

BENZİN VE ALKOL YAKITLARI İÇİN YAĞ FİLMİ KAYNAKLI HC EMİSYONLARININ MATEMATİK MODELENMESİ

*M. İhsan KARAMANGİL**
*Seçkin YENİCE***

Özet: Silindir cidarları üzerindeki yağ filmi, hidrokarbon (HC) emisyonlarının oluşmasındaki ana kaynaklardan biri olarak bilinmektedir. Bundan dolayı sunulan çalışmada; bir buji ateşlemeli motorda benzin, etanol ve metanol kullanılması durumunda yağ filmi içine emilen/salınan yakıt miktarı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaç için termodinamik esaslı bir çevrim modeli geliştirilmiş ve ardından söz konusu modele yağ filmi kaynaklı HC'lerin oluşumunu hesaplayan bir model eklenmiştir. Yağ filmi tarafından emilen/salınan etanol ve metanol yakıtının 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, SI motoru

Mathematical Modeling of HC Emissions Released by Oil Film for Gasoline and Alcohol Fuels

Abstract: Oil film on cylinder liner has been suggested as a major source of engine-out hydrocarbon emissions. So in the present study, the rate of absorption/desorption of the fuel in the oil film has been investigated numerically in a spark ignition engine by using gasoline, ethanol and methanol fuels. To aim this purpose, a thermodynamic cycle model has been developed and then a mathematical modeling for the rate of absorption/desorption of the fuel in the oil film has been developed and adapted for this thermodynamic cycle model. It was seen that the absorption/desorption mechanism of ethanol and methanol 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

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 zamanlarında ise hidrokarbon salma (desorbtion) yeteneğine sahiptir. Motor çıkış

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Görükle 16059, Bursa.

** Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle 16059, Bursa.

İletişim Yazarı: M.İ. Karamangil (ihсан@uludag.edu.tr)

hidrokarbon emisyonlarının %10-25'inin yağ filminden emilen ve salınan hidrokarbonlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir, (Hamrin ve Heywood, 1995).

Dwyer-Joyce ve diğ. (2006) tek silindirli bir motor üzerinde yağ filmi kalınlığını belirlemek için bir düzenek kurmuşlar ve motor devrini değiştirerek piston eteği civarındaki yağ filmi kalınlığının 2-21 µm arasında değiştiğini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Baba ve diğ. (2007) piston eteği üzerindeki yağ filmi davranışını (kalınlık ve hız) incelemişlerdir. Yağ filmi kalınlığını laser induced fluorescence (LIF) ve particle image velocimety metotlarını kullanarak ölçmüşler ve bu iki metodu karşılaştırmışlardır. Yağ filminin piston hızı ile birebir aynı hızda hareket etmediğini bulmuşlar ve bu farkın motor devri ve krank açısına göre nasıl değiştiğini ortaya koymuşlardır. Dhar ve diğ. (2008) 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 diğ. (2009) 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 (1990) 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 diğ. (1996) buji ateşlemeli motorlarda silindirlerdeki yağ filminin HC emisyonlarına olan etkisini incelemişlerdir. Yağlı ve yağsız yapılan deneyler sonucunda yağ filminin toplam HC emisyonları üzerindeki katkısını %28 olarak bulmuşlardır.

Yu ve diğ. (2000) 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 (2002) 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 literatürdeki çalışmalardan farklı olarak; bir buji ateşlemeli motorda, benzin, etilalkol ve metil alkol kullanılması durumunda yağ filmi kaynaklı HC emisyonlarının oluşumu sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca motorun bazı çalışma parametrelerinin yağ filminden kaynaklı HC emisyonları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

2. MATEMATİK MODEL

Sunulan çalışmada; bir buji ateşlemeli motorda farklı yakıtların kullanılması durumunda, yağ filmi kalınlığından kaynaklanan hidrokarbon (HC) emisyonlarının değişimi sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaç için daha önceden hazırlanan bir termodinamik esaslı çevrim modeli geliştirilmiştir. Ardından yağ filmi kaynaklı HC oluşum modeli geliştirilmiştir ve bu model çevrim programına alt program olarak eklenmiştir.

