

BENZİN VE GAZ YAKITLAR İÇİN YAĞ FİLMİ KAYNAKLI HC EMİSYONLARININ MATEMATİK MODELLENMESİ

M. İhsan Karamangil², Seçkin Yenice¹, Ömer Kaynaklı¹, Ali Sürmen³

¹Uludag University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Mechanical Eng., Bursa

²Uludag University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Automotive Eng., Bursa

³Bursa Technical University, Rector

ihsan@uludag.edu.tr, seckinyenice@hotmail.com, kaynakli@uludag.edu.tr, ali.surmen@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.05.2012; Kabul/Accepted: 27.02.2014)

ÖZET

Silindir cidarları üzerindeki yağ filmi motor çıkış hidrokarbon (HC) emisyonlarının ana kaynaklarından birisi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, benzin, LPG ve metan için yağ filmi içerisine emilen/salınan yakıt miktarı için matematik bir model geliştirilmiştir. Yağ filmi tarafından emilen/salınan LPG ve metanın benzinden daha düşük seviyede olduğu görülmüştür. Bu farklılığın en önemli parametresi çözünürlükle ilgili olan Henry sabiti olduğu tespit edilmiştir. Düşük motor devirlerinde yağ filmi yakıt buharı etkileşimine daha uzun süre tanındığı için emilen/salınan HC miktarları artmıştır. Artan sıkıştırma oranı ve giriş basıncı ile birlikte emilen/salınan HC miktarları artmıştır.

Anahtar kelimeler: Yağ filmi, Henry kanunu, HC emisyonları, Buji ateşlemeli motor

MATHEMATICAL MODELING OF HC EMISSIONS RELEASED by OIL FILM for GASOLINE and GASEOUS FUELS

ABSTRACT

Oil film on cylinder liner has been suggested as a major source of engine-out hydrocarbon emissions. In this study, a mathematical modeling for the rate of absorption/desorption of the fuel in the oil film has been developed for gasoline, LPG and methane. It was seen that the absorption/desorption mechanism of LPG and methane into the oil film were lower than gasoline. It was determined that the most dominant parameter of this difference was Henry's constant, which was related to solubility. As interaction time of oil film-fuel vapor was longer at low engine speeds, the quantities of HC absorbed/desorbed increased. The quantities of HC absorbed/desorbed increased with increasing inlet pressure and compression ratio.

Keywords: Oil film, Henry's Law, HC emission, SI engine

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Silindir cidarları üzerinde yağ filminin temel görevi segmanları ve piston eteğini yağlamak, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmaktır. Birkaç mikron kalınlığındaki bu yağ filmi, emme, sıkıştırma ve yanma işlemleri sırasında hidrokarbon emme (absorbtion), genişleme ve egzoz stroklarında ise hidrokarbon salma (desorbtion) yeteneğine sahiptir. Motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının %10-25'inin yağ filminden emilen ve salınan hidrokarbonlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir, [1].

Dwyer-Joyce ve ark. [2] tek silindirli bir motor üzerinde yağ filmi kalınlığını belirlemek için bir düzenek kurmuşlar ve piston eteği civarındaki yağ filmi kalınlığını 2-21 µm olarak ölçmüşlerdir. Baba ve ark. [3] piston eteği üzerindeki yağ filmi davranışını (kalınlık ve hız) incelemişlerdir. Dhar ve ark. [4] bir motor simülöründe piston segmanı-silindir gömleği arasındaki yağ filmi kalınlığını belirlemeye çalışmışlar ve yağ filmi kalınlığını 3 farklı noktada 0,2-8 µm arasında ölçmüşlerdir. Kato ve ark. [5] piston eteği ile silindir gömleği arasındaki boşluğun yağ filmi kalınlığı ve hızında etkili olduğunu

bulmuşlardır. Piston eteği ile silindir gömleği arasında 30-100 µm arasında boşluklar tespit etmişlerdir.

Korematsu [6] buji ateşlemeli bir motorda yağ filmi içerisine yakıt emiliminin yanmamış HC emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. İnce yağ filmi içerisine yakıt emilim ve salınım işlemini modellemiştir. Yağ filminden neşredilen yanmamış HC miktarının yağ filminin pozisyonuna, motor devrine, difüzyon katsayısına, yağ filmi kalınlığına, çevrim sayısına ve motor yağı içerisindeki başlangıç yakıt konsantrasyonuna bağlı olduğunu bulmuştur.

Shenghua ve ark. [7] buji ateşlemeli motorlarda silindirlerdeki yağ filminin HC emisyonlarına olan etkisini incelemiştir. Yağlı ve yağsız yapılan deneyler sonucunda yağ filminin toplam HC emisyonları üzerindeki katkısını %28 olarak bulmuşlardır.

Yu ve ark. [8] buji ateşlemeli bir motorda yağ filmi içerisine yakıt emilim/salınım işleminin dinamik davranışı üzerine çalışmışlardır. Emilme/salınma olayı üzerinde en etkili parametrenin Henry sabiti olduğunu tespit etmişlerdir. Yine silindirlerin üst kısımlarında yer alan yağ filminin alt kısımdakilere göre emilme/salınma işlemine daha fazla katıldığını söylemektedirler. Yu ve Min [9] benzer bir çalışmada motor devri, motor yükü ve yağ filmi sıcaklığına bağlı parametrik bir çalışma yapmışlar ve çözünürlükle ilgili olan Henry sabitini yağ filmi içerisindeki yakıtın emilim ve salınım olayında en baskın parametre olarak göstermişlerdir.

Bu çalışmada yukarıda özetlenen çalışmalardan farklı olarak benzin ile gaz yakıtların yağ filmi kaynaklı HC emisyonları karşılaştırılmış ve sonuçlar bazı motor konstrüktif ve çalışma parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir.

2. MATEMATİK MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada, benzinli motorlarda farklı yakıtlar için yağ filminden kaynaklanan hidrokarbon emisyonlarının tespiti için matematik bir model geliştirilmiştir. Model iki alt kısımdan oluşmaktadır.

