



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAĞ FİLMİ KAYNAKLI HC EMİSYONLARININ  
MATEMATİK MODELLENMESİ**

**Seçkin YENİCE**

Doç. Dr. M. İhsan KARAMANGİL  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2011  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Seçkin YENİCE tarafından hazırlanan “Yağ Filmi Kaynaklı HC Emisyonlarının Matematik Modellenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

**Başkan :** Doç. Dr. M. İhsan KARAMANGİL  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye :** Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye :** Prof. Dr. Atakan AVCI  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
**Enstitü Müdürü**  
.../.../2011

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**10/10/2011**

**İmza**

**Seçkin YENİCE**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YAĞ FİLMİ KAYNAKLI HC EMİSYONLARININ MATEMATİK MODELLENMESİ

**Seçkin YENİCE**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Silindir gömleği üzerindeki yağ filmi motor çıkış HC emisyonlarının ana kaynaklarından biri olarak bilinmektedir. Bu çalışmada içten yanmalı buji ateşlemeli benzin motorlarında farklı yakıtlar için yağ filminden kaynaklanan hidrokarbonların oluşum mekanizması üzerine bir matematik model geliştirilmiştir. İlk olarak, silindir içi gazlarının termodinamik özellikleri (basınç, sıcaklık, ısı taşınım katsayısı vs.) bir çevrim boyunca hesaplanmıştır. Daha sonra, Henry ve difüzyon kanunlarını kullanarak, yakıtın yağ filmi içine kütleli emilme/salınma hızının etkisi, farklı yakıtlar için ( Izo-oktan, metanol, etanol, LPG ve doğal gaz) motor devrine, sıkıştırma oranına, giriş basıncına, hava fazlalık katsayısına göre incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yağ filmi, Henry kanunu, difüzyon katsayısı

2011, xii+98 sayfa.

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **MATHEMATICAL MODELING OF HC EMISSIONS FROM OIL FILM**

**Seçkin YENİCE**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. M. İhsan KARAMANGİL

Oil film on cylinder liner has been suggested as a major of engine out hydrocarbon emissions. In this study, a mathematical modeling for the rate of absorption /desorption of different fuels in the oil film has been developed. First of all, the thermodynamic properties of the cylinder gases (pressure, temperature, convection of heat etc.) for different fuels have been calculated through a cycle. Then, using Henry and diffusion laws, the effect of the rate of absorption/desorption of different fuels has been investigated depending on engine speed, compression ratio, excess air coefficient, initial pressure.

**Key Words:** Oil film, Henry's law, diffusion coefficient

2011, xii + 98 pages.

## TEŞEKKÜR

İlk önce, verdiği fikirler ve yaptığı yardım ve katkılarından dolayı kıymetli hocam, danışmanım Doç. Dr. M. İhsan KARAMANGİL' e çok teşekkür ediyorum.

Programın çalıştırılmasında altından kalkamadığımız problemleri aşmamızda yardımcı olan hocam Yrd. Doç. Dr. Erol SOLMAZ' a teşekkürlerimi bir borç biliyorum.

Son derece misafirperver olan arkadaşlarım Serkan ULAŐAN, Emre ÇALIŐKAN, Egemen AKGÜL ve Mete KOCA' ya verdikleri maddi ve manevi desteklerinden dolayı minnettarım.

Son olarak da, gösterdikleri sabır ve destekten dolayı sevgili annem, babam ve ağabeyime çok teşekkür ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	3
2.1. Yağ Filminin Kalınlığının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar .....	3
2.2. Yağ Filminin HC Depolaması ile İlgili Çalışmalar .....	7
2.3. Yağ Filmini İçerisindeki Yakıtın Oksitlenmesi ve Diğer Kaynakları İçeren Çalışmalar .....	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	14
3.1. Hidrokarbon (HC) Mekanizmaları .....	14
3.1.1. Yanmamış hidrokarbonların kaynakları .....	14
3.1.2. Silindir içinde oksitlenme ve alıkonulma .....	24
3.1.2.1. Silindir içinde oksitlenme .....	24
3.1.2.2. Hidrokarbon alıkoyma .....	26
3.1.3. HC Taşınım Mekanizmaları .....	26
3.2. Matematik – Çevrim Modeli .....	31
3.2.1. Termodinamik Model .....	31
3.2.1.1. Motorun geometrik özellikleri .....	34
3.2.1.2. Yakıt tipinin volumetrik verime etkisi .....	36
3.2.1.3. Yanma stokyometrisi .....	38
3.2.1.4. Yanan yakıt miktarının hesaplanması .....	41
3.2.1.5. Silindir içi ısı taşınım katsayısının hesabı .....	41
3.2.1.6. Silindir içi gazlarının $c_p$ , $\mu$ ve $M_A$ değerlerinin hesabı .....	42
3.2.1.7. Cidara olan ısı transferinin hesabı .....	43
3.2.1.8. Silindir içi duvar sıcaklığının hesabı .....	44
3.2.1.9. Reaksiyona giren ve çıkan ürünlerin mol sayıları ve molar konsantrasyonlarının hesabı .....	45
3.2.2. Yağ filmi kaynaklı HC oluşum mekanizmalarının modellenmesi .....	47
3.2.2.1. Difüzyon eşitliği .....	50
3.2.2.2. Silindir içi yakıt miktarının hesabı .....	59
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	61
5. SONUÇ .....	87
KAYNAKLAR .....	89
EKLER .....	91
EK 1 Yakıtların Buharlaştırma Entalpisi .....	92
EK 2 Izo-oktan Yakıtı için Yakıt Buharının Soğutma Etkisi Hesabı .....	93
EK 3 Karışımı Oluşturan Bileşenlerin $c_p$ ve $\mu$ Değerlerinin Hesabı .....	94
EK 4 Silindir İçerisindeki Gazların Moleküler Ağırlıklarının KMA'na Göre Değişimi .....	96
EK 5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması .....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A$	Yüzey alanı
$A_{piston}$	Piston başı yüzey alanı
$C_1, C_2$	Woschni katsayıları
$c_p$	Silindir içi gazların sabit basınçtaki özgül ısıları
$c_v$	Silindir içi gazların sabit hacimdeki özgül ısıları
$c, h, o$	Yakıt bileşeninde bulunan karbon, hidrojen ve oksijen sayıları
$c_i$	x doğrultusunda her bir noktanın konsantrasyonu
$c_{ort}$	Ortalama konsantrasyon değeri
$D$	Yağ içine giren yakıt buharı için difüzyon katsayısı, silindir çapı
$f_{kalçev,i}$	Oksitlenmeden kaçan hidrokarbon miktarının silindir içinde kalabilen kesri
$f_{oksegoz,i}$	Silindir dışına çıkan hidrokarbonların egzozda oksitlenen kesri
$f_s$	Yakıt akışı parçalanma katsayısı
$H$	Henry kanunu sabiti, strok uzunluğu
$H_u$	Yakıtın ısı değeri
$h$	Isı transfer katsayısı
$h_c$	Cidar tarafındaki ısı taşınım katsayısı
$k$	İzantropik üs katsayısı
$l$	Biyel kolu uzunluğu
$M$	Moleküler ağırlık
$M_A$	Gaz karışımının moleküler ağırlığı
$M_{dolgu,0}$	Gaz halindeki toplam kütlelerin moleküler ağırlığı
$M_{mix}$	Gaz karışımının moleküler ağırlığı
$M_o$	Yağın moleküler ağırlığı
$m$	Gaz karışımının kütlesi
$m_{att}$	Atık gaz kütlesi
$m_{dolgu,0}$	Dolgu kütlesi (yakıt+hava+atık gaz) (kg)
$m_{krsm}$	Karışımın kütlesi
$m_{HC,i}$	i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarı
$m_{HC,motor-c}$	Motor çıkışında bir çevrimde neşredilen HC miktarı
$m_{h,gercek}$	Havanın gerçek kütlesi
$m_{y,gercek}$	Yakıtın gerçek kütlesi
$m_y$	Silindir içine bir çevrimde emilen toplam yakıt miktarı
$m_{yak}$	Yakıt kütlesi
$m_{yak(g)}$	Gaz halindeki yakıtın kütlesi



$m_{yak(s)}$	Sıvı yakıtın kütlesi
$m_{yağ}$	Silindir cidarı üzerinde strok boyunca oluşan yağ kütlesi
$m_{y,yağ}$	Yağ filmi tarafından emilen yakıt miktarı
$m_{y,sil}$	Silindir içerisine alınan yakıt kütlesi
$N$	Silindir içindeki farklı gaz bileşenlerinin sayısı
$n$	Motor devri(d/dk)
$n_i$	Her bir bileşenin sayısı
$n_{doğu0}$	(Yakıt+hava+atık gaz) toplam mol sayıları
$n_{yak,sil}$	Silindir içindeki yakıtın mol sayısı
$n_{yak,yag}$	Yağ içinde çözülmüş yakıtın mol sayısı
$n_{y,sil0}$	Reaksiyona giren yakıtın başlangıçtaki mol sayısı
$n_{y,yanan}$	Yanan yakıtın mol sayısı
$n_{yag}$	Yağın mol sayısı
$Nu$	Nusselt sayısı
$O_{min}$	Yanma için gerekli minimum oksijen miktarı
$p_2$	Silindir gazlarındaki yakıtın kısmi basıncı
$p_{me}$	Mekanik basınç
$p_m$	Motorun bir elektrik motoru ile döndürülmesiyle yanma olmadan p ile aynı krank açısında silindir içinde oluşan basınç değeri
$p_r$	Atık gaz basıncı(kPa)
$p_{yakit,gaz}$	Yakıtın kısmi basıncı
$Q$	Yakıtla verilen enerji
$Q_{kay}$	Kayıp enerji
$Q_{yak}$	Yakıt enerjisi
$Q_{yak,top}$	Toplam yakıt enerjisi
$R$	Krank yarıçapı
$\bar{R}$	Üniversal gaz sabiti
$R_{coolant}$	Soğutucu su tarafındaki ısı direnç
$R_{gas}$	Gaz tarafındaki ısı direnç
$R_{wall}$	Silindir duvarındaki ısı direnç
$Re$	Reynolds sayısı
$s$	Krank mili eksenini ile piston pim eksenini arasındaki mesafe
$T$	Sıcaklık (K)
$T_o$	Yağ filmi sıcaklığı
$T_d$	Anlık ortalama duvar sıcaklığı (K)
$T_g$	Silindir içi gaz sıcaklığı (K)
$T_r$	Atık gaz sıcaklığı(K)
$T_{soğ,su}$	Soğutma suyu sıcaklığı (K)

$T_w$	Silindir duvar sıcaklığı (K)
$T_{w,c}$	Soğutma suyu tarafındaki cidar sıcaklığı (K)
$T_{wall}$	Gaz tarafındaki cidar sıcaklığı
$T_{yağ}$	Yağ sıcaklığı (K)
$t$	Zaman
$U$	Toplam iç enerji
$U_p$	Ortalama piston hızı
$V$	Silindir hacmi(m <sup>3</sup> )
$V_c$	Kompresyon hacmi
$V_d$	Strok hacmi
$V_h$	Strok hacmi
$V_m$	Yakıtların molar hacmi
$V_r$	Referans hacim
$W$	İş
$w$	Silindir içindeki yerel ortalama gaz hızı, krank mili açısal hızı(rad/s)
$x$	Yağ filminden silindir cidarına doğru olan mesafe, Yakıtın buharlaşma yüzdesi
$x_2$	Yağ içindeki yakıtın molar oranı
$x_r$	Atık gaz oranı
$x_{yakit,yag}$	Yağ filmi içerisine emilen yakıtın mol kesri
$x_{yak}$	Yağ içinde çözünen yakıtın mol kesri
$x_b$	Wiebe fonksiyonuna göre yanan yakıt kesri
$Y_2$	Gaz karışımı içindeki yakıtın molar oranı
$Y_m$	Gaz fazındaki yakıtın kütleli oranı
$\eta_v$	Genel volumetrik verim
$\eta_{v1}$	Yakıt buharının havanın bir kısmının yerini almasının volumetrik verim ifadesi
$\eta_{v2}$	Yakıt buharının soğutma etkisinin volumetrik verim ifadesi
$\eta_{v3}$	Statik etkilerin volumetrik verim ifadesi
$\tau_d$	Difüzyon zaman sabiti
$\delta$	Yağ filmi kalınlığı
$\phi$	Yakıt fazlalık katsayısı – Yakıt/Hava oranı
$\lambda$	Hava fazlalık katsayısı
$\theta$	Krank açısı değeri
$\theta_s$	Üst ölü noktadan itibaren ölçülen açısal krank dönme miktarı
$\Delta\theta$	Yanma uzunluğu
$\Delta H_{vap}$	Buharlaşma entalpisi
$\varepsilon$	Motorun sıkıştırma oranı
$\rho_{h,giris}$	Havanın girişteki yoğunluğu

$\rho_o$	Yağın yoğunluğu
$\rho_{yak}$	Yakıt yoğunluğu
$\rho_{krsm}$	Karışımın yoğunluğu
$\mu$	Silindir içi gazların viskozitesi
$\mu_o$	Yağ viskozitesi
$\gamma$	Denklem uygunluk ve kararlılık şartı katsayısı

## Kısaltmalar

## Açıklama

AÖN	Alt ölü nokta
CO <sub>2</sub>	Karbondiyoksit
CH <sub>3</sub> OH	Metanol
CH <sub>4</sub>	Metan
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol
C <sub>3,7</sub> H <sub>9,4</sub>	LPG
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Izo-oktan
DELYAGIR	Her bir derecelik ilerlemede yağ filmi tarafından emilen yakıt miktarı
DSALHC	Her bir derecelik ilerlemede yağ filmi tarafından salınan yakıt miktarı
EMHCTOP	Herhangi bir krank açısında yağ filmince emilen toplam yakıt miktarı
ETNL	Etanol
H <sub>2</sub> O	Su
HFK	Hava fazlalık katsayısı
IO	Izo-oktan
KMA	Krank mili açısı
MTN	Metan
MTNL	Metanol
MYAKSIL	0-335 derece arası silindir içinde bulunan yakıt miktarı
MYAK0	Tek bir silindir içine alınan toplam yakıt miktarı
MYANTETA	Herhangi bir krank açısına kadar silindir içinde yanan toplam yakıt miktarı
MYKAL	470 dereceden sonra silindir içinde kalan yakıt
MYSILYS	335-720 derece arası silindir içinde bulunan yakıt miktarı
N <sub>2</sub>	Azot
stok-oran	Stokiyometrik oran
TTY	Teorik tam yanma
ÜÖN	Üst ölü nokta

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Yanma odası içerisindeki aralık ve boşluk bölgeleri.....	16
Şekil 3.2. İnce yağ filmi içine yakıtın emilmesi ve salınması .....	18
Şekil 3.3. Farklı yağlama yağları için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Henry sabitinin deneysel verileri .....	21
Şekil 3.4. Egzoz HC emisyonları ile yağ sarfiyatı arasındaki ilişki. Normal imal edilmiş piston-segman grubu ve özel imal edilmiş sızdırmaz piston-segman grubu.....	22
Şekil 3.5. Egzoz işlemi süresince egzoz supabından geçen HC kütleli debisindeki ve HC konsantrasyonlarındaki değişim .....	27
Şekil 3.6. Silindir cidarı üzerindeki yağ filminden salınan ve segman boşluk bölgelerinden çıkıp silindiri terk eden hidrokarbonların akış işlemlerinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.7. Her silindire giren benzin yakıtı için komple akış diyagramı.....	30
Şekil 3.8. Yanma odası için kapalı sistem sınırı .....	32
Şekil 3.9. Silindir, piston, biyel ve krank geometrisi. D: çap, H: strok, l: biyel kolu uzunluğu, R: krank yarıçapı, $\theta$ : krank açısı.....	35
Şekil 3.10. 1500 d/dak da ve $p_{me}=15$ bar da çalışan bir motorun silindir duvar sıcaklığının dağılımı.....	45
Şekil 3.11. Her silindire her çevrimde giren yakıt için şematik akış diyagramı.....	49
Şekil 3.12. Yağ filmi boyunca oluşturulan gridlerin şematik gösterimi .....	53
Şekil 3.13. 3 farklı yağlama yağı içinde çözünen izo-oktan için $H^*$ 'ın yağ sıcaklığı ile değişimi .....	55
Şekil 3.14. Metanol ve izo-oktan yakıtlarının Henry sabiti değerlerinin sıcaklığa göre değişimi.....	56
Şekil 3.15. Farklı yakıtların Henry sabitlerinin sıcaklığa bağlı değişimi .....	57
Şekil 4.1. 5 Farklı yakıt için literatürdeki KMA-Basınç değişimi grafikleri.....	61
Şekil 4.2. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimi.....	63
Şekil 4.3. Farklı yakıtlar için yakıttan verilen enerjinin yanma süresince KMA' na göre değişimi .....	64
Şekil 4.4. Farklı yakıtlar için enerji kayıplarının yanma süresince KMA' na göre değişimi.....	64
Şekil 4.5 Farklı yakıtlar için net enerjinin yanma süresince KMA' na göre değişimi....	64
Şekil 4.6. İzo-oktan yakıtı için bu çalışmadaki modelde hesaplanan basınç değerleri ile daha önce literatürde hesaplanmış basınç değerlerinin karşılaştırılması .....	65
Şekil 4.7. 5 Farklı yakıt için literatürdeki KMA-Sıcaklık değişimi grafikleri.....	66
Şekil 4.8. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi sıcaklık değişimi....	66
Şekil 4.9. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi ısı taşınım katsayısının değişimi.....	66
9	
Şekil 4.10. Bir çevrim boyunca silindir içerisindeki yakıt miktarları.....	70
Şekil 4.11. Yağ filmi tarafından emilen HC miktarının farklı yakıtlar için KMA' na göre değişimi .....	71
Şekil 4.12. Yağ filmince salınan HC miktarının farklı yakıtlar için KMA' na göre değişimi.....	72

<b>Şekil 4.13.</b> Izo-oktan yakıtının devir sayısına bağlı yağ filmince emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi .....	73
<b>Şekil 4.14.</b> Izo-oktan yakıtının devir sayısına bağlı yağ filmince salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi .....	73
<b>Şekil 4.15.</b> Farklı yakıtların 1000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filmince emilen HC miktarının değişimi.....	74
<b>Şekil 4.16.</b> Farklı yakıtların 3000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filmince emilen HC miktarının değişimi.....	74
<b>Şekil 4.17.</b> Farklı yakıtların 1000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filminden salınan HC miktarının değişimi.....	75
<b>Şekil 4.18.</b> Farklı yakıtların 3000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filminden salınan HC miktarının değişimi.....	75
<b>Şekil 4.19.</b> Metanol yakıtının motor sıkıştırma oranına bağlı yağ filmince emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi.....	76
<b>Şekil 4.20.</b> Metanol yakıtının motor sıkıştırma oranına bağlı yağ filmince salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi.....	77
<b>Şekil 4.21.</b> Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 7' de KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	77
<b>Şekil 4.22.</b> Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 10 da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	78
<b>Şekil 4.23.</b> Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 7 de KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi .....	78
<b>Şekil 4.24.</b> Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 10 da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi .....	79
<b>Şekil 4.25.</b> Etanol yakıtının hava giriş basıncına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi .....	80
<b>Şekil 4.26.</b> Etanol yakıtının hava giriş basıncına bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi.....	80
<b>Şekil 4.27.</b> Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,6 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	81
<b>Şekil 4.28.</b> Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,8 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	81
<b>Şekil 4.29.</b> Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,6 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi .....	82
<b>Şekil 4.30.</b> Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,8 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi .....	82
<b>Şekil 4.31.</b> LPG yakıtının hava fazlalık katsayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi .....	83
<b>Şekil 4.32.</b> LPG yakıtının hava fazlalık katsayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi.....	84
<b>Şekil 4.33.</b> Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 0,8 (zengin karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	84
<b>Şekil 4.34.</b> Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 1,2 (fakir karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi.....	85

<b>Şekil 4.35.</b> Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 0,8 (zengin karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi.....	85
<b>Şekil 4.36.</b> Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 1,2 (fakir karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi.....	86

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1.</b> Simüle edilen motorun teknik özellikleri .....	34
<b>Çizelge 3.2.</b> Farklı yakıtlar için hesaplanan volumetrik verim ve yanma stokyometrisi değerleri .....	40
<b>Çizelge 3.3.</b> Hidrokarbon kaynaklarının motor-çıkış HC emisyonları üzerine etkisi.....	48
<b>Çizelge 3.4.</b> Modelde hesaplatılan viskozite ve difüzyon katsayısı sonuçları.....	51
<b>Çizelge 3.5.</b> Farklı yakıtlar için literatürde yer alan sıcaklık ve Henry sabiti değerleri .	56
<b>Çizelge 3.6.</b> Silindir içine hapsolunan ve yanma olayına katılan yakıt miktarı.....	60

## 1. GİRİŞ

Bilimsel araştırmaların çoğunda insan hayatının önemi, dünyanın artan nüfusu ve azalan kaynaklar araştırmacıları yeni kaynaklar bulmaya, mevcut teknolojileri daha verimli ve ekonomik kullanmaya, üretimin insan sağlığına olumsuz katkılarını en aza indirmeye yönelmektedir. Bu alanlarda yapılan çalışmalar genel boyutta birbirleriyle çelişmemektedir. Daha verimli yani daha ekonomik olan aynı zamanda çevre için daha az zararlı olan demektir. Bunun için günümüzde teknolojik araştırmalar ve çevresel önlemler büyük bir hızla gelişimini sürdürmektedir.

Gelişen teknolojinin bazı sorunları da beraberinde getirdiği aşıkârdır. Çevre sorunlarının önemli bir bölümünün bu gelişmenin ürünü olduğu bilinmektedir. Doğamız günden güne tahrip edilmektedir. Çevre kirlenmesine neden olan birçok kirletici kaynak bulunmaktadır. Bu kirletici kaynaklar arasında araçların egzozlarından çıkan emisyonların neden olduğu çevre kirliliği önemli yer tutmaktadır.

Güç makineleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan benzin motorları özellikle hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonları bakımından iyileştirmeye gerek duymaktadır. Bu yüzden gerek eksik yanma ürünü olan karbon monoksit ve gerekse yanma reaksiyonundan yanmadan çıkan veya yanma sırasında yanan bölgenin dışındaki hacimlerde kendine yer bulan hidrokarbonların oluşum ve egzozdan dışarı atılma mekanizmaları incelemeye değer konulardır. Yağ filmi gibi hacimlere iştirak ederek reaksiyondan kurtulan, daha sonra geri verilen yakıt miktarı ve cinsi üzerinden ifade edilen hidrokarbon kayıpları küçümsenemeyecek değerlerdedir.

Bu çalışmada farklı yakıtlar için birçok hidrokarbon kaynağından en önemlilerinden biri olan yağ filmi hidrokarbonları belli yaklaşımlar çerçevesinde ele alınmıştır. Hidrokarbonların yağ filmi içerisine emilmesi ve yağ filminden salınması hususlarında önemli etkiye sahip olan difüzyon katsayısı, Henry Kanunu sabiti gibi modeller nümerik çözüm modelleriyle desteklenerek önemli sonuçlar ortaya çıkarılmıştır.

Çalışmanın bölümleri aşağıda özetlenmiştir:

2. Bölüm “Kaynak Özetleri” kısmında literatür araştırması verilmiştir. Konu ile alakalı son çalışmaların bir özeti sunulmuştur.



3. Bölüm “Materyal ve Yöntem” kısmında buji ateşlemeli motorlarda HC emisyon kaynaklarından bahsedilmiş ve yağ filmi hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ayrıca Çevrim Modeli ve Nümerik Çözüm Modelleri ele alınmıştır:

*i.* Çevrim modeli kısmında; silindir içi gazların global ısı taşınım katsayısı, sabit basınçta özgül ısısı, viskozitesi, yoğunluğunu vs. belirleyen yaklaşımlar yanma modeli ile birlikte beraber anlatılmıştır. Ayrıca yağ filmi kaynaklı HC emisyon modelleri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

*ii.* Nümerik çözüm modeli kısmında; matematik modelde verilen sayısal süreç sunulmuştur. Kullanılan sayısal yöntem, kısmi diferansiyel denklemlerin nümerik çözüm metotlarından sonlu hacim metodudur. İlk önce çözüm alanı sonlu sayıda hücrelere bölünmüş daha sonra fark denklemleri elde edilerek çözüm yapılmıştır.

4. Bölüm “Bulgular ve Tartışma” kısmı araştırma sonuçları kısmıdır. Hesaplanan değerler burada grafiklerle desteklenmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar literatürde yer alan verilerle değerlendirilerek yorumlanmıştır.

5. Bölüm “Sonuç” bölümüdür. Elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve bu konuda daha sonra çalışacak olan araştırmacılara ışık tutacağını düşündüğümüz bazı tavsiyelerde bulunulmuştur.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde buji ateşlemeli motorlarda, son yıllarda büyük önem kazanan HC emisyonlarının özellikle yağ filmiyle ilgili son yapılan deneysel ve modelleme çalışmaları ele alınacaktır. Bu çalışmaların ortak özelliği tek kaynağın çevrim boyunca ayrıntılı olarak incelenmiş olmasıdır. Yani çalışmaların çoğunda kaynak tarafından yutulan daha sonra silindire geri dönen, silindir içinde oksitlenen silindir içinde alıkonularak bir sonraki çevrime dahil olan ve egzozu gönderilmiş hidrokarbon miktarları belirlenmiştir. Makaleler aşağıdaki gibi bir sınıflandırmaya tabi tutulmuştur.

1. Yağ filminin kalınlığının belirlenmesi ile ilgili çalışmalar
2. Yağ filminin HC depolaması ile ilgili çalışmalar
3. Yağ filmi içerisindeki yakıtın oksitlenmesi ve diğer kaynakları içeren çalışmalar

### 2.1. Yağ Filminin Kalınlığının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Yang (1995), içten yanmalı motorlarda piston segman yağlamasının bir ve iki boyutlu sayısal modelini geliştirmiştir. Bu çalışmada yağlama yağı filmi kalınlığını ve hidrodinamik basıncını ölçmek için her bir sayısal model elastohidrodinamik kaviteasyonu kapsamaktadır. Bir boyutlu modelde, önceki çalışmalarda tahmin edilenden daha kalın yağ filmlerine yol göstermede kaviteasyon ve elastohidrodinamik etkiler önemli rol oynamaktadır. Burada, kalın filmler, özellikle üst ölü nokta civarlarında, gaz basıncının yüksek olduğu piston segmanının arka kenarında belirgindir. Temel bir boyutlu model, çevresel akış etkilerini bünyesinde barındırmasıyla 2 boyutlu hale getirilmiştir. Bu sayısal modelde bazı hataları elimine etmek için ana eşitliği doğrusallaştıran bir yaklaşım ve yakınsama geliştirilmiştir. Piston-segman performansını simule etmek için 2 durum incelenmiştir: Rijid segman ve eliptik silindirde eskitilmiş elastik segman. Aşınmış silindirin yüklenmiş olduğu çevresel akışın, segman yük taşıma kapasitesini ve yağ filmi kalınlığını azaltan bir hidrodinamik basınç düşüşüne sebebiyet verdiği görülmüştür. Sapma analizleri segmanın aşınmış silindirin şekline uyabildiğini göstermiştir. Fakat yine de, uyum mükemmel değildir ve bu nedenle segman boşluğu alanına yanma odası gazlarının kaçması için bir potansiyel oluşturmaktadır. Segmanlarla silindir gömleği arasındaki sürtünme gücü de fakir koşullar altında araştırılmıştır. Segman ve gömlek yüzey pürüzlülüğünden daha kalın bir

yağ filmi kalınlığı nedeniyle kesme mukavemetiyle yüklü orta dereceli bir sürtünme kuvveti bulunmuştur. Fakat yağ filmi kalınlığındaki ciddi düşüş dolayısıyla sınırlı yağlama nüfuzu olduğu için, üst ölü nokta civarındaki sürtünme kuvvetindeki bir keskin yükseliş tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın sayısal yöntemleri, segman ve segman yağlamayı analiz etmede daha iyi kullanılabilir ve daha iyi segman dizaynına öncülük edebilir.

Dwyer-Joyce ve ark. (2006), bir ultrason cihazıyla gömlek – piston eteği yağ filmi analiz etmişlerdir. Buradaki prensip yağ filmindeki bir ultrason sinyalinin yankısının tutulması ve analizi temeline dayanmaktadır. Yansıtılan dalga genliği oranı yağ filmi kalınlığı ile ilişkilendirilebilmektedir. Yöntemin değerlendirilmesi için 4 zamanlı tek bir silindir bir dyno test platformu üzerinde kullanılmıştır. Bir piezo- elektrik dönüştürücü silindir gömleğinin dışına bağlanmış ve yüksek frekans kısa süreli ultrason sinyallerini belirlemede kullanılmıştır. Bu sinyaller piston eteği sensör bölgesi üzerinden geçerken yağ filmi kalınlığını belirleme kullanılmışlardır. 2 – 21 µm aralığındaki yağ filmleri motor hızıyla değişimler kaydedilmiştir. Sonuçlar detaylı sayısal tahminlerle uygunluk göstermişlerdir. Yağ filmi kalınlığı ölçümü için yeni bir ultrason yöntemi piston eteği-gömlek yağlamasının ölçümünde değerlendirilmiştir. Yansıtılan ultrason sinyalleri piston sensör bölgesinden geçerken kaydedilmiştir. Yansıtılan sinyaller bir basit yay model yaklaşımı kullanımıyla yağ filmi kalınlığını doğrudan vermek için yorumlanılabilmektedir. 2-21 µm değerleri arasındaki yağ filmleri çalışma ve yanma şartlarının bir aralığı altında piston eteği için ölçülmüştür. Fakat sensor belli bir dereceye kadar alan genişliğini kaydederken, bu durumda piston segmanı geçişi sırasında film ölçümü mümkün olmamaktadır. Ölçülen veri nitel olarak film oluşumunun bir sayısal modelinden elde edilen eski veri ile uyuşmaktadır.

Baba ve ark. (2007), içten yanmalı motorlarda piston üzerindeki yağ filmi davranışını Lazer Uyarımlı Flüorışma(LIF) - Parçacık Görüntüsü Velosimetrisi(PIV) ile analiz etmişlerdir. Bu bağlamdaki yöntem, yağ filmi kalınlığı ve hız ölçümü için öne sürülmektedir. Yağ filmi kalınlığı lazer uyarımlı flüorışma ile ölçülmektedir ve onun hızı da parçacık görüntüsü velosimetrisi ile ölçülmektedir. Bir model motor, yağ filmi kalınlığı için LIF ölçümlerini test etmek amacıyla çalıştırılmaktadır ve bir optik erişimli motor (üretim motoru baz alınarak) hız ve yağ filmi kalınlığının her ikisini de

değerlendirmek için işletilmektedir. Bu birleştirilmiş yöntem içerisinde, lazer uyarımlı flüor ışına görüntüleri, parçacık görüntüleri yerine PIV (Parçacık Görüntü Velosimetrisi) ölçümlerinde kullanılmaktadır. Sonuçlara göre yağ filmi kalınlığı ve hızı birleştirilmiş yöntem sayesinde sadece lazer uyarımlı flüorışına rengi görüntülenmesiyle eş zamanlı olarak ölçülebilmektedir. Yağ filmi kalınlığı ve hızı, motor çalışma esnasındaki motorun krank açıları boyunca takdim edilmektedir. Bu araştırmanın sonuçları aşağıdaki gibidir:

1. Yağ filmi kalınlığı ve hızı her bir krank açısıyla LIF ve PIV ile tek tek ölçülebilmektedir. Onlar içerisindeki değişimler krank açısıyla alakalı olmaktadır.
2. LIF görüntülerinin kullanımıyla, PIV mantıklı hız vektörleri temin edilebilmektedir. İleri sürülen bu yöntem, aynı LIF görüntüsünden yağ filmi kalınlığı ve yağ filmi hızının eş zamanlı ölçümlerini gösterebilmektedir.
3. Yağ filmi, piston hızını tam olarak izleyememektedir. Hız içerisindeki fark motor hızı ve krank açısıyla alakalıdır.
4. Yağ filmi hızı ve kalınlığı ölçümleri hakkındaki bazı örnekler her bir krank açısı için gösterilmektedir. Önerilen yöntemin yağ filmi davranışını anlamada yararlı olduğu doğrulanmıştır.

Dhar ve ark. (2008), bir motor simülatöründe piston segmanı – gömlek yüzeyi arasındaki dinamik yağlama yağı filmi kalınlığı üzerine ölçümler yapmışlardır. Bu mevcut araştırmada segman-gömlek yüzeyindeki minimum yağ filmi kalınlığının ölçümü için kapasitans (sığa) methodu kullanılmaktadır. Segman ve gömlek içerisine gömme olarak monte edilmiş, kontrol çubuğu arasında kurulu kapasitansın ölçümü kontrol çubuğu ve yağ ile dolmuş gömlek arasındaki bölgede sağlanan dielektrik katsayısı bilinen yağ filmi kalınlığının belirlenmesinde kesin bir çözüm sağlamaktadır. Bu çalışma, detaylandırılmış sensör tasarımı, kapasitif mikro sensor kullanılarak yağlama yağı filmi kalınlığının ölçümü ve cihazlandırmasını sunmaktadır. Bu araştırma, sensör ve cihazlandırmayı geçerli kılmak için çalışan bir motorda uygulanmaktadır. Normal yanma gerçekleştirilen bir motor içerisinde de bu uygulama ayrıca gerçekleştirilmiştir. Çalışma yapılan motor üzerinde kapasitans kontrol çubukları ve ilgili elektronik devre minimum yağ filmi kalınlığının ölçümü için geliştirilmektedir. Yağ filmi kalınlığı 3 farklı yerde farklı hızlarda ölçülmüştür; üst ölü nokta, orta strok ve alt ölü nokta civarlarında. Sonuçları da bu çalışmada sunulmaktadır. Çalışan motorda

yağlama yağı kalınlığı 0,2 – 8 µm arası değişkenlik göstermiştir. Yağlama yağ filmi kalınlığı iki yönlü hareket içerisinde piston eğimindeki zıtlıktan dolayı motor strokunun yükselme alçalmasında özel pozisyonlarda önemli bir şekilde değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik, motor simülatörü içerisindeki yanma basıncı ve gaz sıkıştırmanın olmamasından dolayı diğer araştırmacıların raporladığı ateşlenen motora nazaran nispeten daha küçüktür. Bu nedenle, sensörlerin önündeki yağ filmi kalınlığı biraz daha başarılı ölçülmüştür. Ve bu kapasitans kontrol çubuğu sensörleri, yağ transport olgusunu anlamada ateşlenen motor içerisinde de çalıştırılabilmektedir. Yağlama yağı filmi kalınlığı sensörün tüm pozisyonlarında motor hızı artışıyla birlikte artmakta olduğu görülmüştür. Bu sınırlı-karışık yağlamalı yağlama rejiminden hidrodinamik yağlama rejimine geçen değişimden kaynaklıdır.

Kato ve ark. (2009), bir önceki “içten yanmalı motorlarda piston üzerindeki yağ filmi davranışını Lazer Uyarımlı Flüorışım(LIF) – Parçacık Görüntüsü Velosimetrisi(PIV) ile analizini” geliştirmişlerdir. Bu araştırmada yağ filmi ölçümü davranışıyla yağlama mekanizması tartışılmaktadır. Yağ filmi davranışı; yağ filmi kalınlığı ve yağ filmi hız haritasıyla değerlendirilmektedir. LIF ve PIV birleşim yöntemi yağ filmi davranışının ölçümlerinde uygulanmaktadır. Birleşim yöntemi film kalınlığı ve hızının her ikisini aynı anda gerçekleyebilmektedir. İlk deneme, model motor içerisinde LIF ile yağ filmi kalınlığının ölçümü dinamik kontrolleri için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, krank açısıyla yağ filmi kalınlığının değişimini göstermektedir. Birleştirilmiş yöntem 4 zamanlı 2 silindirli optik ulaşımı mümkün bir motorda çalışma şartlarında denenmektedir. Motorun bir silindiri, piston eteğindeki yağ filmi davranışını incelemek için safir maddesindedir. Piston eteğindeki 30 µm ve 100 µm boşlukları test edilmiştir. Yağ filmi kalınlığı dağılımının karakteristikleri piston etek boşluğuna da bağlı olmaktadır. Aynı zamanda yağ filmi hızı vektör haritaları da ayrıca elde edilmiştir. Motor hızının 2000 d/dak i ile piston eteğinin merkezindeki yağ filmi kalınlığının etek açıklığından bağımsız olduğu görülmüştür.

Avan ve ark. (2010), otomobil motorlarında çalışma esnasındaki piston segman yağ filmi kalınlığının ölçümünün ultrasonlu gösterimi üzerine çalışmışlardır. Bu araştırma, piston segmanı-silindir bağlantısı gösterimi için alışılmamış bir yaklaşımda bulunmuştur. Bir düz kiriş ultrason temas dönüştürücüsü, çalışan dizel motorun silindir

duvarının yaş tarafına bitiştirilmektedir. Ultrason dalgaları silindir duvarı boyunca yayılmaktadır ve piston segmanları duyarlı algılama alanı üzerinden geçerken, segman-gömlük temasından yansımalar kayıt edilmektedir. Bu tabakadan yansıtılan bir ultrason sinyalinin oranı, bilinen yansıma katsayısıyla, tabakanın kıvamıyla ve seçilen materyallerin ve yağlamanın yankılanım özellikleriyle farklılaşmaktadır. Dönüştürücü segmanları başarılı bir şekilde algılamaktadır ve yansıma katsayısı temastan kaydedilen yansımanın kullanılmasıyla elde edilmektedir. Segman temasındaki yağ filmi kalınlığının ileriki değerlendirmelerinde, çeşitli ultrason dönüştürücüleri kullanımı önerilmektedir. Bu çalışmada, çalışan motordan üst ölü nokta, alt ölü nokta ve strok orta noktası civarından çeşitli ölçümler alınmıştır. Dönüştürücü, segmanları başarılı bir şekilde algılamış ve yansıma katsayısı farklı motor hızları için elde edilmiştir. Eğer gelen ultrason bütünüyle segman yüzeyi üzerine düşmesi için sınırlandırılabilmişe, yağ filmi kalınlık değerleri yansıma katsayısı verisi kullanımıyla yaylı modelden elde edilebilmiştir. Segmanlar için elde edilen minimum yağ filmi kalınlığı değerleri uzamsal çözünürlük probleminden dolayı inişli çıkışlıdır. Çözünürlük problemini çözmek için, piston segmanına ultrason tekniğinin uygulanması için çeşitli fikirler öne sürülmüştür. Yüksek kapasite iç belleğinin ve daha güçlü bir ultrason sinyalinin kullanımı sistem duyarlılığını arttırabilir. Bu alışma piston segmanı ve gömlük arasındaki bozucu olmayan yağ filmi kalınlığı ölçümünün ultrason yaklaşımıyla daha elverişli olduğunu göstermiştir.

