



KISMİ YÜK ŞARTLARINDA HİDROJENCE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ DIESEL YANMASININ MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Tarkan SANDALCI* ve Yasin KARAGÖZ*

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı
34349 Beşiktaş, İstanbul, sandalci@yildiz.edu.tr

(Geliş Tarihi: 21.07.2014, Kabul Tarihi: 30.05.2015)

Özet: Diesel motorlar gelecek yıllarda da kullanılacak olmakla beraber, günlük hayatın vazgeçilmez parçasıdır. Ancak, giderek azaltılan emisyon regülasyonları sınır değerleri ve buna paralel olarak ileri teknoloji ürünü yanma sonrası iyileştirici ekipmanlarına ihtiyaç duyulması sonucu meydana gelen maliyet artışları, ayrıca son yıllarda motorin fiyatlarındaki artışlar; araştırmacıları diesel motorlarda kullanılacak alternatif yakıt arayışına zorlamaktadır. Bu çalışmada, gaz fazındaki hidrojen emme portundan bir gaz enjektörü ile püskürtülürken, tutuşma diesel enjektöründen püskürtülen motorin ile sağlanmıştır. Gönderilen hidrojenin enerji içeriği, toplam yakıtın %25'ini oluşturacak şekilde sabitlenmiş ve yapılan tüm testler 1300 d/d sabit motor hızında yapılmıştır. Kısmi yüklerde (%37, %47 ve %65) dolgunun hidrojen zenginleştirilmesinin, diesel motorun motor performansı, emisyonlar ve yanma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla kısmi yük şartında hidrojen zengin şartta hem NO_x emisyonları, hem de is emisyonlarının kontrol altına alınabileceği görülmüştür. Hidrojen zengin şartta, THC emisyonlarında bir miktar artış meydana gelmesine rağmen, CO₂ ve CO emisyonlarında iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, pik silindir gaz basıncı ve pik ısı açığa çıkış oranında hidrojen zengin şartta artış meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Diesel motor, İS, NO_x, Isı yayma oranı

EFFECT OF HYDROGEN ENRICHED DIESEL COMBUSTION ON EMISSIONS AND ENGINE PERFORMANCE AT PARTIAL LOAD CONDITIONS

Abstract: Diesel engines will be used in the following years and they are indispensable in daily life. However, stringent emission regulations force automotive manufacturers to use higher technology after-treatment devices and this causes an increase on total price of diesel engines. Also, the increase on diesel fuel prices in recent years is considered together, the researchers try to find a new fuel for diesel engines. In this study, hydrogen was introduced into intake manifold using gas injector and pilot diesel fuel was injected using diesel injectors to ignite mixture. Hydrogen energy was kept constant as 25% of total fuel and all tests were conducted at 1300 rpm constant engine speed. The effect of hydrogen addition on engine performance emissions and combustion characteristics at part loads (37%, 47% and 65%) were investigated. NO_x and smoke emissions can be reduced with hydrogen addition. However, THC emission increased with hydrogen addition, CO₂ and CO emissions were improved. Furthermore, peak in-cylinder gas pressure and peak heat release rate values were increased with hydrogen addition.

Keywords: Hydrogen, Diesel engine, Smoke, NO_x, Rate of heat release

GİRİŞ

Günümüzde enerji talebi artışına bağlı olarak fosil yakıtların hızla tükenmesi, petrol türevi yakıtlarda fiyat artışlarına neden olurken, enerji verimliliği ve çevresel kaygılara yönelik giderek ağırlaşan emisyon regülasyonlarının baskıcı etkileri, araştırmacıların alternatif yakıt konusundaki arayışlarına hız kazandırmıştır (Durat vd, 2013; Özer vd, 2012; Sayın, 2013). Avrupa Birliği Komisyonu White Paper Report'a göre, 2050 yılında ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonunda 1990 yılına göre %60 düşüş hedeflenmektedir (EEA Report, 2013). 2010 ila 2011 yılları arasında ulaşım sektöründe yenilenebilir enerji tüketimi %3.5'tan %3.8 değerine çıkmasına karşın

