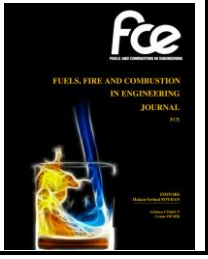
	MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL		
	eISSN: 2564-6435		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce		
	<u>Geliş/Received</u> 01/01/2023		
	<u>Kabul/Accepted</u> 12/06/2023		<u>Doi:</u> https://doi.org/10.52702/fce.1228061

Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması

Ali Şanlı^{*1}, İlker Turgut Yılmaz²

ÖZ

Bu çalışmada, yüksek basınçlı yakıt püskürtme teknolojisine sahip dört silindirli bir dizel motorda hidrojen gazı emme kanalından hava ile karıştırılarak sabit devirde (1750 d/dak) iki farklı motor yükünde (60 Nm ve 100 Nm) test edilmiştir. Hidrojen debisi, dakikada 10 litreden (H10) 50 litreye (H50) kadar 10 l/dak'lık artışlarla değiştirilmiştir. Yapılan yanma analizinde 200 çevrim için standart sapma ve çevrimsel değişim katsayıları incelendiğinde; 100 Nm'de krank açısına bağlı olarak silindir basıncında en az çevrimsel değişim H30 ve H40 oranlarında elde edilmiştir. Test motoru, düşük yükte çalıştırıldığında artan hidrojen miktarıyla birlikte maksimum silindir basıncının ve maksimum yanma sıcaklığının tüm çevrimlerde daha erken oluştuğu belirlenmiştir. 60 Nm'de en yüksek silindir basıncı H50 ile 365° krank açısında 82,97 bar, 100 Nm'de dizel ile 374° krank açısında 109,32 bar olarak belirlenmiştir. Düşük motor torkunda, H20 ile 375° krank açısında 38,01 J/° olarak elde edilen ısı dağılım oranı, yüksek torkta H50 ile 377° krank açısında 70,39 J/° olarak elde edilmiştir. Maksimum ısı dağılımı oranı değerleri tüm çevrimler için düşük yükte 371-377° krank açısı aralığında değişirken, tork artışıyla birlikte değerler daha geniş bir krank açısı aralığında (370-379° krank açısı) elde edilmiştir. En yüksek yanma sıcaklıkları, düşük yükte H20 ile 390° krank açısında 1571 K değerinde elde edilirken, yüksek torkta 392° krank açısında H50 ile 2449 K değerinde elde edilmiştir. Aynı zamanda, 200 çevrim boyunca en yüksek sıcaklıklar düşük yükte 388-392° krank açısı aralığında değişirken, yüksek yükte daha geniş krank açısı aralığında (386-393° krank açısı) değişmiştir. Ortalama indike basınç ve maksimum silindir basıncı için çevrimsel değişim katsayıları 100 Nm'de H50 çalışması haricinde tüm çalışma koşulları için % 3'ün altında kalmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, belirli çalışma şartları altında hidrojenin ortak hatlı dizel motorda çevrimsel değişimlerin azalmasına katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Çevrimsel değişim, Yanma, Dizel

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

^{*1} Gemi Makineleri İşletme, Piri Reis Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, İstanbul;

email: phdalisanli@outlook.com  0000-0002-7965-5637

² Makine Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul;

email: ilker.yilmaz@marmara.edu.tr  0000-0002-0398-7635

1. GİRİŞ

Dizel motorlar, ulaşım, jeneratör uygulamaları, tarım, denizcilik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yakıt dönüşüm verimlerinin yüksek olmasının yanı sıra düşük oranda karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları yayması önemli avantajlarıdır. Ancak, verimleri yüksek olmasına rağmen yüksek oranda partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonu yaymaktadır. Bu emisyonların azaltılmasında kullanılan iyileştiricilerin artan maliyetleri ve motor performansını azaltması araştırmacıları farklı yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir [1].

Hidrojen, karbon içeren emisyonları önemli oranda azaltmasından dolayı hem dizel hem buji ateşlemeli motorlarda sıklıkla tercih edilmektedir [2,3]. Alt ısı değerleri, alev ilerleme hızı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ve difüzyon özelliği diğer yakıtlara nazaran daha yüksektir. Bunun yanı sıra, daha geniş alevlenme limitlerine ve daha düşük tutuşma enerjisine sahiptir [4]. Dizel motorlarda hidrojen, emme kanalından fumigasyon veya enjektörler aracılığıyla silindirlere gönderilmektedir. Diğer bir yöntem ise doğrudan silindirlere püskürtülerek kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntem motorda önemli değişiklikler gerektiğinden ve artan maliyetlerden dolayı nadiren tercih edilmektedir. Dizel motorlarda hidrojenin ana yakıt olarak kullanılmasında ateşleyici olarak, setan sayısı yüksek bir pilot yakıt (dizel veya biyodizel gibi) kullanılmaktadır. Pilot yakıt, sıkıştırma işlemi sonuna yakın bir zamanda yanma odasına püskürtülerek hidrojen ve hava karışımını tutuşturur. Emme kanalından hidrojen gönderilen yöntemlerde emilen hava miktarı azalmakta ve karışım zenginleşmektedir. Aynı zamanda, emme havasında yanıcı gaz bulunmasından ötürü geri tepme problemiyle karşılaşmamak için yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımların iyi soğutulması gerekmektedir [5]. NO_x emisyon artışına neden olan yüksek alev hızı aynı zamanda kullanılan hidrojen oranıyla da artmaktadır. Düşük motor torkunda genel olarak NO_x emisyonları daha azdır. Bu durum silindir sıcaklıklarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır [6].

Çevrimsel yanma değişimleri, motor performans ve emisyonlarına önemli oranda etki etmektedir.

Aynı zamanda, motor titreşimlerinin temel sebeplerinden biri olduğu düşünülmektedir. Çevrimsel değişimler, silindirlere meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylardan kaynaklanır. Çevrimden çevrime değişen bölgesel hava-yakıt oranı, önceki çevrimden kalan artık gaz miktarı, yanma odasında oluşan hava hareketleri, yakıt püskürtme basıncı ve miktarı, tutuşma gecikmesi gibi olaylar çevrimsel farklılıkların temel sebepleridir [7]. Ortalama indike basınçtaki küçük çevrimsel değişimler, çıkış gücünde önemli değişimlere neden olmaktadır [8].

Alternatif yakıtların içten yanmalı motorlarda çevrimsel değişimlere etkisi ile ilgili literatürde bazı araştırmalar karşımıza çıkmaktadır. Wang ve diğerleri [9], alternatif yakıt olarak dimetil eter kullanımının dizel motorda çevrimsel değişimlere etkisini incelemişlerdir. Maksimum basınç ve maksimum sıcaklık değişimlerinin tüm yakıt karışım oranları için % 3 altında kaldığını tespit etmişlerdir. Maksimum basınç artış oranı değişiminin maksimum ısı dağılım oranına benzer olduğunu göstermişlerdir. Ceviz ve Yüksel [10], buji ateşlemeli motorda etanol miktarının çevrimsel değişimlere etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, ortalama indike basınç için çevrimsel değişimler açısından en uygun etanol miktarının % 10 olduğunu tespit etmişlerdir. Wang ve diğerleri [11], metanol-dizel çift yakıt karışımlarıyla çalıştırılan sıkıştırma ateşlemeli bir motorda düşük motor torkunda maksimum basınç ve maksimum sıcaklıklar için çevrimsel değişim katsayılarının arttığını gözlemlemişlerdir. Emme sıcaklığının düşük motor torkunda tüm çevrimsel değişim katsayı parametrelerine en etkili faktör olduğunu tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, püskürtme zamanlamasının metanol-dizel çevrimsel çalışmalarına etkisiz bir parametre olduğu belirtilmiştir. Wang ve diğerleri [12], çeşitli doğalgaz-dizel karışım oranlarıyla çalıştırılan bir dizel motorda çevrimsel yanma analizi yapmışlardır. Artan doğalgaz miktarıyla birlikte, maksimum silindir basıncı, ortalama indike basınç ve krank açısına göre silindir basıncının arttığını tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, ortak hat yakıt püskürtme sistemine sahip dört silindirli ve dört zamanlı sıkıştırma ateşlemeli bir motor iki farklı motor torkunda değişik hidrojen akış oranlarıyla test edilmiştir. Elde edilen bulgular, çevrimsel

farklılıklar açısından değerlendirilmiştir. Çevrimsel yanma değişimleri açısından iki farklı motor torkunda optimum hidrojen oranı araştırılmıştır.