## **2.2. Yağ Filminin HC Depolaması ile İlgili alışmalar**

Korematsu (1990), buji ile ateşlemeli motorlarda yağ filmi içerisine yakıt emiliminin yanmamış HC emisyonları üzerine etkisini incelemiştir. İnce yağ filmi içerisinde yakıt emilim ve salınımının dinamik işlemi olarak tanımlanan basitleştirilmiş bir model geliştirilmiştir. Hesaplanan sonuçlar göstermektedir ki; emilim ve salınım işleminin oranı motor hareketiyle kıyaslanabilir, ve yağ filminden neşredilen yanmamış yakıtın miktarı yağ filminin pozisyonuna, dönme hızına, difüzyon katsayısına, yağ filmi kalınlığına, yağ filminin mevcut çevrimlerine ve motor yağı içerisindeki başlangıç yakıt konsantrasyonuna bağlıdır. Yağ filmi boyunca olan yakıt difüzyonu, silindir basıncı, segman gaz basıncı ve yağ filmi kalınlığı gibi birbirine sırasıyla bağlı olan modeller

motorun verilen çalışma şartları ve özelliklerinde dinamik işlemi değerlendirmek için kullanışlıdır.

Shenghua ve ark. (1996), buji ile ateşlemeli motorlarda silindir yağlama yağı filminin HC emisyonlarına olan etkisini incelemişlerdir. Hidrokarbonların yağ filmi içerisine ve dışarısına olan difüzyon işlemi bu çalışmada araştırılmaktadır. Teorik simülasyonlar göstermektedir ki yağ filminden salınan hidrokarbonların boyutu, maksimum “a” bir kritik değere kadar yağ filmi kalınlığının artışıyla birlikte artmaktadır. Ve bu maksimum değerdeki yağ filmi, kritik değerden kalın olduğu zaman biraz değişebilmektedir. Normal çalışma şartları altında, yağ filmi kalınlığı yaklaşık olarak kritik kalınlığa ya eşittir ya da büyüktür, bu yüzden yağ filminin yaklaşık olarak neye sahip olduğu ve egzoz hidrokarbonlarında olan maksimum payı bellidir. Aynı sonuç deneysel verilerden de çıkarılabilir. Yanmamış hidrokarbonların ölçülen konsantrasyonu farklı yağlara dayalı farklı petrolere göre farksızdır. Ve yağ filmi kalınlığını değiştirmeye sebebiyet verebilecek şeyler segman takımlarıyla ilgilidir. Yağsız motor testi ispat etmiştir ki, yağ filmi toplam hidrokarbon emisyonlarının %28 oranına katkı sağlayabilir.

Yu ve ark. (2000), buji ile ateşlemeli motorda yağ filmi içerisinde yakıt emilim ve salınım dinamik işlemi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yakıt emilimi ve salınımı üzerine yağ filminin etkisi motor hızına, motor yüküne, ortalama film sıcaklığına göre araştırılmıştır. Yağ filminin etkisinin miktarını belirlemek için çok bileşenli yakıt kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki çözünürlükle ilişkisi olan Henry Sabiti, yağ filmi içerisindeki yakıtın emilim ve salınımı mekanizması içerisinde en baskın parametredir. Silindir gömleğinin üstüne yakın olan yağ kesimi, yakıt emilim ve salınımı işlemine diğer kesimlerden daha önemli katkı sağlamaktadır. Isınma koşullarında, motor hızı yakıt emilim – salınımları üzerine az bir etkiye sahiptir. Fakat yağ filmi sıcaklığı düşükken yakıt emilim – salınımının miktarı motor hızının yükselmesiyle azalmaktadır. Piston boşluklarında hapsedilmiş olan yakıt miktarı yağ filmindeki olanın 2 - 2,3 katıdır. Fakat yağ filmi içerisinde tutulmuş olan yakıt-piston boşluklarının kaçışından daha yavaş olarak yanma odası içerisine salınır. Kıvılcım ateşli motorlarda HC emisyon kaynakları üzerine olan detaylandırılmış araştırmaların çoğu sıkı emisyon gereksinimleriyle buluşmada yönetilmişlerdir. Silindir gömleği üzerindeki yağ filmi motor çıkış HC emisyonlarının ana kaynağından biri olarak sunulmuştur. Bu çalışmanın

amacı, yağ filmi içerisinde emilen/salınan çok bileşenli yakıtın bir dinamik işleminin bir modelini geliştirmektir. Bu model, farklı motor çalışma koşullarında yağ filmi tarafından emilen yakıt miktarını ve yanma odasına salınan yakıt yüzdesini tahmin edebilmektedir. Ayrıca, bir motordaki yağ filmi içerisinde yakıt emilim/salınım işleminin sistematik çalışma araştırması için de olanak sağlamaktadır.

Yu ve Min (2002), buji ile ateşlemeli motorlarda hidrokarbon emisyonları üzerine yağ ve sıvı yakıt filminin etkilerini incelemiştir. Yağ ve yakıt filmlerinin karşılıklı difüzyonları içerisinde ve yağ filmi içerisindeki yakıtın emilim ve salınımını değerlendirmek için bir model geliştirilmiştir. Motor hızı, yükü ve yağ filmi sıcaklığına bağlı parametrik bir çalışma ile inceleme yapılmıştır. Sonuçlar çözünürlükle ilgili olan Henry sabitinin yağ filmi içerisindeki yakıtın emilim ve salınımında en baskın parametre olduğunu göstermiştir. Isınma şartları altında, motor hızı yakıtın salınımı ve emiliminin miktarı üzerinde az etkisi vardır, fakat yağ film sıcaklığı düşük olduğunda yakıt emilim – salınımının miktarı motor hızının yükselmesiyle düşmektedir. Yağ filmi ve piston kafası üzerindeki sıvı yakıt yüksek HC emisyonlarına sebebiyet verir, temel şartlar altında (soğuk motorda), ıslatılmış yağ filminden salınan miktar ve yakıt filminden buharlaşan yakıt miktarı stokyometrik yakıt kütesinin % 24,5'udur. Sıvı yakıtlı yağ filminin etkisi sıvı yakıtsız olan yağ filminden 5,3 kat daha büyüktür. Piston silindir arası boşluklardan kaçan yakıt miktarı yağ filmi içerisindeki yakıttan 1,3 kat daha büyüktür. Bununla birlikte, soğuk motor şartları altında yanma odası içerisine yağ filmi içerisinde hapsedilen yakıtın salınımı piston-silindir arası boşluklardan kaçan yakıttan daha yavaş olduğu söylenebilir.

### **2.3. Yağ Filmini İçerisindeki Yakıtın Oksitlenmesi ve Diğer Kaynakları İçeren Çalışmalar**

Shimada ve ark. (2004), içten yanmalı motorun bir piston segmanı üzerindeki yağ filmi sıcaklığı, yağ filmi kalınlığı ve ısı transferinin analizinde yerel yağlama viskozitesinin etkisini incelemiştir. Bir dizel motordaki segmanın üzerindeki yağ filmi kalınlığı ve sıcaklığı hakkında yerel yağlama yağının viskozitesinin etkisi Reynolds Eşitliği kullanılarak analiz edilmiştir. Viskoz dağılımından ısı yayan değişken iki boyutlu enerji



eşitliği de bu analizde kullanılmıştır. Yağ filmi viskozitesi, herhangi birçok mevsimli yağ için, yerel yağ filmi sıcaklığının ve yerel kayma hızının kullanımıyla belirlenmiştir. Dahası, segman ve gömlek yüzeyi arasındaki ısı transferi incelenmiş ve test edilmiştir. Bu yöntemle hesaplanmış olan yağ filmi kalınlığı, ortalama kayma hızı ve gömlek sıcaklığına dayalı viskozitenin olduğu durumdan daha azdır. Segman ve gömlek yüzeyindeki ısı transferinin maksimum değeri, yağ filmi kalınlığının minimum olduğu yerdeki krank açısının civarında elde edilmiştir. Bu çalışma içerisinde, düzensiz ve 2 boyutlu termohidrokinematik yağlama modeli çok mevsimli yağ için geliştirilmiştir. Yağ filmi sıcaklığı, yağ filmi kalınlığı ve segman-gömlek yüzeyi arasındaki ısı transferi; kesme hızı ve segman ve gömlek yüzeyinin her ikisinin lokal yağ filmi sıcaklığından sağlanan lokal viskozite kullanımıyla analiz edilmiştir. Ayrıca, bu viskozite modeli ve geleneksel viskozite modelinin her ikisi, segman- gömlek arasındaki yağlama karakteristikleri için karşılaştırılmışlardır. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Yağ filmi içerisinde, lokal kesme hızından ve lokal sıcaklıktan elde edilen lokal yağlama viskozitesi hesaba katılmış bu modelin kullanımıyla bir çevrimdeki segman ve gömlek yüzeyi arasındaki ısı transferi miktarı ve yağ filmi kalınlığı tahmin edilebilmiştir.
2. Bu viskozite modeli kullanımıyla elde edilen yağ filmi kalınlığı, viskozitesi gömlek sıcaklığı ve ortalama kesme hızına bağlı olan geleneksel viskozite modelinden daha incedir.
3. Çok mevsimli yağların viskozitesi kesme hızına bağlı olduğu halde, üst ölü nokta ve alt ölü nokta dışındaki bölgelerde bir çevrimdeki yüksek kesme hızından dolayı yağın viskozite değeri düşüktür.
4. Bu yöntemle tahmin edilen yağ filmi kalınlığı azalan viskozite ve segman genişliği ile daha ince olmaktadır.
5. Segman ve gömlek yüzeylerindeki maksimum ısı transferi, yağ filmi kalınlığının minimum olduğu krank açısı civarlarında meydana gelmiştir. Segman ve gömlek yüzeylerindeki ortalama ısı transferi ortalama yağ filmi viskozitesinin düşmesiyle yükselmektedir.

Norris ve ark. (1995), buji ateşlemeli motorlarda yağlama yağı tabakasında oluşan hidrokarbonların oksitlenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışma içerisinde, yağlama yağı tabakasından çıkan hidrokarbonların yanma sonrası oksitlenmesi

simülasyonlar sayesinde araştırılmaktadır ve bu araştırmalar deneysel ölçümlerle karşılaştırılmaktadır. Bir boyutlu kimyasal tepkimeye açık olan difüzyon model, yağlama yağ tabakasından görülen hidrokarbonların oksitlenmesi ve salınım süreci için formüle edilmiştir. Enerji, kütle ve türler koruma denklemleri; genişleme stroku boyunca, çalkantı yayılımı için basitleştirilmiş varsayımlar kullanımıyla, sınır tabaka büyümesi ve kimyasal reaksiyon oranları sayesinde çözümlenmektedir. Simülasyon sonuçları göstermektedir ki; olağan hipotezler altında, reaksiyon ve difüzyon oranlarının her ikisi kontrol ediliyor olmaktadır. Kimyasal reaksiyon oranları, genişleme strokunun başından sonuna kadar sıcaklıkların dar bir aralığı üzerinde doruk noktaya ulaşmaktadır. Bu oksitlenme alanı, genişleme stroku esnasında, ısı transferi ve hacimsel genişlemeden dolayı duvardan uzaklaşmaktadır. Hassas analizler göstermiştir ki yağ tabakasından olan hidrokarbonların oksitlenmesinin belirlenmesinde en önemli tek parametre çalkantı yayılımıdır. Bu çalkantı yayılımı, deneysel değerler olarak büyüklüğün aynı türde olabilmesi için tahminler içerisinde yer almalıdır. Diğer önemli parametreler: HC' un kimyasal tepkimesi ve ilk sınır tabaka kalınlığıdır. Çok hassas çalışma parametrelerine ve katkı maddesi türüne olan oksitlenme seviyelerinin duyarlılığına ilişkin bu araştırmada özellikle seyreltme ve soğutma suyu sıcaklığında iyi bir uyum sağlanmaktadır. Bu uyum anlaşılana o ki; motorlardaki yanmamış HC oksitlenmesinin basitleştirilmiş modeller gibi temsil edileceğini göstermektedir. Fakat oksitlenme seviyeleri için mutlak değerleri tahmini içerisinde 3 farklılığın bir faktörünün, alt modeller içerisinde esaslı bir arıtmanın gerekli olduğunu tavsiye etmektedir.

Salazar (2008), küçük motorlarda yanmamış HC emisyon mekanizmaları hakkında araştırma yapmıştır. Bu çalışmada hava soğutmalı ikiz V, karbüratörlü bujili bir motorun yanmamış HC emisyonları üzerindeki yağ filmi, segman takımı boşlukları ve emme manifoldundaki sıvı yakıtın etkisi incelenmiştir. Motor gücünün bir aralığı için, 2 farklı motor hızıyla, çeşitli hava yakıt oranlarında ve sabit ateşleme zamanı için testler yerine getirilmiştir. Karbüratör kullanılıyorken yakıtın fakir atomizasyonu ve buharlaşmasından ötürü olan sıvı yakıt etkilerini soyutlamak için, özel koşullu homojen, ön buharlaştırılmış karışım sistemi sonuçları karşılaştırılmıştır. Yağ filmi içerisinde yakıt yüzey emiliminin; motor çıkış HC emisyonları üzerine etkisi ve onun sonraki çevrimdeki salınım gecikmesini izleyen yanma, çeşitli yakıt kompozisyonları ve karter yağı basıncıyla incelenmiştir. Standart tamamıyla harmanlı benzin kullanımı sonuçları,

yağ içerisinde yaklaşık olarak 1/10 daha az çözünürlüğe sahip propan kullanım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Testler birkaç motor hızı ve yükü için sabit yakıt fazlalık katsayısı  $\phi = 1,21$  ve sabit ateşleme zamanıyla uygulanmıştır. Deneysel çalışma, sıvı gaz fazı dengesinin sayısal analizi ve yağdaki yakıtın emilim salınım işleminin sayısal analiziyle desteklenmektedir. Buna göre sonuçlar aşağıdadır:

1. Her iki yakıt için kararlı durum emisyonları araştırılmıştır ve tüm çalışma şartları için nicel ve nitel olarak iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.
2. Kararlı çevrim HC emisyonları da her iki yakıt arasında iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür. En dikkat çeken egzoz stroğunun son bölümü olan yerde, yağdan yakıt salınımının etkisinin belirgin olması beklenmektedir.
3. HC emisyonlarının, hafif yük düşük hız çalışma koşullarındaki karter yağı basıncından büyük ölçüde etkilendikleri görülmüştür, fakat yüksek hız ve yüklerde az derecede etkilenirler. Çeşitli karter yağı basınçlarında gözlemlenmiş farklı HC emisyonları için sebebin segman takımı içerisindeki depo farklılığının olmasına inanılmaktadır. Kartar yağı basıncı içerisindeki değişimlerle HC içerisindeki görelî değişim gerçeği her iki yakıt için aynıdır. Ve kararlı çevrimli HC emisyonlarının bir farkının olmaması, yağ filminden yakıt salınımının küçük motorlardan toplan HC emisyonları içerisinde önemli bir role sahip olmadığını göstermektedir.
4. Yağ yakıt sisteminin sıvı-gaz fazı dengesinin bir simülasyonu, küçük motorlardaki HC emisyonlarındaki yağ filmi payının otomobil motorlarından daha küçük ve daha az olması gerektiğini göstermektedir. Bu esas olarak küçük motorların nispeten yüksek yakıt fazlalık katsayısı oranına rağmen onların yüksek çalışma sıcaklıkları nedenindedir. HC emisyonlarına yağ filmi katkısının küçük motorlar için pek kayda değer olmadığını deneysel sonuçlar baz alınarak önceki gözlemleri analizler desteklemiştir. Literatür baz alınarak, yağ filminin toplam HC emisyonlarına katkısı %10 dan daha az veya ihmal edilebilir olduğu otomobil motorları için tahmin edilmektedir.
5. Kararlı hal koşulları altında çevrim boyunca düzensiz emilim salınım sürecinin sayısal analizi, yağ filmi mekanizması kaynaklı olan HC emisyonlarının en büyük payı, enjekte edilmiş yakıt kütlelerinin %1 inin altında olması gerektiğini öngörmektedir. Bu segman takımının izafi payından daha düşüktür (sadece %10 civarı). Oksitlenme sonrası kaynaklı daha ileri bir düşüş beklenmektedir. Dolayısıyla, yağ tabakasının etkisi

küçük motorlar içerisinde önemsiz bir paydır. Yağ filminin etkisinin, yanmamış yanma veya segman takımı katkısından biriyle yenilgiye uğramış olduğu beklenmektedir.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Hidrokarbon (HC) Mekanizmaları**

Bu bölümde hidrokarbon emisyonlarına sebep teşkil eden kaynaklardan bahsedilmiştir. Çalışma konumuz olan yağ filmi daha ayrıntılı olarak verilmiştir. Hidrokarbonların kaynaklarına, silindire yerleşmelerinden silindiri terk etmelerine kadar olan aşamalar özetlenmiş ve buna bağlı kısımlarda da önemli detaylı bilgiler verilmiştir.

##### **3.1.1. Yanmamış hidrokarbonların kaynakları**

Buji ateşlemeli motorlarda HC emisyonlarının kaynakları çok iyi bilinmektedir. Bununla birlikte birçok sürecin fiziksel ve kimyasal kanunlarının karmaşıklığından dolayı, bu kaynakların davranışı çok iyi anlaşılammıştır. Bu kaynakların şu alt başlıklar altında incelendiği görülmüştür:

1. Yanma odası içerisindeki aralıklar veya boşluk bölgeleri (Crevice)
2. Yağ filmi
3. Tortular (birikintiler)
4. Sönüm tabakaları (Quench layers)
5. Sıvı yakıt
6. Egzoz supap sızıntısı

Toplam hidrokarbon emisyon işlemlerinin birbirini takip eden iki büyük aşamada meydana geldiği düşünülmüştür.

Birincisi, alevin normal yayılma işlemi esnasında silindire sevk edilen yakıtın bir kısmının yanmasını engelleyen oluşumlardır. Bunlar şu maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Yakıt buharı – hava karışımı yanma odasındaki boşluk hacimleri içerisine emilmesi
2. Yakıt bileşenlerinin silindir cidarı üzerindeki yağ filmi içerisine emilmesi
3. Silindir kafası ve piston tablası üzerinde bulunan birikintilerin ortamdaki hidrokarbonları kendi bünyelerine emmesi
4. Silindir cidarlarına yakın yerlerde alev söndüğünde yanma odası cidarlarından ayrılan sönüm tabakaları içerisinde hidrokarbonların bulunması

5. Alev cidara ulaşmadan önce söndüğü anda yakıt buharı – hava karışımının yanmamış olarak ayrılması
6. Yeterli hava ile karışamayan ve buharlaşamayan silindir içindeki sıvı benzinin yanma olayı bitmeden evvel yanması
7. Yanmamış karışımın kapalı olan egzoz supabından kaçması

İkincisi, yanma işlemi sonrasında ilgili adımlar olup, yakıtın silindir içinde yanmadan kalabilmesini, genişleme ve egzoz stroklarında kendisini muhafaza edebilmesini ve egzoz port ve manifoldunda yanmadan kalabilmesini ihtiva eder. Bunlar ise şu şekilde özetlenmiştir:

1. Boşluk hacimleri içindeki yanmamış yakıt – hava karışımının dışarıya doğru akışı; yanmış gazlar ile karışması ve bir kısmının oksitlenmesi
2. Yağ filminden ve birikintilerden yanmış gazların içine doğru hidrokarbon buharının difüzyonu; bu bir kısım hidrokarbonun oksitlenmesi
3. Gerek duvar bölgesinde gerekse göbek bölgesinde sönmüş gazların daha sonra yanmış gazlarla karışarak bir kısmının oksitlenmesi
4. Egzoz stroku başlangıcında silindir içindeki yanmamış hidrokarbonun bir kısmının egzoz içine taşınması
5. Egzoz stroku sırasında gazların piston tarafından yer değiştirmesiyle yanmamış HC oranına ilave hidrokarbonların da katılarak egzoz içine taşınması
6. Silindiri terk eden yanmamış hidrokarbonların sıcak egzoz gazları ile karışması ve bu hidrokarbonların bir kısmının egzoz port ve manifoldunda okside olması

Yukarıdaki işlemler neticesinde aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$m_{HC,motor-çıktı} = \sum m_{HC,i} (1 - f_{oksçev,i}) (1 - f_{kalçev,i}) (1 - f_{oksegzos,i}) \quad (3.1)$$

Burada;

$m_{HC,i}$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarı

$f_{oksçev,i}$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarının oksitlenen kesri

$(1 - f_{oksçev,i})$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarının oksitlenmeden kaçan kesri

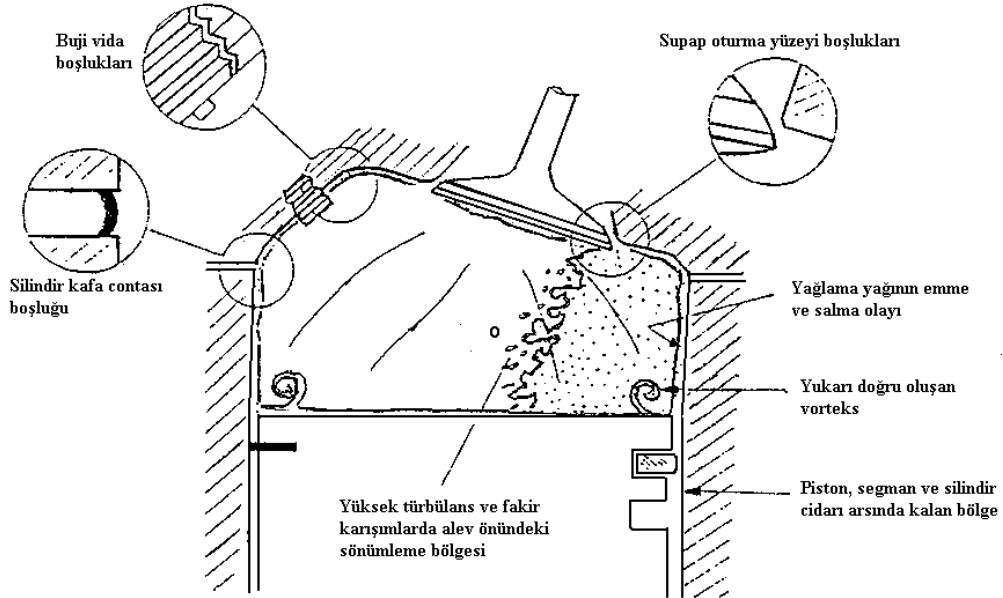
$f_{kalçev,i}$ : Oksitlenmeden kaçan hidrokarbon miktarının silindir içinde kalabilen kesri

$(1 - f_{kalçev,i})$ : Oksitlenmeden kurtulan hidrokarbonların silindir dışına çıkan kesri

$f_{oksegzoz,i}$ : Silindir dışına çıkan hidrokarbonların egzozda oksitlenen kesri

$(1 - f_{oksegzoz,i})$ : Silindir dışına çıkan hidrokarbonların egzozdan atmosfere atılan kesri

Yukarıdaki ifadelerde geçen yanmış kelimesi yakıtın yanma ürünlerine ( $CO_2$ ,  $H_2O$  ve çok az miktarda  $CO$  ve  $H_2$ ) dönüştüğünü belirtmek için kullanılmıştır. Egzozda ölçülen yanmamış hidrokarbonların yaklaşık %50 si oksijenle reaksiyona hiç girmemektedir. Motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının geriye kalan miktarı ise yakıtın reaksiyonu sonucunda oluşan kısmi reaksiyon ürünleridir. Önemli bir miktarı teşkil eden bu ürünler etan, eten, propan, metan, formaldehit, benzen, izobütan, toluen ve 1.3 bütandır (Cheng ve ark. 1993).



**Şekil 3.1.** Yanma odası içerisindeki aralık ve boşluk bölgeleri

### 1- Yanma odası içerisindeki aralıklar veya boşluk bölgeleri (crevices)

Normal yanma olayında yakıtın kaçmasına sebep olan en önemli mekanizmalardan biri olan aralıklar, içlerine yakıt-hava ve artık gaz karışımı girebilen fakat alev giremeyen yanma odasına dar bölgelerle bağlanmış içine ve dışına gaz akışı olan boşluklardır. Şekil 3.1 de farklı boşluk bölgeleri gösterilmiştir. Toplam boşluk hacmi sıcaklığa ve geometriye bağlı olarak kompresyon hacminin %1–2 si kadardır. En büyük boşluk

hacmi üst segman boşluğu hacmi olmakla birlikte, silindir kafa contası, buji ve supap oturma yüzeyi boşlukları da önemsiz değillerdir.

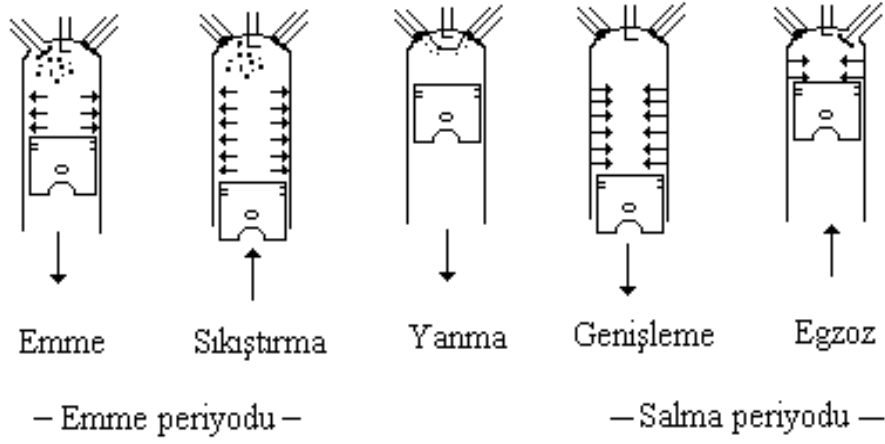
## **2- Yağ filmi**

Bir motorun silindirlerindeki yağ filmi önemli bir hidrokarbon emisyon kaynağıdır. Şekil 3.2 de gösterildiği gibi yağ filmi, emme ve sıkıştırma zamanlarında yakıt hidrokarbonlarını eritir. Depolanan bu hidrokarbonlar alevden korunurlar ve genişleme ve egzoz zamanlarında da yanmış egzoz gazlarının içerisine salınırlar. Kaiser ve ark. ile Korematsu ve ark. (Korematsu 1990) bir yanma odasında (combustion bomb) yaptıkları deneylerde, yakıt içerisine çok az miktarda yağ ilave ettiklerinde çıkan egzoz gazları içerisinde yanmamış yakıt konsantrasyonunun önemli miktarda arttığını gözlemlemişlerdir. Egzozda artan ekstra hidrokarbon miktarı, ilave edilen yağın miktarı ile orantılı olmaktadır. Egzoz hidrokarbonlarındaki artışı öncelikle yağ olmayan ve reaksiyona girmeyen yakıt veya yağdan türemiş bileşenler olarak gözlemlemişlerdir. Yine Boam ve ark. bu olayı 2000 d/dak 'da çalışan ve 0,47 bar emme manifold basıncına sahip bir motor üzerinde çalışmışlardır. İki deney yapılmıştır; birincisi yağ ile yağlama ikincisi ise su ile yağlama. Bu iki deneyden elde edilen motor çıkış HC emisyonları karşılaştırıldığında yağlama yağı yerine su kullanıldığında HC emisyonları %16 daha küçük çıkmıştır. Netice itibariyle silindir içi oksitlenme, arta kalan hidrokarbonlar ve egzoz potundaki oksitlenme dikkate alındığında, silindir içine giren yakıtın yaklaşık %1 i normal yanma olayından kaçarak yağ filmi tarafından emildiği görülür. Yapılan bu deneyler göstermiştir ki yağ filmi, alev yağ filmine gelene dek yakıtı eritir ve depolar ve daha sonra onu soğumuş yanma gazlarının içerisine salar (Korematsu 1990).

Bir motorda ise bu fiziksel olayın detayları bir yanma odasından çok daha farklıdır. Yakıtı eritmek ve salmak için çok az bir zaman vardır. Buji ateşlemeli bir motorda yağ filminin hidrokarbon emisyonları üzerindeki etkisi serbest yağlanan (oil-free) bir motor üzerinde Ishizawa ve Takagi (Korematsu 1990) tarafından doğrudan doğruya belirlenmiştir. Motorun silindirlerindeki yağ filmi kaldırıldığında, yanmamış hidrokarbon konsantrasyonunda önemli bir azalma gözlemlemişlerdir. Carrier ve ark.



bir motor çevrimi içerisinde yağ filmi içerisinde yakıtın emilip salınabileceğini teorik olarak göstermişlerdir (Korematsu 1990).



**Şekil 3.2.** İnce yağ filmi içine yakıtın emilmesi ve salınması

Piston başı üzerine yerleştirilen elemanlarla yağın miktarını belirleyen deneylerde, yanma odası yüzeylerindeki yağ filminin egzoz hidrokarbon emisyonlarını artırdığı saptanmıştır. Motor izo-oktan ile çalıştırıldığında artan egzoz HC seviyeleri silindir içine ilave edilen yağ miktarı ile orantılı olmaktadır. Silindir içine ilave edilen  $0,6 \text{ cm}^3$  yağ egzoz HC konsantrasyonunda 1000 ppm C lik bir artış meydana getirmiştir. Yağ oksitlenme ürünleri hariç, yakıt ve yakıt bileşenleri bu artışın önemli bir bölümüne cevap verebilmektedir. Benzer deneyler propan ile yapıldığında; silindir içerisine yağ ilavesi yapıldığında egzoz HC emisyon değerlerinde herhangi bir artış meydana gelmemiştir. Egzoz hidrokarbon konsantrasyonlarındaki bu artış yakıtın yağ içerisinde çözülebilmesi ile doğru orantılıdır. Motor belli bir süre çalıştıktan sonra egzoz HC seviyesinin yağ ilave edilmesinden önceki normal motor HC seviyelerine doğru düzgün bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek soğutma suyu sıcaklıklarında yağ ilavesi ile hidrokarbona sağlanan artış daha düşüktür ve HC konsantrasyonları çok hızlı bir şekilde normal seviyesine düşer. Yağ sıcaklığındaki artış yağın viskozitesini düşürür ve kartere giden miktarı da artırır (Heywood 1989). Yakın zamanda yapılan çalışmalara göre motor çıkış HC emisyonlarının %10–25 inin yağ filminden emilen ve salınan hidrokarbonlardan kaynaklandığı hesap edilmiştir (Hamrin 1994).

Yağ filminin dış yüzeyinde, yağ filmi içinde erimiş (çözünmüş) yakıt buharı konsantrasyonu denge halindeki seyreltik çözeltiler için Henry Kanunu ile ifade edilir. Henry Kanunu, buhar fazındaki yakıtı kısmi basıncı, yağ filmi içerisine emilen yakıtın mol kesri ve Henry sabiti arasında yazılan bir ifadedir.

$$x_{yakit,yağ} = \frac{P_{yakit,gaz}}{H} \quad (3.2)$$

Eğer yağ filmi yeterince ince ve bu yüzden difüzyonda oldukça hızlı ise (3.2) eşitliği yağ içinde çözünmüş yakıtın mol kesrini hesaplamada kullanılabilir.

Gaz halindeki yakıtın kısmi basıncı;

$$P_{yak,gaz} = \frac{n_{yak,sil} \bar{R} T}{V} \quad (3.3)$$

şeklindedir. Burada;  $n_{yak,sil}$ : silindir içindeki yakıtın mol sayısı, T: sıcaklık ve V: silindir hacmidir. Yağ içinde çözünen yakıtın mol kesri için;

$$x_{yak} = \frac{n_{yak,yağ}}{n_{yak,yağ} + n_{yağ}} = \frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ}} \quad (3.4)$$

yukarıdaki ifade yazılabilir. Çünkü  $n_{yağ} \gg n_{yak,yağ}$  dır. Burada;  $n_{yak,yağ}$ : yağ içinde çözünmüş yakıtın mol sayısı ve  $n_{yağ}$ : yağın mol sayısıdır. Böylece  $x_{yak}$  için;

$$x_{yak} = \frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ}} = \frac{n_{yağ} \bar{R} T}{HV} \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilmiş olur.

Eğer difüzyon zaman sabiti ( $\tau_d$ ), karakteristik motor zamanlarından çok küçük ise (3.5) eşitliği için, oldukça hızlı difüzyon geçerli olacaktır.

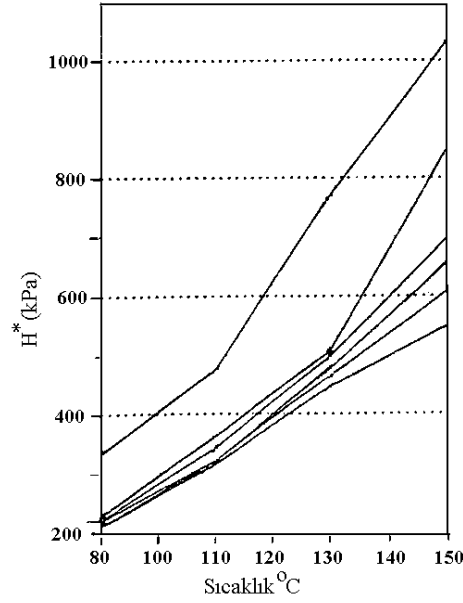
$$\tau_d \approx \frac{\delta^2}{D} \ll n^{-1}$$

Yukarıdaki difüzyon zaman sabiti ifadesinde;  $\delta$  : yağ filmi kalınlığı, D: yağ içine giren yakıt buharı için difüzyon katsayısı ve n: motor devridir. D değeri bir motor yağı içine difüze olan bir hidrokarbon için 300 K de  $10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s ve 400 K de  $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s olmaktadır. Silindir cidarındaki yağ filmi kalınlığı çalışma şartlarına bağlı olarak değişmekle beraber yaklaşık 1- 10  $\mu$ m arasında kalmaktadır. Böylece motor şartları için difüzyon zamanları  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  saniyedir; bu zamanlar en ince yağ filmleri için denge haline gelindiğinde elde edilen değerlerdir (Heywood 1989).

DeneySEL sonuçlara göre Henry sabiti (H) ile yağ sıcaklığı arasında exponansiyel bir ilişki vardır. Şekil 3.3 de görüldüğü gibi Henry sabiti yağ filmi sıcaklığına oldukça duyarlıdır.

Yakıt buharının emilmesi basınç ve sıcaklıkla değişir. Yağ filmi içine emilen buharın miktarı daha düşük yağ sıcaklıklarında ve daha yüksek gaz basınçlarında oldukça yüksektir. Yağ sıcaklığı Henry sabitini, silindir içi basınç da her bileşenin kısmi basıncını etkiler. Yağ filmi sıcaklığı özellikle silindir gömleği sıcaklığına bağlıdır ki, silindir gömleği sıcaklığı da sanki daimi motor çalışma şartları müddetince izafi olarak değişmeyip aynı kaldığı kabul edilir. Bununla birlikte gömlek sıcaklığı yükün artması ile artar ve yağ filmi sıcaklığını etkiler.

Yağ yüzeyinde periyodik olarak üç farklı olay tekrarlanır. Birincisi, yağ yüzeyi yakıt-hava karışımı ile temas halinde olduğu, ikincisi, yüzeyin pistonla örtüldüğü, üçüncüsü ise yüzeyin yanmış gazlarla temas halinde olduğu durumdur. Yağ filmindeki emme ve salma işlemi filmin piston tarafından açılan kısımlarında gerçekleşmektedir (Korematsu 1990).



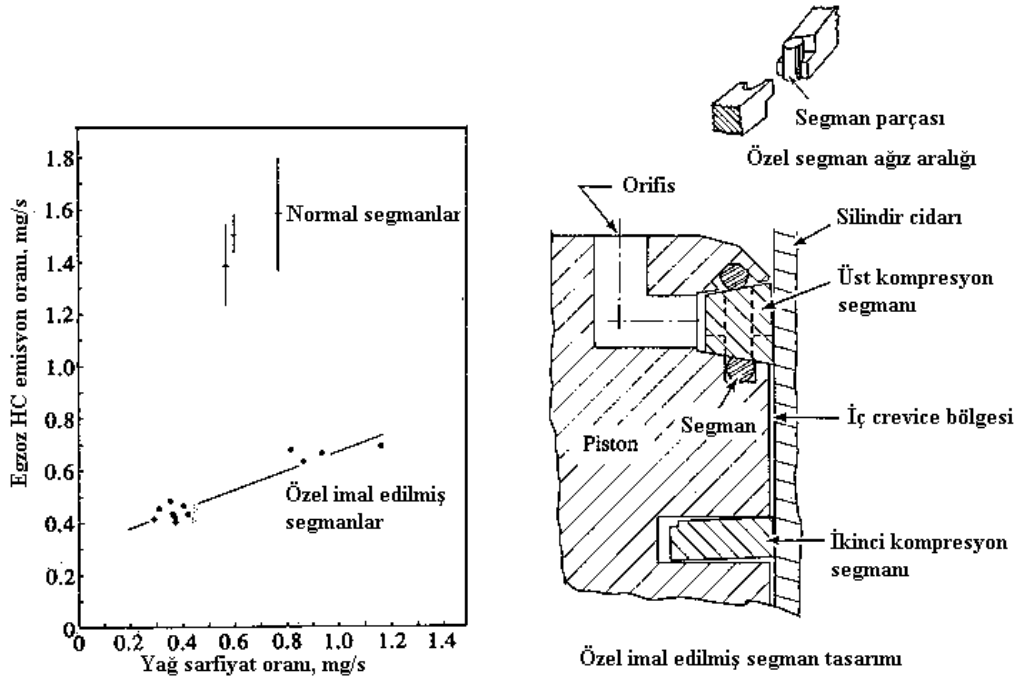
**Şekil 3.3.** Farklı yağlama yağları için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Henry sabitinin deneysel verileri

Bir buji ateşlemeli motorda yağ filmi çevrim boyunca basınçtaki ve sıcaklıktaki değişimlere maruzdur. Emme zamanı boyunca yağ filmi çok düşük basınç ve sıcaklığa maruz kaldığından yağ filmi içine emilen yakıt miktarı çok azdır. Sıkıştırma stroku süresince gaz basıncı ve sıcaklığı artar ve yağ filmi pistonun bir kısmı tarafından örtülür. Yağ filminin pistonla örtülü olmayan kısımları ise hidrokarbon emmeye devam edecektir. Aynı şekilde yanma olayı sırasında basınç ve sıcaklık hızlı bir şekilde arttığından yağ filmi içine hidrokarbon emilmesi devam eder (yağ filminin doyum sınırına ulaşması mümkündür). Emme işlemi alev yağ filmine ulaşana dek devam eder. Hidrokarbonlar yağ filmine emilişlerini tamamladıktan sonra, bu sefer yağ filmi boyunca difüze olmaya başlarlar.