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

Termodinamik modelde, seçilen motora ait geometrik özellikler ile kullanılan yakıt-hava karışımı tanımlanmıştır. Silindir içindeki gazların özgül ısıları, viskoziteleri, basınç ve sıcaklık değerleri her bir krank açısı adımı hesap edilmiştir. Ayrıca silindir içindeki ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, yanma sonucu oluşan ürünlerin miktarları yine krank açısına bağlı olarak bulunmuştur. Bu model [10,11] nolu kaynaklarda detaylı olarak verildiği için burada izah edilmeyecektir. Bununla birlikte, bu makalelerde

bahsedilen modellemelere aşağıdaki eklemeler yapılmıştır. Hem benzinin hem de gaz yakıtların silindir dışında karışım oluşturduğu düşünülmüş ve buna bağlı olarak gaz yakıtlarla çalışmada yakıtın kimyasal formülünden kaynaklanan volumetrik verim kaybı (yakıt buharının havanın yerini alması) hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler η_{v1} ile gösterilmiştir. Benzinin buharlaşması sırasında ortamı soğutma etkisi dikkate alınarak gaz yakıtlarda gerçekleşmeyen volumetrik verim artışı η_{v2} ile temsil edilmiştir. Son olarak burada 2000 d/dak'da tam yükte çalışma durumunda her üç yakıtın aynı şartlarda silindir içine alındığı kabul edilerek volumetrik verimleri $\eta_{v3}=0,85$ olarak alınmıştır. Nihai volumetrik verim bu 3 etki dikkate alınarak hesaplanmış ve η_v ile gösterilmiştir. Buna göre hesaplanan değerler bir tablo halinde Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Benzin, LPG ve metan için hesaplanan volumetrik verim (η_v) ile silindir içine alınan yakıt ve hava miktarları [12] (Volumetric efficiency calculated and fuel and air quantities entered to the cylinder for gasoline, LPG and methane)

	İZO-OKTAN C ₈ H ₁₈	LPG C _{3,7} H _{9,4}	METAN CH ₄
η_{v1}	0,9835	0,9664	0,905
η_{v2}	1,0142	1	1
η_{v3}	0,85	0,85	0,85
η_v	0,8478	0,8214	0,7693
ρ_{yak} (kg/m ³)	4,672	2,204	0,655
ρ_{krsm} (kg/m ³)	1,214	1,191	1,109
Stokimetric H/Y oranı (kgH/kgY)	15,06	15,44	17,17
m_h (kg)	$3,872 \cdot 10^{-4}$	$3,752 \cdot 10^{-4}$	$3,514 \cdot 10^{-4}$
m_y (kg)	$2,571 \cdot 10^{-5}$	$2,429 \cdot 10^{-5}$	$2,047 \cdot 10^{-5}$
m_{atik} (kg)	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$
m_{dolgu} (kg)	$4,137 \cdot 10^{-4}$	$4,002 \cdot 10^{-4}$	$3,726 \cdot 10^{-4}$

Burada ρ_{yak} ve ρ_{krsm} : buhar fazındaki yakıtın ve karışımın yoğunluğunu, m_h ve m_y : silindir içine alınan hava ve yakıt kütlelerini, m_{atik} : bir önceki çevrimden silindir içinde kalan atık gaz miktarını, m_{dolgu} : silindir içindeki toplam kütle ($m_h+m_y+m_{atik}$) temsil etmektedir.

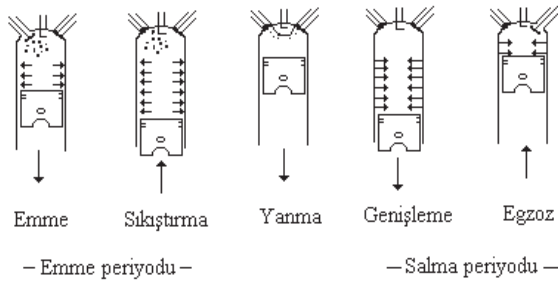
Yağ filmi kaynaklı HC oluşum modelinde, Henry ve difüzyon kanunlarını kullanarak, yakıtın yağ filmi içine kütle emilme/salınma hızının etkisi benzin, LPG ve metan için motor devrine, sıkıştırma oranına, giriş basıncına, hava fazlalık katsayısına göre incelenmiştir. Silindir içine alınan yakıt miktarları her yakıt için stokimetric oranda tutulmuştur. Motora ait geometrik özellikler ve çalışma parametreleri ile sayısal çözümde kullanılan yağ filmi özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Motora ait geometrik özellikler, çalışma şartları ve yağ filmi özellikleri (Geometry of model engine and operating conditions and oil film properties)

Sıkıştırma oranı	8,3
Silindir çapı	0,0864
Strok (m)	0,0674
Biyel uzunluğu (m)	0,13
Krank yarıçapı (m)	0,0337
Kompresyon hacmi (m ³)	5,41x10 ⁻⁵
Strok hacmi (m ³)	3,95x10 ⁻⁴
Motor devri (d/dak)	2000
Giriş basıncı (bar)	1
Hava fazlalık katsayısı	1
Emme supabı açılma açısı	10° BTDC
Emme supabı kapanma açısı	34° ABDC
Egzoz supabı açılma açısı	31° BBDC
Egzoz supabı kapanma açısı	55° ATDC
Ateşleme avansı	-25° BTDC
Yanma süresi	70°
Yağ filmi kalınlığı (µm)	3
Referans sıcaklıktaki yağ yoğunluğu (kg/m ³)	894
Motor yağı moleküler ağırlığı (kg/kmol)	420

2.1. Yağ Filmi Kaynaklı HC Oluşum Modeli (HC Absorbition/Desorbition Model by Oil Film)

Bir buji ateşlemeli motorda yağ filmi (Şekil 1) çevrim boyunca basınç ve sıcaklıktaki değişimlere maruz kalır. Emme zamanı boyunca yağ filmi çok düşük basınç ve sıcaklığa maruz kaldığından yağ filmi içine emilen yakıt miktarı çok azdır. Sıkıştırma stroğu 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 derinliğince nüfuz etmeye başlarlar.



Şekil 1. Yakıtın yağ filmi içerisine emilmesi ve salınması (HC absorbition/desorbition mechanism by oil film)

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 basınçta her bir 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 edilebilir. Bununla birlikte gömlek sıcaklığı yükün artması ile artar ve yağ filmi sıcaklığını etkiler.

