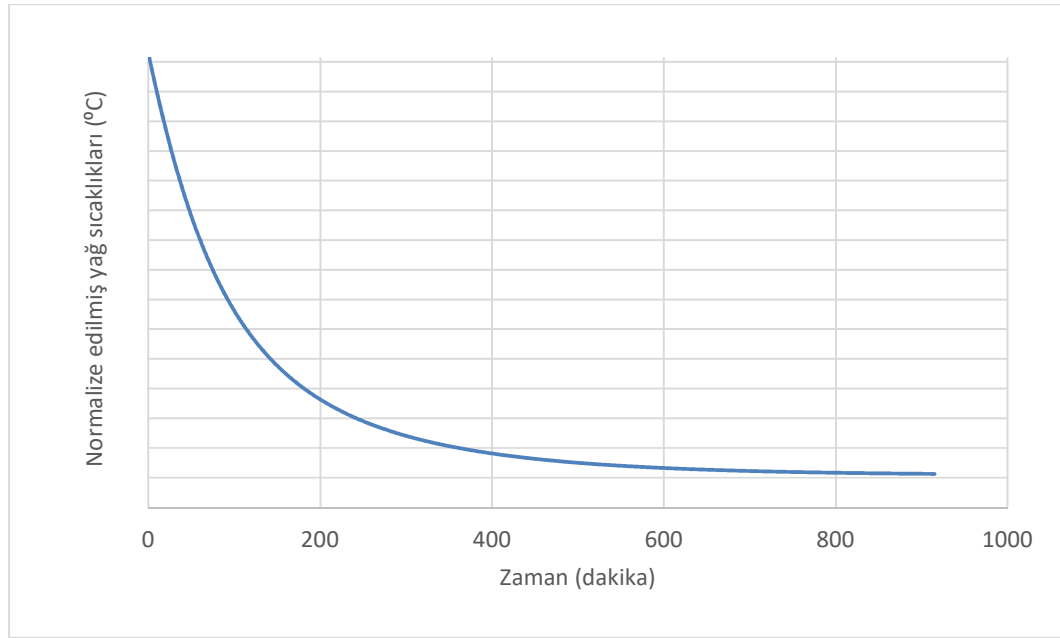
$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \quad (Nu = 0,54(0,27) \cdot Ra^{1/4}) \quad (3.31)$$

Bu denklemlerle Prandtl, Grashof ve Rayleigh sayıları hesaplanarak Nusselt sayısına ulaşılır. Nusselt sayısı ve diğer sabitler kullanılarak da konveksiyon ısı transfer katsayısının hesaplanması mümkün olur. Bu hesaplamalar hava-karter ikilisi için düşey ve yatay düzlem cidarlar baz alınarak tekrar edildiğinde konveksiyon ısı transfer katsayısı elde edilir. Soğuma süreci boyunca hava için tüm konveksiyon ısı transfer katsayılarını her bir cidar sıcaklığı değeri için bilmek gerekmektedir.

Tüm bu değişkenler gözetilerek her bir saniyede motor yağı soğuma miktarı denklem (3.30-3.36) uyarınca hesaplanmıştır. Hesaplamalar sırasında motor yağı, yüzeyi kapalı dikdörtgenler prizması şeklindeki plastik motor karteri içinde ve 25°C laboratuvar koşulları için soğuma eğrisi ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.12'de görüleceği gibi bu koşullar için motor yağının yaklaşık 900 dk'lık bir sürede tam olarak ortam

koşullarına kadar soğuması gerçekleşmiştir. Ayrıca sıcaklık yaklaşık 3 saat içinde ortam sıcaklığı seviyelerine kadar inmiştir.

Bunun yanında modelin doğrulanması bölümünde yağ karterindeki soğumanın motor koşulları için gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Bu nedenle motor testlerinden elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak hesaplanması zor olan A yüzey alanından çevreye doğru gerçekleşen ısı transferinden ısı transfer katsayısının ortaya çıkarılması mümkün olacaktır.



**Şekil 3.12** Matematiksel model sonucu elde edilen yağın soğuma eğrisi

### 3.6 Soğutma Modülü Alt Modeli

Ortaya koyulan formülasyon için bazı kabuller yapılmıştır. Modüldeki iki akışkan SA ve yağ olarak seçilmiştir. Modülün karşı akışlı bir modül olduğu, plaka ve kanatların aynı malzemelerden yapılmış olduğu kabul edilmiştir. Çözüm yaklaşımı SA çıkış sıcaklığı  $t_{co}$  ve motor yağı çıkış sıcaklığı  $t_{ho}$  tahmini ile başlar. SA çıkış sıcaklığının giren SA sıcaklığından  $10^{\circ}\text{C}$  fazlası olacağı öngörülebilir. Ortalama SA ve motor yağı sıcaklıkları Denklem (3.32) ve (3.33) ile tahmini olarak hesaplanabilir [68].

$$t_{cav} = \frac{t_{cin} + t_{co}}{2} \quad (\text{SA}) \quad (3.32)$$

$$t_{hav} = \frac{t_{hin} + t_{ho}}{2} \quad (\text{motor yağı}) \quad (3.33)$$

Bu yaklaşımlar yağın özgül ısısının tablolardan seçilmesi için yardımcı olmak amacıyla gerçekleştirilir. Seçimler yapıldıktan sonra motor yağı çıkış sıcaklığı sabit tutularak SA çıkış sıcaklığı denklem (3.34) ile hesaplanarak ortalama işlemine tekrar sokulur.

$$t_{co} = \frac{\dot{m}_h C_{Ph}(t_{hin} - t_{ho})}{\dot{m}_c C_{Pc}} + t_{cin} \quad (3.34)$$

Doğru sonuca gerektiği kadar yaklaşabilmek için yukarıda belirtilen iterasyonun en az 3 kez tekrar edilmesi ve daha sonra özgül ısısının tablolardan seçilmesi gerekmektedir. Yukarıdaki eşitliğin düzenlenmesi ile motor yağının modülden çıkış sıcaklığı denklem (3.35) ile hesaplanmaktadır [68].

$$t_{ho} = t_{cin} - \frac{\dot{m}_c C_{Pc}(t_{co} - t_{cin})}{\dot{m}_h C_{Ph}} \quad (3.35)$$

$\dot{m}_c$  soğutucunun debisini,  $\dot{m}_h$  motor yağının debisini  $C_{Ph}$  yağın özgül ısısını  $C_{Pc}$  ise SA özgül ısısını ifade etmektedir.

### 3.7 Model Döngüsünün Oluşturulması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan yağın ısınmasının matematiksel modelinde birim zamanda yağa geçen ısı ve yağdan çıkan ısının hesaplanması ve bu hesabın motor yağının rejim sıcaklığına ulaşınca kadar bir döngü şeklinde devam etmesi amaçlanmaktadır. İlgili döngünün kurulmasında yukarıda belirtilen ve literatürde yer alan modellerden bazıları kullanılacağı gibi, bazı enerji dengesi denklemleri ve ısı transfer hesapları da oluşturularak modelde yer alacaktır. Ortaya koyulacak olan döngünün içerisinde mevcut ampirik ifadeler; enerji-ısı transferi temelli orjinal çıkarımlarla kombine edilecektir.

Kurulacak döngünün temeli Şekil 3.13'de görüleceği gibi yağın motor yataklarındaki sürtünmeden ve yanma ısısından kaynaklı olarak birim zamanda ısınması ve rejim

sıcaklığına ulaşınca dek karter bölgesinden ve/veya soğutma modülünden soğuması üzerine olacaktır. (Şekil 3.14) Ayrıca hesaplamaların akış diyagramı Şekil 3.15’de yer almaktadır.



**Şekil 3.13** Motor yağına ısınma ve soğuma döngüsünün temeli



**Şekil 3.14** Modelin işleyişi konusunda temel adımlar

Yukarıdaki adımlarda görüleceği gibi model denklem (3.37)’deki temel formül uyarınca çalışır [65].

$$M_0 c \cdot \frac{dT_0}{dt} = m_0 c \cdot (T_i - T_0) - h_s A_s (T_0 - T_a) \quad (3.37)$$

Buna göre karterdeki bekleyen yağ kütlesinin sıcaklık değişimi, yağa geçen ısı ile karterden dışarıya atılan ısı arasındaki farktır ve bu fark herbir zaman dilimi için hesaplanır. Bu bağlamda ilerleyen bölümlerde görüleceği üzere eşitlikte yer alan 3 terim içinde literatürde ve bu çalışma içersinde ayrı ayrı araştırma alanları oluşmuştur. Eşitliğin ikinci terimi, sürtünmeler, yanmadan geçen ısı, soğutma modülünden geçen ısı, blok ve yatak cidarlarında geçen ısı olmak üzere detaylanmaktadır.

## MODELİN DOĞRULANMASI

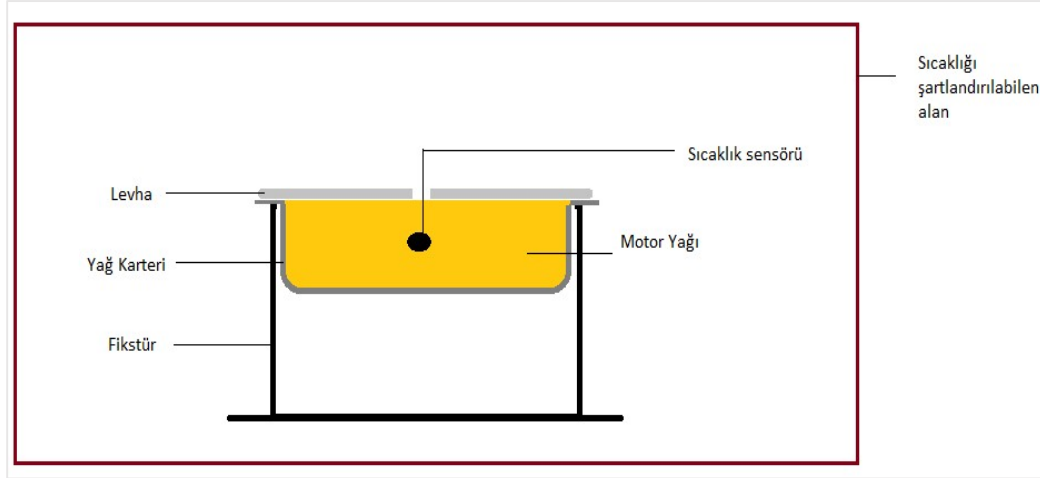
Modelin doğrulanması aşamasında, motor yağının önceki bölümlerde açıklanan ısınma ve soğuma evrelerindeki hesaplaması yapıldıktan sonra ortaya çıkarılan eğrinin deneysel sonuçlarla kıyaslanması ve tutarlılığının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla ısınma ve soğuma bölgelerini ayırt edebilmek için bazı testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler en önemli soğuma bölgeleri olan karter ve bloktan ortama doğru iletilen ısıyı hesaplamak; aynı zamanda da yanmadan ve sürtünmelerden kaynaklı olarak motor yağına doğru gerçekleşen ısı transferini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Model doğrulamaları 2 L'lik 4 silindirli dizel motoru için gerçekleştirilmiş ve ısınma periyotlarının doğrulanması 13 L'lik 6 silindirli motor için de tekrar edilmiştir.

Modelin kurulmasının ilk adımı olan eğri denklemi belirleme işlemi %100'e yakın bir doğrulukla motor yağı karakteristiğini vermektedir. Bu sayede hesaplamalarda kullanmak üzere herbir anda ve sıcaklıktaki viskozite değeri elde edilebilecektir.

### 4.1 Karterdeki Isı Transferi Alt Modelinin Doğrulanması

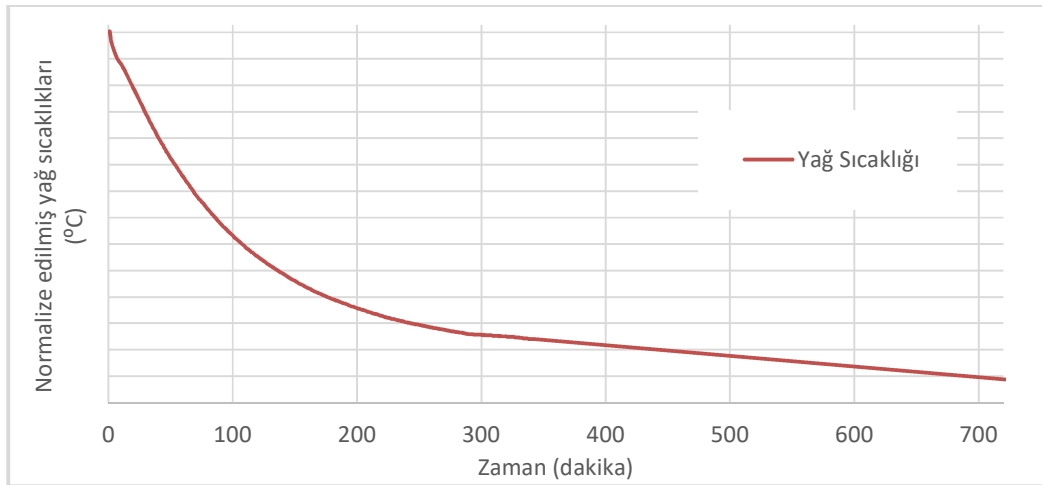
İkinci adımda karterden gerçekleşen soğuma karakteristiğinin önemli elemanlarından biri olan motor karteri ele alınmıştır. Motor karterindeki ısı geçişi karakteristiğinin tam olarak elde edilebilmesi için karter cidarlarından gerçekleşen ısı transferini ve yüzeyinden olan ısı geçişini ayrı elde etmek gerekmektedir. Doğrulamanın bu kısmında karter malzemesi ile aynı malzemeden ve kalınlığı karter kalınlığı ile eş bir plaka ile karter yüzeyi kapatılmıştır. Bunun yanında karter merkezine plakadaki delik yolu kullanılarak sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir..

Karter fikstür üzerine oturtularak diğer elemanlardan etkilenmesinin önüne geçilmiştir. (Şekil 4.1). Testte motor yağının karter içersindeki soğuma eğrisi elde edilerek yalnızca karter cidarlarından ortama doğru olan ısı transferinin hesaplanması amaçlanmaktadır. Motor yağı sıcaklığı motor rejim sıcaklığına ulaştırılarak test başlatılır. İlgili sıcaklığa ulaşılmasının ardından motor yağı karter içersinde soğumaya bırakılır. Soğuma sırasında motor yağı sıcaklığı, karter cidar sıcaklığı ve



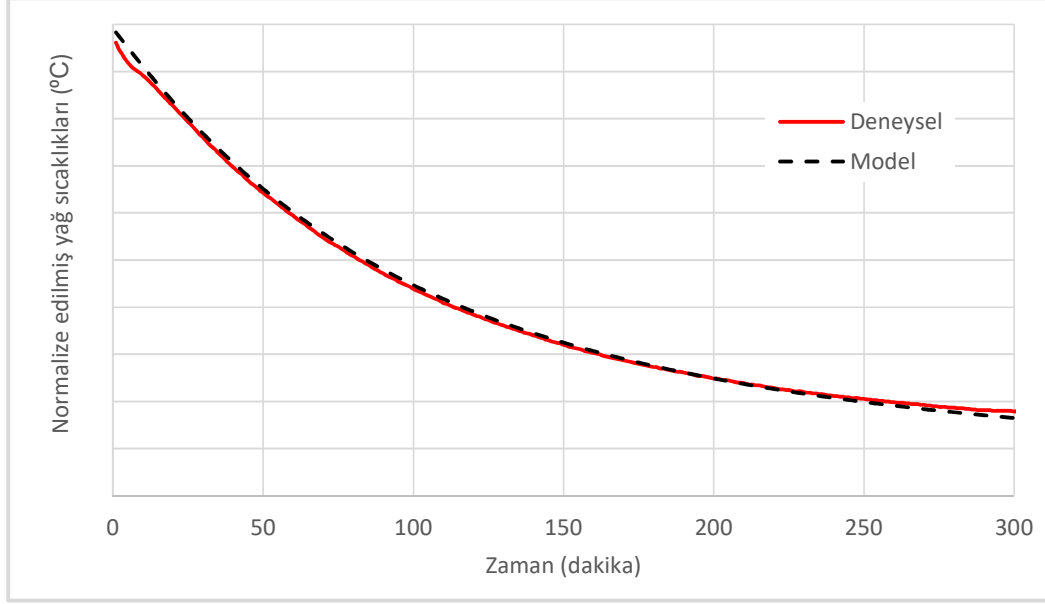
**Şekil 4.1** Karter yağ soğutma testi düzeneği

ortam sıcaklığı sürekli olarak ölçülür. Ölçüm yapılan sıcaklık sensöründen her 1 dakikada bir kayıt alınmaktadır. Alınan ölçümler yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaşmasına kadarki geçen sürede devam eder ve burada sonlandırılır. (Şekil.4.2)



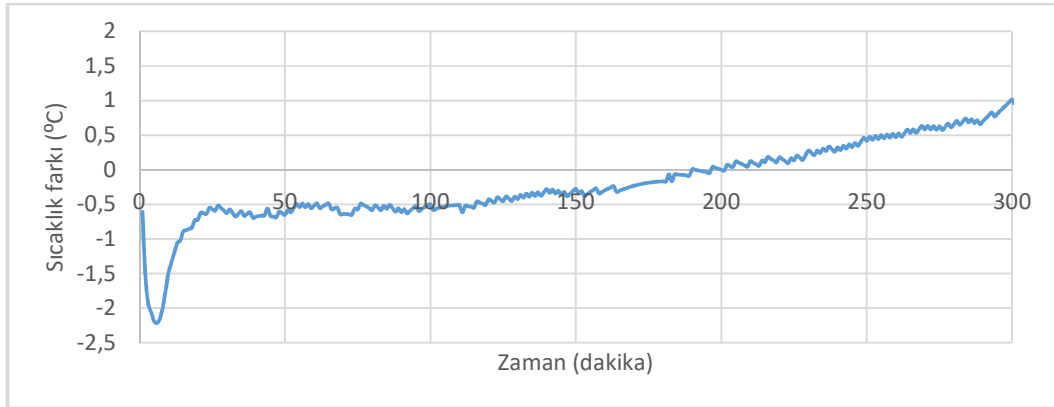
**Şekil 4.2** Motor karterindeki yağın soğuma eğrisi deneysel sonuçları

Motor yağ sıcaklığındaki azalarak seyreden eğri karakteristiğinin nedeni zamanla ortam ve motor yağı arasındaki sıcaklık farkının ve dolayısı ile ısı geçişinin azalmasıdır. Söz konusu test hem plastik karter hem de metal karter için tekrar edilmiştir. (Şekil 4.3)



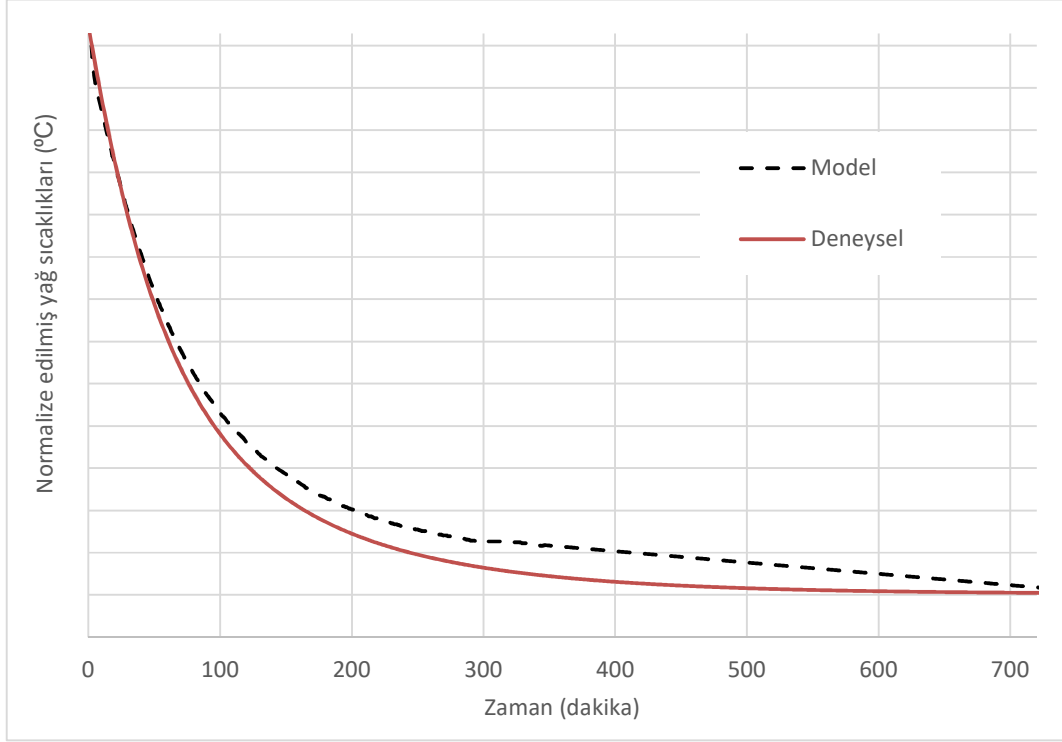
**Şekil 4.3** Plastik karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması

Plastik karter için model ve deneySEL sonuçlar arasında maksimum 0-2°C bandında farklar görülmektedir. Hesaplama metodunun oldukça iyi bir yaklaşım sağladığı söylenebilir. (Şekil 4.4)

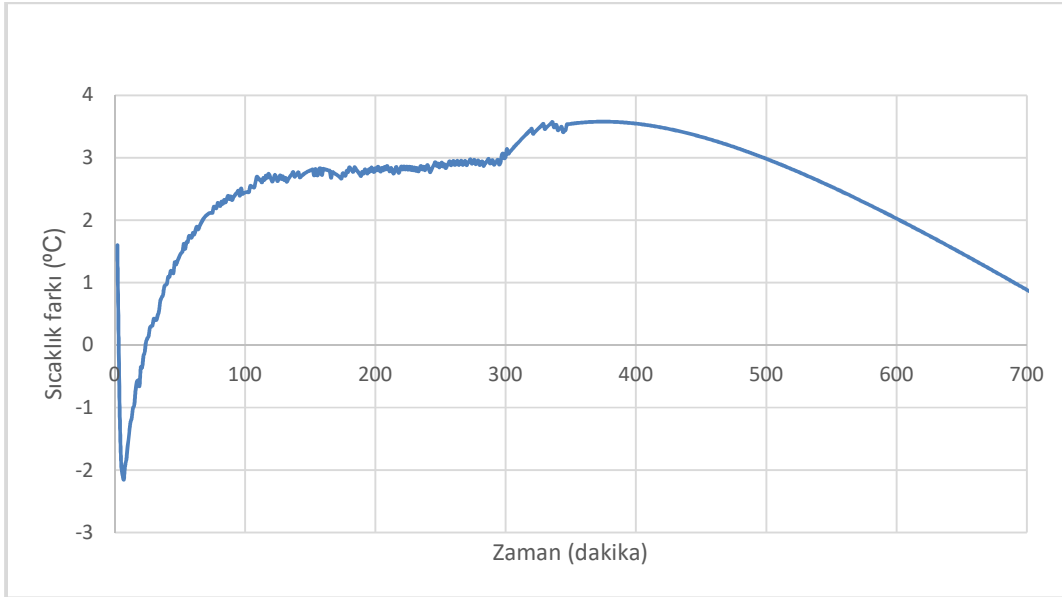


**Şekil 4.4** Plastik karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması-sıcaklık farkları

Metal karterde de durum benzer şekilde seyrederken bu kez farklar 0-3°C bandındadır.(Şekil 4.5-4.6)



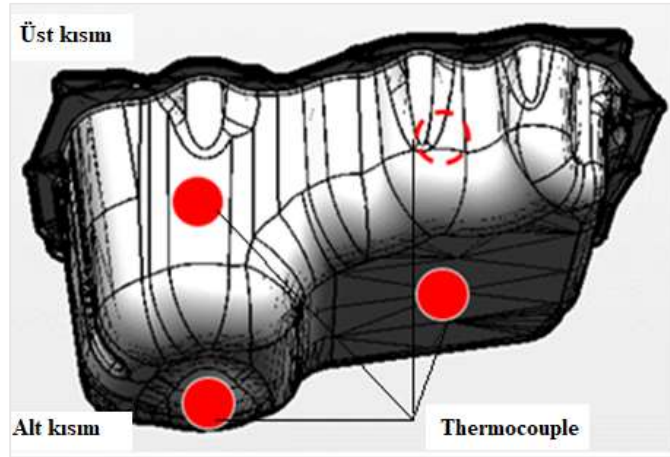
**Şekil 4.5** Metal karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması



**Şekil 4.6** Metal karterde yağın soğuması alt modelinin doğrulanması-sıcaklık farkları

#### 4.2 Karterdeki Isı Transferi Alt Modelinin Motor Koşullarında Doğrulanması

Karter cidarlarındaki ısının hesaplanmasının ardından bu hesaplamanın motor koşullarında deneysel testler ile tekrarlanması önem arz etmektedir. Cidarlar için kolayca belirlenen ısı transfer katsayısının karter yüzeyindeki kompleks alan ve yağ-hava doğrudan geçişi için daha zor olduğu söylenebilir. Bunun tespiti adına tekrarlanan motor testler yapılırken motor karteri Şekil 4.7’de gösterilen noktalardan delinerek K tipi thermocouple’lar yardımıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.. Bu sayede motor karterinin farklı bölgelerinden fazla sayıda ölçüm almak mümkündür.

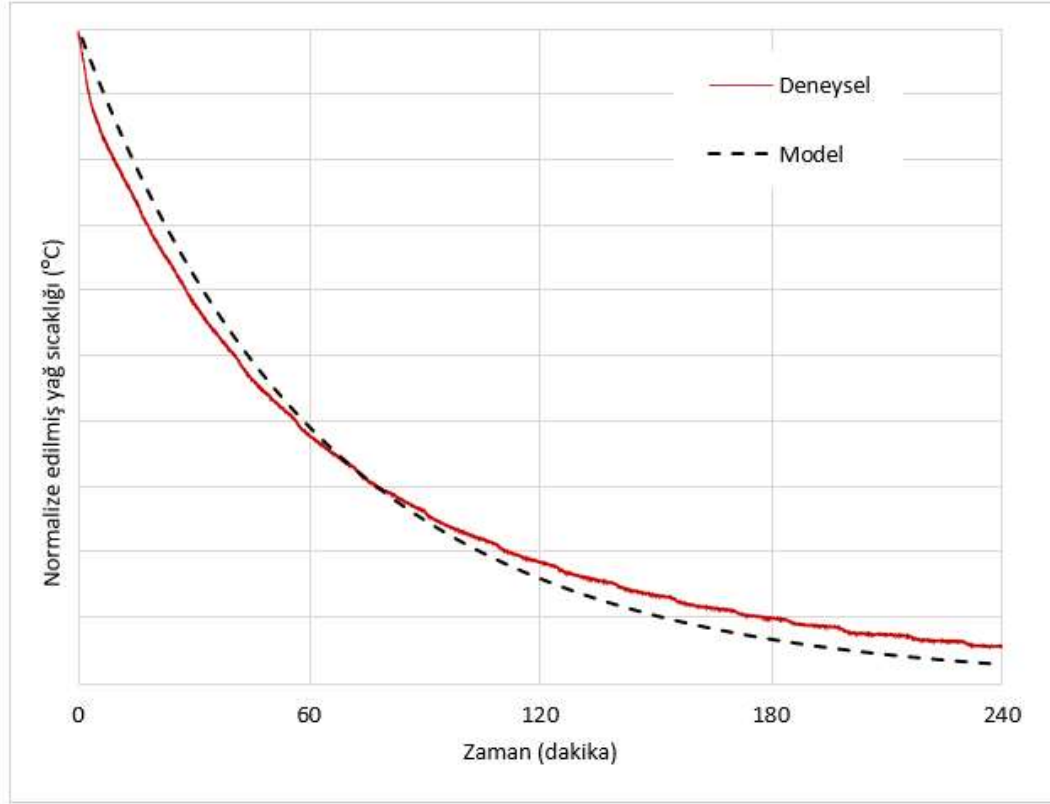


**Şekil 4.7** Metal karter termocouple pozisyonları

İlgili bölgelerin delinmesi sonrası iç kısımlara doğru yerleştirilen K tipi thermocouple’lar 0,25 saniyede bir ölçüm alma hızına sahipken 0-200°C bandındaki ölçümler için tavsiye edilirler. Bu ölçümlerdeki maksimum hata oranları 1,1°C ile %0,4 dolaylarındadır.

Ölçümlerin farklı sensörlerden 0,25 saniyede bir kaydedilmesi sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ölçüm açısından gereken hassaslığı sağlayacaktır. Bu kıyaslamalar ve literatür bilgileri gözetilerek elde edilen yüzeyden konveksiyon ısı transfer katsayısı kullanıldığında elde edilen hesaplamalar metal karter ve motor koşullarında gerçekleştirilen test sonuçları ile paralellik göstermektedir. Bu da

motor karterinden ortama doğru gerçekleştirilen ısı transfer hesabının doğruluğunu kanıtlar. (Şekil 4.8)



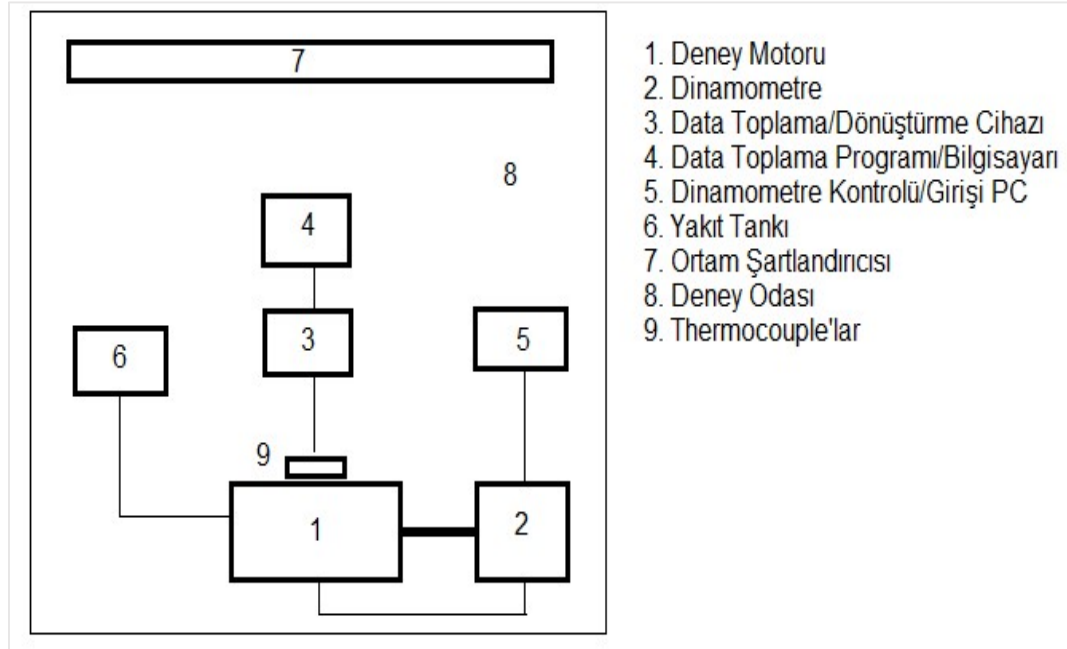
**Şekil 4.8** Motor koşullarında karter soğumasının hesaplanması

Sonuçlar deneysel ölçümler ile model çıktılarının yaklaşık olarak maksimumda 2°C'lik farklara ulaştığını göstermektedir. Bunun da kabul edilir sınırlar içerisinde yer aldığı söylenebilir. Görüldüğü gibi motor koşulları içerisinde standart metal karter yaklaşık 4 saatlik bir periyotta ortam sıcaklığı seviyesine ulaşır. Bunun yanında sıcaklığının yaklaşık olarak %80'ini 2 saat içerisinde kaybetmektedir.