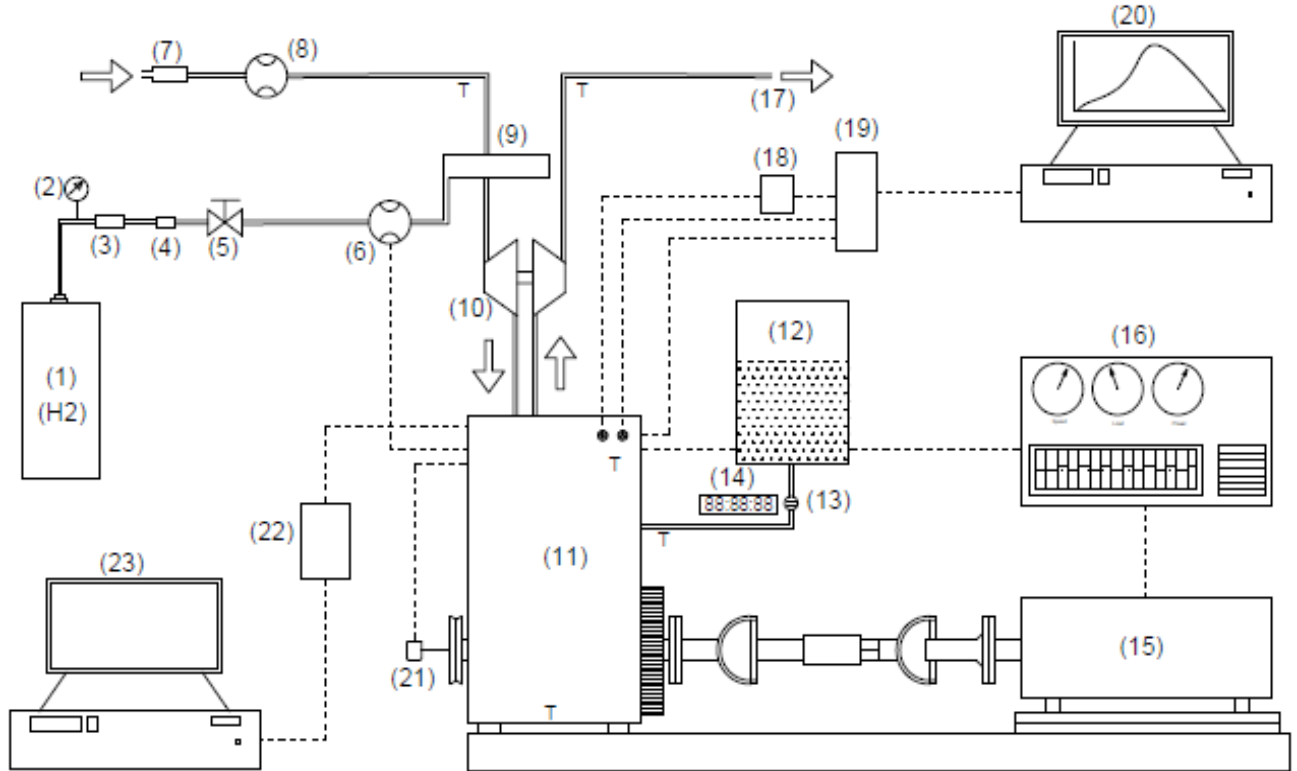
2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada, dört silindirli, dört zamanlı, turboşarjlı, ortak hatlı bir dizel motor kullanılmıştır. Motor özellikleri Tablo 1’de verilmektedir. Test sistemi şeması Şekil 1’de verilmektedir. Motor torkunu ve devrini ayarlamak için elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Testler boyunca dinamometrede oluşan yüksek hararet şehir şebeke suyu yardımıyla giderilmektedir. Motest yazılımı yardımıyla dinamometre ara yüzü kontrol edilebilmektedir. Motor emme havası akış oranı New Flow akış ölçer ile ölçülmüştür. Hidrojen gazı için 50 litrelik tüplerde Hatgrup firmasından temin edilen % 99,999 saflıkta hidrojen gazı kullanılmıştır. Emme portunda bulunan bir karışım odasında emme havası ile karıştırılan hidrojenin akış oranı Sierra 5858E model akış

Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması ölçer ile ölçülmüştür. Her testte, dizel yakıt miktarı yakıt tankıyla bağlantılı olan ölçekli cam beher ve bir kronometre yardımıyla ölçülmüştür. Yanma odası basıncı, Oprand 33288 model kızdırma buji tipinde basınçölçer kullanılarak ölçülmüştür. Her deneyde toplanan silindir basınç sinyalleri National Instrument 6343 model veri toplama kartı üzerinden bir bilgisayara aktarılmıştır. Krank açısı, krank kasmağı eksenine bağlanan 360° artımlı bir enkoder yardımıyla belirlenmiştir. Febris yazılımında kaydedilen değerler çevrimsel yönden analiz edilmiştir.

Tablo 1. Test motoru özellikleri

Motor tipi	Ortak hatlı, dört silindirli, turboşarjlı, sekiz supaplı
Enjeksiyon safhaları	Ön püskürtme ve ana püskürtme
Kurs mesafesi	80,5 mm
Silindir çapı	76 mm
Sıkıştırma oranı	16,9:1
Strok hacmi	1461 cm ³
Maksimum güç	48 kW @4000 d/dak
Maksimum tork	160 Nm @1750 d/dak



- 1.Hidrojen tüpü, 2. Basınç ölçer, 3. Regülötör, 4. Alev tutucu, 5. Kısma valfi, 6. Hidrojen akış ölçer, 7. Hava filtresi, 8. Hava akış ölçer, 9. Karışım odası, 10. Turboşarj, 11. Test motoru, 12. Yakıt tankı, 13. Ölçekli cam beher, 14. Kronometre, 15. Dinamometre, 16. Dinamometre kontrol paneli, 17. Egzoz çıkışı, 18. Amplifier, 19. Veri toplama kartı, 20. ve 23. Bilgisayar, 21.Enkoder, 22. Diagnostik kart.

Şekil 1. Test şeması

Testler, sabit devirde (1750 d/dak) iki farklı motor torku ve beş farklı hidrojen akış oranlarıyla yapılmıştır. Deneylerde kullanılan pilot yakıt, petrol ofisi yakıt istasyonlarından temin edilen Euro dizel yakıttır. Yakıt testleri, motor kararlı rejime ulaştığında yapılmıştır. Motor suyu giriş-çıkış sıcaklıkları $80 \pm 5^\circ$ C civarında sabit tutulmuştur. Soğutma suyu sıcaklıkları, egzoz gaz sıcaklığı, karter yağ sıcaklığı ve emme havası sıcaklığı K tipi termokupullarla ölçülmüştür ve sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 1'de 'T' ile gösterilmiştir. Testlerde, öncelikle normal dizel yakıt düşük ve yüksek motor torklarında referans yakıt olarak test edilmiştir. Daha sonra, hidrojen gazı düşük yükte emme portundan düşük akış oranlarından başlayarak kısma valfleri sayesinde kademeli olarak artırılmıştır. Geri tepme durumunda tüpe alev ulaşmaması için emme hattında alev tutucu kullanılmıştır. Daha yüksek hidrojen oranlarında çalışabilmek ve vuruntu oluşumundan kaçınmak için sıkıştırma oranı 18,25'den 16,9'a düşürülmüştür. Bunun için fazladan bir silindir kapak contası ilave edilmiştir. Yakıt karışımları, hidrojenin hacimsel akış oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin, H10 sembolü 10 l/dak akış debisinde hidrojen akışını simgelemektedir. İstenen tork elde edilinceye kadar dizel yakıt miktarı artırılmaktadır. Hidrojen yakıt enerji paylaşım oranı, en yüksek hidrojen oranı (H50) için 60 Nm'de % 29 ve 100 Nm'de % 18'dir. Azalan hidrojen oranıyla birlikte dizel yakıt enerji paylaşım oranı artmaktadır. Her testte, motorun elektronik kumanda ünitesine bağlı bir diagnostik kart yardımıyla bir çevrimde püskürtülen dizel yakıt miktarı, emme havası sıcaklık ve akış oranları, gaz kolu açısı, ortak-hat basıncı gibi birçok farklı parametre bilgisayar ekranında aynı anda görülmektedir. Deneylerde kullanılan cihazların hata miktarları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Ölçülen bazı test değişkenlerinin doğrulukları

Ölçülen değişken	Hata miktarı
Tork, Nm	$\pm\% 0,25$
Devir, d/dak	$\pm\% 1$
Krank açısı	$\pm 1^\circ$
Hidrojen debisi, l/dak	$\pm\% 1$
Dizel debisi, l/dak	$\pm\% 0,5$
Sıcaklık, °C	$\pm\% 1$
Silindir basıncı, bar	$\pm\% 0,5$

Deneylerde elde edilen silindir basıncının işlenmesiyle yanma fazı ile ilgili önemli bulgulara ulaşılmaktadır. Birim krank açısı

Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması aralığında açığa çıkan ısı enerjisi (ısı dağılım oranı) termodinamiğin birinci kanunundan elde edilen aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$\frac{dQ_{Net}}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

Bu eşitlikte, k , P ve V sırasıyla özgül ısılar oranı (C_p/C_v), ölçülen anlık silindir basıncı ve anlık silindir hacmidir. dQ_{Net} net ısı dağılım oranını ifade etmektedir.