Genişleme ve egzoz strokları boyunca yağ filmi piston tarafından açılır. Yağ filmi azalan sıcaklık ve basınca maruzdur ve yanmış gazlar içindeki hidrokarbon konsantrasyonu hemen hemen sıfırdır. Bundan dolayı hidrokarbonlar yağ filminin dışına doğru salınırlar ve silindir gazları içine difüze olurlar. Eğer oksitlenmeye uğramazlar ve silindirden de çıkabilirlerse yanmamış HC emisyonlarına katılırlar.

Motor yağ sarfiyatı ile egzoz HC emisyonları arasındaki ilişkiler yağ emme/salma ve segman boşluğu mekanizmalarının izafi önemi hakkında bir görüş açısı sağlar. Wentworth (Heywood 1989) buji ateşlemeli bir motorda özel tasarlanmış bir segman ile

yağ sarfiyatını ve HC emisyonlarını ölçmüştür. Bu tasarımların biri sızdırmaz segman-orifis tipindedir ki tüm segman boşluk bölgeleri etkin bir şekilde etkisiz hale getirilmiştir. Ayrıca bu bölgelere veya bu bölgelerden dışarı herhangi bir önem arz edecek gaz akışı engellenmiştir. Şekil 3.4 deki şekle göre; hem fabrikasyon segman tasarımında hem de sızdırmaz segman-orifis tasarımında, yağ sarfiyatının artması ile HC emisyonları artmaktadır. Yağ sarfiyatı normal tüketim seviyelerinden sıfıra doğru yaklaştıkça egzoz HC seviyelerinde bir azalma gözükmemektedir. Fakat bu azalma fabrikasyon segmanı ile sızdırmaz segman-orifis segmanı (ana boşluk bölgesi ortadan kaldırılmıştır) arasındaki emisyon seviyelerindeki farktan çok küçüktür. Kullanılan orijinal pistonun üst kısmında bir oyuk vardır. Normal üst segman boşluğu hacmine sahip bir pistonda HC emisyonlarının daha yüksek olması beklenir.



**Şekil 3.4.** Egzoz HC emisyonları ile yağ sarfiyatı arasındaki ilişki. Normal imal edilmiş piston-segman grubu ve özel imal edilmiş sızdırmaz piston-segman grubu. SI motoru, 1600 d/dak,  $p_{mi}=422$  kPa,  $\phi=0,9$ ,  $\varepsilon=8$ , emme basıncı 54 kPa, MBT ateşleme avansı

### 3- Silindir içi sıvı yakıt

Silindir içi sıvı yakıt da HC emisyonlarını etkiler. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada ısınmış bir motorda dahi, sıvı yakıtın motor çıkış HC emisyonlarını %20 desteklediği

görülmüştür. Silindir içindeki sıvı yakıtın miktarı enjektör tipine, püskürtme karakteristiğine ve bileşen sıcaklıklarına bağlıdır. Yakıt genellikle emme supabı ve port cidarları üzerine püskürtülür. Yakıtın küçük bir miktarı burada supap açılmadan önce buharlaşır. Emme supabının açılmasıyla, yanmış gazların hızlı bir şekilde geri akışı ile port içindeki sıvı yakıtın büyük bir miktarı buharlaşır. Bununla birlikte arta kalan ve silindire giren sıvı yakıt ya yanar ve yanma gazlarının bir kısmını oluşturur ya da normal yanma işleminden kaçarak tortulara, yağ filmine veya segman boşluğuna dahil olur. Yakıt açık bir supabın arkasına püskürtüldüğü zaman daha büyük miktarda sıvı yakıt silindire girer ve daha fazla sıvı yakıt kaynaklarda depolanabilir, böylece HC emisyonları artar. Yakıtın hazırlanma işlemi de silindir içindeki sıvı yakıtı etkiler. İki farklı yakıt sistemine ait, klasik bir enjektörle önceden buharlaşmayı sağlayan bir enjektör dikkate alındığında önceden buharlaşmayı sağlayan benzin enjektörü için HC emisyonlarında %10–25 arasında bir azalma gözlenmiştir (Karamangil 2000).

#### **4- Alev sönümü**

Silindire doğru ilerleyen alev soğutulmuş yanma odası yüzeylerine ulaştığında alev sönümü meydana gelir ve yüzeye bitişik yanmamış bir karışım tabakası ayrılır. Uzun yıllar HC emisyonlarının en önemli ana kaynağı olarak yanma odası yüzeyleri üzerindeki sönüm tabakaları düşünülmüştür. Soğutma yüzeyleriyle alev sönüm mesafesi arasındaki ilişkiye dair birçok geniş araştırmalar yapılmıştır. Bununla birlikte daha sonra yapılan tahminler, alev sönümü sonrası difüzyon ve oksitlenmeden dolayı sönüm tabakaları hidrokarbonların oksitlenmesinin tamamen gerçekleştiği üzerine olmuştur. Hızlı gaz örneklemeli motor deneyleri bu tahminleri desteklemektedir (Namazian ve Heywood 1983).

Alev sönümü etkisi fakir ve seyreltik karışimli (EGR ile) çalışma şartlarında da önemli olabilir. Yakın zamandaki çalışmalar alev sönümünün HC emisyonlarına yaklaşık %5 katkıda bulunduğunu göstermiştir (Cheng ve ark. 1993).

#### **5- Tortular (birikintiler)**

Tortular normal olarak bir motorun çalışması süresince uzun bir kilometreden sonra oluşabilirler. Tortular silindir kafasında, piston kafasında ve emme manifoldu üzerinde

şekillenirler. Çalışma şartlarına bağlı olarak bir miktar yakıt bileşeni emdiklerine ve saldıklarına inanılır. Tortular emme supabının arkasında oluştukları takdirde, püskürtülen yakıt bunlar tarafından emilecektir. Bu durum motorun çalışması süresince silindirlere fakir bir dolgunun gitmesine sebebiyet verir. Emme supabı tortuları sanki daimi HC emisyonlarını çok fazla etkilemezler. Bununla birlikte, piston başı ve silindir kafası üzerindeki tortular HC emisyonları üzerinde etkiye sahiptirler. Sıkıştırma ve yanma olayları esnasında yakıt tortularca emilir. Böylece yakıt normal yanma işleminden kaçır ve daha sonra genişleme ve egzoz strokları boyunca da dışarı çıkarlar. Voltados ve ark. silindir içi tortuların HC emisyonlarını %50–100 kadar artırabileceğini göstermişlerdir. Yakın zamandaki yapılan bir çalışmada tortu etkilerinin toplam HC emisyonlarına katkısı %16 olarak hesaplanmıştır (Cheng ve ark. 1993).

## **6- Egzoz supabı sızıntısı**

Daha öncede ifade edildiği gibi egzoz supabı sızıntısı, yanmamış karışımın egzoz supabı oturma yüzeyinden egzoz portuna doğru sızmasıdır. Hızlı cevap veren alev iyonizasyon HC detektörleri ile egzoz portunda yapılan deneylerde, supap kapandığında port içinde HC konsantrasyonlarının periyodik bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu fiziksel olay HC emisyonlarına çok az bir katkıda bulursa bile (toplam HC emisyonlarının %7 sinden daha az) ihmal edilmemelidir (Hamrin 1995).

### **3.1.2. Silindir içinde oksitlenme ve alkonulma**

Normal yanma işlemi bittikten sonra yanma olayından kaçan yanmamış hidrokarbonlar saklandıkları bölgelerden çıkabilirler veya silindir içinde oksitlenirler, ya artık gazlar içinde tutulurlar ya da egzoz port ve manifoldunda oksitlenirler. Bu üç mekanizmanın her biri de motordan neşredilen yanmamış hidrokarbon miktarını azaltır.

#### **3.1.2.1.Silindir içinde oksitlenme**

Yanma olayından kaçan hidrokarbonlar yanma olayı bittikten sonra sıcak yanmış gazlar içinde oksitlenirler. Genişleme ve egzoz stroklarında yanmış gaz sıcaklıkları eğer yeterli oksijen varsa hidrokarbonları okside edecek kadar yüksektir ve hidrokarbonlar sıcak

yanmış gazlar ile karışarak içlerine difüze olurlar. Yanma odası cidarları üzerinde şekillenmiş sönüm tabakaları içerisindeki yanmamış hidrokarbonların oksitlenmesi alev sönümünden sonra 1 ms'lik zaman ölçeğinde gerçekleşir. Sönüm tabakaları ince olduklarından dolayı yanmış gazların içerisine doğru HC difüzyonu çok hızlı olacaktır. Yanmış gazlar hala yüksek sıcaklıklara sahip olduğundan oksitlenme işlemi de hızlı bir şekilde gerçekleşecektir (Heywood 1989). Silindir içerisindeki çok kısa zamandan dolayı 1000 K in altındaki sıcaklıklarda, ortam HC oksitlenmesinin meydana gelmesine müsait değildir. Egzoz supabı açıldıktan sonra, süpürme işlemi başlar, silindir içindeki gaz sıcaklığı ve basıncı azalır ve silindir içindeki oksitlenme önemli bir şekilde yavaşlar (Hamrin 1994).

Egzoz süpürme işleminden önce yanmış gazlar ile karışan herhangi bir HC oksitlenecektir. Silindir içi gaz sıcaklığı genel olarak egzoz supabının açılmasına yakın 1250 K in üstündedir. Karakteristik reaksiyon zamanı 1 ms den daha azdır. Egzoz işlemi süresince sıcaklık hızlı bir şekilde düşer ve genelde 1000 K' in altında olur.  $\tau_{HC}$  yaklaşık 50 ms den daha fazladır. Deneysel bir çalışmada simüle edilmiş segman boşluğundan çıkan hidrokarbonun tam oksitlenmesinin sadece silindir içi gaz sıcaklığının 1400 K' in üstünde olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. Bu yüzden egzoz stroku sırasında boşluk bölgelerinden veya yağ filminden ayrılan hidrokarbonların büyük bir kısmının çok az bir oksitlenmeyle kurtulabildikleri ümit edilir. Gaz örnekleme verilerinin egzoz stroku boyunca, silindir içi HC konsantrasyonlarında çok az bir azalma göstermesi bu sonucu doğrulamaktadır.

Yakıt-hava karışımı üreten kaynaklar oksitlenme için yeterli oksijene sahiptir. Diğer taraftan sadece yakıt üreten kaynaklar sıcak silindir gazları içine sadece yakıt buharı sokarlar. Kaynağın bu tipi başlangıçta yakıt buharı ile karışan oksijenden ayrılır. Bu sebepten dolayı, yakıt kaynaklarının, yakıt-hava kaynaklarına göre çok düşük mertebelerde oksitlendiklerine inanılır. Silindir içerisindeki oksitlenme miktarı ayrıca hidrokarbonların kaynaklardan çıkış hızına, genişleme ve egzoz strokları boyunca yanmış gazlarla karışım zamanına ve kaynakların silindir içindeki konumuna bağlıdır. Yakın zamanda yapılan çalışmalarla yakıt-hava kaynaklı hidrokarbonların yaklaşık 2/3 ü, yakıt kaynaklı hidrokarbonların ise yaklaşık 1/3 ünün silindir içinde oksitlendikleri belirlenmiştir.



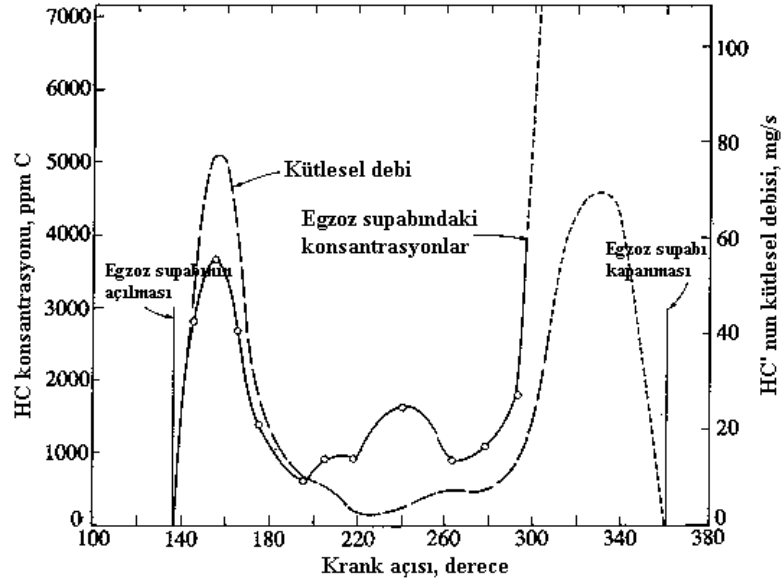
### 3.1.2.2. Hidrokarbon alıkoyma

Silindir içi oksitlenmeden arta kalan HC, ya egzoz gazları ile egzozla gönderilir ya da silindir içinde tutularak artık gazlar ile bir sonraki çevrimde taze dolgunun bir kısmını oluştururlar. Egzoz stroku boyunca pistonun gazları bir vorteks şeklinde silindir cidarları boyunca topladığı bilinir. Vorteksin segman boşluğundan ve yağ filminden arta kalan hidrokarbonların büyük bir kısmını içerdiği tahmin edilmektedir. Geometrik yapılardan ötürü hidrokarbonun bir kısmı artık gazlar içinde alıkonulur. Yakın zamandaki çalışmalardan, klasik yükleme için (1500 d/dak,  $p_{mi}=3.8$  bar) silindir içi oksitlenmeden sonra geriye kalan hidrokarbonların yaklaşık 1/3'ünün silindir içinde kaldığı hesaplanmıştır.

### 3.1.3. HC Taşınım Mekanizmaları

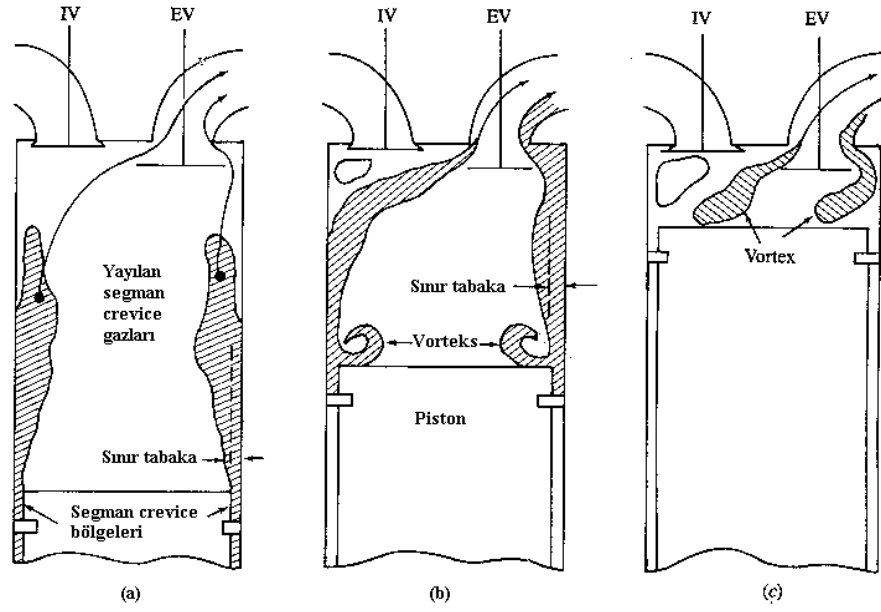
Yukarıda izah edilen mekanizmaların tümü (ateşlememe hariç) yanma odası cidarına yakın fakat silindir içindeki yanmış gaz kütlesi ile karışmamış yanmamış hidrokarbonlarla neticelenir. Bu yüzden, egzoz gazları içindeki HC dağılımının üniform olacağı beklenemez. Oluşum mekanizmalarının detayları kavranılarak egzoz stroku müddetince, egzoz portu içinde yanmamış HC konsantrasyon dağılımını belirlemek için deneyler yapılmıştır. Egzoz portu çıkışına yerleştirilen bir hızlı örneklemeli valf ile gaz konsantrasyonları ölçülmüştür. HC konsantrasyon ölçümlerinin sonuçları Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Egzoz işlemi boyunca HC konsantrasyonları önemli bir şekilde değişir. Egzoz darbeleri arasında egzoz portunda arta kalan gaz yüksek bir HC konsantrasyonuna sahiptir (Heywood 1989).

Genişleme ve egzoz strokları müddetince segman boşluğundan dışarıya doğru gerçekleşen herhangi bir jet tipi akış, yanmamış hidrokarbonları yanmış gazların içine taşıyabilir. Silindir cidarına yakın bulunan hidrokarbonların iki mekanizma yoluyla silindiri terk ettiği gösterilmiştir. İlki egzoz supabının ilk açılması esnasında meydana gelen ve silindirden dışarıya doğru akan kuvvetli gaz akışı içindeki dağılımdır. Diğeri egzoz stroku sırasında, piston tablası ile silindir cidarı arasında üretilmiş olan vortektir.



**Şekil 3.5.** Egzoz işlemi süresince egzoz supabından geçen HC kütleli debisindeki ve HC konsantrasyonlarındaki değişim,  $n=1200$  d/dak,  $\phi=1.2$ , kelebeksiz SI motor.

Şekil 3.6 da bu akış işlemleri gösterilmiştir. Şekil 3.6a da egzoz işlemi boyunca motor silindiri içindeki egzoz supabı açık olarak gösterilmiştir. Tam bu anda segman boşluk bölgelerinden çıkan ve genişleme müddetince cidar boyunca uzanan yanmamış hidrokarbonlar (silindir cidarı üzerinde yağ filminden çıkan hidrokarbonlarda vardır) silindir içi basıncın azalmasına bağlı olarak silindir içine yayılırlar. Bu malzemenin bir kısmı egzoz stroku başlangıcında meydana gelen hızlı bir hareketle yanmış gazlar tarafından sürülecektir. Egzoz başlangıcı esnasında cidarlara komşu yoğun hidrokarbon ihtiva eden gazın dağılmasının neticesinde, yanma odası cidarlarındaki termal sınır tabakanın ani incelmeye sebebiyle şeffaf bir motor üzerinde hızlı film çekme tekniğiyle gözlemlenmiştir. Bu işlem, buji dişleri arasından ve silindir kafası contası boşluğundan gelen herhangi bir hidrokarbonun katkısıyla toplam hidrokarbon emisyonlarının yaklaşık yarısını içeren ilk çıkan egzoz gazları içindeki yanmamış hidrokarbonları destekleyecektir. Egzoz stroku müddetince bu yanmış gaz karışımına yanmamış hidrokarbonlarda eklenerek egzoz işlemi devam edecektir (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6.** Silindir cidarı üzerindeki yağ filminden salınan ve segman boşluk bölgelerinden çıkıp silindiri terk eden hidrokarbonların akış işlemlerinin şematik gösterimi. (a) egzoz stroku başlangıcı, (b) egzoz stroku süresince, (c) egzoz stroku sonu

İkinci mekanizma piston tablası-silindir cidarı köşesinde, egzoz strokunun başlangıcında başlar. Egzoz boyunca pistonun hareketiyle silindir cidarındaki sınır tabaka gazları (piston ve segman boşluk hidrokarbonlarının geri kalanları da dahil) süpürülür, bir vorteks içerisinde yuvarlanırlar ve silindirin üstüne doğru itilirler. Piston tablası- silindir cidarı köşesindeki akış şeffaf bir motor üzerinde gözlemlenmiştir. Egzoz strokunun sonunda bu vorteksin yüksekliği motor kompresyon yüksekliği ile karşılaştırılabilir.

Şekil 3.6c de gösterildiği gibi, egzoz supabından uzakta silindirin üst köşesinde, benzer şekilde dönen bir akış oluşur. Bir kısmı silindir dışına süpürülen bu akış cidardan ayrılmış bir vorteks şeklindedir. Supabın en yakın köşesinde akış supap civarına doğru saptırılır. Ayrıca vorteksin bir kısmı yanma odası dışına doğru çekilme eğilimi gösterir. Bu şekilde, esasen yanma odasını bitişik konumlanmış yanmamış hidrokarbonların büyük bir kısmını içeren vorteksin önemli bir bölümünün egzoz strokunun sonunda silindiri terk etmesi mümkündür. Bu vorteks akışının egzoz strokunun sonunda ölçülen yüksek hidrokarbon konsantrasyonlarına öncülük eden bir mekanizma olacağı düşünülür. Egzozlanmış hidrokarbon kütlelerinin diğer yarısını meydana getirir ve ortalama egzoz hidrokarbon seviyelerinden çok daha yüksek olan artık gaz içerisinde

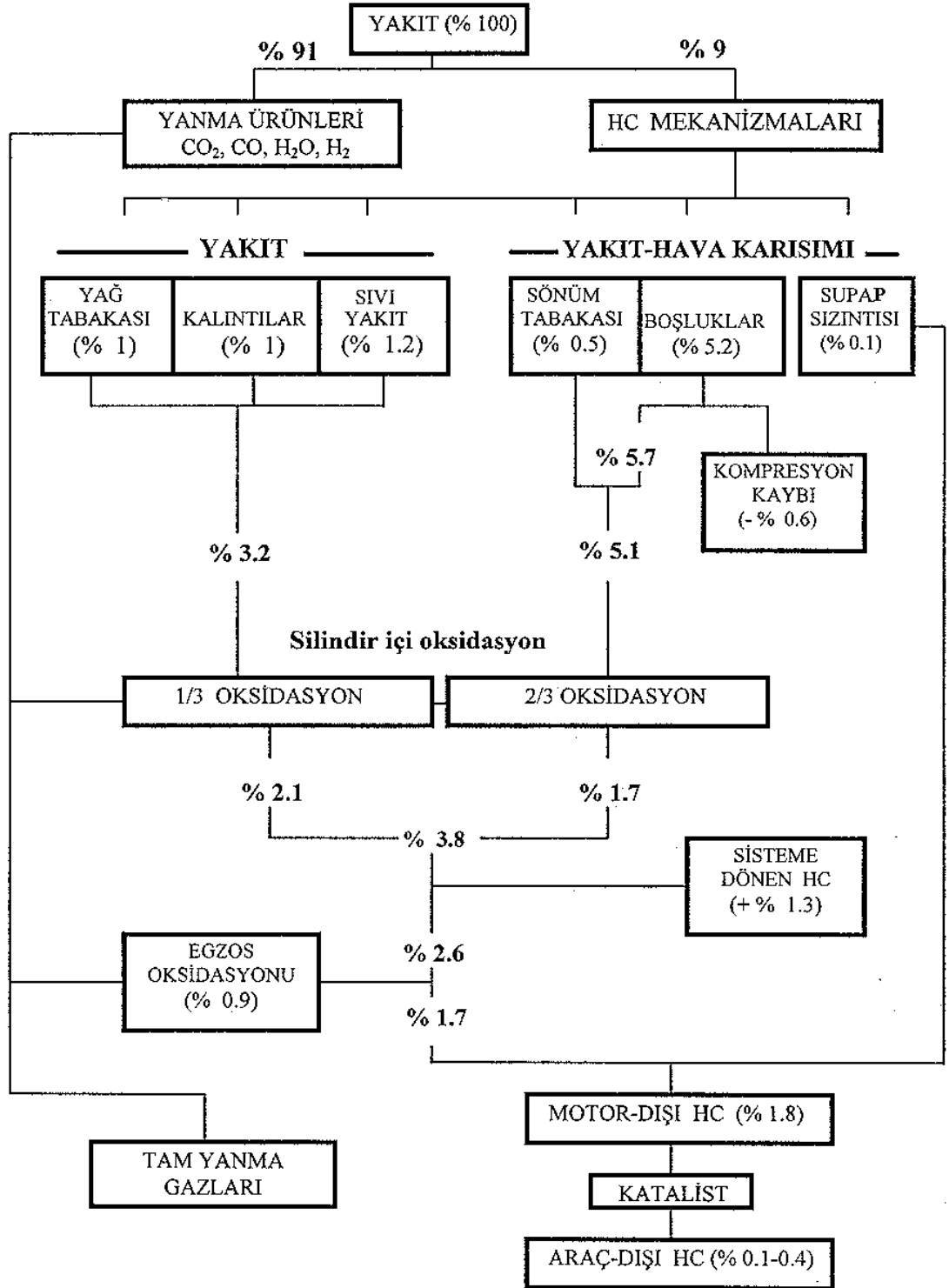
ölçülen HC konsantrasyonlarına cevap verebilecektir(Şekil 3.6). Gaz kelebeğinin tam açık pozisyonundaki çalışma şartlarında yapılan bu çalışma göstermiştir ki, silindir içinde oksitlenmesi gerçekleştirilemeyen hidrokarbonun yaklaşık 2/3 ü egzozla gönderilir, silindir içindeki gazın %95'lik kısmı egzoz supabından porta geçer.

### **Silindir içine alınan yakıt için akış diyagramı**

Yukarıda izah edilen HC mekanizmalarının hepsi uygun bir şekilde birbirlerine bağlanarak Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında her bir çevrimde silindire giren yakıt 2'ye ayrılmaktadır. Bir kısmı normal yanma işlemi ile yanmakta diğer kısmı ise daha önce anlatılan mekanizmalar tarafından paylaşılmaktadır. Kaynaklarda kendi aralarında ayrılmışlardır. Kaynakların bir kısmı bünyelerinde depoladıkları hidrokarbonları silindir içine yakıt-hava karışımı şeklinde neşrederler. Diğer bir kısmı silindir içine oksijenden ayrılmış yakıt buharı bileşenleri neşrederler ve bunların oksitlenmesi için oksijene ihtiyaç duyulur. Bir de silindir içi proseslerin hiç birisine katılmayan egzoz supabı sızıntısı vardır. Parantez içindeki sayılar emilen yakıtın bir yüzdesi olarak HC miktarlarını belirtir.

Şekil 3.7 deki en önemli şey yakıtın yaklaşık %9 unun normal yanma işleminden kaçması ve motor çıkış HC emisyonlarının yakıtın yaklaşık %1.8 ine denk gelmesidir. Kompresyon kaybının (~%0.6) ve artık hidrokarbonların (~%1.3) yeniden çevrime dahil oldukları düşünülürse yanmamış yakıt miktarının %9 dan %7 ye düştüğü görülür. Tabiidir ki taşıt emisyonları daha düşük yüzdelerle sahiptir.

Şeklin sağ tarafı yanmamış HC mekanizmalarını, sol tarafı ise normal yanma işlemi göstermektedir. Kaynaklar veya işlemler yoluyla normal yanma işleminden kaçan yakıtın bir kısmı, diyagramın üst kısmında kutularla gösterilmiştir. Silindir içinde oksitlenme, silindir içinde artık gazlarla alıkonulma, egzoz port ve manifoldunda oksitlenme ve katalizör sırasıyla şeklin alt tarafında gösterilmiştir. Parantez içindeki sayılar toplam çevrim boyunca her adım için HC emisyon indeksini (her bir çevrimde silindire giren benzinin yüzdesi) göstermektedir (Karamangil 2000).



Şekil 3.7. Her silindire giren benzin yakıtı için komple akış diyagramı

### 3.2. Matematik – Çevrim Modeli

Komple bir çevrim modeli iki alt modelden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Termodinamik model
2. Yağ filmi kaynaklı HC oluşum mekanizması modeli

Termodinamik modelde seçilen motora ait geometrik özellikler ile kullanılan yakıt-hava karışımı tanımlanmıştır. Silindir içindeki gazların özgül ısıları, viskoziteleri, basınç ve sıcaklıkları her bir krank açısı adımıyla hesap edilmektedir. Ayrıca silindir içindeki ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, yanma sonucu oluşan ürünlerin miktarları krank açısı değişimi ile bulunmaktadır.

Yağ filmi kaynaklı HC oluşum mekanizması modelinde yağ filmi tarafından yutulan ve salınan hidrokarbonların yutulma ve salınma mekanizması modellenmiştir.

Böylece bu çalışmada ele alınan iki modelle egzoz portuna kadar olan yağ filmi için yanmamış HC emisyon değerleri belirlenmiş olmaktadır.

#### 3.2.1. Termodinamik Model

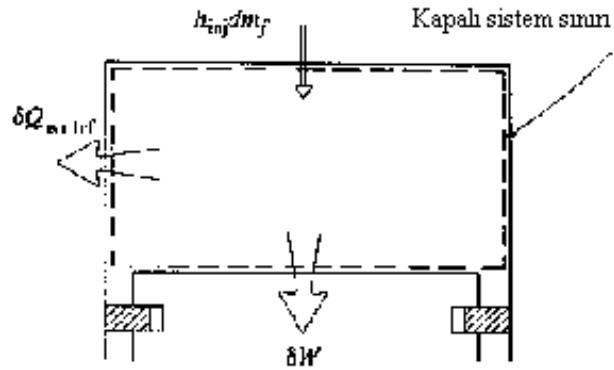
Daha önce işaret edildiği gibi bu çalışmada sıcaklık dağılımı için entalpi (enerjinin korunumu) denklemi çözülmemiş, onun yerine aşağıda kabulleri sıralanan boyutsuz bir cebirsel ifade çözülmüştür. Tabii ki bu durumda tek ve silindir içinde üniform bir sıcaklık ve basınç dağılımı kabul edilmiştir. Navier-Stokes denklemi basınç terimi ihtiva ettiğine göre, bu şekilde bir yaklaşımın çözümü kolaylaştırmakla birlikte, Navier-Stokes denkleminin çözümüne tabii olmayan bir dış müdahale anlamına geldiği kesindir. Yani bir yandan bir basınç dağılımı bulunmakta sonra bütün basınç değerleri sabit bir değerle değiştirilmektedir.

Silindir içindeki gazların krank mili açısına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlendiği bu modelde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

1. Yakıt tamamen buharlaşmaktadır.
2. Tüm gazlar özgül ısıları sıcaklıkla değişen ideal gaz olarak kabul edilmişlerdir.

3. Yanma ürünlerinde çözünme yoktur (reaksiyon sırasında, daha önce oluşan ürün cinslerinde bir farklılık olmamaktadır).
4. Isı transferi, Woschni tarafından bulunan ısı transfer katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır.
5. Yanma odası içerisindeki basınç ve sıcaklık dağılımları her krank mili açısında ünitiformdur.
6. HC modelinin çalışmaya başlamasına kadar yanmanın her safhasında taze dolgu ile egzoz ürünleri homojen bir karışım oluşturmaktadır
7. Silindir içi ısı transferinde kullanılan duvar sıcaklıkları, her krank açısında silindir için başlangıçta verilen eksenel sıcaklık dağılımının ortalaması olarak alınmaktadır.

Basınç ve sıcaklık değerleri Termodinamiğin I. Kanuna ısı kayıpları ilavesi ile elde edilen yeni eşitlikten hareketle hesaplanmıştır.



**Şekil 3.8.** Yanma odası için kapalı sistem sınırı

Kapalı sistem için I. Kanun:

$$\begin{aligned} \delta Q - \delta W &= dU \\ (\delta Q_{yak} - \delta Q_{kay}) - pdV &= mc_v dT \end{aligned} \quad (3.6)$$

İdeal gaz denklemini  $pV = mRT$  kullanılarak 3.6 eşitliği  $mdT = \frac{1}{R}(pdV + Vdp)$  ve

$du = \frac{c_v}{R}(pdV + Vdp)$  denklemleriyle tekrar düzenlenirse;

$$(\partial Q_{yak} - \partial Q_{kay}) - pdV = \frac{c_v}{R}(pdV + Vdp) \quad (3.7)$$

$$(1 + \frac{c_v}{R})p \frac{dV}{d\theta} = (\frac{\partial Q_{yak}}{d\theta} - \frac{\partial Q_{kay}}{d\theta}) - \frac{c_v}{R}V \frac{dp}{d\theta} \quad (3.8)$$

$R = c_p - c_v$ ,  $k = c_p/c_v$  ve  $c_v/R = 1/(k-1)$  ifadeleri kullanılarak eşitlik

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{k-1}{V} (\frac{\partial Q_{yak}}{d\theta} - \frac{\partial Q_{kay}}{d\theta}) - k \frac{p}{V} \frac{dV}{d\theta} \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Açık çözüm yöntemi kullanılarak elde edilen sonlu fark denklemi ise;

$$p(\theta)_i = p(\theta)_{i-1} + \frac{k-1}{V(\theta)_i} \{ [Q_{yak}(\theta)_i - Q_{yak}(\theta)_{i-1}] - [Q_{kay}(\theta)_i - Q_{kay}(\theta)_{i-1}] \} - k \frac{p(\theta)_{i-1}}{V(\theta)_i} [V(\theta)_i - V(\theta)_{i-1}] \quad (3.10)$$

elde edilir. Eğer önceki açı değerindeki basıncı ( $p(\theta)_{i-1}$ ), hacmi ( $V(\theta)$ ), yakıtla verilen enerjiyi ( $Q_{yak}(\theta)$ ) ve kayıp enerjiyi ( $Q_{kay}(\theta)$ ) biliniyorsa açıya bağlı basınç değeri ( $p(\theta)_i$ ) hesaplanabilir.

$PV^k = sbt$  izantropik ilişkisinin kullanımıyla değerlendirilen basınç değişiminde k katsayısı şu ifade ile hesaplanır:

$$k = 1,4 - 0,16\lambda \quad (3.11)$$

Anlık silindir hacmi ( $V(\theta)_i$ ), motorun geometrik özelliklerinden yararlanılarak bulunabilir.



### 3.2.1.1. Motorun geometrik özellikleri

Modelimize esas olan motor, hem emme hem de egzoz işlemlerini yapan, yanma odası merkezine yerleştirilmiş tek supabı bulunan bir motordur. Motor geometrisine ait teknik bilgiler Çizelge 3.1 de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1.** Simüle edilen motorun teknik özellikleri

Sıkıştırma oranı	8,3
Silindir çapı (m)	0,0864
Strok (m)	0,0674
Biyel kolu uzunluğu (m)	0,13
Krank yarıçapı (m)	0,0337
Kompresyon hacmi (m <sup>3</sup> )	5,41x10 <sup>-5</sup>
Strok hacmi (m <sup>3</sup> )	3,95x10 <sup>-4</sup>
Motor devri (d/dak)	2000
Giriş basıncı (bar)	1
HFk: $\lambda$	1
Ateşleme zamanı	-25 ° KMA (ÜÖN)
Yanma süresi	70 ° KMA

Emme ve egzoz supabı açılma ve kapanma zamanları ise;

Emme supabı açılma zamanı	: ÜÖN dan 10 °KMA önce
Emme supabı kapanma zamanı	: AÖN dan 34 °KMA sonra
Egzoz supabı açılma zamanı	: AÖN dan 31 °KMA önce
Egzoz supabı kapanma zamanı	: ÜÖN dan 55 °KMA sonra
Ateşleme avansı	: ÜÖN dan 25°KMA önce
Yanma sonu açısı	: ÜÖN dan 45 °KMA sonra

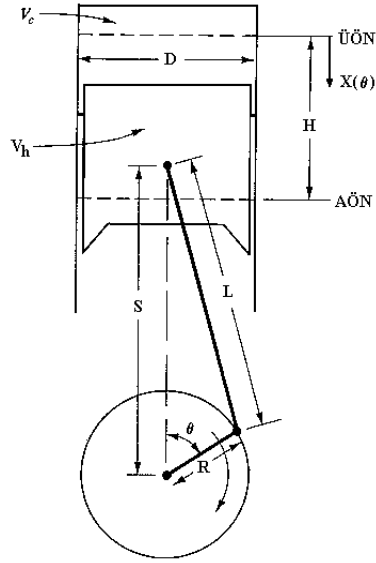
Supap açılma-kapanma açıları, ateşleme avansı ve yanma sonu açısı sınırlı sayıdaki çalışmalarla karşılaştırma yapabilmek için, onlarla uyum sağlayacak değerler seçilmiştir.

Motorun sıkıştırma oranı:

$$\varepsilon = \frac{V_c + V_h}{V_c} \quad (3.12)$$

ile ifade edilir.

Strok ile krank yarıçapı arasındaki ilişki  $H = 2R$  dir.



**Şekil 3.9.** Silindir, piston, biyel ve krank geometrisi. D: çap, H: strok, l: biyel kolu uzunluğu, R: krank yarıçapı,  $\theta$ : krank açısı

Şekil 3.9 de krank biyel mekanizmasının geometrisi gösterilmiştir. Pistonun ÜÖN dan itibaren kat ettiği mesafe  $x(\theta)$  ise;

$$x(\theta) = l + R - s$$

yazılabilir. s: krank mili eksenini ile piston pim eksenini arasındaki mesafe olmak üzere

$$s = R \cdot \cos\theta + (l^2 - R^2 \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}$$

değerine eşittir. s yukarıdaki denklemde yerine yazıldığında

$$x(\theta) = (l + R) - (R \cos(\theta) + (l^2 - R^2 \sin^2(\theta))^{\frac{1}{2}}) \quad (3.13)$$

değeri elde edilir.