#### **4.3 Yanmanın Olmadığı Durumda Yağa Geçen Isı Alt Modelinin Doğrulanması**

Soğuma evresinde yalnızca motor karterinden çevreye doğru ısı transferi hesabının doğrulanması sonrasında bu kez sürtünmelerden motor yağına doğru geçen ısı transferinin hesabını diğerlerinden ayırt etmek için doğrulama metodu geliştirilmiştir. Bu bağlamda 2,0 L 4 silindirli motorda motoring yapılması yoluyla

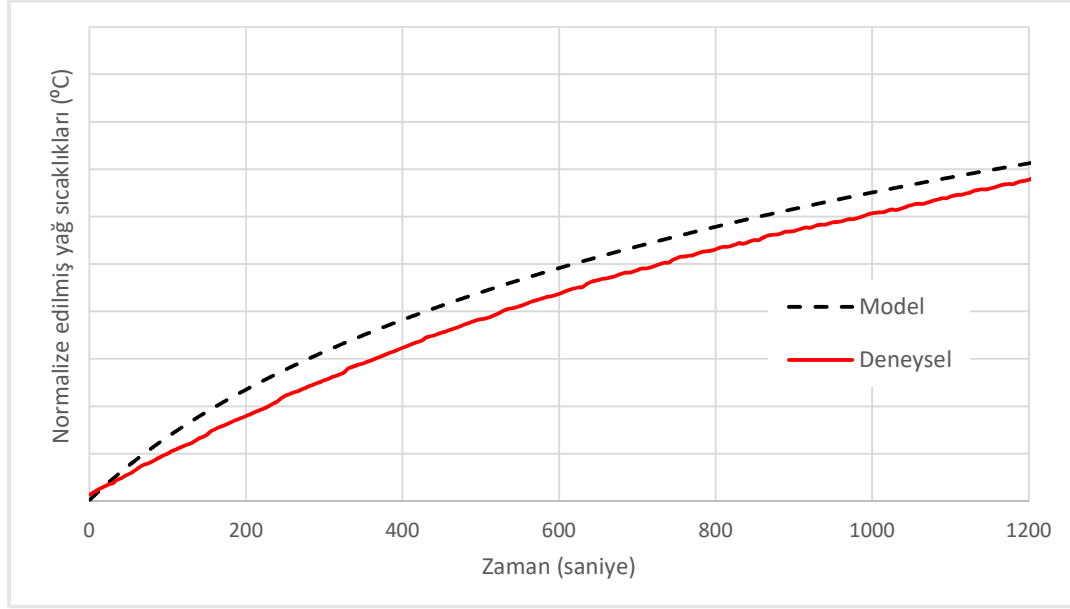
ısı transfer hesabı gerçekleştirilmektedir. Deneylerin gerçekleştirildiği test düzeneği motoring yapılması için uygun imkanı sağlamaktadır. (Şekil 4.9)



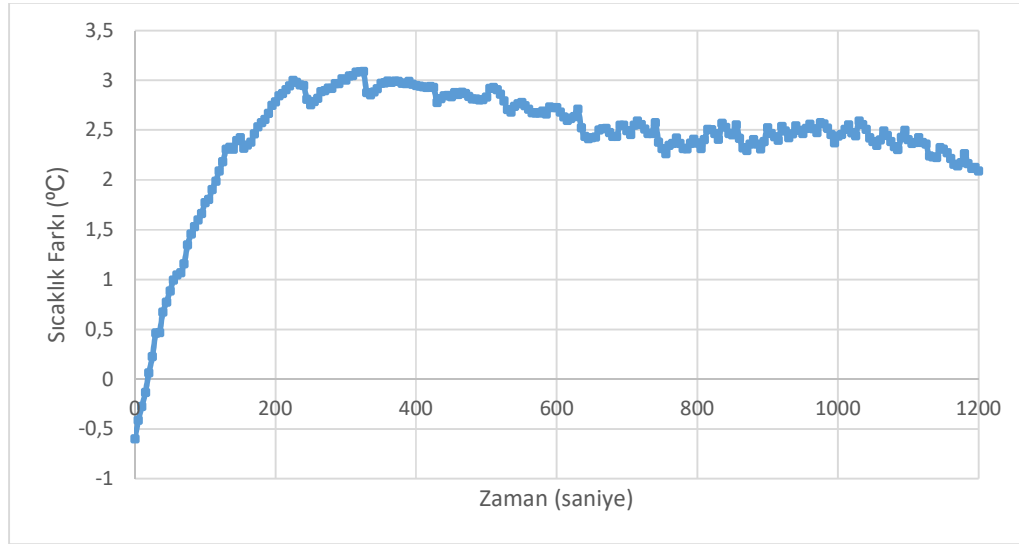
**Şekil 4.9** Deneylerin yapıldığı düzeneğin şematik görünümü

Motoring'de dışarıdan bir elektrikli motor yardımıyla krank miline tahrik verilir. Aynı zamanda motor yanma odasına yakıt gönderilmez. Bu sayede yanmadan gelen ısınma etkisi tamamen ortadan kaldırılmış olur. Bu da yalnızca sürtünmenin ısı kaynağı olduğu durumu gözlemlememizi, sürtünme dolayısı ile ortaya çıkan ve yağa geçen ısının hesaplanmasını daha kolay hale getirir. Belirtilen deney şartları durumunda tahrikini krank milinden alan tüm ikincil sistemler aktif durumdadır. Yalnızca motor yanması dolayısı ile çalışan sistemler deaktiftir.

2000 devir/dakika'lık motoring şartları ve yanmanın olmadığı durumdaki testte karterde daha önce belirtilen bölgelerden sıcaklık ölçümleri alınarak 0,25 saniyede bir'lik kayıt alınmıştır. Soğumada alınan ölçüm prosedürüne benzer olarak tüm thermocouple'lardan alınan ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen sonuçlar model hesaplamaları ile kıyaslandığında maksimum 3°C bandında bir fark göstermiştir.(Şekil 4.10 ve 4.11)



**Şekil 4.10** 2000 d/d ve yanmanın olmadığı koşullarda motor yağının ısınması



**Şekil 4.11** 2000 d/d ve yanmanın olmadığı koşullarda motor yağının ısınması için deneysel ve model değerleri arasındaki sıcaklık farkları

Burada üzerinde durulması gereken bir başka durum, sürtünmeden ortaya çıkan ısının yaklaşık olarak yalnızca %20 dolaylarında bir kısmının yağı ısıtmada kullanıldığının ortaya çıkarılmış olmasıdır. Kalan %80'lik kısım yatak cidarları ve blok vasıtasıyla çevreye doğru iletilir. Elde edilen bu sonuç literatürde yer alan

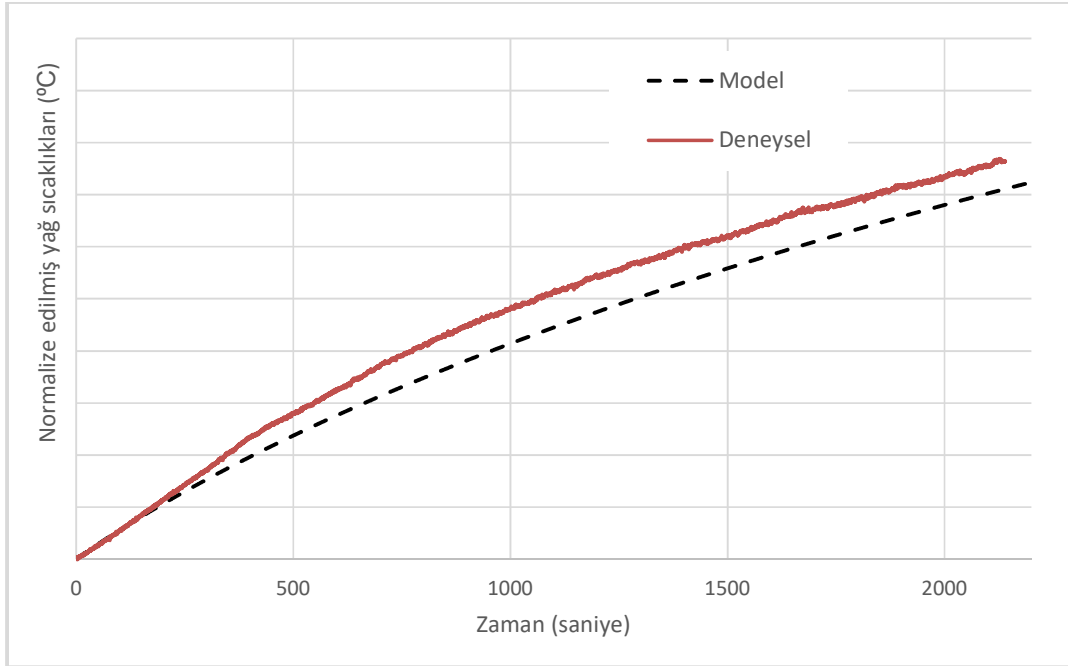
benzer modelleme çalışmaları ile tutarlılık göstermektedir [70],[73]. Bu durum soğuk ilk çalışmanın başında böyledir. Yağ sıcaklığını ve blok-yatak sıcaklıklarının artmasıyla yağa geçen ısının oranı artacağından %20 olan bu oran artarak devam eder. Motor yağ sıcaklıkları ve blok sıcaklıkları uyarınca ve motor karakteristiğine bağlı olarak %20 ve %40 arasında değişmektedir [8]. Bu oran motor yağı sıcaklığının rejim koşullarına ulaşmasıyla birlikte en yüksek değerini alır.

#### **4.4 Yanmanın Olduğu Durumda Modelin Doğrulanması**

Bu aşamadan sonra sürtünmeden yağa geçen ısı, bloktan ve karterden dışarı aktarılan ısı hesaplamalarının doğrulanmasından sonra yanma koşulları ve pistonun yağı ısıtması da devreye katılarak tümüyle model doğrulama işleminin yapılması gerçekleştirilmiştir. Modelin doğrulanması prosesinde literatürdeki veriler doğrultusunda ilerlenmiştir. Bunlardan birincisi motor yağının ilk ısınması sırasında yağa geçen ısının %61 kadarının sürtünme yoluyla geldiğidir, ve de pistonu gönderilen yağ engellendiğinde de bu oranın %90'ların üzerine kadar çıktığı bildirilmektedir [8],[72]. Dolayısı ile yanmadan gelen ısının yağa katılan toplam ısının yaklaşık 1/3 lük bir kısmını oluşturduğu söylenebilir.

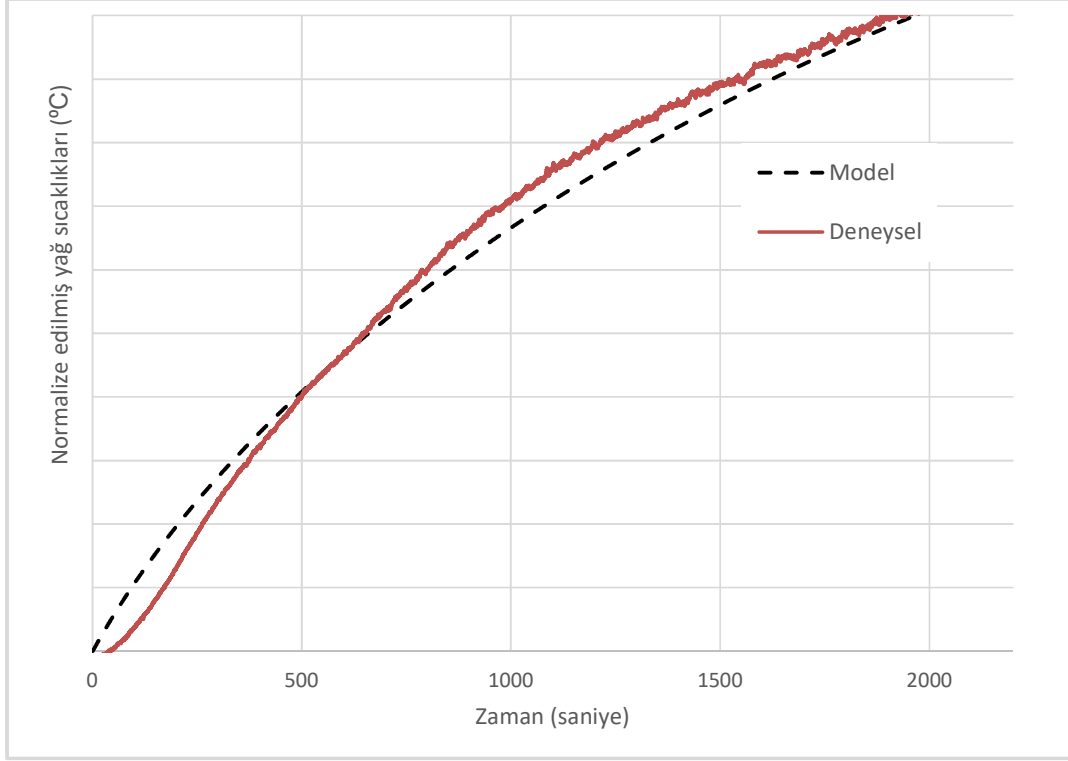
Bunların yanında literatürdeki ortak kanaatlerden bir tanesi motor devir sayısının motor yüküne oranla yağın ısınma periyodunu etkileyen en önemli faktör olduğudur. Motor yağının motor yükünden bağımsız, motor devir sayısı ile de doğrudan doğruya bağlantılı olduğu konusunun [8],[65],[72],[74] diğer araştırmacılarla ortaya konmuş olması doğrulamaların farklı motor devirleri için tekrarlanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenlerle motor testleri laboratuvar ortamında 2,0 L 4 silindirlik motor için 1000,1500,2000 ve 2500 d/d'lık farklı hızlar için tekrarlanmıştır. Deneyler sırasında ölçümler önceki ölçümlerde olduğu gibi motor karterine bağlanmış ve sızdırmazlığı sağlanmış thermocouple'lar yardımıyla alınmış ve kaydedilmiştir. Doğrulamalarda ortamda hava akışının olmadığı kabul edilmiş ve sıcaklık sabit olarak şartlandırılmıştır. Bunun yanında motor yükü ve devir sayısı sabit tutulmuştur. Bunların yanında testler sırasında ilerleyen aşamalarda kullanılmak üzere elektronik kontrol ünitesi kayıtları da tutulmuştur. Bu sayede püskürtülen yakıt miktarları da kaydedilmiştir.

Yapılan testlerden 1.si olan 1000 devir/dakika sabit motor hızı testinin sonuçları Şekil 4.12’de yer almaktadır. Sonuçlardan görülebileceği gibi 2-3<sup>0</sup>C’lık maksimum sıcaklık farkları ile yağın ısınma periyodu tespit edilmiştir. Bunun yanında 1000 rpm devir sayısının diğer ölçümlerde de gözlemlenebileceği gibi yağı ısıtmada uzun bir zaman aldığı görülmüştür. Bunun motor koşulları ve yaz mevsimi normalleri gözetilerek belirlenen bir ortam sıcaklığı olduğu göz önünde bulunulursa soğuk koşullar ve araç şartları için bu devir seviyelerinde yağın ısınma sürecinin potansiyel uzunluğu ortaya çıkar.



**Şekil 4.12** Motor yağ sıcaklığının 1000 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması

Bir diğer motor devir sayısı 1500 devir/dakika’da motor yağının ısınmasının model ve deneysel koşullar bakımından kıyaslaması Şekil 4.13’de yer almaktadır. Yağ sıcaklık değerleri arasındaki farklar ilk 500 saniyelik kısımda model verileri lehine 2-3<sup>0</sup>C daha fazla iken 500 saniye sonrasında yaklaşık 1-2<sup>0</sup>C’lık farkla deneysel sonuçların daha yüksek olduğu bir trendle seyreder. Buradaki farklılık ortam



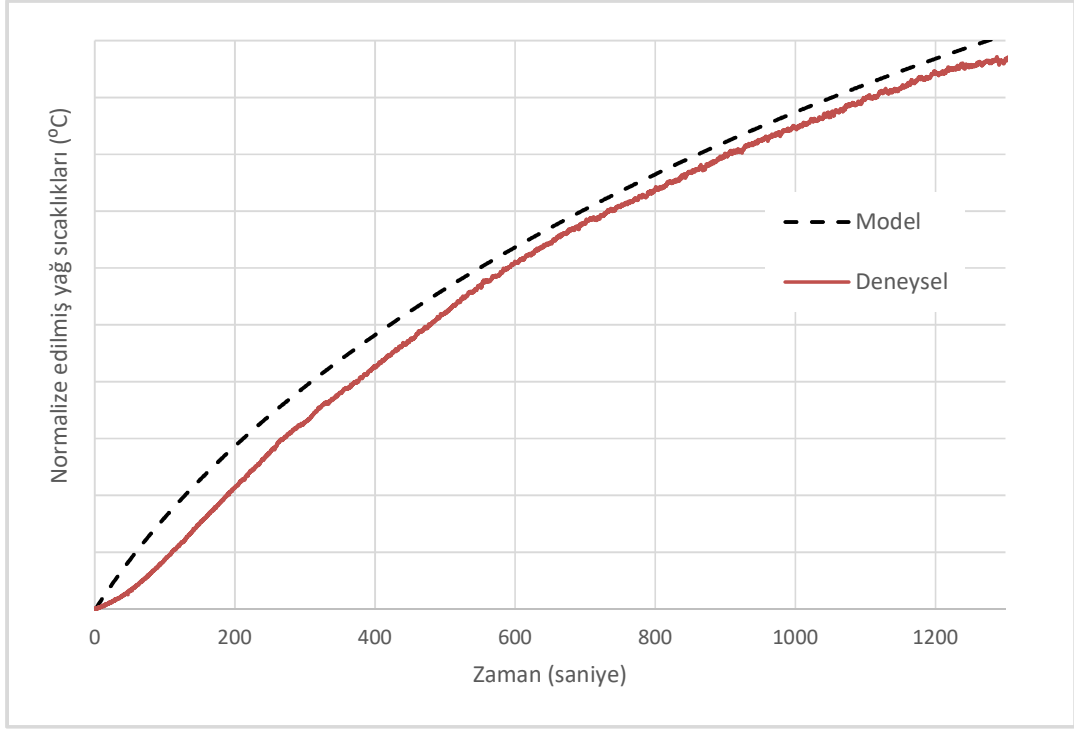
**Şekil 4.13** Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması

koşullarında kontrol dışı bir hava akımı ya da ölçüm hatasının etkisi olarak değerlendirilebilir. Bunun yanında yağın ısınma trendinin modelde iyi bir yaklaşım ortaya çıkardığı görülmüştür.

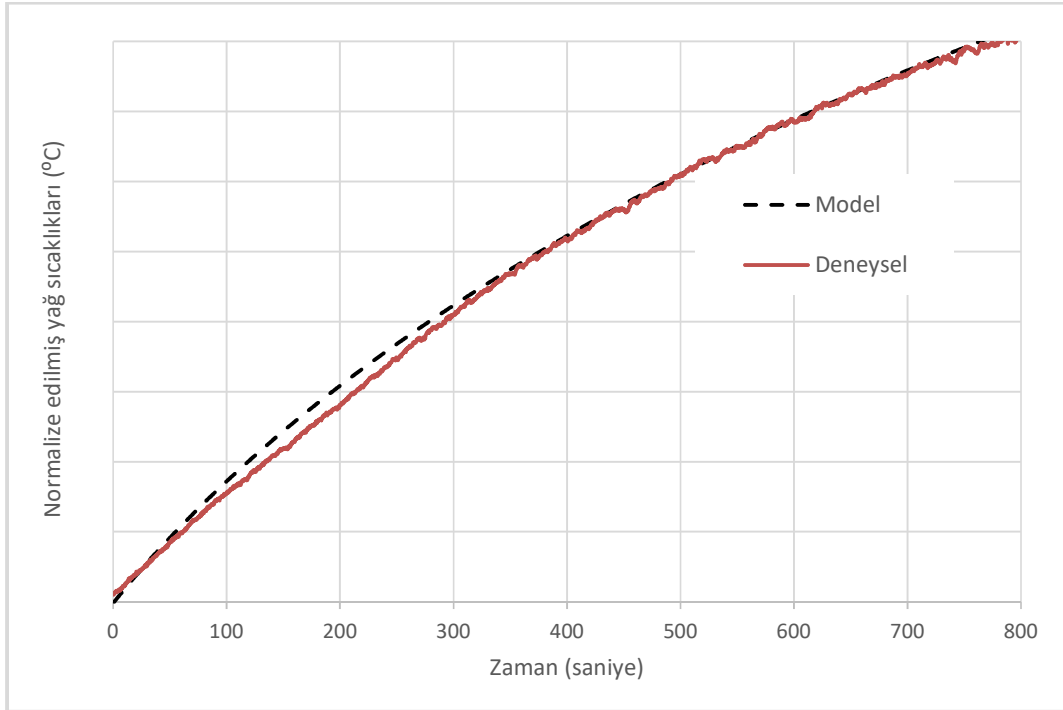
2000 devir/dakika motor hızında ise deneysel ve model verileri arasındaki sıcaklık farkı ilk kısımda nispeten fazla görünse de ikinci kısımda oturan trend  $1^{\circ}\text{C}$  dolaylarında bir farkla yüksek bir tutarlılık göstermektedir. (Şekil 4.14)

Bunun yanında devir sayısının 2 katına çıkarılması 1000 devir/dakika ile kıyaslandığında yağın ısınma hızını 2 kattan daha fazla artırdığı sonucunu da model ve deneysel olarak ortaya çıkarmıştır. Bu durum yağın ısınma periyodunun hızla doğrudan bağlantılı olduğu fikrini de destekler [72].

2500 devir/dakika motor hızı şartlarında ise Şekil 4.15’de görülebileceği gibi oldukça iyi bir yaklaşım ile motor deneysel verileri ve model sonuçlar  $0-1^{\circ}\text{C}$ ’lık bir farkla yüksek bir tutarlılık göstermektedir.



**şekil 4.14** Motor yağ sıcaklığının 2000 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması



**şekil 4.15** Motor yağ sıcaklığının 2500 devir/dakika şartları için model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması

2,0 L motor şartlarında alınan ölçümler ve model hesaplamaları dikkate alındığında kurulmuş olan modelin deneysel ölçümlerle iyi bir tutarlılık gösterdiği söylenebilir. 4 farklı devir sayısı için alınan ölçümlerin tümü gözetildiğinde devir sayısının motor yağının soğuk ilk çalışmasındaki ısınma evresi için önemli bir değişken olup modelin ise bu önemli değişkenin etkisini gösterebilecek bir hassasiyette sahiptir. Bu durum modelin sonraki aşamalarda yapılacak araştırmalar için iyi bir araç olacağını göstermektedir. Bu araç yağlama sistem elemanları ve değişkenleri üzerindeki oynamaların etkisini görebileceğimiz ve çalışmalarını yoğunlaştıracığımız alanları tespit etmede kullanılabilir.

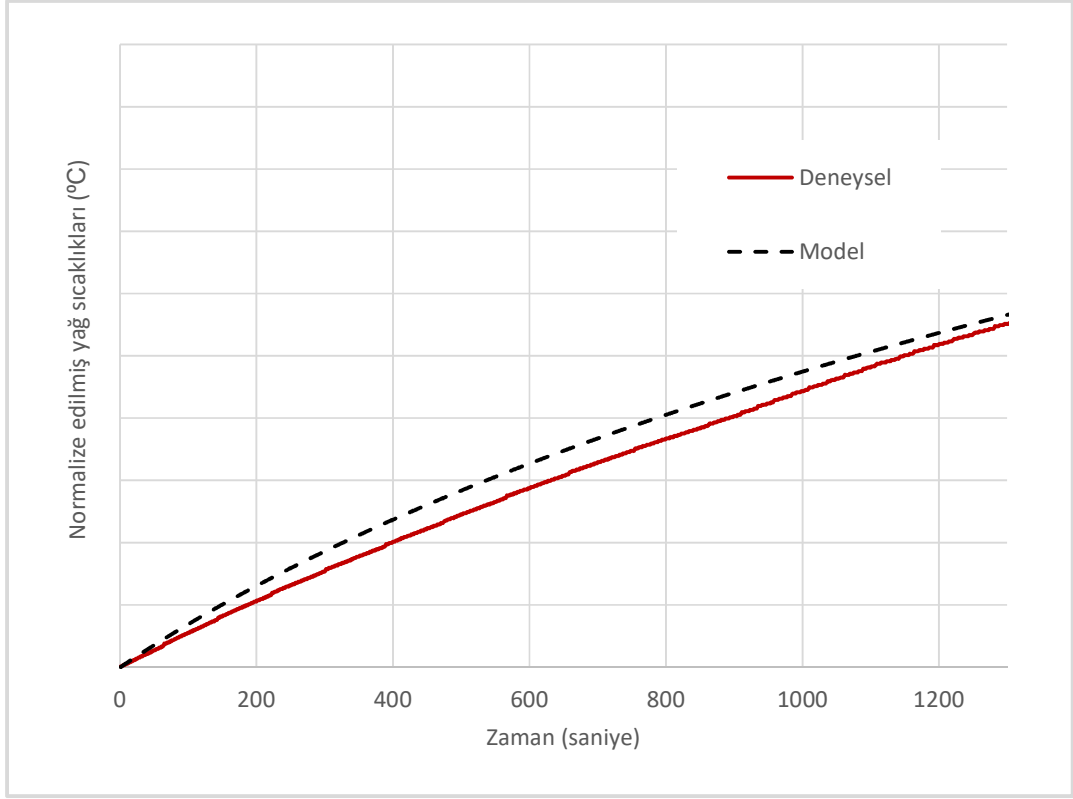
#### **4.5 Yanmanın Olduğu ve Olmadığı Durumlar için 13L Motorda Modelin Doğrulanması**

Bunların yanında modelin doğruluğunun ve diğer motorlarda kullanışlı olduğunun gösterilmesi adına bazı test ve doğrulamalar da ağır vasıta araç motoru olan 13L ve 6 silindirli motor koşulları için tekrar edilmiştir. Bu sayede motor büyüklükleri, yağ tipi ve karter özellikleri değiştiğinde de aynı doğrulamaların gerçekleştirilebileceğinin kanıtlanması modelin güvenilirliğini artırmaktadır. Bu amaçla motor yağının soğuk ilk çalışma sırasında ısınma süreci benzer koşullarda tekrar edilmiştir.

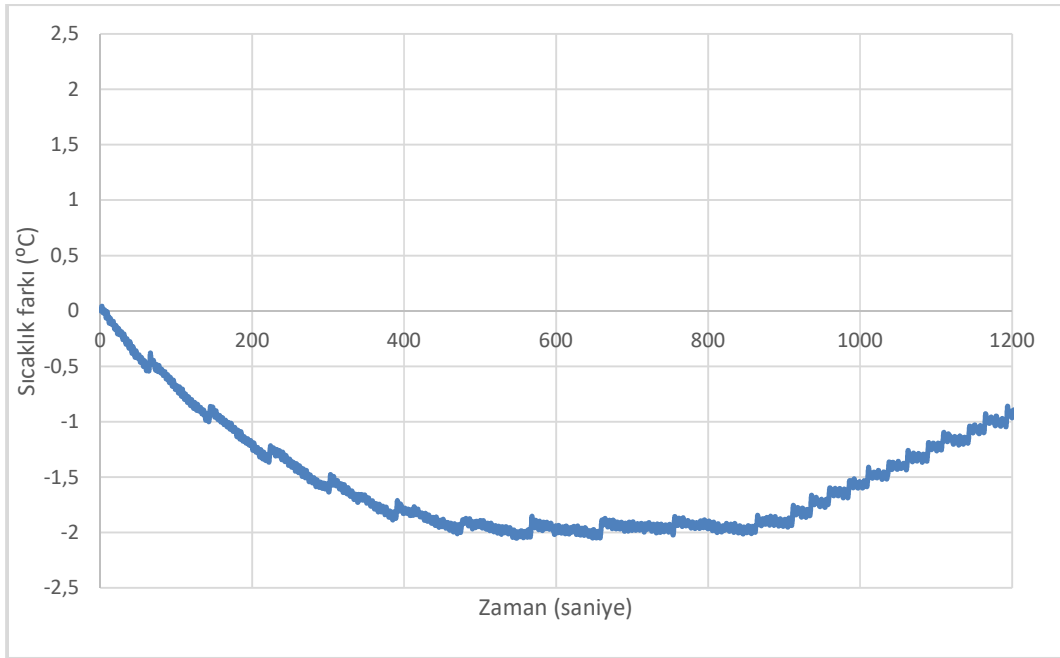
Bir önceki motorda gerçekleştirildiği gibi ilk olarak motoring yapılarak farklı hızlarda yağın sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Bunun ardından yanmanın da ölçüme eklenmesi ile çalışma tamamlanmıştır.