Genişleme ve egzoz strokları boyunca yağ filmi piston tarafından açılır. Yağ filmi azalan basınç ve sıcaklığa maruzdur ve yanmış gazlar içindeki hidrokarbon konsantrasyonu hemen sıfırdır. Bundan dolayı, hidrokarbonlar yağ filminin dışına doğru salınırlar ve silindir gazları içine yayılırlar. Eğer oksidasyona uğramazlar ve silindirden de çıkabilirlerse yanmamış hidrokarbon emisyonlarına katılırlar.

Yağ filmi için geliştirilen matematik model Henry Kanunu ile difüzyon denklemini içerir.

2.1.1. Henry Kanunu (Henry's Law)

Yağ filminin dış yüzeyinde ve yağ filmi içinde erimiş (çözülmüş) yakıt buharı konsantrasyonu, denge halindeki seyreltik çözeltiler için, Henry Kanunu ile ifade edilir. Henry Kanunu, buhar fazındaki yakıtın kısmi basıncı, yağ filmi içerisine emilen yakıtın mol kesri ve Henry sabiti arasında yazılan bir ifadedir, [13].

$$x_{yak,yağ} = \frac{P_{yak,(g)}}{H} \quad (1)$$

Gaz halindeki yakıtın kısmi basıncı;

$$P_{yak,(g)} = \frac{n_{yak,sil} \tilde{R} T}{V} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanır. Burada; $n_{yak,sil}$: silindir içindeki yakıtın mol sayısı, T : sıcaklık, V : silindir hacmi ve \tilde{R} : universal gaz sabitidir [14].

Deneysel sonuçlara göre Henry sabiti (H) ile yağ sıcaklığı arasında üssel bir ilişki vardır. Şekil 2'de izo-oktan, propan ve metan için Henry sabiti ile yağ sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir.

H^* , Henry sabiti cinsinden;

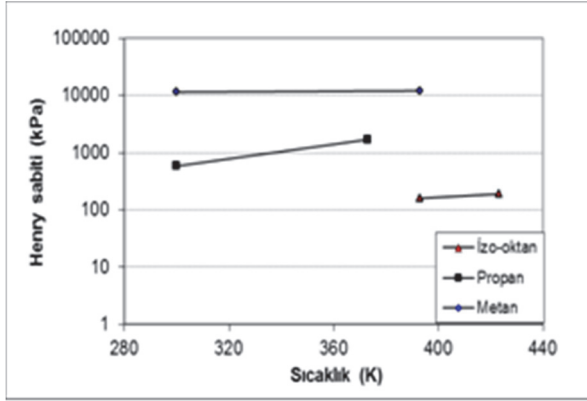
$$H^* = H(M_{yağ} / M_{yak})$$

$M_{yağ}$: yağın mol kütlesi, M_{yak} : yakıtın mol kütlesidir.

Silindir gömleği sıcaklığına bağlı olan yağ filmi sıcaklığı Henry sabitini, silindir içi basınç da her bir bileşenin kısmi basıncını etkiler. Şekil'2 deki grafiklerden yağ filmi sıcaklığı ile H^* arasındaki bağıntı;

$$H^* \propto (10^{0.0082T_{yağ}}) \quad (3)$$

şeklinde olur. Burada $T_{yağ}$: cidardaki yağ filmi sıcaklığıdır [15].



Şekil 2. Farklı yakıtlar için Henry sabiti-yağ sıcaklığı değişimi [12, 15] (Variation of Henry's constant-oil film temperature for different fuels)

2.1.2. Difüzyon Denklemi (Diffusion Equation)

Yukarıda izah edilen yağ filmi içerisine yakıtın emilip salınması, yağ yüzeyindeki konsantrasyonun ani bir şekilde değişmesinden dolayı, tek boyutlu yakıt difüzyonu problemi olarak davranış gösterir. Yağ filmi Şekil 3'te gösterildiği gibi silindir ekseninde 180 eşit parçaya bölünmüş ve y ekseninde her bir düğüm noktasından diğerine olan difüzyon ihmal edilmiştir [10].

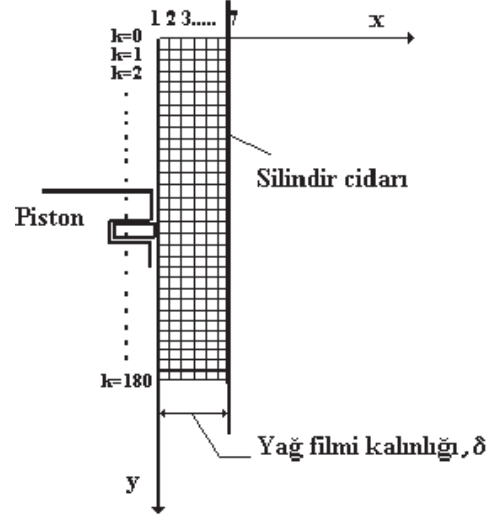
Nümerik çözüm sadece x eksenine doğrultusunda yapılmaktadır. Bununla birlikte gerçek motor çalışma şartlarında y eksenine doğrultusunda da hücreler arası geçiş söz konusudur. Fakat bu tip geçişlerin modellenmesindeki zorluk ve belirsizlik nedeniyle y yönündeki difüzyon dikkate alınmamıştır.

Şekil 3'teki koordinat sisteminin kullanılmasıyla yağ filmi içindeki yakıtın konsantrasyonu $c(x,t)$, difüzyon eşitliğinin kullanılmasıyla silindir cidarına doğru olan mesafenin ve zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir.

Difüzyon eşitliği;

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4)$$

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 terimidir.



Şekil 3. Yağ filmi boyunca oluşturulan gridlerin şematik gösterimi [10]. (Meshing of oil film)

Sınır şartları:

- i. $c(x,0)=0$ $t=0$ anında bütün noktalardaki konsantrasyonlar sıfırdır.
- 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 [16,17].

