



**Makale
(Article)**

Doğalgaz Yakıtlı HCCI Bir Motorda Hidrojen İlavesinin Yanma Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Nümerik Olarak İncelenmesi

Seyfi POLAT*, Ahmet UYUMAZ**, Duygu İPÇİ***, H. Serdar YÜCESU***, Hamit SOLMAZ***, Emre YILMAZ***

*Hitit Üniversitesi, TBMYO, Otomotiv Programı, Çorum/TÜRKİYE

**Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, TBMYO, Otomotiv Programı, Burdur/TÜRKİYE

***Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE

seyfipolat@hitit.edu.tr; auyumaz@mehmetakif.edu.tr; yucesu@gazi.edu.tr; hsolmaz@gazi.edu.tr; emreyilmaz@gazi.edu.tr

Özet

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar konvansiyonel içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında yüksek termik verim, NO_x ve is emisyonlarındaki eş zamanlı azalma avantajlarından dolayı yeni bir araştırma alanı olmuştur. HCCI motorlarda kendi kendine tutuşma zamanlaması üzerinde direkt kontrol olmadığından çalışma ve yük aralığı sınırlı kalmaktadır. Yanma işlemini etkileyen en önemli parametrelerden bazıları karışımın kompozisyonu ve yakıtın kimyasal özellikleridir. Bu çalışmada sıkıştırma oranı 10:1 olan doğal emişli, tek silindirli, dört zamanlı, dört supaplı, doğal gaz ile çalışan bir HCCI motorunda hidrojen ilavesinin yanma işlemi üzerindeki etkileri açık kaynak kodlu KIVA-4 yazılımı ile nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaçla doğalgaz yakıtının içerisine %0, %10, %20, %30, %40, oranlarında hidrojen ilave edilerek beş farklı yakıt karışımı hazırlanmıştır. Bununla birlikte yanma analizi üç farklı hava fazlalık katsayısı değerinde ($\lambda=1.5$, $\lambda=2$, $\lambda=2.5$) gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, hidrojen ilavesinin kendi kendine tutuşma zamanlaması, toplam yanma süresi, ısı dağılımı, silindir içi basınç ve silindir içi sıcaklık üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HCCI, Doğalgaz, Hidrojen, KIVA, Yanma

A Numerical Investigation of the Effects of Hydrogen Addition on Combustion Characteristics in a HCCI Engine Fueled With Natural Gas

Abstract

Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) engines have become a new field of research because of high thermal efficiency compared to the internal combustion engines and reduction of NO_x and particular matter emissions simultaneously. Operating and load range were limited as there is no direct control on the controlling auto-ignition timing and combustion process in the HCCI engines. Some of the most important parameters affecting the combustion process are the mixture composition and chemical properties of the fuel. In this study, the effects of hydrogen addition on combustion process were investigated numerically using open coded software KIVA-4 in a single cylinder, four-stroke, four-valve, naturally aspirated and compression ratio of 10:1 HCCI engine fuelled with natural gas. For this purpose, five different fuel mixtures were prepared by addition hydrogen into the natural gas at different rates 0% - 10% - 20% - 30% and 40%. In addition, combustion analysis was performed with three excessive air coefficient ($\lambda=1.5$, $\lambda=2$, $\lambda=2.5$). As a result, the effects of hydrogen addition were investigated on the self-ignition timing point, total combustion duration, heat release rate, in-cylinder pressure, cylinder temperature.

Keywords : HCCI, Natural Gas, Hydrogen, KIVA, Combustion

Bu makaleye atf yapmak için

Polat S, Uyumaz A, Yücesu H.S., Solmaz H, Yılmaz E, "Doğalgaz Yakıtlı HCCI Bir Motorda Hidrojen İlavesinin Yanma Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Nümerik Olarak İncelenmesi" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2015, 12(2)15-26

How to cite this article

Polat S, Uyumaz A, Yücesu H.S., Solmaz H, Yılmaz E, "A Numerical Investigation of the Effects of Hydrogen Addition on Combustion Characteristics in a HCCI Engine Fueled With Natural Gas" Electronic Journal of Machine Technologies, 2015, 12 (2) 15-26