Gaz sıcaklığı, referans bir noktadaki basınç, hacim ve sıcaklık değerleri kullanılarak ideal gaz kanununa göre aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$T_g = PV \frac{T_{ref}}{P_{ref}V_{ref}} \quad (2)$$

Burada, ref alt indisi ile gösterilen değerler için emme supabının kapanma açısı olan 200° krank açısındaki (alt ölü noktadan sonra 20°) basınç, silindir hacmi ve gaz sıcaklığıdır.

Çevrimsel değişim katsayısı (ÇDK) herhangi bir yanma parametresi için hesaplanabilir. ÇDK, aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$\text{ÇDK} = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100 \quad (3)$$

σ ve \bar{X} sırasıyla standart sapma ve ortalama değeri ifade etmektedir. σ Aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4)$$

X_i herhangi bir yanma parametresi seçilebilir. n çevrim sayısıdır. Bu çalışmada, 200 çevrim için çevrimsel yanma analizi yapılmıştır.

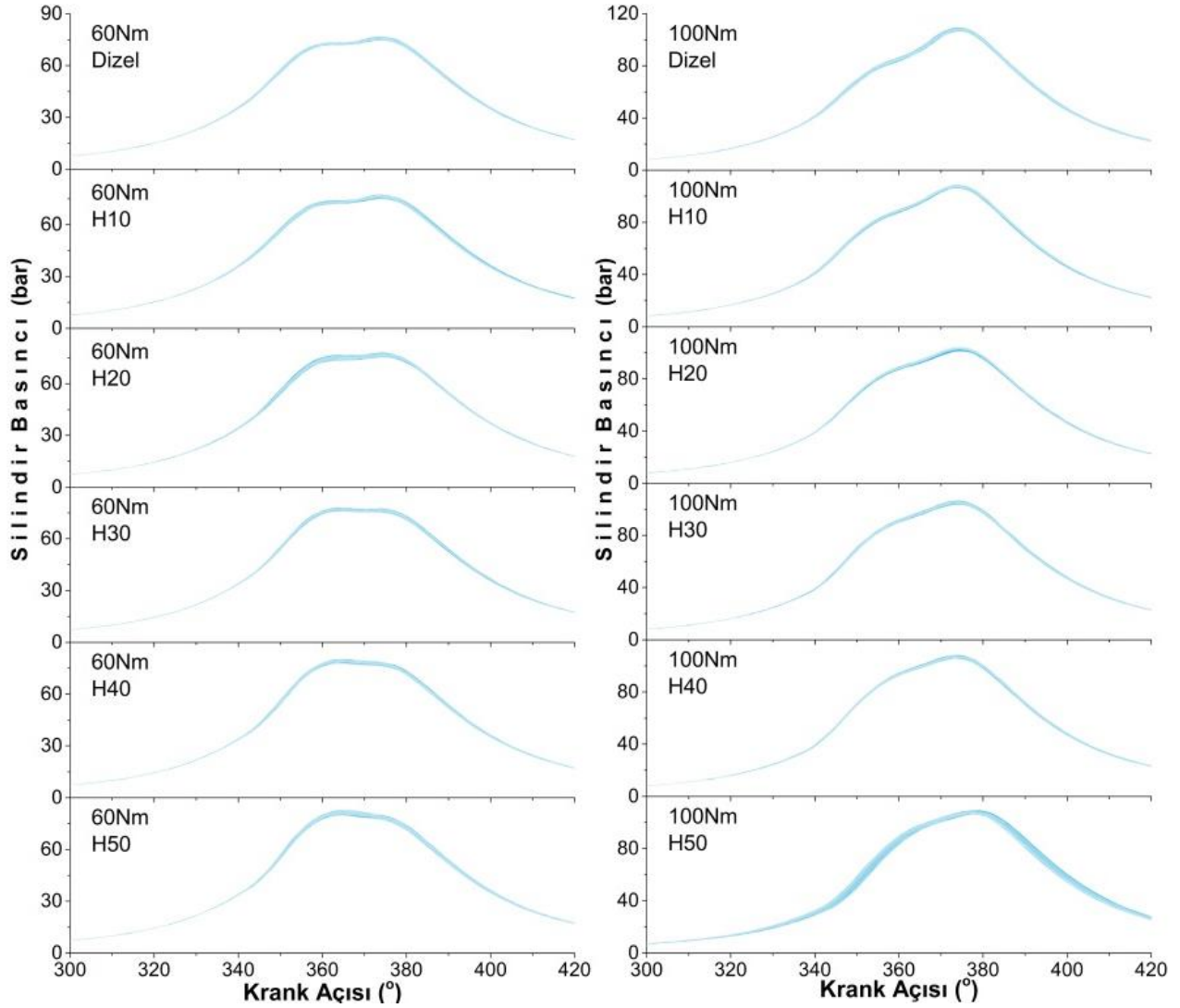
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Çevrimsel Silindir Basıncı Değişimi

Bu bölümde, hidrojen ve pilot dizel yakıtın yanması sonucu oluşan silindir basınç verileri 200 çevrim için verilmiştir. 60 Nm ve 100 Nm motor torklarında, her bir krank açısında oluşan silindir basınç değişimleri tüm hidrojen-dizel çalışmaları için Şekil 2'de verilmektedir. Şekiller incelendiğinde sıkıştırma periyodunda tüm silindir basınç eğrilerinde çevrimsel değişimlerin az olduğu görülmektedir. Ancak, yanma

başlangıcından itibaren üst ölü nokta (ÜÖN) civarında çevrimsel değişimler artmaktadır. ÜÖN'den sonra yanma bitimine doğru çevrimsel değişimler azalmakta ve tüm silindir basınç eğrileri birbirine oldukça yakın bir eğilim göstermektedir. 60 Nm motor torku altında normal dizel çalışmasıyla kıyaslandığında, hidrojen-dizel yakıtlı çalışmalarda silindir basınç eğrilerinin çevrimden çevrime daha fazla değiştiği görülmektedir. En yüksek ve en düşük silindir basınçları arasındaki fark daha fazladır. Ancak, 100 Nm'de oluşan silindir basınçları

Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması incelendiğinde, H50 çalışması hariç diğer hidrojen-dizel çalışma durumlarında oluşan çevrimsel silindir basınç farklılıklarının normal dizel çalışmasından daha az olduğu görülmektedir. 100 Nm'de, H50 ile oluşan çevrimsel silindir basınçları önemli oranda değişmektedir. Bu değişimlerin, artan hidrojen ilavesi ve artan pilot dizel yakıt sonucu oluşan aşırı zengin karışımdan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Farklı hidrojen akış oranlarında ve farklı yüklerde çevrimsel silindir basınç değişimleri

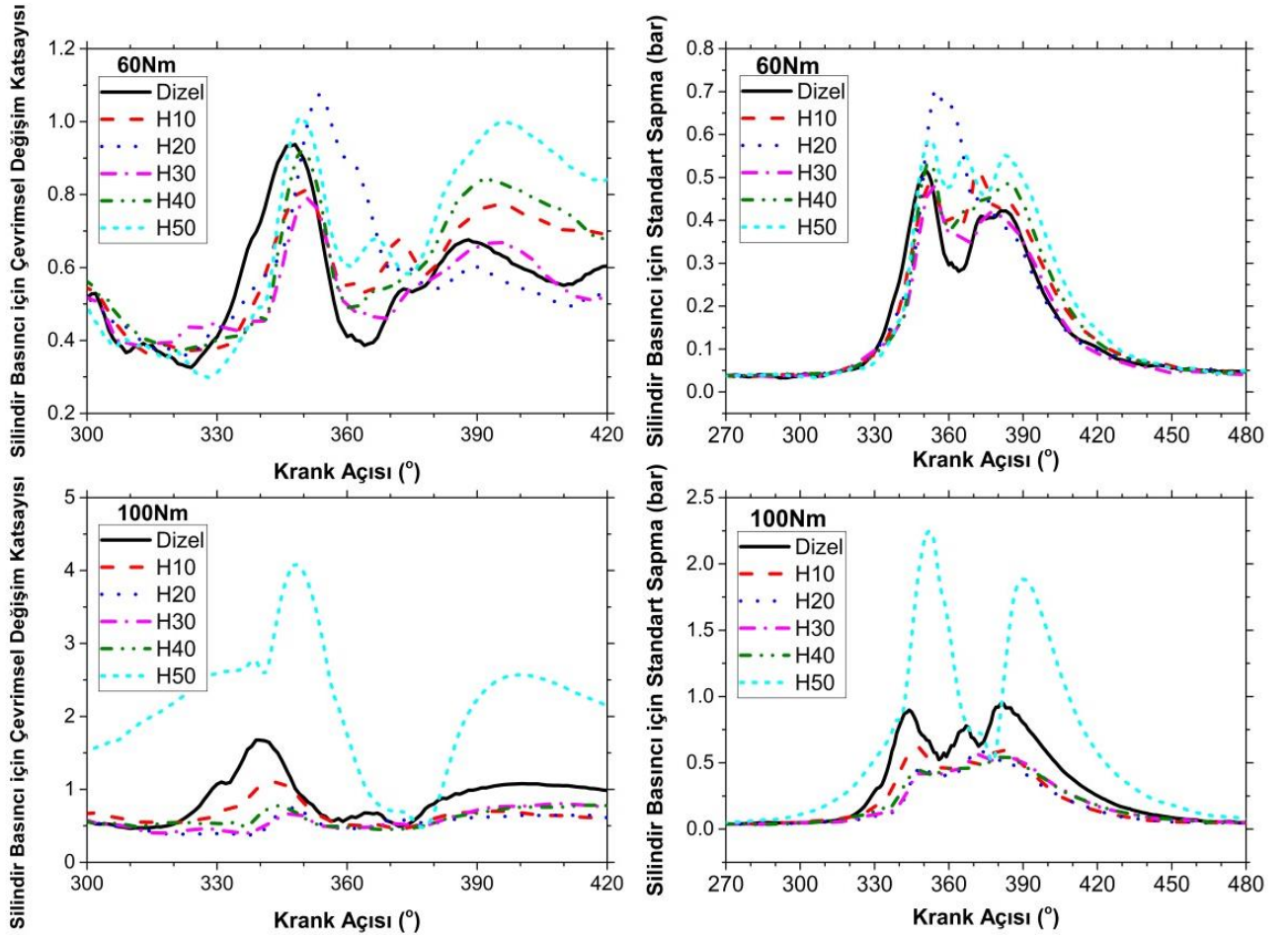
Dizel ve hidrojen-dizel karışımları için silindir basınç eğrilerinde çevrimsel değişimlerin boyutunun daha açık bir şekilde ortaya koyulabilmesi için krank açısına göre standart sapma ve çevrimsel değişim katsayısı (ÇDK) değişimlerinin ele alınması daha uygun olur. Şekil 3'de bu değişimler sunulmaktadır. Yukarıda tartışıldığı gibi 100 Nm'de H10, H20 H30 ve H40