Termodinamik modele; kullanılan benzin motorunun strok uzunluğu, silindir çapı vb. gibi temel özellikleri ve yakıtın özellikleri girildiğinde buji ateşlemeli motorların çevrimi hesaplayabilmektedir. Söz konusu modelde silindir basıncı ve sıcaklığı için adi bir diferansiyel denklem takımı elde edilmektedir. İlgili denklem takımı uygun bir sayısal yöntemle 1 °KMA'da çözümlenerek silindir içerisindeki gazların termodinamik özellikleri, silindir basıncı ve sıcaklığı vb. birçok parametre hesaplanabilmektedir. Bu model Karamangil ve diğ. (2004) ve Karamangil ve diğ. (2006) nolu kaynaklarda detaylı olarak verildiği için burada izah edilmeyecektir. Bununla birlikte, bu makalelerde bahsedilen modellerle aşağıdaki eklemeler yapılmıştır. Hem benzinin hem de alkollü yakıtların silindir dışında karışım oluşturduğu düşünülmüş ve buna

bağlı olarak yakıtın kimyasal formülünden kaynaklanan volumetrik verim kaybı (yakıt buharının havanın yerini alması) hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler η_{v1} ile gösterilmiştir. Etanol ve metanolün buharlaşması sırasında ortamı soğutma etkisi dikkate alınmış ve bundan kaynaklanan 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, etanol ve metanol için hesaplanan volumetrik verim (η_v) ile silindir içine alınan yakıt ve hava miktarları (Yenice, 2011)

	İZO-OKTAN C ₈ H ₁₈	METANOL CH ₃ OH	ETANOL C ₂ H ₅ OH
η_{v1}	0,9835	0,8772	0,9346
η_{v2}	1,0142	1,1242	1,0648
η_{v3}	0,85	0,85	0,85
η_v	0,8478	0,8382	0,8459
ρ_{yak} (kg/m ³)	4,672	1,311	1,885
ρ_{krsm} (kg/m ³)	1,214	1,175	1,204
Stokiyometrik H/Y oranı (kgH/kgY)	15,06	6,438	8,957
m_h (kg)	$3,872 \cdot 10^{-4}$	$3,828 \cdot 10^{-4}$	$3,863 \cdot 10^{-4}$
m_y (kg)	$2,571 \cdot 10^{-5}$	$5,946 \cdot 10^{-5}$	$4,313 \cdot 10^{-5}$
$m_{atık}$ (kg)	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$	$7,877 \cdot 10^{-7}$
m_{dolgu} (kg)	$4,137 \cdot 10^{-4}$	$4,431 \cdot 10^{-4}$	$4,303 \cdot 10^{-4}$

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

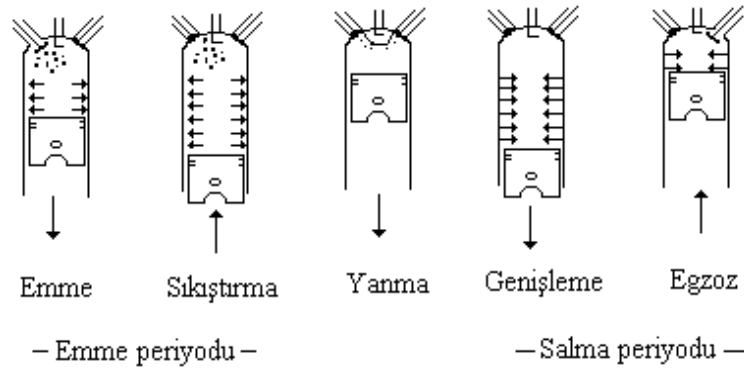
Yağ filmi kaynaklı HC oluşum modelinde, Henry ve difüzyon kanunlarını kullanarak, yakıtın yağ filmi içine kütle emilme/salınma hızının etkisi benzin, etanol ve metanol için motor devrine, sıkıştırma oranına, giriş basıncına, hava fazlalık katsayısına göre incelenmiştir. Silindir içine alınan yakıt miktarları her yakıt için stokiyometrik 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

Sıkıştırma oranı	8.3	Emme supabı açılma açısı	10° BTDC
Silindir çapı	0.0864	Emme supabı kapanma açısı	34° ABDC
Strok (m)	0.0674	Egzoz supabı açılma açısı	31° BBDC
Biyel uzunluğu (m)	0.13	Egzoz supabı kapanma açısı	55° ATDC
Krank yarıçapı (m)	0.0337	Ateşleme avansı	-25° BTDC
Kompresyon hacmi (m ³)	$5.41 \cdot 10^{-5}$	Yanma süresi	70°
Strok hacmi (m ³)	$3.95 \cdot 10^{-4}$	Yağ filmi kalınlığı (μ m)	3
Motor devri (d/dak)	2000	Referans sıcaklıktaki yağ yoğunluğu (kg/m ³)	894
Giriş basıncı (bar)	1	Motor yağı moleküler ağırlığı (kg/kmol)	420
Hava fazlalık katsayısı	1		

2.1. Yağ Filmi Kaynaklı HC Oluşum Modeli

Bir buji ateşlemeli motorda yağ filmi Şekil 1'de görülebileceği gibi, çevrim boyunca değişen basınç ve sıcaklığın etkisi altında kalır. Emme zamanı boyunca yağ filmi çok düşük basınç ve sıcaklığın etkisinde kaldığından yağ filmi içine emilen yakıt miktarı çok azdır. Sıkıştırma zamanı 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

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 zamanları boyunca yağ filmi piston tarafından açılır. Yağ filmi azalan basınç ve sıcaklığa maruzdur ve yanmış gazlar içindeki hidrokarbon konsantrasyonu hemen 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

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, (Heywood, 1989).