1. GİRİŞ

Fosil kökenli yakıtların tükenmesi ve artan çevre kirliliği gibi problemlerden dolayı araştırmacılar daha ekonomik yakıt tüketen ve düşük emisyonlu motorların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmışlardır. Aynı zamanda alternatif yakıtlı motorların geliştirilmesi de temel araştırma konuları içerisindeydir. Alternatif yakıtların genellikle benzin ve dizel yakıtları ile kıyaslandığında daha ekonomik ve temiz olması beklenmektedir. Doğal gaz bu konuda en uygun yakıtlardan biridir. Ayrıca doğal gaz hem buji ile ateşlemeli hem de sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılabilir. Ancak doğal gazın yavaş yanma hızı, düşük yanma kapasitesi gibi problemlerden dolayı buji ile ateşlemeli motorlarda kullanılması hem motorun çıkış gücünü düşürmekte hem de yakıt tüketimini artırmaktadır [1-3]. Sonuç olarak stokiyometrik hava/yakıt oranı ile çalışan bir doğal gazlı motorda termik verim de düşük olmaktadır. Bu problemi çözmek için silindir içerisine alınan dolgunun yoğunluğu artırılabilir. Fakat bu yöntemde de yanma sıcaklığı artacağından NO_x emisyonları artacak ve ayrıca silindir duvarlarından daha fazla ısı kaybı olacaktır. Bu problemi çözmek için diğer bir etkili metot ise doğal gazın yüksek yanma hızına sahip başka bir gazla karıştırılarak yakılmasıdır. Hidrojen bu konuda, yüksek yanma hızı ile en uygun gazlardan biridir. Ayrıca düşük yanma karakteristiğini iyileştirmek için doğalgaza katılan hidrojenin egzoz emisyonlarını da iyileştireceği beklenmektedir [3-7]. HCCI motorlar hem yüksek termik verim hem de NO_x ve is emisyonlarının eş zamanlı azaltılmasındaki potansiyelinden dolayı farklı bir yanma modu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte HCCI motorların yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalışması egzoz gazı azaltıcı sistemlerine olan ihtiyacı da azaltmaktadır. Fakat yanma üzerinde bir kontrol mekanizmasının olmaması, düşük yüklerde tutuşmama, yüksek yüklerde vuruntu sorunlarından dolayı çalışma aralığı sınırlı kalmaktadır. Bu noktada farklı kimyasal yapıya haiz alternatif yakıtların kullanılması HCCI motorlarda meydana gelen kendiliğinden yanma reaksiyonlarının kontrolünde ve yanmanın seyrinde doğrudan etkileri bulunmaktadır. Bu noktada HCCI motorlarda ısıl enerjisi ve oktan sayısı yüksek olan hidrojen ve doğalgaz yakıtlarının kimyasal kinetikler ve oksidasyon reaksiyonları üzerinde etkileri bulunmaktadır [8-12].

Son birkaç yıl içinde çoğu araştırmacı doğalgaza hidrojen eklemenin motor performansı ve emisyonları üzerine çalışmışlardır. Blarigan ve Keller doğalgaz hidrojen karışımını port enjeksiyonlu bir motor üzerinde denemişlerdir [13]. Bauer ve Forest bir CFR motorunda doğalgaz hidrojen karışımının yanması üzerine deneysel olarak çalışmışlardır [14]. Wong ve Karim [15] analitik olarak homojen şarjlı sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda hidrojen ilavesi ile zenginleştirme yapmış ve çevrimler arası varyans farkına etkisini incelemişlerdir. Sonucunda da hidrojen ilavesi ile motorun çalışma aralığı genişletilmiştir. Polat ve arkadaşları [16] tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir motorda EGR ve ateşleme zamanlamasının yanma karakteristikleri üzerinde etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda EGR oranı arttıkça silindir basıncının ve ısı dağılımının azaldığını görmüşlerdir. Aynı zamanda ateşleme zamanlamasının avansa alınması ile silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığını gözlemlemişlerdir. Jafarmadar ve arkadaşları [17] Fortran tabanlı kodları kullanarak doğalgaz ve hidrojen yakıtlarının HCCI motordaki etkilerini farklı EGR oranlarında incelemişlerdir. EGR kütle miktarı arttıkça ekserji veriminin %48,9'dan %28,7'ye düştüğünü görmüşlerdir. Guo ve arkadaşları [18] hidrojen yakıtının dizel HCCI bir motorda etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada hidrojen ilavesi ile yanma fazının rötara alındığını, yanma süresinin kısaltıldığını görmüşlerdir. Fakat hidrojenin vuruntu eğilimini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ibrahim ve Ramesh [19] hidrojen ile çalışan bir HCCI motorda emme havası giriş sıcaklığının ve karışım seyreltme metodunun yanma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yüksek emme giriş sıcaklığı yanmanın avansa alınmasına ve vuruntunun gerçekteşmesine neden olduğunu görmüşlerdir. Hidrojen ile yapılan dizel yakıtına göre daha yüksek verim elde edilmiştir. Guo ve Neill [20] n-heptan ile çalışan HCCI bir motorda hidrojen ilavesinin yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçta hidrojen ilavesinin yanmayı rötara aldığını, sabit yanma fazında hidrojenin indike termik verimi arttırdığını görmüşlerdir. Song ve S. Song [21] metanol ile çalışan bir HCCI motorda hidrojen ilavesinin performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Bu çalışmada doğalgaz/hidrojen yakıt karışımlarının tek silindirli, dört zamanlı, dört supaplı HCCI bir motorda yanma üzerindeki etkileri nümerik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla KIVA-4 kodları kullanılarak tek silindirli bir motor modeli elde edilmiş, silindir basıncı, ısı dağılımı, silindir içi sıcaklık, maksimum basınç artışı oranı, yanma başlangıcı ve yanma süresi değişimleri incelenmiştir.

2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, dört supaplı doğalgaz ile çalışan bir HCCI motor KIVA-4 yazılımı ile simüle edilmiştir. Simüle edilen motorda hidrojen ilavesinin yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri nümerik olarak analiz edilmiştir. Tablo 1’de KIVA-4 yazılımında kullanılan deney şartları ve parametreler verilmektedir.