belirlenen hedefe ulaşabilmesi için bu oranın en az %4.1 olması gerektiği belirtilmiştir (EEA Report, 2013). Teknolojik gelişmelerle birlikte, regülasyonlardaki emisyon sınırları sürekli olarak düşürülmesine rağmen NO_x ve partikül madde emisyonlarında artış meydana gelmiştir (Köze ve Cinviz, 2013; Liu vd, 2011; Nieminen vd, 2010; Saravanan vd, 2007). 2013 Air quality report in Europe'a göre, 2011 yılında trafik kontrol noktalarından yapılan ölçümlerin %42'sinde NO₂ emisyonu sınır değeri geçmiştir (EEA Report, 2013). 2011 yılında, partikül madde (<=10µm) emisyonları trafik alanlarda %43, şehir içlerinde %38, endüstriyel alanlarda %25, kırsal alanlarda ise %15 olarak belirlenen sınırı aşmıştır (EEA Report, 2013). Meydana gelen NO_x ve özellikle partikül madde artışın

temel nedeni diesel motorlu araç sayısındaki artıştır (Sayın, 2013). Yaşanan bu gelişmelere paralel olarak, otomotiv sektöründeki alternatif çevreci yakıt arayışları sürmektedir (Gürbüz vd, 2013; Sezer ve Bilgin, 2013). Bazı araştırmacılar, LPG, CNG, LNG, biyogaz, etanol vs. alternatif yakıtlara yönelmişlerdir (Gürbüz vd, 2013; Özer vd, 2012; Sezer ve Bilgin, 2013). Hidrojen, karbon atomu içermeyen, yanma sonucunda yalnızca su açığa çıkaran bir alternatif yakıt olarak ön plana çıkmaktadır (Gürbüz vd, 2013; Kosar vd, 2011; Saravanan ve Nagarajan, 2009). Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması, hidrokarbon türevi yakıtlı araçlardan, geleceğin yakıt pilli araçlarına geçiş için bir köprü vazifesi görecektir (Bika vd, 2008). Elektrikli araçlar üzerine de son yıllarda birçok çalışma yapılmasına rağmen, düşük enerji yoğunluğu, yetersiz alt yapı gibi sorunlardan dolayı yaygın olarak kullanım alanı bulamadığından günümüzde ve yakın gelecekte, içten yanmalı motorlara bağımlılık devam edecektir (Miyamoto vd, 2009). Hidrojen, fosil yakıtlardan veya biokütleden dönüşümle, elektrolizle veya direkt termokimyasal solar dönüşümle üretilebilmektedir (Bika vd, 2008; Kosar vd, 2011). Ayrıca, hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği zaman oldukça çevreci ve temiz bir yakıt olmakla beraber, hidrojen elektrik enerjisi gibi enerji taşıyıcı (ikincil enerji) olarak kullanılabilir (Bose ve Maji, 2009; Saravanan ve Nagarajan, 2008). Bazı araştırmacılar hidrojeni homojen dolgu sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda (HCCI) kullanmalarına rağmen, tutuşma başlangıcını kontrol etmekteki zorluklardan ve dar çalışma aralıklarından dolayı yakın gelecekte ticari olarak kullanılmaları mümkün görülmemektedir (Gome-Antunes vd, 2008; Szwaja ve Grab-Rugalinski, 2009).

Araştırmacıların büyük bir çoğunluğu, hidrojenin Otto motorlarda kullanılmasına yönelik araştırma yapmışlardır (Gürbüz vd, 2013; Kosar vd, 2011). Hidrojenin Otto motorlarında kullanılması ile ilgili yapılan bu çalışmalarda %30'a yakın güç düşüklüğü ile beraber, erken ateşleme, alev tepmesi ve vuruntu gibi pek çok yanma problemi ile karşılaşmıştır (Saravanan ve Nagarajan, 2009).