Herhangi bir krank açısında yanma odası yüzey alanı  $A(\theta)$ ;

$$A(\theta) = A_{sil, kaf} + A_{piston} + \pi D x(\theta) \quad (3.14)$$

Burada  $A_{\text{sil, kaf}}$ : silindir kafası yüzey alanı,  $A_{\text{piston}} = \frac{\pi D^2}{4}$  (üstü düz pistonlar için piston başı yüzey alanıdır).

Herhangi bir krank açısında silindir hacmi;

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} x(\theta) \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $V_c$ : kompresyon hacmini göstermektedir. Ortalama piston hızının değeri ise;

$$U_p = \frac{Hn}{30} \quad (3.16)$$

Burada  $U_p$ : ortalama piston hızı (m/s), H: strok (m), n: motor devri (d/dak) dir.

### 3.2.1.2. Yakıt tipinin volumetrik verime etkisi

Yakıt tipinin volumetrik verime olan etkisi 2 başlık altında incelenir:

- 1- Yakıt buharının havanın bir kısmının yerini alması
- 2- Yakıt buharının soğutma etkisi

#### 1- Yakıt buharının havanın bir kısmının yerini alması:

Karışım manifold içerisinde gerçekleşirken dolmuş hava ve yakıt buharı şeklindedir. Bu, yakıt buharının havanın bir kısmının yerini doldurması demektir. Bu sebeple karışımdaki havanın kısmi basıncı düşmektedir. Yani volumetrik verim üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bu hususta yalnızca yakıtların kimyasal formüllerine bakarak yakıtların volumetrik performansı karşılaştırılabilir.

İzo-oktanın teorik tam yanması durumunda;



1 mol Yakıt + 1x(4,5+8)x4,762 mol Hava = 60,525 mol toplam Karışım

$$YakitOrani = \frac{1molYakit}{60,525molKarisim} = 0,0165 = \%1,65 \quad (3.18)$$

$$HavaOrani = \frac{59,525molHava}{60,525molKarisim} = 0,9835 = \%98,35 \quad (3.19)$$

Yani;  $\eta_{vl} = 0,9835 = \%98,35$

## 2- Yakıt buharının soğutma etkisi:

Gerek manifolda enjeksiyonda(SPI,MPI) gerekse doğrudan enjeksiyonda(GDI), yakıt buharının soğumaya neden olması ve karışımın yoğunluğunu arttırmasıyla hava yoğunluğu ve volumetrik verimde artış görülür. Soğuma miktarı şu şekilde hesaplanmaktadır (Clemmens 1984):

$$\Delta T = - \frac{(x.F.\Delta H_{vap} + Q)}{(1 - F + x.F).C_p} \quad (3.20)$$

$$F = \phi.f_s.\lambda$$

Burada;

$x$ : yakıtın buharlaşma yüzdesi

$f_s$ : Yakıt akışı parçalanma katsayısı (0,2 olarak alınmıştır) (Clemmens 1984).

$\phi$ : Yakıt/Hava oranı

$\lambda$ : Hava fazlalık katsayısı

$\Delta H_{vap}$ : Buharlaşma entalpisi(Btu/lb)(Ek 1)

$C_p$ :  $F < 0,5$  ise 0,240;  $F > 0,5$  ise 0,245 (Btu/lb.F)

$\Delta T$ : Soğuma miktarı ( $^{\circ}F$ )

$Q$ : Analizin ilk adımı için 0 alınan ısı değeri

İzo-oktan için  $\Delta T = -4,07^{\circ}C$  olarak hesaplanmaktadır (Ek 2). Manifold içerisine gelene kadar  $40^{\circ}C$  sıcaklığa ısınan hava izo oktan etkisiyle  $35,93^{\circ}C$  sıcaklığa soğuyacak ve yoğunluğunda artış gerçekleşecektir.

$$\eta_{v2} = \frac{\rho_i}{\rho_{i-1}} = \frac{1,143}{1,127} = 1,014 \text{ olarak elde edilir.}$$

Bunların yanı sıra volumetrik verimde statik etkiler rol oynamaktadır. Hava basıncı, hava filtresi, emme manifoldu, gaz kelebeği, emme supabı gibi elemanlardan geçerken düşüşe uğramaktadır. Bu statik etkileri de  $\eta_{v3}$  olarak nitelendirecek olursak volumetrik verim aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\eta_v = \eta_{v1} \cdot \eta_{v2} \cdot \eta_{v3} = 0,9835 \cdot 1,014 \cdot 0,85 = 0,8477 \quad (3.21)$$

Çizelge 3.2 de 5 yakıt için değerler hesaplanmıştır.  $\eta_{v3}$  ifadesi tüm yakıtlar için 0,85 olarak kabul edilmiştir. Gaz yakıtlar olan LPG ve Metan'ın soğutma etkisi olmadığından  $\eta_{v2}$  değerleri 1 olarak alınmıştır.

### 3.2.1.3. Yanma stokyometrisi

Yakıt olarak izo-oktan, etanol, metanol, LPG ve doğalgaz(metan) için incelenecektir.

İzo-oktan için;

İzo-oktan'ın formülü  $C_8H_{18}$  'dir.

Havanın molekül ağırlığı;  $M_{hava}=28,84 \text{ kg/kmol}$ ' dur.

Havanın motora giriş şartları;

$$T_{h,giriş} = 300 \text{ °K}$$

$$p_{h,giriş} = 100 \text{ kPa}$$

Havanın (atmosfer havası) girişteki yoğunluğu;

$$\rho_{h,giriş} = \frac{pM}{\tilde{R}T} = \frac{100 \times 10^3 \times 28,84}{8314 \times 300} = 1,1563 \text{ kg/m}^3$$

1 kmol yakıt için yazılacak yanma denkleminde reaktantlar



olduğuna gore; karışımın kutlesi

$$m_{krsm} = 8 \times 12 + 18 \times 1 + 12,5 \times 4,762 \times 28,84 = 1830,7 \text{ kg karışım/kmolY}$$

olur. Yakıtın aynı şartlarda girdiği kabul edilerek, yakıtın ve karışımının yoğunluğu;

$$\rho_y = \frac{100 \times 10^3 \times (8 \times 12 + 1 \times 18)}{8134 \times 300} = 4,672 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{krsm} = \frac{1 \times 4,672 + 12,5 \times 4,762 \times 1,1563}{1 + 12,5 \times 4,762} = 1,2144 \text{ kg/m}^3$$

şeklinde elde edilir.

İzo-oktan için stokyometrik oran:

$$\left(\frac{H}{Y}\right)_{stok} = \frac{12,5 \times 4,762 \times 28,84}{114} = 15,06 \text{ 'dır.}$$

Tek silindir içindeki gerçek hava kutlesi;

$$m_{h,gerçek} = \eta_v \cdot V_h \rho_{h,atm} = 0,8477 \times 3,95 \cdot 10^{-4} \times 1,1563 = 3,872 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \quad (3.22)$$

Yakıt kutlesi ise;

$$\frac{m_{h,gerçek}}{m_{y,gerçek}} = \left(\frac{H}{Y}\right)_{gerçek}, \quad \lambda = \frac{\left(\frac{H}{Y}\right)_{gerçek}}{\left(\frac{H}{Y}\right)_{stok}} = 1 \Rightarrow \left(\frac{H}{Y}\right)_{gerçek} = \left(\frac{H}{Y}\right)_{stok} \quad (3.23)$$

$$m_{y,gerçek} = \frac{m_{h,gerçek}}{\left(\frac{H}{Y}\right)_{gerçek}} = \frac{3,872 \cdot 10^{-4}}{15,06} = 2,571 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

olarak bulunur.

4 zamanlı motorlarda;

Atık gaz oranı :  $x_r=0.06-0.1$

Atık gaz sıcaklığı : 900-1000K

Atık gaz basıncı : 0.105–0.125 Mpa

sınırları arasında değişmektedir [Safgönül ve ark. 1995].

Atık gaz kütlesi:

$$m_r = \frac{V_c P_r}{\tilde{R}_r T_r} = \frac{5,41 \cdot 10^{-5} \times 115}{8,314 \cdot 950} = 7,877 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \quad (3.24)$$

Buna göre bir silindirin içerisindeki toplam kütle  $m_{dolgu0}$  olmak üzere;

$$m_{dolgu0} = m_h + m_y + m_r = 3,872 \cdot 10^{-4} + 2,571 \cdot 10^{-5} + 7,877 \cdot 10^{-7} = 4,137 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

değerini almaktadır.

**Çizelge 3.2.** Farklı yakıtlar için hesaplanan volumetrik verim ve yanma stokiyometrisi değerleri

	İZO-OKTAN C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	METANOL CH <sub>3</sub> OH	ETANOL C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	LPG C <sub>3,7</sub> H <sub>9,4</sub>	METAN CH <sub>4</sub>
$\eta_{v1}$	0,9835	0,8772	0,9346	0,9664	0,905
$\eta_{v2}$	1,0142	1,1242	1,0648	1	1
$\eta_{v3}$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$\eta_v$	0,8478	0,8382	0,8459	0,8214	0,7693
$m_{krsm}(kgKrşm/kmolY)$	1830,7	238	458,01	884,6833	290,6722
$\rho_{yak}(kg/m^3)$	4,672	1,311	1,885	2,204	0,655
$\rho_{krsm}(kg/m^3)$	1,214	1,175	1,204	1,191	1,109
<i>stok-oran</i>	15,06	6,438	8,957	15,444	17,167
$m_{h,grck} (kg)$	$3,872 \cdot 10^{-4}$	$3,828 \cdot 10^{-4}$	$3,863 \cdot 10^{-4}$	$3,752 \cdot 10^{-4}$	$3,514 \cdot 10^{-4}$
$m_{y,grck} (kg)$	$2,571 \cdot 10^{-5}$	$5,946 \cdot 10^{-5}$	$4,313 \cdot 10^{-5}$	$2,429 \cdot 10^{-5}$	$2,047 \cdot 10^{-5}$
$m_{ank}(kg)$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$
$m_{dolgu} (kg)$	$4,137 \cdot 10^{-4}$	$4,431 \cdot 10^{-4}$	$4,303 \cdot 10^{-4}$	$4,002 \cdot 10^{-4}$	$3,726 \cdot 10^{-4}$

### 3.2.1.4. Yanan yakıt miktarının hesaplanması

Bir çevrimde bir silindir içersine alınan yakıt miktarı ( $m_{y,sil}$ ) belli ise yanma olayı başladıktan sonra krank açısının her bir derecesine bağlı olarak yanan yakıt miktarı Wiebe fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Wiebe fonksiyonuna göre yanan yakıt kesri;

$$x_b(\theta) = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta\theta}\right)^n\right] \quad (3.25)$$

şeklindedir. Burada;  $x_b$ , krank açısının pozisyonu  $\theta$  da yanmış yakıt kesri;  $\theta$ , incelenen konumda açisal krank dönme miktarı;  $\theta_s$ , ÜÖN'dan itibaren ölçülen açisal krank dönme miktarı;  $\Delta\theta$ : ısı katılıminın süresi(yanma uzunluğu) dir. Burada  $a=5$  ve  $n=3$ 'tür (Karamangil ve ark. 2004).

Bir çevrimde silindire giren toplam yakıt enerjisi;

$$Q_{yak,top} = m_{y,sil} \cdot H_u \quad (3.26)$$

Herhangi bir krank açısında yanan yakıtla açığa çıkan ısı miktarı;

$$Q_{yak}(\theta) = m_{y,sil} \cdot x_b(\theta) \cdot H_u \quad (3.27)$$

### 3.2.1.5. Silindir içi ısı taşınım katsayısının hesabı

Woschni, silindir boyutları ve silindir içi akış hareketlerini de içerecek şekilde ısı taşınım katsayısındaki terimleri arttırarak aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$Nu = 0.035 Re^{0.8} \quad (3.28)$$

$k \propto T^{0.75}$ ,  $\mu \propto T^{0.62}$  kabulü yapılırsa ve  $p = \rho RT$  olarak alınırsa yukarıdaki korelasyon şu şekilde yazılabilir:

$$h_c (W / m^2 K) = 3,26 D^{-0.2} (m) p^{0.8} (kPa) w^{0.8} (m / s) T^{-0.55} (K) \quad (3.29)$$



Burada;  $D$ : karakteristik uzunluk (silindir çapı),  $w$ : silindir içindeki yerel ortalama gaz hızıdır.

Woschni; emme, sıkıştırma ve egzoz sırasında ortalama gaz hızının ortalama piston hızına orantılı olduğunu söylemiştir. Yanma ve genişleme sırasında yanma sonucunda oluşan yoğunluk farkından dolayı gaz hızlarındaki etkilenmeyi ( $\sim 10$  m/s) direkt olarak hesaplamayı denemiştir ki, bu da ortalama piston hızıyla mukayese edilebilir mertebelere sahiptir (Karamangil ve ark. 2004).

$$w = \left[ C_1 U_p + C_2 \frac{V_d T_r}{p_r V_r} (p - p_m) \right] \quad (3.30)$$

Burada  $V_d$ : strok hacmi,  $p$ : anlık silindir basıncı,  $p_r$ ,  $V_r$ ,  $T_r$ : kullanılan akışkanın belli bir referans noktasına göre (emme supabının kapanması) basıncı, hacmi ve sıcaklığıdır.  $P_m$ : motorun bir elektrik motoru ile döndürülmesiyle yanma olmadan  $p$  ile aynı krank açısında silindir içinde oluşan basınç değeridir. Watson ve Jonata'ya göre (1982)  $p_m$  değeri ölçme yerine sıkıştırma ve genişleme stroklarını politropik proses kabul ederek hesaplanabilir. Woschni (3.30) denklemi  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları için aşağıdaki eşitlikleri önermiştir:

Emme ve egzoz stroklarında:	$C_1=6.18$	$C_2=0$
Sıkıştırma strokunda:	$C_1=2.28$	$C_2=0$
Yanma ve genişleme strokunda:	$C_1=2.28$	$C_2=3.24 \times 10^{-3}$

### 3.2.1.6. Silindir içi gazlarının $c_p$ , $\mu$ ve $M_A$ değerlerinin hesabı

Yanma başlangıcına kadar silindir içindeki karışım sadece yakıt ve havadan ibarettir. Yanmanın başlaması ile silindir içindeki kompozisyon değişmektedir. Yanma Teorik Tam Yanma (TTY) kabul edildiğinde açığa çıkan ürünler  $CO_2$ ,  $H_2O$  ve  $N_2$  olacaktır. Yanma olayı devam ettikçe açığa çıkan ürünlerin miktarları da artacaktır. Yanma sona erdiğinde ise silindir içerisinde sadece yanma ürünleri kalmış olacaktır. Karışımın viskozitesi, özgül ısı ve moleküler ağırlığı hesaplanırken pistonun her bir adımında silindir içerisindeki karışımı oluşturan bileşenlerin ayrı ayrı  $c_p$ ,  $\mu$  ve  $M_A$  değerleri hesap

edilmiş ve içerideki mol sayılarına bağlı olarak bulunmuşlardır. Karışımı oluşturan her bir ürünün  $c_p$  ve  $\mu$  değerlerinin hesabı sıcaklığa bağlı olarak Ek 3 de  $M_A$  değerleri farklı yakıtlar için krank açısına bağlı olarak Ek 4 de verilmiştir. Karışımın ortalama  $c_p$ ,  $\mu$  ve  $M_A$  değerleri ise aşağıda tanımlanmışlardır:

$$c_{p,karışım} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot c_{p,i}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (3.31)$$

$$\mu_{karışım} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot \mu_{p,i}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (3.32)$$

$$M_A = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot M_{A,i}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (3.33)$$

Burada;

N: Silindir içindeki farklı gaz bileşenlerinin sayısı

$n_i$ : Her bir bileşenin mol sayısını göstermektedir.

### 3.2.1.7. Cidara olan ısı transferinin hesabı

Her bir krank açısı adımımda silindir içi gazlardan cidara olan ısı transferi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir (Karamangil ve ark. 2004):

$$\Delta Q_{kay} = Q_{kay}(\theta)_i - Q_{kay}(\theta)_{i-1} = h_g(\theta)A(\theta)[T_g(\theta) - T_w] \frac{1}{w} \frac{\pi}{180} \quad (3.34)$$

Burada;  $h$ , ısı transfer katsayısı;  $A$ , ısı kaybının olduğu yüzey alanı;  $T$ , silindir gaz sıcaklığı;  $T_w$ , silindir duvar sıcaklığı;  $w$ , krank mili açılma hızıdır (rad/s) 'dir.

Silindir içersindeki gaz sıcaklığı ideal gaz ilişkisiyle elde edilebilir:

$$T_g = \frac{pVM_{mix}}{m\tilde{R}} \quad (3.35)$$

Burada;

$M_{mix}$ : Gaz karışımının molar kütlesi(= $M_A$ )

$m$ : Gaz karışımının kütlesi

$R$ : Üniversal gaz sabiti

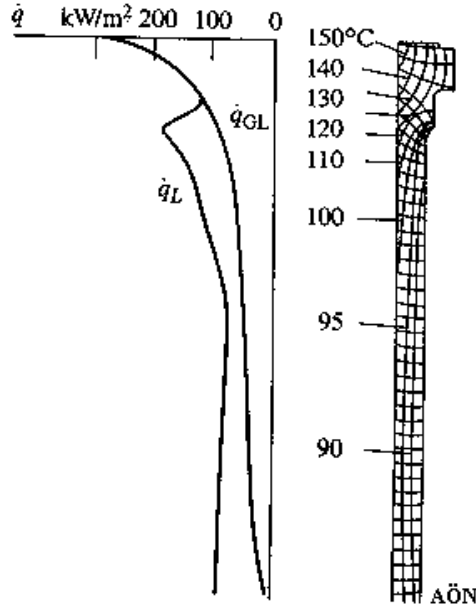
### 3.2.1.8. Silindir içi duvar sıcaklığının hesabı

Silindir içi yanmış gazlardan silindir cidarlarına aktarılan anlık ısı transferi herhangi bir  $\theta$  açısı konumu için yukarıda (3.34) denklemiyle açıklandığı gibi ifade edilir.

$$\Delta Q_{kay} = Q_{kay}(\theta)_i - Q_{kay}(\theta)_{i-1} = h_g(\theta)A(\theta)[T_g(\theta) - T_w] \frac{1}{w} \frac{\pi}{180}$$

Şekil 3.10 da belli çalışma şartlarındaki bir motorun silindir cidarları boyunca sıcaklık değişimleri verilmiştir [Heywood 1989]. Cidar üzerinde sıcaklığın azaldığı bölgeler, gaz genişleme işleminin önemli bir kısmının tamamlandığı ve ondan sonraki bölgelerdir. Yani sıcaklık silindirin üst kısmından aşağı doğru inildikçe azalmaktadır.

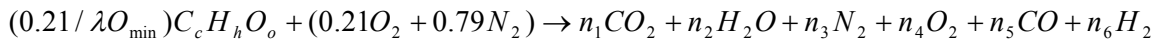
Normalde duvar sıcaklığı; silindir içi gazların sıcaklığına, silindir içi ısı taşınım katsayısına, yüzey alanına, soğutucu akışkan sıcaklığına ve soğutucu akışkan tarafındaki ısı taşınım katsayısına bağlı olarak hesaplanmalıdır. Bu terimler arasında ilişki kurulduğunda Voltera tipi bir integral deklemlerle karşılaşılır. Bu integral denklemin çözümü oldukça zor olup, duvar sıcaklığının hesaplanmasının her adımında silindir içi gaz sıcaklığının bulunmasına paralel tekrar bir iterasyonla çözüm gerektirdiğinden bu yöntemden vazgeçilmiştir. Bunun yerine Şekil 3.10 dan krank açısına bağlı olarak eşdeğer sıcaklık eğrilerinden elde edilen anlık ortalama  $T_d$  değerleri programa sabit data değerleri olarak girilmiştir. Yani Şekil 3.10 daki şartlarda çalışan motorun duvar sıcaklıklarının ortalama değeri sabit duvar sıcaklığı değeri olarak.



**Şekil 3.10.** 1500 d/dak da ve  $p_{me}=15$  bar da çalışan bir motorun silindir duvar sıcaklığının dağılımı

### 3.2.1.9. Reaksiyona giren ve çıkan ürünlerin mol sayıları ve molar konsantrasyonlarının hesabı

Yakıt  $C_cH_hO_o$  şeklinde olduğunda 1 kmol hava için kısmi eksik yanma reaksiyon denklemi (Kirkpatrick 2006);



şeklindedir. Burada;

$n_i$  : 1 kmol hava başına açığa çıkan ürünlerin mol sayıları,

$\lambda$  : hava fazlalık katsayısı,

$O_{\min}$  :yanma ürünleri için gerekli minimum oksijen miktarını gösterir.

$$n_5 = (-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}) / 2a_1$$

$$a_1 = 1 - K$$

$$b_1 = 0,42 - (0,21 \cdot (2c - o) / \lambda O_{\min}) + K(0,42 \cdot ((1 / \lambda - 1) + (0,21 \cdot c / \lambda O_{\min})))$$

$$c_1 = (-0,42 \cdot c \cdot 0,21 \cdot ((1 / \lambda) - 1) \cdot K) / (\lambda O_{\min})$$

$$K = \text{Exp}(2,743 - (1,761 / t) - (1,611 / t^2) + (0,2803 / t^3))$$

$$t = T / 1000$$

$$\begin{aligned}
& \lambda \geq 1 \text{ için;} \\
n_1 &= (c.0,21)/(\lambda O_{\min}) \\
n_2 &= (h.0,21)/(2\lambda O_{\min}) \\
n_3 &= 0,79 \\
n_4 &= 0,21(1 - (1/\lambda)) \\
n_5 &= 0, \quad n_6 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \lambda < 1 \text{ için;} \\
n_1 &= (c.0,21)/(\lambda O_{\min}) - n_5 \\
n_2 &= 0,42 - (2c - o).0,21/\lambda O_{\min} + n_5 \\
n_3 &= 0,79, \quad n_4 = 0, \quad n_5 = n_5, \\
n_6 &= 0,42[(1/\lambda) - 1] - n_5
\end{aligned}$$

Reaksiyona giren yakıtın başlangıçtaki mol sayısı;

$$n_{y,sil0} = \frac{m_{y,sil0}}{M_y} \quad (3.36a)$$

Bu ifadeden hareketle reaksiyona giren havanın başlangıçtaki mol sayısı;

$n_{h,sil0} = \lambda \cdot h_{\min} \cdot n_{y,sil0}$  dir. Burada  $h_{\min} = O_{\min} \cdot 4,762$  dir.

Yanan yakıtın kütlesi;  $m_{y,yanan} = m_{y,sil0} \cdot x_b(\theta)$  şeklinde verilmiş idi. Yanan yakıtın mol sayısı ise;

$$n_{y,yanan} = \frac{m_{y,yanan}}{M_y} \quad (3.36b)$$

şeklinde olur.

Silindir içinde kalan yakıtın mol sayısı;

$$n_{y,silkalan} = n_{y,sil0} - n_{y,yanan} = \frac{m_{y,sil0} [1 - x_b(\theta)]}{M_y} = n_{y,sil0} [1 - x_b(\theta)] \quad (3.36c)$$

şeklinde dir. Benzer şekilde teorik tam yanma için diğer bileşenlerin mol sayıları;

$$n_{h,silkalan} = n_{h,sil0} - n_{h,yanan} = \frac{m_{h,sil0} [1 - x_b(\theta)]}{M_h} = n_{h,sil0} [1 - x_b(\theta)] \quad (3.36d)$$

veya

$$n_{h,silkalan} = n_{y,silkalan} \cdot HMOLS0 \quad (3.36e)$$

$$n_{CO2} = c \cdot n_{y,yanan} \quad (3.36f)$$

$$n_{H2O} = h / 2 \cdot n_{y,yanan} \quad (3.36g)$$

$$n_{N2} = \lambda \cdot O_{\min} 3,762 \cdot n_{y,yanan} \quad (3.36h)$$

### 3.2.2. Yağ filmi kaynaklı HC oluşum mekanizmalarının modellenmesi

Genel olarak kaynağı ne olursa olsun HC emisyon oluşum mekanizması şu adımlardan oluşmaktadır (Şekil 3.11):

- i. Normal yanma işleminden kaçan hidrokarbonların oluşturduğu HC kaynak mekanizmaları
- ii. Bu hidrokarbonların silindir içinde oksidasyonu
- iii. Egzoz stroku boyunca silindir içinde kalan hidrokarbonların bir kısmının alıkonulması
- iv. Ezoz port ve manifoldunda hidrokarbonların oksidasyonu

Bu dört işlem birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$m_{HC,motor,çıkış} = \sum_i m_{HC,i} (1 - f_{oxi,cyl,i})(1 - f_{ret,cyl,i})(1 - f_{oxi,exh,i}) \quad (3.37)$$

Burada;

$m_{HC,i}$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarı

$f_{oksçev,i}$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarının oksitlenen kesri

$(1 - f_{oksçev,i})$ : i kaynağından bir çevrimde neşredilen HC miktarının oksitlenmeden kaçan kesri

$f_{kalçev,i}$ : Oksitlenmeden kaçan hidrokarbon miktarının silindir içinde kalabilen kesri

$(1 - f_{kalçev,i})$ : Oksitlenmeden kurtulan hidrokarbonların silindir dışına çıkan kesri

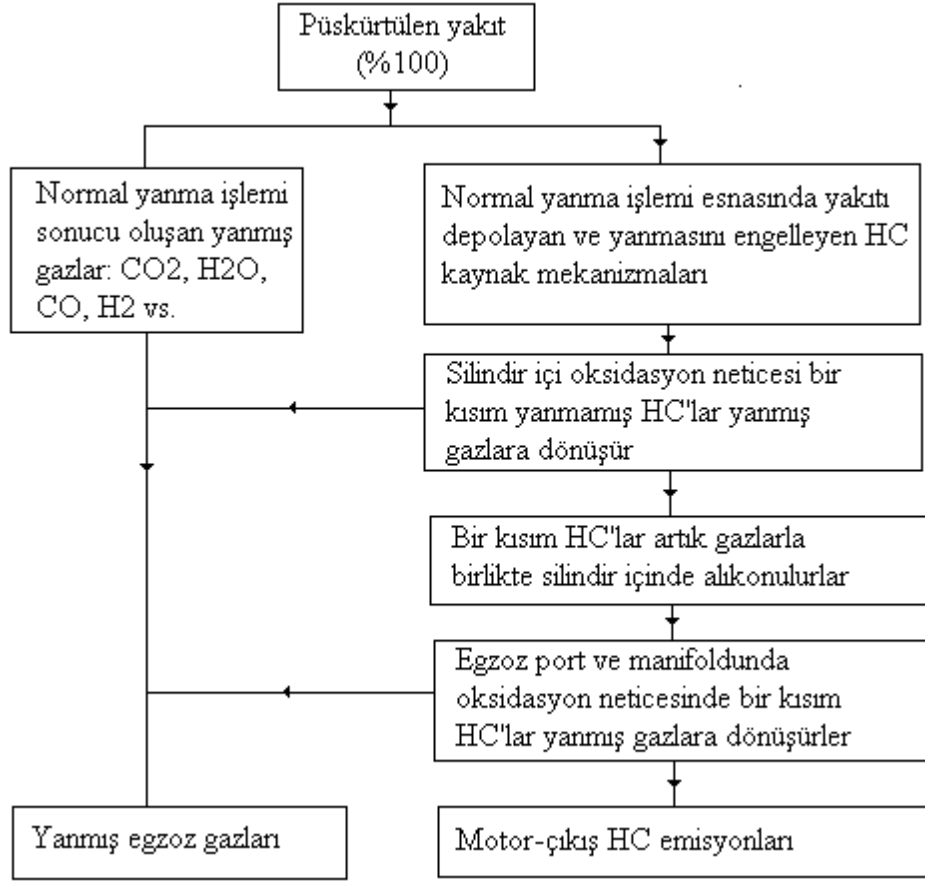
$f_{oksegzoz,i}$ : Silindir dışına çıkan hidrokarbonların egzozda oksitlenen kesri

$(1-f_{oksegzoz,i})$ : Silindir dışına çıkan hidrokarbonların egzozdan atmosfere atılan kesri şeklindedir.

Normal yanma işlemi esnasında yanmayan hidrokarbonların miktarı kaynak mekanizmalarıyla belirlenmiştir. Daha önce tarif edildiği gibi, yanma olayından kaçan hidrokarbonlar, sönüm tabakaları, egzoz supabı sızıntısı, tortular (birikintiler), sıvı yakıt ve yağ filminden oluşmaktadır. Her kaynak kendi yapısına uygun olarak ya yakıt-hava-atık gaz ve yanma gazlarının ya da sadece yakıtın normal yanma işleminden kaçmasına müsaade eder. Hidrokarbonlar iki farklı karaktere sahip kaynaktan neşrolunur. i. Yakıt-hava kaynaklı, ii. Yakıt kaynaklı. Çizelge 3.3 de kaynaklar, bağlı olduğu kategoriler ve motor çıkış HC emisyonlarına katkıları özetlenmiştir.

**Çizelge 3.3.** Hidrokarbon kaynaklarının motor-çıkış HC emisyonları üzerine etkisi

Yakıt-hava kaynaklı		Yakıt kaynaklı	
Boşluklar (Crevices)	%38	Yağ filmi	%16
Sönüm tabakaları	%5	Tortular	%16
Egzoz supabı sızıntısı	%5	Sıvı yakıt	%20



**Şekil 3.11.** Her silindire her çevrimde giren yakıt için şematik akış diyagramı

Yağ filmi çevrim boyunca yakıtı emme ve salma işlemi yapmaktadır. Emme ve salma olayının sıcaklığın, basıncın, yağ filmi kompozisyonunun ve kalınlığının bir fonksiyonu olduğu kabul edilmiştir. Yine yağ filminden neşredilen yanmamış yakıt miktarı, yağ filminin pozisyonuna, motorun devir sayısına, difüzyon katsayısına, motorun çevrim sayısına ve yağ içindeki başlangıçtaki yakıt konsantrasyonuna bağlıdır.

Daha önce tartışıldığı gibi, yağ filminin yakıtı emme-salma işleminin karmaşık fiziki konveksiyon ve difüzyon olaylarını içermektedir. Ara yüzde yağ-yakıt buharı dengesinin Henry kanunu ile kontrol edildiğine inanılmaktadır. Yağ filmi kaynaklı HC oluşum mekanizması modeli Henry kanunundan türetilen iki farklı terim ile difüzyon denklemini içermektedir.

Henry kanunundan türetilen ifadeler;

1. Sıcaklığın bir fonksiyonu olan Henry sabiti için bir eşitlik
2. Yakıtın kısmi basıncı için bir eşitlik



Yağ yüzeyinde periyodik olarak üç farklı olay tekrarlanır. Birincisi, yağ yüzeyinin yakıt-hava karışımı ile temasta olduğu, ikincisi yağ yüzeyinin pistonla örtüldüğü durumdur. Üçüncüsü ise yağ yüzeyinin yanmış gazlarla temas halinde olduğu durumdur. Yağ filmindeki emme ve salma işlemi, filmin piston tarafından açılan kısımlarında gerçekleşmektedir.

### 3.2.2.1. Difüzyon eşitliği

Yukarıda izah edilen yağ filmi içerisine yakıtın emilip salınması, yağ yüzeyindeki konsantrasyonun ani değişiminden dolayı, tek boyutlu yakıt difüzyonu problemi olarak davranış gösterir.

Silindir cidarındaki yağ filmi içerisine, yakıt bileşenlerinin emilme ve salınma işlemine ait modelin temel kabullerinden biri, yağ içerisine difüzyonun sınırlayıcı faktör olmasıdır. Bu mantıklı kabul difüzyon katsayısından dolayıdır ki (D), bu katsayının sıvı fazındaki değeri gaz fazındaki değerinden  $10^4$  kat daha küçüktür. Ayrıca yağ filmi içinde hücreler arasındaki geçiş ihmal edilmiştir. Bu kabuller ile yağ filmi içine emilen yakıt konsantrasyonunun tamamen analitik olarak hesaplanması mümkün olmaktadır.

Difüzyon katsayısı aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanabilir (Salazar 1996):

$$D = 1,33.10^{-11} \frac{T_o^{1,47} \mu_o^{\left(\frac{10,2}{V_A} - 0,791\right)}}{V_A^{0,71}} \quad (3.38)$$

$$V_A = 0,285.V_c^{1,048}$$

Burada yağın viskozitesi( $\mu_o$ ) Kelvin sıcaklığında Walther eşitliği ile ilişkili olduğu aşağıda gösterilmektedir( Norris ve Hochgreb 1994):

$$\log_{10} \log_{10}(\mu_o / \rho_o + 0,7) = 8,17 - 3,16.\log_{10}(T_o) \quad (3.39)$$

Bu denklemle (3.39) SAE-10w30 yağı için viskozite değerleri hesaplanabilmektedir. Denklemde yer alan yoğunluk değeri SAE-10w30 yağı için referans sıcaklıktaki yoğunluk değeri baz alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\rho(T_o) = \rho(T_{o_0}) - 0,63(T_o - T_{o_0})$$

Bu denklemlerde (3.45) ve (3.46);

D: Difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )

$T_o$ : Yağın sıcaklığı (K)

$V_c$ : Yakıtın kritik molar hacmi ( $cm^3/mol$ ) (Reid ve ark. 1987)

$\mu_o$ : Yağın viskozitesi (g/m.s)

$\rho_o$ : Yağın yoğunluğu ( $g/cm^3$ )

$T_{o_0}$ : Referans yağ sıcaklık değeri (288,5 K)

$\rho(T_{o_0}) = 894 kg / m^3$  (Referans sıcaklıktaki yoğunluk değeri)

Çizelge 3.4 'de farklı yakıtların farklı krank mili açılarında ve buna bağlı duvar sıcaklıklarında hesaplanan değerleri verilmektedir(Ek 5).

**Çizelge 3.4.** Modelde hesaplatılan viskozite ve difüzyon katsayısı sonuçları

KMA	TWALL (K)	$\mu_o$ (g/m s)	$D_{IO}$ ( $m^2/s$ )	$D_{MTNL}$ ( $m^2/s$ )	$D_{ETNL}$ ( $m^2/s$ )	$D_{LPG}$ ( $m^2/s$ )	$D_{MTN}$ ( $m^2/s$ )
180 <sup>0</sup>	363,15	12,91	$2,96.10^{-10}$	$1,32.10^{-9}$	$8,46.10^{-10}$	$5,66.10^{-10}$	$1,7.10^{-9}$
270 <sup>0</sup>	369,59	10,98	$3,43.10^{-10}$	$1,48.10^{-9}$	$9,61.10^{-10}$	$6,48.10^{-10}$	$1,9.10^{-9}$
360 <sup>0</sup>	424,59	3,81	$9,13.10^{-10}$	$3,26.10^{-9}$	$2,28.10^{-9}$	$1,62.10^{-9}$	$3,95.10^{-9}$
450 <sup>0</sup>	369,6	10,98	$3,43.10^{-10}$	$1,49.10^{-9}$	$9,61.10^{-10}$	$6,48.10^{-10}$	$1,9.10^{-9}$
540 <sup>0</sup>	359,6	14,18	$2,73.10^{-10}$	$1,24.10^{-9}$	$7,87.10^{-10}$	$5,24.10^{-10}$	$1,6.10^{-9}$

Şekil 3.12 de yağ filminin kesit resmi gösterilmiştir. Şekil 3.12 deki koordinat sisteminin kullanımı ile yağ filmi içindeki yakıtın konsantrasyonu  $c(x,t)$ , difüzyon eşitliğinin kullanımı ile silindir cidarına doğru olan mesafenin ve zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir.

Difüzyon eşitliği;

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.40)$$

Bu denklemden (3.40);

c: yağ filmi içine (tek bir hücre için) emilen yakıt miktarının o hücre içindeki yağ miktarına oranı, yani konsantrasyon.

D: yağ filmi içerisinde ilerleyen yakıtın difüzyon katsayısı

x: yağ filmi yüzeyinden silindir cidarına doğru olan mesafe

t : zaman

Sınır şartları:

i.  $c(x,0)=0$   $t=0$  anında bütün noktadaki konsantrasyonlar sıfırdır. Yani;

$$c(1,1), c(2,1), \dots, c(7,1)=0$$

$$c(1,2), c(2,2), \dots, c(7,2)=0$$

.....

.....

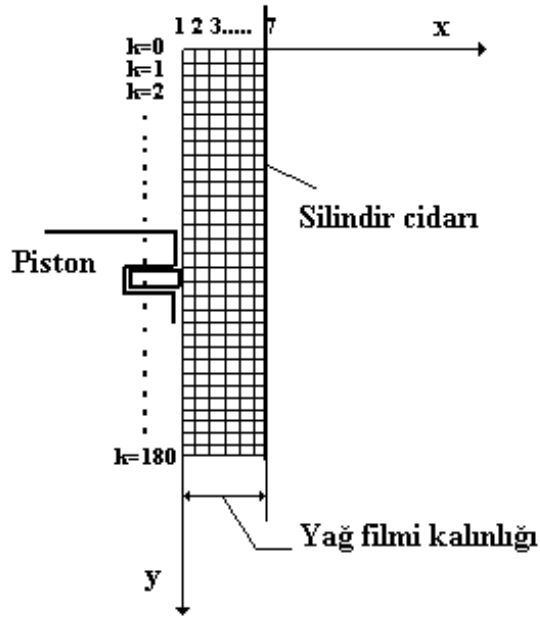
$$c(1,180), c(2,180), \dots, c(7,180)=0$$

ii.  $\frac{\partial c}{\partial x}(\delta, t) = 0$  silindir duvarında konsantrasyonun konuma göre değişimi tüm t

adımlarında sıfırdır.

iii.  $c(0,t)=F(t)$

silindir gazları ile yağ filmi yüzeyi arasındaki sınır şartı. Henry kanunundan bulunacak olan konsantrasyon değeridir.