Burada birinci sınır şartı tüm noktalarda sıfır olarak verilebildiği gibi (başlangıçta yağ filmi hiç yakıt ihtiva etmiyor demektir) çevrim tekrarlanmak suretiyle hesaplanacak olan değerler de başlangıç sınır şartı olarak kullanılabilir. Üçüncü sınır şartındaki $F(t)$ bilinen bir fonksiyondur ve silindir gazları ile yağ filmi yüzeyi arasında Henry Kanunu uygulanmak suretiyle bulunur.

Sıvı-gaz arayüzü için daha önce yazılan Henry Kanunu;

$$x_{yak,yağ} = \frac{P_{yak,(g)}}{H} = \frac{P}{H} \left(\frac{P_{yak,(g)}}{p} \right) = \frac{P}{H} Y \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir.

$x_{yak,yağ}$: yağ içindeki yakıtın molar oranı, $p_{yak,(g)}$: silindir gazlarındaki yakıtın kısmi basıncı, H : yağ içinde erimeyen yakıt için Henry sabiti, p : gaz karışımının toplam basıncı, Y : gaz karışımı içindeki yakıtın molar oranıdır.

$n_{yağ}$ ve $n_{yak,yağ}$ sırasıyla yağ filminin ve yağ filmi içine emilen 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 (5) nolu eşitlikte yerlerine yazılırlarsa;

$$\frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ} + n_{yak,yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{dolgu0}} \quad (6)$$

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

$$\frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ}} \cong \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{dolgu0}} \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir.

Önceki eşitlikte mol sayıları yerlerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{m_{yak,yağ} / M_{yak}}{m_{yağ} / M_{yağ}} &= \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)} / M_{yak}}{m_{dolgu0} / M_{dolgu0}} \\ \frac{m_{yak,yağ}}{m_{yağ}} &= \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)}}{m_{dolgu0}} \cdot \frac{M_{dolgu0}}{M_{yak}} \cdot \frac{M_{yak}}{M_{yağ}} \\ &= \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)}}{m_{dolgu0}} \cdot \frac{M_{dolgu0}}{M_{yağ}} \end{aligned}$$

Burada;

$$H^*(t) = H(t) \left(\frac{M_{yağ}}{M_{yak}} \right) \text{ ve } Y_m(t) = \frac{m_{yak(g)}}{m_{dolgu0}}$$

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

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

olmak üzere üçüncü sınır şartı;

$$F(t) = c(0,t) = \frac{m_{yak,yağ}}{m_{yağ}} = p(t) \cdot Y_m(t) \cdot K(t) \quad (8)$$

şeklinde bulunmuş olur. $m_{yak,yağ}$: yağ filmi içine emilen yakıtın kütlesi, $m_{yağ}$: yağ filminin kütlesi,

$m_{yak(g)}$: gaz halindeki yakıtın kütlesi, m_{dolgu0} : gaz halindeki toplam kütle (yakıt+hava+artık gaz), $M_{yağ}$: yağın mol kütlesi, M_{yak} : yakıtın mol kütlesi, M_{dolgu0} : silindir gazlarının mol kütlesidir.

Bir çevrim boyunca $p(t)$, $Y_m(t)$, $K(t)$ değerlerinin değişimi termodinamik çevrim çıktılarına bağlıdır ve bulunmaları burada ele alınmamıştır. Dolayısıyla Eş.(8)'ten pistonun her konumunda yağ filmi yüzeyindeki konsantrasyon değeri hesaplanabilir. Pistonun ÜÖN'dan itibaren 60° hareket ettiğini düşünelim. Henry Kanunu bize piston 60° hareket ettikten sonra elde edilen $c(0,t)=F(t)$ yüzey konsantrasyonu değerinin piston blokajından serbest kalan 60 hücre için de eşit olduğunu söyler.

Difüzyon denklemi sonlu fark metodunun kullanımıyla nümerik olarak çözülür. Sonlu fark metodlarından açık çözüm (explicit) metodu kullanılır.

Difüzyon denklemi;

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (9)$$

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

$$\frac{c_i^{k+1} - c_i^k}{\Delta t} = D \left(\frac{c_{i+1}^k - 2c_i^k + c_{i-1}^k}{\Delta x^2} \right) \quad (10)$$

$$c_i^{k+1} = c_i^k + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (c_{i+1}^k - 2c_i^k + c_{i-1}^k) \quad (11)$$

şeklinde bir sonlu fark denklemi elde edilir. Burada i indisi x yönündeki ilerlemeyi, k indisi zaman boyutunda ilerlemeyi gösterir. Denklemin çözümünün doğru kabul edilebilir olması için denklemin uygunluk ve kararlılık şartlarını sağlaması gerekmektedir. Mesela 2000 d/dak için zaman artımı $\Delta t = 8,333 \cdot 10^{-5}$ s olur ve Δx derinlik artımı da $0.5 \mu m$

seçilirse, $\gamma = \frac{D \Delta t}{\Delta x^2} = 0.0166$ olarak hesaplanır.

Böylece $\gamma < 1/2$ kararlılık şartı sağlanmış olur. 180x6, 180x8, 180x9, 180x13 gibi farklı grid sayılarında program çalıştırılmış ve sonuçlarda yaklaşık %5,83 lük bir hata gözlenmiştir.

Δt : 2000 d/dak'da çalışan motorun 1 KMA'sına karşılık gelen zaman dilimidir. Bu da şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta t = \frac{2000}{60} = 33,33 \frac{dev}{s} = \frac{1}{33,33} \frac{s}{dev} = 0,03 \frac{s}{dev}$$

2000 dev/dak'da çalışan bir motorun bir krank mili devri 0,03 saniyede gerçekleşiyor. 1 devri krankın 360 derecelik dönüşünde gerçekleştiğine göre 1 KMA saniye cinsinden $8,333 \cdot 10^{-5}$ s eder.

$$\Delta t = 0,03 \frac{s}{dev} = \frac{0,03}{360} = 8,33 \cdot 10^{-5} \frac{s}{KMA}$$

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

$$c_{ort}(K) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{N} \quad (12)$$

formülü ile verilebilir. c_i : x doğrultusunda her bir noktanın konsantrasyonu, N: nokta sayısını göstermektedir.