Diesel motorlar, yüksek termik verim ve düşük özgül CO₂ emisyonu gibi avantajlarına rağmen, yüksek miktarda NO_x ve is emisyonlarından dolayı dezavantaja sahiptirler (Heywood, 1988; Miyamoto vd, 2011; Sayın, 2013). Diesel araçlardan kaynaklanan NO_x, partikül madde ve is emisyonlarının regülasyonlara uygun sınırlara çekilmesinde yanma sonrası iyileştirme sistemlerinden (Katalizör, SCR, LNT, DPF vs.) yararlanılmakla birlikte, bu sistemler maliyetleri arttırmaktadır. Hidrojenin diesel motorlarda çift yakıt olarak kullanılması söz konusu emisyonları kontrol altına almak için alternatif olabilir (Bika vd, 2008). Hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığından dolayı (576°C), doğrudan diesel motorlarda yakıt olarak kullanılmaları mümkün değildir (Bose ve Maji, 2009).

Bu yüzden, tutuşmayı sağlayacak enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar (Gomes-Antunes, 2009). Ikegami ve diğerleri (Ikegami, 1982) çalışmalarında kızdırma bujili özel gaz enjektörü kullanarak hidrojenin tutuşmasını sağlarken, Antunes ve diğerleri (Gomes-Antunes, 2009) emme havasını ısıtarak tutuşmayı sağlamışlardır.

Emme portuna enjektörle hidrojen püskürtme, direkt silindir içerisine hidrojen püskürtme veya sürekli olarak emme manifoldundan hidrojen gönderme ve pilot diesel püskürtme ile tutuşmanın gerçekleştirilmesi yöntemlerine literatürde sıkça rastlanılmaktadır (Christodoulou ve Megaritis, 2013; Pan vd, 2014; Wu H.W. ve Wu Z.Y., 2012). Sürekli olarak emme manifoldundan hidrojen gönderilmesinde, erken-ateşleme, vuruntu ve emme manifoldunda alev tepmesi gibi sorunlar ile karşılaşmaktadır. Emme portuna enjektörle hidrojen püskürtülmesi veya sürekli olarak emme manifolduna hidrojen gönderilmesi yöntemlerinde ise, gönderilen hidrojen emme strokunda silindir içerisine alınan hava ile yer değiştirdiği ve volümetrik verimi düşürdüğü için, motor gücünde bir miktar düşüşe neden olabilir (Köse ve Cinviz, 2013). Direkt silindir içerisine hidrojen püskürtme yönteminde ise, ticari olarak kullanımı yaygın olmayan, yüksek sıcaklığa dayanıklı, özel yüksek basınçlı hidrojen enjektörleri kullanmak gereklidir. Ayrıca, motorda bir takım modifikasyonlar yapmak, yüksek basınçlı hidrojen enjektörünü silindir kafasına yerleştirmek gerekmektedir. Bu durum direkt silindir içerisine hidrojen püskürtme yönteminin ticari olarak kullanımında önemli engel teşkil etmektedir. Bu sebepten dolayı, emme portuna enjektörle hidrojen püskürtme ve tutuşmanın motorin ile sağlanması yöntemi, çift yakıtlı (hidrojen+motorin) diesel motorlarda en uygun yöntemdir (Saravanan vd, 2007; Saravanan ve Nagarajan, 2008).

Diesel yakıtlarla karşılaştırıldığında, hidrojen, daha yüksek alev hızına ve daha geniş tutuşabilirlik sınırları dar alev sönme bölgesi ve yüksek difüzyon katsayısı gibi üstün özelliklere sahiptir (Gomes-Antunes vd, 2009; Kosar vd, 2011; Mohammadi vd, 2007). Hidrojenin diesel motorlarda çift yakıt olarak (motorin+hidrojen) kullanılması, daha homojen bir karışım oluşturacağı için partikül madde emisyonlarının iyileştirilmesine katkı sağlar (Liew vd, 2010). Hidrojen karbon atomu içermediği için CO₂, HC ve CO emisyonları da düşer (Gürbüz vd, 2013).