**Şekil 3.12.** Yağ filmi boyunca oluşturulan gridlerin şematik gösterimi

Burada birinci sınır şartı sıfır olarak verilebildiği gibi (başlangıçta yağ filmi hiç yakıt ihtiva etmiyor demektir) çevrim tekrarlanmak suretiyle hesaplanacak olan değerlerde başlangıç sınır şartı olarak kullanılabilirler. Üçüncü sınır şartındaki  $F(t)$  bilinen bir fonksiyondur ve en basit ifadelerle hesaplanabilir. Silindir gazları ile yağ filmi yüzeyi arasında Henry kanunu uygulanmak suretiyle bulunur.

Sıvı-gaz arayüzü için Henry kanunu uygulanırsa;

$$H \cdot x_2 = p_2 \Rightarrow x_2 = \frac{p}{H} \left( \frac{p_2}{p} \right) = \frac{p}{H} Y_2 \quad (3.41)$$

Burada;

$x_2$ : yağ içindeki yakıtın molar oranı

$p_2$ : silindir gazlarındaki yakıtın kısmi basıncı

$H$ : yağ içinde erimeyen yakıt için Henry sabiti

$p$ : gaz karışımının toplam basıncı

$Y_2$ : gaz karışımı içindeki yakıtın molar oranı şeklindedir.

$n_{yağ}$  ve  $n_{yak(s)}$  sırasıyla sıvı fazdaki yağın ve yakıtın mol sayıları,  $n_{yak(g)}$  ve  $n_{dolgu0}$  da sırasıyla gaz fazındaki yakıtın ve diğer tüm karışımın (yakıt+hava+artık gazlar) mol sayıları olmak üzere bu ifadeler (3.40) nolu eşitlikte yerlerine yazılırlarsa;

$$\frac{n_{yak(s)}}{n_{yağ} + n_{yak(s)}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{dolgu0}}$$

bulunur. Yağ filmi içerisindeki yakıtın mol sayısının yağa göre çok az olacağı ve dolayısı ile ihmal edilebileceği kabulü ile eşitlik

$$\frac{n_{yak(s)}}{n_{yağ}} \cong \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{dolgu0}} \quad (3.42)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$m_{yak(s)}$ : sıvı yakıtın kütlesi

$m_{yağ}$ : sıvı yağın kütlesi

$m_{yak(g)}$ : gaz halindeki yakıtın kütlesi

$m_{dolgu0}$ : gaz halindeki toplam kütle (yakıt+hava+artık gaz)

$M_{yağ}$ : yağın molekül ağırlığı

$M_{yak(s)}$ : sıvı haldeki yakıtın molekül ağırlığı

$M_{yak(g)}$ : gaz halindeki yakıtın molekül ağırlığı

$M_{dolgu0}$ : gaz halindeki toplam kütle molekül ağırlığı

Önceki eşitlikte mol sayıları yerlerine yazılırsa;

$$\frac{m_{yak(s)} / M_{yak(s)}}{m_{yağ} / M_{yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)} / M_{yak(g)}}{m_{dolgu0} / M_{dolgu0}}$$

$$\frac{m_{yak(s)}}{m_{yağ}} = p \cdot \frac{m_{yak(g)}}{m_{dolgu0}} \cdot \frac{M_{dolgu0}}{H \cdot M_{yak(g)}} \cdot \frac{M_{yak(s)}}{M_{yağ}}$$

Burada;

$$H^* = H \left( \frac{M_{yağ}}{M_{yak(s)}} \right)$$

$$Y_m(t) = \frac{m_{yak(g)}}{m_{dolgu0}}$$

$Y_m(t)$  gaz fazındaki yakıtın kütleli oranı,  $p(t)$  silindir basıncı ve;

$$K = \frac{M_{dolgu0} \cdot M_{yak(s)}}{H \cdot M_{yağ} \cdot M_{yak(g)}} = \frac{M_{dolgu0}}{H^* \cdot M_{yak(g)}}$$

olmak üzere;

$$F(t) = c(0,t) = \frac{m_{yak(s)}}{m_{yağ}} = p(t) \cdot Y_m(t) \cdot K \quad (3.43)$$

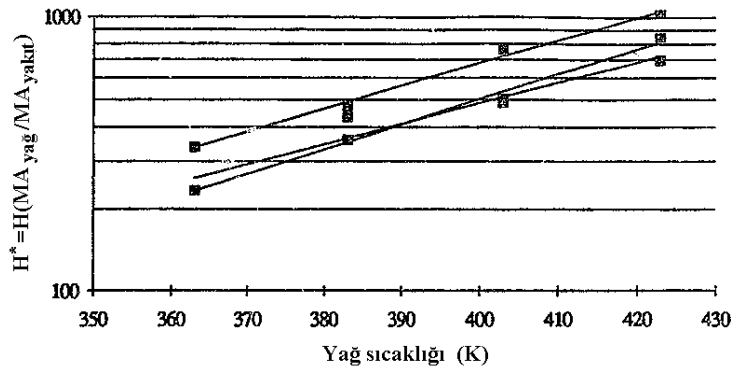
şeklinde bulunmuş olur.

Yağ ve yağ kombinasyonları içindeki farklı yakıtlar için yapılan deneylerde Henry sabitinin yağ sıcaklığı ile üssel olarak değiştiği tespit edilmiştir. Şekil 3.13 de 3 farklı tip yağ için, yağ sıcaklığına bağlı olarak Henry sabitinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.13 deki eğrilerden aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$H^* \propto (10^{0.0082 T_{yağ}})$$

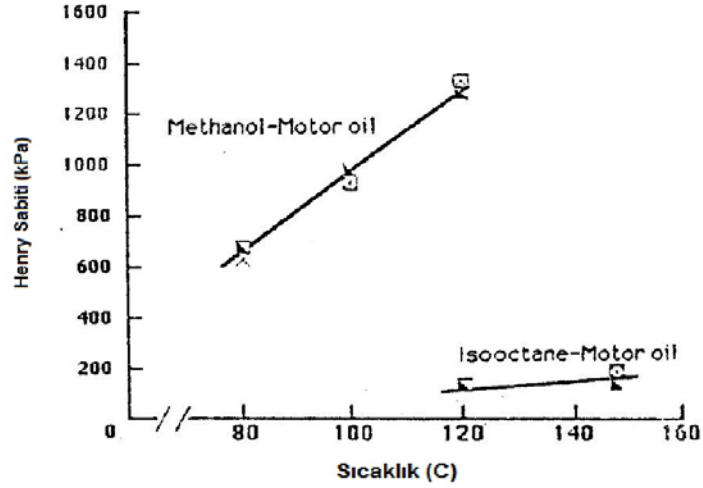
Genel çalışma şartlarında yağ sıcaklığı ile soğutma suyu sıcaklığı orantılı kabul edilir.

$$T_{yağ} \propto T_{soğ,su}$$



**Şekil 3.13.** 3 farklı yağlama yağı içinde çözünen izo-oktan için  $H^*$ 'ın yağ sıcaklığı ile değişimi

Literatürdeki araştırmalar doğrultusunda Henry sabitinin farklı yakıtlar için değerleri Çizelge 3.5 ve Şekil 3.14 ve 3.15 de özetlenmiştir (Korematsu ve ark. 1986,1989,1990,1991). Henry sabiti değerleri deneysel veriler neticesinde elde edildiğinden tüm yakıtların her bir sıcaklıktaki Henry sabiti değerine ulaşılamamaktadır. Bu yüzden literatürde yer alan değerler üzerinde eğri uydurma yöntemine başvurulmuştur.



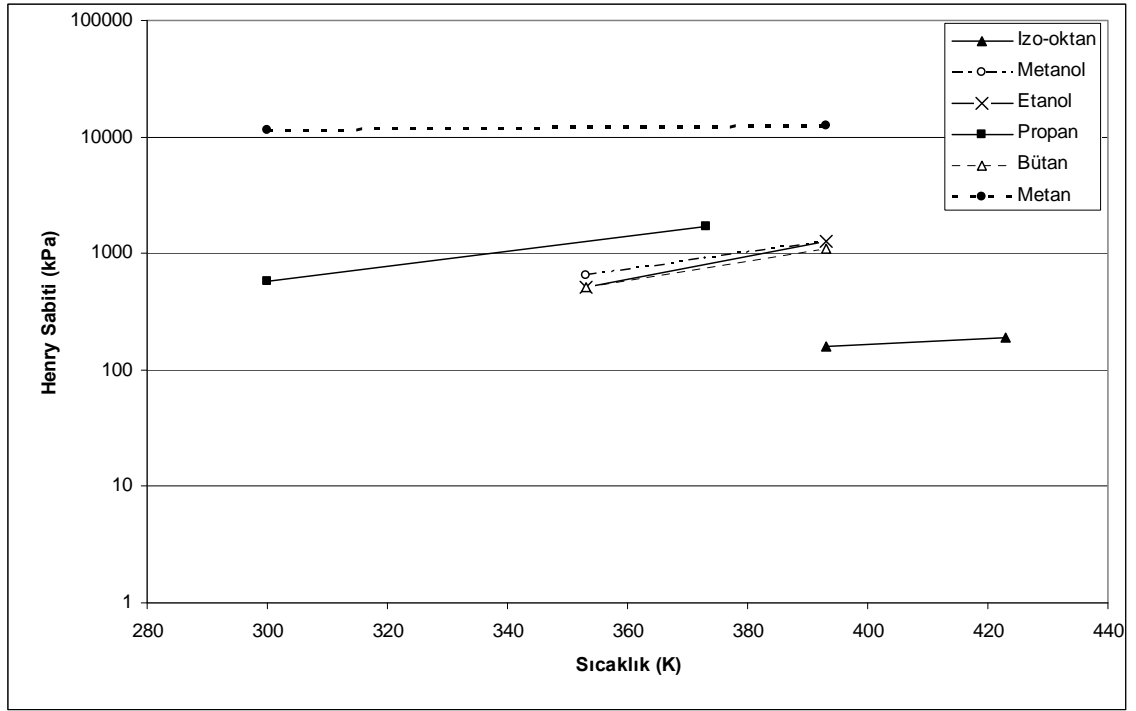
Şekil 3.14. Metanol ve izo-oktan yakıtlarının Henry sabiti değerlerinin sıcaklığa göre değişimi(Korematsu ve Yuo, 1989)

Çizelge 3.5. Farklı yakıtlar için literatürde yer alan sıcaklık ve Henry sabiti değerleri

Yakıtlar	izo-oktan	metanol	etanol <sup>1</sup>	propan	bütan	metan <sup>2</sup>
Sıcaklık(K)	393	423	353	393	353	393
Henry Sabiti(kPa)	160	190	650	1280	517	1279
				585	1700	830
						11500

<sup>1</sup> Etanol yakıtıyla ilgili literatürde yağ içerisindeki çözünmeye bağlı Henry Sabiti değeri bulunmadığından, bir diğer alkol olan metanole yakın değerler varsayımında bulunulmuştur.

<sup>2</sup> Metan yakıtının yalnızca 300 K 'deki Henry sabiti değerini bilindiğinden dolayı Şekil 3.16 da bir eğri uydurma varsayımında bulunulmuştur.



**Şekil 3.15.** Farklı yakıtların Henry sabitlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

(3.43) nolu eşitlik yardımıyla pistonun her konumunda yağ filmi yüzeyindeki konsantrasyon değeri hesaplanabilmektedir. Mesela piston  $5^\circ$  hareket ettikten sonra, o adımdaki  $p(t)$  değeri,  $Y_m(t)$  değeri ve  $K$  değeri hesaplanabilmektedir. Yağ filmi pistonun hareketine bağlı olarak  $[x(\theta)]$  180 farklı hücreye ayrılmıştı. Henry kanununa göre hesaplama yaptığımızda piston  $5^\circ$  hareket ettikten sonraki elde edilen  $c(0,t)=F(t)$  yüzey konsantrasyonu değerinin pistonun süpürdüğü 5 hücre içinde eşit olduğunu söylemektedir.

Difüzyon denklemini sonlu fark metodu kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Sonlu fark metodlarından açık çözüm (explicit) metodu kullanılmıştır.

Difüzyon denklemini;

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.44)$$



I. türev için ileri sonlu fark, II.türev için merkezi sonlu fark kullanılırsa;

$$\frac{c_i^{k+1} - c_i^k}{\Delta t} = D \left( \frac{c_{i+1}^k - 2c_i^k + c_{i-1}^k}{\Delta x^2} \right) \quad (3.45)$$

$$c_i^{k+1} = c_i^k + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (c_{i+1}^k - 2c_i^k + c_{i-1}^k) \quad (3.46)$$

şeklinde bir sonlu fark denklemi elde edilir. Burada i indisi x yönündeki ilerlemeyi, k indisi zaman yönündeki ilerlemeyi gösterir. Denklemin çözümünün doğru kabul edilebilir olması için denklemin uygunluk ve kararlılık şartlarını sağlaması gerekmektedir. Kararlılık şartını ağırlayan  $\Delta x$  ve  $\Delta t$  aralıkları sırasıyla  $0.5 \mu m$  ve  $8,333.10^{-5}$  s olarak seçilmiştir. Bu durumda  $\gamma = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} = 0.0166$  olarak hesap edilmiş olur.

Herhangi bir K adımında, o adımdaki yağ filmi hücresi içerisindeki ortalama konsantrasyon değeri  $c_{ort}(K)$  ile gösterilirse;

$$c_{ort}(K) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{N} \quad (3.47)$$

formülü ile verilebilir. Burada;

$c_i$ : x doğrultusunda her bir noktanın konsantrasyonu

N: nokta sayısını göstermektedir.

Üniform yağ filmi kalınlığında ve sabit yağ yoğunluğunda silindir cidarı üzerinde strok boyunca oluşan yağ kütlesi;

$$m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi D H \quad (3.48)$$

olarak tariflenir. Tek bir hücreye ait yağ kütlesi ise;

$$\Delta m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi D \Delta y \quad (3.49)$$

şeklindedir.

Yağ filmi içine emilme işlemi yukarıda izah edildiği gibi; silindir içi basınç değerine, silindir içinde kalan yakıt miktarına ve Henry sabitine bağlıdır. Buna göre yağ filminden ilk salınan hidrokarbonların ~1/3'ünün tamamen oksitlendiği bu da ~470 °KMA na karşılık gelmektedir, daha sonra salınan 2/3'lük kısmın ise oksitlenmeyerek silindir içinde kaldığı kabul edilmiştir. Böylece yağ filminden salınan hidrokarbonların oksitlenme işlemi ~470° bitmektedir. Dolayısıyla program bundan sonra silindir içine yayılan hidrokarbonların konsantrasyon dağılımını vermektedir. Model sonuçlarına göre emilme işlemi ~0°-369° KMA açıları arasında olmaktadır. Yaklaşık olarak silindir içi maksimum basınçtan sonrada ~370°~540° KMA arası yağ filminden salınımlar olmaktadır.

### 3.2.2.2. Silindir içi yakıt miktarının hesabı

Silindir içine bir çevrimde emilen toplam yakıt miktarı  $m_y$  ile gösterilmiştir. Bu yakıtın bir kısmının yağ filmi tarafından emilmesi sonucu silindir içinde kalan ve yanma olayına katılan yakıt miktarı bir miktar azalmış olacaktır. Bu miktar  $m_{y,sil}$  ile gösterilirse;

$$m_{y,sil} = m_y - m_{y,yağ} \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir.

Her bir krank açısında silindir içinde bulunan yakıt miktarının hesabı Çizelge 3.6 da bir tablo halinde gösterilmiştir. Bu çizelgede yer alan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir:

*MYAKSIL*: 0-335° arası silindir içinde bulunan yakıt için kullanılan bir terimdir.

*MYSILYS*: 335-720° arası silindir içinde bulunan yakıt için kullanılan bir terimdir.

*MYKAL*: 470° den sonra silindir içinde kalan yakıt (Bu yakıt yağ filminden gelen ve bu dereceden sonra artık yanmayan yakıtların toplamıdır) için kullanılan bir terimdir. Yağ filminden salınan yakıtın ise 1/3 ü yanmaktadır. Yağ filminden çıkan karışımın 1/3 ünün yandığı nokta yaklaşık 470° civarındadır. Bu açıdan sonra çıkan karışım ve yakıt artık yanmamaktadır. İşte bunlar *MYKAL* ile gösterilmiştir.

*MYAK0*: Tek bir silindir içine alına toplam yakıt miktarı

*EMHCTOP*: Herhangi bir krank açısında yağ filmince emilen toplam yakıt miktarı

*MYANTETA*: Herhangi bir krank açısına kadar silindir içinde yanan toplam yakıt miktarı

*DELYAGIR*: Her bir derecelik ilerlemede yağ filmi tarafından emilen yakıt miktarı

*DSALHC*: Her bir derecelik ilerlemede yağ filmi tarafından salınan yakıt miktarı

**Çizelge 3.6.** Silindir içine hapsolunan ve yanma olayına katılan yakıt miktarı

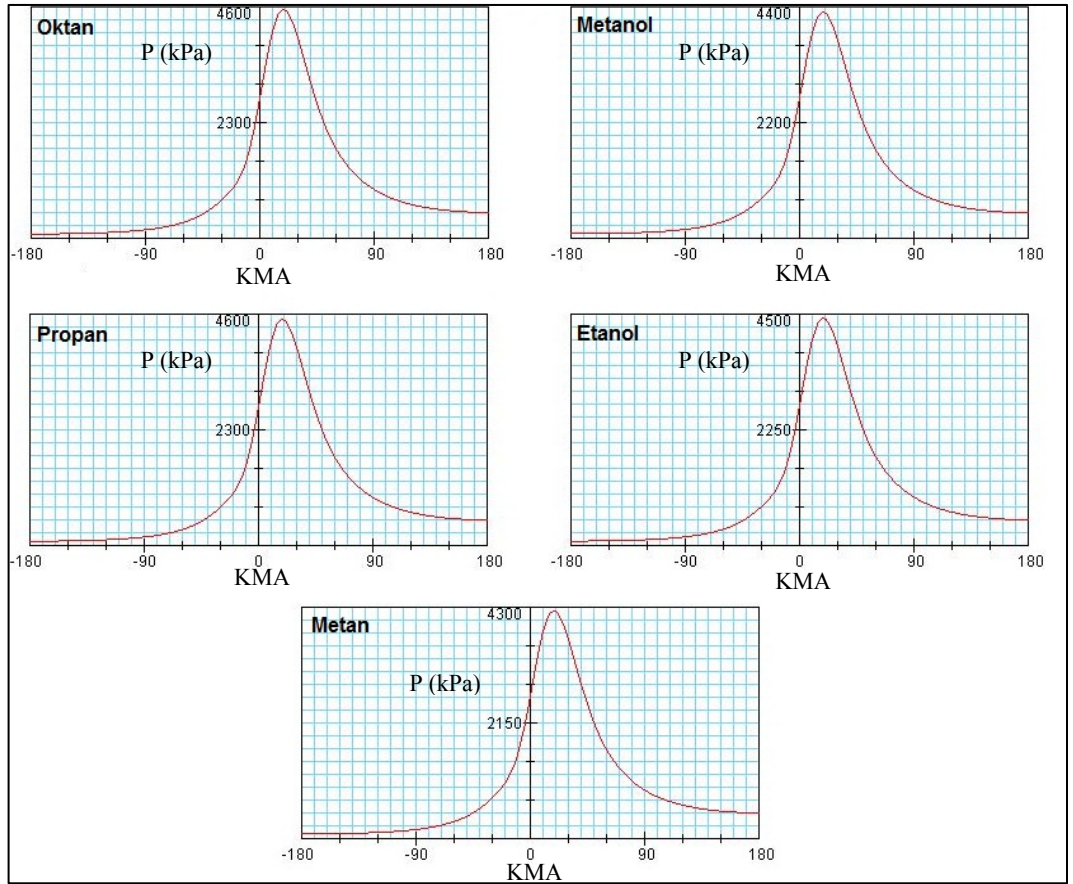
Krank açısı °KMA	$m_{y,sil} - m_{y,kal}$
0-335	$m_{y,sil} = MYAKSIL = MYAK0 - EMHCTOP$
335-369	$m_{y,sil} = MYSILYS = MYAKSIL - MYANTETA - DELYAGIR$
370-470	$m_{y,sil} = MYSILYS = MYAKSIL - MYANTETA + DSALHC$
471-480	$m_{y,sil} = MYSILYS = MYAKSIL - MYANTETA$ $m_{y,kalan} = MYKAL = DSALHC$
481-720	$m_{y,sil} = 0$ $m_{y,kalan} = MYKAL = DSALHC$

- Yukarıda  $m_{y,sil}$ ' in hesabında kullanılan terimler programda kullanılan terimlerdir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Termodinamik ve yağ filmi modellerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1- Şekil 4.1 de kullanılan motor parametrelerine bağlı olarak farklı yakıtlar için literatürde daha önce hesaplanan basınç değerleri gösterilmektedir (Kirkpatrick 2006). Şekil 4.2' de ise modelde hesaplanan krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimleri 5 farklı yakıt için gösterilmektedir.

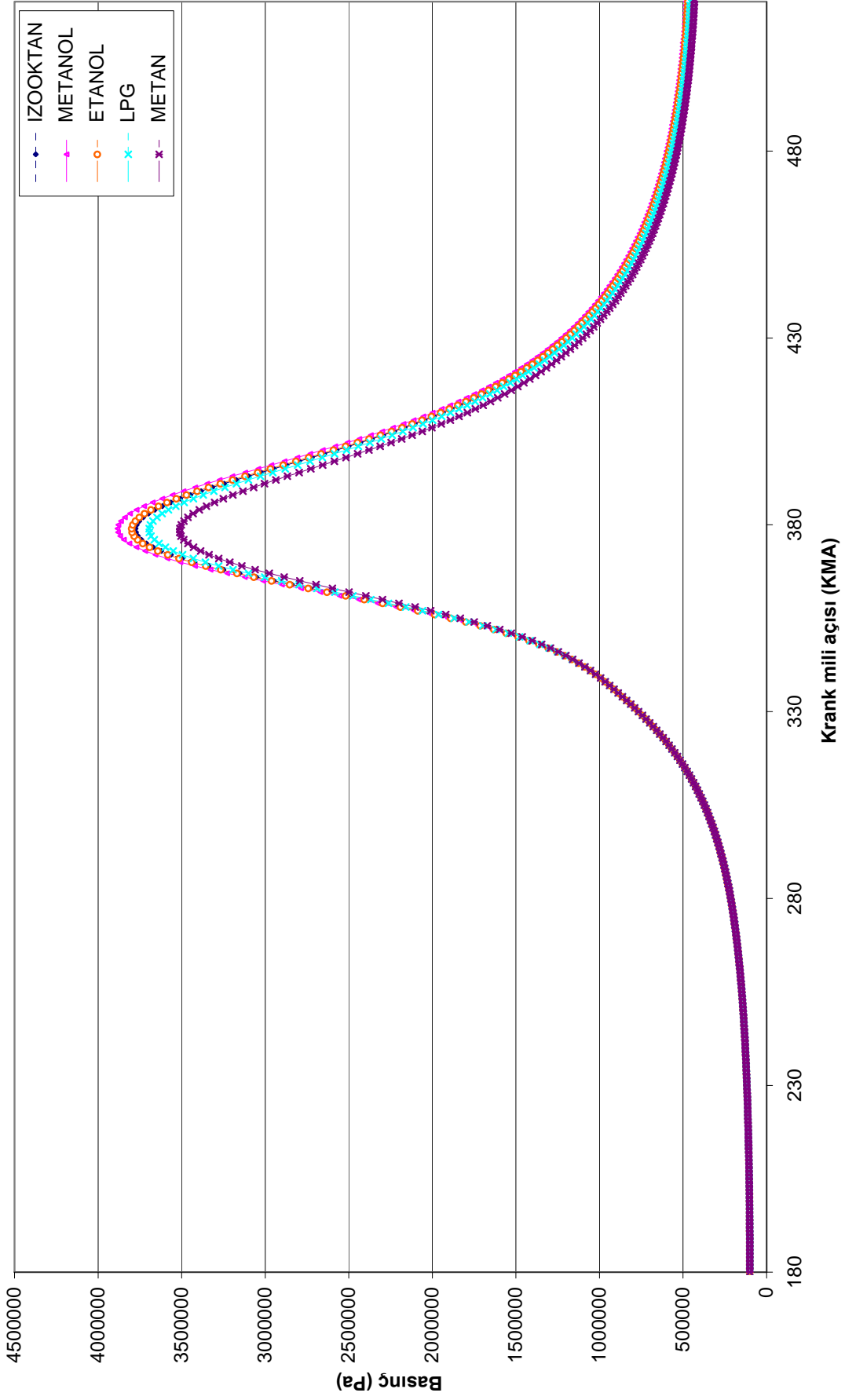


Şekil 4.1. 5 Farklı yakıt için literatürdeki KMA-Basınç değişimi grafikleri

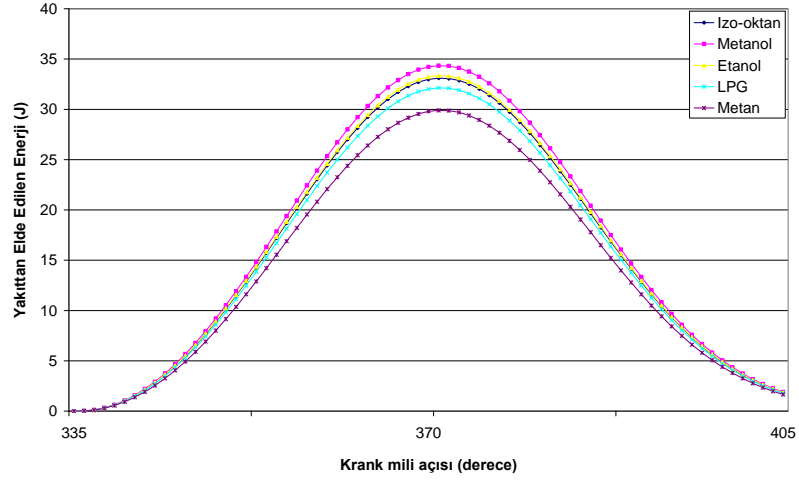
Her ne kadar motor parametreleri aynı olarak girilse de basınç hesaplarındaki öngörüler Şekil 4.1 ile Şekil 4.2 arasındaki farklılığı göz önüne sermektedir. (3.10) denklemine bakılırsa yakıtlar arasındaki basınç değerleri farklılığı, yakıtla verilen enerji ( $Q_{yak}$ ) ve enerji kayıpları ( $Q_{kay}$ ) ile ilişkili olduğu açıkça görülür. Şekil 4.2'de yeni modelde elde

edilen sonuçlara bakıldığında basınç eğrilerinin maksimum değerleri 35 Bar ile 40 Bar arasında değişmektedir. Şekil 4.1' de literatürde daha önce hesaplanmış grafiklerde yer alan basınç eğrilerinin maksimum değerleri ise 43 Bar ile 46 Bar arasında değişmektedir. Bunun sebebi yeni modelde değerlendirilen volumetrik verim ifadesinin, literatürdeki modelde yer alan volumetrik verim ifadesinden daha düşük değerde olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde daha önce hesaplanmış olan modelde volumetrik verim ifadesi içerisinde yakıt buharının havayı soğutma etkisi ve statik etkiler göz önünde bulundurulmamıştır. Fakat yeni modelde bu etkiler söz konusudur. Yakıtle verilen enerji ( $Q_{yak}$ ), silindir içerisine alınan yakıtle doğrudan ilişkilidir (Bkz. denklem (3.27)). Volumetrik verimin düşüşüyle silindir içerisinde alınan yakıt miktarı da azalmaktadır böylece yakıtle verilen enerji ve basınç düşmektedir. Literatürde daha önceden hesaplanmış olan basınç grafiklerine bakıldığında (Şekil 4.1) maksimum basınç sıralaması büyükten küçüğe doğru şu şekildedir: oktan-propan-etanol-metanol-metan. Yeni öngörülen modelde ise, metanol-etanol-izo oktan- LPG-metan şeklindedir. Buradaki farkın sebebi yakıtların farklı volumetrik değerlere ve farklı özgül ısı değerlerine sahip olmasındandır. Dolayısıyla silindir içerisine alınan yakıt miktarı bu 2 modelde farklılık gösterir, bu da yakıtle verilen enerjileri farklı yapar. Bu yüzden sıralamanın farklı olması beklenmektedir.

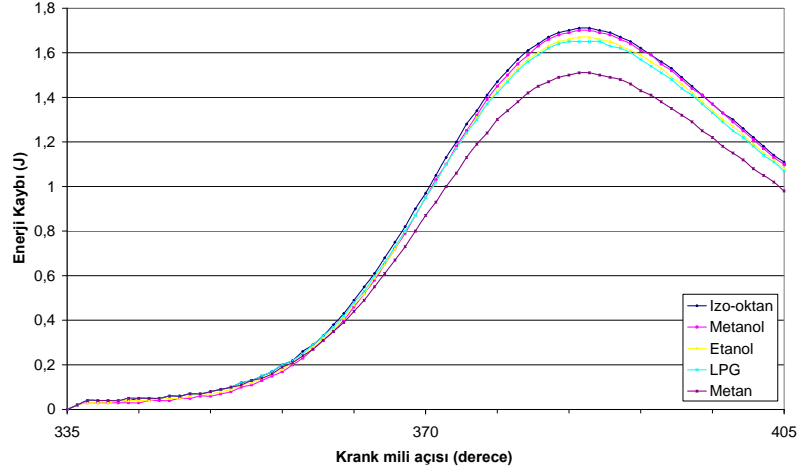
Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5' de sırasıyla yakıtle verilen enerji ( $Q_{yak}$ ), enerji kayıpları ( $Q_{kay}$ ) ve net enerji ( $Q_{yak}-Q_{kay}$ ) grafikleri ele alınan 5 yakıt için gösterilmektedir. Yakıtlar arasındaki basınç farkının sebebinin enerji farkları olduğu açıkça görülmektedir. Basınçların maksimum değerlerinin sıralaması yine aynı şekilde burada da görülmektedir (Büyükten küçüğe doğru: metanol-etanol-izo oktan-LPG-Metan).



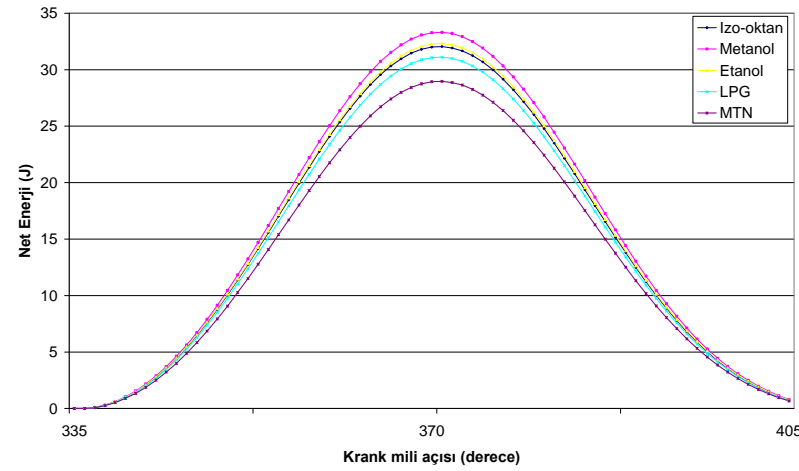
Şekil 4.2. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimi



**Şekil 4.3.** Farklı yakıtlar için yakıttan verilen enerjinin yanma süresince KMA'na göre değişimi

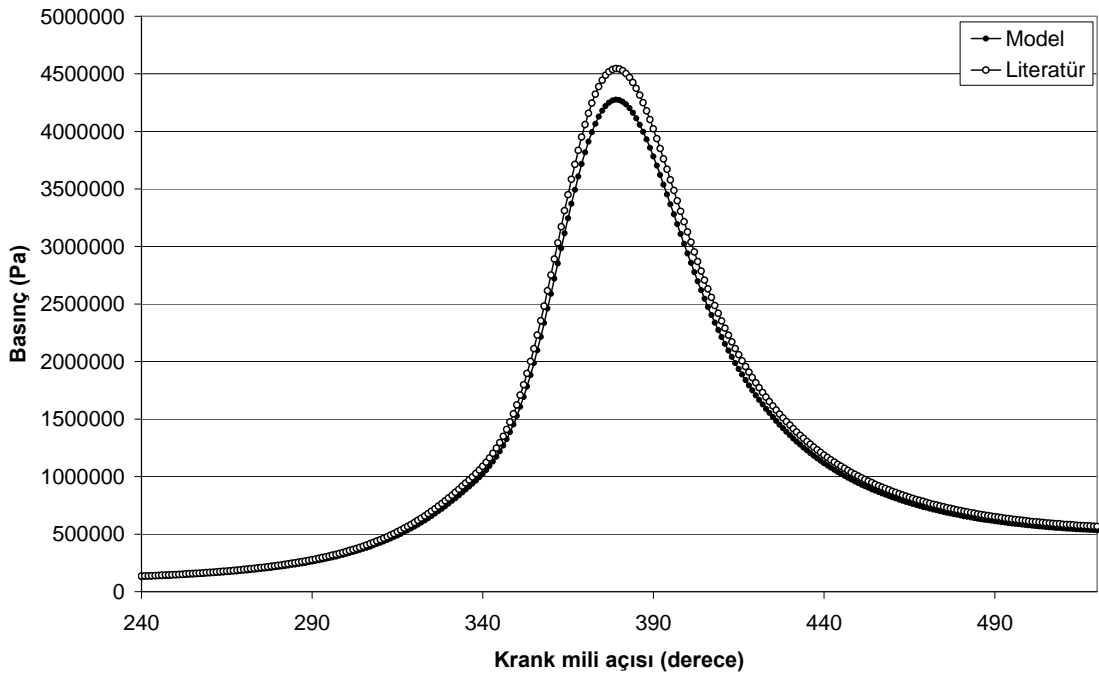


**Şekil 4.4.** Farklı yakıtlar için enerji kayıplarının yanma süresince KMA'na göre değişimi



**Şekil 4.5** Farklı yakıtlar için net enerjinin yanma süresince KMA'na göre değişimi

Şekil 4.6’ da ise izo-oktan yakıtı için daha önce literatürde hesaplanmış basınç değerleri ile bu çalışmadaki modelde hesaplanan basınç değerleri karşılaştırılmaktadır. Burada modeldeki volumetrik verim etkisi göz ardı edilmiştir yani 1 olarak alınmıştır. Buna göre aradaki farkın sebebi ısı değeridir. Literatürde hesapta kullanılan ısı değeri, modelde kullanılan değerden daha yüksek olduğundan dolayı basınç değerleri daha yüksek çıkmaktadır.