Tablo 1. KIVA-4 yazılımında kullanılan deney şartları ve parametreler

Yakıt	Metan +(%0- %10+ %20+ %30+ %40 Hidrojen)
Lambda	1,5 -2 - 2,5
Devir [d/d]	2200
Sıkıştırma oranı	10:1
Dolgu giriş sıcaklığı [K]	350
Dolgu giriş basıncı [bar]	1
Silindir çapı [mm]	86
Kurs boyu [mm]	64,8
Yanma odası yüksekliği [mm]	7,2
Krank açısı aralığı [°KA]	180-540

Test yakıtları hidrojen ve doğalgazın hacimsel karıştırılması ile elde edilmiştir. Hidrojen ve metan gazının bazı özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Doğalgaz yaklaşık olarak % 98 metan, % 0,6 etan, % 0,2 propan, % 0,2 butan, % 0,1 pentane, % 0,1 karbondioksit (CO₂), % 0,8 nitrojen (N₂) ihtiva etmektedir [2, 22-24]. Yapılan çalışmada nümerik analizi ve hesaplamaları kolaylaştırmak için KIVA-4 yazılımında metan kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan test yakıtlarının yüzdesi ve kısaltmaları ise Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Hidrojen ve doğalgaz yakıtlarının özellikleri [25-27]

	Hidrojen	Doğalgaz
Kimyasal formülü	H ₂	(Metan) CH ₄
Erime noktası [°C]	-259,16	-182,5
Kaynama noktası [K]	20,2	111,5
Yoğunluk [kg/m ³]	0,08988	0,862
Buharlaştırma ısısı [kJ/kg]	448,69	510,83
Yakıtın alt ısıl değeri [MJ/kg]	119,93	50
Araştırma oktan sayısı	130	120
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı [K]	858	923

Tablo 3. Test yakıtları ve kısaltmaları

Hacimsel yakıt yüzdeleri	Kısaltmaları
% 100 metan+%0 hidrojen	M100H0
% 90 metan+% 10 hidrojen	M90H10
% 80 metan+% 20 hidrojen	M80H20
% 70 metan+% 30 hidrojen	M70H30
% 60 metan+% 40 hidrojen	M60H40

2.1. Doğalgaz/Hidrojen Stokiyometri Hesabı

Yapılan çalışmada doğalgaz ve hidrojen karışım yakıtlarının stokiyometri hesabı yanma denklemlerine göre gerçekleştirilmiştir. %100 metan-%0 hidrojen, (M100H0) %90 metan-%10 hidrojen, (M90H10) %80 metan-%20 hidrojen, (M80H20) %70metan-%30 hidrojen (M70H30) ve %60 metan-%40 hidrojen (M60H40) yakıt karışımlarının yanma reaksiyonları hava fazlalık katsayılarına göre elde edilmiştir. Farklı test yakıtları için elde edilen yanma denklemleri aşağıda belirtilmiştir. Tablo 4’de farklı test yakıtları için hesaplanan hava fazlalık katsayılarına göre hesaplanan hava/yakıt oranları görülmektedir.

Tablo 4. Farklı test yakıtları için hesaplanan hava fazlalık katsayılarına göre hesaplanan hava/yakıt oranları ve gaz miktarları

Test yakıtı	M100H0			M90H10			M80H20			M70H30			M60H40		
	λ			λ			λ			λ			λ		
	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5
H/Y Oranı	14,3	19,0	23,8	13,2	17,6	22,0	12,1	16,2	20,2	11,1	14,8	18,5	10,0	13,3	16,7
CH ₄ [%]	6,98	5,24	4,19	6,79	5,09	4,07	6,56	4,92	3,94	6,30	4,72	3,78	5,97	4,48	3,58
O ₂ [%]	19,5	19,8	20,1	19,4	19,8	20,0	19,2	1,23	19,9	19,1	19,5	19,8	18,9	19,4	19,7
N ₂ [%]	73,4	74,8	75,6	73,0	74,5	75,4	72,5	19,7	75,1	71,8	73,6	74,7	71,1	73,0	74,2
H ₂ [%]	-	-	-	0,75	0,56	0,45	1,64	1,23	0,98	2,70	2,02	1,62	3,98	2,98	2,39

KIVA-4 Programı ile 350 K sıcaklık ve 1 bar basınçta CH₄, O₂, H₂ ve N₂ ye ait yoğunluklar sırasıyla 0,5513, 1,0996, 0,0692 ve 0,9627 kg/m³ elde edilmiştir.

2.2. Yanma Modeli

KIVA-4 kodları enerjinin korunumu yasalarını kullanır. Herhangi m komponenti için akışkan fazındaki süreklilik eşitliği Eş.(1) ile belirtilmektedir.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \rho_m^c + \rho \delta_{m1}^s \quad (1)$$

Bu eşitlikte ρ_m , m komponentinin kütle yoğunluğunu, ρ hacim yoğunluğunu, \vec{u} akışkan hızını, D difüzyon katsayısını, ρ_m^c kimyasal kaynak terimi, ρ_m^s püskürtme kaynak terimi, δ delta fonksiyonunu göstermektedir. Eş. (2) toplam akışkan yoğunluğu için süreklilik denklemini göstermektedir.

$$\sum_m \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) \right) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \rho_m^c + \rho \delta_{m1}^s \quad (2)$$

Eş. (2) Eş.(3)'e dönüştürülebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \dot{\rho} \quad (3)$$

Akışkan karışımı için momentum eşitliği Eş.(4) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{1}{a^2} \nabla p - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho \kappa \right) + \nabla \cdot \sigma + \vec{F}^s + \rho \vec{g} \quad (4)$$

