

Homojen Karışımli Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI) bir motorun tek-bölgeli modelleme yöntemi kullanılarak analizi

Halit Yaşar¹

27.04.2016 Geliş/Received, 04.10.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.49792

ÖZ

HCCI motorların modellenmesinde sıfır-boyutlu modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller tek veya çok bölge içerebilirler. Bununla birlikte, en basit yaklaşım yanmış ve yanmamış gazı içeren tek bölge yaklaşımıdır. Bu tip sıfır-boyutlu modellerde yanma olayı Wiebe fonksiyonu ile modellenmektedir. Bu makalede, HCCI prensibine göre çalışan tek silindri bir Ricardo Hydra motoru tek bölge yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Analiz çalışmalarında SPICE (Simulated Petrol Internal Combustion Engine) yazılımının modifiye edilmiş bir versiyonu olan TRICE yazılımı kullanılmıştır. Yanma analizlerinde, HCCI yanma modellerinde standart Wiebe fonksiyonu kullanımının maksimum silindir basıncının yüksek olarak tahmin edilmesi sonucunu doğurması nedeniyle, standart Wiebe fonksiyonunun modifiye edilmiş bir şekli olan Double-Wiebe fonksiyonu kullanılmıştır. Analizler, n-Heptan-Toluen karışımı için üç hava fazlalık katsayısı değerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bir Avrupa Komisyonu Marie Curie destek programı (FP-6) projesi kapsamında Shell Araştırma Merkezine ait motor test laboratuvarında ölçülen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HCCI motor, tek-bölgeli modelleme, net ısı yayılımı, dilindir basıncı

Analysis of a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine by using a single-zone modelling method

ABSTRACT

Zero-dimensional models are commonly used to model HCCI engines. These models may contain single or multi zones. However, the simplest approach is the single-zone containing burned and unburned gases. In these type models, combustion progress is modelled by Wiebe function. In this article, a single-cylinder Ricardo Hydra engine, which is running in HCCI mode, was modelled by using single-zone method. In the analysis, a modified Shell SI engine code called TRICE was used. This code is a modified version of SPICE (Simulated Petrol Internal Combustion Engine) and modified for HCCI engine. In the combustion analysis, a modified Wiebe function called double-Wiebe function was used since standard Wiebe-function tends to over-predict the peak cylinder pressure in HCCI combustion models. The analyses were performed for n-Heptane-Toluene blend with three excess air ratios and the results were compared to the experimental data measured in the engine test laboratory of Shell Research Centre within an European Commission Marie Curie Transfer of Knowledge Scheme (FP6) project.

Keywords: HCCI engine, single-zone model, net heat release, cylinder pressure

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya - hyas@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

HCCI homojen bir şekilde karıştırılmış hava ile yakıtın kendi kendine tutuşma şartlarına kadar sıkıştırıldığı bir içten yanma şeklidir. HCCI hem homojen karışım kivilci ateşleme (SI) ve hem de sıkıştırma ateşlemenin (CI) karakteristiklerine ve bu iki yanma şeklinin en iyi özelliklerini biraraya getirme potansiyeline sahiptir. Bu yanma şeklinde yakıt ile hava SI motorda olduğu gibi karıştırılır fakat tutuşma olayının başlatılması ise bujiden çakılan kıvılcım yerine CI motorda olduğu gibi karışımın basınç ve sıcaklığının kendi kendine tutuşma şartlarına ulaşmaya kadar sıkıştırılması yoluyla gerçekleştirilir. HCCI yanmasının önemli bir karakteristiği silindir içerisinde neredeyse aynı anda meydana gelen kendiliğinden tutuşma nedeniyle çok hızlı bir yanmanın meydana gelmesidir. Literatürde HCCI motorlar üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [1-15]. HCCI motorlarda katalitik dönüştürücülere gerek olmaksızın çok düşük NOx emisyonlarının meydana geldiği görülmektedir. Fakat bu motorlarda düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle HC ve CO emisyonları yüksektir ve emisyon normlarını sağlayabilmek için bu emisyonlarla ilgili azaltıcı önlemler alınmalıdır [16-23].