çalışmalarında normal dizel yakıt çalışmasına göre silindir basıncında standart sapmanın daha az olduğu görülmektedir. Şekil 3'te açıkça görüldüğü gibi 100 Nm'de H50 çalışmasında çevrimsel değişim katsayısı değişimi diğer hidrojen oranlarına kıyasla oldukça yüksektir. Yüksek ÇDK değerleri, motor çıkış gücünde dalgalanmaların ve motor titreşimlerinin artacağı

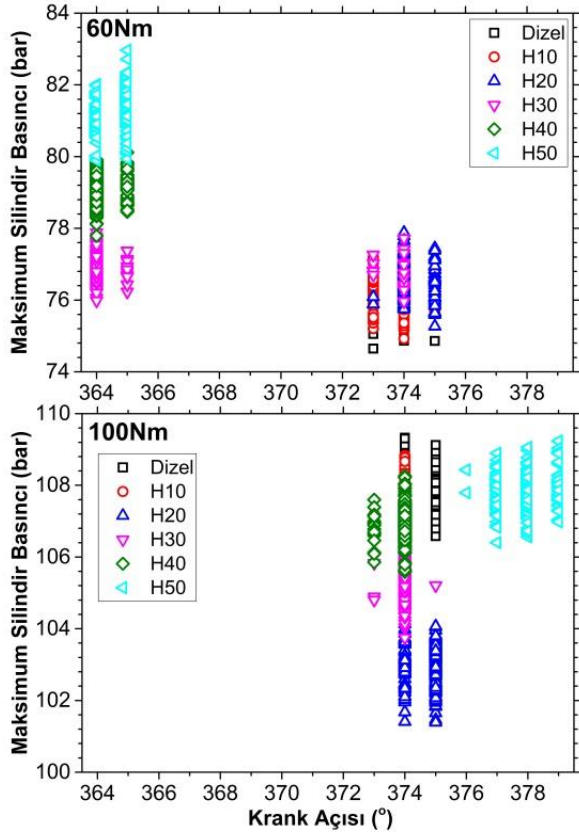
anlamına gelmektedir. Aynı zamanda, oluşacak yüksek basınç artış oranlarından dolayı vuruntu olacağı açıktır. Bu durum, motor çalışmasını ve dolayısıyla araç sürüş konforunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Çevrimden çevrime değişimlerin incelenmesinde kullanılan diğer önemli göstergeler maksimum silindir basıncı-krank açısı ve maksimum silindir basıncı-çevrim sayısı değişimleridir. Farklı yüklerde dizel ve hidrojen-dizel yakıtlı çalışmalar için maksimum silindir basıncı-krank açısı değişimleri Şekil 4’de, maksimum silindir basıncı-çevrim sayısı Şekil 5’de gösterilmektedir. Test motoru düşük torkta çalışırken, normal dizel, H10 ve H20 yakıtları için maksimum silindir basınçları ÜÖN’den sonra 13-15° krank açısı (KA) aralığında oluşmakta iken hidrojen oranı artışıyla birlikte maksimum silindir basınçlarının 8-11°KA daha erken (364-365°KA aralığından) oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda, 200 çevrim boyunca, artan hidrojen miktarıyla maksimum silindir basınç değerlerinin arttığı Şekil 4 ve Şekil 5’de açıkça gösterilmektedir.

Literatürde, Seelam ve diğerleri ortak hatlı bir dizel motorda artan hidrojen oranıyla birlikte silindir basıncının düzenli şekilde arttığını göstermişlerdir [13]. Ancak, Santoso ve diğerleri tarafından yapılan çalışmaya göre maksimum silindir basıncı düşük yükte artan hidrojen miktarıyla birlikte azalmıştır. Ayrıca, düşük yükte çalışmada hidrojen ilavesi sonucu çevrimden çevrime maksimum basınç dalgalanmalarının dizel çalışmasıyla kıyaslandığında önemli oranda arttığını göstermişlerdir [14]. Sabit motor torkunda, hidrojen oranı artarken dizel yakıt miktarı azalmaktadır. Artan hidrojen miktarıyla ön karışım yanma prosesinde alev daha hızlı ilerler. Daha fazla miktarda hidrojen ve daha az miktarda dizel yakıt, ana püskürtme safhasından önce yakılır. Bu durumda, artan hidrojen oranıyla daha erken maksimum basınçlar gözlemlenir. Silindir hacminin daha küçük olması ve hidrojenin yüksek alev sıcaklığı, silindir basıncının daha fazla yükselmesine neden olmaktadır. Ana püskürtme ile maksimum basınç değeri daha çok artar [15].

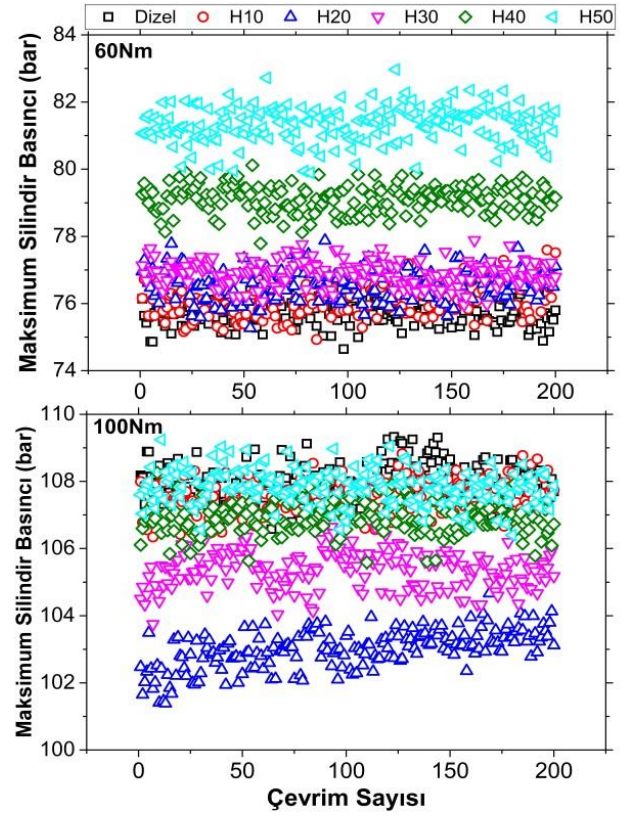


Şekil 3. Farklı hidrojen akış oranlarında silindir basıncının ÇDK ve standart sapma değişimleri



Şekil 4. Farklı hidrojen akış oranlarında maksimum silindir basınç-krank açısı değişimleri

Diğer taraftan, artan yükte birlikte maksimum silindir basınçlarının geciktiği görülmektedir. 100 Nm'de yakıtların maksimum silindir basınçları 373-379°KA aralığındadır. Yük artışı, ana safhada püskürtülen dizel yakıt miktarını artırmakta ve muhtemelen oluşan oksijen yetersizliğinden dolayı karışımın yanma fazını geciktirmektedir. Ayrıca, artan hidrojen ilavesiyle birlikte hiçbir çevrimde homojen karışımın kendi kendine tutuşma olayı gözlenmemektedir. Zhou ve diğerleri, bir dizel motorda yaptıkları deneysel çalışmada yüksek yükte hidrojen ilavesiyle birlikte bazı çevrimlerde kendi kendine tutuşma olayıyla karşılaşmışlardır [16]. Bu durum çok yüksek silindir basınç değerleri oluşturmakla birlikte vurutuya yol açmaktadır. Benzer bir durum, Gupta ve Mittal tarafından buji ateşlemeli bir motorda biyometan kullanımıyla yapılan çalışmada ortaya konmuştur [17].