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

$$m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi D H \quad (13)$$

olarak tariflenir. Tek bir hücreye ait yağ kütlesi ise;

$$\Delta m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi D \Delta y \quad (14)$$

şekindedir. Tek bir hücre içerisine emilen yakıt miktarı da;

$$c(0, t) = F(t) = \frac{\Delta m_{yak}}{\Delta m_{yağ}} \quad (15)$$

eşitliğinin kullanımıyla

$$\Delta m_{yak} = F(t) \cdot \Delta m_{yağ} \quad (16)$$

şeklinde hesaplanır. Benzer şekilde tüm düğüm noktaları için aynı işlemler tekrarlanır. Nihayet, her düğüm noktasında en son hesap edilen yakıt kütleleri toplanarak suretiyle yağ filmi içinde o anda bulunan toplam yakıt miktarı hesaplanmış olur.

Yağ filmi içine emilen yakıt miktarının silindirik içi gazların basıncına, silindirik içinde kalan yakıt miktarına ve Henry sabitine, difüzyon katsayısına, motor devrine ve yağ filmi kalınlığına bağlı olduğu görülür.

Difüzyon Katsayılarının Hesabı

Difüzyon katsayıları aşağıdaki eşitliğe [18] göre hesaplanmıştır.

$$D = 1,33 \cdot 10^{-11} \frac{T_o \mu_o \left(\frac{10,2}{V_A} - 0,791\right)}{V_A^{0,71}} \quad (17)$$

$$V_A = 0,285 \cdot V_c^{1,048} \quad (18)$$

Yağın viskozitesi (μ_o) Walter eşitliğinden hesaplanır, [19];

$$\log_{10} \log_{10}(\mu_o / \rho_o + 0,7) = 8,17 - 3,16 \cdot \log_{10}(T_o) \quad (19)$$

Eşitlikte geçen yağın yoğunluk değeri referans sıcaklıktaki yoğunluk değeri baz alınarak hesaplanmıştır.

$$\rho(T_o) = \rho(T_{o_0}) - 0,63(T_o - T_{o_0}) \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemlerde; D: Difüzyon katsayısı (m^2/s), M_o : Yağın mol kütlesi (g/mol), T_o : Yağ sıcaklığı (K), V_A : Yakıtın molar hacmi (cm^3/mol), V_c : Yakıtın kritik molar hacmi (cm^3/mol), μ_o : Yağın viskozitesi (g/ms), ρ_o : Herhangi bir sıcaklıktaki yağın yoğunluğu (g/cm^3), T_{o_0} : Referans sıcaklık (288,5 K), $\rho(T_{o_0})$: Referans sıcaklıktaki yağ yoğunluk değeri ($894 kg/m^3$).

Yakıtların kritik molar hacmi değerleri izo-oktan için $468 cm^3/mol$, LPG için $239,4 cm^3/mol$ ve metan için $99,2 cm^3/mol$ dür.

Tablo 3'te 424,59 K duvar sıcaklığı için hesaplanmış viskozite ve difüzyon katsayısı değerleri verilmiştir. Duvar sıcaklığı değeri rejim halindeki bir motorun aksel sıcaklık dağılımlarının ortalaması alınarak bulunmuştur, [13].

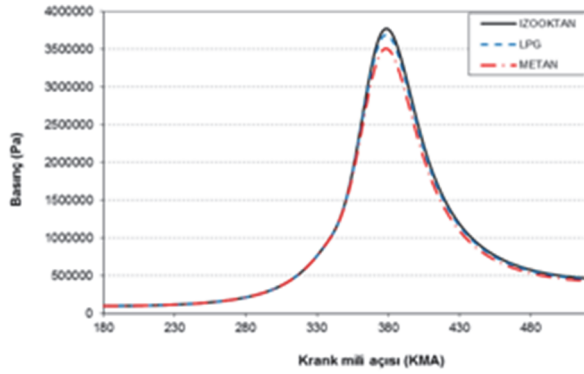
Tablo 3. Viskozite ve difüzyon katsayısı değerleri (424,59 K duvar sıcaklığı için) (Values of viscosity and diffusion coefficients ($T_{wall}=424,59 K$))

TDUVAR (K)	μ_o (g/m s)	$D_{izo-oktan}$ (m^2/s)	D_{metan} (m^2/s)	D_{LPG} (m^2/s)
424,59 K	3,81	$9,13 \cdot 10^{-10}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$	$1,62 \cdot 10^{-9}$

3. MODEL SONUÇLARI ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Sonuçlar hesaplanmadan önce kullanılan termodinamik modelin doğruluğu test edilmiştir. Bunun için literatürde benzer şekilde silindirik içi basınç ve sıcaklığın hesaplandığı bir programdan faydalanılmıştır, [20]. Bu doğrulamadan sonra izo-oktan, LPG ve metan için yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarları motor devri, sıkıştırma oranı, giriş basıncı ve hava fazlalık katsayısına göre hesaplanmıştır.

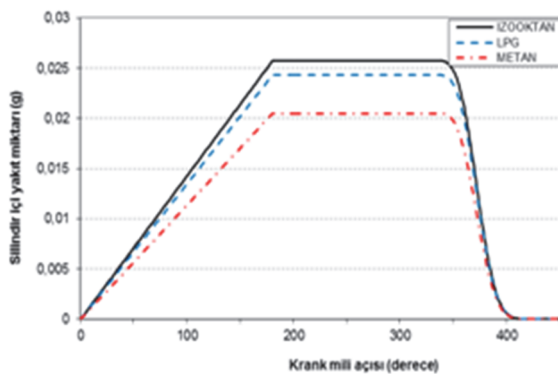
İzo-oktan, LPG ve metan için elde edilen silindir içi basınç değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



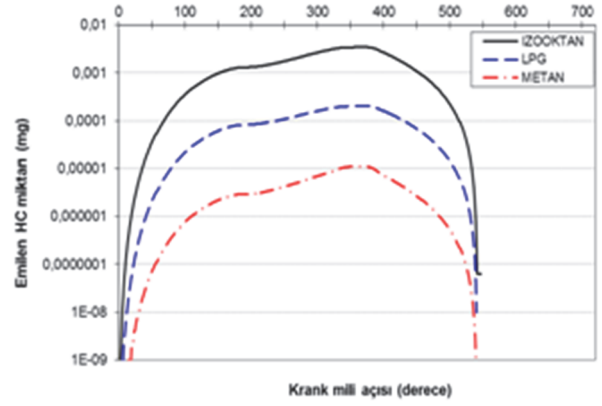
Şekil 4. Silindir içi basınç değişimleri (pressure variations in cylinder)

Şekil 5'te bir çevrim boyunca silindir içine alınan yakıt miktarı 3 farklı yakıt için gösterilmiştir. Silindir içine yakıt girişi emme supabı kapanana kadar (214 KMA) devam etmektedir. 335-405 KMA arası değerlerde yanma olmakta ve yakıt miktarı yanma reaksiyonuna bağlı olarak yanarak azalmaktadır. Silindirlere stokimetric oranda Y/H karışımı alındığı için her bir yakıt için silindirlere alınan yakıt miktarları farklı olmaktadır.