HCCI motorlarla ilgili modelleme çalışmalarında 0-Boyutlu modeller çok yaygın olarak kullanılmaktadır [24-29]. Bu modeller, çok-bölgeli ve tek-bölgeli olabilirler. Bununla birlikte, en basit yaklaşım tek-bölgeli model olup bu yöntemle de oldukça iyi sonuçlar alınmaktadır. Tek-bölgeli 0-Boyutlu modellerde yanma olayı Wiebe fonksiyonu ile tanımlanabilir [30, 31]. Bununla birlikte, HCCI motorlarda yanma olayının standart Wiebe fonksiyonu ile modellenmesi ile iki sorun ortaya çıkmaktadır. Birincisi, Wiebe fonksiyonundaki parametreler çalışma şartları ile değişmektedir. İkincisi ise HCCI motorlarda ana yanma fazındaki yanma hızı ile geç yanma fazındaki yanma hızı arasında büyük farklar bulunmaktadır. Bu nedenle, HCCI motorlarda yanma olayının modellenmesinde Wiebe fonksiyonunun modifiye edilmiş bir şekli olan Double-Wiebe fonksiyonunun kullanılması çok daha iyi sonuçlar vermektedir [28, 29].

Bu çalışmada, tek-silindirli bir Ricardo Hydra motoru tek bölge yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Analiz çalışmalarında SPICE (Simulated Petrol Internal Combustion Engine) yazılımının modifiye edilmiş bir versiyonu olan TRICE kullanılmıştır. Yanma analizlerinde, HCCI yanma modellerinde Double-Wiebe fonksiyonu kullanılmıştır. Analizler, n-Heptan-Toluen karışımı yakıt için üç hava fazlalık katsayısı değerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bir Avrupa Birliği projesi (FP6) kapsamında İngiltere'nin Chester şehrindeki Shell Araştırma Merkezine ait motor test laboratuvarında ölçülen deneysel verilerle

karşılaştırılmıştır.

2. MODEL (MODEL)

Bu çalışmada, SPICE (Simulated Petrol Internal Combustion Engine) analiz programı kullanılarak, HCCI modunda çalışan bir Ricardo Hydra motorun farklı çalışma şartlarında, iki değişik yakıtla çalıştırılması durumu için analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen analiz sonuçları aynı motordan elde edilen deneysel verilerle doğrulanması yapılmıştır.

Modelleme çalışmalarında kullanılan SPICE yazılım programı esas olarak SI motor analizi için geliştirilmiş bir yazılım olup, bir Avrupa Birliği projesi (FP-6) kapsamında modifiye edilerek HCCI motor analizine uygun hale getirilmiştir [28-29]. Program, tek-bölgeli termo-kimyasal yapıda bir program olup, silindir basınç ve sıcaklığı ile birlikte motor performans değerlerini tahmin etmektedir. Programda yanmanın modellenmesinde Wiebe fonksiyonu kullanılmaktadır. Tek-bölgeli analizde silindir içindeki akışkan aynı basınç ve sıcaklığa sahip tek bir bölge olarak dikkate alınmaktadır. Bu durum, özellikle yanma odası yüzeylerindeki sınır tabaka bölgesi ve piston boşluklarındaki karışımın daha düşük sıcaklıkta olmasını ve bunun sonucu olarak daha geç yanmasını dikkate almamaktadır. Bu durum, çok fakir karışımlarda çalışabilen HCCI motor modellerinde maksimum silindir basıncının deneysel değerden oldukça yüksek olarak tahmin edilmesi sonucunu doğurmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla, geç yanma etkilerini dikkate almak üzere Wiebe fonksiyonunun modifiye edilmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla modifiye edilen Wiebe fonksiyonu Double-Wiebe fonksiyonu olarak adlandırılmış ve aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [28].

$$x_b = (1 - \alpha_d) \left\{ 1 - \exp \left(-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right) \right\} + \alpha_d \left\{ 1 - \exp \left(-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{K_d \Delta\theta} \right)^{m+1} \right) \right\} \quad (1)$$