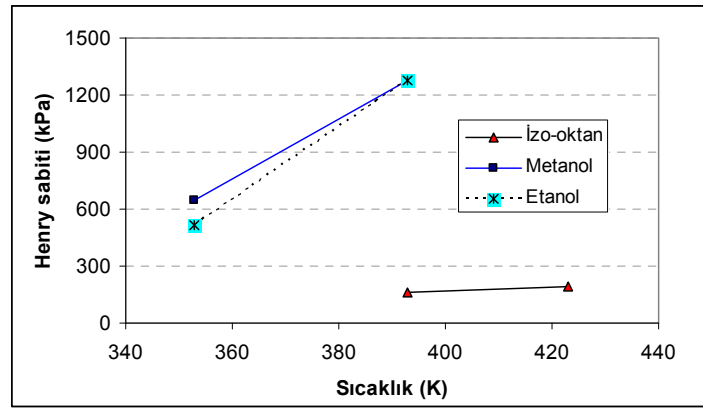
$$x_{yak,yağ} = \frac{P_{yak,(g)}}{H} \quad (1)$$

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 (Çengel and Bols, 1990).

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



Şekil 2:

Farklı yakıtlar için Henry sabiti-yağ sıcaklığı değişimi (Yenice, 2011; Hamrin, 1994)

H^* ; Henry sabiti cinsinden;

$$H^* = H(M_{yağ} / M_{yak})$$

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

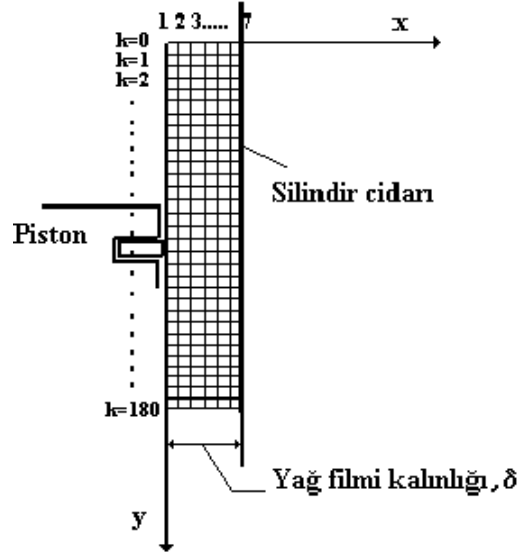
Silindir gömleği sıcaklığına bağlı olan yağ filmi sıcaklığı Henry sabitini, silindir içi basınç da her bir bileşenin kısmi basıncını etkiler. Şekil 2 deki eğrilerden yağ filmi sıcaklığı ile H^* arasındaki bağıntı;

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

şeklinde olur. Burada $T_{yağ}$: cidardaki yağ filmi sıcaklığıdır (Hamrin, 1994).

2.1.2. Difüzyon Denklemi

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 eksenine 180 eşit parçaya bölünmüş ve her bir hücreden diğerine olan difüzyon ihmal edilmiştir (Karamangil, 2004).



Şekil 3:

Yağ filmi boyunca oluşturulan gridlerin şematik gösterimi (Karamangil, 2004).

Şekil 3' teki koordinat sisteminin kullanılmasıyla yağ filmi içindeki yakıtın konsantrasyonu $c(x,t)$, difüzyon eşitliğinin kullanımıyla 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.

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 (Heywood and Hochgreb 1996, Schramm and Sorenson 1990).

Burada birinci sınır şartı tüm noktalarda sıfır olarak verilebileceği 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_{do1gu0} da sırasıyla gaz fazındaki yakıtın ve diğer tüm karışımın (yakıt+hava+artık gazlar) mol sayıları olmak üzere bu ifadeler (5) nolu eşitlikte yerlerine yazılırlarsa;

$$\frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ} + n_{yak,yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{do1gu0}} \quad (6)$$