Şekil 6'da yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı miktarlarının krank mili açısıyla değişimi gösterilmiştir. Emilme işleminin silindir içi maksimum basınca kadar devam ettiği görülmektedir. Hem silindir içerisine alınan en yüksek yakıt miktarı, hem de yağ filmi tarafından emilen en yüksek HC miktarı izo-oktan da olmuştur. Bunun sebebi izo-oktanda Henry sabitinin LPG ve metana göre çok daha düşük değerde olmasıdır.

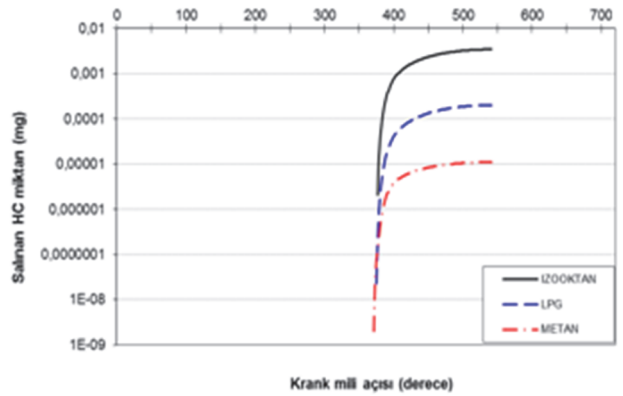


Şekil 5. Bir çevrim boyunca silindir içerisine alınan yakıt miktarları (Fuel quantities entered to the cylinder along a cycle)



Şekil 6. Farklı yakıtlar için yağ filmi tarafından emilen HC miktarı (HC amount absorbed by the oil film for different fuels)

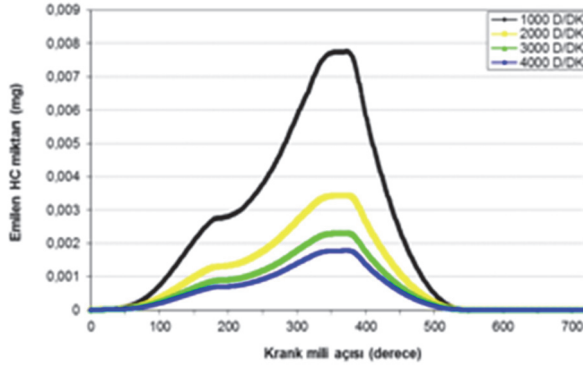
Şekil 7'de yağ filmi tarafından salınan HC miktarları gösterilmiştir. Emilme işlemi çevrim başlangıcından silindir içi maksimum basınç değerine kadar devam etmektedir. Basıncın azalmaya başlamasıyla birlikte yağ filmi içerisindeki hidrokarbonlar silindir içerisine doğru difüze olmaya başlarlar. Salınım işlemi maksimum basınç değeri ile 540 KMA arasında gerçekleşir. 540 KMA dan sonra silindir içerisinde kalan yakıt miktarı çok azaldığından, silindir içi basınç değeri hemen hemen sabit kaldığından ve Henry sabiti 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 salınım en fazla izo-oktanda, en düşük metanda görülmektedir.



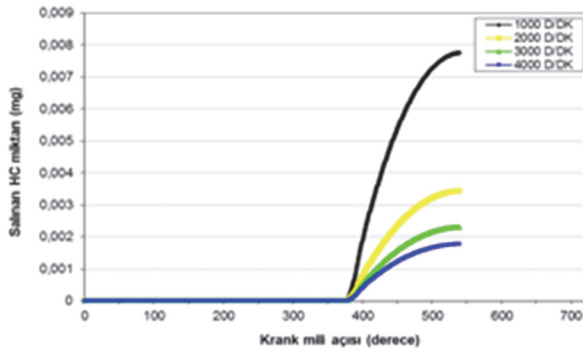
Şekil 7. Farklı yakıtlar için yağ filmi tarafından salınan HC miktarı (HC amount desorbed by the oil film for different fuels)

Bundan sonraki kısımda parametrik inceleme yapılırken tek bir yakıt seçilmiş ve değiştirilen parametrenin etkisi bu yakıt üzerinde gözlemlenmiştir. Böylece grafiklerin daha sade ve anlaşılır olması sağlanmıştır. Parametredeki değişimin diğer yakıtlar üzerinde de benzer etkiyi göstermesi beklenmelidir.

Şekil 8 ve 9'da izo-oktan yakıtı ile çalışmada devir sayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarındaki değişim gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi düşük devir sayılarında emilen ve salınan HC miktarları artmaktadır. Bunun sebebi çevrimin daha uzun sürmesi nedeniyle yakıt buharı–yağ ikilisinin daha uzun süre bir arada bulunmasıdır. Dolayısıyla daha fazla miktarda yakıt buharı (HC) yağ filmince emilir ve yine daha fazla miktarda HC yağ filmince salınır.