İlk olarak 1200 devir/dakika şartları için motoring yapılarak ölçümler alınmıştır. (Şekil 4.16) Alınan sonuçlar modelden elde edilen sonuçlarla maksimum 2°C'lık bir fark ile iyi bir tutarlılık göstermektedir. (Şekil 4.17)

Bir diğer motoring ölçüm sonuçlarına göre 1500 devir/dakika motor hızında elde edilen sonuçlar model sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre özellikle 500 saniye dolaylarında fark 3°C seviyelerine yükselse de özellikle ilk ve son kısımlarda fark  $\pm 1^\circ\text{C}$  dolaylarında bir farkla ve iyi bir tutarlılık ile seyretmektedir. Bunun yanında motor devir sayısının yağın ısınma hızı üzerindeki etkinliğinin bu sonuçlar karşılaştırıldığında büyük motorda da benzer bir özellik

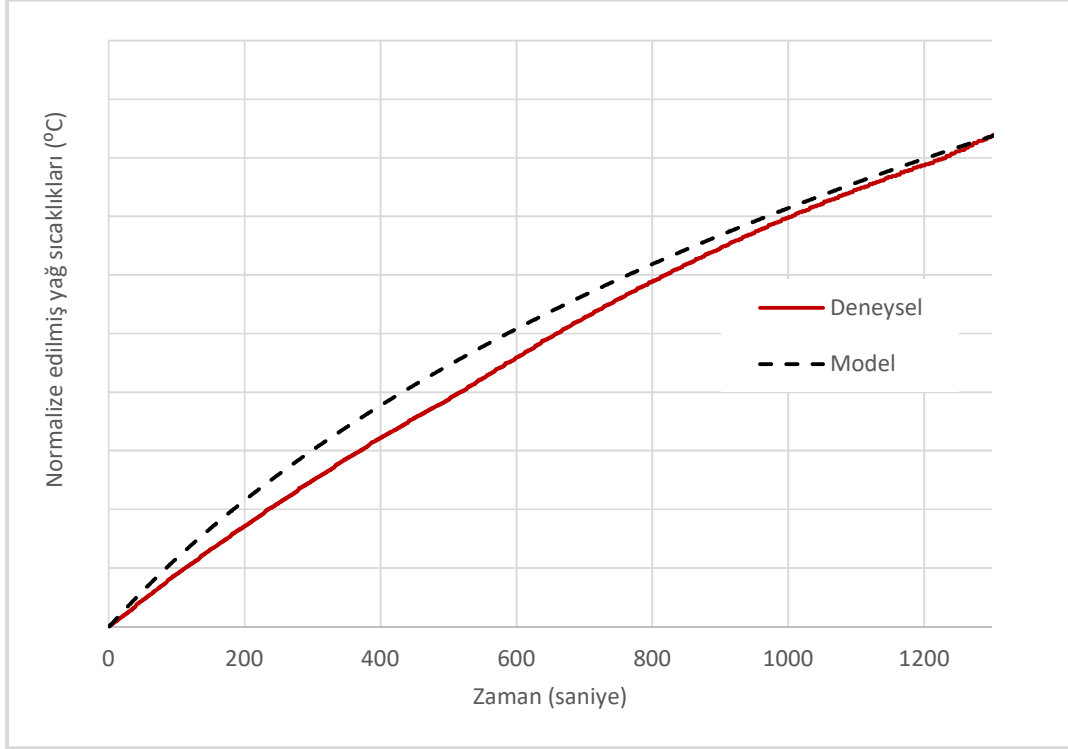


**Şekil 4.16** 13 L Motor yağ sıcaklığının 1200 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması



**Şekil 4.17** 13 L 1200 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları

gösterdiği görülmektedir. Bunun yanında sıcaklığa bağlı olarak yazılmış olan f kayıp katsayısı fonksiyonu tüm motor devirleri için gerekli tutarlılığı vermektedir. (Şekil 4.18 ve 4.19)

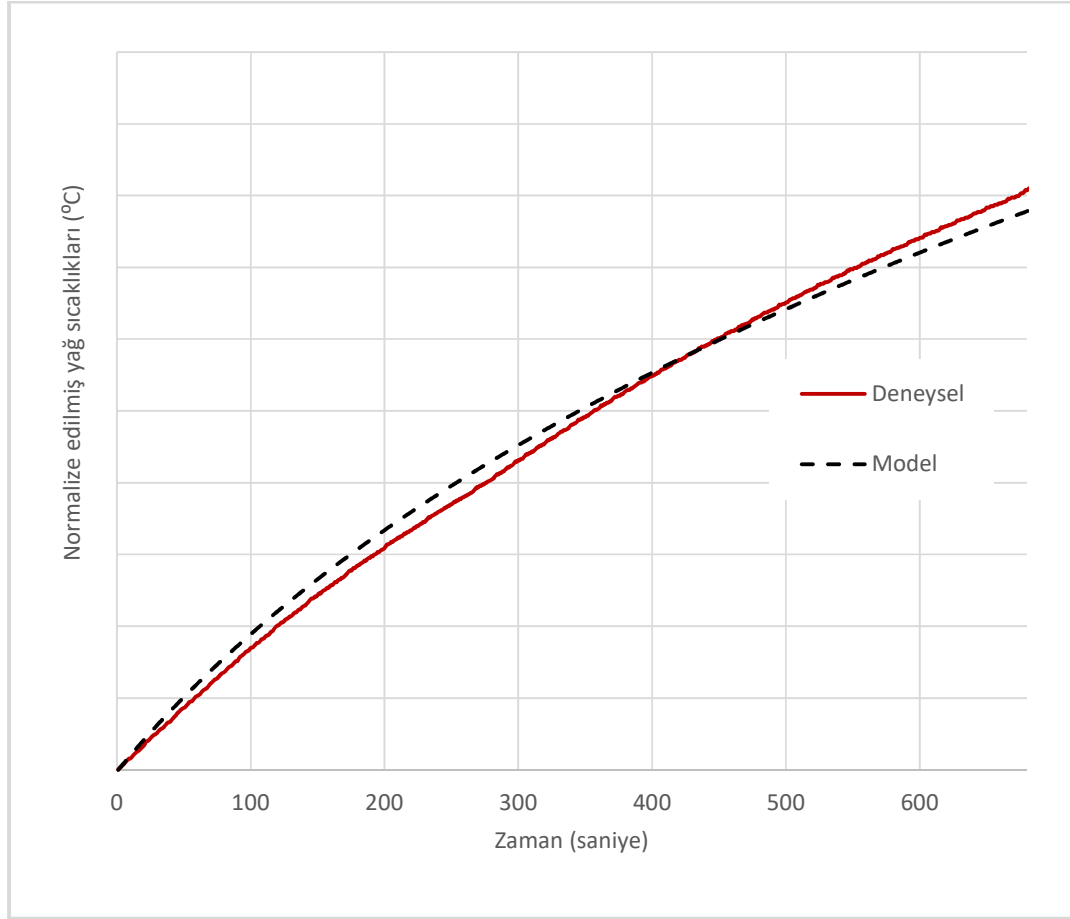


**Şekil 4.18** 13 L Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması



**Şekil 4.19** 13 L 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları

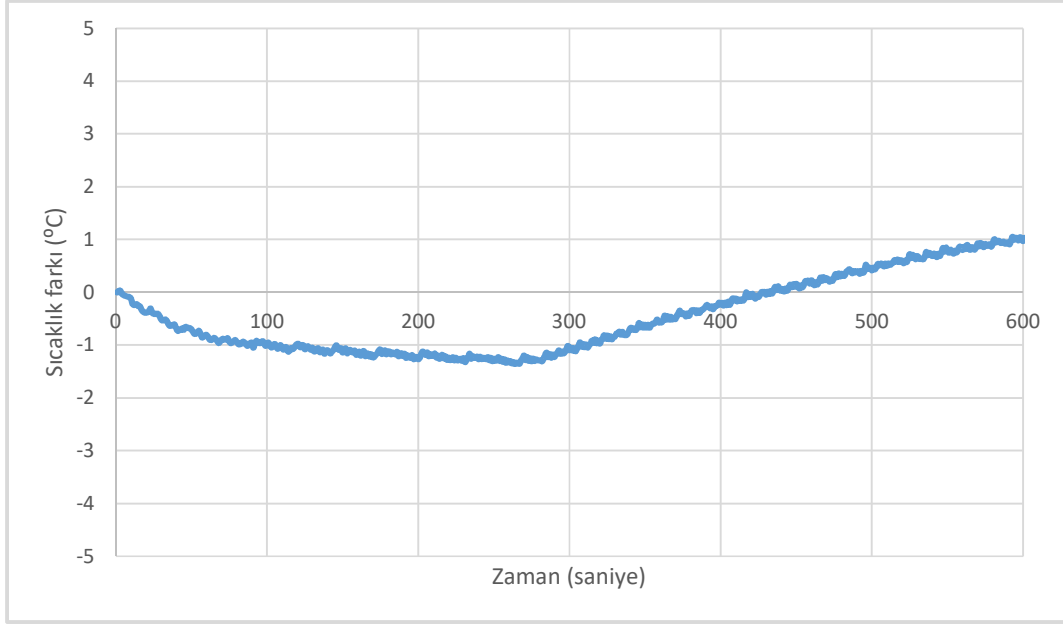
Son olarak yanmadan bağımsız olarak motoring gerçekleştirilerek elde edilen deneysel sonuçlar 2000 devir/dakika içindir. (Şekil 4.20)



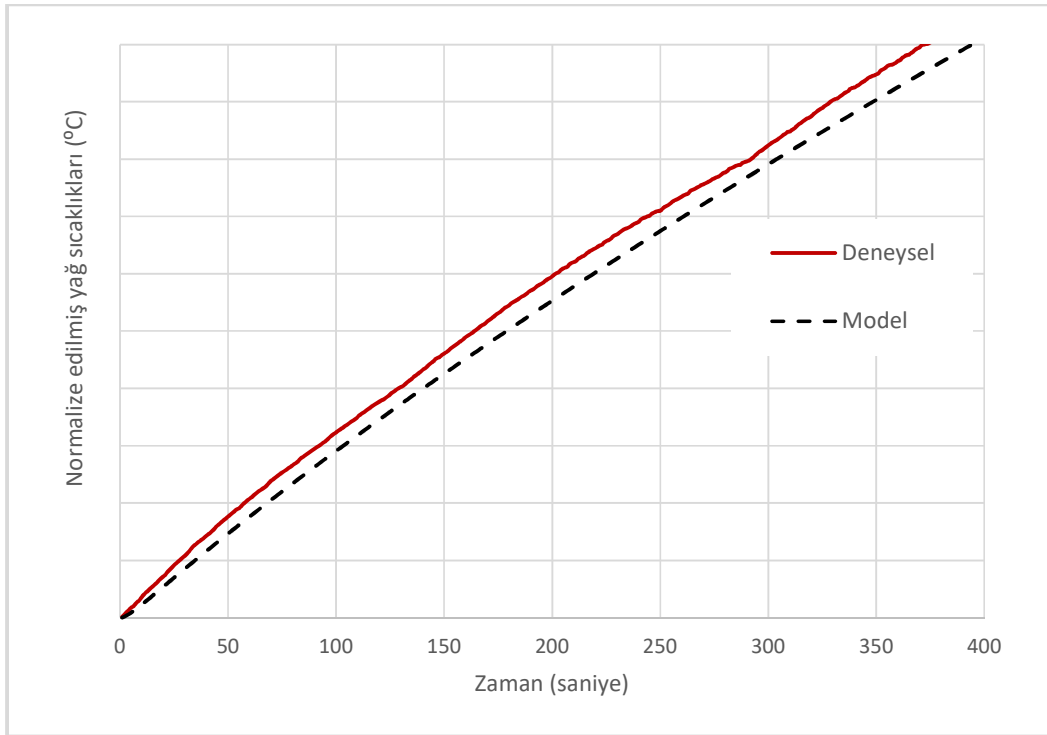
**Şekil 4.20** 13 L Motor yağ sıcaklığının 2000 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması

Bu kıyaslama için de tutarlılık seviyesinin oldukça iyi bir noktada olduğu gözlemlenmektedir. Ölçüm zaman aralığının başından sonuna kadar deneysel ve model çıktıları arasında  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'lik bir fark ile oldukça tutarlı bir yaklaşım vardır. (Şekil 4.21)

Bunların yanında doğrulamanın motor yanmasının gerçekleştiği durum için tekrarı yapılmıştır. Motor yanmasının aktif olduğu durum için 1500 devir/dakikalık motor hız için gerçekleştirilen motor testinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de model sonuçları ve deneysel datalar bakımındaki kıyaslanmıştır.

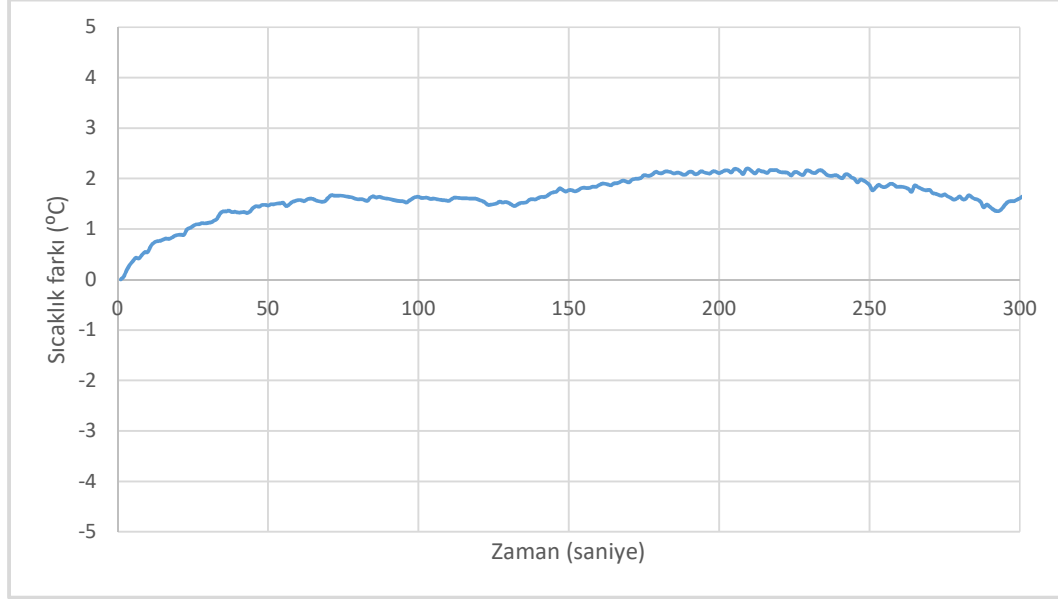


**Şekil 4.21** 13 L 2000 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları



**Şekil 4.22** 13 L Motor yağ sıcaklığının 1500 devir/dakika şartlarında model ve deneysel sonuçlar için kıyaslanması

Model ve deneysel sonuçlar arasındaki farklar maksimum 2°C dolaylarında seyretmektedir.(Şekil 4.23)



**Şekil 4.23** 13 L 1500 devir/dakika ve yanmanın bulunduğu durumda şartlarında model ve deneysel sonuçlar için sıcak motor yağ sıcaklığı farkları

Bu da 13 L motorda da diğer motorda olduğu gibi yanmadan yağa geçen ısı konusunda iyi bir tutarlılık elde edildiğini gösterir.

Bu bölümde yağın soğuk çalışmadaki ısınma modeli 2 L ve 13 L'lik karakteristiği tamamen farklı 2 motor için doğrulanmıştır. Yağ sıcaklığının başlangıç ve bitiş noktaları ölçümlemenin yapıldığı sıcaklık aralığı gözetildiğinde ve ölçüm yapan sensörlerin hata aralığı dikkate alındığında maksimumda tüm ölçümlerin ortalaması olan 1-2°C lik sıcaklık farkları ile modelin doğruluğu bakımından kabul edilebilir niteliktedir. Farkların bir diğer nedeni laboratuvar şartlarında da olsa test sırasında önüne geçilemeyen hava akımları gibi ölçüm hatalarına neden olabilecek etmenlerdir.

Daha önce yanma motor yükünün etkisinin motor hızı etkisine oranla yağın ısınmasına katkısı önemsiz bir faktör olduğu literatürde ortaya konulmuştu [8],[65],[72],[74]. Buna karşın yalnızca yanmanın varlığının gözardı edilemez bir faktör olduğu bu deneysel ve model çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Yanmanın

seviyesi etkisi düşük bir faktörken yanmanın varlığı önemli bir etken olarak kabul edilebilir.

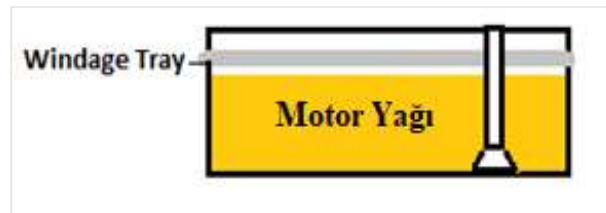
Bir diğer önemli nokta ise motordaki yanma ve sürtünme durumlarının ısınma üzerindeki etkinlik oranlarının motor karakteristiğine göre farklılık gösterebileceğidir. Literatürde verilen soğuk ilk çalışmada sürtünmenin yağa geçen ısının 2/3'lük bir kısmını, yanmanın ise kalan 1/3'lük kısmını oluşturduğu vurgusu [8],[72] 2L motordan alınan ölçüm ve doğrulamalara göre iyi bir paralellik göstermektedir. Buna karşın 13 L 'lık büyük motorda bu oranın yanma lehine artış gösterdiğini söylemek doğru olur.

# 5

## YAĞLAMA SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN YAĞIN ISINMASINA ETKİSİ

Bölüm 4'te; motorun soğuk çalışmasında yağın ısınmasını simule eden matematiksel model doğrulanmıştı. Doğrulama işlemi 2 L ve 13 L'lik motorlarda birden fazla devir sayısı ve yanmanın olup olmadığı durumlar için gerçekleştirilmişti. Bu bölümde ise matematiksel model yardımıyla bazı araştırmalar yer almaktadır. Araştırmalar soğuk çalışmadaki verimsiz evrenin, yağın daha hızlı ısıtılması ile daha verimli hale getirilmesi üzerine olan yöntemleri ihtiva eder. Bu yöntemler yağın soğuk başlangıç çalışması evresinde hızlı şekilde düşük viskozitelere ulaşmasını bu sayede de motor sürtünmelerini düşürmeyi hedeflemektedir.

Bu araştırmaların ilki karter geometrisinin yağın hızlı ısınması üzerine olan etkileridir. Bu araştırma karter cidar kalınlığının ve karter malzemesinin soğuk başlangıç çalışmasındaki yağın hızlı ısınması üzerine olan etkisinin kıyaslanmasıdır. Bu etkiler daha önce araştırmacılar tarafından üzerinde durulduğu gibi [24], [25], [28], [29], [30], [31] yağın ısınma evresinin veriminin artırılmasından çok soğuma evresindeki yağın soğumasını yavaşlatmaya yöneliktir. Bunun yanında windage tray kullanımının (Şekil 5.1) etkisi soğuma evresinde incelenmiştir [82].

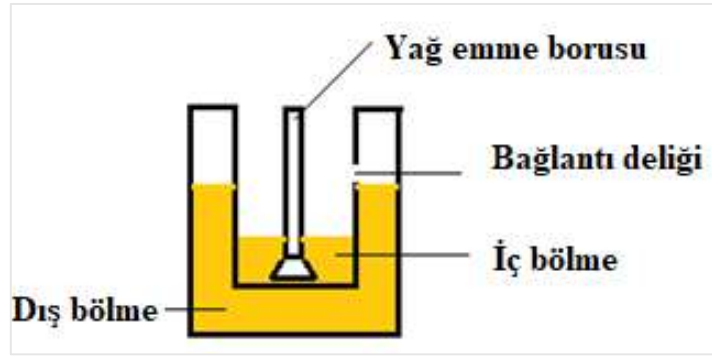


Şekil 5.1 Windage tray kullanımı

Karter çevresinin izolasyon malzemesi ile kaplanması bir diğer araştırma alanıdır. Karteri etkileyen tüm bu parametrelerden üretilmiş kombinasyonlar bu alanda kıyaslanmıştır.

İncelenen bir diğer konu motor yağının tipi ya da viskozite karakteristiğidir. Birbirinden farklı 6 adet motor yağı soğuk ilk çalışma evresi için kıyaslanmıştır.

Kıyaslamanın yapıldığı bir diğer alan literatürde akıllı karter uygulamalarının ya da bölmeli karter uygulamalarının yardımıyla yağ kütlesinin değişken olarak kullanılmasıdır [21]. (Şekil 5.2)



**Şekil 5.2** Bölmeli karter uygulaması

Ayrıca diğer kıyaslama konuları; ana yatakların boyutları, piston boyutları ve dışardan bir etki ile motor karterinin ısıtılmasıdır. Kıyaslamalar genel olarak model yardımı ile elde edilen sıcaklık ve viskozite grafikleri, motor sürtünmelerini veren FMEP artış azalışlar ve yakıt tüketim değerleri üzerinden yapılmıştır.

### **5.1 Karter Malzemesinin Etkisinin İncelenmesi**

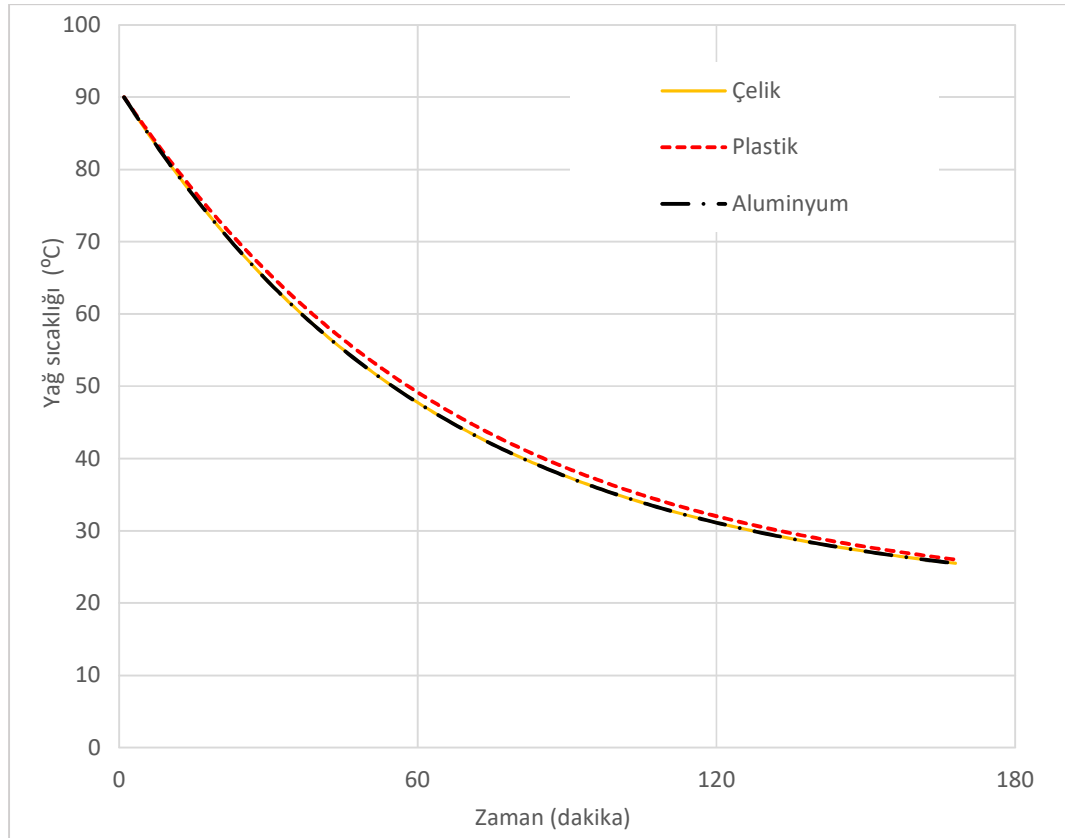
Motor yağ karteri malzemesi dayanım, geniş hacim, ısınma soğuma gibi fonksiyonel gereklilikler gözetilerek farklı malzemelerden seçilebilir. Geçmişte metal bazlı karter malzemeleri kullanılmış olsa da son dönemlerde plastiğin otomotiv alanındaki artışı ve yüksek sıcaklık ve darbeye bağlı dayanımının artması yanısıra ağırlık kaygıları da gözetildiğinde kullanımı artmıştır. Bunun yanında bir diğer önemli özellik ısı iletim katsayısı düşük malzeme seçimi ısınma ve soğuma evrelerinde önemli katkılar sunabilir. Tablo 5.1’de görüleceği gibi plastiğin ısı iletim katsayısı diğerlerinin yanında fark yaratacak ölçüde küçüktür. Buna karşın motorun

ilk ısınma evresinde karterden dışarıya doğru gerçekleşen ısı transferi yağa geçen ısının yanında oldukça küçük kalacağından ısınma evresinde doğrudan karter üzerinde gerçekleştirilen bu etkiyi diğer araştırmacıların izolasyon denemelerinde [25] olduğu gibi görmek pek mümkün değildir. Buna karşın soğuma evresinde motorun durduğu koşullarda bu kıyaslamalar daha anlamlı hale gelir.

**Tablo 5.1** Malzemelerin ısı iletkenlikleri

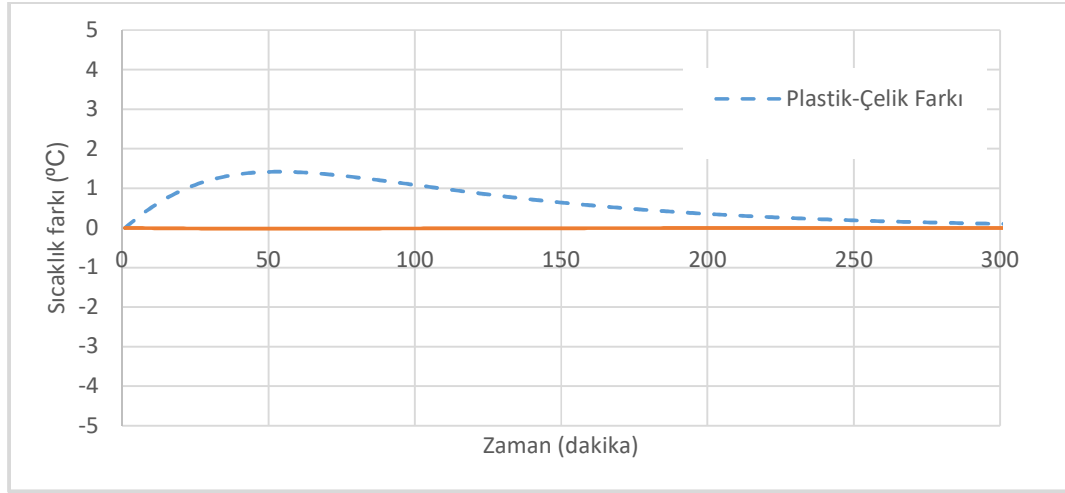
| Malzeme   | Termal Kondaktivite (W/Mk) |
|-----------|----------------------------|
| Aluminyum | 205                        |
| Çelik     | 22                         |
| Plastik   | 0,27                       |

Soğuma evresinde soğuma alt modeli kullanılarak malzemeler üzerinden yapılan kıyaslamaların sonuçları Şekil 5.3’de görülmektedir.



**Şekil 5.3** Standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

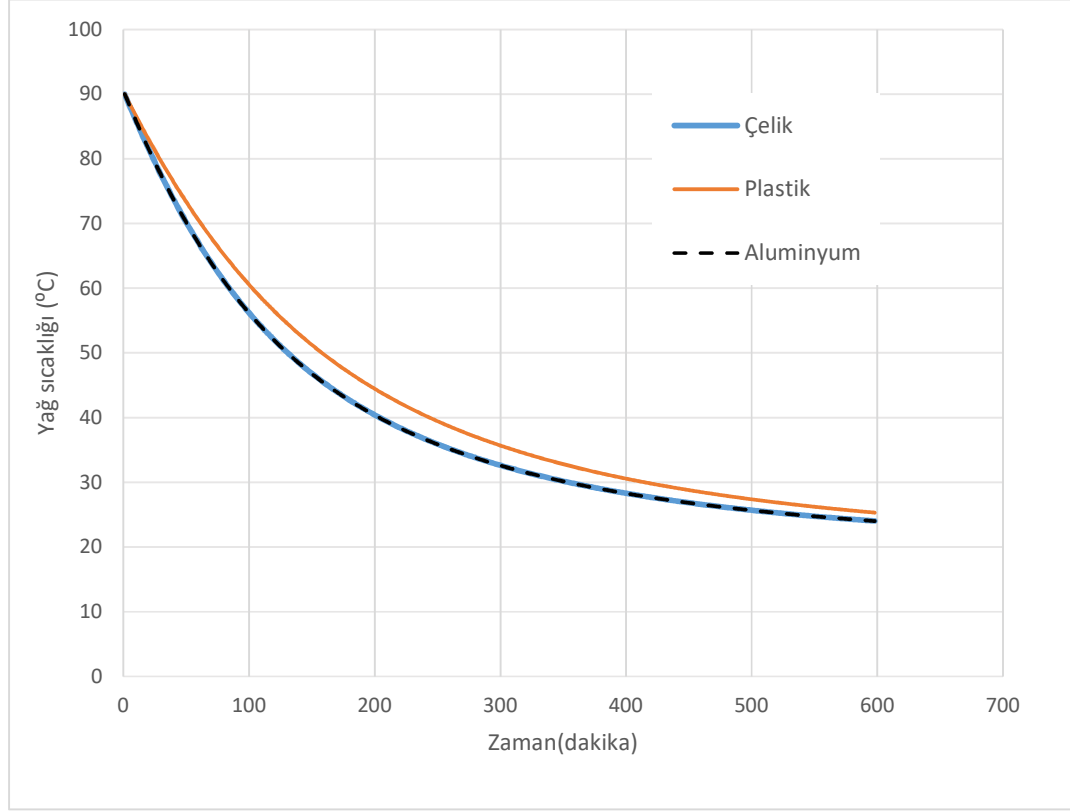
Bu kıyaslamalar sabit cidar kalınlığı ve farklı malzemeler için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4’de plastik-çelik ve alüminyum-çelik malzemeler arasındaki farklar verilmiştir. Burada görüleceği gibi alüminyum ile çelik arasında önemli bir fark yokken plastik ile çelik arasındaki fark 2<sup>0</sup>C dolaylarına ancak ulaşabilmektedir. Bu durum doğrudan malzeme değişikliğinin kayda değer bir etki yaratmadığı anlamına gelir.



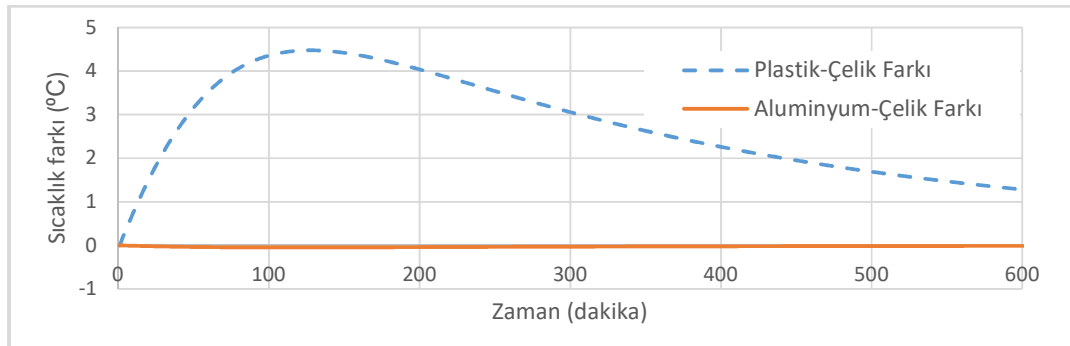
**Şekil 5.4** Standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları

Termal iletkenlik katsayıları arasındaki büyük farklılıklara karşın sıcaklıklar arasında bir fark yaratılamamış olmasının temelinde iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi milimetre seviyesinde olan cidar kalınlıklarıdır. Kalınlıkların oldukça küçük olması malzeme değişikliğinin ısı transfer dirençleri üzerindeki etkinliğini azaltır. İkinci önemli neden ise soğuma evresinde karterden gerçekleşen ısı kaybının yaklaşık olarak yarısının karter cidarları yerine karter yüzeyinden gerçekleşiyor olmasıdır. Bu bağlamda yüzeyin ısı transfer katsayısı oldukça düşük bir windage tray uygulaması ile kapatılıyor olması durumunda (Şekil 5.1) [82] karter cidarlarından kaçan ısının oranı artacaktır. Bu durumda duvar iletkenliğini düşürmek yağın soğumasının yavaşlatılması açısından daha önemli bir hale gelir. Bu kapsamda yapılan kıyaslama sonuçları Şekil 5.5’de yer almaktadır. Soğumaya bırakılan 3 karter malzemesi uygulamasından alüminyum ve çelik malzemeli olanlar arasında kayda değer bir fark görülmezken, plastik malzemeli olan uygulamanın diğerlerinden daha sıcak seyrettiği ve bu sıcaklık farkının 1 ve 2.

saatler arasından yaklaşık olarak  $5^{\circ}\text{C}$  seviyesine kadar yükseldiği gözlemlenmektedir (Şekil 5.6). Bu durum karter yüzey alanı izole edildiğinde karter malzemesinin cidar kalınlığı düşük tutulduğu durumda dahi fark yaratabileceği ve bir sonraki çalışmada avantaj teşkil edebileceği fikrini destekler.



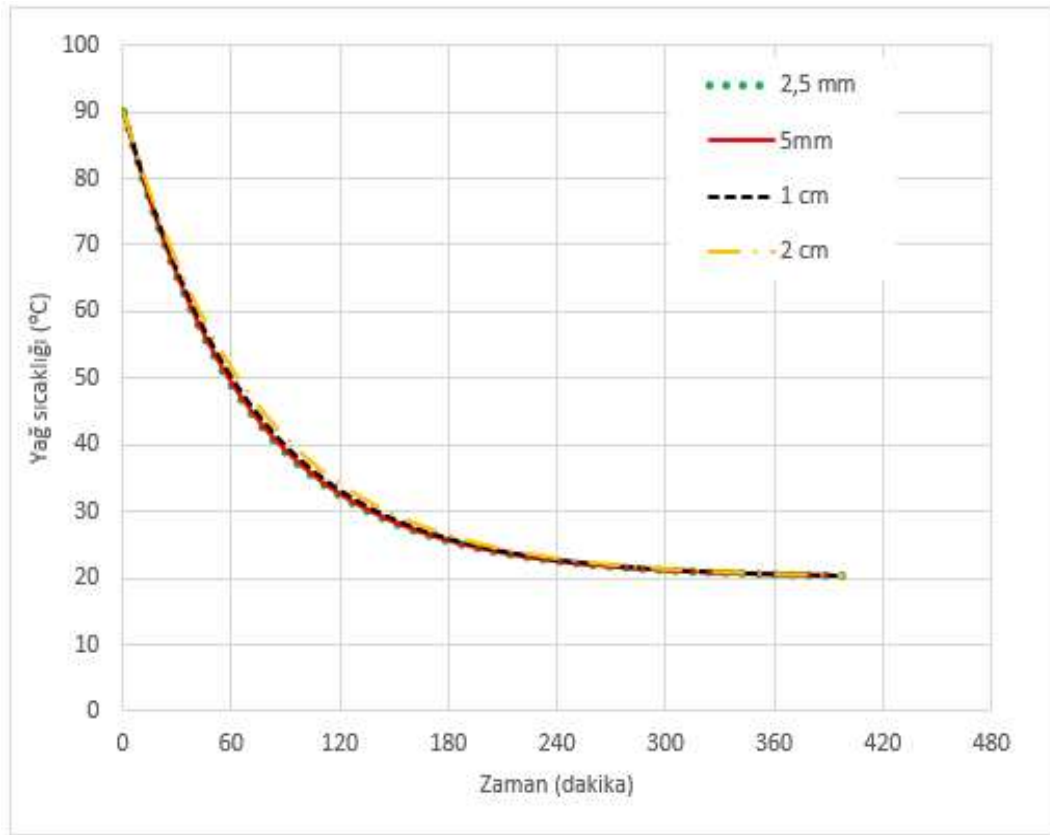
**Şekil 5.5** Windage tray uygulaması durumunda standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi



**Şekil 5.6** Windage tray uygulaması durumunda standart karter ve sabit cidar kalınlığı için farklı malzemelerin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

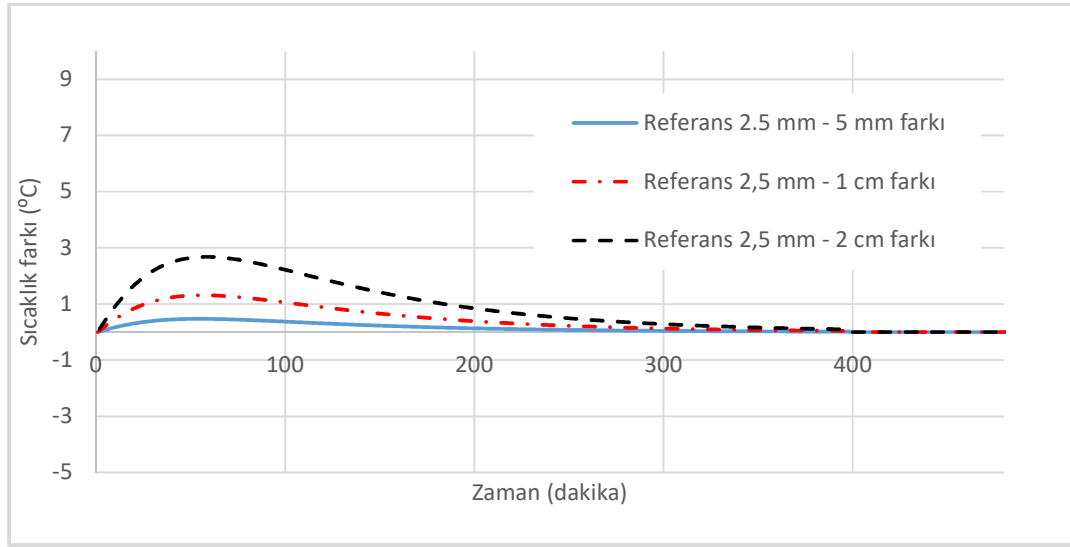
## 5.2 Karter Cidar Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi

Karter cidar kalınlığı da karterin yoldan gelen darbelere karşı dayanım fonksiyonu göz önünde bulundurularak seçilen bir parametredir. Buna karşın cidardan çevreye doğru olan ısı transferinde; transfer direncini artırarak yağın soğumasını önleyici bir rol oynayabilir. Metal karter malzemesi göz önünde bulundurulduğunda ısı iletim katsayısının büyüklüğü nedeniyle cidar kalınlığının artırılması ısı direncini istenilen seviyede artıramaz bu nedenle kıyaslamalar plastik malzeme için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’de 2,5 mm, 5 mm, 1cm ve 2 cm karter cidar kalınlıkları için plastik malzeme karterler kıyaslanmıştır.