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

$$\frac{n_{yak,yağ}}{n_{yağ}} \cong \frac{p}{H} \cdot \frac{n_{yak(g)}}{n_{do1gu0}} \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. Önceki eşitlikte mol sayıları yerlerine yazılırsa;

$$\frac{m_{yak,yağ} / M_{yak}}{m_{yağ} / M_{yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)} / M_{yak}}{m_{do1gu0} / M_{do1gu0}}$$

$$\frac{m_{yak,yağ}}{m_{yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)}}{m_{do1gu0}} \cdot \frac{M_{do1gu0}}{M_{yak}} \cdot \frac{M_{yak}}{M_{yağ}} = \frac{p}{H} \cdot \frac{m_{yak(g)}}{m_{do1gu0}} \cdot \frac{M_{do1gu0}}{M_{yağ}}$$

Burada;

$$H^*(t) = H(t) \left(\frac{M_{yağ}}{M_{yak}} \right) \text{ ve } Y_m(t) = \frac{m_{yak(g)}}{m_{do1gu0}}$$

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

$$K(t) = \frac{M_{do1gu0}}{H(t) \cdot M_{yağ}} = \frac{M_{do1gu0}}{H^*(t) \cdot M_{yak}}$$

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 (2.8) nolu eşitlikten 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. Bu çalışmada sonlu fark metodlarından açık çözüm (explicit) metodu kullanılmıştır. Çözüm metodu ile ilgili detaylı bilgiye Karamangil ve diğ. (2006) numaralı kaynaktan bakılabilir.

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

$$c_{ort}(K) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{N} \quad (9)$$

formülü ile verilebilir. 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;

$$m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi DH \quad (10)$$

olarak tariflenir. Tek bir hücreye ait yağ kütlesi ise;

$$\Delta m_{yağ} = \rho_{yağ} \delta_{yağ} \pi D \Delta y \quad (11)$$

şeklindedir. Tek bir hücre içerisine emilen yakıt miktarı da;

$$c(0,t) = F(t) = \frac{\Delta m_{yak}}{\Delta m_{yağ}} \quad (12)$$

eşitliğinin kullanımıyla;

$$\Delta m_{yak} = F(t) \cdot \Delta m_{yağ} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. Benzer şekilde 180 hücre için aynı işlemler tekrarlanır. Nihayet, her hücrede en son hesap edilen yakıt kütleleri toplanmak suretiyle yağ filmi içinde o anda bulunan toplam yakıt miktarı hesaplanmış olur.

Yağ filmi içine emilen yakıt miktarının silindir içi gazların basıncına, silindir 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 göre hesaplanmıştır (Salazar, 2008):

$$D = 1,33.10^{-11} \frac{T_o \mu_o \left(\frac{10,2}{V_A} - 0,791\right)}{V_A^{0,71}} \quad (14)$$

$$V_A = 0,285.V_c^{1,048} \quad (15)$$

Yağın viskozitesi (μ_o) Walter eşitliğinden hesaplanır, (Norris and Hochgreb, 1994);

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

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

$$\rho(T_o) = \rho(T_{o_0}) - 0,63(T_o - T_{o_0}) \quad (17)$$

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 $468 cm^3/mol$, metanol için $118 cm^3/mol$ ve etanol için $167,1 cm^3/mol$ dür. Tablo 3' te $424,59 K$ duvar sıcaklığı için hesaplanmış viskozite ve difüzyon katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Viskozite ve difüzyon katsayısı değerleri ($424,59 K$ duvar sıcaklığı için)

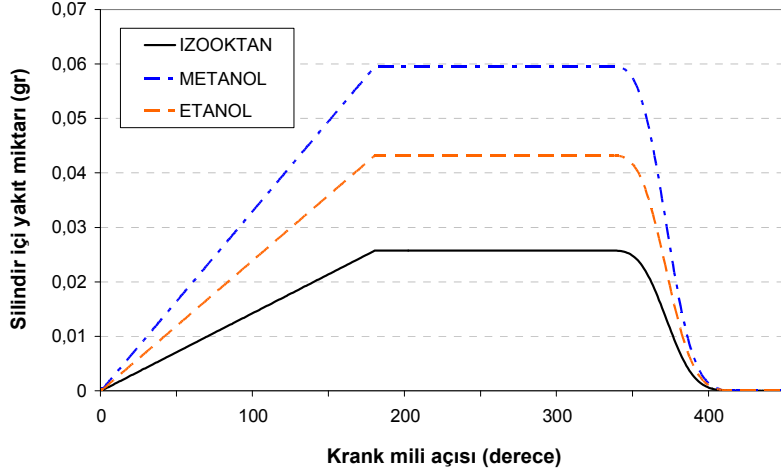
TWALL (K)	μ_o (g/ms)	$D_{izo-oktan}$ (m^2/s)	$D_{metanol}$ (m^2/s)	D_{etanol} (m^2/s)
424,59 K	3,81	$9,13.10^{-10}$	$3,26.10^{-9}$	$2,28.10^{-9}$

3. MODEL SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Sayısal çalışmaya başlamadan geliştirilen termodinamik çevrim modelinin doğruluğu kontrol edilmiştir. Bunun için literatürde benzer şekilde silindir içi basınç ve sıcaklığın hesaplandığı bir programdan faydalanılmıştır, (Ferguson and Kirkpatrick, 2001). Bu doğrulamadan sonra izo-oktan, metanol ve etanol için yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarları motor devri, sıkıştırma oranı, giriş basıncı ve hava fazlalık katsayısına göre hesaplanmıştır.