Hornng-Wen Wu ve Zhan-Yi Wu (Wu H.W., Wu Z.Y., 2012), direkt püskürtmeli bir diesel motorda yaptıkları çalışmada, 1800 dev/d sabit motor hızında, emme manifoldundan enerji içeriği olarak toplam yakıtın %0 ila %20'si arasında hidrojen göndermiş ve hacimce %0 ila %40 arasında EGR'yi çeşitli motor gücü şartlarında uygulamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ısı verim artan hidrojen oranı ile artarken, özgül yakıt tüketimi EGR artışı ile bir miktar artmıştır. Ayrıca, HC ve NO_x

emisyonu hidrojen artışı ile artmasına rağmen, NO_x emisyonu EGR ile kontrol altında tutulabilmiştir. İS ve CO emisyonlarında ise düşüş gözlemlenmiştir.

Pan ve diğerleri (Pan vd, 2014), 2 stroklu, aşırı doldurmalı MTU/Detroit 12V-71 TI diesel motorda yaptıkları çalışmada, 0 sL/d, 22 sL/d ve 220 sL/d debilerinde hidrojen göndererek, rölanti ve 4 ayrı yük şartında (%25, %50, %75 ve %100) emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, tüm yük şartlarında, 22 sL/d hidrojen debisinin CO₂ ve NO_x emisyonları üzerindeki etkisi önemsizken, 220 sL/d hidrojen ilavesiyle CO₂ emisyonlarında %1.16 artış, PM 2.5 emisyonlarında %11 düşüş, CO emisyonlarında ise %37 düşüş gözlemlenmiştir.

Bika ve diğerleri (Bika vd, 2008), aşırı doldurmalı, direkt püskürtmeli Volkswagen TDI motorunda, 2 farklı yakıtta (motorin ve soya metil ester biyodizeli), 1700 d/d sabit motor hızında, %20, %40 ve %60 yük şartlarında, %0 ila %40 arasında hidrojen enerji içeriği değişiminin partikül madde ve NO_x emisyonları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, hidrojen ilavesi için, motorin yakıtıyla motorun çalıştırılması durumunda, partikül madde emisyonlarında %10 ila %50 arasında düşüş gözlenirken, NO_x emisyonlarında ise kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

Miyamoto ve diğerleri (Miyamoto, 2009), direkt püskürtmeli tek silindirli bir diesel motorda, hidrojen ilavesinin emisyon ve yanma karakteristiği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, gönderilen hidrojen miktarı hacimce %16'ya kadar arttırılmış, motorinin püskürtülmesi ÜÖN dan sonra yapılmıştır. Bu yöntemle, NO_x emisyonu ve silindir içi basınç artış oranı kontrol altında tutulmuştur. Ayrıca, hidrojen ilavesi ile HC emisyonlarında artış olmazken, NO emisyonları ise düşürülmüştür.

Saravanan ve Nagarajan (Saravanan ve Nagarajan, 2009), tek silindirli, direkt püskürtmeli Kirloskar AV1 marka diesel motorda, hidrojenin karbüratörden gönderilmesi, porttan püskürtülmesi ve manifolddan püskürtülmesi yöntemlerini karşılaştırmışlardır. 1500 dev/d sabit motor hızında, %25, %50, %75 ve %100 yük şartlarında yapılan çalışmada, porta püskürtme ile manifoldda püskürtme arasında kayda değer bir fark gözlenmemiştir. Karbüratörle hidrojen gönderilmesinde, NO_x emisyonu %8 artmış, verim ve is emisyonu sırasıyla %5 ve %8 düşmüştür. Porta hidrojen püskürtmede ise, is emisyonu %18 düşerken, verim ve NO_x emisyonu sırasıyla %17 ve %34 artmıştır.