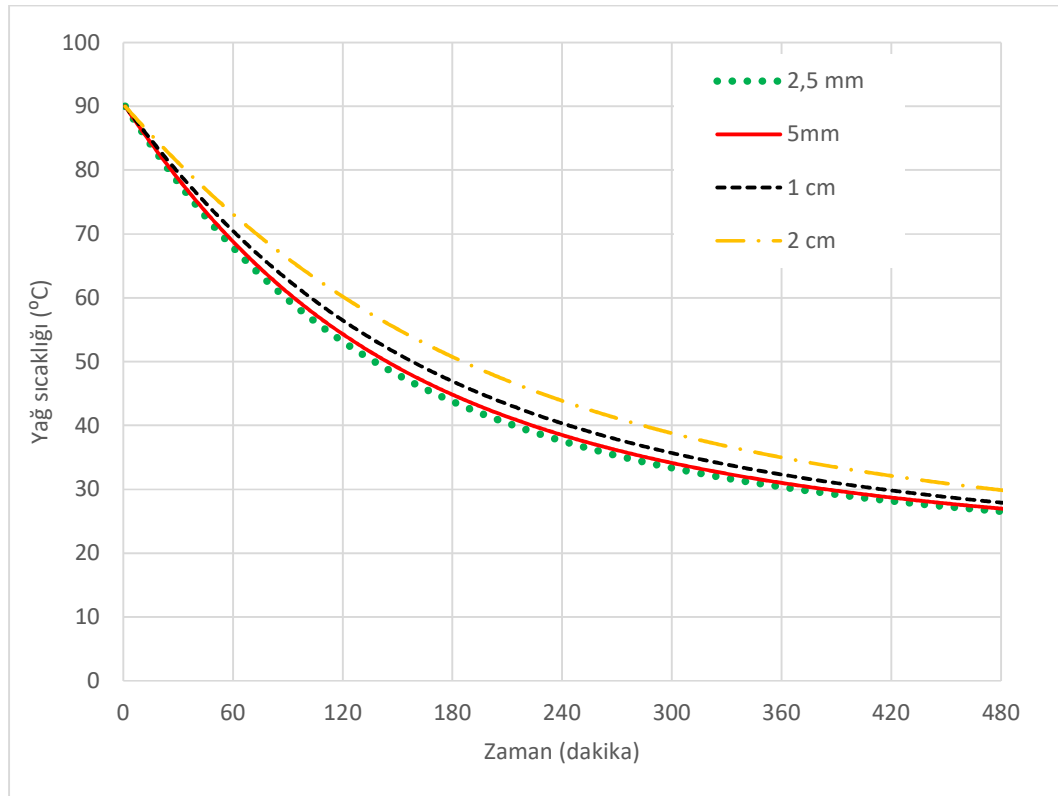
**Şekil 5.7** Farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

Karter malzeme tipine benzer bir durum burada da görülmektedir. Isının büyük bir çoğunluğunun yüzeyden transfer olması ve cidar kalınlıklarının ısı direncini artırmada yetersiz olması nedeniyle soğuma evresinde oluşan sıcaklık farkları maksimumda 3°C dolaylarına kadar ulaşabilmektedir. (Şekil 5.8)



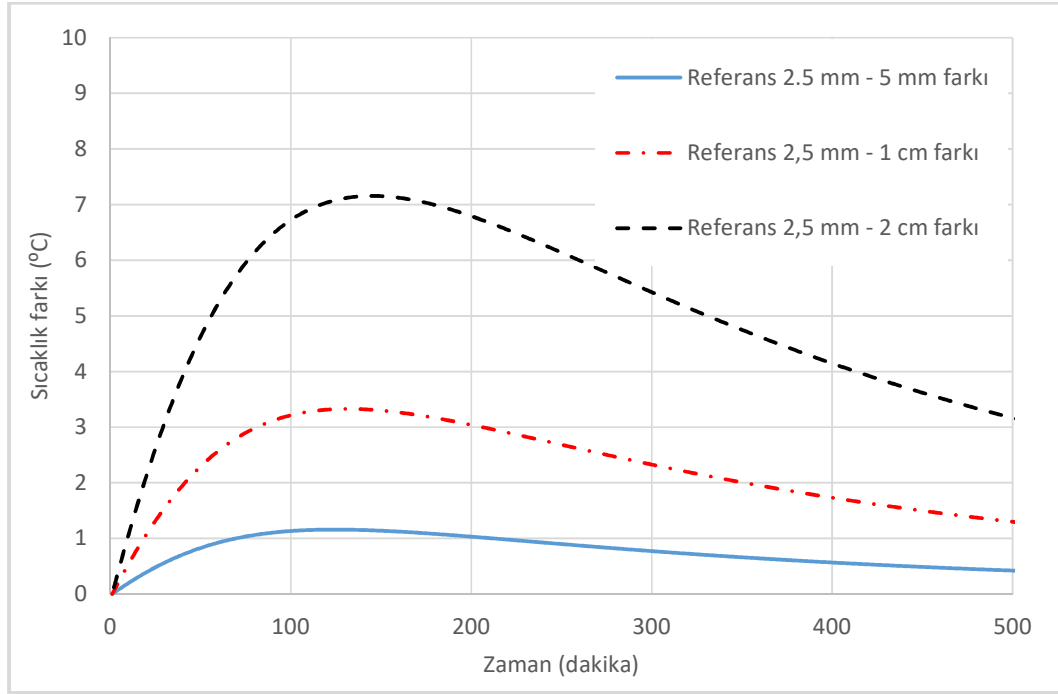
**Şekil 5.8** Farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları

Buna karşın windage tray uygulaması kullanılarak yüzeyden transfer olan ısı kısıtlandığında motor yağı sıcaklık eğrileri Şekil 5.9'daki gibi seyretmektedir.



**Şekil 5.9** Windage tray uygulaması durumunda farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

Şekil 5.10'da görülebileceği gibi motor yağı sıcaklık farkları windage tray'in kullanıldığı durum için minimum ve maksimum kalınlıklar arasında 7 °C seviyelerine ulaşmaktadır.



**Şekil 5.10** Windage tray uygulaması durumunda farklı cidar kalınlıkları için plastik malzemeli karterin motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları

Bu sıcaklık farklarının yanı sıra soğuma evresinde aynı referans sıcaklıklara ulaşılması bakımından da önemli zaman dilimi farkları ortaya çıkmıştır. Minimum ve maksimum kalınlıklı karter uygulamalarının 50°C seviyelerine ulaşmaları arasında yaklaşık 1 saatlik kayda değer bir fark oluşmaktadır. Bu zaman farkı 30°C seviyesine ulaşılması durumu için 2 saatten fazladır. Bu bağlamda cidar kalınlığının artırılması bir sonraki çalışmaya avantajlı başlanması açısından windage tray uygulaması ile kullanıldığında önemli bir katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

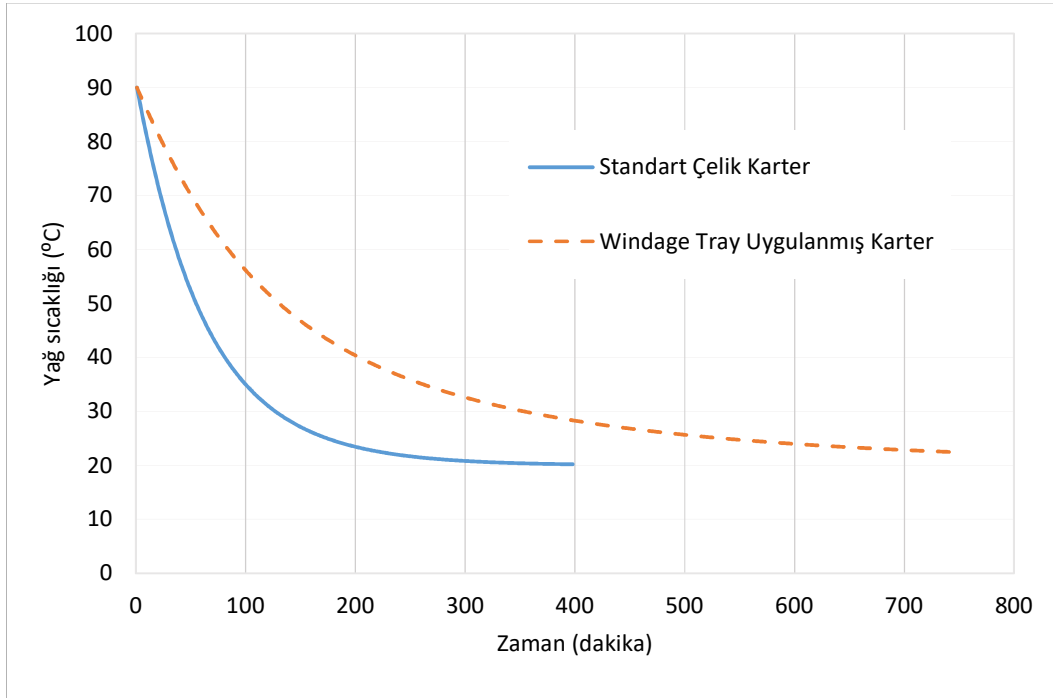
### 5.3 Windage Tray Uygulamasının Etkisinin İncelenmesi

İlk iki tasarım parametresi görülebileceği gibi windage tray uygulamasının kullanımının önemini ortaya çıkarma konusunda yardımcı olmuştur. Bu kısımda windage tray uygulamasının standart karter karşısındaki getirisi incelenecektir. Öncelikle windage tray uygulaması motor yağının karter içersinde kalmasının

sağlanması amacıyla ortaya çıkmıştır [82]. Negatif ve pozitif ivmelenme, yokuş aşağı iniş ve yokuş yukarı çıkış durumlarının yanında yanal eğime sahip yollarda ve virajlarda motor yağının karter içersinde eylemsizliğinden kaynaklanan hareketleri nedeniyle yağ çekmede problemler yaşanabilir. Windage tray uygulamasının ortaya çıkmasındaki temel neden bu problemi ortadan kaldırarak her koşulda yağ emiş borusunun yağın içersinde kalmasını sağlamaktır.

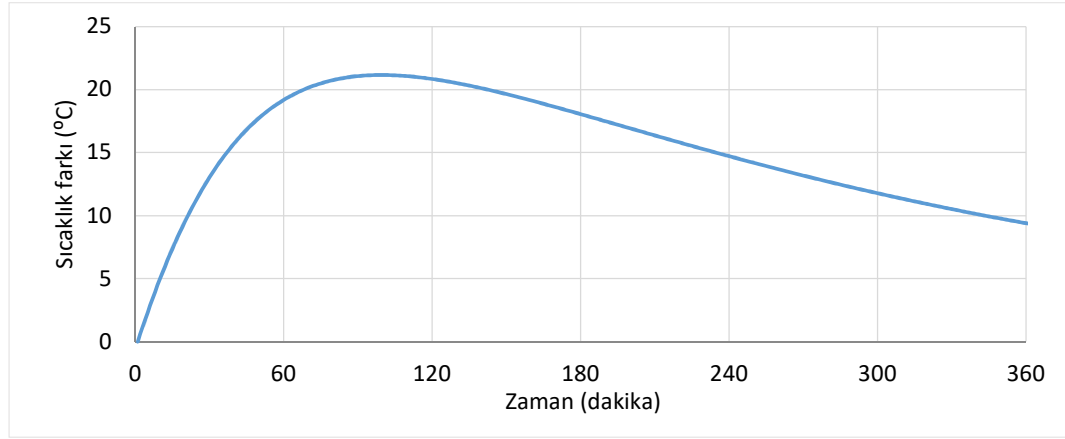
Bunun yanında motor soğuma evresindeki model doğrulama çalışmaları sırasında görülmüştür ki karterin yüzeyinden kaybolan ısı cidarlardan transfer olan ısı baz alındığında önemli bir orana sahiptir. Bu bağlamda windage tray uygulaması motor çalışması sırasında katkı vereceği gibi, motorun duruşu esnasında da yağın soğumasını yavaşlatarak bir sonraki çalışma için avantajlı bir başlangıça yardımcı olacaktır. Bu yüzden bu kıyaslama için uygulama malzemesi ısı iletim katsayısı daha düşük olan plastikten seçilmiştir.

Şekil 5.11’de windage tray uygulamasının kullanıldığı motor karteri ile standart çelik motor karterinin motorun duruşu sırasındaki soğuma grafikleri yer almaktadır.



**Şekil 5.11** Windage tray uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

Standart çelik motor karteri ile windage tray uygulamasının kullanıldığı motor kıyaslandığında hem soğuma evresindeki sıcaklık farkları bakımından hem de soğuma süreleri bakımından çarpıcı farklar ortaya çıkmaktadır. (Şekil 5.12)

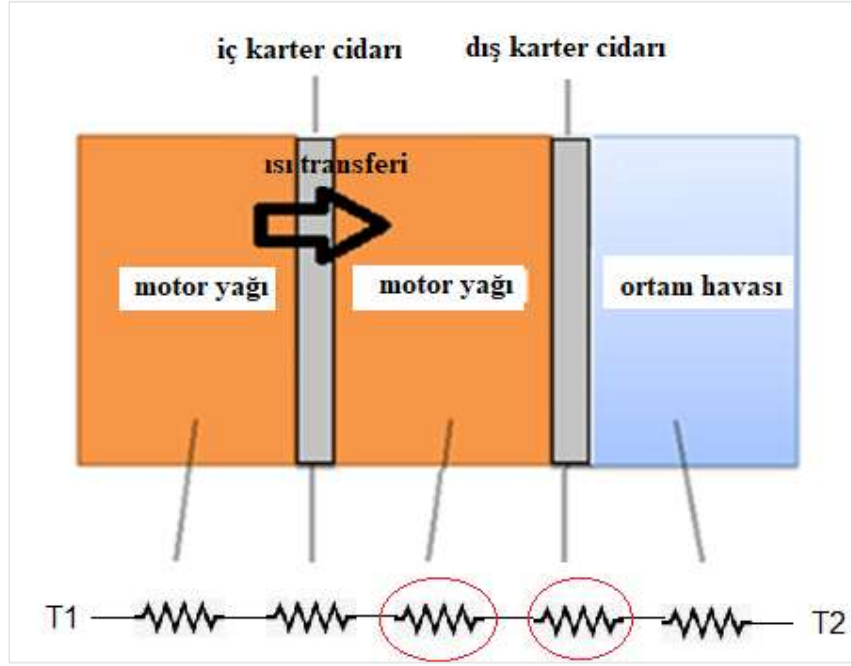


**Şekil 5.12** Windage tray uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları

Sıcaklık farkları 10 ila 20°C dolaylarında bir fark ile seyrederken 2 saatin sonuna da bu farkın 20°C 'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Bunun yanında 30°C'ye ulaşma süreleri arasında yaklaşık 4 saatlik bir fark oluşmaktadır. Bu fark ilgili zaman dilimi boyunca yeniden çalışmaya başlatılan motorlar için önemli bir avantaj teşkil edilmesi anlamına gelmektedir. Bunun yanında standart karter 6 saatte 20°C seviyesine gelirken bu süre windage tray uygulaması olan karterde 12 saat civarındadır.

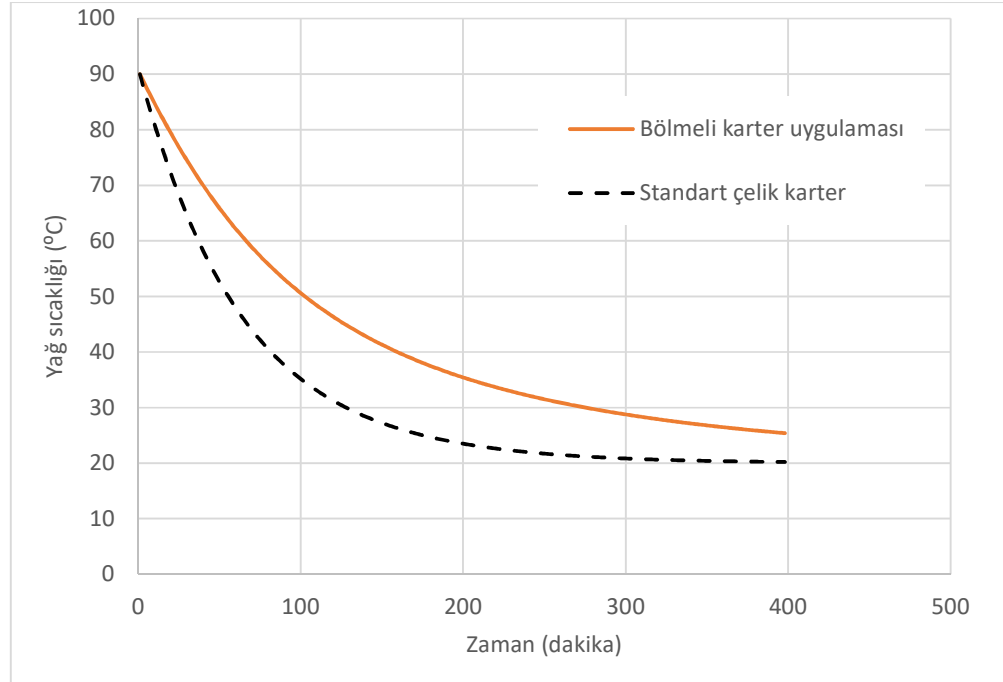
#### 5.4 Bölmeli Karter Uygulamasının Etkilerinin İncelenmesi

Bir çok uygulamada ortaya konulduğu gibi akıllı karter fikri motor yağ karter kütlelerini organize ederek daha hızlı ısınmanın yolunu açar [21]. Bunun yanında yapısı gereği iç içe tasarlanmış olan bölmeli karter uygulaması ısı transfer yolundaki direncin artması bakımından da önem arz etmektedir. Standart bir karter göre ısı transfer yoluna bir sıvı katman ve bir cidar katmanı daha eklenecektir. Bu sayede ısı transferinin düşmesinin yolu açılmış olur. Dolayısı ile bu tür karter uygulamalarını ısı transfer yolu ve soğumanın yavaşlatılması kapsamında da ele almak gerekmektedir. Şekil 5.13'de yer alan ısı transfer yoluna dış karter duvarı ve iç dış karterler arasındaki sıvı katman eklenmiştir.



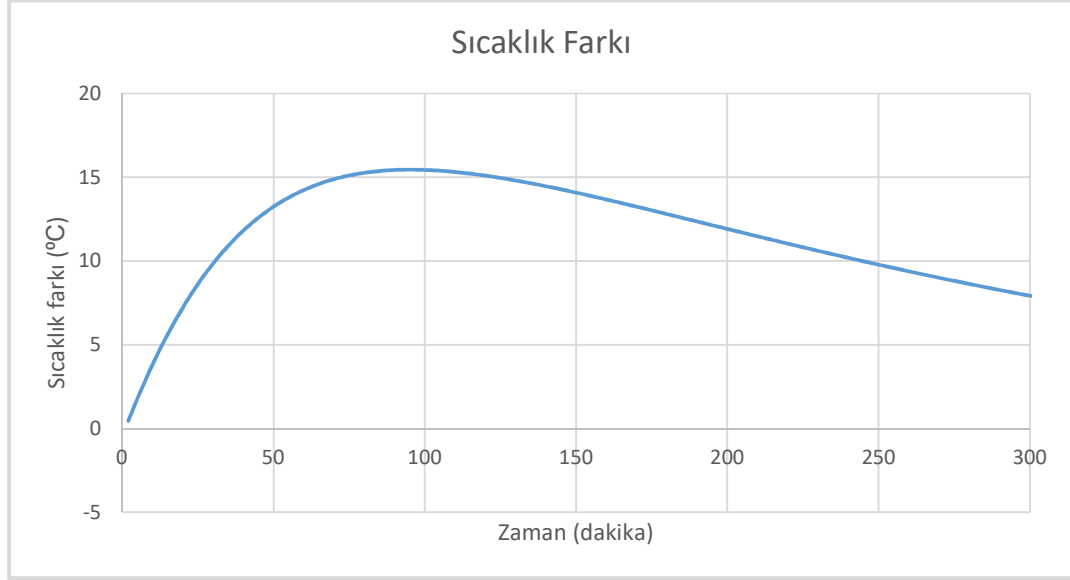
**Şekil 5.13** Bölmeli karter uygulaması ısı transfer yolu

Belirtilen yol ile ısı transferinin yeniden hesaplanması sonrasında standart ve bölmeli karterlerin kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5.14)



**Şekil 5.14** Bölmeli karter uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi

Bu kıyaslamadan soğumanın geciktirilmesi adına önemli farkların ortaya çıktığı söylenebilir. 2 saatlik soğuma evresi sonunda sıcaklık farkları 15°C dolaylarına ulaşmıştır. (Şekil 5.15)



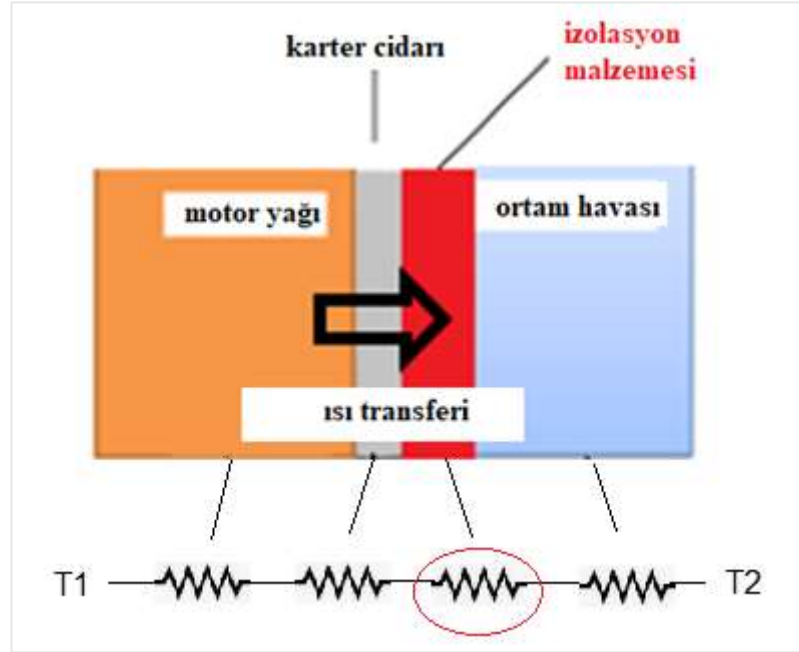
**Şekil 5.15** Bölme karter uygulamasının motor yağı soğuması üzerindeki etkisi - sıcaklık farkları

Bunun yanında 30°C lik sıcaklığa ulaşma süreleri arasındaki fark ise yaklaşık olarak 2,5 saattir. Yağ miktarını organize ederek avantaj sağlayan bu uygulamanın soğuma evresini geciktirme konusundaki katkısı da oldukça önemli bir seviyededir.

### 5.5 Karter İzolasyonunun Etkilerinin İncelenmesi

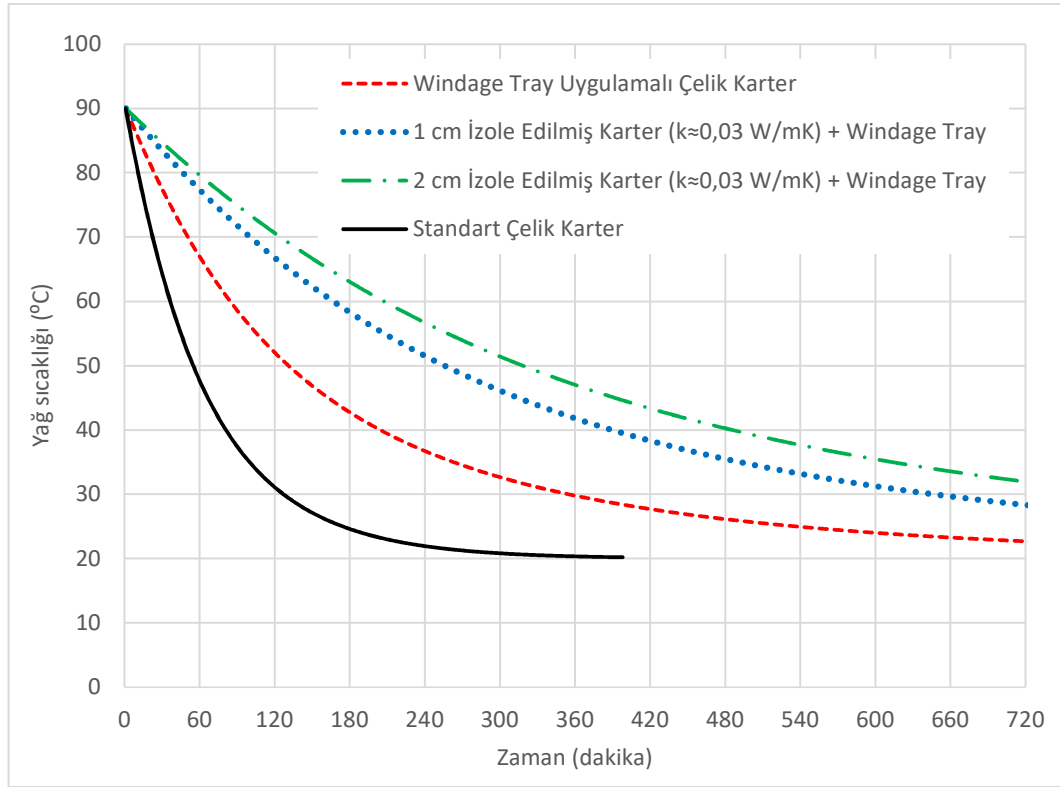
İçten yanmalı motorlarda izolasyon uygulamaları gerek daha sıcak ve yüksek verimlilikte bir çalışma hedeflendiğinde gerekse NVH hedefleri gözetilerek uygulanabilmektedir. Benzer amaçlar için bu çalışma kapsamında karter izolasyonunun motor yağının soğuması evresindeki katkısı irdelenecektir. İzolasyon malzemesinin karter cidarının çevresine eklenmiş olması bölme karter uygulamasındakine benzer bir katkı sağlayarak ısı transfer yolu üzerindeki ısı direncini artıracaktır. Şekil 5.16'da görüleceği gibi izolasyon malzemesi ısı direnci içersine eklenmiş olur, bu bağlamda izolasyon malzemesinin cidar kalınlığının yanı

sıra ısı iletim katsayısı oldukça düşük izolasyon malzemelerinin kullanılıyor olması etkinliği önemli ölçüde artırmaktadır.

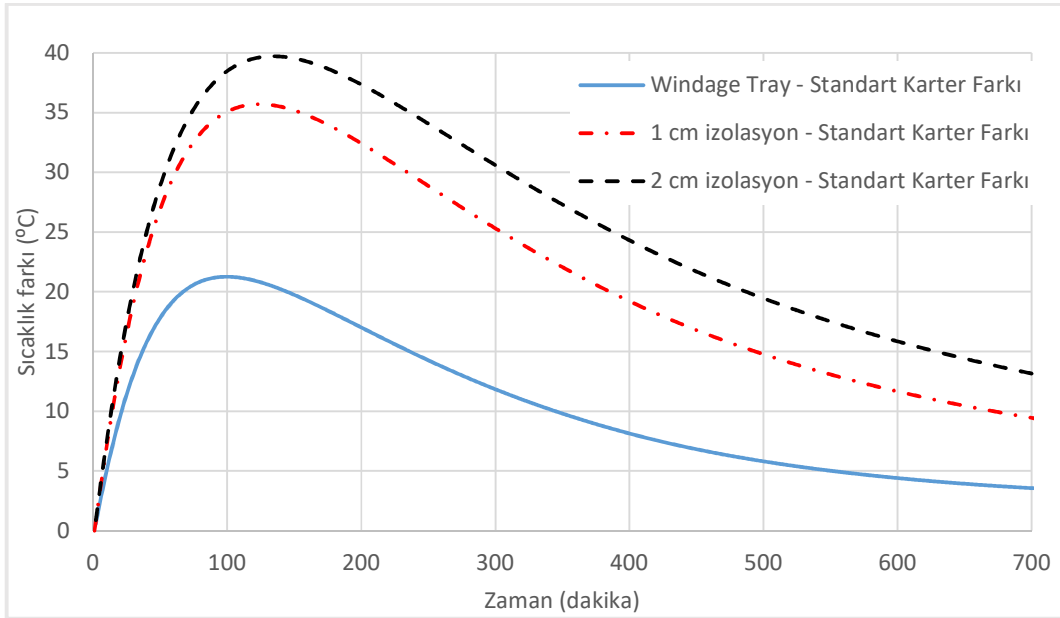


**Şekil 5.16** Bölmeli karter uygulaması ısı transfer yolu

Burada windage tray uygulaması ile izolasyon malzemesinin birlikte kullanılması durumu ve farklı kalınlıktaki izolasyon malzemelerinin etkinliği irdelenmiştir. Kıyaslaması yapılan 4 opsiyondan birincisi standart metal karter, ikincisi bir önceki bölümde gerçekleştirilen windage tray uygulaması, üçüncü ve dördüncüsü ise bu kıyaslamaların üzerine eklenmiş olan 1 ve 2 cm kalınlıklardaki izolasyon malzemesi uygulamalarıdır. Şekil 5.17’de bu dört opsiyon için soğuma evresindeki yağ sıcaklığı eğrileri yer almaktadır. Yaklaşık 0,03 W/mK ısı iletim katsayısına sahip malzeme kullanılarak gerçekleştirilen izolasyonun gerek standart kartere göre gerekse windage tray uygulamasına göre önemli ölçüde fark yarattığı söylenebilir. 1cm izolasyon malzemesi windage tray uygulamalı kartere göre 15°C standart karter göre ise 35°C’lik bir sıcaklık farkı yaratmaktadır. Bu fark 2 cm’lik izolasyon için 40°C dolaylarına kadar ulaşır.(Şekil 5.18) Bunun yanında 1 cm izolasyonlu motor yağı 50°C motor yağı sıcaklığını standart karterden 3 saat, windage tray uygulamalı karterden ise 2 saat sonra ulaşır. Bunun yanında 2 cm izolasyon malzemesinin uygulanması 1 cm’ye göre ortalama 5°C’lik bir sıcaklık farkı yaratmıştır.