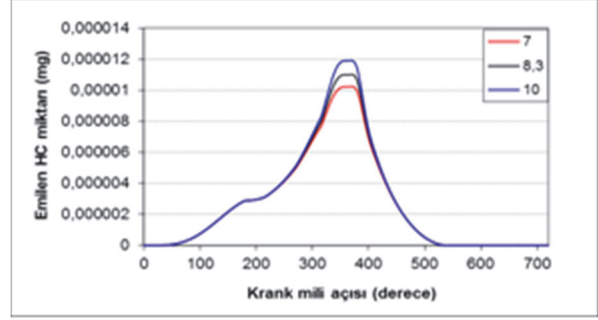


Şekil 8. İzo-oktan için farklı devir sayılarında yağ filmi tarafından emilen HC miktarı (HC amount absorbed by the oil film at different engine speeds for iso-octane)

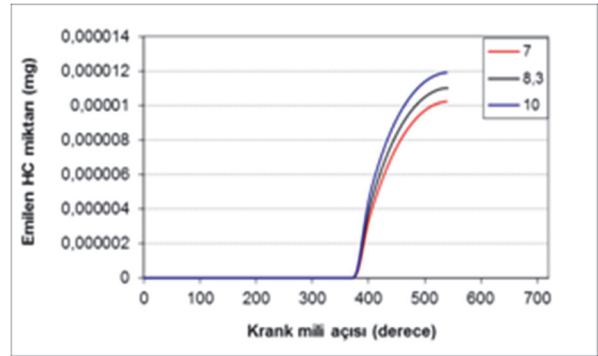


Şekil 9. İzo-oktan için farklı devir sayılarında yağ filmi tarafından salınan HC miktarı (HC amount desorbed by the oil film at different engine speeds for iso-octane)

Şekil 10 ve 11'de sırasıyla metan için farklı sıkıştırma oranlarında yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarları verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi sıkıştırma oranı arttıkça yağ filmi tarafından emilen HC miktarları artmaktadır. Bunun temel sebebi sıkıştırma oranının artışıyla birlikte silindir içi basıncın artmasıdır. Basıncın yükselmesi yakıt buharının (HC) yağ filmi içerisine daha kolay yani daha fazla nüfuz etmesi anlamına gelir.

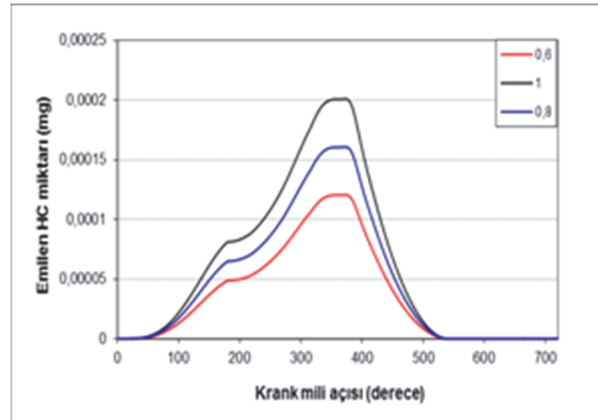


Şekil 10. Metan için farklı sıkıştırma oranlarında ($\epsilon=7, 8.3$ ve 10) yağ filmi tarafından emilen HC miktarı (HC amount absorbed by the oil film at different compression ratios for methane)

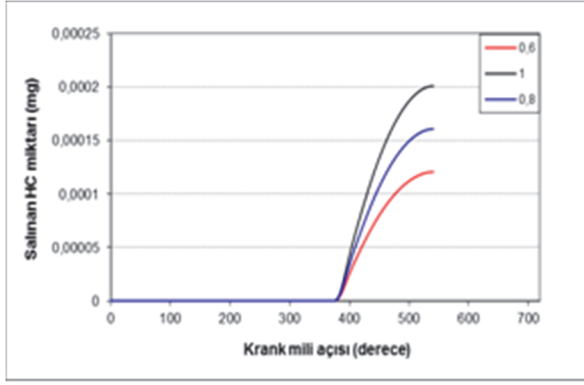


Şekil 11. Metan için farklı sıkıştırma oranlarında yağ filmi tarafından salınan HC miktarı (HC amount desorbed by the oil film at different compression ratios for methane)

Şekil 12 ve 13'te LPG için farklı giriş basıncı değerlerinin yağ filmince emilen ve salınan HC miktarı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi basınç artışı ile yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarında artış söz konusudur. Düşük basınç değerlerinde (5) denkleminde de görüldüğü yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı (HC) az olmaktadır.

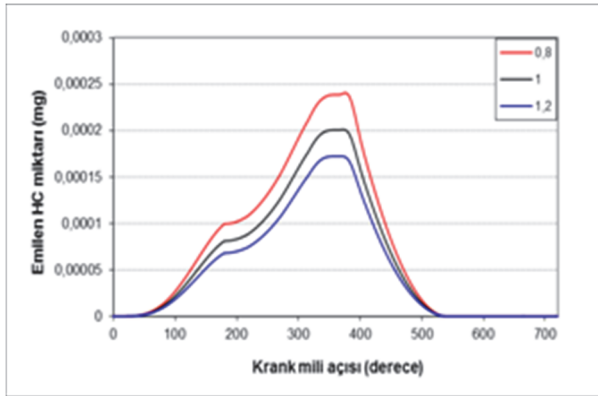


Şekil 12. LPG için farklı giriş basıncı değerlerinde yağ filmi tarafından emilen HC miktarı (HC amount absorbed by the oil film at different inlet pressure values for LPG)

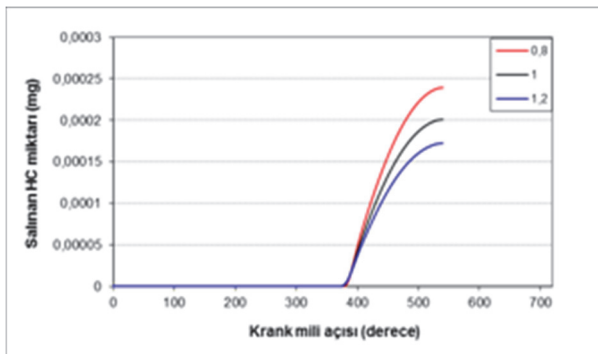


Şekil 13. LPG için farklı hava giriş basıncı değerlerinde yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA'na göre değişimi (HC amount desorbed by the oil film at different inlet pressure values for LPG)

Şekil 14 ve 15'te LPG yakıtı için hava fazlalık katsayısının farklı değerlerinin yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarı üzerine olan etkisi görülmektedir. Zengin karışımlarda silindir içerisindeki yakıt miktarının artmasıyla birlikte yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarında da bir artış görülmektedir.