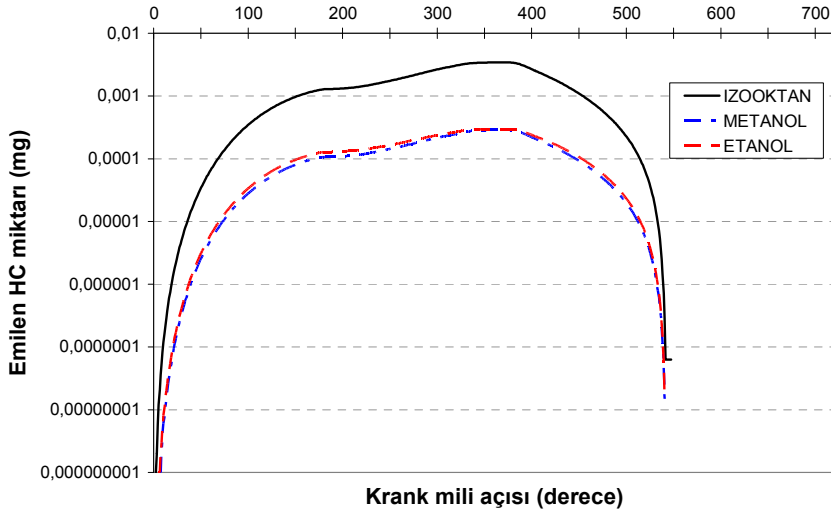
Şekil 4 de bir çevrim boyunca silindir içine alınan yakıt miktarı 3 farklı yakıt için gösterilmiştir. Silindir içine yakıt girişi emme supabı kapanana kadar ($214 ^\circ KMA$) devam etmektedir. $335-405 ^\circ KMA$ arası değerlerde yanma olmakta ve yakıt miktarı yanma reaksiyonuna bağlı olarak yanarak azalmaktadır. Silindirlere stokyometrik oranda Y/H karışımı alındığı için her bir yakıt için silindirlere alınan yakıt miktarları farklı olmaktadır.

Şekil 5'te 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 metanol ve etanola göre çok daha düşük değerde olmasıdır.



Şekil 4:

Bir çevrim boyunca silindir içerisine alınan yakıt miktarları

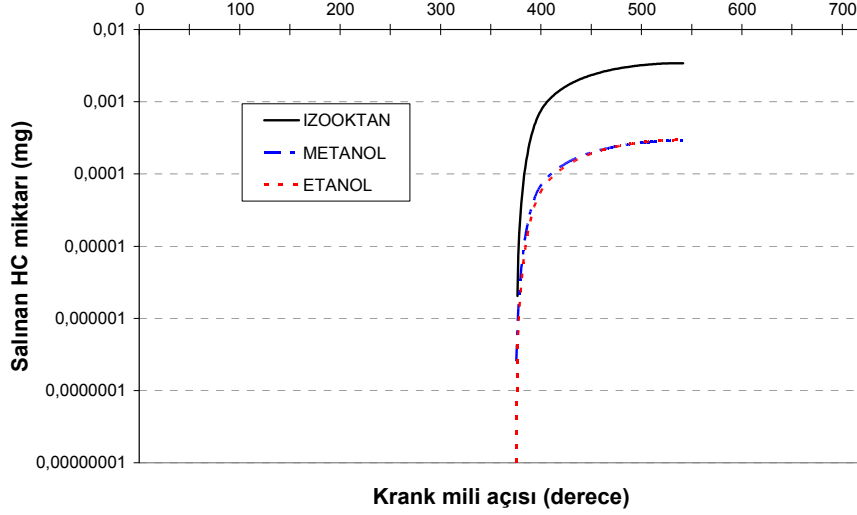


Şekil 5:

İzo-oktan, metanol ve etanol için yağ filmi tarafından emilen HC miktarı

Şekil 6 da 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

salınma işleminde de Henry Kanunu ve difüzyon katsayısının önemi büyüktür. Yine burada da yakıtlar içerisinde salınma en fazla izo-oktanda, en düşük metanol ve etanolde görülmektedir.