Bu eşitlikte p akışkan basıncını, \vec{F}^s momentum kazanç oranını, \vec{g} özgül gövde kuvvetini, σ viskoz gerilim tensörünü (Newton tipi akış) ifade etmektedir. Özgül iç enerji eşitliği Eş. (5) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho I) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} I) = \frac{-p \nabla \cdot \vec{u} + (1 - A_0) \sigma}{\nabla \vec{u} - \nabla \cdot \vec{J} + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q} + \dot{Q}} \quad (5)$$

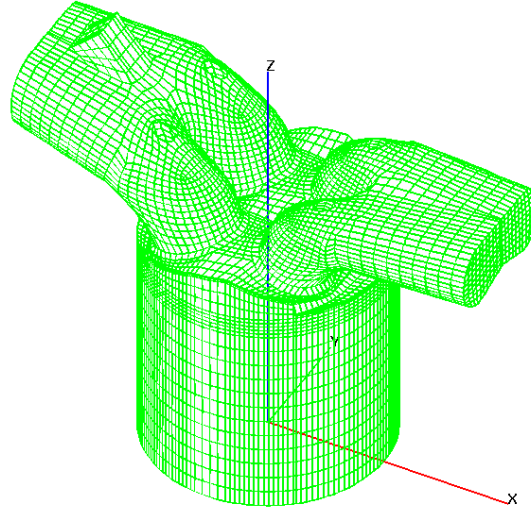
Bu eşitlikte I özgül iç enerjiyi, \dot{Q} kimyasal ısı dağılımı için kaynak terimi, \dot{Q} püskürtme etkileşimi için kaynak terimi, \vec{J} ısı akış vektörünü göstermektedir. Simülasyonda türbülans modeli olarak $k - \varepsilon$ modeli kullanılmıştır. Türbülans modeli Eş.(6) ile gösterilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \kappa) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \kappa) = \frac{-\frac{2}{3} \rho \kappa \nabla \cdot \vec{u} + \sigma}{\nabla \vec{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{P_{rk}} \right) \nabla \kappa \right]} - \rho \varepsilon + \dot{W} \quad (6)$$

KIVA-4 kodları ile yanma analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla simülasyonun her aşamasında sekiz adımlı kimyasal eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitlikler aşağıda belirtilmiştir.



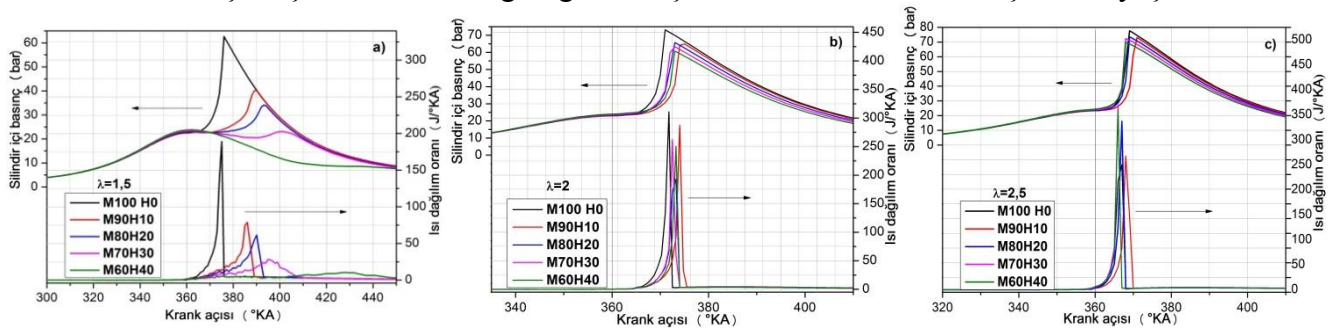
Burada RH hidrokarbon yakıtı, $(C_n H_{2n})$ R^* radikali B dallanma maddesini, Q ara ürünleri göstermektedir. Model birbirine yakın ağ yapısı ile birleştirilmiştir. Ağ yapısı birleştirme işleminden sonra 38392 hücre, 43224 düğüm noktası elde edilmiştir. Simülasyonun sonucunda yanma işleminin gözlemlenmesi için silindir içi analiz gerçekleştirilmiştir. Silindir modelinin dinamik ızgara yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Yanma odası, emme ve egzoz portları ayrılaştırılmıştır.



Şekil 1. Tek silindirli model

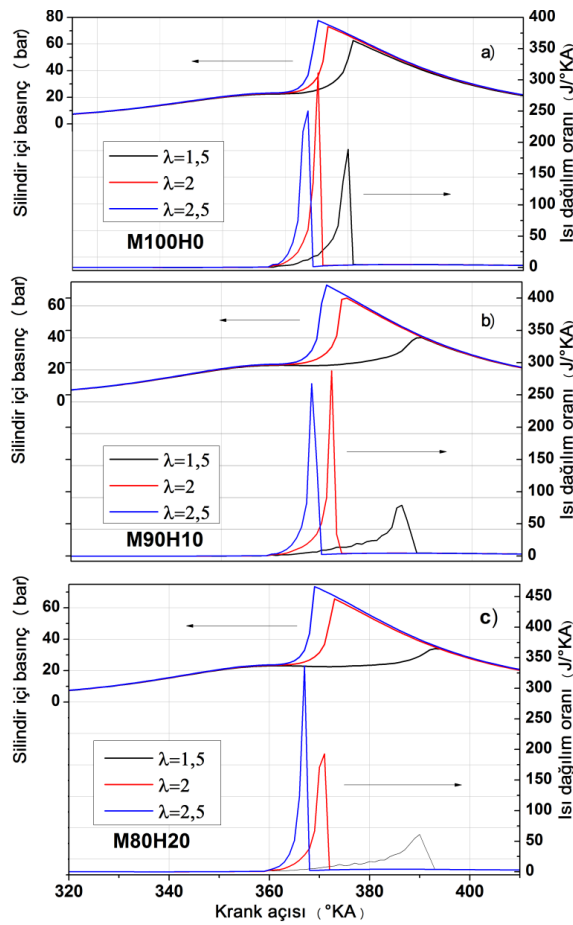
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