Literatürdeki bir çok çalışmada diesel motorlarda hidrojen+motorin kullanılmasıyla, CO, CO₂ ve is emisyonlarında düşüş gözlemlenmesine rağmen, özellikle kısmi yüklerde termik verim, özgül yakıt tüketimi, NO_x ve THC emisyonlarında bir görüş birliğine varılamamıştır. Bu yüzden yapılan çalışmada,

gaz enjektörü ile emme portuna hidrojen püskürtme yöntemi ile, 1300 dev/d sabit motor hızı ve toplam yakıt enerjisinin (motorin+hidrojen yakıtı) alt ısıl değer açısından %25'i kadar hidrojen gönderilerek, kısmi yüklerde (%37, %47 ve %65 yük şartı) motor performansı, emisyonlar ve yanma karakteristiği üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Test Motoru ve Yükleme Düzeni

Test motoru, tek silindirli, 4 stroklu, su soğutmalı, doğal emişli, değişken sıkıştırma oranına sahip CFR motorudur. Yapılan çalışmada, motorun sıkıştırma oranı 19:1 olarak ayarlanmıştır. Motor yükleme sistemi, DC motor ve kontrol sisteminden oluşmakta olup, motor torku sistem üzerindeki kuvvet algılayıcı ile ölçülmüştür. Motor ve dinamometre ayrıntıları Tablo 1'de verilmiştir. Motorun emdiği kütleli hava miktarı sistem üzerindeki eğik manometre ve orifis verileriyle hesaplanmıştır. Motor tarafından tüketilen motorin miktarı, hem VZ 0.2 model, Sika marka minyatür türbin tipi debimetre ile hem de gravimetrik yöntemle ölçülerek hesaplanmıştır. Motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile egzoz gaz sıcaklığı K-tipi termokupl ile ölçülmüştür. Şekil 1'de deney setinin şematik gösterimi detaylı olarak verilmiştir. Hidrojen tüketimi ise, New-Flow marka, TLF 23 model termal kütleli debimetre ile ölçülmüştür. Kuvvet algılayıcı, motorin tüketimi, hidrojen tüketimi ve emisyon verileri NI USB 6215 tipi veri toplama kartı ile bilgisayarda kayıt altına alınmıştır.

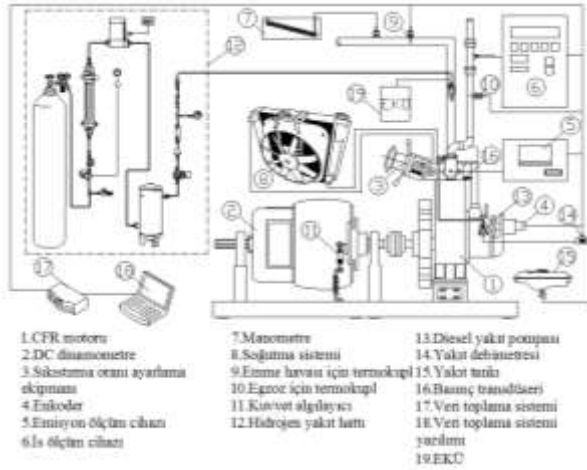
Tablo 1. Motor ve dinamometre özellikleri

Motor üretici firma	Ferryman,4-strok CFR motoru
Emme	Doğal emişli
Silindir sayısı	1
Çap x strok [mm]	90 x 120
Silindir hacmi [cm ³]	799
Sıkıştırma hacmi	19 (bu çalışmada seçilen değer)
Süpürme hacmi [cm ³]	765
Hız aralığı min-max [d/d]	600 – 2000
Emme & egzoz subabı sayısı	1 & 1
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Dinamometre tipi & gücü [kW]	DC & 7.5