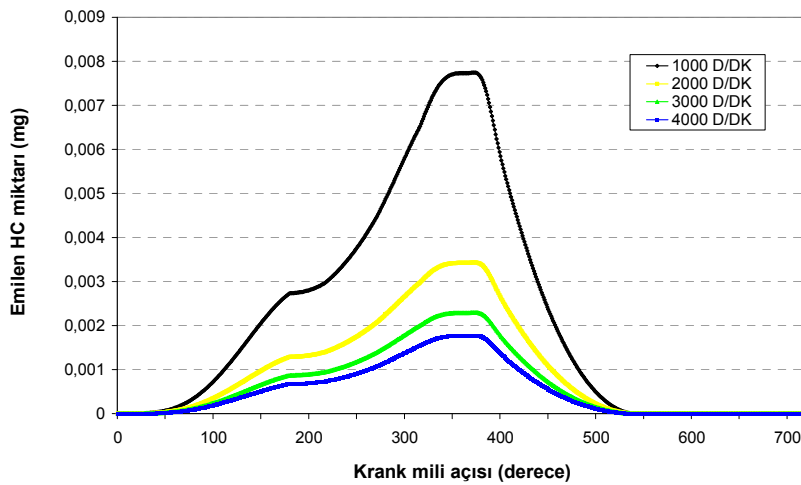


Şekil 6:

Farklı yakıtlar için yağ filmi tarafından salınan HC miktarı

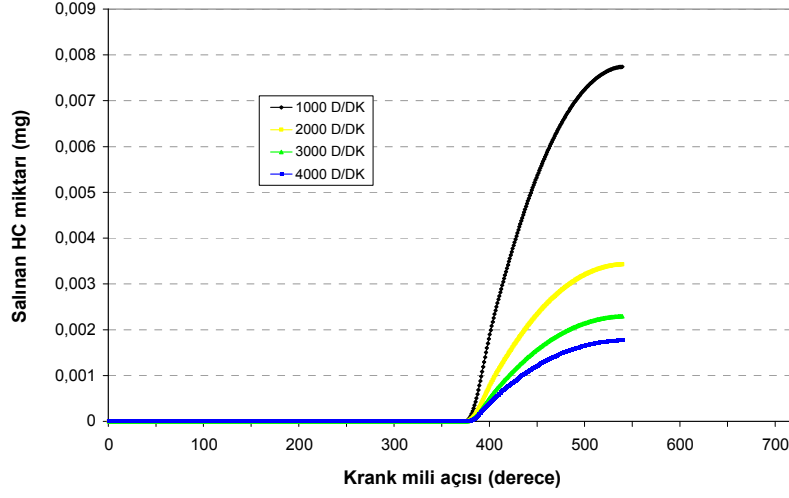
Bundan sonraki kısımda parametrik inceleme yapılırken tek bir yakıt seçilmiş ve değiştirilen parametrenin etkisi bu yakıt üzerinde gözlemlenmiştir. Böylece şekillerin daha sade ve anlaşılır olması sağlanmıştır. Parametredeki değişimin diğer yakıtlar üzerinde de benzer etkiyi göstermesi beklenmelidir.

Şekil 7 ve 8 de izo-oktan yakıtı ile çalışmada devir sayısına bağlı olarak yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarındaki değişim gösterilmiştir. Şekillerde 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 7:

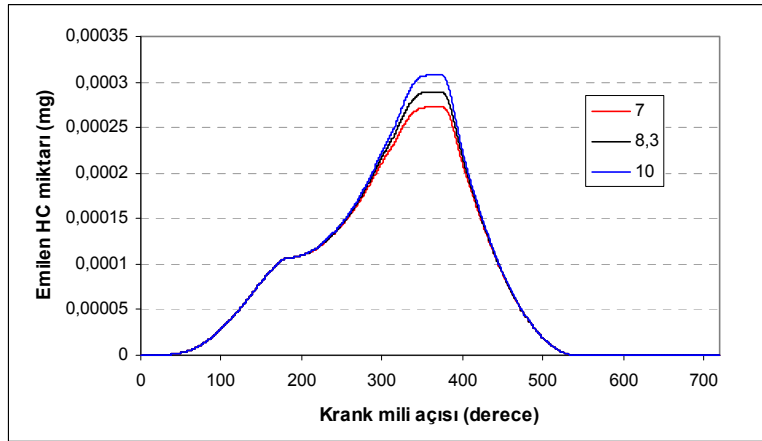
İzo-oktan için farklı devir sayılarında yağ filmi tarafından emilen HC miktarı