HCCI yanmasında yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri yanma işleminin gelişimini doğrudan etkilemektedir. HCCI motorlarda görülen düşük yüklerde ateşlenememe, yüksek yüklerde hızlı basınç artış oranı ve meydana gelen vuruşta çalışma aralığını sınırlandırmaktadır. Şekil 2’de test yakıtları ile farklı hava/yakıt oranlarında silindir içi basıncın ve ısı dağılımının değişimi krank açısına göre görülmektedir. Şekil 2 incelendiğinde tek aşamalı ısı dağılımının olduğu görülmektedir. Maksimum basınçlar M100H0 yakıtı ile elde edilmiştir. Hava fazlalık katsayısı arttıkça elde edilen maksimum basınçlar artmıştır. $\lambda=1,5$ hava fazlalık katsayısında hidrojen miktarı arttıkça elde edilen maksimum silindir içi basınç ve ısı dağılımı azalmıştır. Şekil 2-a ve Şekil 2-b incelendiğinde hava fazlalık katsayısı arttıkça elde edilen silindir basıncı değerlerinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Hava fazlalığının azalması hidrojen oranının artmasına bağlı olarak elde edilen silindir basıncı ve ısı dağılımı azalmaktadır. Silindir içi basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etki incelendiğinde hidrojenin havaya ihtiyaç duyduğu, karışım zenginleştikçe basıncın ve ısı dağılım oranının azaldığı görülmektedir. Bunun tersinde hidrojen ilave edildiğinde hava/yakıt oranının artışı yanma oranını artırarak basınç artış oranının çok artmasına neden olmaktadır. Hidrojen ilavesi ile maksimum silindir içi basınçlarda bir azalma görülmektedir. Bunun nedeni hidrojenin geç tutuşmasına bağlı olarak yanmanın tamamlanamamasından kaynaklandığı ifade edilebilir. Hidrojen ilavesi yakıtın kimyasal etkisine bağlı olarak yanma fazını rötara almaktadır. Çünkü hidrojen düşük sıcaklık reaksiyonları boyunca $H_2 + OH = H_2O + H$ reaksiyonuna iştirak eder. Bu nedenle hidrojen yakıtının seyreltme ve kimyasal etkileri düşük sıcaklık reaksiyonları boyunca ısı dağılım oranının azalmasına neden olmaktadır. Song ve S. Song [21] metanol ile çalışan bir motorda yaptıkları çalışmada sabit emme giriş sıcaklığı ve basıncında hidrojen ilavesi ile maksimum silindir basıncının ve maksimum basınç artış oranının azaldığını göstermişlerdir ve elde edilen sonuçlar ile uyusmaktadır.



Şekil 2. Test yakıtları ile farklı hava/yakıt oranlarında elde edilen silindir içi basınç ve ısı dağılımı değerleri

Şekil 3’de hava/yakıt oranlarına göre M100H0, M90H10, M80H20 test yakıtları ile elde edilen silindir içi basınç ve ısı dağılım oranlarının krank açısına göre değişimi görülmektedir. Hava yakıt oranı arttıkça tüm test yakıtları için yanma avansa alınmakta ve maksimum silindir içi basınç değerleri artmaktadır. Hava/yakıt oranının artması kendiliğinden tutuşma reaksiyonlarını iyileştirmektedir. Bununla birlikte hidrojenin tutuşmaya başlaması için hava fazlalığına ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığının metan yakıtına göre düşük olması ve hava/yakıt oranı artışı maksimum silindir basıncının daha önce elde edilmesine neden olmuştur. Hidrojenin tutuşmaya karşı direncinin fazla olması yanma fazının rötara alınmasına ve hava fazlalığının artışı ile elde edilen maksimum silindir basıncının azalmasına neden olduğu görülmektedir. Guo ve Neill [8] sabit sıkıştırma oranında yaptıkları çalışmada hidrojen ilavesi ile maksimum basıncın daha geç elde edildiğini görmüşlerdir. Bununla birlikte yüksek hidrojen ilavesi oranlarında termik verimin arttığını görmüşlerdir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürle bağdaştığı görülmektedir.

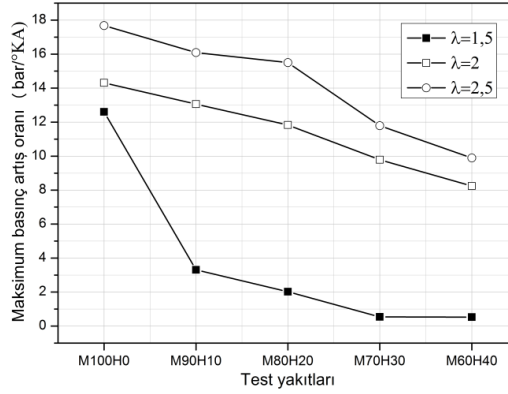


Şekil 3. Hava/yakıt oranlarına göre M100H0, M90H10, M80H20 test yakıtları ile elde edilen silindir içi basınç ve ısı dağılım oranları

HCCI yanması üzerinde direkt bir kontrol metodu olmadığından kendiliğinden yanma kimyasal kinetikler, sıkıştırma sonunda karışımın termodinamik durumu ve karışım kompozisyonu tarafından kontrol edilmektedir. Bu noktada kendiliğinden ani olarak yanma odasının genelinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar basınç artış oranının artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda istenmeyen vuruntulu yanma görülmektedir.