Şekil 14. LPG için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde yağ filmi tarafından emilen HC miktarı (HC amount absorbed by the oil film at different excess air ratio values for LPG)



Şekil 15. LPG için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde yağ filmi tarafından salınan HC miktarı (HC amount desorbed by the oil film at different excess air ratio values for LPG)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, benzin (izo-oktan) ile gaz yakıtların (LPG ve metan) yağ filminden kaynaklanan HC emisyonları teorik olarak incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Yağ filmi tarafından yakıt buharının emilme işleminin silindir içi maksimum basınç değerine kadar devam ettiği, daha sonra basıncın azalması ile birlikte yakıt buharının silindir içine doğru difüze olmaya başladığı belirlenmiştir. Yağ filminden olan salınım yaklaşık 540 KMA sına kadar devam etmiştir. 540 KMA dan sonra silindir içerisinde kalan yakıt miktarı çok azaldığından, silindir içi basınç değeri hemen hemen sabit kaldığından ve Henry sabiti artmaya başladığından dolayı yağ filminden herhangi bir salınma görülmemektedir.

İzo-oktan, LPG ve metan arasında yağ filmi tarafından en fazla emilme/salınma olayının gerçekleştiği yakıt izo-oktan olurken, bu olayın en az gerçekleştiği yakıt ise metan olmuştur. Bu farklılığın en önemli nedeni yakıtların sahip olduğu Henry sabiti değerleridir. Aynı silindir cidar sıcaklığı şartlarında, yağ filmi kaynaklı HC emisyonlarına etki derecelerine göre yakıtlar sırasıyla; izo-oktan, LPG ve metan olarak tespit edilmiştir.

Düşük motor devirlerinde HC emisyonlarını arttığı görülmüştür. Bunun nedeni düşük motor devirlerinde yağ filmi yakıt buharı etkileşimine daha uzun süre tanınmasıdır. Artan sıkıştırma oranıyla birlikte silindir içi basınç değerleri de arttığı için emilen/salınan HC emisyonları artmıştır. Giriş basıncı için de aynı durum söz konusudur. Zengin karışım değerlerinde silindir içine alınan yakıt miktarı arttığı için HC emisyonları da doğal olarak artış göstermiştir.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma, Seçkin Yenice'nin 14.11.2011 tarihinde Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde kabul edilen yüksek lisans tezinin bir bölümüdür.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Hamrin, D.A. and Heywood, J.B., "Modeling of Engine-Out Hydrocarbon Emissions for Prototype Production Engines", SAE, Paper No: 950984, 1995.
2. Dwyer-Joyce, R.S., Green, D.A., Harper, P., Lewis, R., Balakrishnan, S., King, P.D., Rahnejat, H., Howell-Smith, S., "The Measurement of Liner-Piston Skirt Oil Film Thickness by an Ultrasonic Means", SAE, Paper No: 2006-01-0648, 2006.
3. Baba, Y., Suzuki, H., Sakai, Y., Wei, D.L.T., Ishima, T., Obokata T., "PIV/LIF Measurements of Oil Film Behavior on the Piston in IC Engine", SAE, Paper No: 2007-24-0001, 2007.

4. Dhar, A., Agarwal A.K., Saxena V., "Measurement of Lubricating Oil Film Thickness Between Piston Ring-Liner Interface in an Engine Simulator", **SAE**, Paper No: 2008-28-0071, 2008.
5. Kato, M., Fujita, K., Suzuki, H., Baba, Y., Ishima, T., Obokata T., "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, 2009.
6. Korematsu, K., "Effects of Fuel Absorbed in Oil Film on Unburnt Hydrocarbon Emissions from Spark Ignition Engines", **JSME International Journal Series II**, Cilt 33, No 3, 606-614, 1990.
7. Shenghua, L., Longbao, Z., Keyu, P., Hui, Z., Xiangfeng Y., "Effects of Cylinder Lubrication Oil Film on Hydrocarbon Emissions of SI Engine", **SAE**, Paper No: 961913, 1996.
8. Yu, S., Yi, H., Cho, H., Kim, M., Min, K., "Modeling of the Dynamic Process of Fuel Absorption/Desorption in the Oil Film in SI Engines", **JSME International Journal Series B**, Cilt 43, No 4, 570-575, 2000.
9. Yu, S., Min, K., "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** Cilt 216, 759-771, 2002.
10. Karamangil, M.I., Surmen, A., and Gul, Z., "In-Cylinder Expansion of Ring Crevice and Oil film Hydrocarbons in SI Engines", **Energy Conversion and Management**, Cilt 45, No 18-19, 3109-3126, 2004.
11. Karamangil, M.I., Kaynaklı, O., Sürmen, A., "Parametric Investigation of Cylinder and Jacket Side Convective Heat Transfer Coefficients of Gasoline Engines. **Energy Conversion and Management**, Cilt 47, 800-816, 2006.
12. Yenice, S., "Mathematical Modelling of HC Emissions from Oil Film", **Master Thesis**, Uludag University, 2011.
13. Heywood, J.B., "**Internal Combustion Engine Fundamentals**", McGraw-Hill International Editions, Singapore, 930 s., 1989.
14. Çengel, A.Y. and Bols, M.A., "**Thermodynamics an Engineering Approach**", McGraw-Hill International Editions, 1990.
15. Hamrin, D.A., "Modeling of Engine-Out HC Emissions for Prototype Production", **Master Thesis**, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
16. Heywood, J.B. and Hochgreb, S., "Measurement of Gasoline Absorption into Engine Lubricating Oil", **SAE**, Paper No: 961229, 1996.
17. Schramm, J. and Sorenson, S.C., "A Model for Hydrocarbon Emissions from SI Engines", **SAE**, Paper No: 902169, 1990.
18. Salazar, V., "Unburned Hydrocarbon Emission Mechanisms in Small Engines", **Ph. D. Thesis**, Mechanical Engineering, University of Wisconsin – Madison, USA, 2008.
19. Norris, M.G., Hochgreb, S., "Novel Experiment on In-Cylinder Desorption of Fuel from the Oil Layer", **SAE**, Paper No:941963, 1994.
20. Ferguson C.R., Kirkpatrick A, "**Internal Combustion Engines Applied Thermosciences**", John & Wiley Sons Inc, New York, 2001