**Şekil 5.17** İzolasyon malzemesinin kalınlığının yağın soğuma evresi üzerindeki etkisi



**Şekil 5.18** İzolasyon malzemesinin kalınlığının yağın soğuma evresi üzerindeki etkisi – sıcaklık farkları

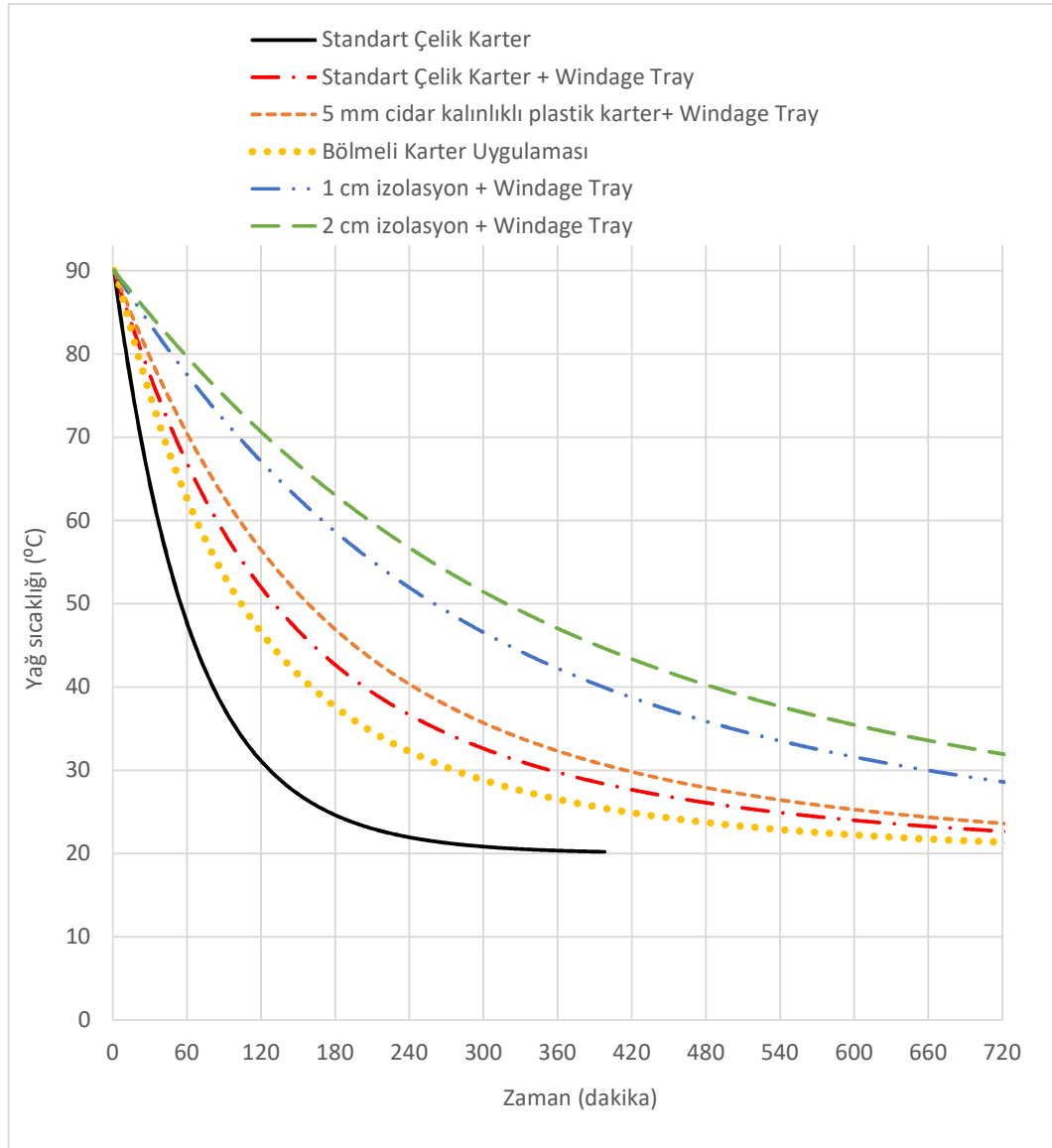
## 5.6 Çeşitli Karter Kombinasyonlarının Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde farklı motor karter parametrelerinin motor yağının soğuma evresine olan etkinlikleri karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise soğuma süreleri, yeniden ısınma periyotları, yağ viskoziteleri motor sürtünmeleri üzerinde yaratılan farklar bakımından referans elik motor karteri, windage tray uygulaması eklenmiş 2,5 mm cidar kalınlığına sahip elik karter, windage tray uygulamasının yanı sıra malzemeyi plastik cidar kalınlığını ise 5 mm'ye çıkarılması ile ortaya konan konsept, bölmeli karter uygulaması ve farklı kalınlıktaki izolasyon malzemeleri ile elde edilmiş karter modelleri karşılaştırılmıştır.

20°C ortam koşullarında soğumaya bıraktın motor yağları kıyaslandığında tüm bu opsiyonlar arasında çarpıcı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Soğuma evreleri incelendiğinde sıcaklık farkları 15 ile 40°C 'lik seviyelere kadar ulaşmaktadır. Bunun yanında soğuma sürelerindeki uzama 30°C'lik sıcaklıklara dönüşler baz alındığında 2 ila 10 saat arasında uzamaktadır.

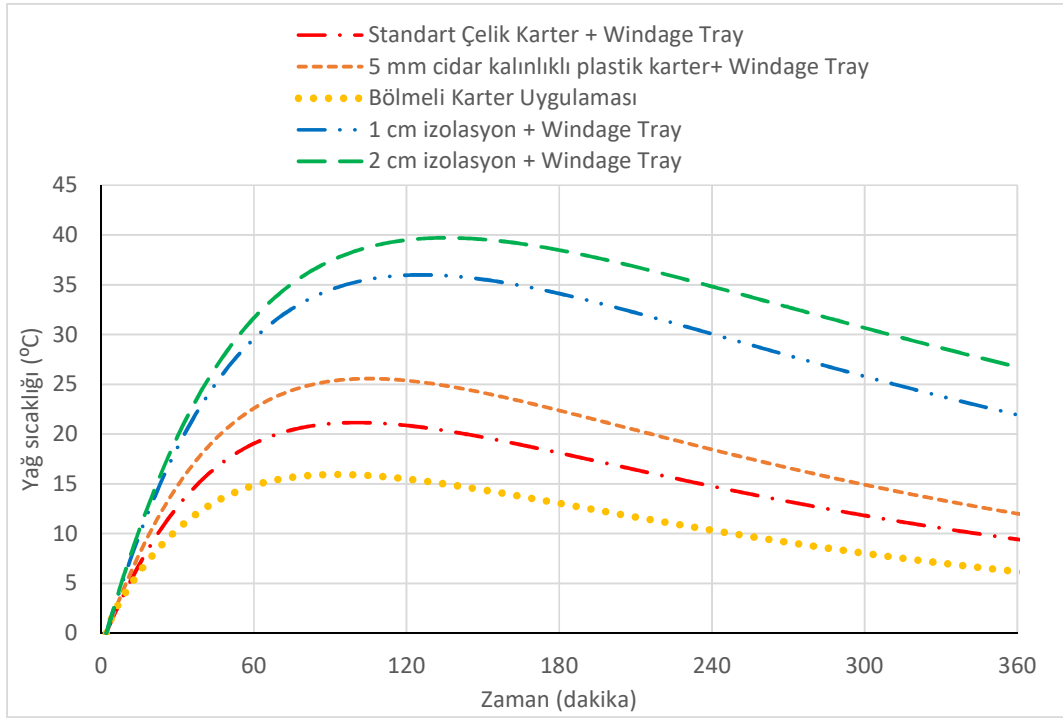
Kıyaslamalar sonucunda soğumayı en çok geciktiren opsiyonun 2 cm kalınlıklı izolasyon malzemesi uygulanan karter için gerçekleştiğı, bunun 1 cm izolasyonlu karter opsiyonun takip ettiğı ortaya çıkmıştır. Windage tray uygulamasının tüm opsiyonlardaki farkın oluşmasında önemli bir katkı verdiğı görölmektedir. Windage tray uygulamalı ve 5 mm kalınlıklı plastik karter en iyi üçüncü performansı, metal karter ise dördüncü performansı göstermektedir. Bölmeli karter uygulaması beşinci sırada yer alsa da bu rolün bölmeli karter için ikincil bir fayda olduğı aslı görevinin yağ miktarı üzerindeki ayarlamalar olduğı da gözardı edilmemelidir. Bu bakımdan soğuma evresinin daha iyi bir hale getirmesi ekstra bir katkıdır. (Şekil 5.19 -5.20)

Buradaki etkinliklerin ve esas faydanın ortaya konabilmesi için belirli bir zaman diliminden sonra farklı karter opsiyonuna sahip motorların yeniden çalıştırılması ve ilk çalışmadaki performansları kıyaslanmalıdır. Bu amaçla motorun stop edilmesinden 2 saat sonra yeniden çalıştırılması ile elde edilen yağın ısınma davranışı ve motor verimlilikleri elde edilmek istenen sonuç üzerinde bir gösterge oluşturmaktadır. Sabit referans motor hızında yeniden alıştırma yapıldığında elde edilen yağın ısınma trendleri ve yeniden rejim sıcaklığına ulaşma süreleri (Şekil 5.21)'de yer almaktadır.

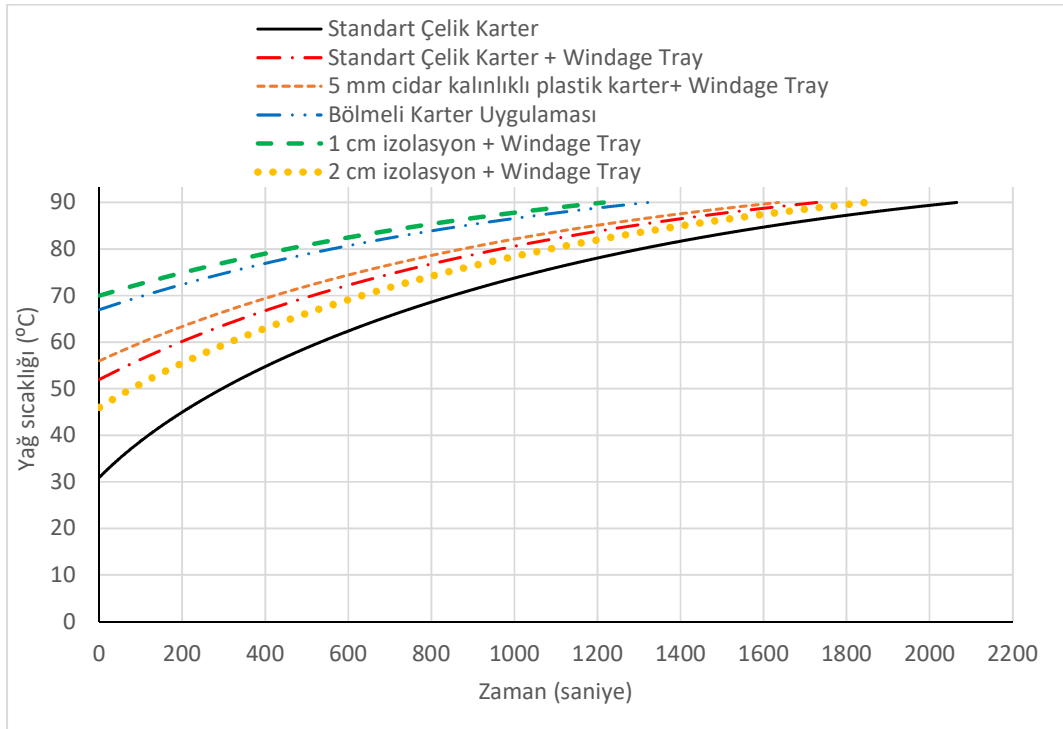


**Şekil 5.19** Farklı karter opsiyonlarının yağın soğuma evresinde kıyaslanması

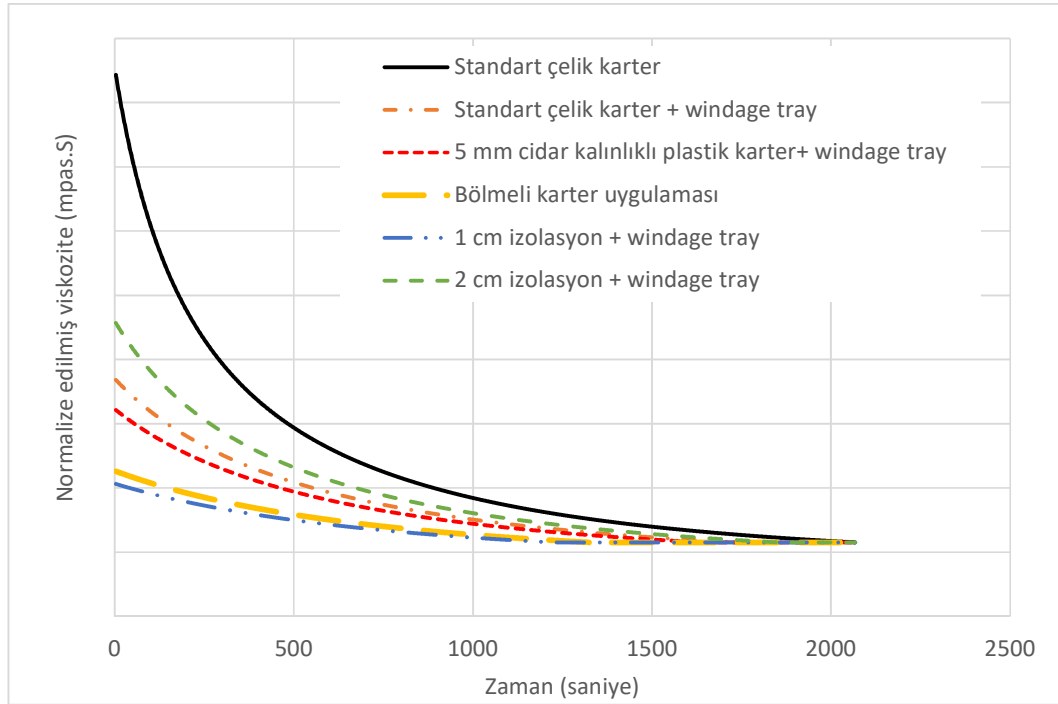
Bunun yanında (Şekil 5.22) bu süreleri içerisindeki motor yağının viskozite değerlerini verirken, Şekil 5.23’de ise bu viskozite değerlerinden çıkışlar hesaplanan motor FMEP değerlerini göstermektedir. Sonuçlardan görüleceği gibi gerek viskozite değerleri gerekse FMEP değerleri arasında yeniden çalıştırma sırasında önemli farklar ortaya çıkmıştır. Bu durum karter geometrisi üzerindeki değişikliklerin verimsiz ilk çalışma periyodunu ne denli etkilediğinin göstergesidir.



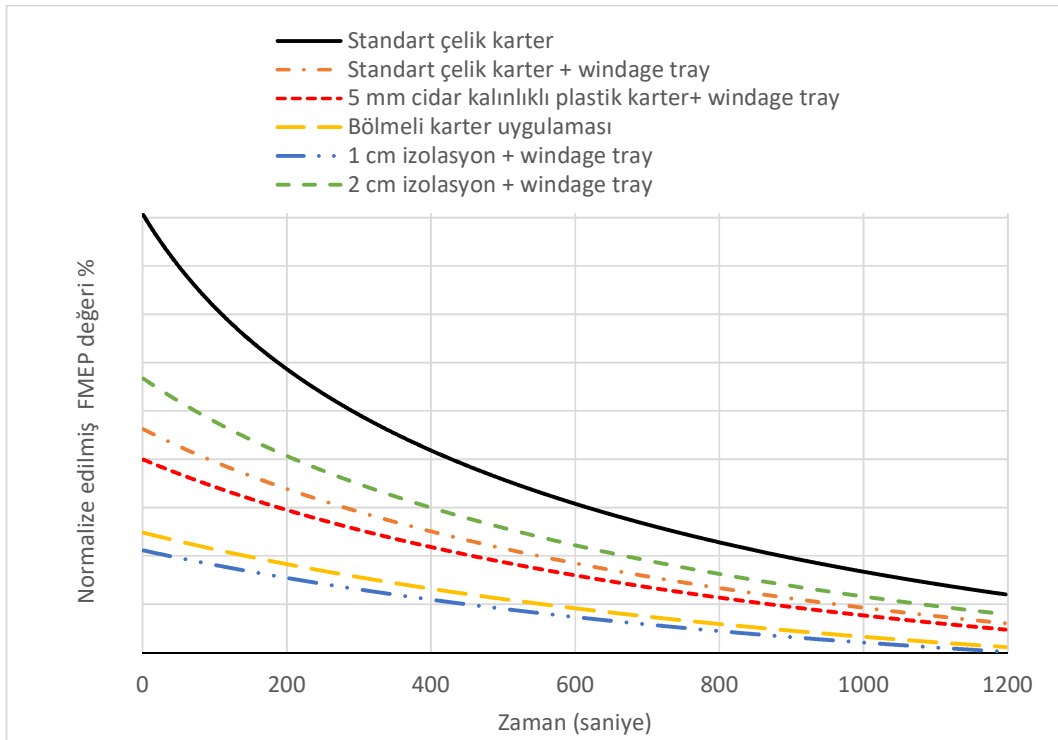
**Şekil 5.20** Farklı karter opsiyonlarının yağın soğuma evresinde kıyaslanması – çelik kartere göre sıcaklık farkları



**Şekil 5.21** Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması



**Şekil 5.22** Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması – viskozite değerleri



**Şekil 5.23** Farklı karter opsiyonlarının 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden ısıtılması süreçlerinin kıyaslanması – FMEP değerleri

Tablo 5.2’de motor yağ karter geometrilerinin kıyaslama kriterlerini göstermektedir. Daha önce belirtilen yağ sıcaklık farklarının yanında 30°C’ye ulaşma süreleri önemli farklar doğurmaktadır. Standart karter yaklaşık 2 saatte bu seviyeye dönerken windage tray uygulaması olan çelik karterde bu süre 334 dakika, 5 mm kalınlıklı plastik karter uygulamasında ise 392 dakika olarak elde edilmiştir. Bölmeli karterde bu süre yalnızca yaklaşık 135 dakika geliştirilmiştir. İzolasyon malzemesinin kullanımı kalınlığa bağlı olarak bu süreyi 10-12 saatler dolayların taşır.

**Tablo 5.2** Karter opsiyonlarının farklı kriterler bakımından kıyaslanması

| Karter opsiyonu                      | Maksimum sıcaklık farkı | 30 °C’ye ulaşma süresi (dakika) | 2 saat sonunda yağ sıcaklığı | Yeniden başlatma durumunda FMEP değişimi | Ağırlık Değişimi ~% |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| Standart çelik karter                | -                       | 125                             | 31°C                         | -                                        | Referans            |
| Standart çelik karter + windage tray | 21°C                    | 334                             | 52°C                         | 10,5%                                    | +14%                |
| 5 mm plastik karter + windage tray   | 25°C                    | 392                             | 56°C                         | 12,5%                                    | -43%                |
| 1 cm izolasyon + windage tray        | 36°C                    | 624                             | 67°C                         | 17,7%                                    | +37%                |
| 2 cm izolasyon + windage tray        | 39°C                    | 763                             | 70°C                         | 19%                                      | +59%                |
| Bölmeli karter uygulaması            | 15°C                    | 260                             | 46°C                         | 7,6%                                     | -47%                |

Bir diğer kıyaslama parametresi 2 saat sonunda ulaşılan yağ sıcaklıklarıdır. Burada standart karter 31°C seviyesine ulaşmışken bölmeli karter 46°C, windage tray uygulaması karterlerden çelik karter 52°C, 5 mm kalınlıklı plastik karter 56°C, izolasyon ve windage tray uygulamalarının kombin edildiği karterler ise sırasıyla 1 cm izolasyon kalınlığı için 67°C ,2 cm izolasyon kalınlığı içinse 70°C seviyesine ulaşmıştır.

Tüm bu faydalılıkların çıktı olarak değerlendirileceği konu motor performansıdır. Bu bağlamda motor sürtünmelerinin azaltılması önemli bir göstergedir. Windage

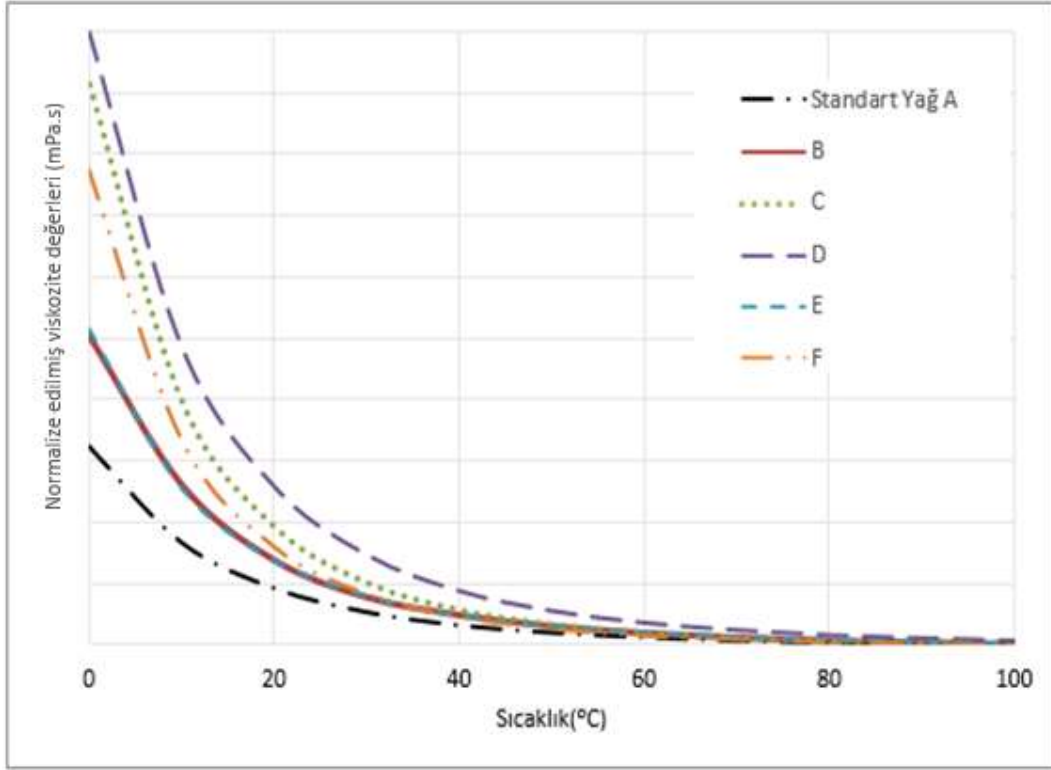
tray uygulamalı metal karter %10,5, 5 mm kalınlıklı plastik+windage tray uygulaması %12,5, bölmeli karter uygulaması %7,6, izolasyon malzemesinin eklendiği durumlardaki opsiyonlar ise %17,7 ile %19 seviyesinde motor sürtünmelerinde azalma sağlamışlardır.

Bir diğer önemli kıyaslama parametresi karter opsiyonlarının ağırlıklarıdır. Buna göre windage tray uygulaması %14'lük bir ek ağırlık getirmektedir. Tüm opsiyonların hemen hemen hepsinde verimliliği artıran bu uygulama için kabul edilebilir bir artıştır. Bunun yanında plastik karter malzemesinin kullanımı termal etkisinin yanında ağırlık azaltma bakımından da önemli bir katkı sağlar. Çelik malzeme yoğunluğu plastiğin yaklaşık yedi katı olsa da ağırlık azaltma oranı aynı oranda sağlanamaz. Bunun temel nedeni plastiğin dayanımını artırabilmek için kullanılan ekstra yapısal özellik eklemeleridir. Daha iyi bir dayanım ve termal özellik sağlamanın bir diğer metodu cidar kalınlığının 2,5 mm'den 5 mm'ye çıkarmaktır. Malzeme çelikten plastiğe kalınlık, 2,5 mm'den 5 mm'ye çıkarıldığında windage tray uygulaması eklenmesine karşın %43'lük önemli bir ağırlık azaltma sağlanacaktır. Bölmeli karter uygulamasındaki ağırlık azaltma %47 civarındadır buna karşın soğuma performansı 5 mm'lik karterden daha iyi değildir. Bunun yanında üretim prosesi de daha karmaşıktır. İzolasyon malzemesi ise her ne kadar önemli bir termal avantaj sağlasa da %37 ile 59 arasında değişen bir oranda ağırlık artışına neden olur. Tüm opsiyonlar kıyaslandığında 5 mm plastik karter ve windage tray uygulaması hem %12,5 lik bir FMEP azaltması hem de %43'lük bir ağırlık azaltması sağlamaktadır.

### **5.7 Yağ Tipinin Etkisinin İncelenmesi**

Soğuk ilk çalışma periyodunda incelemesi yapılan bir diğer yağlama sistemi elemanı motor yağıdır. Motor yağları kimyasal içeriğine göre farklı viskozite-sıcaklık karakteristiklerine sahiptirler. Bunun yanında aynı isimle anılan motor yağlarında dahi farklı viskozite karakteristikleri katkı maddelerinin etkisiyle görülebilir. Bu kısımda referans motor yağının yanı sıra 5 farklı motor yağı soğuk ilk çalışma evresi için incelenmiştir. İnceleme ilk olarak önceki bölümde yer alan metotla denklemlerin elde edilmesi ile başlar. Denklemlerin elde edilmesi her bir motor yağı

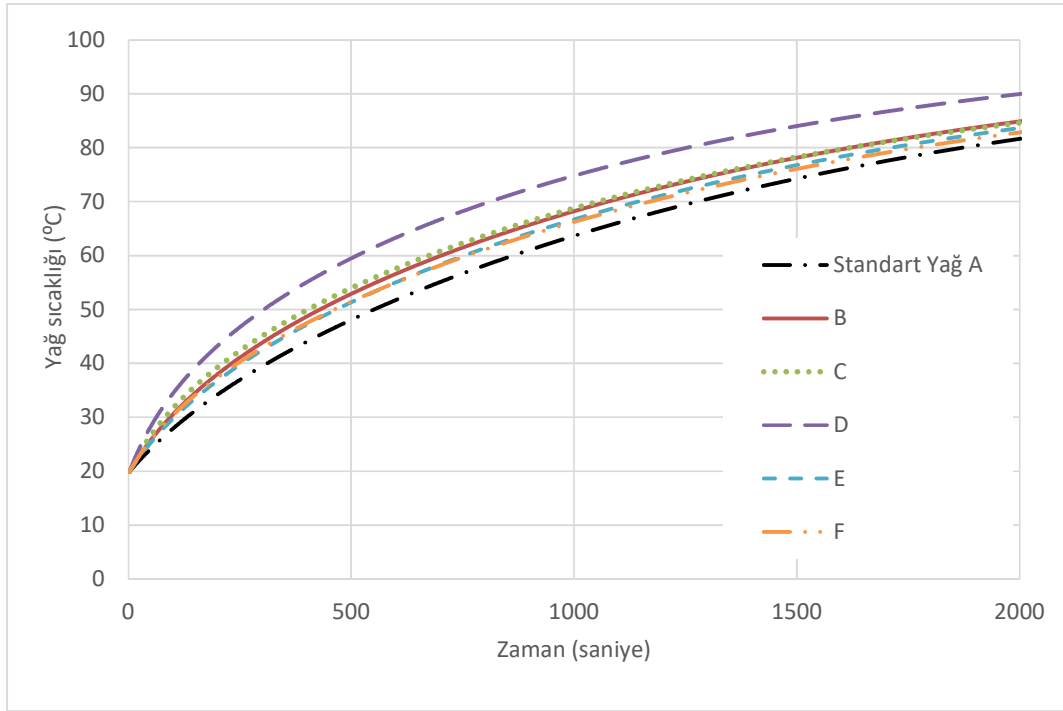
sıcaklığı için viskozite hesaplamasının yapılabilmesi için önemlidir. Şekil 5.24’de A,B,C,D,E tipi yağlar için sıcaklık-viskozite grafikleri yer almaktadır. Yağ tipleri 0-100 °C sıcaklık aralığında geniş bir viskozite yelpazesine sahiptirler



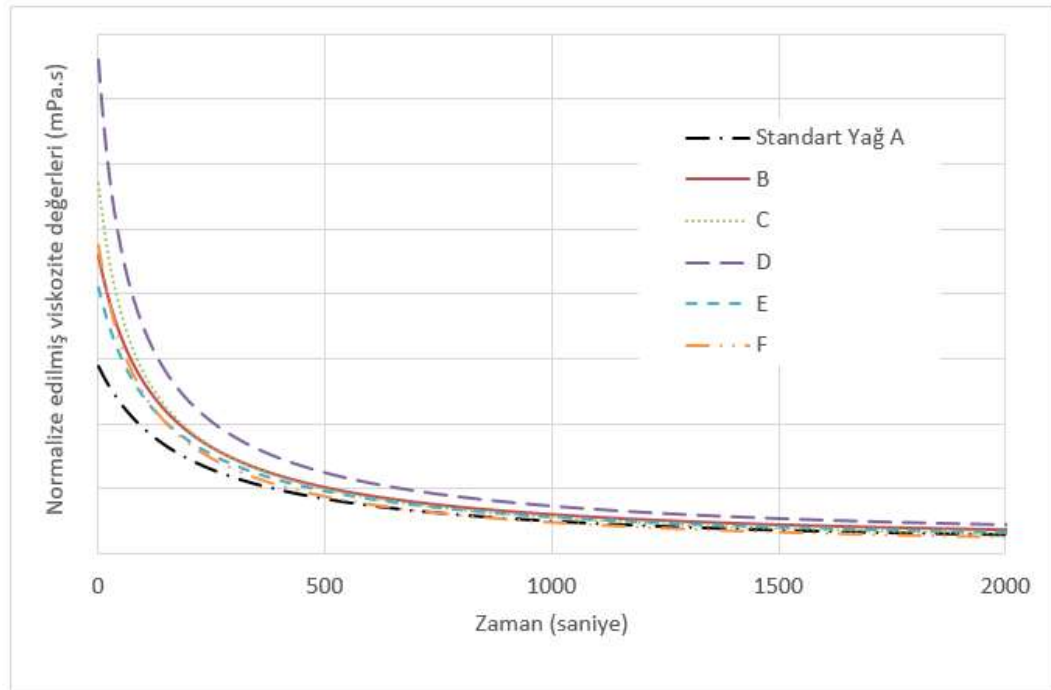
**Şekil 5.24** Farklı yağ tipleri için viskozite-sıcaklık grafiği

2L’lik motor için yağın ısınma modeli farklı yağ tipleri için referans sabit motor hızında ve yükünde koşturulduğunda yağların ısınma eğrileri Şekil 5.25’deki şekilde elde edilir.

Buna göre viskozite değerleri en yüksek eğriye sahip olan C tipi motor yağı diğer motor yağlarına göre daha hızlı ısınmıştır. Bunun yanında standart motor yağı ise diğerlerine oranla daha yavaş bir ısınma eğrisine sahiptir. Diğer 4 motor yağının birbirlerine oldukça yakın seyrettikleri söylenebilir. C tipi motor yağı referans sıcaklığa ulaştığında diğer motor yağ tipleri bu sıcaklığın yaklaşık 5 ile 9°C gerisinde seyretmektedir. Sıcaklık farkları yağın ısınması süreci boyunca maksimumda C tipi ve standart tip motorlar için kıyaslama yapıldığında yaklaşık olarak 15°C seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Şekil 5.26’da ısınma periyodu boyunca elde edilmiş olan dinamik viskozite karakteristikleri görülmektedir.