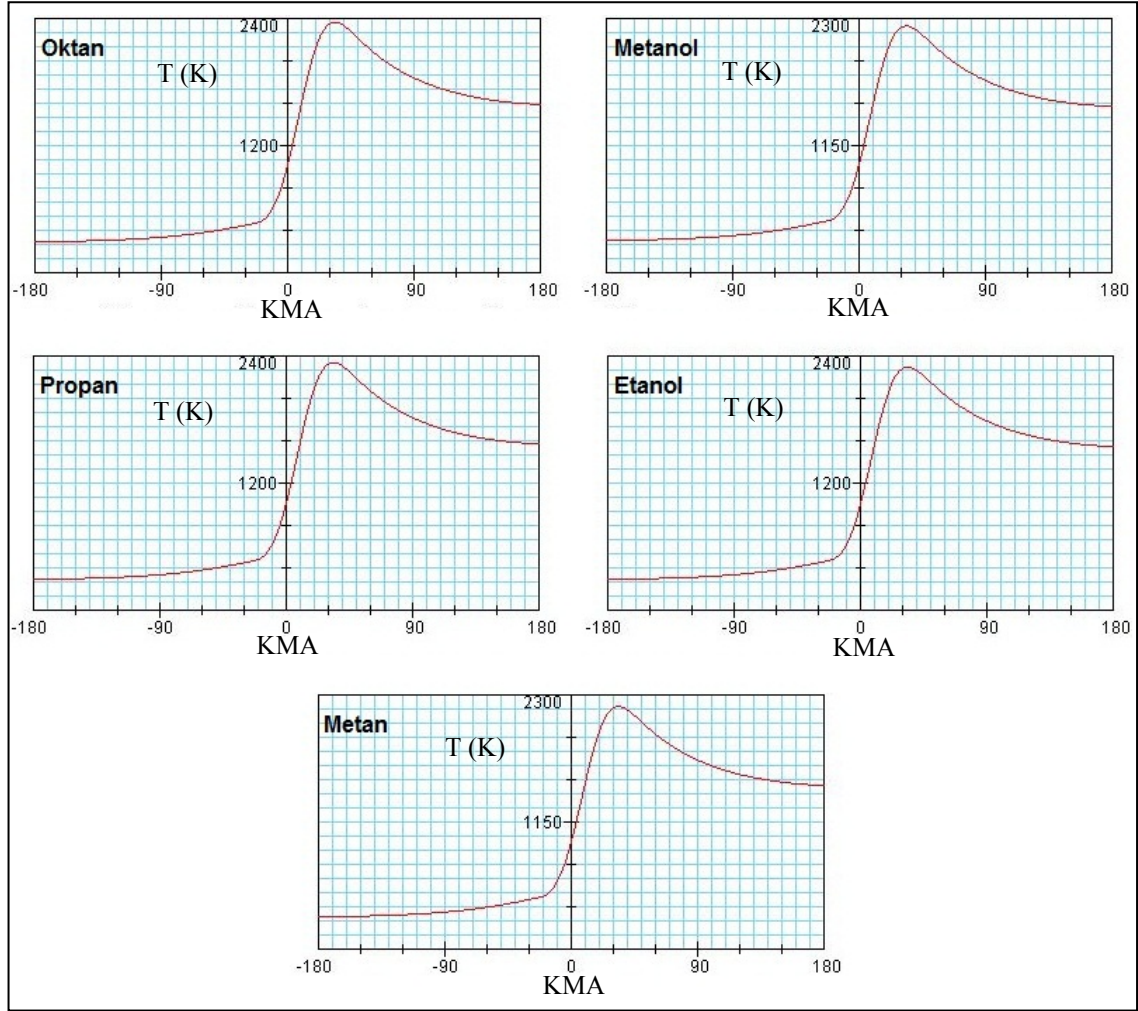


**Şekil 4.6.** İzo-oktan yakıtı için bu çalışmadaki modelde hesaplanan basınç değerleri ile daha önce literatürde hesaplanmış basınç değerlerinin karşılaştırılması

2- Şekil 4.7’ de kullanılan motor parametrelerine bağlı olarak literatürde daha önce hesaplanmış çeşitli yakıtlar için grafikler gösterilmektedir(Kirkpatrick 2006). Burada, maksimum sıcaklık değerleri büyükten küçüğe doğru, Oktan, Propan, Etanol, Metanol ve son olarak Metan olarak sıralanmaktadır. Şekil 4.8’ deki grafikte aynı sıralama ortaya çıkmamaktadır. Bunun sebebi literatürdeki modelde volumetrik verimde yakıt buharının soğutma etkisinin görülmemesinin birçok parametreyi etkilemesindedir. (3.35) denkleminde bakıldığında sıcaklık; basınç, hacim ve silindir içerisindeki gazların moleküler ağırlığıyla doğru orantılı, silindir içerisindeki dolgu kütlesiyle ters orantılıdır. Şekil 4.8’ de en yüksek maksimum sıcaklık değeri LPG de görülmektedir. Daha sonra

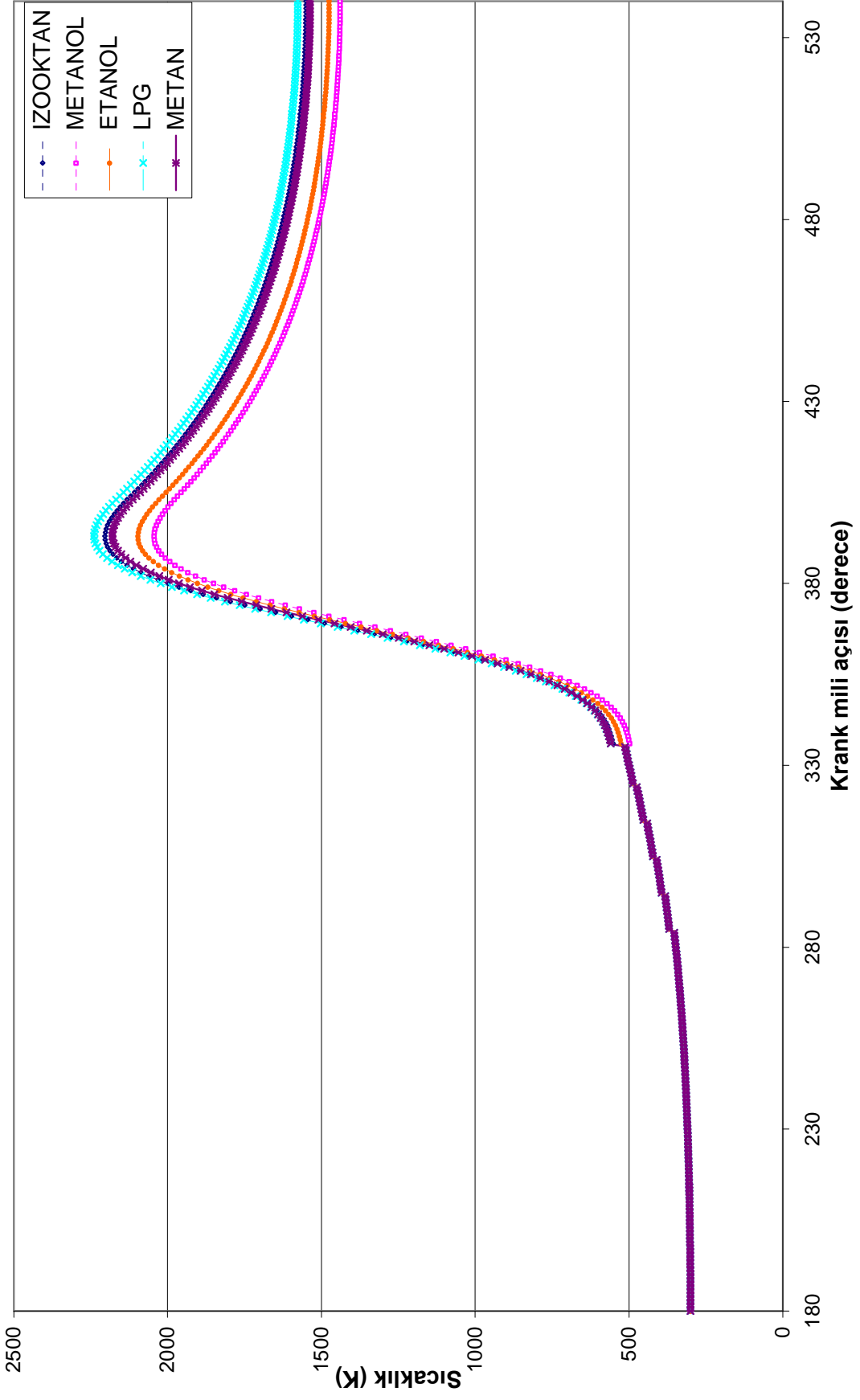


sırasıyla Izo-oktan, Metan, Etanol ve Metanol gelmektedir. Çizelge 3.2 ve Ek 4 de yer alan silindir içerisindeki gazların yakıtı göre olan moleküler ağırlığı  $M_A$  değişim grafiğine bakıldığında bu sıralamanın sebepleri anlaşılabilir.



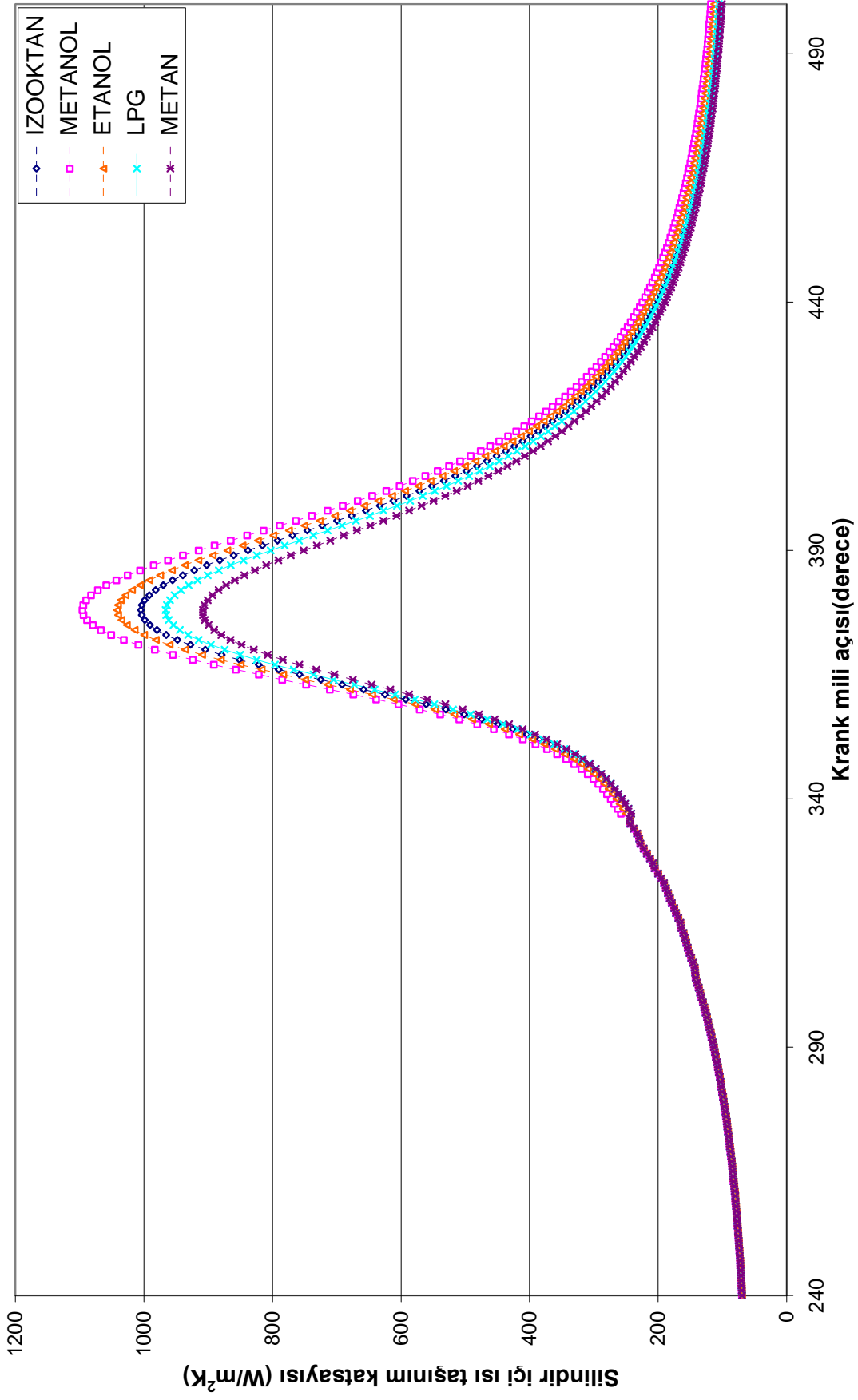
**Şekil 4.7. 5** Farklı yakıt için literatürdeki KMA-Sıcaklık değişimi grafikleri

Özellikle Metanol ve Etanolün volumetrik verimindeki soğutma etkisi artışı alınan dolgu miktarını arttırmakta dolayısıyla silindir içi sıcaklık değerini azaltmaktadır. LPG'nin hem  $M_A$  değerinin yüksek oluşu hem de dolgu miktarının az oluşu sebebiyle silindir içi sıcaklık maksimum değerlerinde en yüksek değer ona ait olmaktadır. Şekil 4.8 de görüldüğü gibi yanma açısı  $335^{\circ}\text{KMA}$  ile birlikte sıcaklık yükselmekte  $390^{\circ}\text{KMA}$  civarlarında maksimuma ulaşmaktadır.



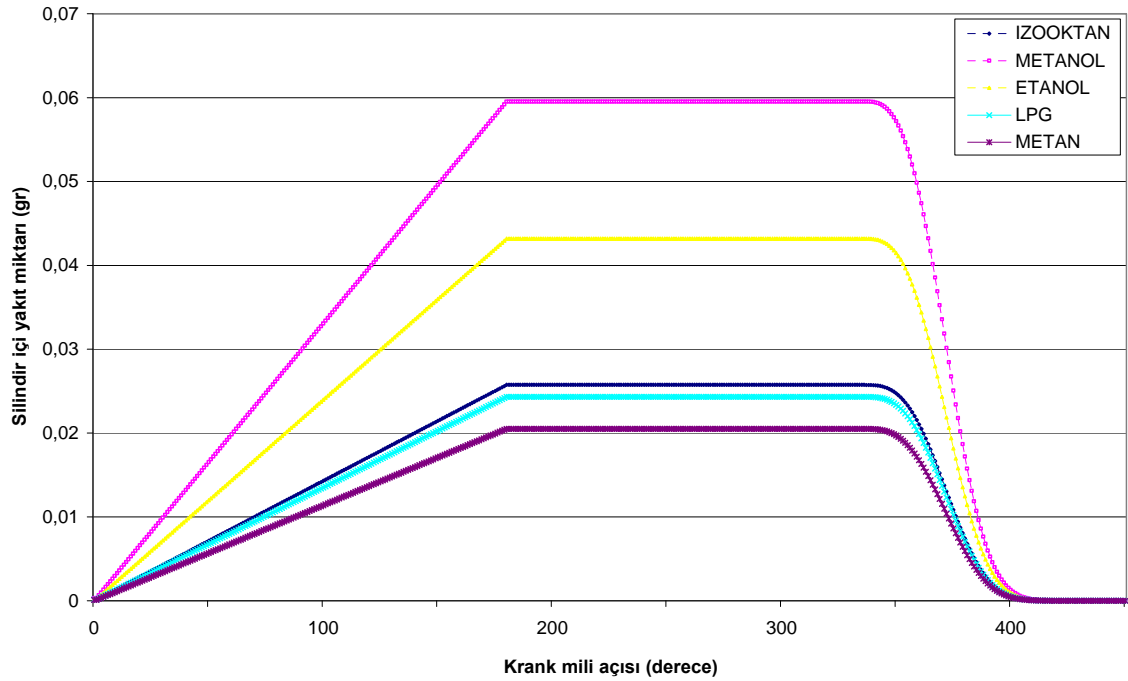
Şekil 4.8. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi sıcaklık değişimi

3- Şekil 4.9 da krank mili açısına bağlı olarak silindir içi ısı taşınım katsayısı değerlerinin değişimleri gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi basınç değerlerinin artmış olduğu krank mili açılarında silindir içi ısı taşınım katsayısı değerleri de artmaktadır. Basıncın maksimum olduğu yerlerde maksimuma ulaşılmıştır. Isı taşınım katsayısı değerleri bu 5 farklı yakıt için büyükten küçüğe doğru Metanol, Etanol, İzoktan, LPG ve Metan olarak sıralanmaktadır. Nitekim (3.29) eşitliğine bakıldığında silindir içi ısı taşınım katsayısı; basınç ile doğru, sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Farklı yakıtların krank açısına bağlı olarak silindir içi ısı taşınım katsayısının değişimi

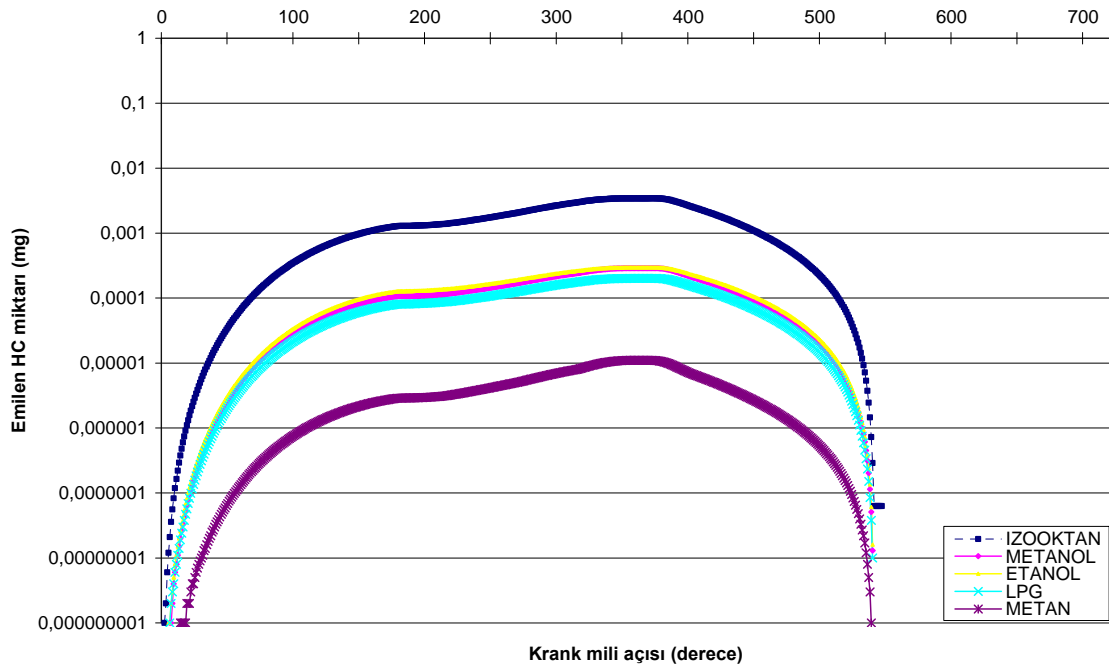
4- Şekil 4.10 da bir çevrim boyunca silindir içerisine alınan yakıt miktarı 5 farklı yakıt için modellenerek çizdirilmiştir. Silindir içerisine yakıt girişi emme supabı kapanana kadar ( $214^{\circ}$ KMA) devam etmektedir.  $335-405^{\circ}$  KMA arası değerlerde yanma olmakta ve yakıt miktarı yanma modeline bağlı olarak yanarak azalmaktadır. 5 farklı yakıt arasındaki silindir içerisine alınan yakıt miktarlarındaki fark yakıtların kimyasal formülleriyle ilişkilidir. İlk önce her bir silindir içerisine alınan hava miktarları hesaplanmış daha sonra o havaya uygun stokyometrik oranda yakıt silindir içerisine alınmıştır. Yani tüm yakıtlar için  $\lambda=1$  dir. Yakıtın buharlaşırken meydana getirdiği soğuma etkisi, yakıt buharının havanın yerini alması ve yakıtların farklı stokyometrik oranlara sahip olmaları nedeniyle silindir içerisine alınan yakıt miktarları farklı olmaktadır. En düşük  $(H/Y)_{\text{stok}}$  oranı metanolde olduğu için en fazla yakıt metanolde silindir içine alınmaktadır.



Şekil 4.10. Bir çevrim boyunca silindir içerisindeki yakıt miktarları

5- Şekil 4.11 de yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı (HC) miktarının 5 farklı yakıt için krank mili açısına göre değişimleri gösterilmektedir. Emilme işleminin silindir içi maksimum basınca kadar devam ettiği görülmektedir. Şekil 4.11' deki silindir içerisine alınan yakıt miktarları ile Şekil 4.11 deki yağ filmince emilen HC miktarları arasındaki ilişki orantılı değildir. Yani silindir içerisine alınan en yüksek yakıt miktarı Metanol

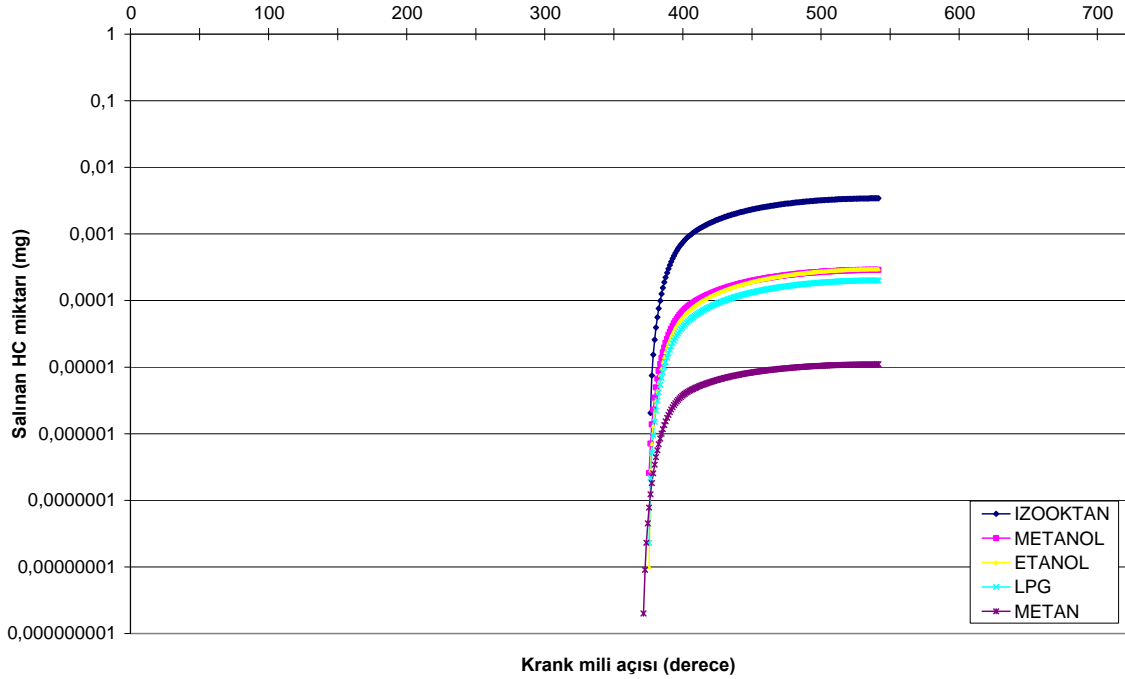
yakıtına ait iken, yağ filmi tarafından emilen en yüksek HC miktarı Izo-oktan yakıtına aittir. Bunun sebebi yağ filmi tarafından emilme işleminde Henry Kanunu'nun rol oynamasıdır. Sıcaklığa bağlı olan Henry sabiti değeri ne kadar büyük değerde ise yağ filmince gerçekleşen emilme işlemi o kadar az olmaktadır. (3.41) denkleminde Henry sabiti ile yağ içerisindeki yakıtın molar oranının ters orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca difüzyon katsayısının da buradaki etkisi önem taşımaktadır. Difüzyon katsayısı (3.40) eşitliğine bağlı olarak yağ filmi içerisindeki yakıt konsantrasyonuyla doğru orantılıdır.



**Şekil 4.11.** Yağ filmi tarafından emilen HC miktarının farklı yakıtlar için KMA'na göre değişimi

6- Şekil 4.12 de yağ filmi tarafından silindir içi maksimum basınca ulaştıktan sonra salınan HC miktarları gösterilmektedir. Emilme işlemi çevrim başlangıcından silindir içi maksimum basınç değerine kadar devam etmektedir. Basıncın azalmaya başlamasıyla birlikte yağ filmi içerisindeki hidrokarbonlar silindir içerisine doğru difüze olmaya başlarlar. Salınım işlemi maksimum basınç değeri ile 540 °KMA arasında gerçekleşmektedir. 540 °KMA dan sonra silindir içerisinde kalan yakıt miktarı çok azaldığından, silindir içi basınç değeri sabit kaldığından ve Henry sabiti değeri artmaya başladığından dolayı yağ filminden herhangi bir salınma görülmemektedir. Emilme işleminde olduğu gibi salınım işleminde de Henry Kanunu ve difüzyon katsayısının

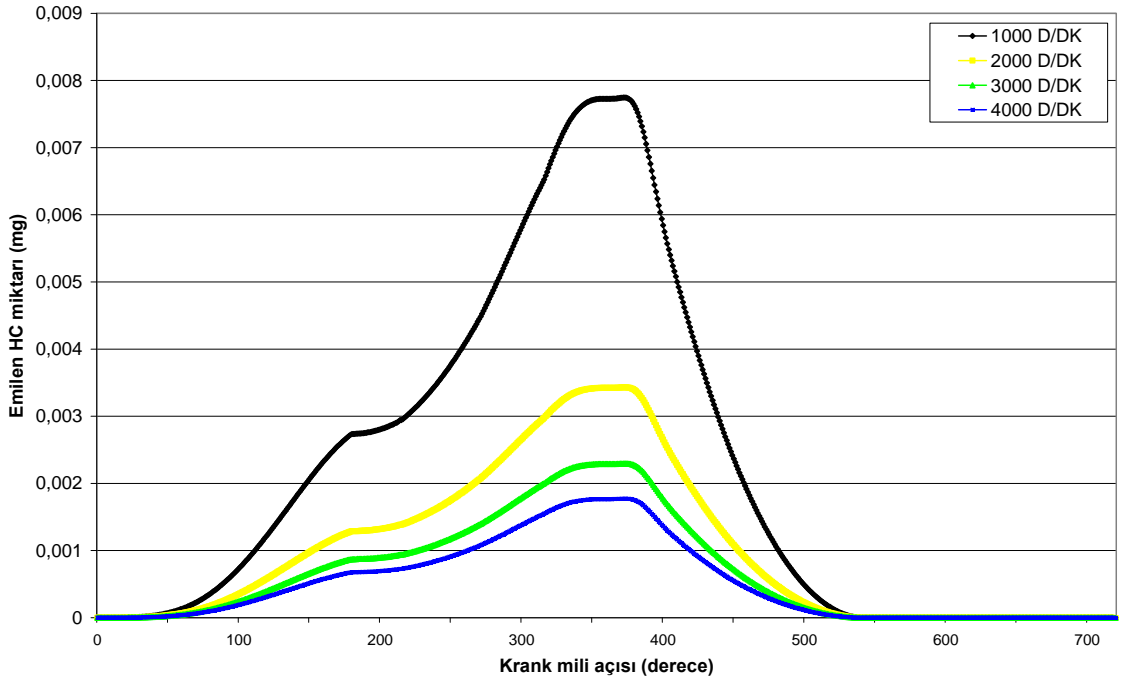
önemi büyüktür. Yine burada da yakıtlar içerisinde salınma en fazla İzo-oktanda, en düşük Metanda görülmektedir.



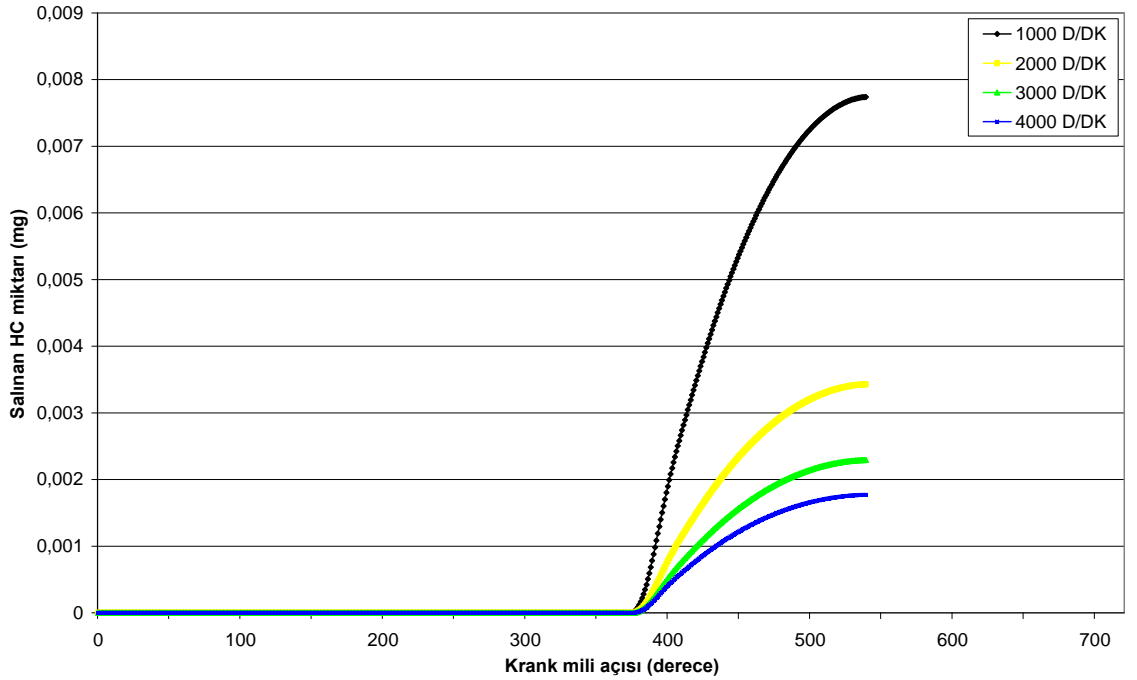
**Şekil 4.12.** Yağ filmince salınan HC miktarının farklı yakıtlar için KMA'na göre değişimi

7- Şekil 4.13 ve 4.14 da İzo-oktan yakıtının devir sayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarındaki değişim gösterilmektedir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi düşük devir sayılarında emilen ve salınan HC miktarları artmaktadır. Bunun sebebi çevrimin daha uzun sürmesiyle yakıt buharı – yağ ikilisinin daha uzun süre bir arada bulunmasıdır. Yani yakıt buharı yağ filmi içerisine veya içerisinden dışarıya difüze olabilecek daha fazla zaman bulur. Dolayısı ile daha fazla miktarda yakıt buharı (HC) yağ filmince emilir ve yine daha fazla miktarda HC yağ filmince salınır.

Şekil 4.15 ve 4.16 da 1000 d/dk ve 3000 d/dk devir sayılarında incelenen 5 yakıtın da KMA na göre olan yağ filmince emilen HC miktarlarındaki değişim gösterilmektedir. Şekil 4.17 ve 4.18 de ise 5 yakıtın 1000 d/dk ve 3000 d/dk devir sayılarındaki yağ filmince salınan HC miktarlarındaki değişim gösterilmektedir. Yine bu 4 grafikten devir sayısının azalışına bağlı emilme ve salınma işlemlerinin artışı açıkça görülmektedir.

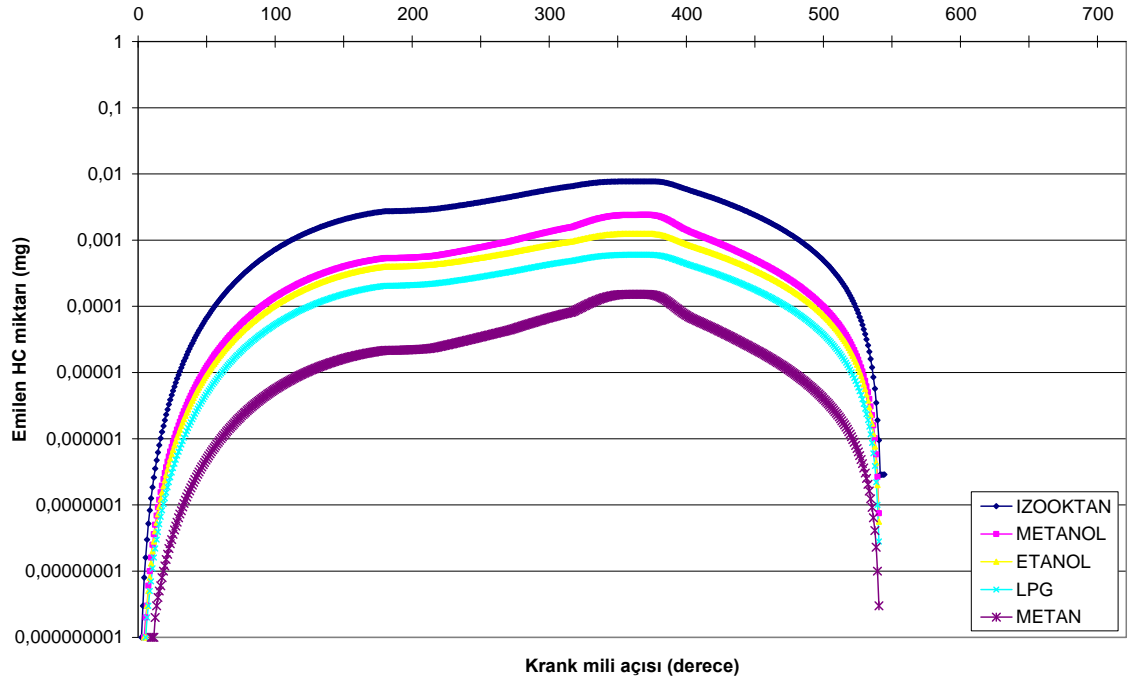


**Şekil 4.13.** Izo-oktan yakıtının devir sayısına bağlı yağ filmince emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi

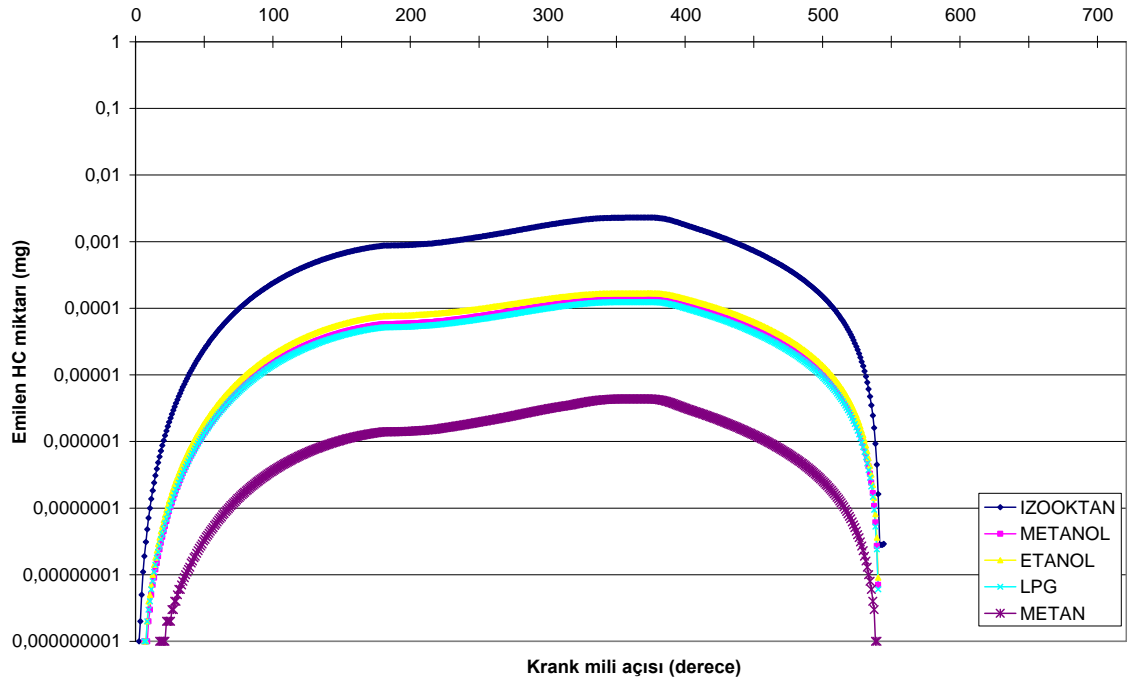


**Şekil 4.14.** Izo-oktan yakıtının devir sayısına bağlı yağ filmince salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi

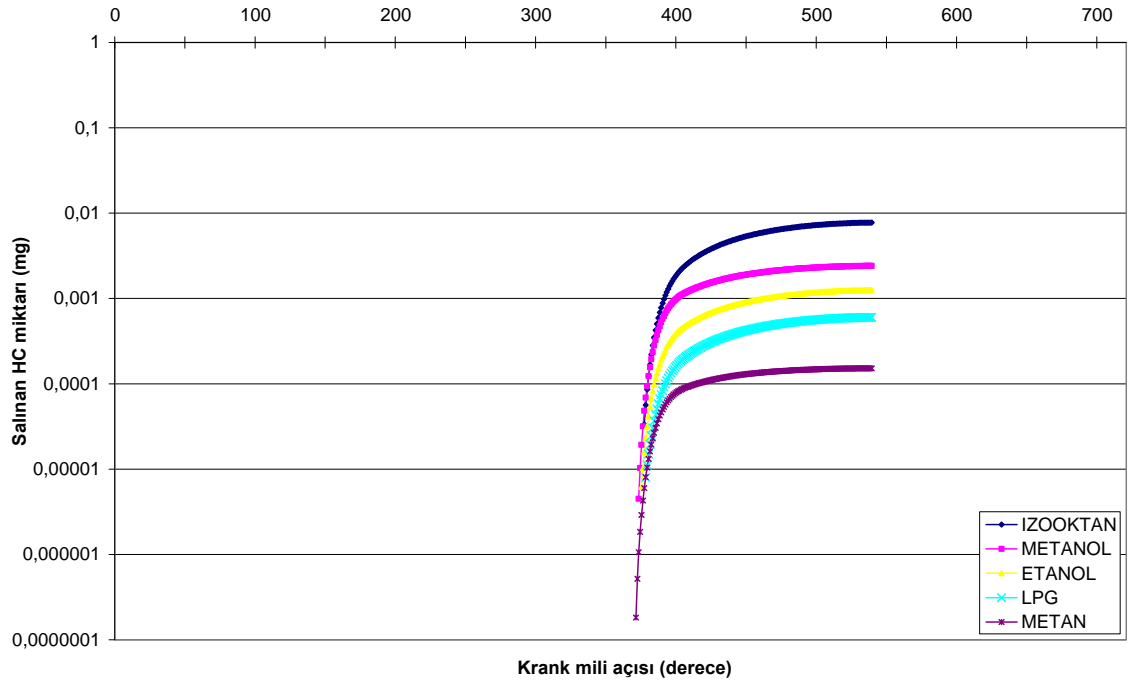




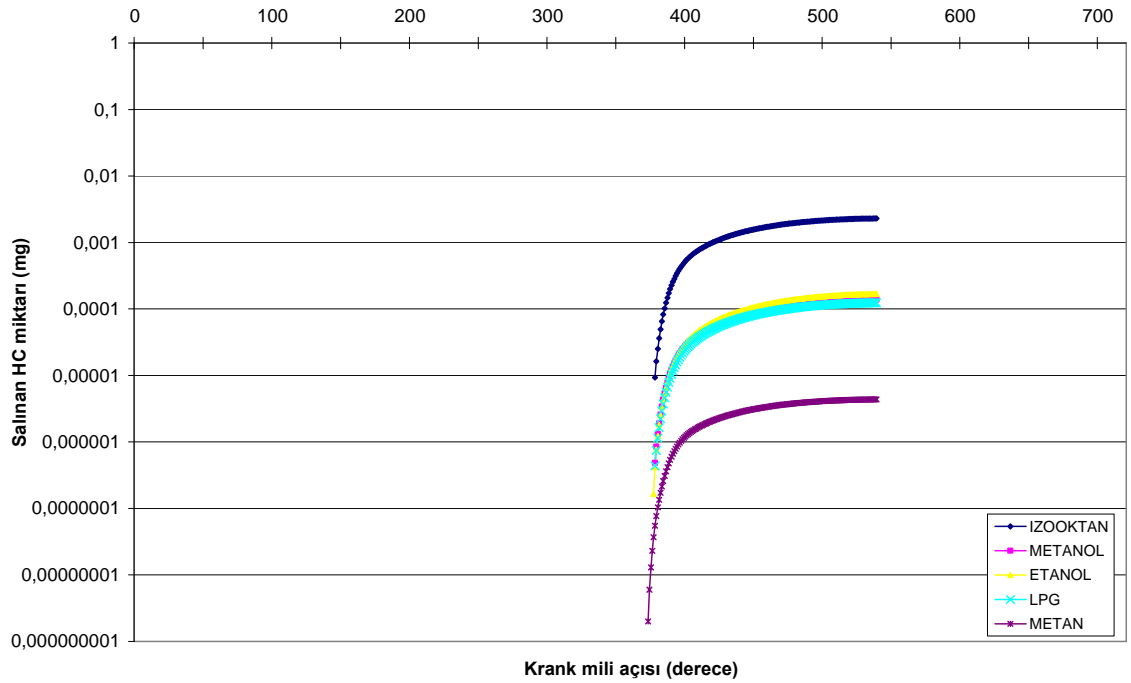
Şekil 4.15. Farklı yakıtların 1000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filmince emilen HC miktarının değişimi