Burada x_b yanmış kütle kesri, θ krank mili açısı, θ_0 , yanmanın başladığı krank mili açısı, a ve $\Delta\theta$ yanma süresini belirleyen ayarlanabilir sabitler, m yanma eğrisinin şeklini düzenleyen parametre, α_d yavaş yanma bölgesinde yanan karışım kesri ve K_d yavaş yanma süresinin standart yanma süresine oranıdır. Yanmanın başladığı krank mili açısı karışımın %50'sinin yanmış olduğu krank mili açısına θ_{50} bağlı olarak aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir;

$$\theta_0 = \theta_{50} - \Delta\theta_{10-90} \left(\frac{\ln(2)}{a_{10-90}} \right)^{1/(m+1)} \quad (2)$$

Denklem (1)'deki a ise aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır;

$$a = a_{10-90} = \left[\begin{array}{c} \left\{ \ln \left(\frac{1}{(1-0.9)} \right) \right\}^{1/m+1} \\ - \left\{ \ln \left(\frac{1}{(1-0.1)} \right) \right\}^{1/m+1} \end{array} \right]^{m+1} \quad (3)$$

Silindir içindeki gazlardan cidarlara olan ısı transferi;

$$\dot{Q} = h_g [A_{sk}(T_g - T_{d-sk}) + A_{pk}(T_g - T_{d-pk}) + A_{sg}(T_g - T_{d-sg})] \quad (4)$$

denklemi ile hesaplanmıştır. Burada, \dot{Q} birim zamanda silindir cidarlarına olan anlık ısı transferi, A_{sk} , A_{pk} ve A_{sg} silindir kafası, piston kafası ve silindir gömleği yüzey alanlarını göstermektedir. T_g , T_{d-sk} , T_{d-pk} ve T_{d-sg} ise sırasıyla silindir gaz sıcaklığı, silindir kafasının yanma odasına bakan yüzey sıcaklığı, piston kafası yüzey sıcaklığı ve silindir gömleğinin yanma odasına bakan yüzey sıcaklığıdır. Isı taşınım katsayısının hesabında Hohenberg [32] tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

$$h_g(\theta) = \alpha_s V(\theta)^{-0.06} p(\theta)^{0.8} T(\theta)^{-0.4} (\bar{s}_p + b)^{0.8} \quad (5)$$

Burada $h_g(\theta)$ krank mili açısına bağlı ısı taşınım katsayısı, \bar{s}_p ortalama piston hızı, $V(\theta)$, $p(\theta)$ ve $T(\theta)$ krank mili açısına bağlı anlık silindir hacmi, silindir basıncı ve silindir gaz sıcaklığı, a ve b ise kalibrasyon sabitleri olup Hohenberg tarafından 130 ve 1.4 olarak önerilmiştir [32].

3. DENEYSEL (EXPERIMENTAL)

Analiz sonuçlarının doğrulanması amacıyla bu çalışmada kullanılan deneysel veriler yazarın bir Avrupa Birliği projesi (FP-6) kapsamında İngiltere'nin Chester şehrinde kurulu bulunan Shell Araştırma Merkezi'ndeki motor test laboratuvarındaki tek silindri Ricardo Hydra motorunda elde ettiği verilerdir. Çalışmada kullanılan motora ait özellikler Tablo 1'de, deneysel ve modelleme çalışmalarında kullanılan yakıtın özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel motorun özellikleri (Specifications of the test engine)[61-62]

Parametre	Değer	Birim
Silindir çapı	86	mm
Strok uzunluğu	86	mm
Biyel kolu uzunluğu	143.5	mm
Sıkıştırma oranı	14.04	-
Emme süpabı çapı	32	mm
Süpap sayısı	4	-
Emme süpabı açılma zamanı	340	°KMA
Emme süpabı kapanma zamanı	612	°KMA
Egzoz süpabı açılma zamanı	120	°KMA
Egzoz süpabı kapanma zamanı	332	°KMA

Tablo 2. Deneysel ve modelleme çalışmalarında kullanılan yakıtın özellikleri (Specifications of the fuel used in the experimental and modelling studies)