**Şekil 5.25** Farklı yağ tipleri motorun ısınma evresinde ve sabit referans hızda yağ sıcaklığı grafiği



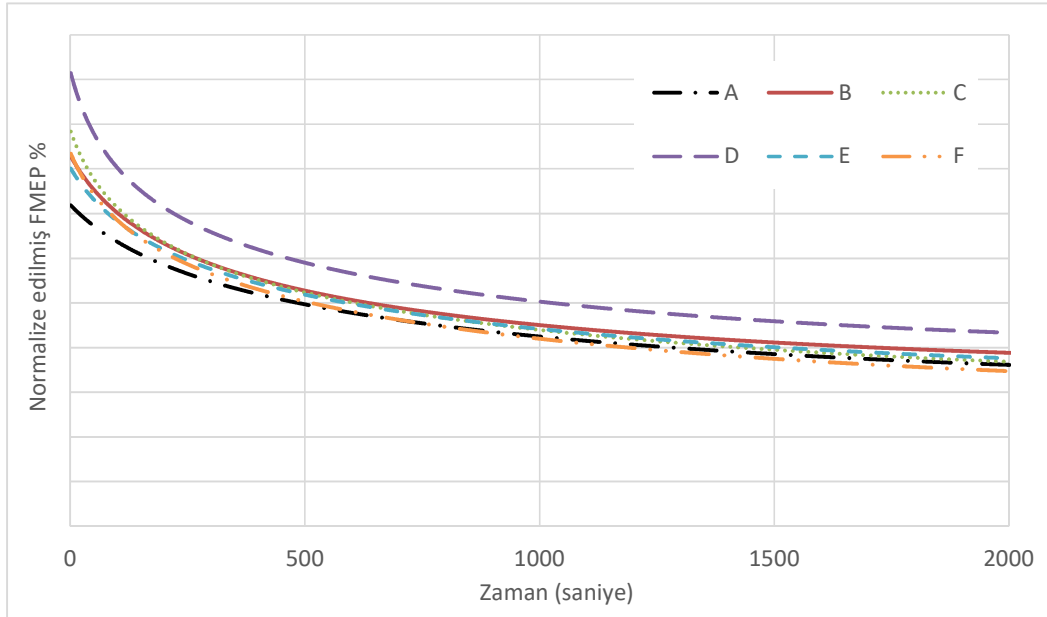
**Şekil 5.26** Farklı yağ tipleri motorun ısınma evresinde ve sabit referans hızda yağ viskoziteleri grafiği

Yine sıcaklıkla paralel olacak şekilde maksimum farklar standart ve D tipi yağ arasında oluşmaktadır. Bunun yanında A,B,D ve E tipi motor yağlarında viskozite değişimleri birbirlerine oldukça yakın seyretmektedirler.

Elde edilmiş olan kümülatif FMEP değerleri kıyaslandığında Tablo 5.3’de yer alan yüzdesel farklar ortaya çıkmaktadır. Gerçekleşen FMEP farkları da Şekil 5.27’de görülebilir.

**Tablo 5.3** Soğuk ilk çalışmada motor sürtünmelerindeki kümülatif farklar

| Yağ tipi | Standart | B     | C     | D      | E     | F     |
|----------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|
| FMEP ~%  | ref      | 7,14% | 5,27% | 20,30% | 4,72% | 0,57% |



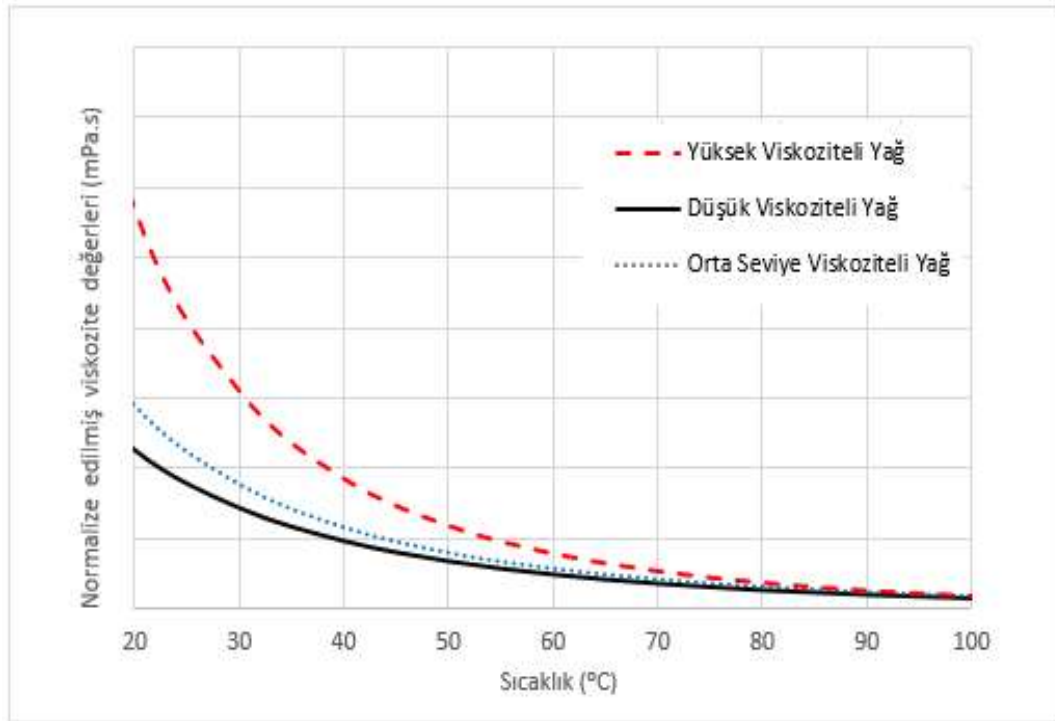
**Şekil 5.27** Soğuk ilk çalışmada motor sürtünmelerinin değişimi

Sürtünmelerdeki değişim ve kümülatif değer farkları ile yağın ısınma eğrileri gözönünde bulundurulduğunda C tipi yüksek viskoziteli motor yağının en erken ısınan motor yağı olmasına karşın sürtünme değerlerinde yaklaşık %20’lik bir farka neden olduğu gözlemlenmektedir. Bunun yanında en yavaş ısınan standart motor yağı için bu değerler toplamda en düşük seviyededir. Genel algının aksine hızlı ısınma yağ tipleri göz önünde bulundurulduğunda daha verimli bir çalışma evresi için yeterli olmamıştır. Referans motor yağına göre daha hızlı ısınma eğrilerine

sahip motor yağlarının tümü ilgili motor koşulları için kümülatifde sürtünme artışlarına neden olmaktadır. A tipi motor yağı %7,1 B tipi motor yağı %5,2, D tipi motor yağı %4,2 E tipi motor yağı ise %0,5'lik bir FMEP artışı ortaya çıkarmaktadır.

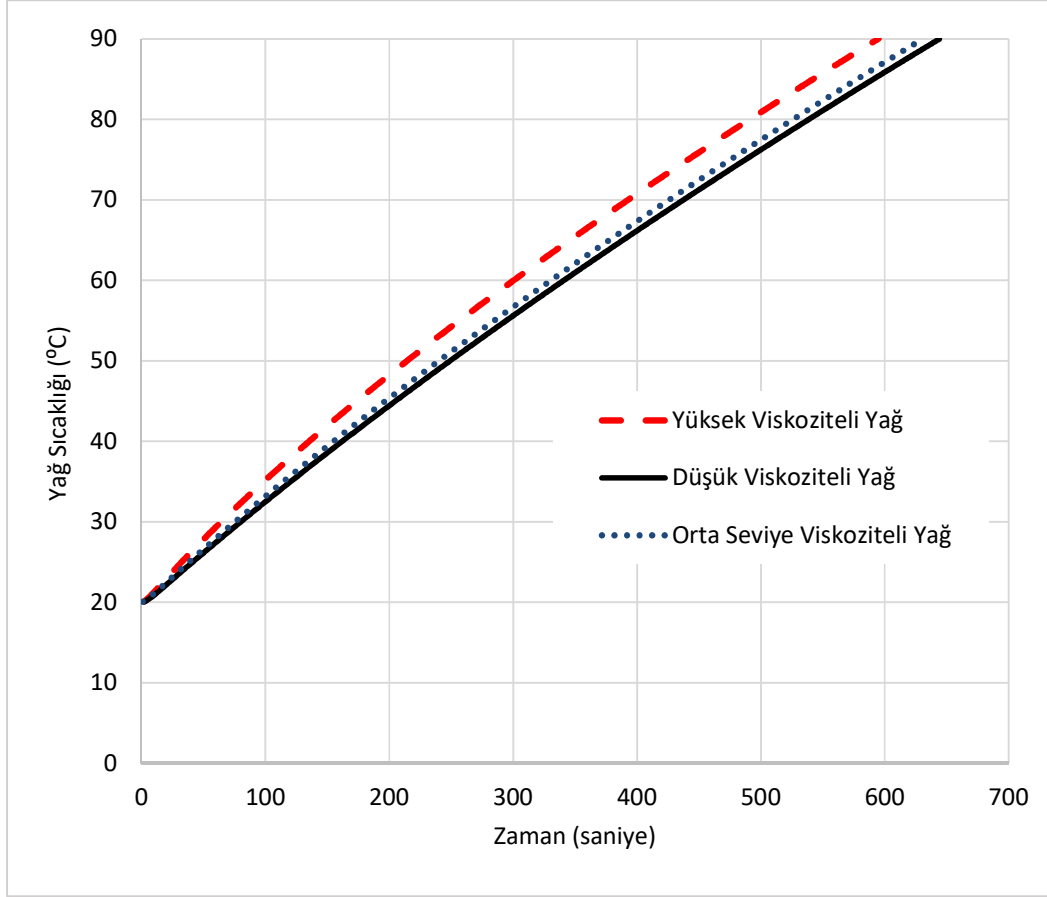
Motor yağ sıcaklıklarındaki hızlı artışa karşın FMEP'lerdeki tersi etkinin açıklanmasında iki dayanak bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, düşük motor yüklerinde sürtünme en önemli yağ ısıtma faktörüken, yüksek viskoziteli yağlar daha fazla sürtünmeye neden olacak ve yağ için daha iyi bir ısı kaynağı oluşturacaktır. İkincisi ise bu hızlı ısıtmanın aynı zamanda yüksek sürtünme kayıplarının da göstergesi olmasıdır. Bu etkinin yanında aynı sıcaklık değerleri için daha yüksek viskoziteye sahip yağların sıcaklığının hızlı artmasıyla viskozitelerini düşürdükleri fakat düşük viskoziteli yağların seviyesine inemedikleri ortaya çıkmıştır.

Çalışmalar 13L motorda üç farklı yağ tipi için tekrar edilmiştir. Üç farklı yağ tipi için sıcaklık ve yağ viskozitesi değerleri Şekil 5.28'de yer almaktadır.



**Şekil 5.28** Farklı yağ tipleri için viskozite-sıcaklık grafiği

Bu yağ tipleri için yağın ısınma grafikleri ilk 10 dakikalık periyot için oluşturulduğunda Şekil 5.29'daki eğriler elde edilmektedir. Bu periyotta motor sürtünmeleri 2L motor uygulamasında olduğu gibi yüksek viskoziteli motor yağında %6 yüksek oranda bir FMEP değerine; düşük viskoziteli motor yağında ise %0,2 oranda düşük seviyede bir FMEP değerine sahip olmaktadır. (Tablo 5.4)



**Şekil 5.29** Farklı yağ tipleri için sıcaklık-zaman grafiği

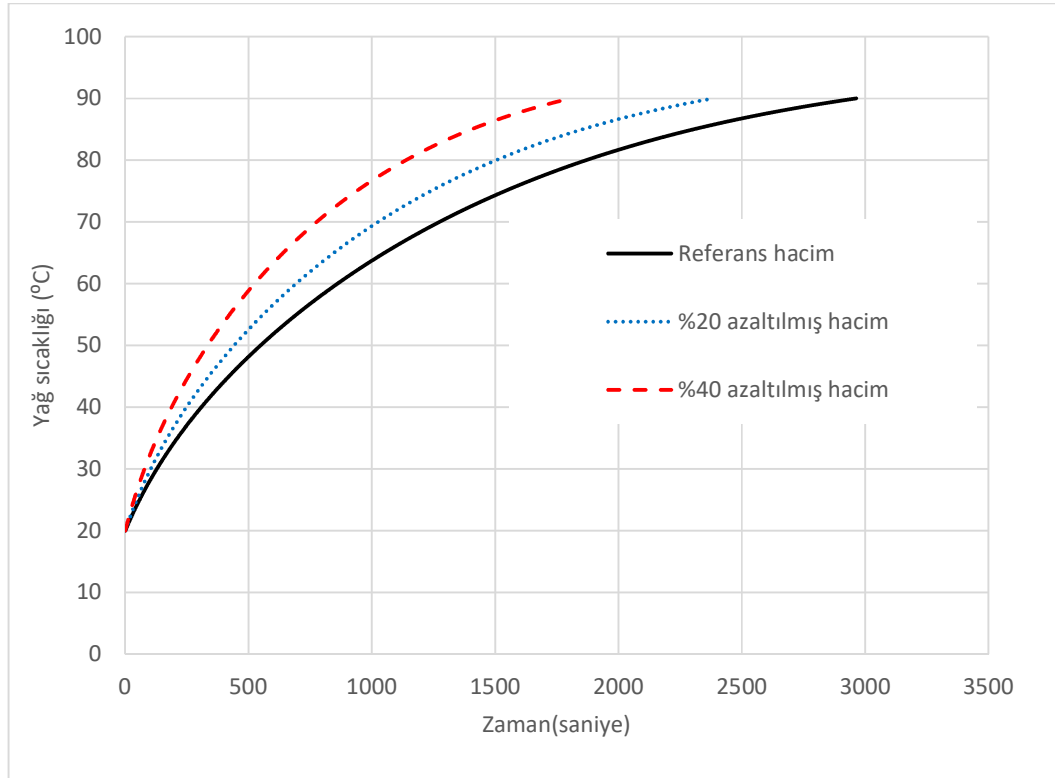
**Tablo 5.4** İlk 10 dakika için için FMEP farkları

| Yağ tipi | Orta viskozite seviyeli yağ | Düşük viskozite seviyeli yağ | Yüksek viskozite seviyeli yağ |
|----------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| FMEP ~%  | Ref                         | -%0,2                        | +%6                           |

## 5.8 Yağ Miktarının Etkisinin İncelenmesi

Motorlarda kullanılan yağ miktarını belirleyen bazı önemli faktör vardır. Bunlardan birincisi motor yağ tüketimi ve yaşlanması gözetilerek belirlenen toplam yağ miktarı, ikincisi yağ emiş borusunun her koşulda yağın içinde kalmasını sağlayacak yağ yüksekliği, üçüncüsü ise motorun içersinde dolaşan yağ miktarıdır. Bunlar baz alındığında motorun ihtiyaç duyduğu yağ miktarı karterde bekleyenden çok daha azdır. Yağın ilk motor çalışması sırasındaki ısınmasında yağ miktarını azaltabilen akıllı teknolojiler kullanılması denklem (3.41) gözetildiğinde yağın hızlı ısınmasına ve bu sürecini verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır. Bu bölümde model yardımıyla farklı yağ miktarları için yapılmış olan kıyaslamalara yer almaktadır.

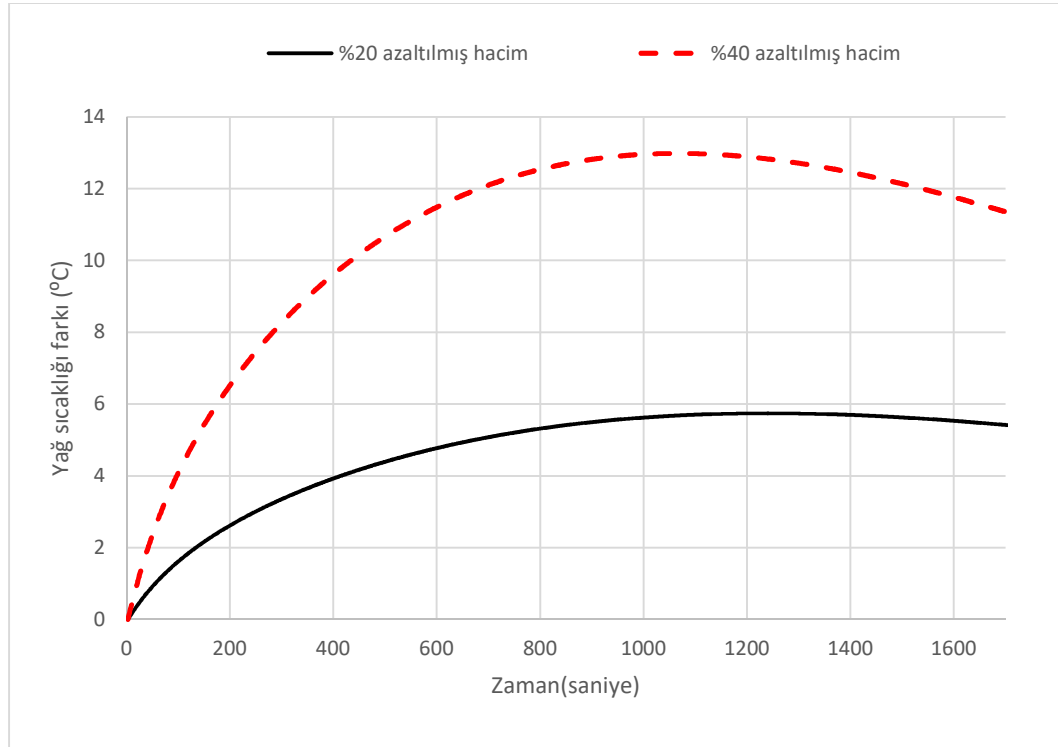
İlk olarak 2L motor için motor yağının %20 azaltılması ve %40 azaltılması durumları için sabit referans hız değerleri gözetilerek elde edilen ısınma eğrileri kıyaslanmıştır. Şekil 5.30'daki sonuçlar incelendiğinde %20 ve %40 azaltılmış yağ hacmi için yağ sıcaklıkları referans yağ hacimli motora göre daha yüksek seyretmektedir.



Şekil 5.30 Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında ısınma evreleri

Bunun yanında referans sıcaklıklara ulaşma sürelerinde %20 azaltılmış yağ hacimli motor 12 dakika %40 azaltılış hacimli motor 20 dakika hızlıdır.

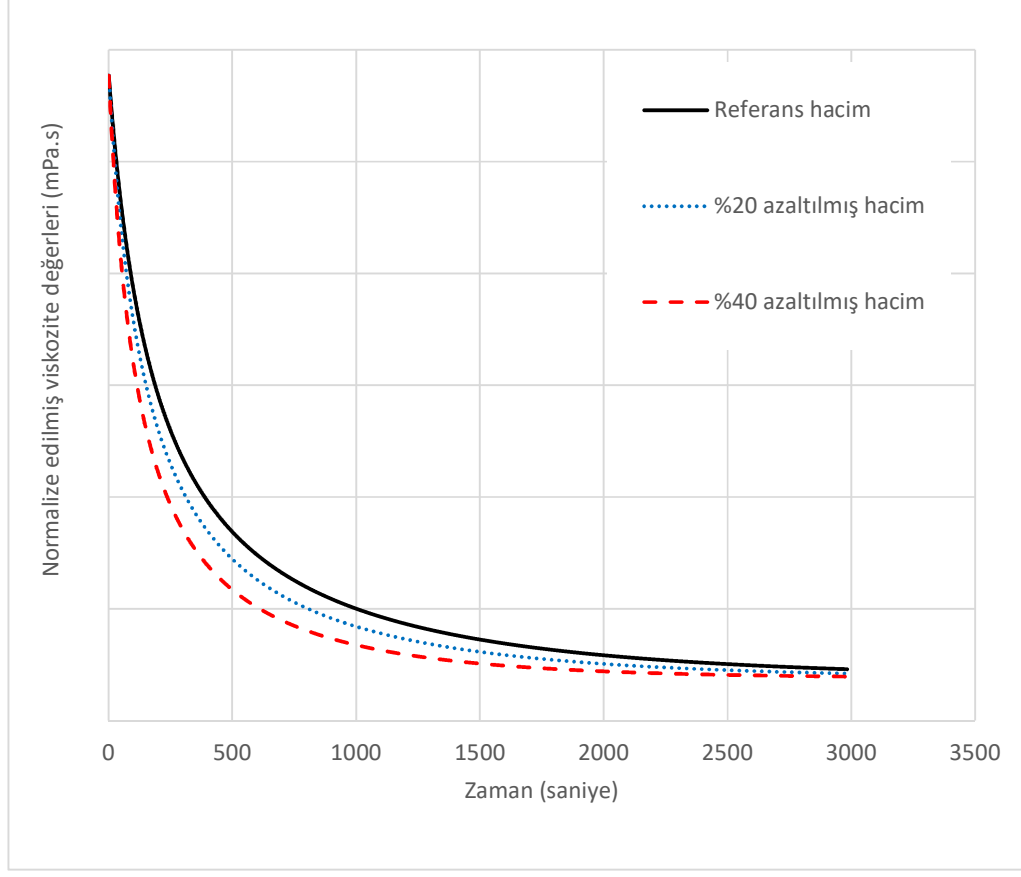
Ayrıca bir diğer önemli kriter yağın ısınması evresinde hacmin azaltılmasının sıcaklığın daha yüksek seyretmesine vermiş olduğu katkıdır. Bu durum için verilen sıcaklık değerleri farkları Şekil 5.31’de yer almaktadır. Buna göre yağ hacminin %20 azaltılması durumu için yağ sıcaklıkları farkları 6°C ye kadar yüksek seyrederken, hacmin %40 azaltılması durumunda sıcaklık farkları 13°C’ye kadar yükselebilmektedir.



**Şekil 5.31** Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında sıcaklık farkları

Elde edilmiş sıcaklık farkları uyarınca motor yağları dinamik viskoziteleri Şekil 5.32’deki şekilde seyretmektedir.

Bu süreçler için elde edilmiş olan motor yağ sıcaklık farkları FMEP değerleri üzerinde bazı farkları doğurmuştur. Buna göre yağ hacmini %20 azaltmak FMEP değerlerini %4 azaltırken, %40 azaltmak ise bu değerlerde %8,5’lik bir azalma sağlamıştır. (Tablo 5.5)

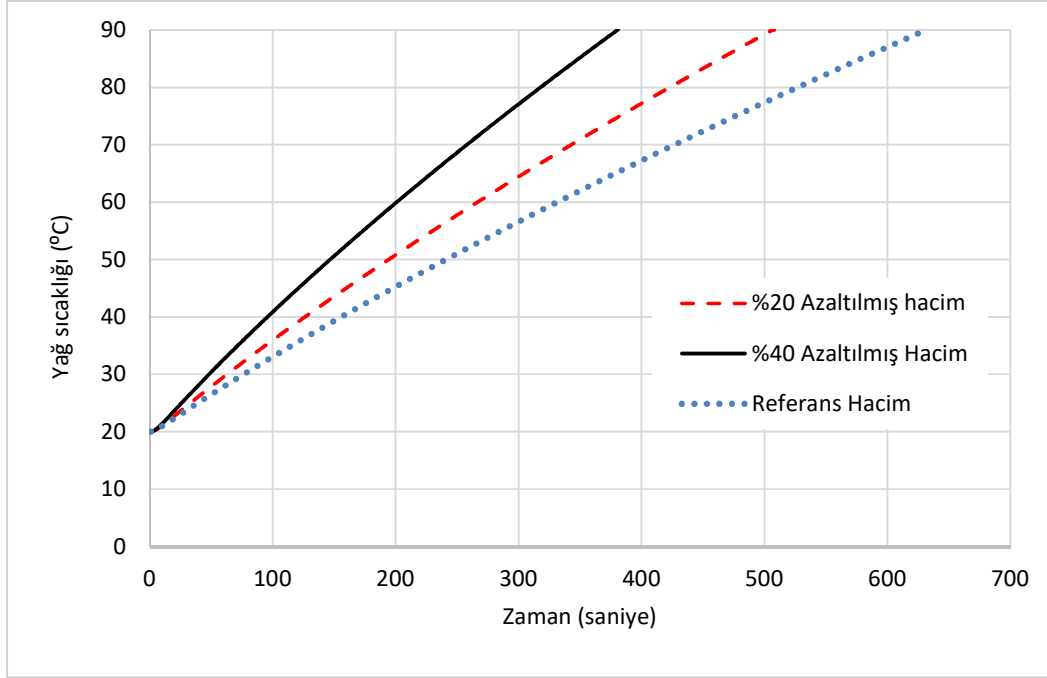


**Şekil 5.32** Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında viskozite değerleri

**Tablo 5.5** Motor yağ hacmi değişikliklerinin FMEP üzerindeki etkileri

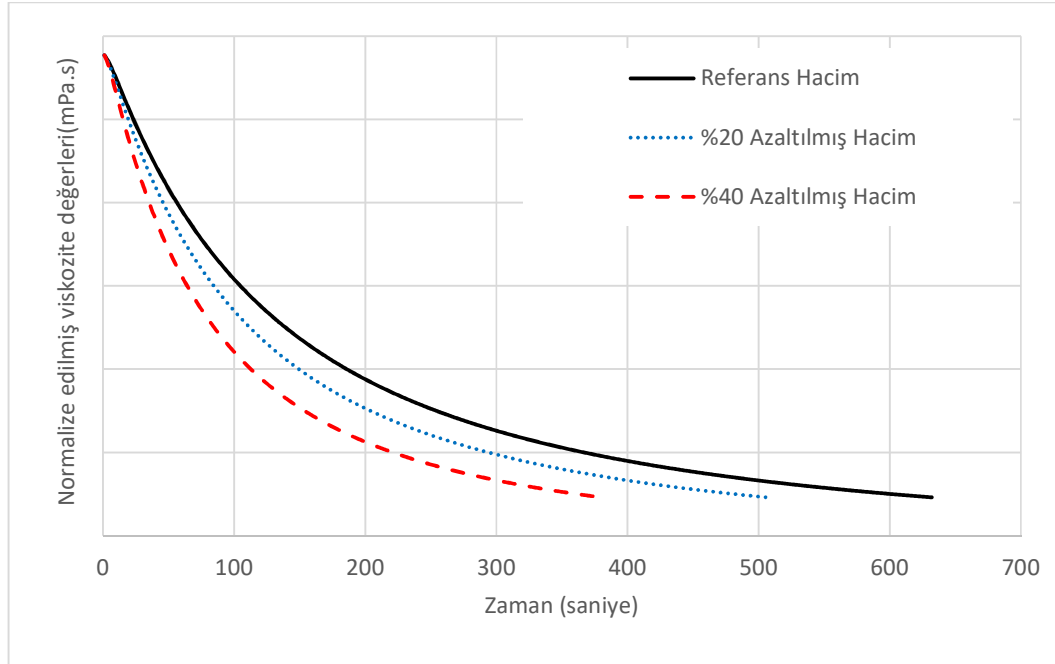
| Yağ hacmi | Referans yağ hacmi | %20 azaltılmış yağ hacmi | %40 azaltılmış yağ hacmi |
|-----------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| FMEP ~%   | Ref                | -%4                      | -%8,5                    |

Aynı çalışma 13L motorlu araçta referans sabit devir ve yük şartları için gerçekleştirildiğinde yağın referans sıcaklıklara ulaşma sürelerinde 2 ila 4 dakika arasında farklar oluşmaktadır. Bunun yanında yağ sıcaklık farkları % 20 yağ eksilmesi durumunda maksimumda 8°C, %40 yağ eksilmesi durumunda ise maksimumda 17°C fark yaratmaktadır. (Şekil 5.33)



**Şekil 5.33** Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında ısınma evreleri

Bu süre içerisinde elde edilen motor yağı dinamik viskozite değerleri ise Şekil 5.34'deki gibi seyretmektedir. Buna göre viskozite değeri yağın azaltılması ile önemli seviyede düşmüştür.



**Şekil 5.34** Farklı yağ hacimlerinin sabit referans motor hızında viskozite değerleri

Yine aynı süre içerisinde elde edilen sürtünme değerleri arasındaki oransal farklar da Tablo 5.6'da verilmiştir. Buna göre motor yağ hacminin %20 azaltılması sürtünmeleri %5,6 azaltırken %40'luk bir azalma sürtünmeleri %11,3 seviyesinde azaltmaktadır. (Tablo 5.6)

**Tablo 5.6** Motor yağ hacmi değişikliklerinin FMEP üzerindeki etkileri

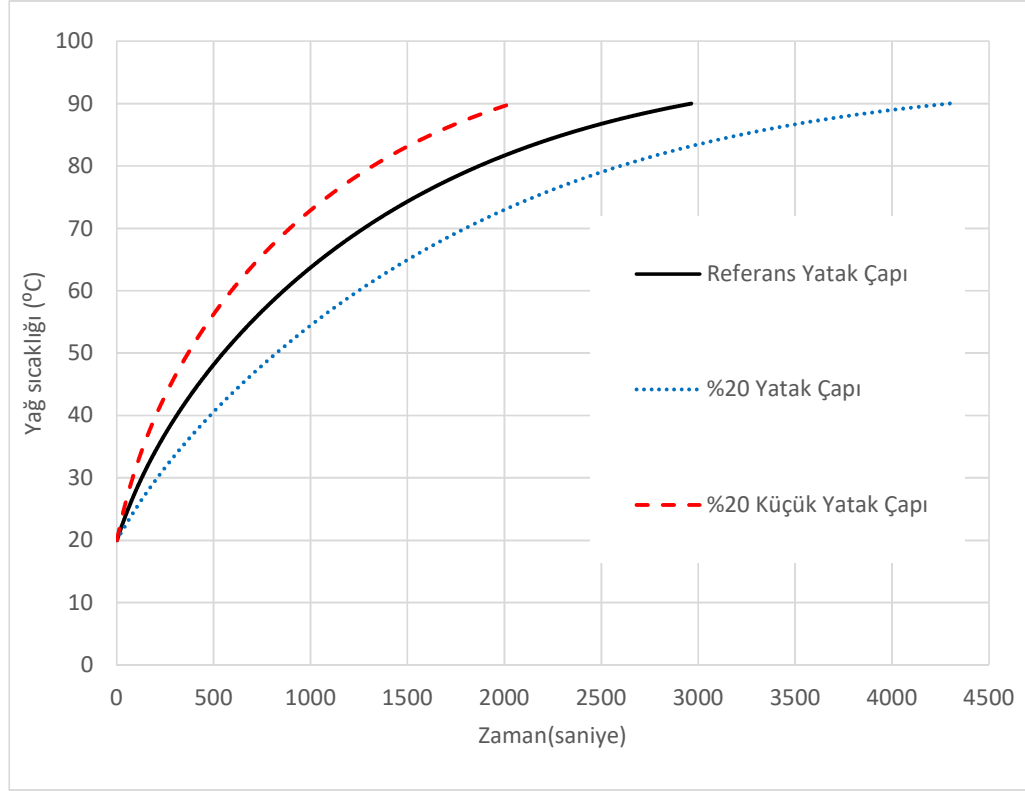
| Yağ tipi | Referans yağ hacmi | %20 düşük yağ hacmi | %40 düşük yağ hacmi |
|----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| FMEP ~%  | Ref                | -%5,6               | +%11,3              |

Bu durumlardan da anlaşılabileceği gibi motor yağ miktarının azaltılması hızlı ısınma açısından önemli bir avantaj sağlar. Motor büyüklüklerine göre ısınma süreleri farklılık gösterse de bu çalışma miktarın azaltılmasının getirebileceği katkılar için bir örnek teşkil eder. Araç koşulları için karterin etrafından hava akışı olması durumunda, ya da daha soğuk iklimler gözetildiğinde ısınma süreleri daha da uzayacağından miktarın azaltılması daha da fazla katkı sağlayacaktır. Bunun yanında düşük yükler yerine yüksek yüklerin seçilmesi büyük motorlara göre bu süreyi kısaltabilir. Ama her iki durumda da miktarın azaltılmasının bir katkı sağladığı gerçeği göz ardı edilemez. Yağ tüketimi sebebiyle motordaki yağ miktarı zamanla azalacağından bu azaltma etkisi kendiliğinden görülebilir. Bunun yanında direkt olarak miktarı azaltmak yağın ömrüne olumsuz etkileyeceğinden mümkün değildir. Bu nedenler ile akıllı karter uygulamaları yağın ömrünü koruduğu gibi soğuk ilk çalışma evresini de verimli geçilmesine önayak olur. Bu konuda literatürde ortaya konulmuş oldukça fazla sayıda uygulama yer almaktadır [21],[22].