Şekil 5. Farklı hidrojen akış oranlarında 200 çevrim boyunca maksimum silindir basınç değişimleri

60 Nm'de maksimum silindir basıncı H50 ile 365°KA'da 82,97 bar elde edilirken, 100 Nm'de normal dizel çalışması ile 374°KA'da 109,32 bar elde edilmiştir. Ayrıca, 100 Nm'de H50 yakıtıyla maksimum silindir basınç değerleri diğer yakıtlardan daha geç krank açıları (376-379°KA) oluşmuştur. Artan hidrojen ilavesiyle birlikte emme havası azalmaktadır. Bunun yanında, artan yükte birlikte pilot dizel miktarındaki artış karışımı aşırı derecede zengin yapmıştır. Oluşan bu zengin karışım kısmen eksik yanmanın oluşmasına ve maksimum basıncın gecikmesine neden olmaktadır. Ayrıca, Şekil 2'de H50 ile oluşan çevrimsel değişimlerin kaynakları arasında düşünülmektedir.

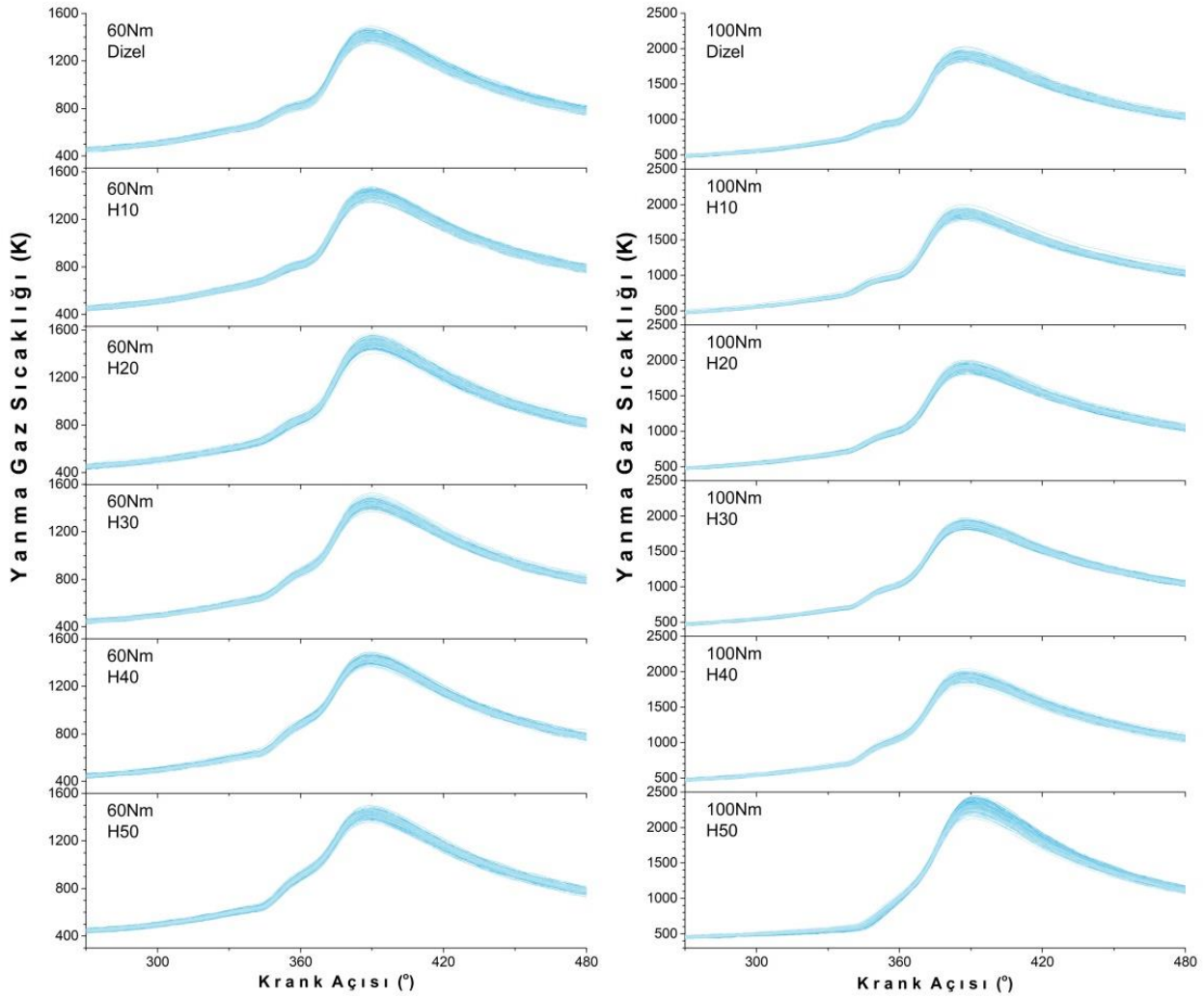
3.2. Çevrimsel Yanma Gaz Sıcaklığı Değişimi

200 çevrim boyunca krank açısına göre yanma gaz sıcaklığı değişimleri farklı yüklerde Şekil 6'da sunulmuştur. Düşük motor torkunda normal dizel ve hidrojen-dizel yakıtlı çalışmalar için yanma gaz sıcaklıkları 1400-1500 K civarında değiştiği görülmektedir. Artan yükte birlikte yanma gaz sıcaklıkları 2000 K üstüne çıkmıştır. Şekil 7'de maksimum yanma gaz sıcaklığı-krank açısı ve Şekil 8'de 200 çevrim boyunca meydana gelen maksimum yanma gaz sıcaklığı değişimleri

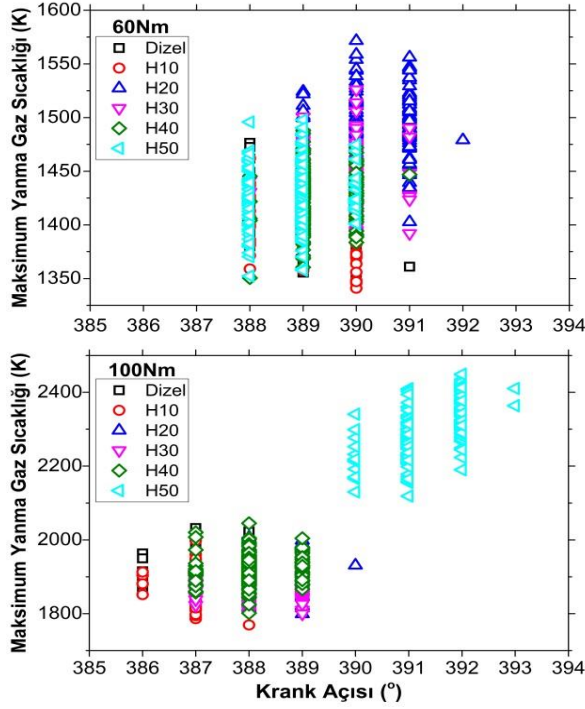
gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde, düşük motor torkunda maksimum sıcaklıkların ÜÖN'den sonra 28-32°KA aralığında, yüksek motor torkunda ise maksimum sıcaklıkların 26-33°KA aralığında olduğu görülmektedir. Artan yükte birlikte maksimum sıcaklıkların olduğu KA aralığı genişlemektedir. Bunda H50 çalışma durumunun etkisi açıkça görülmektedir. Benzer durum daha önce belirtildiği gibi silindir basıncı için gerçekleşmiştir. Düşük motor torkunda H20 ile en yüksek sıcaklıkların, H10 ile en düşük sıcaklığın ÜÖN'den sonra 30°KA'da olduğu görülmektedir. Yüksek motor torkunda H50 ile en yüksek sıcaklıkların 392°KA'da, H10 ile en

Hidrojen Kullanılan Ortak Hat Yakıt Püskürtme Sistemli Bir Dizel Motorda Çevrimsel Yanma Değişimlerinin Araştırılması düşük maksimum sıcaklığın 388°KA'da olduğu görülmektedir.