Parametre	Değer	Birim
Yakıt	n-Heptan-Toluen karışımı (%25 n-Heptan, %75 Toluen)	-
Kapalı formül	C ₇ H _{10.24}	-
RON sayısı	83.30	-
MON sayısı	73.10	-
Stokiyometrik H/Y oranı	13.98	-
Alt Isıl Değeri	42122	kJ kg ⁻¹
Yoğunluk (20 °C'da)	0.803	g cm ⁻³

4. MODEL VE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARATION OF THE MODEL AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu çalışmada, HCCI modunda çalışan tek silindri Ricardo Hydra motora ait deneysel ve model sonuçlarının karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Çalışmada yukarıda özellikleri verilen yakıt için üç farklı hava fazlalık katsayısı değerinde modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 3' de modelleme sonucu tahmin edilen maksimum silindir basıncı değerlerinin aynı çalışma şartlarında ölçülen maksimum silindir basıncı değerleri ile karşılaştırılması ve modelle deneysel sonuçları arasında oluşan farklılaşmalar sunulmaktadır.

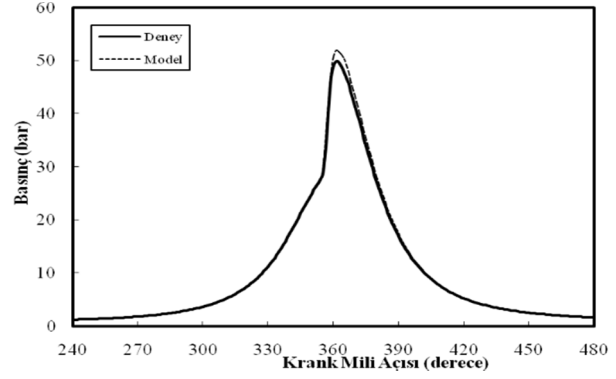
Tablo 3. Maksimum deney ve model silindir basıncı değerleri ve modelle deney arasındaki farklılaşmalar (Maximum measured and experimental cylinder pressure values and the differences between model and experiment)

Hava fazlalık katsayısı	Deney (bar)	Model (bar)	Fark (%)
3.5	45.662	46.662	3.54
4.0	49.866	51.885	3.90
4.5	37.496	40.251	6.84

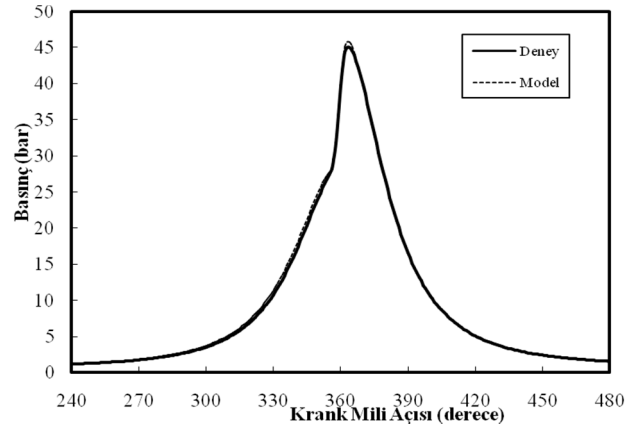
Tablodan da görüleceği üzere, modelleme sonucu deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere karışımın fakirleşmesi ile birlikte modelle deney arasındaki farklar artmaktadır. Bununla birlikte, deneyle model arasında maksimum %6.84 artış olmakta olup bu değer modelleme çalışmaları için makul bir fark oluşturmaktadır. Bu çalışmada normal Wiebe fonksiyonu kullanımına ait sonuçlar verilmemiştir. Yaşar ve arkadaşlarının [28] çalışmasında Double-Wiebe fonksiyonu kullanımı durumunda normal Wiebe fonksiyonu kullanımı durumuna göre modelle deney değerleri arasındaki farkın yaklaşık olarak %9 iyileştiği belirtilmektedir.