### 5.9 Yatak Boyutlarının Etkisinin İncelenmesi

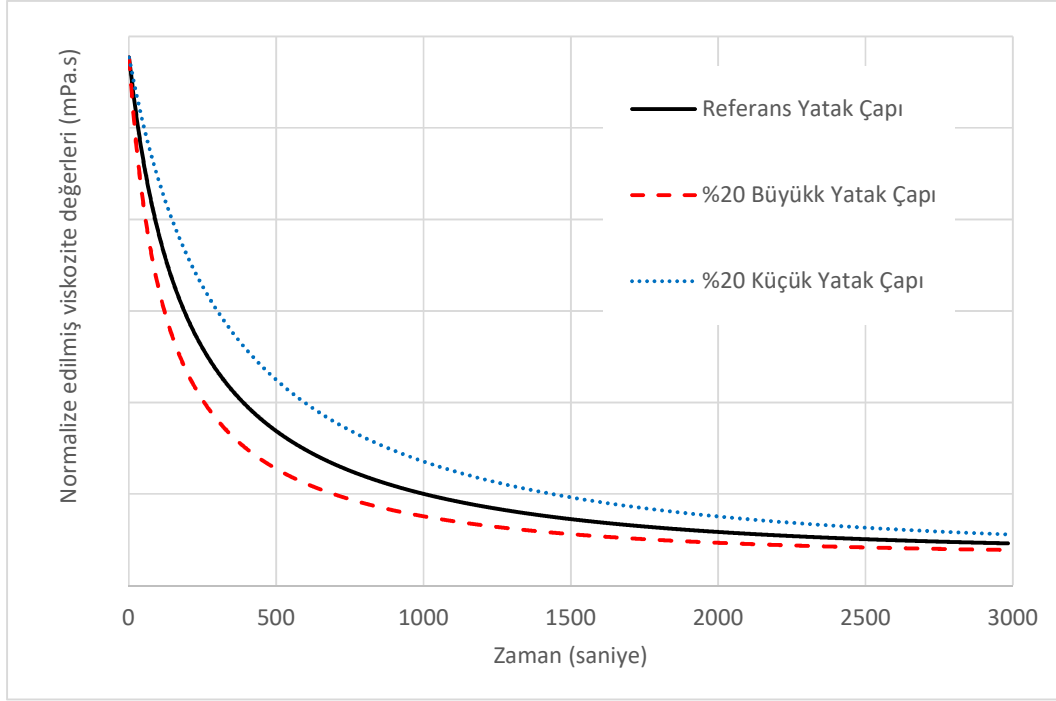
Motor yataklarının boyutları da motor sürtünmelerine etki etmesi nedeniyle sürtünmeler üzerinden motor yağının ısınma periyodunu da doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerden birincisi motor ana yataklarının çapıdır. Çapın artması sürtünme yüzeyini dolayısıyla da yeterli basıncın sağlanması şartı için sürtünme oranını artıracaktır. Bu bölümde motor ana yataklarının %20 fazla ve

%20 az seçilmesi durumları için yağın ısınma eğrileri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Bu bakımdan sabit referans motor hızında gerçekleştirilen kıyaslamalara göre yatak çapının %20 büyümesi durumunda motor yağı referans sıcaklığa ulaşma süresi 1/3 oranında kısalmıştır, buna karşın %20 küçülmesi durumunda ise bu sürenin yaklaşık 1/3 oranında arttığı söylenebilir. (Şekil 5.35)



**Şekil 5.35** Farklı ana yatak çap değerleri için motor yağının ısınma eğrisi

Buna bağlı olarak viskozite eğrileri de Şekil 5.36'deki gibi elde edilmiştir. Isınma veya yağ viskozitesi eğrilerindeki bu çarpıcı farklara karşın motor yağının hızlı ısıtmak motor sürtünmelerini düşürmede aynı oranda etkili olmamıştır. Büyük çaptaki yüksek sürtünme oranları hızlı ısıtmanın pozitif etkisine karşın motor sürtünmelerini referans çapa göre %2 oranında yüksek kalacak seviyede tutar. Ters şekilde düşük motor yatak çapının düşük sürtünme oranı, yağın yavaş ısınması negatif etkisine karşın motor sürtünmelerinin referans yatak çapına göre %2,6 oranında düşük kalması sonucunu doğurmuştur. (Tablo 5.7)



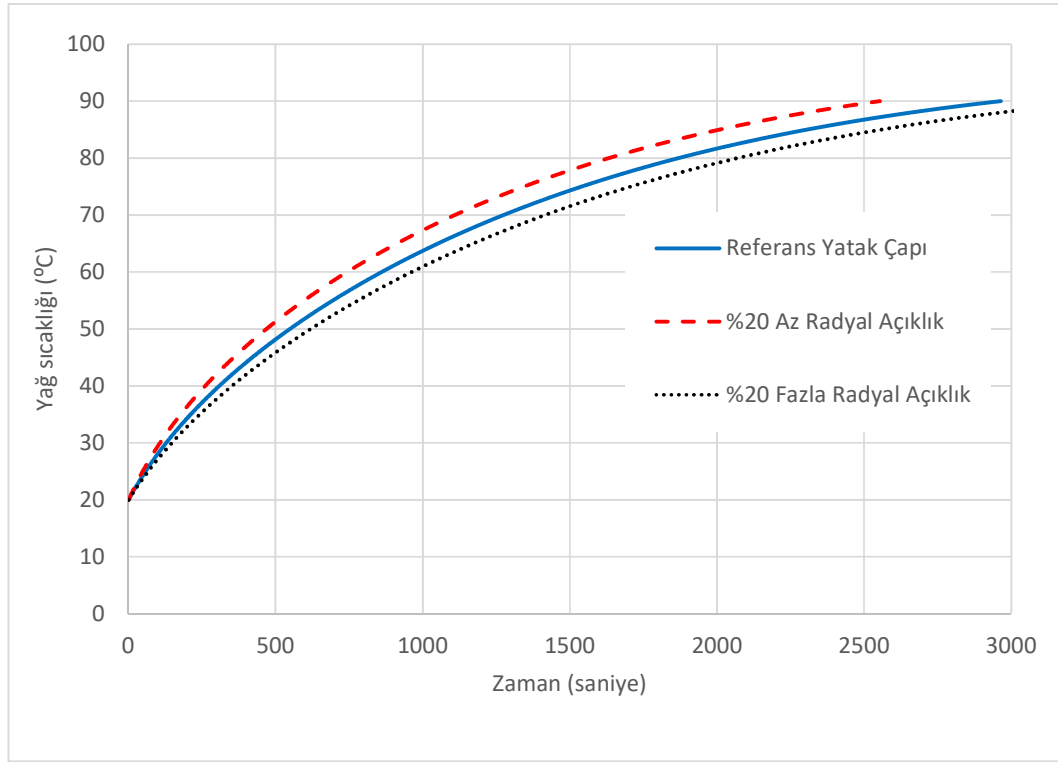
**Şekil 5.36** Farklı büyüklükteki yatak çapları için yağ viskozite değerler

**Tablo 5.7** Farklı büyüklükteki yatak çapları için FMEP değerleri

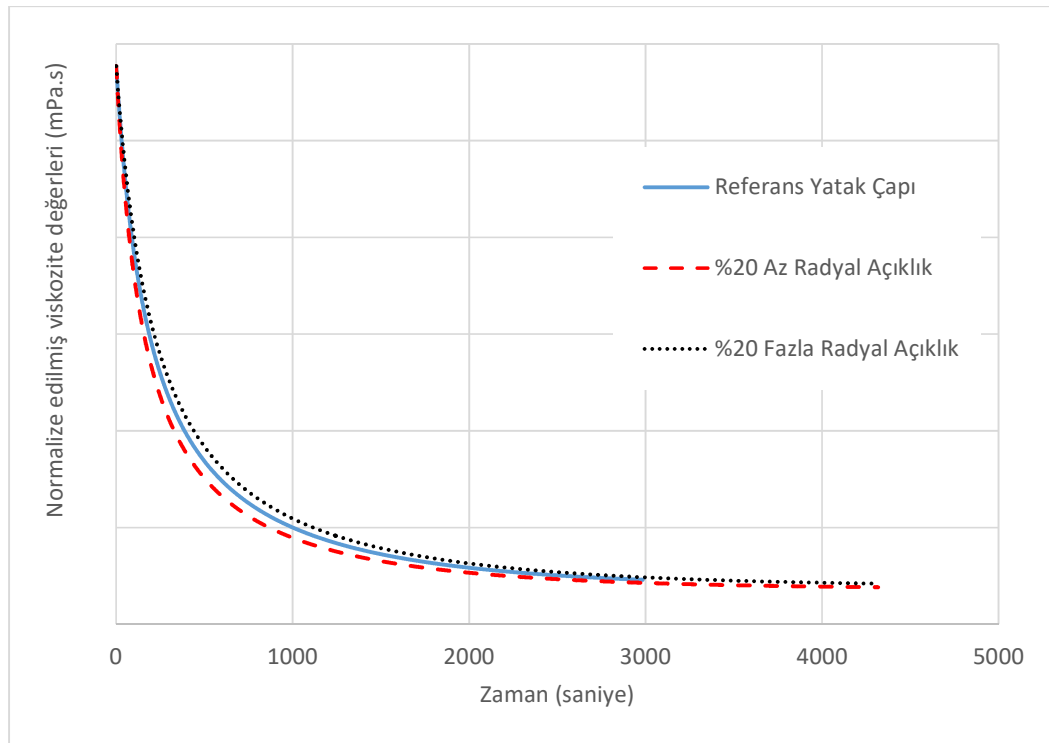
| Yatak çapı | Referans yatak çapı | %20 büyük yatak çapı | %20 küçük yatak çapı |
|------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| FMEP ~%    | Ref                 | +%2                  | -%2,6                |

Benzer bir değerlendirme de radyal açıklıklar için gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmeye göre elde edilen motor yağı sıcaklık grafikleri Şekil 5.37'deki gibidir. Buna göre radyal açıklık artırıldıkça sürtünmeler azalacağından motor yağı daha yavaş ısınır, radyal açıklık azaltıldıkça da motor yağı daha hızlı ısınmış olur.

Şekil 5.38'da ise bu sıcaklık değerleri için elde edilmiş olan viskozite çıktıları yer almaktadır. Bu çıktılar gözetildiğinde elde edilen sonuçlara göre çap konusundaki boyut değişimlerine paralel bir yaklaşım ile sürtünmelerin artması yağın hızlı ısınmasını sağlamış olsa da toplam sürtünmeleri düşürmede yeterli olmamıştır. Bu nedenle radyal açıklığın %20 düşürülmesi toplam sürtünmeleri %6,7 azaltırken, %20 artırılması ise %7,9 artırmaktadır. (Tablo 5.8)



**Şekil 5.37** Farklı radyal açıklıklar için motor yağ sıcaklık değişimi



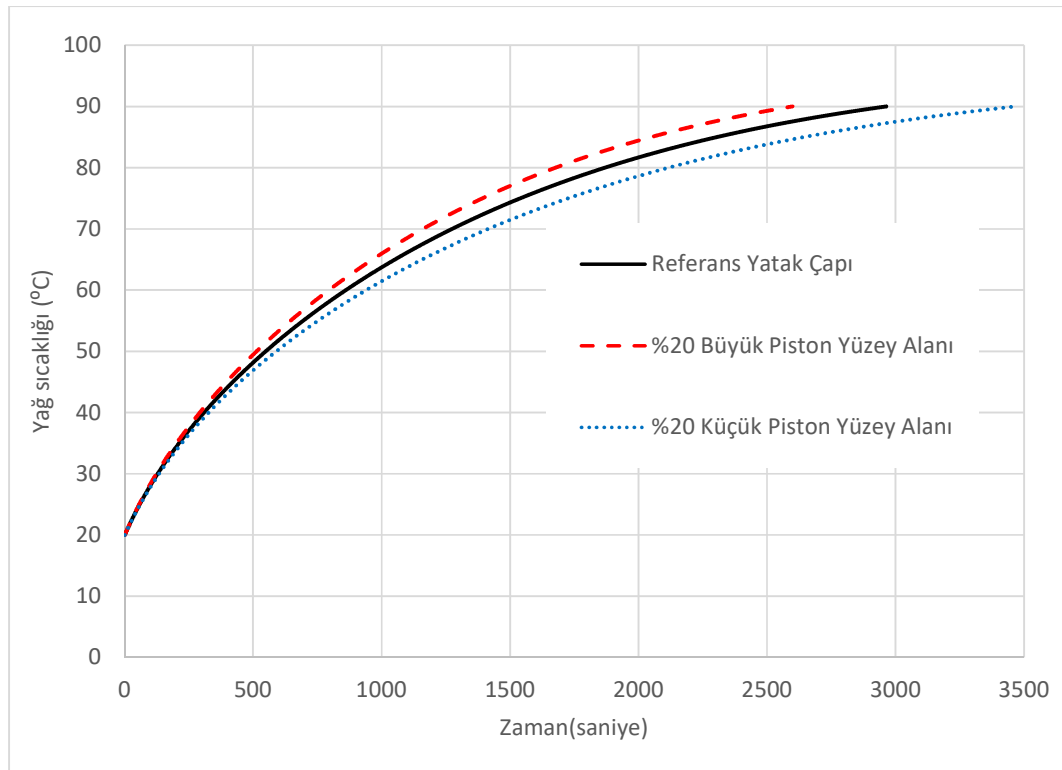
**Şekil 5.38** Farklı radyal açıklıklar için motor yağ sıcaklık değişimi

**Tablo 5.8** Farklı büyüklükteki yatak radyal açıklıkları için yağ viskozite değerleri

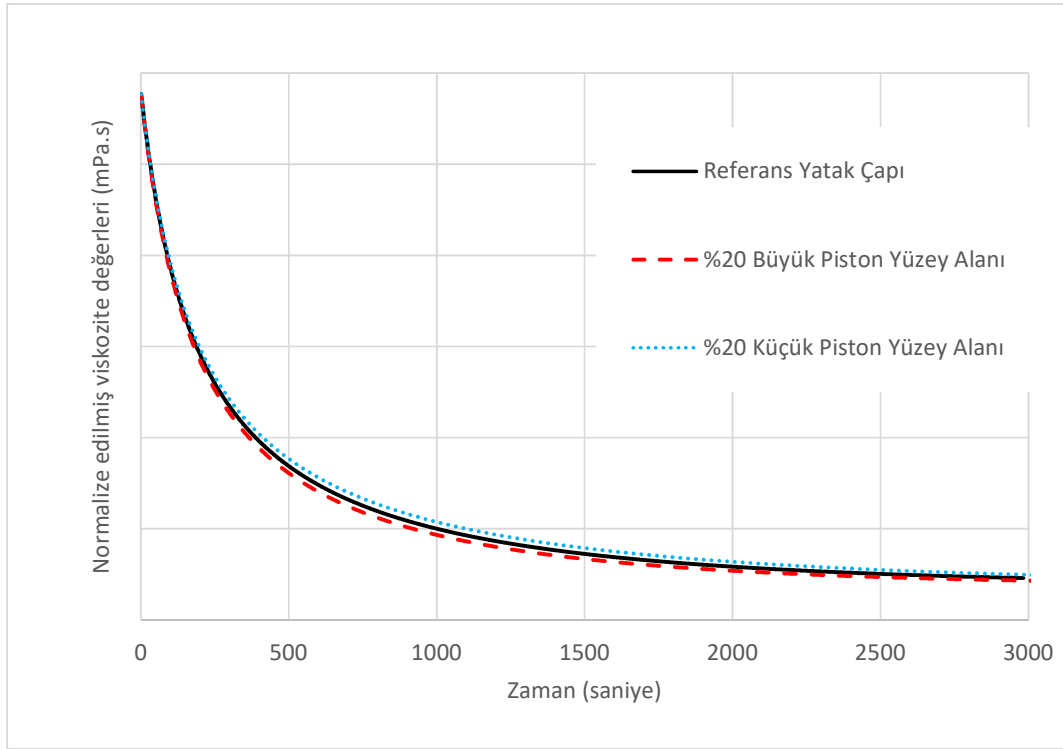
| Radyal açıklık | Referans radyal açıklık | %20 düşük radyal açıklık | %20 fazla radyal açıklık |
|----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| FMEP ~%        | Ref                     | +%6,7                    | -%7,9                    |

### 5.10 Piston Yağ Galerisi Boyutlarının Etkisinin İncelenmesi

Motor yağının ısınması üzerinde etkili olan bir diğer önemli parametre de piston yağ galerisi boyutlarıdır. Pistondan yağa geçen ısı da motordan motora değişmekle beraber önemli bir faktör olduğu için, yağ galerisi yüzey alanındaki değişiklikler motor yağı sıcaklıklarını doğrudan etkileyecektir. Bu kısımda piston yağ galerisi yüzey alanının %20 artırılması ve azaltılmasının etkileri irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre motor yağı sıcaklık ve viskozite eğrileri (Şekil 5.39 ve 5.40)'de yer almaktadır.



**Şekil 5.39** Farklı motor yağı piston yağ galerisi yüzey alanları için yağın ısınma eğrisi



**Şekil 5.40** Farklı motor yağı piston yüzey alanları için viskozite değerleri

Elde edilen sonuçlar FMEP değerleri bakımından kıyaslandığında ise yağ galerisi yüzey alanı %20 daha büyük olan motor için sürtünme değerleri %2,3 azalırken, %20 daha düşük yüzey alanı için bu oran %2,6 seviyesinde artmaktadır. (Tablo 5.9)

**Tablo 5.9** Farklı büyüklükteki piston yüzey alanları için yağ viskozite değerleri

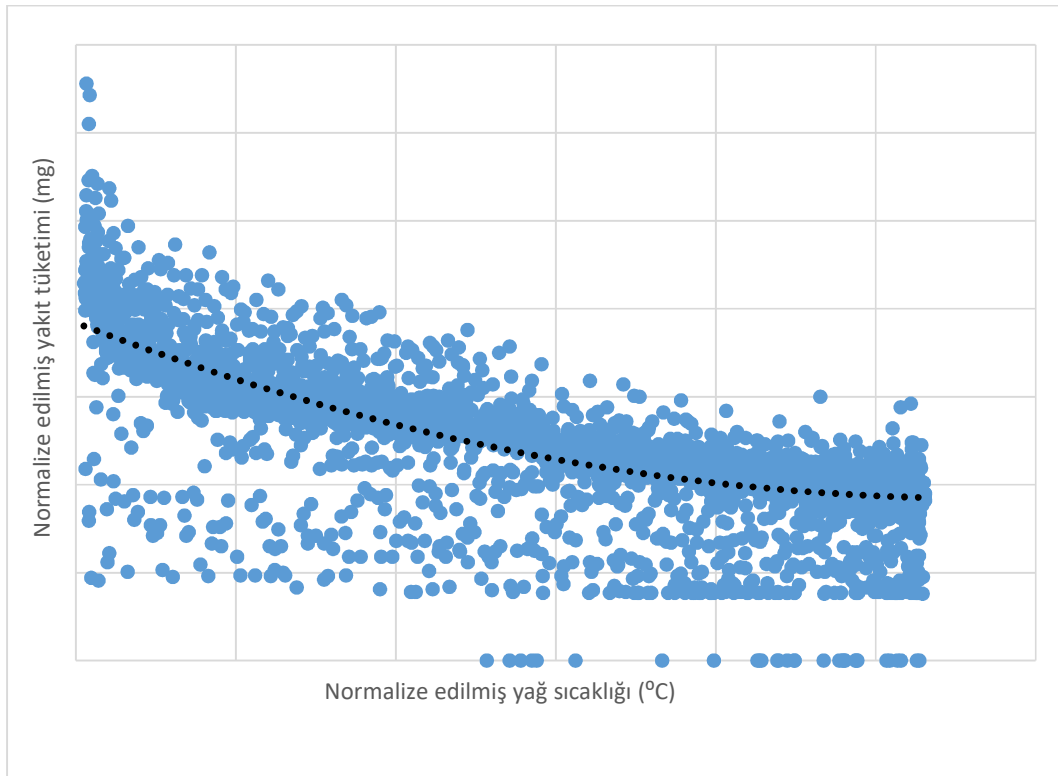
| Piston yüzey alanı | Referans piston yüzey alanı | %20 büyük yüzey alanı | %20 küçük yüzey alanı |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| FMEP ~%            | Ref                         | -%2,3                 | +%2,6                 |

### 5.11 Yağlama Sistemi Üzerinde Yapılan Geliştirmelerin Yakıt Tüketimi Üzerindeki Etkileri

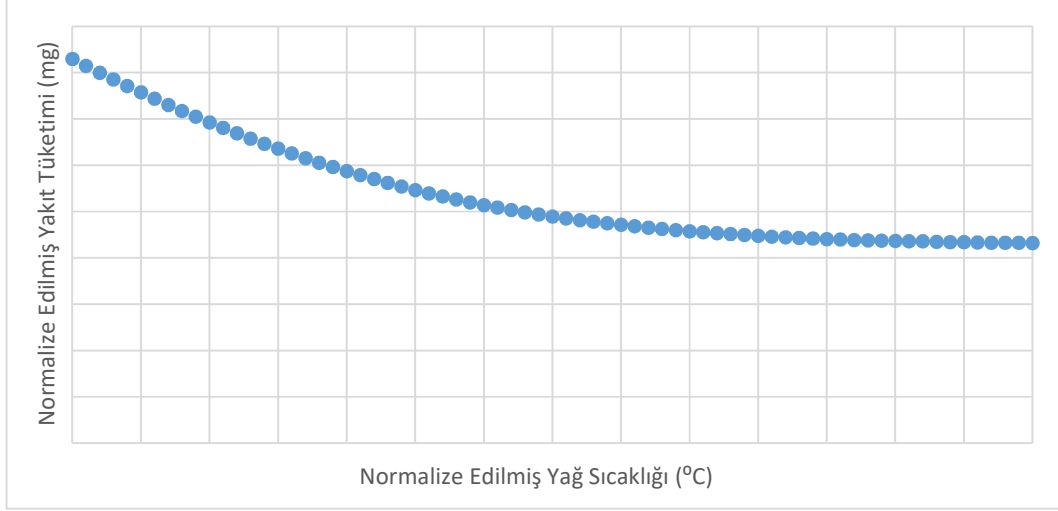
Motor yağı sıcaklığı ile yakıt tüketimi arasında dolaylı yoldan bir ilişki vardır. Yağ sıcaklığının yükselmesi ile yağ viskozitesi artar. Artan viskozite ile hidrodinamik yağlama rejimi içersinde kalmak koşuluyla motor sürtünmeleri azalır, azalan motor sürtünmeleri motor performans parametrelerinde iyileşmeye neden olur. Motor

performans parametrelerinden birincisi aynı yakıt tüketim değeri için sürtünmelerin azalması ile daha fazla güç, aynı güç değeri için daha az yakıt harcamı, veya motor verimliliğinin yükselmesi anlamına gelir. Dolayısı ile motorun soğuk çalışmasında harcanan yakıtın motor yağının ısınması ile aynı hız ve yük değerleri için giderek azalır ve rejim sıcaklığına ulaşıldığında en küçük değerini alması beklenir.

Bu amaçla yağın sıcaklığı ile yakıt tüketimi arasında bir ilişki kurmak için elektronik kontrol ünitesinden elde edilen verilerle her bir çevrim için püskürtülen ortalama yakıt değerleri kaydedilmiştir. (Şekil 5.41) Kaydedilen bu değerler yardımıyla kıyaslaması yapılacak olan farklı devir sayıları için yağ sıcaklığı yakıt tüketimi eğrileri oluşturulabilir. Oluşturulmuş olan eğriler Şekil 5.42’de yer almaktadır. Yakıt tüketim değerlerini yakınsayarak geçecek olan eğri denklemi için Matlab eğri uydurma tool’u kullanılmıştır. Sürtünme karşılıkları bakımından kıyaslanan yağlama sistem elemanları opsiyonları yakıt tüketimi bakımından da kıyaslanabilir.

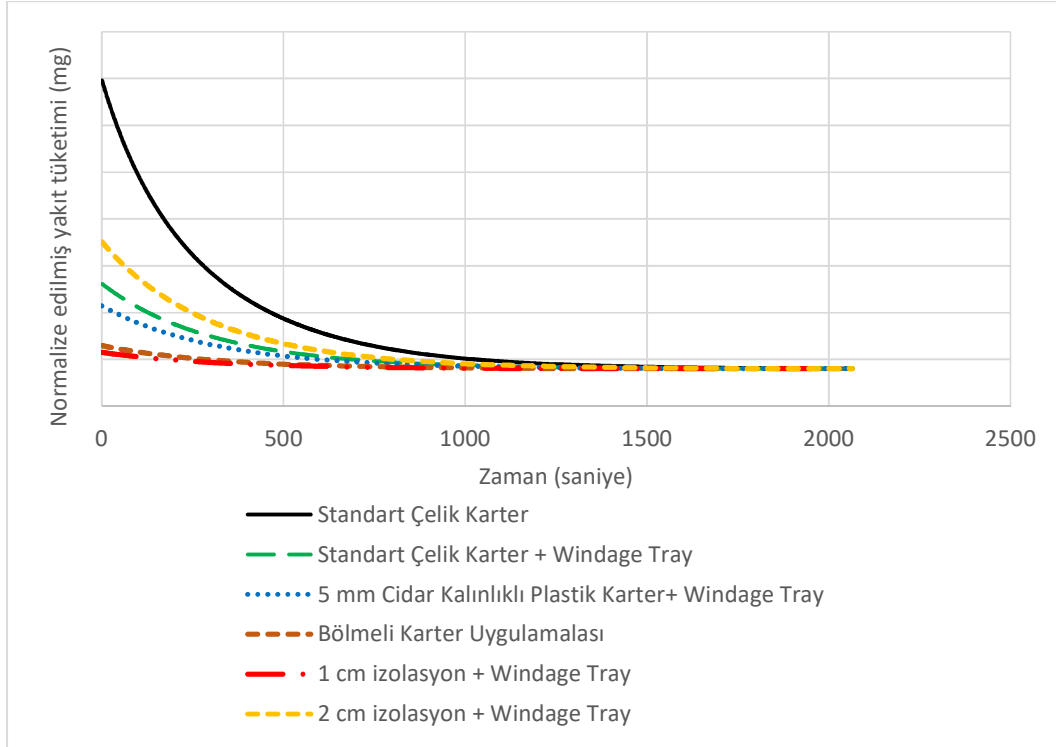


**Şekil 5.41** Referans sabit motor hızı ve yükü için yağ sıcaklığı ve yakıt tüketimi ECU ölçümleri



**Şekil 5.42** Referans sabit motor hızı ve yükü için yakıt tüketimi ve yağ sıcaklığı eğrisinin oluşturulması

Elde edilen eğri denklemi yardımıyla ilk kıyaslama farklı karter opsiyonları için yapılmıştır. Buna göre farklı karter opsiyonları için yakıt tüketim eğrileri Şekil 5.43’de yer aldığı gibidir.



**Şekil 5.43** Farklı karter opsiyonları için 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden başlatılan motorlar için yakıt tüketim değerleri

Bu bağlamda FMEP değerlerinde ve viskozite değerlerinde elde edilene paralel karakteristikte eğriler elde edildiği söylenebilir. Bunun yanında farklı karter opsiyonları için kümülatif yakıt tüketim değerleri referans sabit motor hızında ve 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden başlatma göz önünde bulundurulduğunda Tablo 5.10'da verilmiştir.

**Tablo 5.10** Farklı karter opsiyonları için 2 saatlik soğuma evresi sonunda yeniden başlatılan motorlar için kümülatif yakıt tüketimi yüzdesel farklar

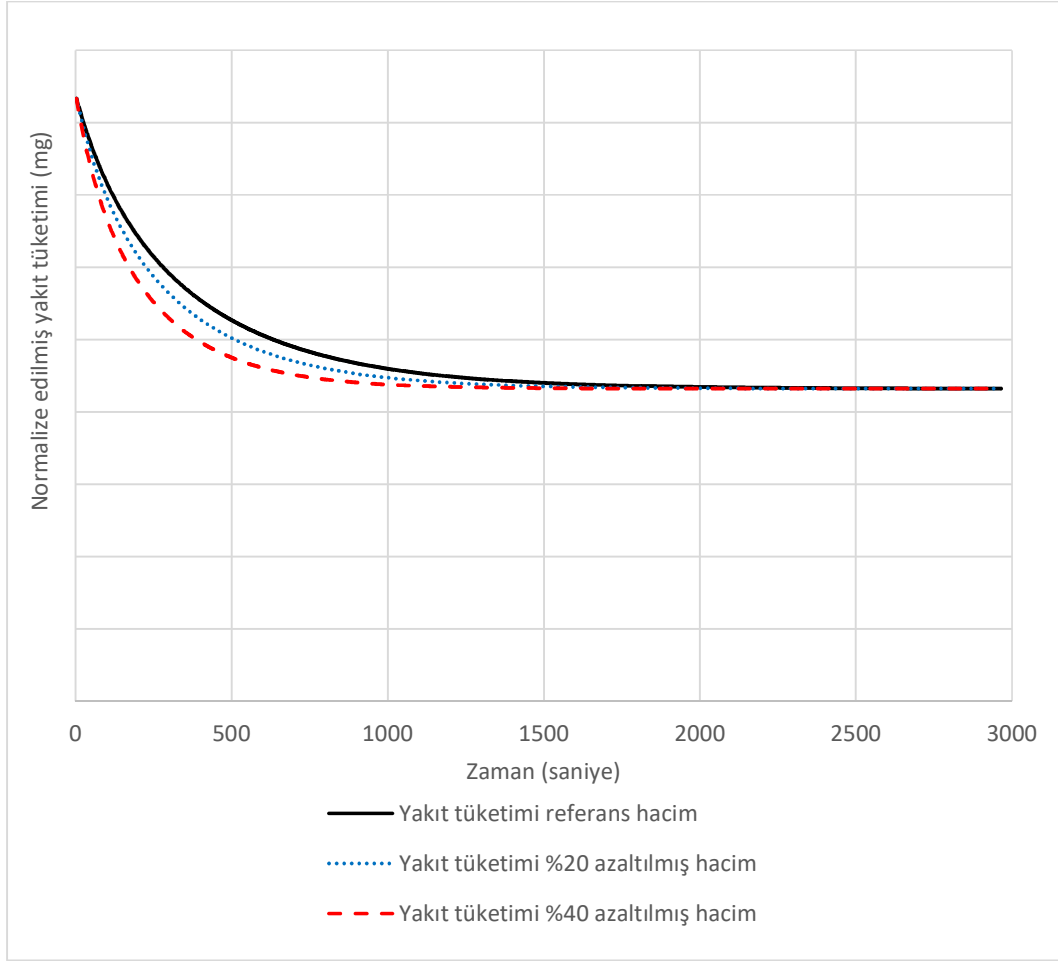
| Karter opsiyonu                                    | Yakıt Tasarrufu~% |
|----------------------------------------------------|-------------------|
| Standart çelik karter                              | Referans          |
| Standart çelik karter + windage tray               | %4,8              |
| 5 mm cidar kalınlıklı plastik karter+ windage tray | %5,4              |
| Bölmeli karter uygulaması                          | %6,5              |
| 1 cm izolasyon + windage tray                      | %6,7              |
| 2 cm izolasyon + windage tray                      | %3,7              |

Buna göre windage tray uygulamalı standart metal karter %4,8, bölmeli karter uygulaması %3,7, 5 mm cidar kalınlıklı ve windage tray uygulamalı plastik karter %5,4, 1 ve 2 cm kalınlıklı izolasyona sahip karter uygulamaları ise sırasıyla %6,5 ve %6,7'lik yakıt tasarrufları sağlamışlardır.

Bir diğer yakıt tüketimi kıyaslaması yağ miktarı için gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda motor yağının %20 azaltılması durumu için %2,06 %40 azaltılması durumu içinse %3,8'lik bir yakıt tasarrufu sağlandığı hesabı yapılmıştır.(Tablo 5.11) Farklı karter hacimleri için gerçekleştirilmiş olan yakıt tüketim değerleri aşağıdaki şekilde elde edilmiştir. (Şekil 5.44)

Bunların yanında motor ECU'sunda motor yağ hacminin %20 azaltılması ile kıyas oluşturması adına referans sabit motor hızı ve yükü için için yakıt tüketim değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar için yakıt tüketim kümülatif değer grafiği Şekil 5.45'de yer almaktadır. Buna göre elde edilen sonuçlar yakıt tüketimi değerleri

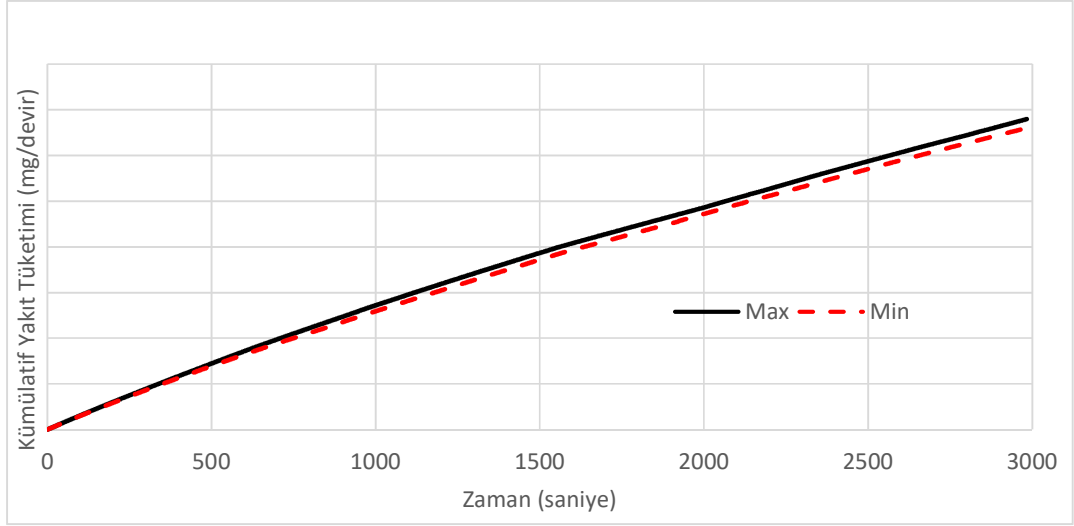
arasındaki farkın toplamda %2,6 seviyesinde olduğunu gösterir. Bunun yanında model yardımıyla elde edilen sıcaklık eğrilerinde 6°C maksimum seviyeye ulaşan sıcaklık farkları deneysel sonuçlarda 5,1 C° dolaylarındadır. Yakıt tüketimi ve sıcaklıklar arasındaki yakınlıklar modelin iyi bir yaklaşım ve kıyaslama metodu ortaya konmasında yeterliliğinin bir göstergesidir.