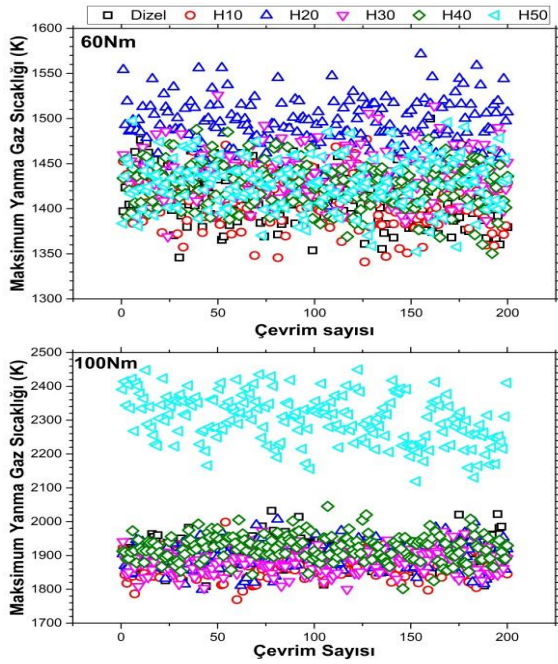
Ayrıca, Şekil 7 ve Şekil 8'den tüm yakıtlar için maksimum sıcaklıkların düşük torkta 1340-1571 K aralığında, yüksek torkta iken 1760-2449 K aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Yüksek torkta, H50 çalışmasının yüksek sıcaklıkların oluşmasında daha etkili olduğu açıktır. Normal dizel ve H10'dan H40'a kadar olan çalışmalarda yaklaşık 1800-2000 K arasında benzer maksimum sıcaklıkların olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Farklı hidrojen akış oranlarında çevrimsel yanma gaz sıcaklığı değişimleri



Şekil 7. Farklı hidrojen akış oranlarında maksimum gaz sıcaklığı-krank açısı değişimleri



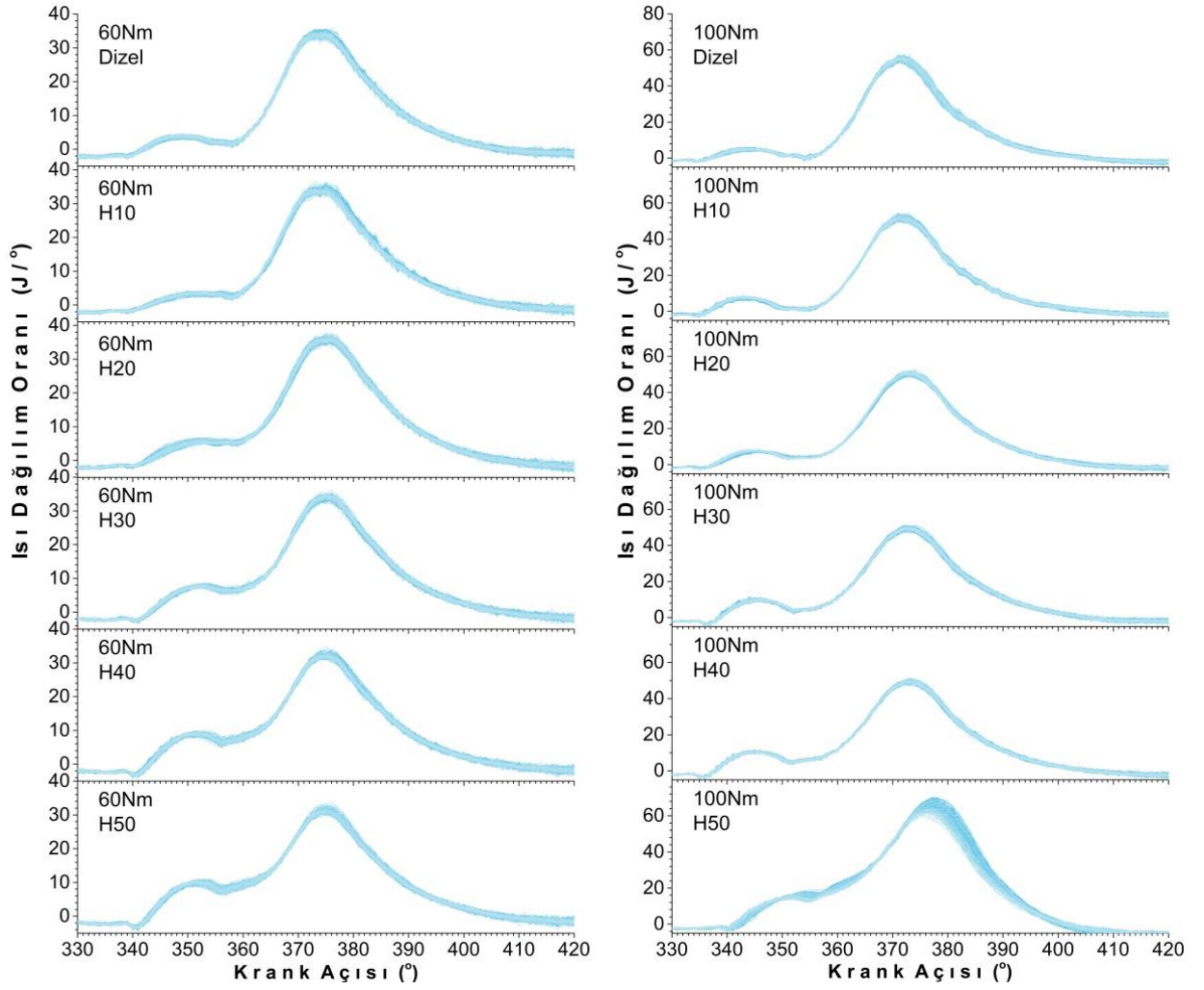
Şekil 8. Farklı hidrojen akış oranlarında ve yükler altında 200 çevrim boyunca maksimum gaz sıcaklığı değişimleri

3.3. Çevrimsel Isı Dağılım Oranı Değişimi

Isı dağılım oranı (IDO), önemli yanma bulgularından biridir. Çift yakıt çalışma

durumlarında, hidrojen varlığı normal dizel yanma fazını etkilemektedir. Sıkıştırma sonuna doğru püskürtülen dizel yakıt, ön püskürtme safhasında kendiliğinden tutuşmakta ve oluşan alev çekirdeği hava-hidrojen karışımını tutuşturmaktadır. Püskürtme esnasında, bir miktar hidrojen gazı dizel yakıtı nüfuz etmektedir. Yanmayla birlikte IDO eğrisinde bir miktar yükselme gözlenmektedir. Yanmakta olan hava-hidrojen karışımına ana püskürtme safhasıyla birlikte daha fazla miktarda pilot dizel yakıt püskürtülür. Ana püskürtme safhasında, yine dizel yakıt içerisine hidrojen gazı nüfuz etmektedir. Hızla tutuşan dizel yakıtla birlikte karışımın kimyasal enerjisi artmakta ve IDO maksimum değerine ulaşmaktadır. Yanma işleminde, dizel yakıt ve hava-hidrojen karışımının önemli bir kısmı yanmaktadır [18]. Genişleme periyodunda, azalan yakıt miktarı ve artan hacimle birlikte IDO eğrisinde azalma meydana gelmektedir. Yanma sonunda, arta kalan yakıt karışımı kısmen egzoz yoluyla atılmakta veya bir sonraki çevrime katılmaktadır.

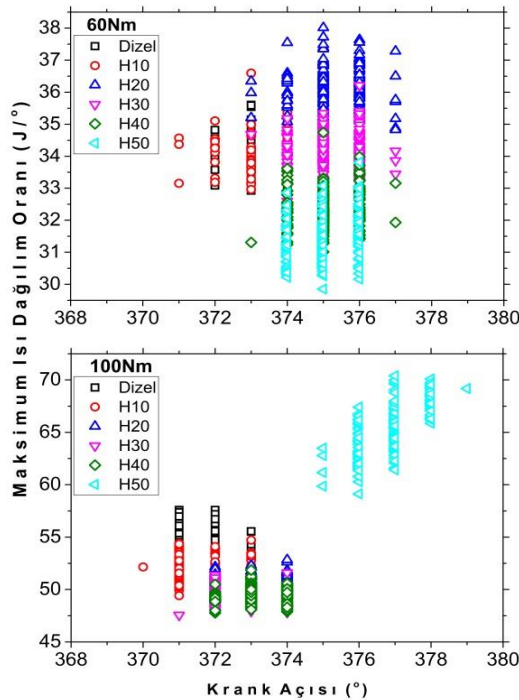
Şekil 9'da, farklı tork ve hidrojen akış oranlarında 200 çevrimde meydana gelen IDO değişimleri gösterilmektedir. Çevrimden çevrime IDO eğrilerinde değişim olduğu açıktır. Her iki motor torkunda, artan hidrojen oranıyla IDO eğrisindeki ön karışım safhasında oluşan pik değer artış göstermiştir. Sabit yükte, artan hidrojen oranıyla birlikte karışımın enerjisi artmaktadır. Ayrıca, 100 Nm'de dizel ve H10'dan H40'a kadar olan çalışmalarda IDO eğrilerinde oluşan çevrimsel değişimlerin 60 Nm'de oluşanlardan daha az olduğu görülmektedir. Yüksek torkta H50 ile IDO eğrilerindeki belirgin dalgalanma, yanma safhasında çevrimler arasında önemli farklılıkların olduğunu göstermektedir.