Şekil 4.16. Farklı yakıtların 3000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filmince emilen HC miktarının değişimi



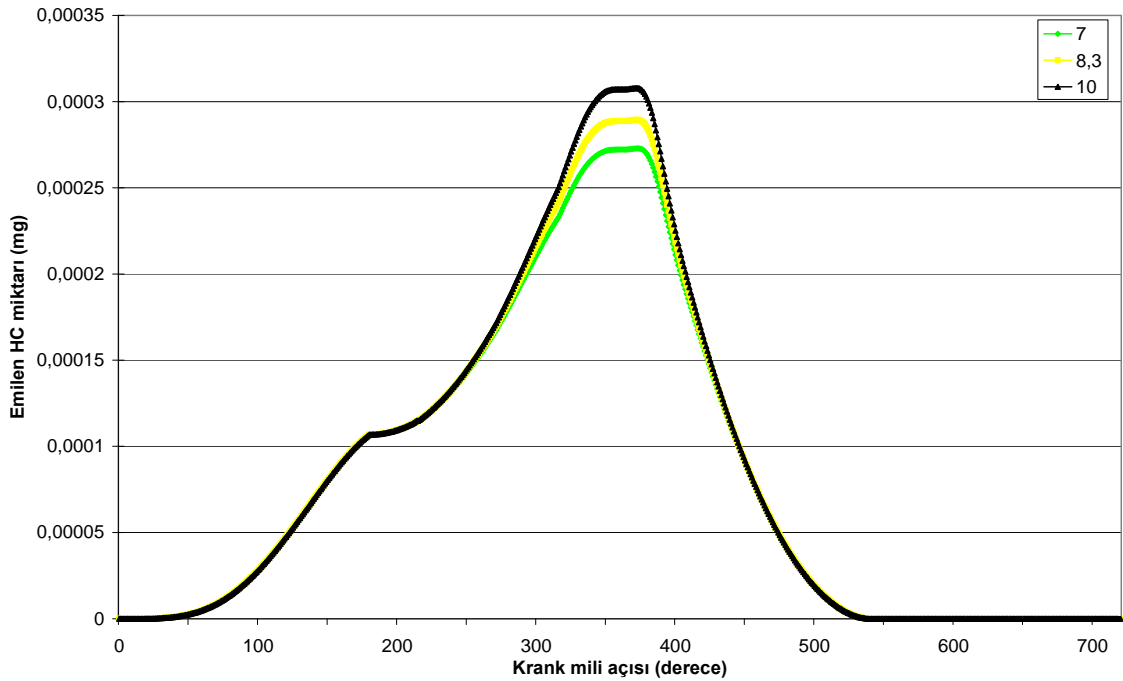
Şekil 4.17. Farklı yakıtların 1000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filminden salınan HC miktarının değişimi



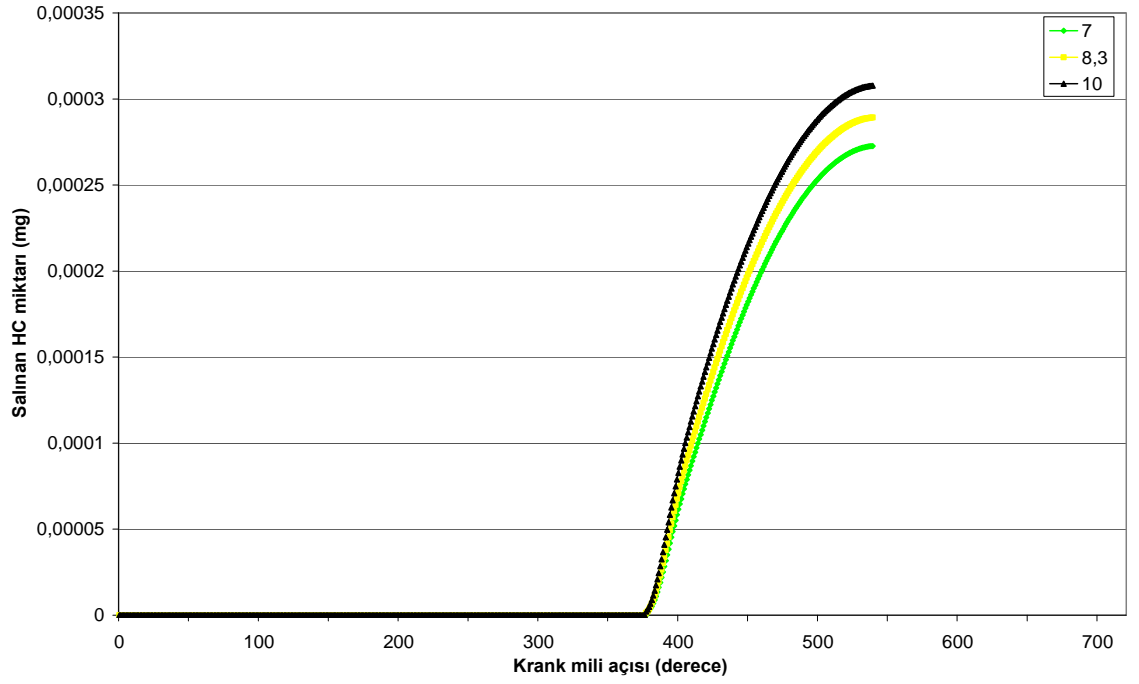
Şekil 4.18. Farklı yakıtların 3000 d/dk da KMA' na bağlı olarak yağ filminden salınan HC miktarının değişimi

8- Şekil 4.19 ve 4.20 de Metanol yakıtının sıkıştırma oranına (3 farklı değerde) bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarının değişimi gösterilmektedir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi motorun sıkıştırma oranı arttıkça yağ filmince emilen ve salınan HC miktarları artmaktadır. Bunun temel sebebi sıkıştırma oranının artışıyla birlikte basıncın artmasıdır. Basıncın yükselmesi yakıt buharının (HC) yağ filmi içerisine daha kolay yani daha fazla nüfuz etmesi manasına gelmektedir. Bu yüksek basıncın azalmaya başlaması yağ filminden salınan HC miktarında artış meydana getirir. Sonuç olarak sıkıştırma oranı artışıyla basınç artar, basınç artışı yağ filmi içerisine yakıt buharının daha fazla nüfuz etmesi demektir, yağ filmi içerisine fazla miktarda HC emilimi, basınç ortadan kalkmaya başladıktan sonra fazla miktarda HC salınımı meydana gelmesi demektir.

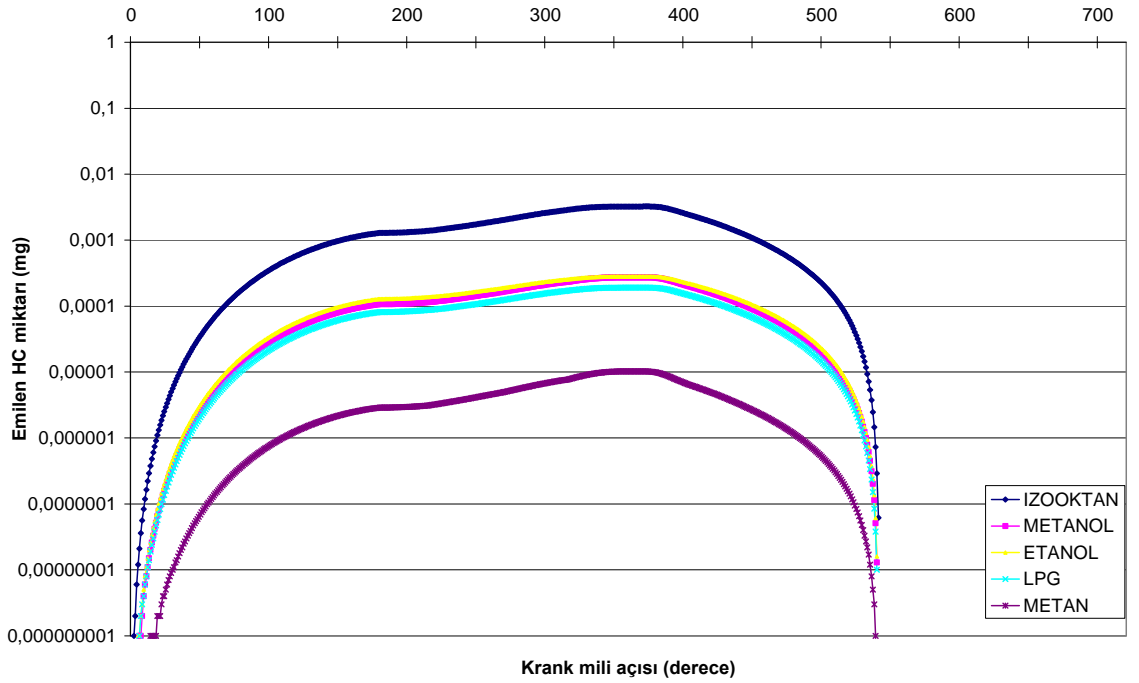
Şekil 4.21 ve 4.22 de sıkıştırma oranı 7 ve 10 değerlerindeki yağ filmince emilen HC miktarındaki değişim farklı yakıtlar için gösterilmektedir. Şekil 4.23 ve 4.24 de ise sıkıştırma oranı 7 ve 10 değerlerinde olduğunda yağ filmi tarafından salınan HC miktarındaki değişim yine farklı yakıtlar için gösterilmektedir.



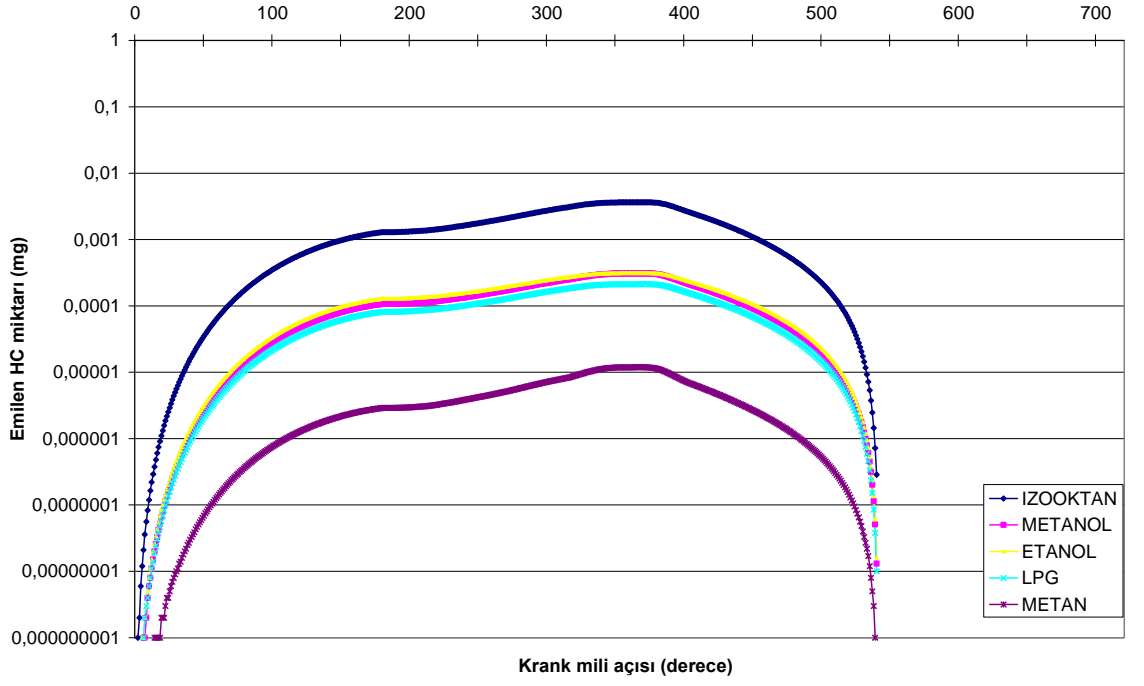
Şekil 4.19. Metanol yakıtının motor sıkıştırma oranına bağlı yağ filmince emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi



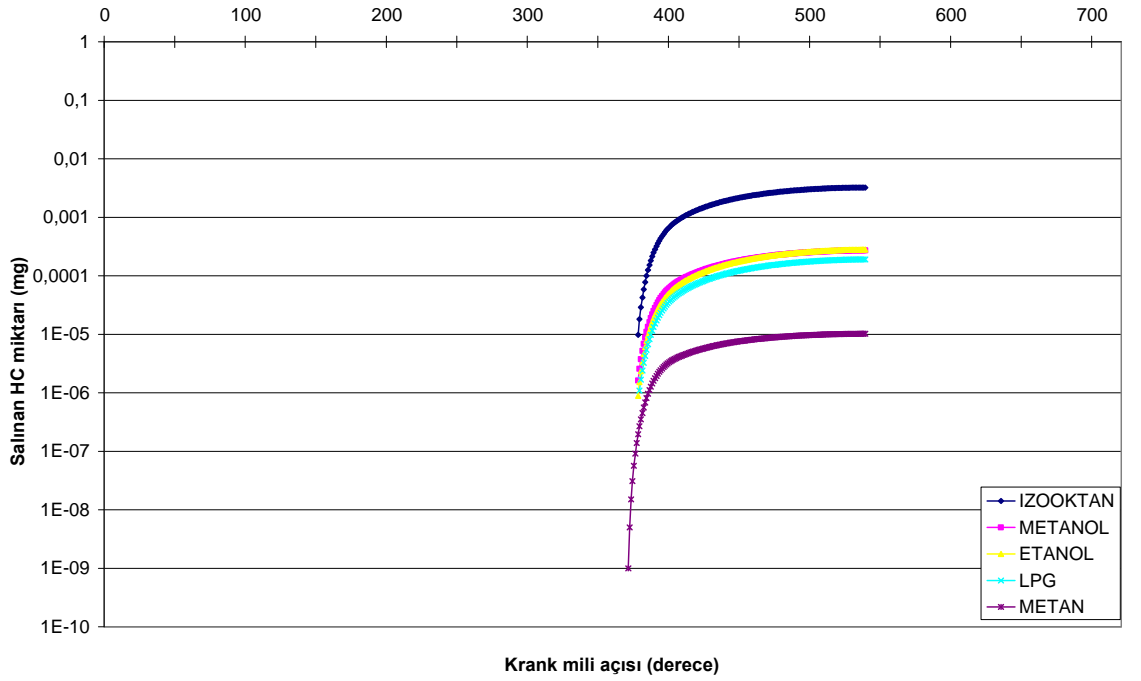
Şekil 4.20. Metanol yakıtının motor sıkıştırma oranına bağlı yağ filmince salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi



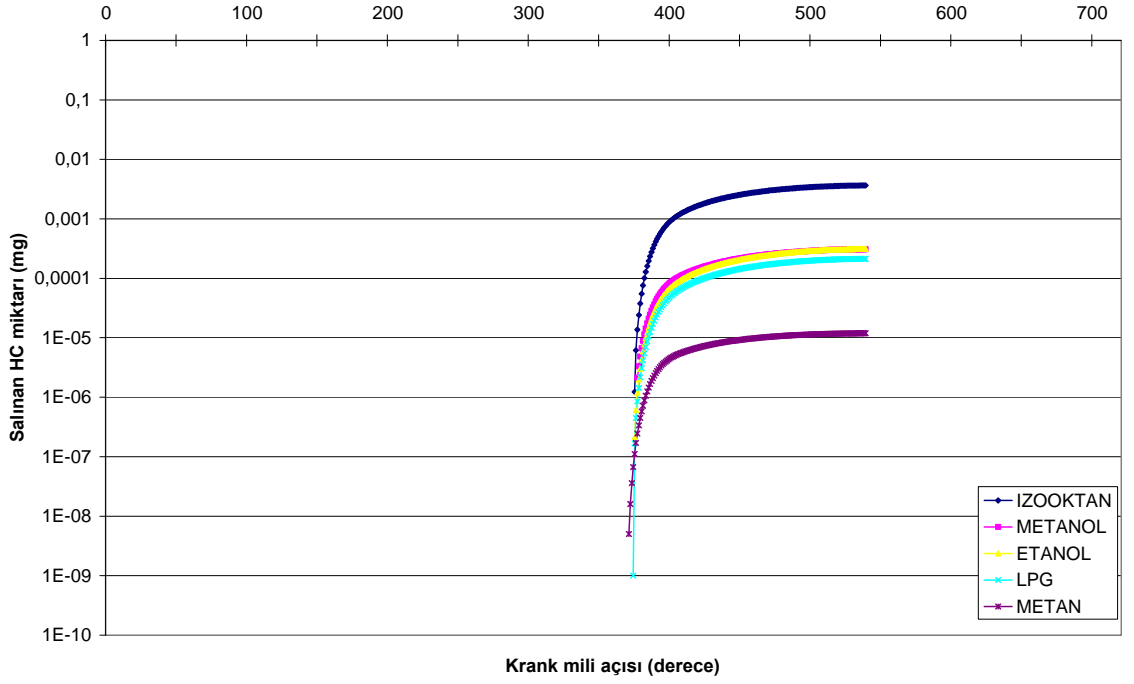
Şekil 4.21. Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 7' de KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi



**Şekil 4.22.** Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 10 da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi



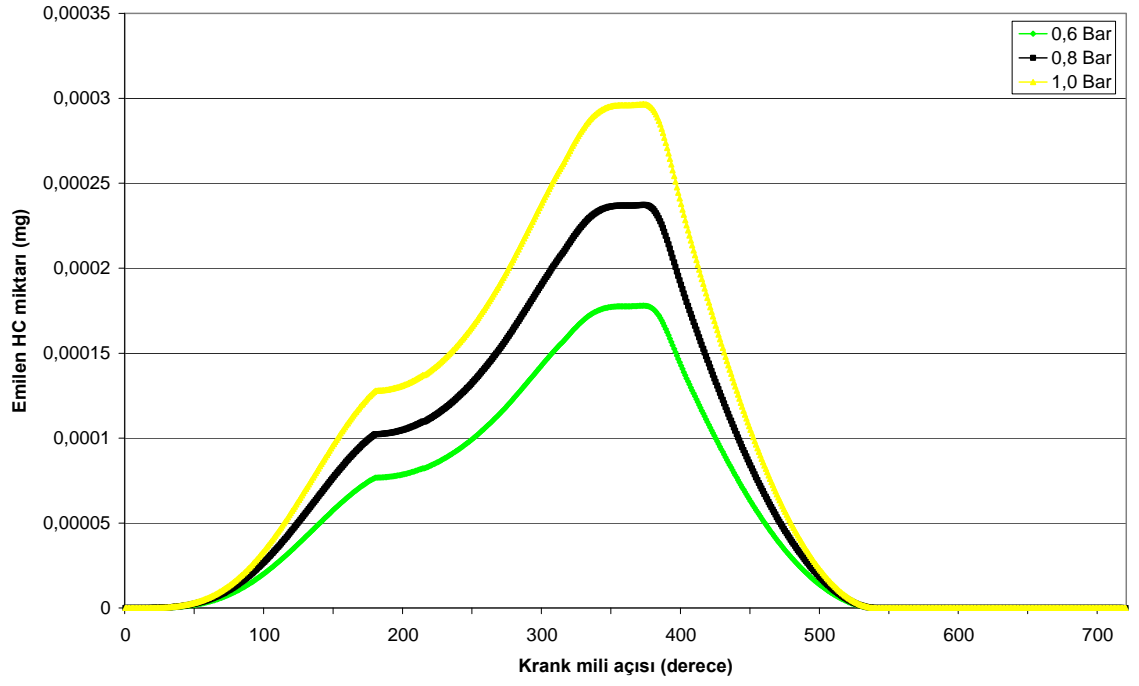
**Şekil 4.23.** Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 7 de KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi



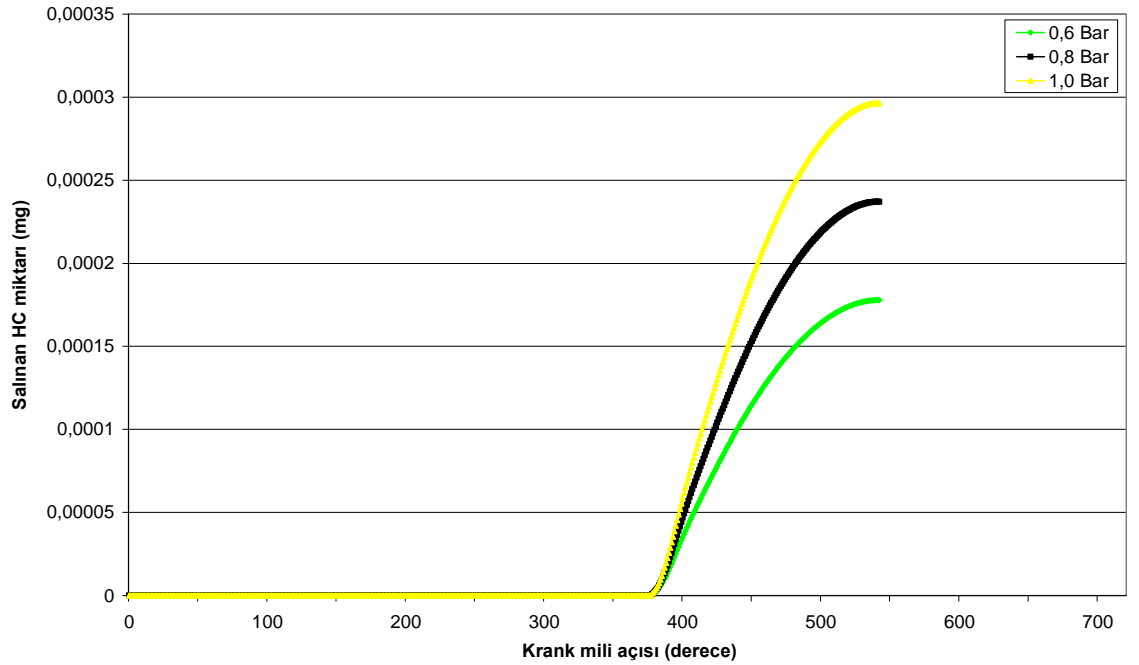
**Şekil 4.24.** Farklı yakıtların motorun sıkıştırma oranı 10 da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi

9- Şekil 4.25 ve 4.26 de Etanol yakıtı için farklı giriş basıncı değerlerinin yağ filmince emilen ve salınan HC miktarı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi basınç artışı ile yağ filmi tarafında emilen ve salınan HC miktarlarında artış söz konusudur. Sıkıştırma oranındaki fark bu grafiklerde daha net gözükmemektedir. Düşük basınç değerlerinde yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı (HC) az olmaktadır. (3.43) denkleminde de görüldüğü gibi yağ filmi içerisindeki yakıt konsantrasyonu basınçla doğru orantılıdır.

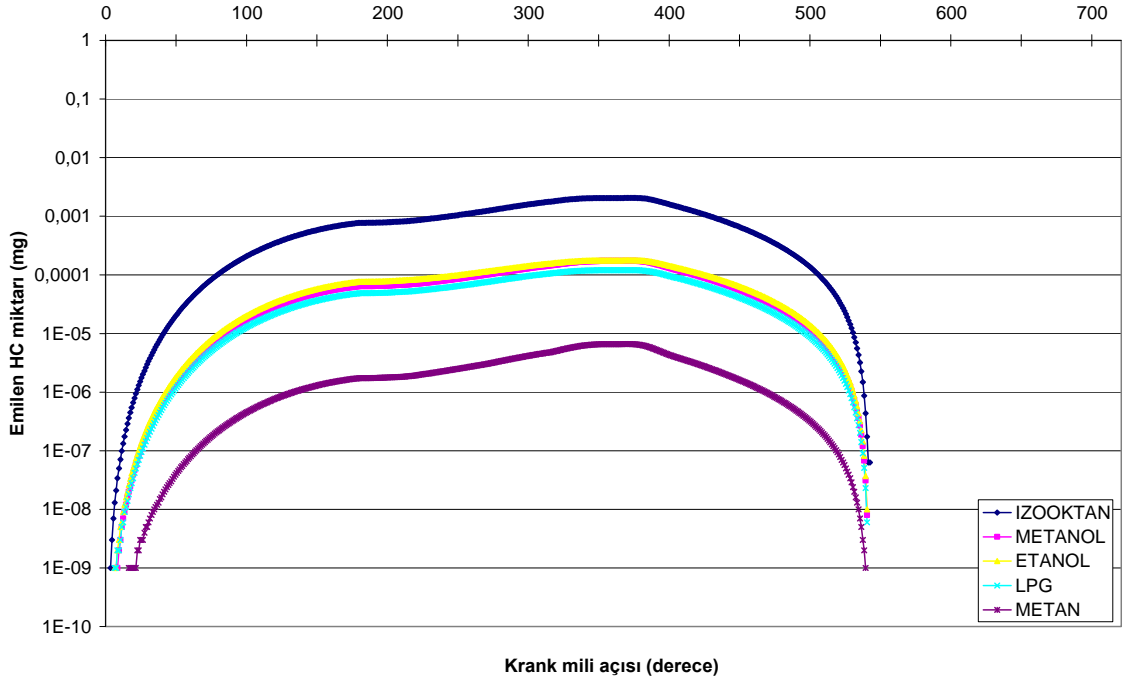
Şekil 4.27 ve 4.28 grafiklerinde 0,6 bar ve 0,8 bar basınç değerleri farklı yakıtlar için yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı miktarları gösterilmektedir. Şekil 4.29 ve 4.30 de ise bu basınç değerleri için yağ filmi tarafından salınan yakıt buharı miktarları verilmektedir.



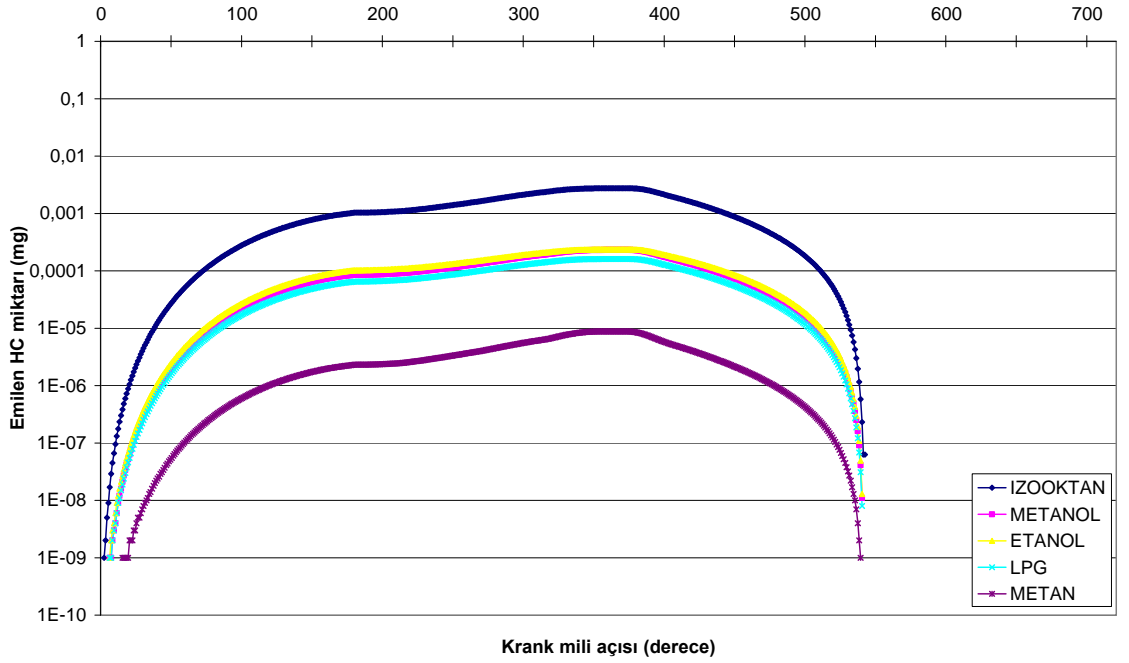
**Şekil 4.25.** Etanol yakıtının hava giriş basıncına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının KMA' na göre değişimi



**Şekil 4.26.** Etanol yakıtının hava giriş basıncına bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi

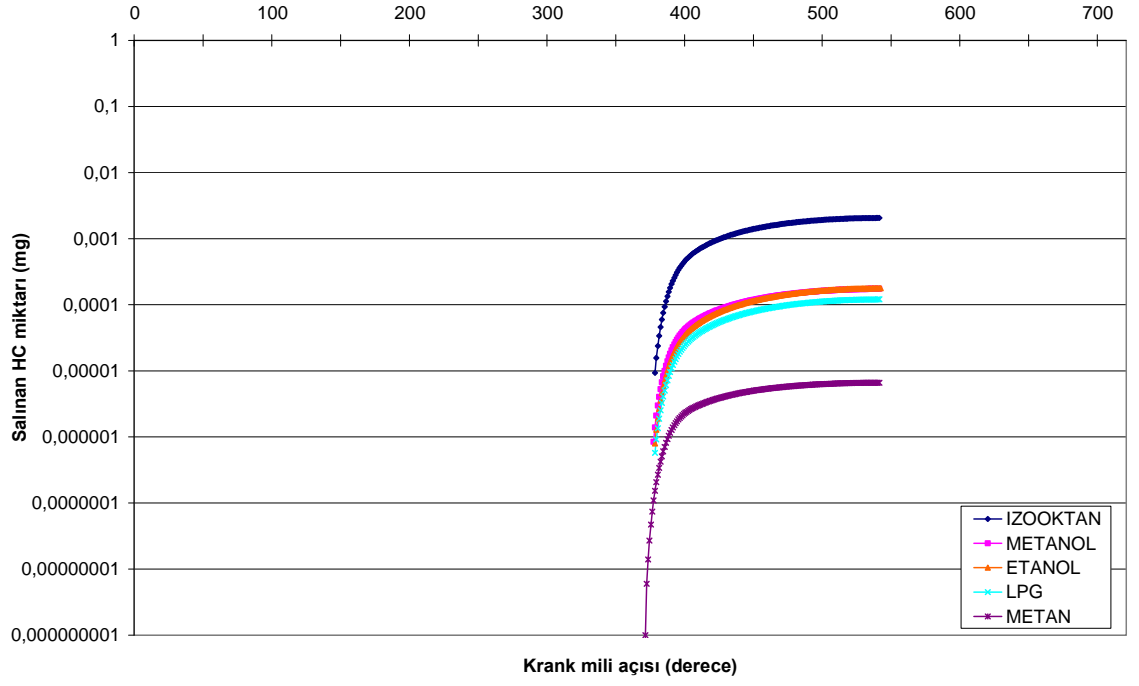


**Şekil 4.27.** Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,6 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi

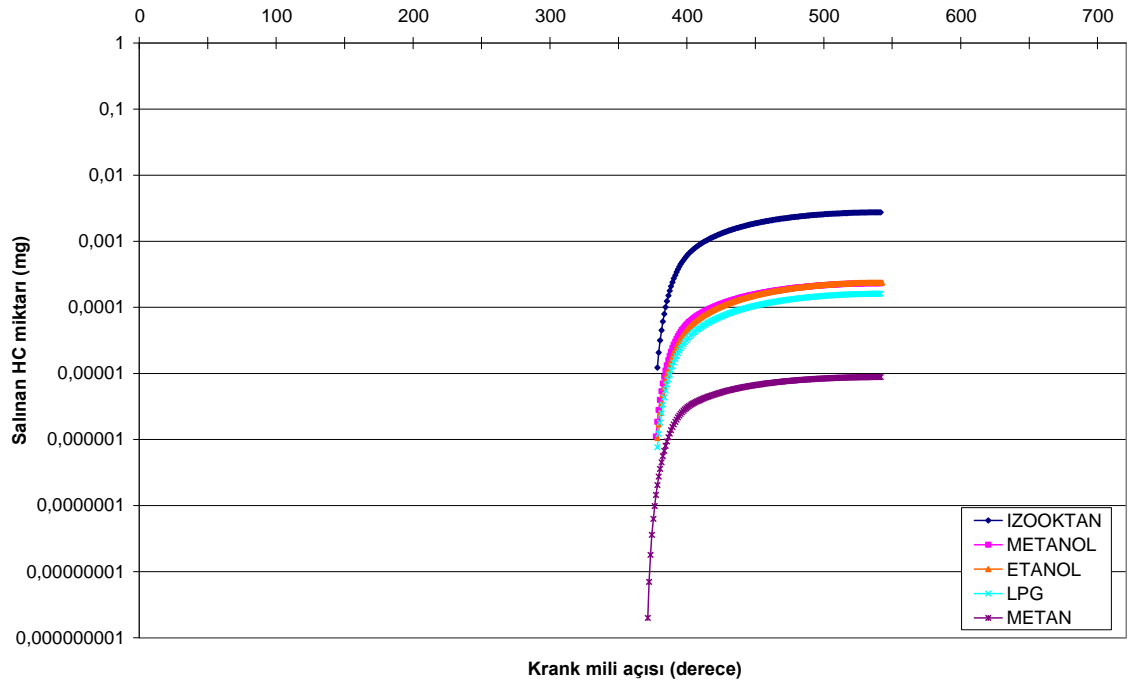


**Şekil 4.28.** Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,8 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi





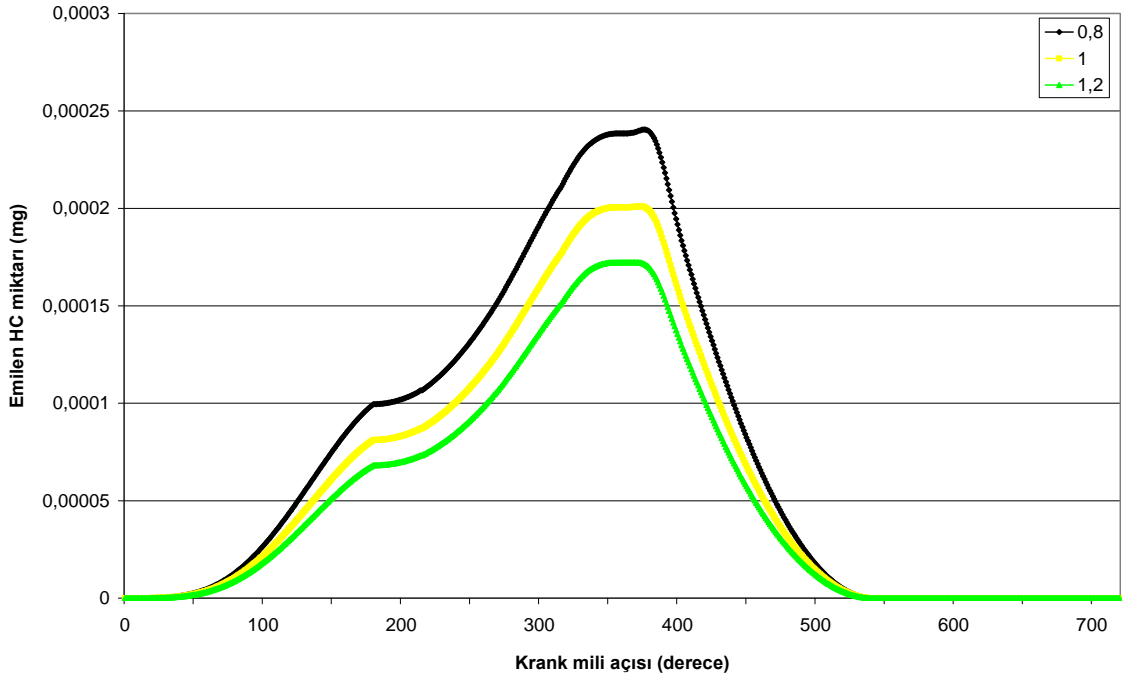
**Şekil 4.29.** Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,6 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi



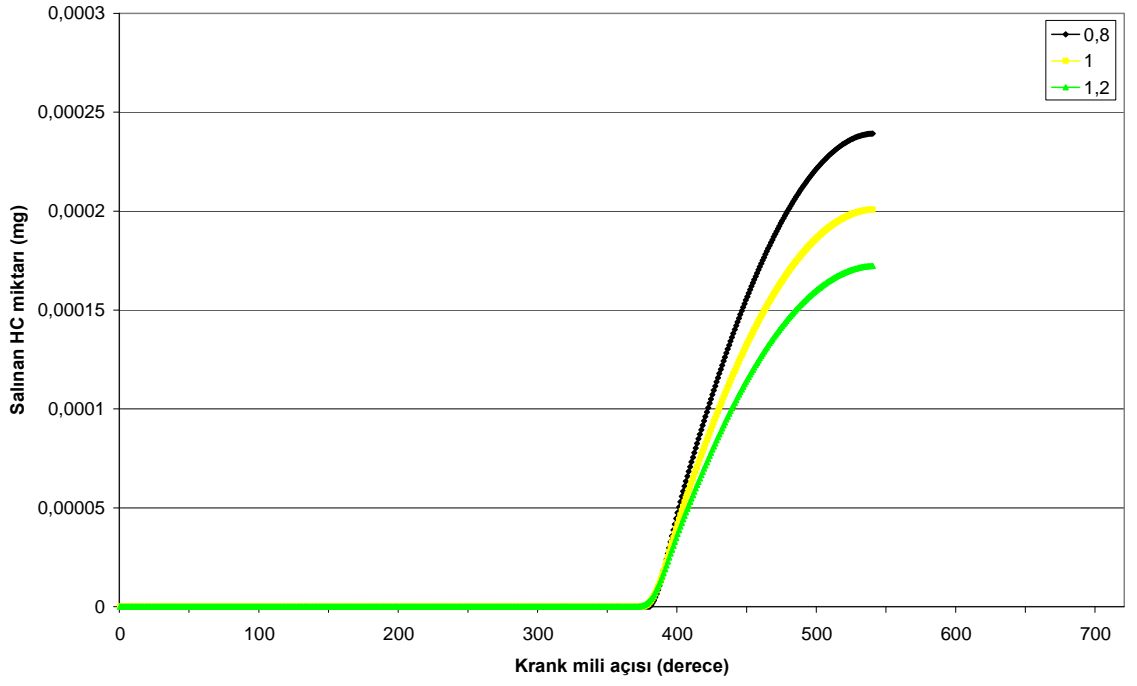
**Şekil 4.30.** Farklı yakıtların hava giriş basıncı 0,8 bar da KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi

10- Şekil 4.31 ve 4.32’de LPG yakıtı için hava fazlalık katsayısının farklı değerlerinin yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarı üzerine olan etkisi görülmektedir. Hava fazlalık katsayısının 1 den düşük değerde olması silindir içerisindeki dolgunun zengin karışımında olduğunu ifade etmektedir. 1 den büyük olması ise fakir karışımında bulunduğunun göstergesidir. Zengin karışımında bulunan bir silindirin içerisindeki karışımın yakıt miktarı yönünden zengindir. Silindir içerisindeki yakıt miktarının artmasıyla birlikte yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarında da bir artış görülmektedir.