**Şekil 5.44** Farklı yağ hacimleri için yakıt tüketim eğrileri

**Tablo 5.11** Yakıt tüketim kıyaslamaları

| Yağ Hacmi                | Referans Yağ Hacmi | %20 Azaltılmış Yağ Hacmi | %40 Azaltılmış Yağ Hacmi |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Yakıt Tasarrufu~%</b> | Base               | %2,06                    | %3,8                     |



**Şekil 5.45** Referans hacim ve %20 azaltılmış hacim için deneysel kümülatif yakıt tüketim değerleri

## 6

## SONUÇ VE ÖNERİLER

---

Tez çalışması kapsamında yapılmış olan çalışmalar 3 grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi konu ile ilgili olan literatür çalışmalarının derlemesi ve konuya temel oluşturan bilgilerin derlenmesidir. İkinci kısım motor yağına soğuk ilk çalışmada geçen ısının matematiksel olarak modelinin oluşturulması ve bu modelin doğrulanmasıdır. Son kısım ise oluşturulan model ile yağlama sistemi üzerindeki değişikliklerin yağın ısınmasına etkisinin araştırılmasıdır.

Bu üç kısım baz alındığında elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddeler şeklinde özetlenebilir.

- Literatür taramasından elde edilen istatistiki sonuçların derlenmesi sonucu ortaya çıkan kanaat motorun soğuk başlangıç çalışması periyodunun özellikle binek taşıtlar için oldukça önemli bir yere sahip olduğudur. Bu konudaki kullanıcı eğilimleri 90'ların başında yapılan istatistiki çalışmalar ile günümüz çalışmaları kıyaslandığında paralellik gösterir.
- Literatür derlemesinde soğuk ilk çalışma ile ilgili çalışmaların sekiz farklı grupta toplandığı sonucuna varılmıştır. Bunlar; egzoz gazı ile ısıtma yöntemi, yağ tipinin etkisi, yağ miktarının etkisi, soğuma periyoduna etki eden yollar, yağ pompasının tipi, depolanan enerjinin kullanılması, çevresel şartlar, yağ soğutma sistemi optimizasyonudur.
- Yağın ısınma modelinin kurulması ve doğrulanması sırasında elde edilen en önemli sonuçlardan biri ana yatak sürtünmelerinin diğer etmenlere nazaran en önemli faktör olduğunun gözlemlenmesidir. Bu durum literatürdeki

alışmalar ile paralellik gösterir. Pistondan geçen ısı ile birlikte motor yağına soğuk süreçteki katının önemli bir bölümü sağlanmış olur.

- Doğrulama sürecinde 2L ve 13L motorda gözlemlenen deneysel sonuçlara göre motor devir sayısı ile yağın ısınması doğrudan ilişkilidir. Devir sayısı ile motor yağı ısınma hızı orantılıdır. Yanmanın olmadığı ve olduğu durumlarda bu orantı gözlemlenmiştir. Bunun yanında yanmanın varlığı önemli bir ısı kaynağıyken, yükün artması bu ısının katkısını devir sayısına göre daha az etkilemektedir.
- Karter içersinde soğumaya bırakılan motor yağı çalışması hem motordan bağımsız olarak karterde hem de motor üzerinde yapılmıştır. Elde edilen farklara bakıldığında motor stop edildikten sonra karter yağından dışarıya ısı transferinin en önemli yolu karter st yüzey alanıdır. Buradan dışarıya doğru iletilen ısı toplam transferin yaklaşık yarısını oluşturur. Bu durum karter geometrisi ve yağ miktarı/yüzey alanı oranlarına göre farklılık gösterebilir.
- Motor yağının ısınma eğrisi azalarak artan bir karakteristiğe sahiptir. Bunun temelde iki nedeni vardır. Birincisi motor yağı sıcaklık viskozite karakteristiğinden ileri gelmektedir. Yağ sıcaklığı arttıķa viskoziteler arası farklar azalacak, bu da sürtünmeleri ve dolayısı ile yağa geçen ısı oranını azaltacaktır. İkincisi ise yanmadan geçen ısı ile rejim sıcaklığına yaklaşıldıkça, bu bölge ile ısı transferlerinin sıcaklık farkları ile birlikte azalmasıdır.
- Deneysel sonuçlarda gözlemlenen bir diğer durum, motor yağ sıcaklığı ile soğutucu akışkan sıcaklıklarının rejim sıcaklığına ulaşılıncaya kadar oldukça yakın seyrettikleri ve bu soğuk süreçte sıcaklık farklarının ısı transferini ihmal ettirecek ölçüde küçük olduğudur. Bunun yanında yeni nesil motorların bazılarında rejim sıcaklığına ulaşılıncaya kadar motor soğutma modlnce by-pass edilir.
- Modelin doğrulanması sürecinde elde edilen bir diğer sonuç motorlarda sürtünmeden ve yanmadan geçen ısı oranlarının motor hacmi, yatak boyutları ve kullanım alanlarına göre farklılık gösterdiğidir. Bu çalışmada

kullanılan motorlardan 13L'lik motorda yağın ısınması üzerinde yanmanın varlığı daha büyük bir etken iken 2L'lik motor için bu oran daha düşüktür.

- Modelin doğrulanması sürecinde sırasıyla önce karterden geçen ısı motordan bağımsız, sonra motorda, yanmasız sürtünmeden geçen ısı sonrasında ise yanma durumu baz alınarak yapılmıştır. Yanmadan bağımsız yapılan testte sürtünmeden bloğa geçen ısı ve sürtünmeden yağa geçen ısı oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar soğuk çalışmanın başında yağa geçen ısı toplam sürtünmeden oluşan ısıнын %20 dolaylarında olduğu ve bu oranın rejim sıcaklığına ulaşıldığında %40 seviyelerine yükseldiğidir.
- Doğrulama ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bir diğer önemli sonuç ise karterden dışarıya doğru olan ısı transferinin yağa sürtünme ve yanma odası yolları ile giren ısıнын yanında oldukça küçük bir orana sahip olmasıdır. Bu nedenle karterden dışarıya olan ısı transferi motor şartları için düşürülse de bu soğuk çalışma periyodu için önemli bir katkı sağlamayacaktır. Dış ortam sıcaklığı soğuk seçilirse veya karter yüzeyinden araç şartlarında hava akışı olduğu göz önünde bulundurulursa; araç ve motor deneyleri için farklılık ortaya çıkabilir. Soğuk şartlarda ve araç hava akış koşullarında karter parametreleri önem kazanabilir.
- Kartardan dışarıya doğru olan ısı transferi motorun ilk çalışması evresinde oransal olarak düşük öneme sahip olsa da diğer çalışmacıların da özellikle izolasyon araştırmalarında bildirdiği gibi motorun duruşu esnasında önemli hale gelmektedir. Dolayısı ile duruş sırasında yağın soğumasının yavaşlatılması bir sonraki motor çalışmasına avantaj getirecektir. Karter geometrisi ile ilgili çalışmaların tamamında bu sürece önem verilmiştir.
- Karter cidar malzemesi, cidar kalınlığı, izolasyon malzemesi, bölmeli karter uygulaması, windage tray uygulaması gibi opsiyonlar kullanılarak üretilen karter modelleri için kıyaslamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 2 saatin sonundaki yağ sıcaklıkları 15 ila 39°C daha sıcak bulunmuştur. Bunun yanında ortam sıcaklığına ulaşmada 2 ila 10 saatlik bir gecikme sağlandığı gözlemlenmiştir. 2 saat sonunda yeninde çalışmaya başlandığında elde edilen FMEP kazançları referans çelik kartere göre; windage tray uygulaması için %10,5, bölmeli karter uygulaması için %7,6, 5mm kalınlıklı

plastik karter uygulaması için %12,5'dir. 1 ve 2 cm'lik izolasyon uygulamaları için sırasıyla %17,7 ve %19'luk FMEP düşüşü sağlanmış olur. Bu opsiyonlar için sağlanan yakıt tüketiminden tasarruflar ise %3,7 ile %6,7 arasında değişmektedir. Burada yakıt tasarruflarının IMEP/FMEP oranı arttıkça düşmesinin bekleneneği gözardı edilmemelidir. Dolayısı ile yakıt tasarrufu açısından net bir sonuç ortaya konması için bu oranlar için kesin sınırlar çizilmeli ve uluslararası çevrimler kullanılara araç testleri gerçekleştirilmelidir. Karter ağırlık durumları da gözetildiğinde 5 mm cidar kalınlığına sahip windage tray uygulamalı plastik karterin %43'lük ağırlık azaltma ve %12,5'lik ağırlık azaltma ve 2 saat sonunda sabit devirde yeninden başlatma koşulları için %5,4'lük yakıt ekonomisi katkıları ile en iyi çözüm olduğu gözlemlenmiştir.

- Karter opsiyonları ile ilgili bu kıyaslamalar motorun rejim sıcaklığında çalışması da gözetilerek henüz motorun geliştirme aşamasında değerlendirilmelidir. İyi bir optimizasyonun yapılmadığı durumlarda rejim sıcaklığındaki çalışma yağın yaptığı iş, soğutma kapasitesi gibi bakımlardan olumsuz etkilenebilir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde bölmeli karter uygulaması ve windage tray uygulaması rejim sıcaklığını olumsuz etkilemede teorikte sorun teşkil etmemektedir. Fakat izolasyon konuları ile cidar/malzeme değişiklikleri bu kapsamda motorun ilk geliştirme aşamalarında değerlendirilmelidir.
- Motor yağ tipi motor yağının ısınması ve sürtünmelerin azaltılması konusunda literatüre karşı zıtlık ve antitez oluşturmaktadır. Buna göre yüksek viskoziteli yağ seçimi motor yağının hızlı ısınmasını sağlarken, bu hızlı ısınmaya karşı motor sürtünmelerini iyileştirememektedir. Yapılmış olan kıyaslamalarda en yüksek viskozitedeki motor yağı daha ısınma evresi boyunca daha sıcak seyretmiş bu sıcaklık referans yağa göre yaklaşık 15°C ye kadar ulaşan bir fark oluşturmuştur. Bu daha sıcak olan ısınma evresine rağmen FMEP değeri standart motor yağına göre %20 daha fazladır. Bunun nedeni sürtünmenin iyi bir ısı kaynağı olması, fakat bunun yanında da bir olumsuzluk teşkil etmesidir.

- Yapılan araştırmalardan bir diğeri ise motor yağ hacmi üzerinedir. İlgili model yardımıyla yağ hacminin 2L motor için %20 azaltılması durumunda sıcaklık farklarının 6°C ye kadar ulaştığı, %40 azaltılması durumunda ise sıcaklık farklarının yaklaşık olarak 13°C'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Bu farklar FMEP değerlerini sırasıyla %4 ve %8,5 seviyesinde azaltmıştır. Bu durum yakıt tasarrufları bakımından kıyaslandığında sırasıyla %2,06 ve %3,8 seviyesindedir. Kıyaslamalar 13L'lik motor için gerçekleştirildiğinde ise referans ve sabit motor hızında FMEP azalmaları %20 yağ eksiltme için %5,6, %40 yağ eksiltme için %11,3'tür.
- 2L motorda ve referans sabit motor hızı ve yükü için yapılan denemelerde deneysel olarak referans yağ hacmi ve %20 azaltılmış yağ hacimleri kıyaslanmıştır. Elde edilen ECU değerlerine göre kümülatif yakıt tüketimleri arasındaki fark %2,6 azalma mertebelerindedir.
- Araştırmalardan elde edilen bir diğeri sonuç yağ miktarını azaltmanın aktif olarak yapılabilmesi için akıllı karter uygulamalarına ihtiyaç olduğudur. Doğrudan yağı azaltmak yağın ömrünü olumsuz etkileyeceğinden, yalnızca soğuk ilk çalışmada kısmi olarak yağın kullanımına olanak sağlayan tasarımlar kullanılmalıdır.
- Motor yağı zamanla eksileceğinden, düşük hacim denemelerinde elde edilen sonuçlar uyarınca motor yağının ilk doldurulduğu anda motorun soğuk çalışma performansı, yağın azalmasıyla pozitifte dönme eğilimi gösterir. Bu durum yağ eksilmesinin motor performansı ve ilk ısınma evresi için pozitif bir katkısı olduğu anlamına gelir.
- Yatak büyüklükleri üzerinde yapılan değişiklikler ilk olarak sürtünmeyi daha sonrada sürtünmenin ısınmaya verdiğı katkıyla yağın ısınması sürecini etkilemiştir. Elde edilen yağın ısınması ve FMEP kıyaslama sonuçları göstermektedir ki gerek radyal boşluklar, gerekse yatak çapı/genişliğı sürtünmeyi artıracak yönde değiştiriliyorsa yağın hızlı ısınmasına olanak tanısa bile toplam sürtünmeleri olumsuz etkilemektedir.
- Pistondan motor yağına ısı transferi sırasında piston yüzey alanının artırılması yağ debisi yeterli oranda sağlandığında ve ısı transfer katsayısı korunduğunda yağa geçen ısıyı artırmaktadır. Bu da doğrudan yağın soğuk

Çalışmada daha verimli bir sürece sahip olmasını sağlar. Bu durumun rejim sıcaklığı şartlarında soğutucu akışkan, yağ ve yanma odası arasındaki ısı transferi kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] H.J. Goetler, L.J. Vidger ve D.S. Majkrzak, "The Effect of Exhaust to Coolant Heat Transfer on Warm up Time and Fuel Consumption of two Automobile Engine," *SAE Technical Paper* No.860363, 1986.
- [2] M. Andre, "In Actual Use Car Testing 70000 Km and 10000 Trips by 55 French Cars Under Real Conditions," *SAE Technical Paper* No.910039, 1991.
- [3] G.E. Andrews, J.R. Harris ve A. Ouanzin, "I Engine warm-up: water and lubricating oil temperature influences," *SAE Technical Paper* No. 892103, 1989.
- [4] Z.Liu, A. Ivanco ve Z.S.Filipi, "Impacts of Real-World Driving and Driver Aggressiveness on Fuel Consumption of 48V Mild Hybrid Vehicle" *SAE Technical Paper* No. 2016-01-1166, 2016.
- [5] A. Evans, J. Cummings, M. Slocombe, F. Corvagli ve D. Stillwell, "National Travel Survey: England 2017,". *Statistical Relase of Department of Transport*, 2018.
- [6] F. Will ve A. Boretti, " A New Method to Warm Up Lubrication Oil to Improve the Fuel Efficiency During Cold Start," *SAE Technical Paper* No. 2011-01-0318, 2011.
- [7] K. Kunze, S. Wolff, I. Lade ve J. Tonhauser, "A systematic analysis of CO<sub>2</sub> Reduction by an Optimized Heat Supply during Vehicle Warm-up," *SAE Technical Paper* No. 2006-01-1450, 2006.
- [8] J.D. Trapy ve P. Damiral, "An Investigation of Lubricating System Warm-up for the Improvement of Cold Start Efficiency and Emissions of SI Automotive Engines," *SAE Technical Paper* No. 902089, 1990.
- [9] Y.K. Lee, J.I. Park ve J.H. Lee, "Analysis Of The Effect Of Cold Start On Fuel Economy Of Gasoline Automatic Transmission Vehicle," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 709–714, 2014.
- [10] J.H. Kim, T. Kim ve S.J. Park, "Effect of Engine Oil Heater Using EGR on the Fuel Economy and NO<sub>x</sub> Emission of Full Size Sedan During Cold Start," *SAE Technical Paper* No. 2016-01-0656, 2016.

- [11] C.N. Grimaldi, C. Poggiani ve A. Cimarello "An integrated Simulation Methodolgy of Thermal Management System for the CO<sub>2</sub> Reduction after Engine Cold Start," *SAE Technical Paper* No. 2015-01-0343, 2015.
- [12] W. Wenzel, I.G. Tabarez ve M. Becker, "Warm up Optimization by means of Exhaust Heat Recovery," *Development Thermal Management*, Volume 75, 2014.
- [13] S. Uppuluri, H.R. Kahalane, ve A. Naiknaware, "Evaluation of Exhaust Heat Recovery System Efectiveness in Engine Friction Reduction and Fuel Economy Improvement for Indian Hatchback," *SAE Technical Paper* No. 2017-01-0154, 2017.
- [14] A. Boretti ve S. Watkins, "Reduced Warm up and Recovery of Exhaust and Coolant Heat with a Single Loop Turbo Steamer Integrated with the Engine Arcitecture in a Hybrid Electrical Vehicle," *SAE Technical Paper* No. 2013-01-2827, 2013.
- [15] R.D. Burke,. C.J. Brace, J.G. Hawley ve I. Pegg, "Review of Systems Analysis of Interactions between the Thermal Lubricant and Combustion Process of Diesel Engines," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Volume: 224 issue: 5, pp: 681-704, 2016.
- [16] D. Di Battista ve R. Cipollone, "Improving Engine Oil Warm Up through Waste Heat Recovery," *Energies* Volume:11 Issue:1, 2018.
- [17] S. Rai, S. Arslan ve B. Jawad, "Exhaust Heat Recovery System Study in Internal Combustion Engines," *SAE Technical Paper* No. 2018-01-1374, 2018.
- [18] E. Andrews, M. Ounzain ve H. Li, "The Use of a Water/Lube Oil Heat Excahngerand Enhanced Cooling Water Heating to Increase Water and Lube Oil heating Rates in Passenger Cars for Reduced Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions During Cold Start," *SAE Technical Paper* No. 2007-01-2067, 2007.
- [19] J.P. Zammit, P.J. Shayler ve I. Pegg, "Thermal Coupling and Energy Flows Between Coolant Engine Structure and Lubricating Oil Engine Warm up," *ImechE/SAE INT Conf VTMS 10*, Paper C1305/053, 2011.
- [20] P. Revereaud, C. Rouaud ve A. Marchl, "Fuel Economy and Cabin Heating Improvement Thanks to Thermal Management Solution Installed a Diesel Hybrid Electric Vehicle," *SAE Technical Paper* No. 2010-01-0800, 2010.
- [21] J. Chisaki, K. Yozhijima ve T. Kikuchi, "Development of a New 2 Liter Fuel Efficient Diesel Engine," *SAE Technical Paper* No. 2013-01-0310, 2013.
- [22] T. Law, P. Shayler ve I. Pegg, "Investigations of sump design to improve the thermal management of oil temperature during engine warm up," Presented at *VTMS 8, Nottingham, UK*, 2007.
- [23] Ş.C. Çerkezoğlu, "Dizel motorun soğuk ilk çalışma durumunda motor yağ miktarının, yağ ısınma performansına ve yakıt tüketimi üzerine olan etkisinin incelenmesi," *Yüksek Lisans Tezi, ITU* 2015.
- [24] A. Muscio ve E. Materalli, "Potential of Thermal Engine Encapsulation on Automotive Diesel Engine," *SAE Technical Paper* No.2005-24-067, 2005.

- [25] E. Bent, P. Shayler ve A. La Rocca "The Effectiveness of Start Stop And Thermal Management Measures to Improve Fuel Economy," *VTMS 11, Coventry*, 2013.
- [26] R. Kamo, W. Bryzik ve M. Reid, "Coating for Improving Engine Performance," *SAE Technical Paper* No. 970204, 1997.
- [27] P.B. Salunkhe ve P. S. Shembekar, "A Review of Effect on Phase Change Material Encapsulation on the Thermal Performance of a System," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* pp. 5603–5616, 2012.
- [28] D. Fabian, L. Tommy, H. Jan, L.V. Jesko, R. Hermann ve G. Ulrich, "Thermo-Acoustic performance of full engine encapsulations –A numerical, experimental and psychoacoustic study." *Applied Acoustics*, 102 (2016) 79–87, 2016.
- [29] H. Völker "PU thermal engine encapsulation for better fuel economy and lower emissions," In: *Head of Technical Market Development, Automotive Specialties, Elastogran GmbH, Olching Trade Press Conference Ludwigshafen, Germany*, 2004.
- [30] B. Minovski, J. Andric, L. Löfdahl ve P. Gullberg, "A numerical investigation of thermal engine encapsulation concept for a passenger vehicle and its effect on fuel consumption," *Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering* 1–15, IMechE 2018.
- [31] S.B. Stouffer, A.B. Lewis, T.J. Whitney ve M.L. Drake, "Diesel cold start improvement using thermal management techniques," *University of Drayton Research Institute*; 2000.
- [32] P. Kumar, R. Mathai, S. Kumar, A. Kachkawa, A.K. Sehgal ve S. Praharaj, "Fuel Economy Benefit with Low Viscosity Engine Oil Formulations on Small Trucks with Chassis Dynamometer Test," *SAE Technical Paper* No. 2017-01-0888, 2017.
- [33] A. Michlberger, P. Morgan, E. Delbridge, M. Gieselman ve M. Kocsis, "Engine Fuel Economy Testing," *SAE Technical Paper* No. 2017-01-0882, 2017.
- [34] P. Carden, C. Pisani ve J. Anderson, "The Effect of Low Viscosity Oil on the Wear Friction and Fuel Consumption of Heavy Duty Truck Engine," *SAE Technical Paper* No. 2013-01-0331, 2013.
- [35] A. Permude, "Influence of Low Viscosity Lubricating Oils on Fuel Economy and Durability of Passenger Car Diesel Engine," *SAE Technical Paper* No. 2012-28-0010, 2012.
- [36] C. M. Engler, P.L. De Nadai ve E. Martins, "Analysis of Oil Sump Contamination with Ethanol in Flex Fuel Engines after Crank and Warm up," *SAE Technical Paper* No. 2009-36-0117, 2009.
- [37] P.J. Shayler, A.J. Allen ve D.K.W. Leong, "Characterising Lubricating Oil Viscosity to Describe Effects on Engine Friction," *SAE Technical Paper* No. 2007-01-1984, 2007.

- [38] W.W. Dam, P. Kleijwegt, M. Torreman ve G. Parsons, "The Lubricant Contribution to Improve Fuel Economy in Heavy Duty Diesel Engine" *SAE Technical Paper* No. 2009-01-2856, 2009.
- [39] K. Tanaka, K. Arase ve A. Kitayama "Development of Oil Cooled Engine for Optimization of Engine Cooling System," *SAE Technical Paper Series* No. 2016-32-0089, 2016.
- [40] A. Osman, A.M. Yusuf ve M. Rafi, "Vehicle Testing and Development Involving a Simplified Split Cooling with Integrated Exhaust Heat Recovery and Reuse," *SAE Technical Paper* No. 2016-01-0647, 2016.
- [41] Z. Kneba, "Possibilites of Car Engine Preheating Using Heat Storage Element," *Gdansk University of Technology, Mechanical Faculty, Poland*, F2010-B-079, 2010.
- [42] H. Li, G.E. Andrews, , G. Zhu, B. Daham, M. Bell, J. Tate ve K. Ropkins, "Impact of Ambient Temperatures on Exhaust Thermal Characteristic during Cold Start for Real World SI Car Urban Driving Test," *SAE Technical Paper* No. 2005-01-3896, 2005.
- [43] M. Rundo ve R. Squarcini, "Experimental Procedure for Measuring Energy Consumption of IC Engine Lubricating Pumps during NEDC Driving Cycle," *SAE Technical Paper* No. 2009-01-1919, 2009.
- [44] Y. Hori., "Hydrodynamic Lubrication e-Book", *Kanazava Institute of Technology Springer*, pp.2, 2005.
- [45] M.J. Plumley, V. Wong, M. Molewyk, ve S.Y. Park, "Optimizing Base Oil Viscosity Temperature Dependence For Power Cylinder Friction Reduction," *SAE Technical Paper* No. 2014-01-1658, 2014.
- [46] O. Deniz, "İçten Yanmalı Motorlar Ders Kitabı," *YTU, Makine Mühendisliği*, pp.27, 2008.
- [47] H. Blaxill, S. Reader, S. Mackay, B. Lerch ve J.Rueckauf, "Development of a Friction Optimized Engine" *SAE Technical Paper* No. 2009-01-1052, 2009.
- [48] W.F. Rohr, "Experimental and Theoretical Investigations of Lube Oil Performance and Engine Friction," *PhD Dissertations, University of Tennessee*, 2013.
- [49] J.M. Coles, D.P. Chang ve S. Zauscher, "Molecular mechanisms of aqueous boundary lubrication by mucinous glycoproteins," *Current Opinion in Colloid & Interface Science* Volume 15, Issue 6, Pages 406-416, 2010.
- [50] P.M. Lee, ve M. Priest, , "Influence of gasoline engine lubricant on tribological performance, fuel economy and emissions," *Internal Combustion Engines : Performance Fuel Economy and Emissions, London, 11- 12 IMechE, London. Chandos , Oxford*, pp. 235-246. ISBN 184334, 2007.
- [51] Anton Paar Website, "<https://wiki.anton-paar.com/en/basic-of-viscometry/>," (02/2019)
- [52] D. Wiswanath, D. Prasad, N. Dutt ve K. Rani "Viscosity of Liquids Theory, Estimation, Experiment, and Data," *Springer E-Book*, pp.139-309, 2007.

- [53] R. Nave, Hyperphysics Intellectual Properties, Georgia Statate University Website, "<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>" (05/2018)
- [54] T. G. Mezger, "The Rheology Handbook", 3rd revised Edition, *Vincentz Network, Hanover, Germany*, 2011.
- [55] J. Cuthbert, "Engine Friction and Wear Performances with Polyalkylene Glycol Engine Oils," *SAE Technical Paper* No. 2016-01-2277, 2016.
- [56] T. Shelby, "High Shear Rate Rheology of Lower Viscosity Engine Oils Over a Temperature Range of 80° to 150°C Using the Tapered Bearing Simulator (TBS) Viscometer," *SAE Technical Paper* No. 2010-01-2288, 2010.
- [57] Website "<http://www.masterlineworld.com/index.php/en/knowledgecenter.automotive-lubrication/engine-lubrication>" (03/2019)
- [58] Website "[www.ecstunning.com](http://www.ecstunning.com)" Volkswagen Jetta 1,8T Oil Pick up Pipe (03/2019)
- [59] P. Antonioli, R. Ruotolo, M. Rimondi ve D. Lomario, "CAE-Based Approach for Oil Pan NVH Optimization of Compact Automotive Diesel Engines," *SAE Technical Paper* No. 2011-01-0934, 2011.
- [60] Y.A. Levendis, "Design and Testing of a Novel Environmentally- Benign Automotive Oil Filter," *SAE Technical Paper* No. 2010-01-0272, 2010.
- [61] SAE Technical Standart Performance, "SAE International in United States Application Testing of Oil-to-Water Oil Coolers for Heat Transfer," 2010.
- [62] D. Staley, B. Pryor ve K. Gilgenbach, "Adaptation of a Variable Displacement Vane *Pump* to Engine Lube Oil Applications," *SAE Technical Paper* No. 2007-01-1567, 2007.
- [63] A. Honda, M. Murakami ve Y. Kimura "Research into Engine Friction Reduction under Cold Conditions – Effect of Reducing Oil Leakage on Bearing Friction," *SAE Technical Paper* No. 2011-01-1662, 2011.
- [64] L. Jarrier, P. Gyan ve J.C. Champoussin, "Thermo-Hydraulic Oil Loop Modelling for ICE Warm up Investigation" *SAE Technical Paper* No. 2002-01-2197, 2002.
- [65] P.J. Shayler ve S.J. Christian, "A model for the Investigation of Temperature Heat Flow and Friction Characteristics During Engine Warm up," *SAE Technical Paper* No. 931153, 1993
- [66] J. Larrier, J.C. Champouissin, R. Yu ve D. Gentile, "Warm up D.I. Diesel Engine: Experimental and Modelling" *SAE Technical Paper* No. 2000-01-0299, 2000.
- [67] A.A. Raimondi, ve J. Boyd, "A solution for the Finite Journal Bearing and its Application to Analysis and Design," *I, II, and III. ASLE Transactions*, Vol 1. No. 1, pp. 154-209, 1958.
- [68] M. Fenton, "Flow and Heat Transfer Modeling of an Automotive Engine Lubrication System," *Phd. Thesis, University of Warwick*, 1994.
- [69] J. Zammit, P. Shayler ve R. Gardiner, "Intvestigating the Potential to Reduce Cranckshaft Main Bearing Friction During Engine Warm-up by Rasing Oil Feed Temperature" *SAE Technical Paper* No. 2012-01-1216, 2012

- [70] D.K.W. Leong, P.J. Shayler, Pegg I.G. ve M. Murphy, "Characterizing the effect of viscosity on friction in the piston assembly of internal combustion engines," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol 221, Issue 4, 2007.
- [71] Website " <http://www.viscopedia.com/>," (04/2017)
- [72] A. Roberts, R. Brooks ve P. Shipway, " Internal combustion engine cold- start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions." *Energy Conversion and Management* No. 82 (2014) 327–350, 2014.
- [73] P.J. Shayler, W.S. Baylis ve M. Murphy, "Main bearing friction and thermalinteraction during the early seconds of cold engine operation." *Presented at ASME 2002 internal combustion engine division fall technical conference, New Orleans, USA*, 2002.
- [74] G.E. Andrews, J.R. Harris ve A. Ounzain, "Transient heating and emissions of an SI engine during the warm-up period," *SAE Technical Paper* No. 880264, 1988.
- [75] B. Sangeorzan, E. Barber ve B. Hinds, "Development of a One-Dimensional Engine Thermal Management Model to Predict Piston and Oil Temperature," *SAE Technical Paper* No. 2011-01-0647, 2011.
- [76] X. Deng, J. Lei, J. Wen, Z. Wen ve L. Shen, "Numerical investigation on the oscillating flow and uneven heat transfer processes of the cooling oil inside a piston gallery," *Applied Thermal Engineering*, Volume 126, Pages 139-150, 2017.
- [77] A. Veshagh, ve C. Chen, "A Computer Model for Thermofluid Analysis of Engine Warm-Up Process," *SAE Technical Paper* No. 931157, 1993
- [78] S.V. Bohac, D.M. Baker ve D.N. Assanis, "A Global Model for Steady State and Transient S.I. Engine Heat Transfer Studies," *SAE Technical Paper* No. 960073, 1996.
- [79] G. Sitkei, "Heat Transfer and Thermal Loading in Internal Combustion Engines," *Akademai Kiado Book, Budapest* Chapter 3 (p:77-104), pp. 85;93;96,1974
- [80] F.P. Incropera, ve D.P. Witt, "Fundamental of Heat and Mass Transfer," *Translation Book from 4th Edition, Literatür Yayınları*, pp.521-530, 2006.
- [81] D. Di Battista, R. Cipollone, ve F. Fatigati, "Engine oil Thermal Management: Oil Sump Volume Modification and Heating by Exhaust Heat During ICE Warm Up," *SAE Technical Paper* No. 2018-01-1366, 2018.
- [82] A. Kolekar, M. Anderson, D. Nash, R. Hegde ve M. Puckett, "New Generation Oil Pan Modules," *SAE Technical Paper* No. 2009, 01-0346, 2009.

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

İletişim Bilgisi: ysfkrtl@gmail.com

### Makaleler

1. Kartal Y. ve Isin O., "Numerical Investigation On Oil Pan Design Parameters to Improve Engine Performance During Oil Cool Down And Warm Up Periods," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 465–475, June 2019.

### Konferans Bildirileri

1. Isin O., Kartal Y. ve Galata S., "Soğuk Çalışma Periyodunda Motor Performansının İyileştirilmesi İçin Yağlama Sistemindeki Çözüm Potansiyelleri Üzerine Bir Derleme," *9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON*, Bursa, Türkiye, pp.1208-1218, 7-8 Mayıs 2018.