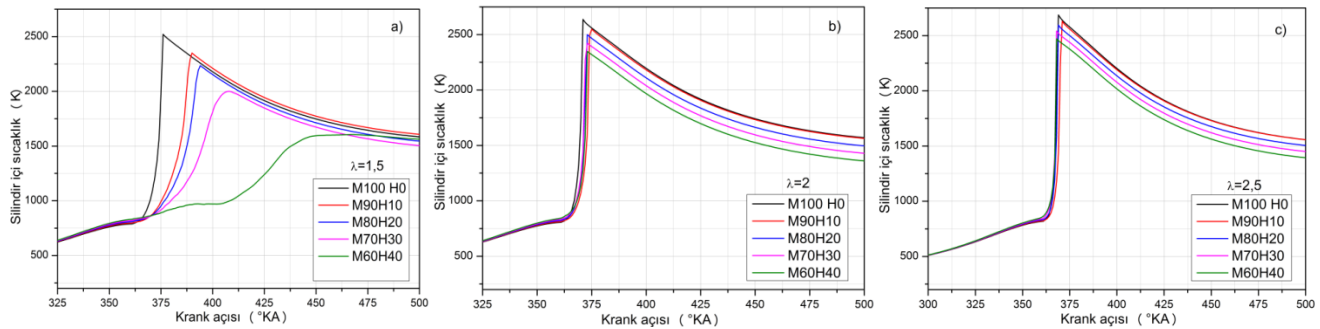
Şekil 4’de test yakıtları ile farklı hava/yakıt oranlarında elde edilen maksimum basınç artış oranları görülmektedir. Hava fazlalığı arttıkça tüm yakıtlar için maksimum basınç artış oranı artmıştır. Bununla birlikte karışım yakıtlardaki hidrojen miktarı arttıkça maksimum basınç artış oranı azalmaktadır.

Hidrojenin kendiliğinden tutuşmaya karşı direncinin metan yakıtına göre daha fazla olması kendiliğinden yanma reaksiyonlarını yavaşlatmakta yanmanın daha stabil olmasına neden olduğu görülmüştür. Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı olan hidrojenin ilavesi oksidasyon reaksiyonları ile kontrol edilebilmekte, hidrojenin kimyasal etkisi yanma fazı üzerinde etkin hale gelmektedir. Şekil 4 incelendiğinde doğalgaza hidrojen ilavesi sonucu hava fazlalığı arttıkça özellikle yüksek motor yüklerinde vuruntu temayülü artmaktadır. Bunun için fakir karışımlarda hidrojen ilavesi ile yapılan çalışmalarda tutuşmanın kontrolü ve yanmanın seyri için karışımın seyreltilmesi ihtiyacı meydana gelmektedir.



Şekil 4. Maksimum basınç artış oranları

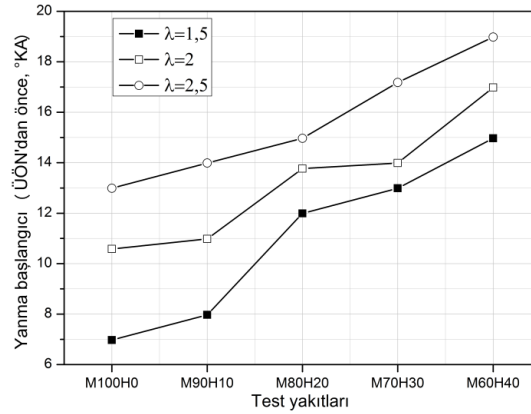
HCCI yanmasında incelenmesi gereken diğer önemli değişken silindir içi sıcaklıktır. Şekil 5 krank açısına göre silindir içi sıcaklıkların değişimini göstermektedir. Tüm hava/yakıt oranlarında karışım yakıtlar içerisindeki hidrojen miktarı arttıkça elde edilen silindir içi sıcaklıklar azalmaktadır. Hidrojen ilavesi ile yanmanın rötara alınması elde edilen sıcaklığın azalmasına neden olmaktadır. Elde edilen maksimum sıcaklıklarda önemli bir fark görülmektedir. Metan yakıtının oktan sayısının düşük olması kimyasal reaksiyonların başlamasına yanma odasındaki kendiliğinden tutuşma şartlarının iyileşmesine yardımcı olduğu ifade edilebilir. Yüksek hava/yakıt oranlarında maksimum silindir sıcaklıklarına önemli bir değişim görülmemektedir. Aynı zamanda hidrojenin ısıl enerjisinin yüksek olması, hava/yakıt oranının artması ile karışım yakıtların yanması sonucu elde edilen sıcaklık artmaktadır.