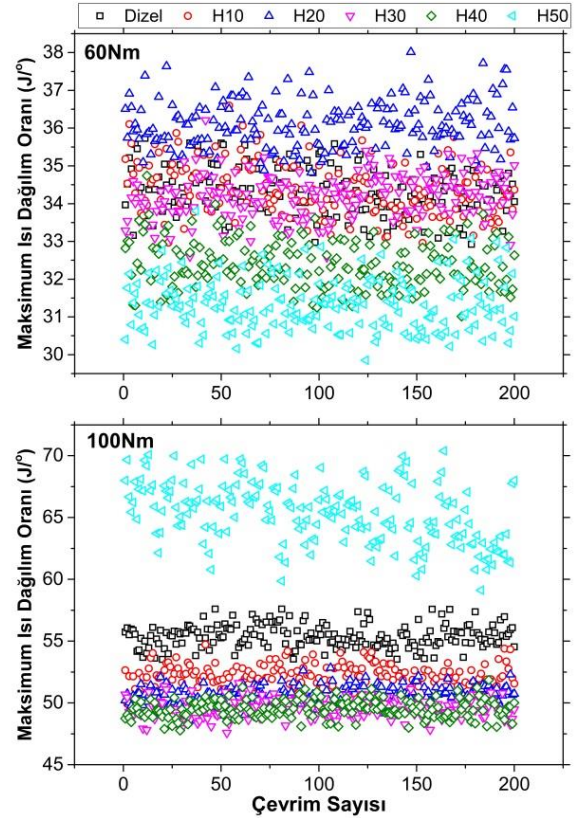
Şekil 9. Farklı hidrojen akış oranlarında ve farklı yüklerde çevrimsel ısı dağılım oranı değişimleri

Maksimum IDO değerleri ve meydana geldikleri krank açıları Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 10'da tüm hidrojen ilave oranları için düşük yükte, maksimum IDO değerlerinin 371-377°KA aralığında değiştiği görülmektedir. 60 Nm'de maksimum IDO, H20 ile 373-377° KA aralığında meydana gelirken, en düşük IDO değerlerinin H50 ile 374-376°KA aralığında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, 60 Nm'de en düşük ve en yüksek IDO değerleri 375°KA'da meydana gelmiştir. Artan yükte birlikte maksimum IDO değerlerinin olduğu krank açısı aralığı genişlemiştir (370-379°KA). 100 Nm'de maksimum IDO değerleri H50 ile önemli oranda artmıştır. En yüksek IDO değeri 377°KA'da, minimum IDO değeri H30 ile 371°KA'da meydana gelmiştir.

Şekil 11'de 200 çevrim boyunca maksimum IDO değerlerinde meydana gelen değişim gösterilmektedir. 60 Nm'de dizel, H10, H20 ve H30 çalışmalarında maksimum IDO değerleri H40 ve H50 ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Dizel çalışmasından H40 ve H50 çalışmalarına geçildiğinde maksimum IDO değerleri kademeli olarak azalmıştır. 100 Nm'de 200 çevrim boyunca H10-H40 yakıtlarıyla elde edilen IDO değerlerinin normal dizelden daha az, H50 için ise daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Aşırı hidrojen ilavesinde, yanma esnasında oluşan aşırı gaz sıcaklığı ve basınç artış oranlarından dolayı IDO değerlerinin yükseldiği düşünülmektedir.

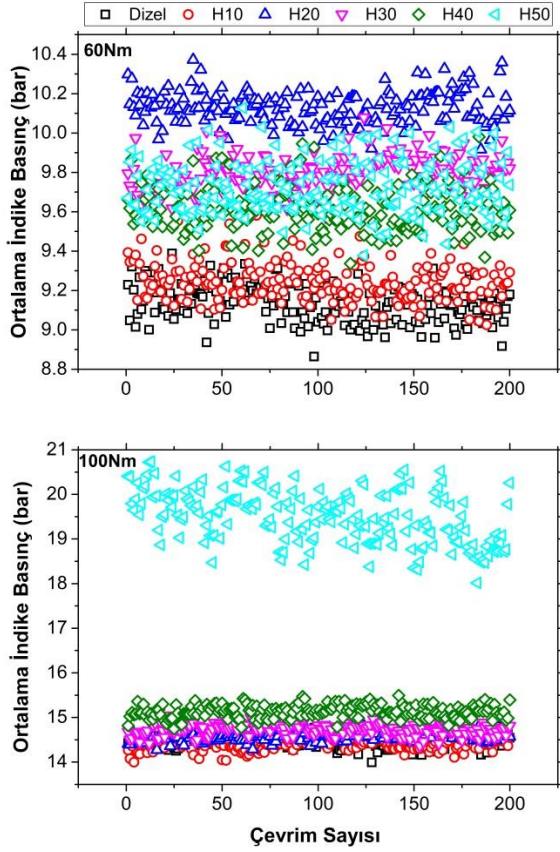


Şekil 10. Farklı hidrojen akış oranlarında ve yükler altında maksimum ısı dağılım oranı-krank açısı değişimleri



Şekil 11. Farklı hidrojen akış oranlarında ve yükler altında 200 çevrim boyunca maksimum ısı dağılım oranı değişimleri

Şekil 12'de 200 çevrim boyunca OİB'de meydana gelen değişimler görülmektedir. 60 Nm'de dizel yakıtta hidrojen eklenmesiyle OİB'de artış meydana gelmektedir. Dizel çalışmasına göre en yüksek OİB artışı H20 ile meydana gelmiştir. 100 Nm'de dizel ve H10'dan H40'a kadar olan çalışmalarda OİB değerlerindeki değişim benzer olup 14-15,5 bar arasındadır. Ancak, H50 çalışması ile OİB'de önemli oranda artış gözlenmiştir ve değerler 18-21 bar seviyelerine çıkmıştır. Düşük ve yüksek yüklerdeki OİB'de meydana gelen değişimlerin, ortalama yanma gaz sıcaklığında meydana gelen değişimlere benzer olduğu gözlenmiştir. Çevrimden çevrime meydana gelen bu farklılıkların yakıt püskürtme sistemindeki değişimlerden, tutuşma gecikmesindeki değişimlerden ve önceki çevrimden kalan artık gaz miktarının etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir [7-12, 19].

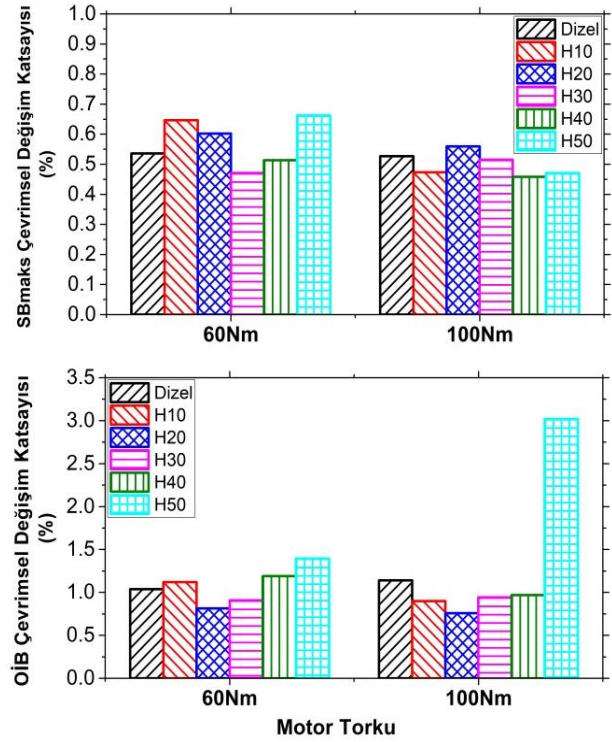


Şekil 12. Farklı hidrojen akış oranlarında ve yükler altında 200 çevrim boyunca OİB değişimleri

Farklı oranlarda hidrojen ilavesi için her iki motor torkunda, maksimum basınç ve ortalama indike basınç (OİB) için ÇDK değerleri Şekil 13’de verilmektedir. Her iki ÇDK sonucunun maksimum değerlerin % 3’den az olması daha iyi bir yanmanın ve daha düzenli motor çalışmasının göstergesidir. Grafikte, tüm yakıtlar için her iki motor torkunda silindir basıncının ÇDK değerleri % 1’in altında olduğu görülmektedir. Normal dizel çalışmasındaki silindir basıncı ÇDK değerleri ile kıyaslandığında, düşük torkta H30 ve H40 yakıtları ile daha düşük değerlerde elde edilirken, yüksek torkta H10, H40 ve H50 ile dizelden daha az silindir basınç ÇDK değerleri elde edilmiştir.