Şekil 1 - 3'de hava fazlalık katsayısının 3.5, 4.0 ve 4.5 değerleri için modelleme sonucu tahmin edilen silindir basınçlarının ölçüm sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılması yapılmaktadır. Şekillerden, modelleme ile emme, sıkıştırma, genişleme ve egzoz süreçlerindeki silindir basıncı tahmininin oldukça kabul edilebilir olduğu görülmektedir. Bütün çevrim boyunca tahmin edilen basınç değerleri ile ölçüm sonucu elde edilen değerler arasındaki farklılaşmanın %7'nin altında kaldığı görülmektedir. Tek-bölgeli HCCI modelleme çalışmalarında özellikle yanma sürecinde maksimum basıncın yüksek olarak tahmin edildiği bilinmektedir [28]. Aslında bu durum HCCI dışındaki motorların tek-bölgeli modelle analizinde de söz konusudur. Fakat HCCI motorların genelde çok fakir karışımla çalışmaları tek bölge yaklaşımını daha sorunlu hale getirmektedir. Çünkü çok fakir karışımlarda silindir içindeki bölgeler arasındaki sıcaklık farklarının daha da artması ve cidarlara yakın bölgelerde ve piston segman boşluklarındaki karışımın daha geç yanması kaçınılmazdır. Bu nedenle, standart Wiebe fonksiyonunun kullanımı da sorunlu hale gelmektedir. Wiebe fonksiyonunu karışımın yavaş yanan kısmını modelleyecek şekilde modife etmenin tek-bölgeli modelleme yönteminin silindir basıncı ve diğer motor karakteristiklerinin tahminini iyileştireceği açıktır. Bu çalışmada özellikle 3.5, 4.0 ve 4.5 hava fazlalığı gibi oldukça fakir karışımlarda çalışıldığı düşünüldüğünde Double-Wiebe fonksiyonu kullanımının daha da önemli olduğu görülmektedir.

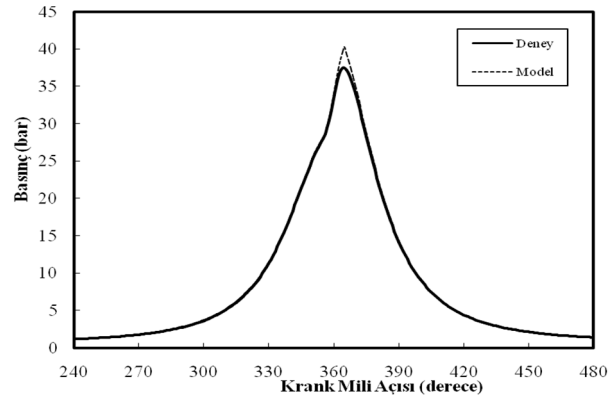
Homojen Karışım Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI) bir motorun tek-bölgeli modelleme yöntemi kullanılarak analizi



Şekil 1. Deneyel ve model silindir basıncı eğrileri, $\lambda=3.5$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı (Measured and predicted cylinder pressure traces, $\lambda = 3.5$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K, $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-heptane-Toluene blend)



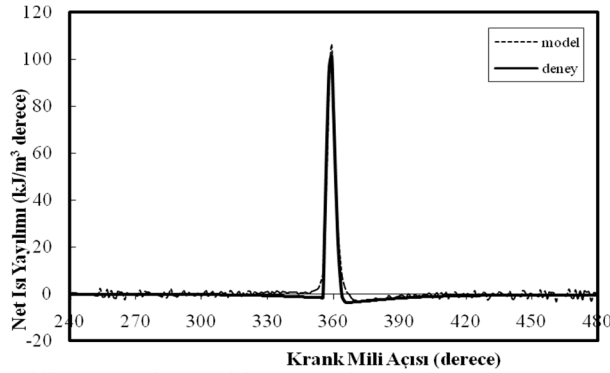
Şekil 2. Deneyel ve model silindir basıncı eğrileri, $\lambda = 4.0$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı (Measured and predicted cylinder pressure traces, $\lambda = 4.0$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K, $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-heptane-Toluene blend)