Şekil 5. Silindir içi sıcaklık değişimleri

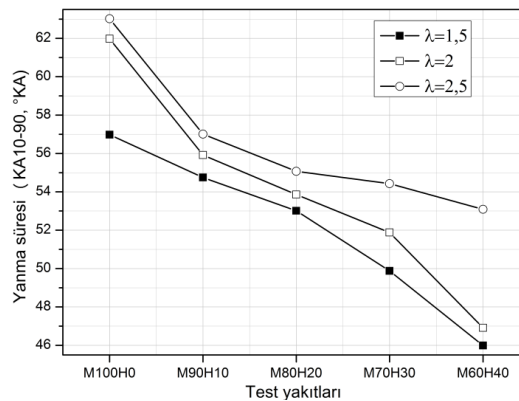
Yanma analizinde yanma başlangıcı krank açısına göre ısı dağılımı değerlerinin negatif değerden pozitif değere yükseldiği krank açısı belirlenerek bulunmuştur. Bu noktada yakıtın kimyasal özellikleri karışım kompozisyonu yanmanın gelişimini direkt etkilemektedir. Şekil 6'da yanma başlangıçlarının değişimi görülmektedir. Hava/yakıt oranı arttıkça tüm test yakıtları için yanmanın avansa alındığı görülmektedir. Hidrojenin oksidasyon reaksiyonları için hava fazlalığına ihtiyaç duyması yanma odasında kendiliğinden tutuşma şartlarının daha kolay elde edilmesi karışımın termodinamik durumunu tutuşmaya elverişli hale getirmekte, yanmanın avansa alınmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde hava fazlalığı ile ısıl enerjisi yüksek hidrojen yakıtının tutuşmaya iştirak etmesi yanmanın başlangıcını öne alınmasına yardımcı

olmuştur. Bunun yanında hidrojen yakıtının kendiliğinden tutuşma sıcaklığının düşük olması yanmanın avansa alınmasına neden olmuştur.



Şekil 6. Yanma başlangıçları

Yanma süresi krank açısına göre kümülatif ısı dağılımlarının 0 ile 1 arasında normalize işlemine tabi tutulması ile elde edilebilmektedir. Kümülatif ısı dağılımlarının normalizasyonu ile yanmanın gelişimi izlenebilmektedir. Dolayısı ile normalize edilmiş kümülatif ısı dağılımlarına göre silindire alınan karışımın %10'unun yanmasını tamamladığı krank açısına bağlı bulunan nokta KA10 olarak, %90'ının yanmasını tamamladığı nokta KA90 olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada yanma süresi KA10 ile KA90 arası krank açısı cinsinden belirlenmiş ve yanma süresi olarak kabul edilmiştir. Yanmanın tamamlanmasını tam olarak belirlemek güçtür. Isı kayıplarının meydana gelmesi devam eden yanma reaksiyonlarının tamamlandığı noktayı belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Şekil 7'de test yakıtları ile elde edilen yanma sürelerinin değişimi görülmektedir. Hava/yakıt oranı arttıkça tüm test yakıtları için yanma süreleri artmaktadır. Aynı zamanda karışım yakıtlardaki hidrojen oranı arttıkça yanma süresi kısalmaktadır. Hava fazlalığının artması ile kimyasal oksidasyon reaksiyonlarının gelişimi yavaşlamaktadır. Daha zengin karışımlarda yakıt ile hava moleküllerinin buluşma ve tutuşma imkânı artırılabilir ve yanma süresi fakir karışımlara göre azalmaktadır. Hidrojen ilavesi ile yanma süresi kısalmaktadır. Bu noktada yanma süresinin kısılması ile birkaç neden şu şekilde ifade edilebilir. Hidrojen ilavesi ile yanma hızı geciktirilmektedir. İkincisi yüksek sıcaklık reaksiyonlarının $H + O_2 = O + OH$ dallanma reaksiyonu ile yoğunlaştırılmasıdır. Hidrojenin ısı enerjisinin yüksek olması ve kendiliğinden tutuşma sıcaklığının metan yakıtına göre düşük olması yanma süresinin kısalmasına neden olmaktadır [18]. Guo ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada sabit sıkıştırma oranında, % 0 egzoz gazı geri dönüşüm oranında hidrojen ilavesi ile yanma süresinin kısaldığını görmüşlerdir. Yapılan deneysel çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmiş, elde edilen sonuçların literatürle uyduğu görülmüştür.



Şekil 7. Yanma sürelerinin değişimi

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doğalgaz ile çalışan bir HCCI motorda hidrojen ilavesinin yanma karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Bu amaçla hidrojen ve doğalgaz yakıtlarının HCCI yanması üzerindeki etkilerini gözlemlenmek amaçıyla KIVA-4 yazılımı kullanılmış, nümerik olarak HCCI yanması incelenmiştir. $\lambda=1.5$ hava/yakıt oranında hidrojen miktarı arttıca silindir içi basıncı azalmıştır. Hava/yakıt oranı arttıca M100H0 yakıtı için maksimum silindir basıncı artmıştır. Hava/yakıt oranı arttıca M1000, M90H10 ve M80H20 yakıtları için yanma avansa alınmış, maksimum silindir basıncı artmıştır. Aynı zamanda hava fazlalığı arttıca maksimum basıncı artış oranı artmış, motorun vurunutulu çalışma eğilimi grlmştir. Bunun için HCCI motorlarda hidrojen kullanımında özellikle yüksek motor yüklerinde karışımın seyreltilmesi ihtiyaı ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde hava fazlalığının artışı ile yanma başlangıcı tüm yakıtlar için avansa alınmıştır. Hidrojen yakıt ilavesi ile yanma başlangıcının avansa alındığı görülmektedir. Yanma süresi hidrojen ilavesi ile kısalmaktadır. Elde edilen sonuçların literatürde elde edilen sonuçlar ile örtüştüğü grlmştir. Motorun hava fazlalığı ile çalıştırılması sonucu yanma süresinin arttığı grlmştir. Aynı zamanda özellikle çok fakir karışımlarda hidrojen ilavesi ile motorun vurunutulu çalışma eğiliminin arttığı grlmştir. Çalışma sonucunda doğalgaz ve hidrojen yakıtlarının HCCI motorlarda kullanılabileceği, hidrojen yakıt ilavesi ile HCCI yanma fazının kontrol edilebileceği grlmştir. HCCI motorlarda tutuşmanın kontrolü ve yanmanın seyri için hidrojenin etkili bir karışım yakıt olabileceği grlmştir.