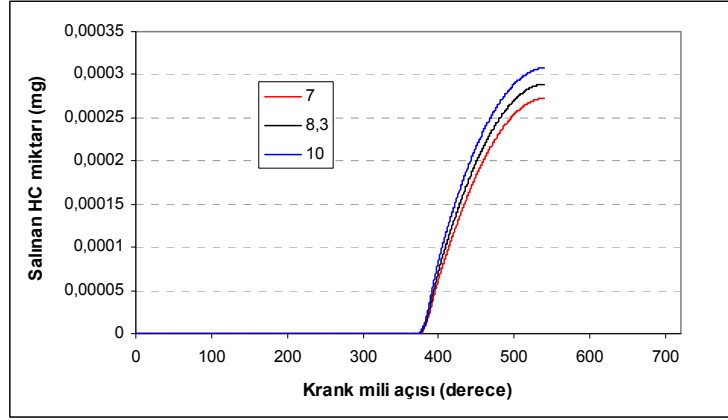
Şekil 8:
İzo-oktan için farklı devir sayılarında yağ filmi tarafından salınan HC miktarı

Şekil 9 ve 10 da sırasıyla metanol için farklı sıkıştırma oranlarında yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarları verilmiştir. Şekillerde 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.

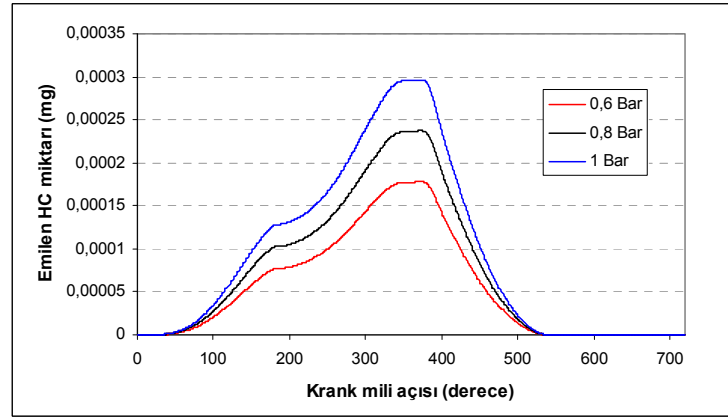
Şekil 11 ve 12 de etanol için farklı giriş basıncı değerlerinin yağ filmince emilen ve salınan HC miktarı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi basınç artışı ile yağ filmi tarafından emilen ve salınan HC miktarlarında artış söz konusudur. Düşük basınç değerlerinde (5) denkleminde de görüldüğü yağ filmi tarafından emilen yakıt buharı (HC) az olmaktadır.



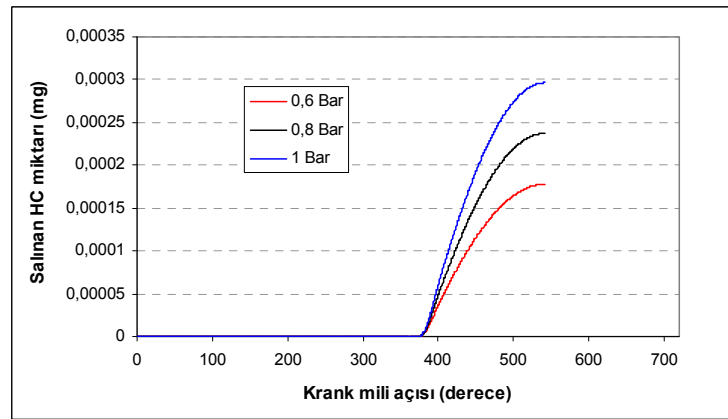
Şekil 9:
Metanol için farklı sıkıştırma oranlarında ($\epsilon=7, 8.3$ ve 10) yağ filmi tarafından emilen HC miktarı



Şekil 10:
Metanol için farklı sıkıştırma oranlarında yağ filmi tarafından salınan HC miktarı

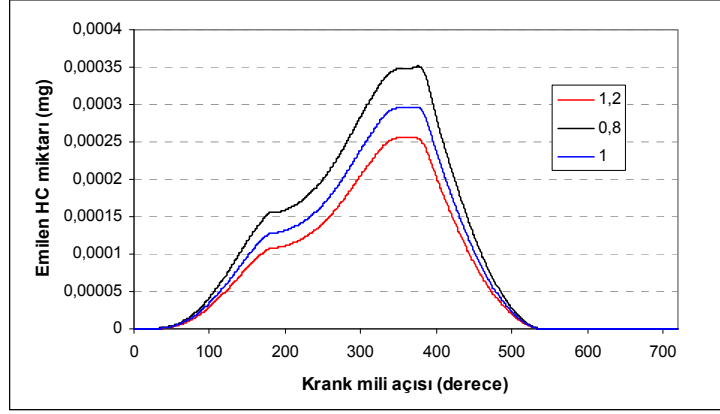


Şekil 11:
Etanol için farklı giriş basıncı değerlerinde yağ filmi tarafından emilen HC miktarı