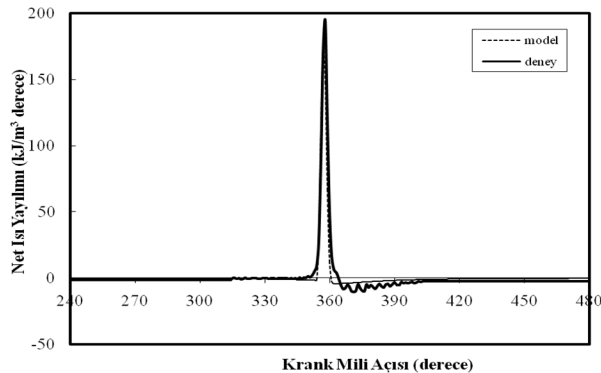
Şekil 3. Deneyel ve model silindir basıncı eğrileri, $\lambda = 4.5$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı

(Measured and predicted cylinder pressure traces, $\lambda = 4.5$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-heptane-Toluene blend)

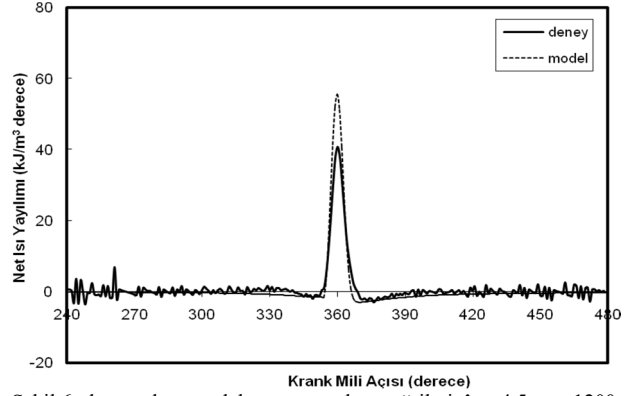
Şekil 4-6' da ise hava fazlalık katsayısının 3.5, 4.0 ve 4.5 değerleri için modelleme sonucu tahmin edilen net ısı yayılımının ölçüm sonucu elde edilen silindir basıncı değerlerine bağlı olarak Rassweiler - Withrow metodu ile hesaplanan net ısı yayılımı değerleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Şekillerden de görüleceği üzere, net ısı yayılımının modellenmesinde elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak burada net ısı yayılımı eğrileri arasındaki farklılaşmanın silindir basıncına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, aslında deneysel sonuçlara dayanarak hesaplanan net ısı yayılımı değerlerinin de gerçekte bir modelleme ile belirlenmesidir. Bu çalışmada deneysel sonuçlara dayanarak hesaplanan net ısı yayılımının modellenmesinde Rassweiler - Withrow [33] metodu kullanılmıştır.



Şekil 4. Deneysel ve model net ısı yayılımı eğrileri, $\lambda = 3.5$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı (Measured and predicted net heat release traces, $\lambda = 3.5$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K, $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-Heptane-Toluene blend)



Şekil 5. Deneysel ve model net ısı yayılımı eğrileri, $\lambda = 4.0$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı (Measured and predicted net heat release traces, $\lambda = 4.0$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K, $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-Heptane-Toluene blend)



Şekil 6. deneysel ve model net ısı yayılımı eğrileri, $\lambda = 4.5$, $n = 1200$ d/dak, $T_{em} = 523$ K, $P_{em} = 1.01$ bar, Yakıt: n-Heptan-Toluen karışımı (Measured and predicted net heat release traces, $\lambda = 4.5$, $n = 1200$ RPM, $T_{int} = 523$ K, $P_{int} = 1.01$ bar, Fuel: n-Heptane-Toluene blend)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, HCCI prensibine göre çalışan tek silindri bir Ricardo Hydra motoru tek-bölgeli modelleme yöntemi kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar bir Avrupa Komisyonu Marie Curie destek programı (FP-6) projesi kapsamında Shell Araştırma Merkezine ait motor test laboratuvarında ölçülen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışma, n-Heptan-Toluen karışımı yakıt için üç farklı hava fazlalık katsayısı değerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- HCCI motorların modellenmesinde tek-bölgeli modelleme yöntemi kullanılarak deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.
- Karışımın fakirleşmesi ile birlikte model ile deney arasındaki farklılaşmalar artmaktadır. Bununla birlikte bütün çalışma koşullarında deneyle model arasında meydana gelen farklılıklar kabul edilebilir düzeylerde dir.
- Tek-bölgeli modelleme yöntemi ile silindir basıncının tahmininde net ısı yayılımına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun temel nedeni, deneysel sonuçlara dayanarak hesaplanan net ısı yayılımı değerlerinin de gerçekte teorik bir model olan Rassweiler - Withrow metodu ile hesaplanmış olmasıdır.
- HCCI motorlarda yanma olayının modellenmesinde Double-Wiebe fonksiyonunun kullanımı oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada model sonuçlarının doğrulanmasında kullanılan deneysel veriler Avrupa Komisyonu Marie Curie Transfer of Knowledge Scheme (FP6) kapsamında desteklenen MTKI-CT-2004-509777 kodlu, Improved engine efficiency-impact of deposits on HCCI engines