5. KAYNAKLAR

1. Liu, C., Karim, GA., 2008, "A simulation of the combustion of hydrogen in HCCI engines using a 3D model with detailed chemical kinetics ", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:3863–75.
2. Hairuddin, A. A., Yusaf, T., Wandel, A.P., 2014, "A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 739–761.
3. Zhao, H., 2007, "HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry", Woodhead Publishing Limited, England, 78–118.
4. Yılmaz, E., Solmaz, H., Polat, S., Uyumaz, A., Sahin, F., Salman, MS., 2014, "Preparation of diesel emulsion using auxiliary emulsifier mono ethylene glycol and utilization in a turbocharged diesel engine", *Energy Conversion and Management*, 86: 973–80.
5. ınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S., Yılmaz, E., 2015, "Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels", *Fuel Processing Technology*, 130:275–81.
6. Kuo, KK., 2005, "Principles of combustion", New Jersey: John Wiley and Sons.
7. Miller, JA, Bowman, CT., 1989, "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, 15: 287–338.
8. Guo, H., Neill, WS., 2013, "The effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of an n-heptane fuelled HCCI engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38:11429-37.
9. Park, J., Cha, H., Song, S., Chun, KM., 2011, "A numerical study of a methane-fueled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36: 5153-62.

10. Yao, M., Zheng, Z., Liu, H., 2009, "Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, 35:398-437.
11. Stone, R., 2000, "Introduction to internal combustion engines" Second ed. London: Macmillan Press.
12. Çınar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Topgul, T., 2015, "Effects of valve lift on the combustion and emissions of a HCCI gasoline engine", *Energy Conversion and Management*, 94, 159–168.
13. Blarigan, P.V., Keller, J O., 1998, "A hydrogen fuelled internal combustion engine designed for single speed/power operation", *International journal of Hydrogen Energy*, 23(7), 603-609.
14. Bauer, C.G., Forest, T.W., 2001, "Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S.I. engine performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(1), 55-70.
15. Wong, Y.K., Karim, G.A., 2000, "An analytical examination of the effects of hydrogen addition on cyclic variations in homogeneously charged compression-ignition engines", *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(12), 1217-1224.
16. Polat, S., Uyumaz, A., Solmaz, H., Yılmaz, E., Topgül, T., Yücesu, H.S., 2016, "A numerical study on the effects of EGR and spark timing to combustion characteristics and NO_x emission of a GDI engine", *International Journal of Green Energy*, 13(1), 63-70.
17. Jafarmadar, S., Nemati, P., Khodaie, R., 2015, "Multidimensional modeling of the effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on exergy terms in an HCCI engine fueled with a mixture of natural gas and diesel", *International Journal of Green Energy*, 105 498–508.
18. Guo, H., Hosseini, V., Neill, W.S., Chippior, W.L., Dumitrescu, C.E., 2011, "An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion", *International Journal of Green Energy*, 36, 13820-13830.
19. Ibrahim, M.M., Ramesh, A., 2014, "Investigations on the effects of intake temperature and charge dilution in a hydrogen fueled HCCI engine", *International Journal of Green Energy*, 39, 14097-14108.
20. Guo, H., Neill, W.S., 2013, "The effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of an n-heptane fuelled HCCI engine", *International Journal of Green Energy*, 38, 11429-11437.
21. Song, H., Song, S., 2015, baskıda, "Predicting performance of a methane-fueled HCCI engine with hydrogen addition considering knock resistance", *International Journal of Green Energy*.
22. Kong, SC., Reitz, RD., 2002, "Use of detailed chemical kinetics to study HCCI engine combustion with consideration of turbulent mixing effects", *Journal of Engineering For Gas Turbines and Power*, 124:702–7.
23. Papagiannakis, RG., Hountalas, DT., 2004, "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas", *Energy Conversion and Management*, 45:2971–87.
24. Jonathan, P., 2006, "Responses to questions on the design elements of a mandatory market-based greenhouse gas regulatory system", U.S Senate Committee on Energy and Natural Resources, Washington.

25. Saravanan, N., Nagarajan, G., 2010, "An experimental investigation on hydrogen fuel injection in intake port and manifold with different EGR rates", *International Journal of Energy and Environment*,1:221–48.
26. Saravanan, N., Nagarajan, G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, KM., 2008, "Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode", *Fuel*, 87:3591–9.
27. Verhelst, S., Wallner, T., 2009, "Hydrogen-fueled internal combustion engines", *Progress in Energy Combustion and Science*, 35:490–527.