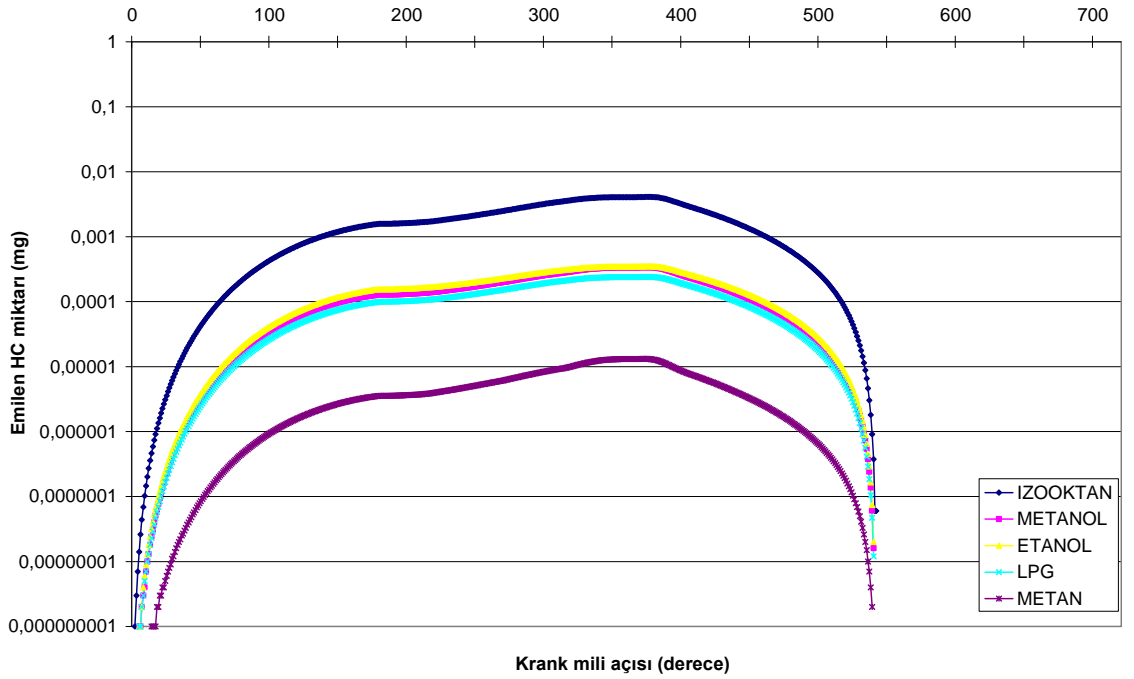
Şekil 4.33 ve 4.34’de hava fazlalık katsayısının 0,8 (zengin karışım) ve 1,2 (fakir karışım) değerlerinde yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi incelenen tüm yakıtlar için gösterilmektedir. Şekil 4.35 ve 4.36 da ise zengin ve fakir karışımlardaki yağ filmince salınan HC miktarlarındaki değişim yine tüm yakıtlar için gösterilmektedir.



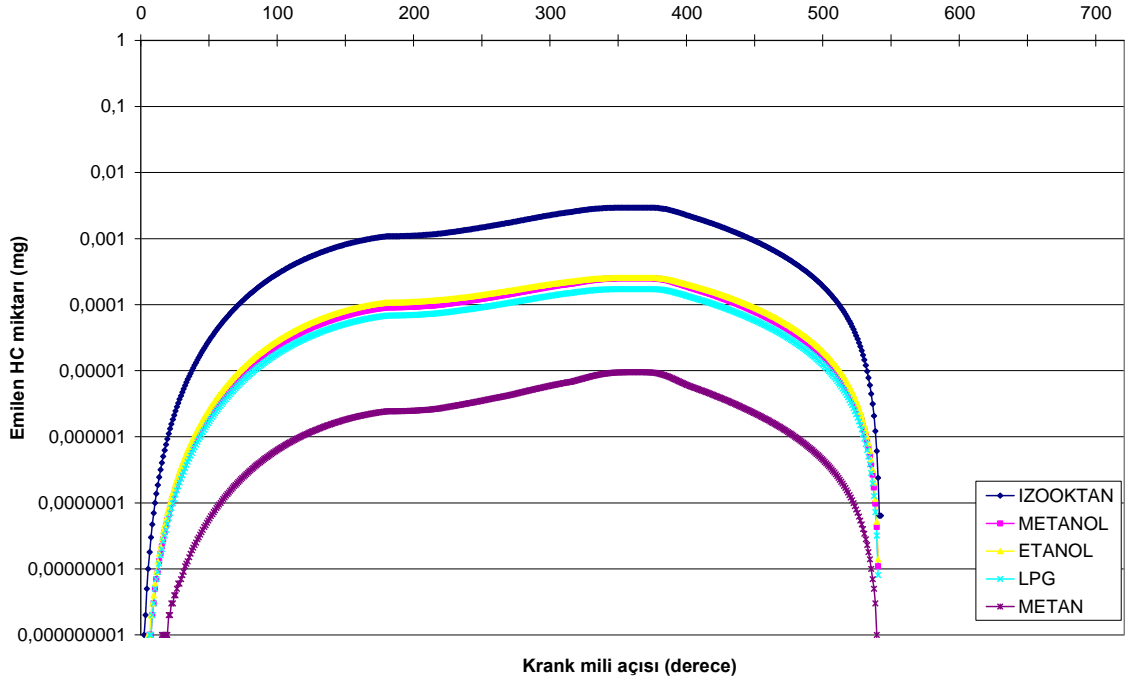
Şekil 4.31. LPG yakıtının hava fazlalık katsayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının KMA’ na göre değişimi



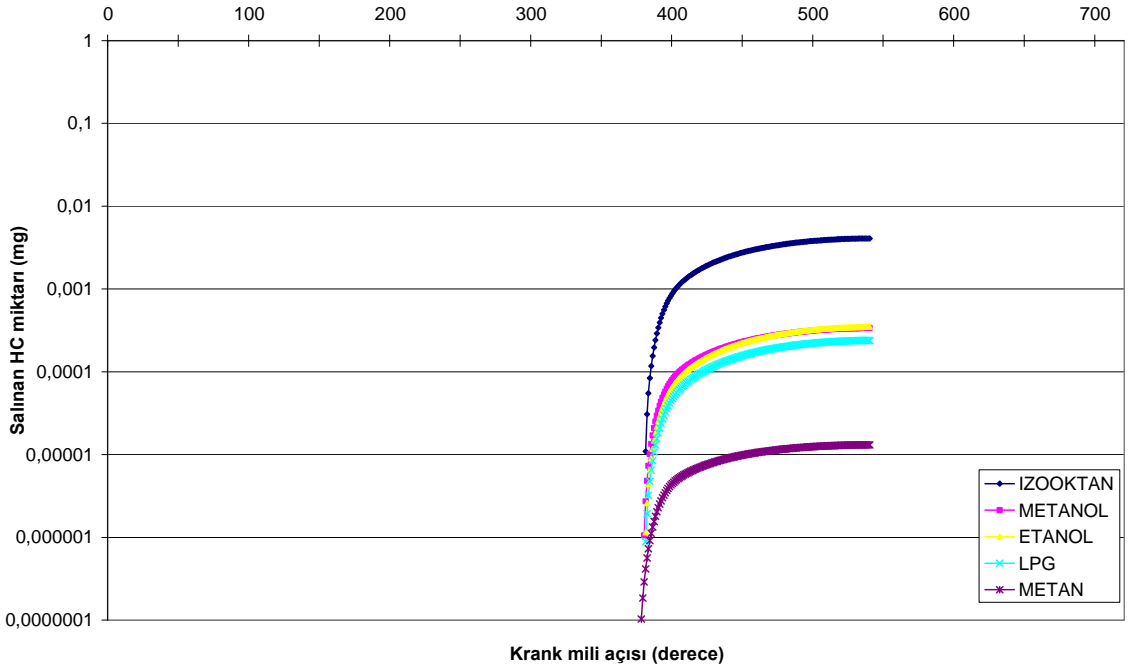
**Şekil 4.32.** LPG yakıtının hava fazlalık katsayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA' na göre değişimi



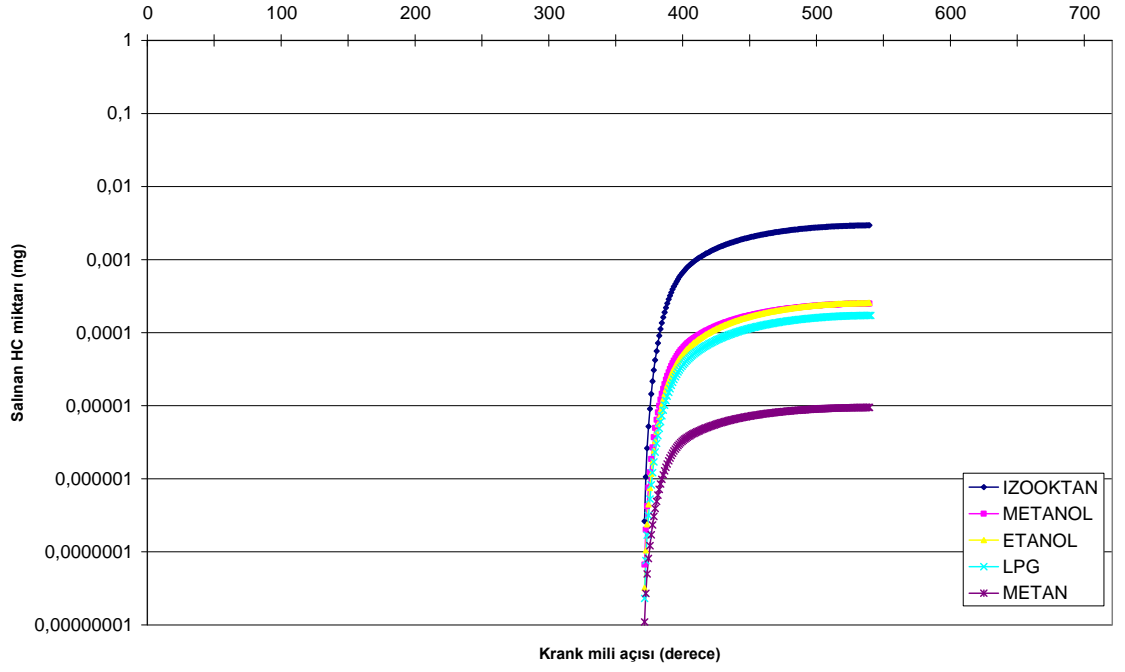
**Şekil 4.33.** Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 0,8 (zengin karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi



**Şekil 4.34.** Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 1,2 (fakir karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen HC miktarının değişimi



**Şekil 4.35.** Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 0,8 (zengin karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi



**Şekil 4.36.** Farklı yakıtların hava fazlalık katsayısının 1,2 (fakir karışım) değerinde olduğu durumlarda KMA' na bağlı olarak yağ filmi tarafından salınan HC miktarının değişimi

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Izo-oktan, Metanol, Etanol, LPG ve Metan(doğal gaz) gibi günümüzde kullanılan yakıtlara yönelik bir araştırma yapılmış ve bunlar aynı çatı altında toplanıp kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

Çalışmada gerekli parametreler ve denklemler kullanılarak bir programda sayısal olarak çözdürülmüştür. Ve daha sonra sonuçlar grafikler haline getirilmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümünde yer alan grafiklerin, istenirse, farklı motor çalışma şartları içinde rahatlıkla elde edilebilmeleri mümkündür. Bu parametreler devir sayısı, sıkıştırma oranı, hava fazlalık katsayısı ve giriş basıncıdır. Program, üzerinde rahatlıkla değişiklik yapılabilecek konuma getirilmiştir. Denenecek yağ cinsi ve diğer motor çalışma parametreleri basitçe değiştirilebilmektedir.

İlk olarak, silindir içi gazlarının termodinamik özellikleri (basınç, sıcaklık, ısı taşınım katsayısı vs.) bir çevrim boyunca hesaplanmıştır. Daha sonra bunlar, Henry ve difüzyon kanunları kullanılarak, yakıtın yağ filmi içine kütleli emilme/salınma hızının etkisi, farklı yakıtlar için ( Izo-oktan, metanol, etanol, LPG ve doğal gaz) motor devrine, sıkıştırma oranına, giriş basıncına, hava fazlalık katsayısına göre incelenmiştir.

Çalışma sonuçlarına göre yakıtlar arasında en fazla basınç metanol yakıtında (maks. ~39 Bar) en düşük basınç metan yakıtında (maks. ~35 Bar) elde edilmektedir. En fazla silindir içi sıcaklık LPG yakıtında (maks. ~2200 K), en düşük silindir içi sıcaklık Metanol yakıtında (maks. ~2050 K) görülmektedir. Silindir içi ısı taşınım katsayısı incelenen yakıtlar arasında en fazla metanol(maks. ~1100 W/m<sup>2</sup>.K) yakıtında, en düşük metan(maks. ~910 W/m<sup>2</sup>.K) yakıtındadır.

Bu çalışmada silindir içerisine alınan en fazla yakıtın metanol yakıtı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bir çevrimde yaklaşık olarak 0,06 gr değerinde metanol yakıtı silindir içerisine alınmaktadır. En düşük metan yakıtı silindir içerisine alınmaktadır (0,02 gr/çevrim). Bu durum yakıtların stokyometrik oranlarıyla ilişkilidir. Gaz yakıtların (LPG ve Metan) yağ filmi tarafından gerçekleşen emilme ve salınma HC miktarlarının

sıvı yakıtlara oranla daha az olarak gerekleştigi sonucuna ulaşılmıştır. Yağ filmince emilen ve salınan en fazla HC miktarları izo oktan yakıtı kullanımında ortaya çıkmaktadır. Bir çevrimde yağ filmi kaynaklı anlık ~0,0015 mg HC oluşumuna sebebiyet vermektedir. Çalışmada ayrıca motor devri artışının yağ filmi kaynaklı HC emisyonlarına azaltıcı yönde bir etkiye neden olduğu, sıkıştırma oranı ve basıncın HC emilim ve salınımını arttırdığı, karışımın zenginleştikçe emilen ve salınan HC miktarlarının fazlalaştığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Bu çalışmada ileriye dönük olarak emme ve egzoz süreçleri modellenilerek daha gerçekçi bir model elde edilebilir. Ayrıca bu modelde yakıt silindir içerisine girerken dolgunun ısınması göz ardı edilmiştir. İleriki çalışmalarda bu değişim de göz önüne alınarak model gerçekle daha uyumlu hale getirilebilmesi mümkündür.

Sonuç olarak çalışma hedeflenen yolda beklenen ümit verici hamleyi yapmış ve bundan sonraki çalışmalar için olumsuz hiçbir netice ortaya koymamıştır.

## KAYNAKLAR

- Avan, E.Y., Mills, R., Dwyer-Joyce, R.S. 2010.** Ultrasonic imaging of the piston ring oil film during operation in a motored engine – towards oil film thickness measurement. *SAE*, Paper No: 2010-01-2179.
- Baba, Y., Suzuki, H., Sakai, Y., Wei, D.L.T., Ishima, T., Obokata T., 2007.** PIV/LIF measurements of oil film behavior on the piston in I.C. engine. *SAE*, Paper No: 2007-24-0001.
- Cheng, W.K., Hamrin, D., Heywood, J.B. 1993.** An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark-ignition engines. *SAE*, Paper No: 932708.
- Clemmens, W.B. 1984.** Methanol vaporization: Effects on volumetric efficiency and on determination of optimum fuel delivery system. U.S. Environmental Protection Agency Technical Report (EPA-AA-TSS-83-9), Michigan, USA.
- Dhar, A., Agarwal, A.K., Saxena V. 2008.** Measurement of dynamic lubricating oil film thickness between piston ring and liner in a motored engine. *Sensors and Actuators*, A 149: 7-15.
- Dhar, A., Agarwal A.K., Saxena V. 2008.** Measurement of lubricating oil film thickness between piston ring-liner interface in an engine simulator. *SAE*, Paper No: 2008-28-0071.
- Dwyer-Joyce, R.S., Green, D.A., Harper, P., Lewis, R., Balakrishnan, S., King, P.D., Rahnejat, H., Howell-Smith, S. 2006.** The measurement of liner-piston skirt oil film thickness by an ultrasonic means. *SAE*, Paper No: 2006-01-0648.
- Hamrin, D.A. 1994.** Modeling of engine-out HC emissions for prototype production. *Master Thesis*, Massachusetts Institute of Technology.
- Hamrin, D.A. and Heywood, J.B. 1995.** Modeling of engine-out hydrocarbon emissions for prototype production engines. *SAE*, Paper No: 950984.
- Heywood, J.B. 1989.** Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill International Editions. Singapore, 930 s.
- Huang, Z., Pan, K., Li, J., Zhou, L., JIANG, D. 1996.** An investigation on simulation models and reduction methods of unburned hydrocarbon emissions in spark ignition engines. *Combustion Science and Technology*, 115 (1-3): 105-123.
- Kaiser, E.W., Siegi, W.O., Trinker, F.H., Cotton, D.F. 1995.** Effect of engine operating parameters on hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark-ignited engine. *SAE*, Paper No: 950159.
- Karamangil, M.I. 2000.** Benzin motorlarında HC emisyonlarının matematik modellenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Karamangil, M.I. 2001.** Buji ateşlemeli motorlarda yağ filmi tarafından taşınan HC emisyonlarının modellenmesi. *Teknoloji*, Sayı 3-4: 73-84.
- Karamangil, M.I., Kaynaklı, O., Sürmen, A. 2004.** Parametric investigation of cylinder and jacket side convective heat transfer coefficients of gasoline engines. *Energy Conversion and Management*(2006), 47: 800-816
- Kato, M., Fujita, K., Suzuki, H., Baba, Y., Ishima, T., Obokata T. 2009.** Analysis of lubricant oil film behavior on the piston surface according with piston shapes by means of LIF and PIV. *SAE*, Paper No: 2009-28-0003.
- Kirkpartick, A.T., 2006.** Engine Thermodynamics – Heat Transfer in Engines – Fluid Mechanics of Engine. <http://www.engr.colostate.edu/~allan/engines.html> (Erişim Tarihi: 17.09.2011)



- Kirkpartick, A.T., 2006.** Finite Heat Release Applet with Heat Transfer. <http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page8/EngineParm2/engine.html> (Erişim Tarihi: 17.09.2011)
- Korematsu, K., Takemura, S., Gabe, M. 1986.** Effects of fuel absorbed in oil film on unburnt hydrocarbon emissions from spark ignition engines (Experiments by combustion bomb). *JSME 52-477*: 2300-2305.
- Korematsu, K., Yuo, K. 1989.** Effects of fuel absorbed in oil film on unburnt hydrocarbon emissions from spark ignition engines (3<sup>rd</sup> report, determination of absorption process of octane or methanol in motor oil by combustion bomb experiments). *JSME 55-519*: 3581-3586
- Korematsu, K. 1990.** Effects of fuel absorbed in oil film on unburnt hydrocarbon emissions from spark ignition engines. *JSME International Journal Series II*, 33(3): 606-614.
- Korematsu, K., Takahashi, S. 1991.** Effects of fuel absorbed in oil film on unburnt hydrocarbon emissions from spark ignition engines (Influence of oil added on piston crown on total hydrocarbon concentration in exhaust gas). *JSME International Journal Series II*, 34(3): 362-368.
- Namazian, M. and Heywood, J.B. 1983.** Flow in the piston-cylinder-ring crevices of a spark-ignition engine: Effect on hydrocarbon emissions, efficiency and power. *SAE*, Paper No: 820088
- Norris, M.G., Hochgreb, S. 1994.** Novel experiment on in-cylinder desorption of fuel from the oil layer. *SAE*, Paper No:941963
- Norris M.G. 1995.** Oxidation of hydrocarbons desorbed from the lubricant oil in spark ignition engines, *Ph. D. Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. USA.
- Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E. 1987.** The properties of gases and liquids. McGraw-Hill, Inc., New York, USA, 741 pp.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H.E., Soruşbay, C. 1995.** İçten yanmalı motorlar. Birsen Yayınevi, İstanbul, 218 s.
- Salazar, V. 2008.** Unburned hydrocarbon emission mechanisms in small engines. *Ph. D. Thesis*, Mechanical Engineering, University of Wisconsin – Madison, USA.
- Shenghua, L., Longbao, Z., Keyu, P., Hui, Z., Xiangfeng Y. 1996.** Effects of cylinder lubrication oil film on hydrocarbon emissions of SI engine. *SAE*, Paper No: 961913.
- Shimada, A., Harigaya, Y., Suzuki, M., Takiguchi, M. 2004.** An analysis of oil film temperature, oil film thickness and heat transfer on a piston ring of internal combustion engine: the effect of local viscosity. *SAE*, Paper No: 2004-32-0024, *JSAE Paper No*: 20044311.
- Yang, Q. 1995.** A numerical study of piston ring lubrication in internal combustion engines. *Ph. D. Thesis*, Engineering Science, University of Toledo, USA.
- Yu, S., Yi, H., Cho, H., Kim, M., Min, K. 2000.** Modeling of the dynamic process of fuel absorption/desorption in the oil film in SI engines. *JSME International Journal Series B*, 43(4): 570-575.
- Yu, S., Min, K. 2002.** Effects of the oil and liquid fuel film on hydrocarbon emissions in spark ignition engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering* 216: 759-771.

## **EKLER**

- EK 1** Yakıtların Buharlaşma Entalpisi
- EK 2** Izo-oktan Yakıtı için Yakıt Buharının Soğutma Etkisi Hesabı
- EK 3** Karışımı Oluşturan Bileşenlerin  $c_p$  ve  $\mu$  Değerlerinin Hesabı
- EK 4** Silindir İçerisindeki Gazların Moleküler Ağırlıklarının KMA'na Göre Değişimi
- EK 5** Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

### EK 1 Yakıtların Buharlaşma Entalpisi

<b>Yakıt</b>	<b>Buharlaşma Entalpisi (kJ/kg)</b>
Bütan	320
Etanol	841
Metan	760
Metanol	1104
Propan	356
Izo-Oktan	308

## EK 2 Izo-oktan Yakıtı için Yakıt Buharının Soğutma Etkisi Hesabı

$$\Delta T = -\frac{(x.F.\Delta H_{vap} + Q)}{(1 - F + x.F).C_p}$$

$$F = \phi.f_s.\lambda$$

Burada ;

$x$ : yakıtın buharlaşma yüzdesi

$f_s$ : Yakıt akışı parçalanma katsayısı (0,2 olarak alınmıştır) (Clemmens 1984).

$\phi$ : Yakıt/Hava oranı

$\lambda$ : Hava fazlalık katsayısı

$\Delta H_{vap}$ : Buharlaşma entalpisi(Btu/lb)(Ek 1)

$C_p$ :  $F < 0,5$  ise 0,240;  $F > 0,5$  ise 0,245 (Btu/lb.F)

$\Delta T$ : Soğuma miktarı ( $^{\circ}F$ )

$Q$ : Analizin ilk adımı için 0 alınan ısı değeri

$$F_{IO} = 0,0664.0,2.1 = 0,01328$$

$$\Delta T_{IO} = -\frac{(1.0,01328.132,416 + 0)}{(1 - 0,01328 + 1.0,01328).0,240} = -7,327 \text{ } ^{\circ}F$$

Havanın başlangıçtaki sıcaklığı  $T_1=40 \text{ } ^{\circ}C$  ( $104 \text{ } ^{\circ}F$ ) olduğu düşünülürse, yakıt buharının etkisiyle  $-7,327 \text{ } ^{\circ}F$ 'lık bir soğuma gerçekleşecektir:

$$T_2 = 104 - 7,327 = 96,673 \text{ } ^{\circ}F = 35,93 \text{ } ^{\circ}C$$

$\Delta T_{IO} (^{\circ}C) = 35,93 - 40 = -4,07 (^{\circ}C)$  olarak elde edilir. Buradaki (-) işareti soğuma olduğunun göstergesidir.

$$T_1 \text{ sıcaklığındaki } \rho_{hava,1} = 1,127 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$T_2 \text{ sıcaklığındaki } \rho_{hava,2} = 1,143 \text{ kg} / \text{m}^3$$

### EK 3 Karışımı Oluşturan Bileşenlerin $c_p$ ve $\mu$ Değerlerinin Hesabı

#### $C_p(\text{CO}_2)$ (300-1000 K):

$$\begin{aligned} \text{CPCO2TET} = & (2.275724 + 0.009922072 * \text{TTETA} \\ & - 0.000010409113 * \text{TTETA}^{**2} + 0.000000006866686 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 0.00000000000211728 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 44.011 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{CO}_2)$ (1000-5000 K):

$$\begin{aligned} \text{CPCO2TET} = & (4.453623 + 0.003140168 * \text{TTETA} \\ & - 0.0000012784105 * \text{TTETA}^{**2} + 0.0000000002393996 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 1.6690333\text{E-}14 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 44.011 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{H}_2\text{O})$ (300-1000 K):

$$\begin{aligned} \text{CPH2OTET} = & (3.386842 + 0.003474982 * \text{TTETA} \\ & - 0.000006354696 * \text{TTETA}^{**2} + 0.000000006968581 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 0.00000000002506588 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 18.016 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{H}_2\text{O})$ (1000-2500 K):

$$\begin{aligned} \text{CPH2OTET} = & (2.672145 + 0.003056293 * \text{TTETA} \\ & - 0.000000873026 * \text{TTETA}^{**2} + 0.00000000012009964 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 6.391618\text{E-}15 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 18.016 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{N}_2)$ (300-1000 K):

$$\begin{aligned} \text{CPN2TET} = & (3.298677 + 0.0014082404 * \text{TTETA} \\ & - 0.000003963222 * \text{TTETA}^{**2} + 0.000000005641515 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 0.000000000002444854 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 28.013 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{N}_2)$ (1000-2500 K):

$$\begin{aligned} \text{CPN2TET} = & (2.92664 + 0.0014879768 * \text{TTETA} \\ & - 0.000000568476 * \text{TTETA}^{**2} + 0.00000000010097038 * \text{TTETA}^{**3} \\ & - 6.753351\text{E-}15 * \text{TTETA}^{**4}) * 8.3145107 / 28.013 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{HAVA})$ (300-1500 K):

$$\begin{aligned} \text{CPHAVA} = & (28.11 + 0.001967 * \text{TTETA} + 0.000004802 * \text{TTETA}^{**2} \\ & - 0.000000001966 * \text{TTETA}^{**3}) / 28.96 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{HAVA})$ (1500-2500 K):

$$\begin{aligned} \text{CPHAVA} = & 0.0005 * ((\text{TTETA} - 1300) / 100)^{**3} \\ & - 0.0056 * ((\text{TTETA} - 1300) / 100)^{**2} + 0.0387 * ((\text{TTETA} - 1300) / 100) + 1.1717 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{YAKIT})$ (300-1500 K):

$$\begin{aligned} \text{CPYAKIT} = & 4.184 * (-1.4867 + 74.339 * (\text{TTETA} / 1000.0) \\ & - 39.065 * (\text{TTETA} / 1000.0)^{**2} + 8.0543 * (\text{TTETA} / 1000.0)^{**3} \\ & + 0.01219 * (1000.0 / \text{TTETA})^{**2}) / 44.064 \end{aligned}$$

#### $C_p(\text{KARIŞIM})$ :

$$\begin{aligned} \text{CPTETA} = & ((1 - \text{ALFA}) * (1 * \text{CPPROPA} * \text{MY} + \text{HMOLS0} * \text{CPHAVA} * \text{MH}) + \\ & \text{ALFA} * (\text{NCO2} * \text{CPCO2TET} * \text{MCO2} + \text{NN2} * \text{CPN2TET} * \text{MN2} + \\ & \text{NH2O} * \text{CPH2OTET} * \text{MH2O} + \text{NO2} * \text{CPO2TET} * \text{MO2})) / ((1 - \text{ALFA}) * (1 * \text{MY} + \\ & \text{HMOLS0} * \text{MH}) + \text{ALFA} * (\text{NCO2} * \text{MCO2} + \text{NN2} * \text{MN2} + \text{NH2O} * \text{MH2O} + \\ & \text{NO2} * \text{MO2})) \end{aligned}$$

**Not:** Yukarıdaki formüllerden hesaplanan  $C_p$  değerleri kJ/kgK birimindedir.

**μ(HAVA) (250-1000):**

$$\text{MUHTETA} = (0.0148 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) ** 3 - 0.7745 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) ** 2 + 26.781 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) + 134.02) / 10. ** 7$$

**μ(HAVA) (1000-2500):**

$$\text{MUHTETA} = (0.0045 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 4 - 0.1639 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 3 + 1.9227 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 2 + 18.639 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) + 404.09) / 10. ** 7$$

**μ(N<sub>2</sub>) (100-1300):**

$$\text{MUN2TET} = (-0.0112 * (\text{TTETA} / 100.) ** 4 + 0.4316 * (\text{TTETA} / 100.) ** 3 - 6.8638 * (\text{TTETA} / 100.) ** 2 + 76.72 * (\text{TTETA} / 100.) - 0.9902) / 10. ** 7$$

**μ(N<sub>2</sub>) (1300-):**

$$\text{MUN2TET} = (14.081 * (\text{TTETA} ** 1.5) / (\text{TTETA} + 114.)) / 10. ** 7$$

**μ(H<sub>2</sub>O) (400-850):**

$$\text{MUH2OTET} = (0.0026 * ((\text{TTETA} - 350.) / 50.) ** 3 - 0.0407 * ((\text{TTETA} - 350.) / 50.) ** 2 + 18.208 * ((\text{TTETA} - 350.) / 50.) + 116.19) / 10. ** 7$$

**μ(H<sub>2</sub>O) (850-):**

$$\text{MUH2OTET} = (11.326 * (\text{TTETA} ** 1.5) / (\text{TTETA} + 120.)) / 10. ** 7$$

**μ(CO<sub>2</sub>) (300-800):**

$$\text{MUCO2TET} = (-0.0276 * ((\text{TTETA} - 250.) / 50.) ** 3 + 0.1795 * ((\text{TTETA} - 250.) / 50.) ** 2 + 20.298 * ((\text{TTETA} - 250.) / 50.) + 128.24) / 10. ** 7$$

**μ(CO<sub>2</sub>) (800-):**

$$\text{MUCO2TET} = (15.48 * (\text{TTETA} ** 1.5) / (\text{TTETA} + 240.)) / 10. ** 7$$

**μ(YAKIT) (300-600):**

$$\text{MUYTETA} = (-0.3543711 + 0.03080096 * \text{TTETA} - 0.00000699723 * \text{TTETA} ** 2) / 10. ** 6$$

**μ(YAKIT) (600-1000):**

$$\text{MUYTETA} = ((0.0148 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) ** 3 - 0.7745 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) ** 2 + 26.781 * ((\text{TTETA} - 200.) / 50.) + 134.02) - 150.) / 10. ** 7$$

**μ(YAKIT) (1000-):**

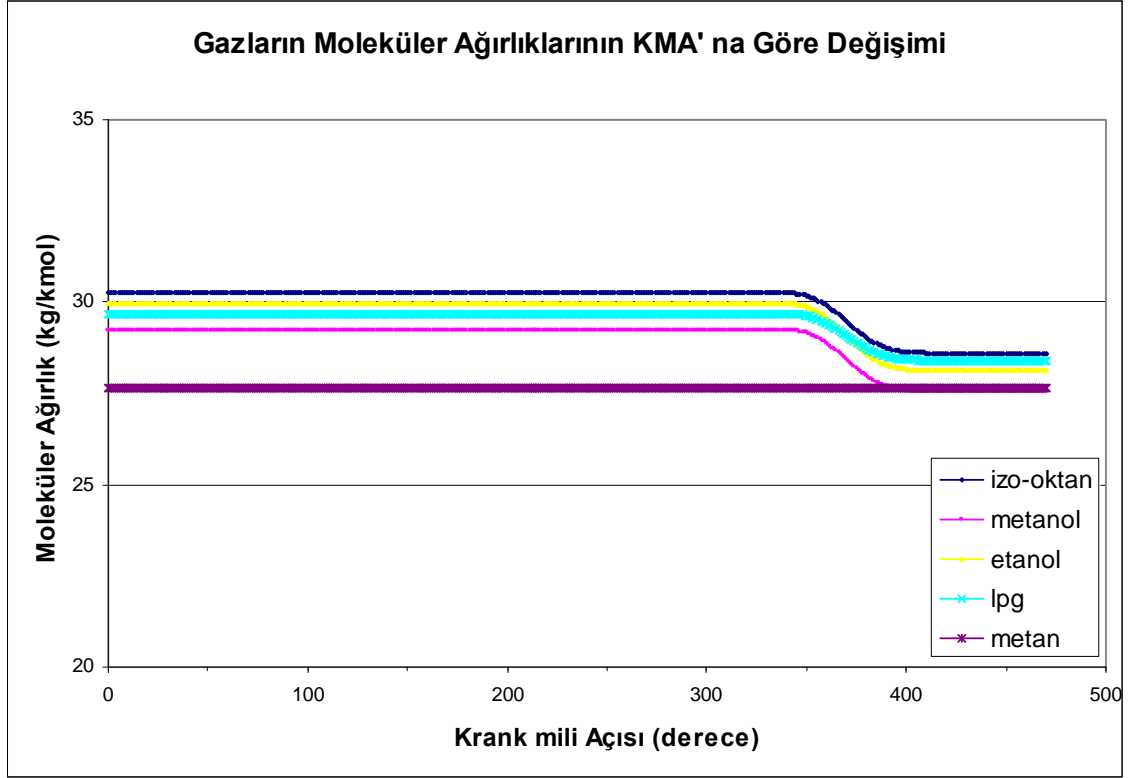
$$\text{MUYTETA} = ((0.0045 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 4 - 0.1639 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 3 + 1.9227 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) ** 2 + 18.639 * ((\text{TTETA} - 900.) / 100.) + 404.09) - 150.) / 10. ** 7$$

**μ(KARIŞIM):**

$$\text{MUTETA} = ((1. - \text{ALFA}) * (1. * \text{MUYTETA} * \text{MY} + \text{HMOLS0} * \text{MUHTETA} * \text{MH}) + \text{ALFA} * (\text{NCO2} * \text{MUCO2TET} * \text{MCO2} + \text{NH2O} * \text{MUH2OTET} * \text{MH2O} + \text{NN2} * \text{MUN2TET} * \text{MN2} + \text{NO2} * \text{MUO2TET} * \text{MO2})) / ((1. - \text{ALFA}) * (1. * \text{MY} + \text{HMOLS0} * \text{MH}) + \text{ALFA} * (\text{NCO2} * \text{MCO2} + \text{NH2O} * \text{MH2O} + \text{NN2} * \text{MN2} + \text{NO2} * \text{MO2}))$$

Yukarıda  $c_p$  ve  $\mu$  ye ait denklemler EXCEL programının kullanımıyla gazların sıcaklığa bağlı olarak verilen tablo değerlerinden elde edilmiş bağıntılardır.

## EK 4 Silindir İçerisindeki Gazların Moleküler Ağırlıklarının KMA'na Göre Değişimi



## EK 5 Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

360 °KMA' nda duvar sıcaklığı, yani yağ sıcaklığı  $T_o = 424,59$  °K olduğuna göre;

Yoğunluk:

$$\begin{aligned}\rho(T_o) &= \rho(T_{o_0}) - 0,63(T_o - T_{o_0}) \\ \rho(424,59) &= \rho(288,5) - 0,63(424,59 - 288,5) \\ \rho(424,59) &= 894 - 0,63(424,59 - 288,5) \\ \rho(424,59) &= 808,2633 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Viskozite:

$$\begin{aligned}\log_{10} \log_{10}(\mu_o / \rho_o + 0,7) &= 8,17 - 3,16 \cdot \log_{10}(T_o) \\ (\mu_o / \rho_o + 0,7) &= 10^{10^{8,17-3,16 \cdot \log_{10}(T_o)}} \\ (\mu_o / 0,8082633 + 0,7) &= 10^{10^{8,17-3,16 \cdot \log_{10}(424,59)}} \\ (\mu_o / 0,8082633 + 0,7) &= 5,4183 \\ \mu_o &= 3,81 \text{ g/m.s}\end{aligned}$$

Difüzyon Katsayısı:

$$\begin{aligned}D &= 1,33 \cdot 10^{-11} \frac{T_o^{1,47} \mu_o^{\left(\frac{10,2}{V_A} - 0,791\right)}}{V_A^{0,71}} \\ V_A &= 0,285 \cdot V_c^{1,048} \\ D_{10} &= 1,33 \cdot 10^{-11} \frac{424,59^{1,47} \cdot 3,81^{\left(\frac{10,2}{0,285 \cdot 468^{1,048}} - 0,791\right)}}{(0,285 \cdot 468^{1,048})^{0,71}} = 9,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}\end{aligned}$$

Yakıtların Kritik Molar Hacmi (cm<sup>3</sup>/mol):

V <sub>C-İO</sub>	V <sub>C-MTNL</sub>	V <sub>C-ETNL</sub>	V <sub>C-LPG</sub>	V <sub>C-MTN</sub>
468	118	167,1	239,4	99,2



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seçkin Yenice  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bakırköy – İSTANBUL 17.05.1985  
Yabancı Dili : İngilizce ve Almanca

### Eğitim Durumu

Lise : Pertevniyal Anadolu Lisesi – İstanbul (2003)  
Lisans : Uludağ Üniversitesi – Bursa (2008)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Bursa (2011)

Çalıştığı Kurumlar : Bosch A.Ş. – Bursa (2008-2009)

İletişim(e-posta) : seckin.yenice@gmail.com