adlı projedeki çalışmalarım esnasında elde edilmiştir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan deneysel verilerin teminindeki katkıları için Avrupa Komisyonu, Shell Araştırma Merkezi yetkilileri ile proje yürütücüsüne en içten teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] N. Mina, M. Kanehara, N. Lida, Assessment for innovative combustion on HCCI engine by controlling EGR ratio and engine speed, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 99, 25 April 2016, pp. 42-60.
- [2] S. Gowthaman, A.P. Sathiyagnanam, Effects of charge temperature and fuel injection pressure on HCCI engine, *Alexandria Engineering Journal*, Cilt 55, No. 1, March 2016, pp. 119-125.
- [3] Y. Yang, J. E. Dec, M. Sjöberg, C. Ji, Understanding fuel anti-knock performances in modern SI engines using Fundamental HCCI experiments, *Combustion and Flame*, Cilt 162, No. 10, October 2015, pp. 4008-4015.
- [4] J. Chen, B. Liu, X. Gao, D. Xu, Experimental and numerical investigation of hetero-/homogeneous combustion-based HCCI of methane-air mixtures in free-piston micro-engines, *Energy Conversion and Management*, Cilt 119, 1 July 2016, pp. 227-238.
- [5] X. Zhen, Y. Wang, Numerical analysis of knock during HCCI in a high compression ratio methanol engine based on LES with detailed chemical kinetics, *Energy Conversion and Management*, Cilt 96, 15 May 2015, pp. 188-196.
- [6] A. Yousefi, A. Ghareghani, M. Birouk, Comparison study on combustion characteristics and emissions of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine with and without pre-combustion chamber, *Energy Conversion and Management*, Volume 100, August 2015, pp. 232-241.
- [7] T. Karthikeya Sharma, G. Amba Prasad Rao, K. Madhu Murthy, Effective reduction of NOx emissions of a HCCI (Homogeneous charge compression ignition) engine by enhanced rate of heat transfer under varying conditions of operation, *Energy*, Cilt 93, Part 2, 15 December 2015, pp. 2102-2115
- [8] S.M. Aceves, D.L. Flowers, F. Espinisco-Loza, A. Babajimopoulos, D.N. Assanis, Analysis of Premixed Charge Compression Ignition Combustion With a Sequential Fluid Mechanics-Multizone Chemical Kinetics Model, SAE paper 2005-01-0115.
- [9] M. Sjöber, J. Dec, N.P. Cernansky, Potential of Thermal Stratification and Combustion Retard for Reducing Pressure-Rise Rates in HCCI Engines, Based on Multi-Zone Modeling and Experiments, SAE paper 2005-01-0113.
- [10] M. Konno, Z. Chen, Ignition Mechanisms of HCCI Combustion Process Fueled with Methane/DME Composite Fuel, SAE paper 2005-01-0182.
- [11] J. Chang, O. Guralp, Z. Filipi, D. Assanis, New Heat Transfer Correlation for An HCCI Engine Derived From Measurements of Instantaneous Surface Heat Flux, SAE paper 2004-01-2996.
- [12] J. Bengtsson, P. Strandh, R. Johansson, P. Tunestål, B. Johansson, Closed-Loop Combustion Control of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine Dynamics, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 18, pp. 167-179, 2004.
- [13] H.S. Soyhan, T. Lovas, F. Mauss, A stochastic simulation of an HCCI engine using an automatically reduced mechanism, ASME Paper No: 2001-ICE-416, 2001; 37-2: 83-96.
- [14] D. L. Flowers, S. M. Aceves, J. R. Smith, J. Torres, J. Girard, R. W. Dibble, HCCI in a CFR Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling, SAE Paper 2000-01-0328.
- [15] M. A. Salvador, D. L. Flowers, K. C. Westbrook, J. R. Smith, R. W. Dibble, M. Christensen, W. J. Pitz, B. Johansson, A Multi-Zone Model for Prediction of HCCI Combustion and Emissions, SAE Paper 2000-01-0327.
- [16] M. Canova, S. Midlam-Mohler, Y. Guezennec, G. Rizzoni, Theoretical and experimental investigation on diesel HCCI combustion with external mixture formation, *Int. J. of Vehicle Design*, 2007; 44: No.1/2, 62 - 83.
- [17] M. Y. Kim, C. S. Lee, Effect of a narrow fuel spray angle and a dual injection configuration on the improvement of exhaust emissions in a HCCI diesel engine, *Fuel*, in press, available online 9 April 2007.
- [18] D. S. Kim, C. S. Lee, Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR, *Fuel*, 2006; 85: 5-6, 695-704.
- [19] L. Shi, Y. Cui, K. Deng, H. Peng, Y. Chen, Study of low emission homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR), *Energy*, 2006; 31: 14, 2665-2676.