Çevrimsel değişimlerin analizinde silindir basınç değerlerinden ziyade daha genel bir kabul olan OİB değerleri esas alınmaktadır. 100 Nm’de H50 hariç diğer tüm yakıtlarla % 1,5’in altında değerler elde edilmiştir. 100 Nm’de H50 çalışmasıyla en yüksek OİB ÇDK değeri (% 3) bulunmuştur. Bu değer, H50 yakıtı ile motorun 100 Nm’de nispeten daha düzensiz çalıştığını anlamına gelmektedir [8]. OİB için yanma kararlılığı göz önüne alındığında, H20 çalışmasının en ideal çalışma durumu olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen OİB ve maksimum silindir basıncı ÇDK değerleri Nag ve diğerleri tarafından yapılan

çalışmadaki sonuçlarla oldukça uyumludur [20]. Zhou ve diğerleri, düşük devirde ve düşük yükte çalışmada OİB ÇDK değerlerinin hidrojen ilavesiyle birlikte arttığını ve bu değerlerin % 5,5-8 aralığında değiştiğini göstermişlerdir. Daha yüksek devir ve daha yüksek yüklerde OİB ÇDK değerleri tüm hidrojen oranları ve standart dizel çalışmaları için azalmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi artan yüklerle birlikte meydana gelen ön tutuşma sonucu OİB ÇDK değerleri % 91,8 oranında artmıştır [16].



Şekil 13. Farklı hidrojen akış oranlarında ve yükler altında silindir basıncı ve ortalama indike basınç için çevrimsel değişim katsayısı değişimleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada, dört silindirli, turboşarjlı, ön püskürtme ve ana püskürtme safhasına sahip ortak hatlı bir dizel motorda emme havasına değişik oranlarda hidrojen ilavesinin çevrimsel yanma değişimleri incelenmiştir. Motor sabit devirde ve iki farklı yükte test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

Faarklı oranlarda hidrojen ilavesi 100 Nm’de silindir basınç dalgalanmasını azaltmıştır. Ancak, oldukça yüksek oranda hidrojen kullanıldığında silindir basınç dalgalanması artmıştır. Hidrojen karışımlarıyla çalışmada, krank açısına göre silindir basıncının standart sapma ve ÇDK değerleri fark edilebilir derecede artmıştır.

Maksimum silindir basınç değerleri ÜÖN'den sonra 4-15°KA aralığında meydana gelmiştir. Artan hidrojen oranı, maksimum silindir basınçlarının daha erken oluşmasına sebep olmuştur.

Ortalama gaz sıcaklığındaki dalgalanmaların silindir basıncından daha fazla olduğu bulunmuştur. 60 Nm yükte en yüksek gaz sıcaklıkları H20 ile 100 Nm yükte ise H50 ile elde edilmiştir. Farklı hidrojen oranlarında, maksimum gaz sıcaklığının meydana geldiği krank açısı aralığı artan torkla birlikte artmıştır. Farklı hidrojen oranlarında, maksimum gaz sıcaklıkları 60 Nm'de ÜÖN'den sonra 28-32°KA aralığında ve 1340-1571 K değerleri arasında oluşurken 100 Nm'de 26-33°KA aralığında ve 1760-2449 K değerleri arasında oluşmuştur. Dizel çalışmasıyla kıyasladığımızda, hidrojen kullanımı maksimum yanma gaz sıcaklıklarının daha geç oluşmasına neden olmaktadır.

IDO'nun krank açısına göre dalgalanması silindir basıncına benzer şekilde gerçekleşmiştir. 60 Nm'de en düşük IDO H50 ile ve en yüksek IDO H20 ile edilmiştir. 100 Nm'de en düşük IDO H30 ile en yüksek IDO H50 ile edilmiştir. Maksimum IDO için krank açıları 60 Nm'de ÜÖN'den sonra 11-17°KA aralığında 100 Nm'de 10-19°KA aralığında meydana gelmiştir.

Çevrimden çevrime OİB'de meydana gelen değişimler ortalama gaz sıcaklığında meydana gelen değişimlere benzemektedir. H50 ile yüksek yükte önemli OİB artışı meydana gelmiştir. OİB için ÇDK H50 haricinde tüm yakıtlar için ideal değer aralığında (% 0,7-1,4) bulunmuştur. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, her iki motor torkunda dizel ve H10'dan H40'a kadar olan hidrojen-dizel çift yakıt çalışmalarında ortak-hatlı dizel motor çevrimsel değişimler açısından stabil çalışmaktadır. Her iki yükte, OİB için en düşük ÇDK değeri H20 çalışmasıyla elde edilmiştir.

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma, 8-11 Eylül tarihlerinde Aydın Adnan Menderes Üniversitesi'nde düzenlenen 16. uluslararası yanma sempozyumunda sunulmuştur.

REFERANSLAR

[1] V. Chintala and K.A. Subramanian, "A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine

under dual fuel mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.70, pp. 472-491, 2017.

- [2] M. Akçay, İ.T. Yılmaz, A. Feyzioğlu, ve S. Özer, "Sıkıştırma ile ateşlemeli bir motora hidrojen ilavesinin egzoz emisyonlarına etkisi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Sayı. 34(3), ss. 21-34, 2019.
- [3] J. Kim, K.M. Chun, S. Song, H.K. Baek, and S. W. Lee, "Hydrogen effects on the combustion stability, performance and emissions of a turbo gasoline direct injection engine in various air/fuel ratios," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1353-1361, 2018.
- [4] İ. T. Yılmaz, "The effect of hydrogen on the thermal efficiency and combustion process of the low compression ratio CI engine," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 197, 117381, 2021.
- [5] L.M. Das, "Fuel induction techniques for a hydrogen operated engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 15 no.11, pp. 833-842, 1990.
- [6] M.S. Kumar, "Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, 1143-1154, 2003.
- [7] P. Kyrtatos, C. Brückner, and K. Boulouchos, Cycle-to-cycle variations in diesel engines, *Applied Energy*, vol. 171, pp. 120-132, 2016.
- [8] M.Y.E. Selim, "Effect of engine parameters and gaseous fuel type on the cyclic variability of dual fuel engines," *Fuel*, vol. 84 no7-8, pp. 961-71, 2005.
- [9] Y. Wang, F. Xiao, Y. Zhao, D. Li, and X. Lei, "Study on cycle-by-cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel," *Applied Energy*, vol. 143, pp. 58-70, 2015.
- [10] M.A. Ceviz and F. Yüksel, "Effects of ethanol-unleaded gasoline blends on cyclic variability and emissions in an SI engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 917-925, 2005.

- [11] Q. Wang, B. Wang, C. Yao, M. Liu, T. Wu, H. Wei, and Z. Dou, "Study on cyclic variability of dual fuel combustion in a methanol fumigated diesel engine," *Fuel*, vol. 164, pp. 99-106, 2016.
- [12] Z. Wang, X. Fu, D. Wang, Y. Xu, G. Du, and J. You, "A multilevel study on the influence of natural gas substitution rate on combustion mode and cyclic variation in a diesel/natural gas dual fuel engine," *Fuel*, vol. 294, 120499, 2021.
- [13] N. Saleem, S.K. Gugulothu, R.V. Reddy, B. Bhasker, and J.K. Panda, "Exploration of engine characteristics in a CRDI diesel engine enriched with hydrogen in dual fuel mode using toroidal combustion chamber," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no.26, pp. 13157-13167, 2022.
- [14] W.B. Santoso, R.A. Bakar, S. Ariyono, and N. Cholis, "Study of cyclic variability in diesel-hydrogen dual fuel engine combustion," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 12, no.4, pp. 52-56, 2012.
- [15] G.K. Lilik, H. Zhang, J. M. Herreros, D.C. Haworth, and A.L. Boehman, "Hydrogen assisted diesel combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no.9, pp. 4382-4398, 2010.
- [16] J.H. Zhou, C.S. Cheung, W.Z. Zhao, and C.W. Leung, "Diesel-hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds," *Energy*, vol.94, pp. 110-123, 2016.
- [17] S.K. Gupta and M. Mittal, "Effect of compression ratio on the performance and emission characteristics, and cycle-to-cycle combustion variations of a spark-ignition engine fuelled with bio-methane surrogate," *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1440-1453, 2019.
- [18] T. Tsujimura and Y. Suzuki, "The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no.19, pp. 14019-14029, 2017.
- [19] G.X. Li and B.F. Yao. Nonlinear dynamics of cycle-to-cycle combustion variations in a lean-burn natural gas engine. *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 611-620, 2008.
- [20] S. Nag, A. Dhar, and A. Gupta. "Hydrogen-diesel co-combustion characteristics, vibro-acoustics and regulated emissions in EGR assisted dual fuel engine," *Fuel*, vol. 307, 121925, 2022.