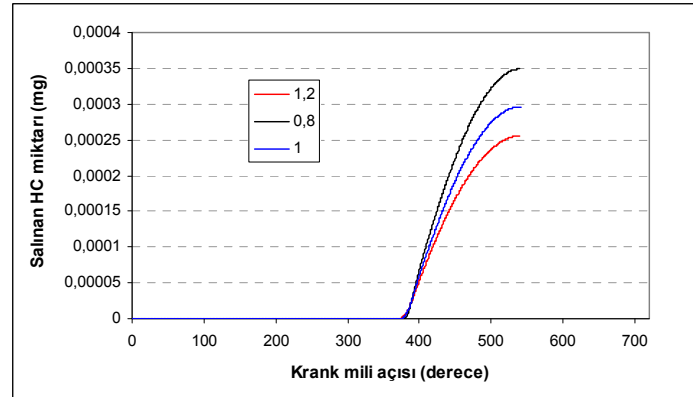
Şekil 12:
Etanol için farklı hava giriş basıncı değerlerinde yağ filmi tarafından salınan HC miktarının KMA'na göre değişimi

Şekil 13 ve 14 te etanol 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 13:

Etanol için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde yağ filmi tarafından emilen HC miktarı



Şekil 14:

Etanol için farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde yağ filmi tarafından salınan HC miktarı

4. SONUÇ

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

1. 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.
2. 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.

3. İzo-oktan, metanol ve etanol arasında yağ filmi tarafından en fazla emilme/salınma olayının gerçekleştiği yakıt izo-oktan olurken, bu olaylar metanol ve etanol için hemen hemen aynı seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu farklılığın en önemli nedeni yakıtların sahip olduğu Henry sabiti değerleridir.
4. Düşük motor devirlerinde HC emisyonlarını arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni düşük motor devirlerinde yağ filmi yakıt buharı etkileşimine daha uzun süre tanınmasıdır.
5. Artan sıkıştırma oranıyla birlikte silindir içi basınç değerleri de arttığı için emilen/salınan HC emisyonları artmıştır. Giriş basıncı için de aynı durum söz konusudur.
6. Düşük lamda (zengin karışım) değerlerinde silindir içine alınan yakıt miktarı arttığı için HC emisyonları da doğal olarak artış göstermiştir.

KAYNAKLAR

1. 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 IC Engine, *SAE*, Paper No: 2007-24-0001.
2. Çengel, A.Y. and Bols, M.A. (1990). *Thermodynamics an Engineering Approach*, McGraw-Hill International Editions.
3. 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.
4. 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.
5. Ferguson C.R., Kirkpatrick A. (2001). *Internal Combustion Engines Applied Thermosciences*, John & Wiley Sons Inc, New York.
6. Hamrin, D.A. (1994). Modeling of Engine-Out HC Emissions for Prototype Production, *Master Thesis*, Massachusetts Institute of Technology.
7. Hamrin, D.A. and Heywood, J.B. (1995). Modeling of Engine-Out Hydrocarbon Emissions for Prototype Production Engines, *SAE*, Paper No: 950984.
8. Heywood, J.B. (1989). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 930 s.
9. Heywood, J.B. and Hochgreb, S. (1996). Measurement of Gasoline Absorption into Engine Lubricating Oil, *SAE*, Paper No: 961229.
10. Karamangil, M.I., Surmen, A., and Gul, Z. (2004). In-Cylinder Expansion of Ring Crevice and Oil film Hydrocarbons in SI Engines, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No: 18-19, pp. 3109-3126.
11. Karamangil, M.I., Kaynaklı, O., Sürmen, A. (2006). Parametric Investigation of Cylinder and Jacket Side Convective Heat Transfer Coefficients of Gasoline Engines. *Energy Conversion and Management*, Vol. 47: 800-816.
12. 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.

13. 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.
14. Norris, M.G., Hochgreb, S. (1994). Novel Experiment on In-Cylinder Desorption of Fuel from the Oil Layer, *SAE*, Paper No:941963.
15. Salazar, V. (2008). Unburned Hydrocarbon Emission Mechanisms in Small Engines, *Ph. D. Thesis*, Mechanical Engineering, University of Wisconsin – Madison, USA.
16. Schramm, J. and Sorenson, S.C. (1990). A Model for Hydrocarbon Emissions from SI Engines, *SAE*, Paper No: 902169.
17. 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.
18. Yenice, S. (2011). Mathematical Modelling of HC Emissions from Oil Film, *Master Thesis*, Uludag University.
19. 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.
20. 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.

Makale 21.05.2012 tarihinde alınmış, 03.11.2012 tarihinde düzeltilmiş, 09.11.2012 tarihinde kabul edilmiştir.