- [20] L. Xingcai, C. Wei, H. Zhen, A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 1. The basic characteristics of HCCI combustion, *Fuel*, 2005; 84: 1074–1083.
- [21] D.S. Kim, M.Y. Kim, C.S. Lee, Combustion and emission characteristics of partial homogeneous charge compression ignition engine, *Combustion Science and Technology*, 2005; 177: 107–125.
- [22] S. Onishi, J. S. Hong, K. Shoda, J. P. Do, S. Kato, Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines, SAE Paper 790501.
- [23] M. Noguchi, Y. Tanaka, , T. Tanaka, Y. Takeuchi, A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion, SAE paper 790840.
- [24] P. Sharma, A. Dhar, Development of chemical kinetics based hydrogen HCCI combustion model for parametric investigation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt 41, No. 14, 20 April 2016, pp. 6148-6154.
- [25] G. Barari, S. M. Sarathy, S. S. Vasu, Improved combustion kinetic model and HCCI engine simulations of di-isopropyl ketone ignition, *Fuel*, Cilt 164, 15 January 2016, pp. 141-150.
- [26] M. D. Firoozabadi, M. Shahbakhti, C.R. Koch, S.A. Jazayeri, Thermodynamic control-oriented modeling of cycle-to-cycle exhaust gas temperature in an HCCI engine, *Applied Energy*, Cilt 110, October 2013, pp. 236-243.
- [27] H. Barths, C. Felsch, N. Peters, Mixing models for the two-way-coupling of CFD codes and zero-dimensional multi-zone codes to model HCCI combustion, *Combustion and Flame*, Cilt 156, No. 1, January 2009, pp. 130-139.
- [28] H. Yasar, H.S. Soyhan, H. Walmsley, B. Head, C. Sorousbay, Double-Wiebe function: An approach for single-zone HCCI engine modeling, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 28, Issues 11–12, August 2008, pp. 1284-1290.
- [29] H.S. Soyhan, H. Yasar, H. Walmsley, B. Head, G.T. Kalghatgi, C. Sorousbay, Evaluation of heat transfer correlations for HCCI engine modeling, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 29, Issues 2–3, February 2009, pp. 541-549.
- [30] M. Klein, L. Eriksson, A Specific Heat Ratio Model for Single-Zone Heat Release Models, 2004; SAE 2004-01-1464.
- [31] C. Elmqvist, F. Lindström, H. Ångström, B. Grandin, G. Kalghatgi, Optimizing Engine Concepts by Using a Simple Model for Knock Prediction, 2003; SAE 2003-01-3123.
- [32] G.F. Hohenberg, Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations, SAE Paper 790825.
- [33] G.M. Rassweiler, L. Withrow, Motion pictures of engine flames correlated with pressure cards, *SAE Transactions* 47 (1938) 185–204