Hidrojen Yakıt Sistemi

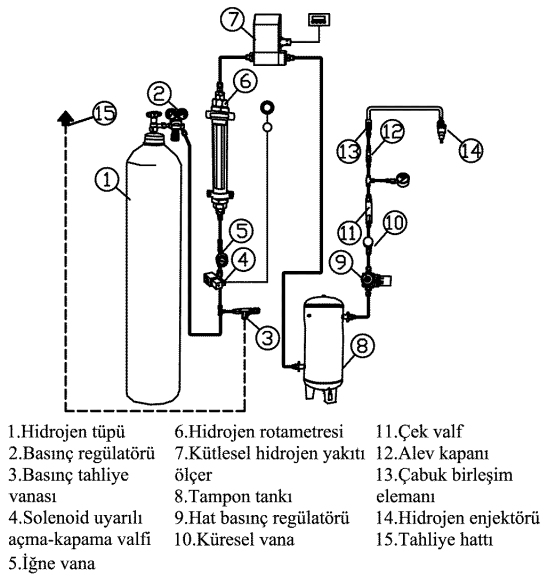
Hidrojen besleme hattının şematik şekli Şekil 2'de verilmiştir. Yüksek basınçlı tüplerde 200 bar basınçta depolanmış olan hidrojen, çift kademeli bir basınç regülatörü ile 4 bar basınç değerine düşürülmüş, gaz enjektörleri ile motora gönderilmeden önce 1 adet çek valf ve 1 adet alev kapanı kullanılmıştır. Böylece, motorda meydana gelebilecek bir alev tepmesine karşı önlem alınmıştır. Ayrıca, hidrojen hattında, bir adet

emniyet valfi yerleştirilmiş ve hattın basıncı 10 bar'ın üstüne çıkması durumunda, tahliye hattı vasıtası ile, hidrojenin laboratuvar dışarısına atılması sağlanmıştır. Bir hat basınç regülatörü vasıtası ile hattın basıncı hassas olarak 4 bar değerinde sabitlenmiştir.



Şekil 1. Deney setinin şematik görüntüsü.

Bir tampon tankı yardımıyla hidrojen akışındaki dalgalanmalar engellenerek termal kütleli debimetre ile hidrojen debisinin hassas ölçümü sağlanmıştır. Ayrıca, ölçüm değerlerinin doğrulanması açısından motorin tüketiminin ölçümünde olduğu gibi termal kütleli debimetrenin yanısıra hidrojen için 4 bar basınç değeri ve 20°C ortam sıcaklığı için özel olarak imal edilmiş bir rotametre ile de ölçüm yapılmıştır. Hidrojen, motora gönderilmesinde Keihin marka LPG-CNG gaz enjektörü kullanılmıştır. Gaz enjektörü, bu tür çalışmalar için özel olarak tarafımızdan geliştirilmiş mikro denetleyici temelli bir Elektronik Kontrol Ünitesi ile hassas kontrol edilmiş, hidrojen sevk başlangıcı zamanlaması emme stroku başında olacak şekilde programlanmıştır.



Şekil 2. Hidrojen hattının şematik görüntüsü.

Silindir İçi Basınç Değişimi

Silindir içi basıncı Kistler marka 6061B tipi basınç transdüseri ve yükselticisi ile elde edilmiş, veriler 2GS/s örnekleme hızına sahip dijital osiloskop yardımı ile kayıt altına alınmıştır. Piston konumu ve krank açısı ölçümü, krank miline yerleştirilmiş bir artımsal kodlayıcı ile elde edilmiş, silindir basınç verileriyle eş zamanlı olarak osiloskopa kaydedilmiştir. Çalışmada elde edilen silindir içi basınç verileri, çevrimsel farkları azaltmak için 100 çevrimin ortalama değeri alınarak değerlendirilmiştir.

Isı Açığa Çıkış Oranı

Bu çalışmada, tek boyutlu bir ısı açığa çıkış oranı modeli kullanılmıştır. Krieger ve diğerleri (Krieger ve Borman, 1966) tarafından oluşturulan ısı açığa çıkış oranına göre yanma prosesi incelenmiştir.

Egzoz Emisyon Ölçümleri

AVL DiCom 4000 cihazı ile CO, THC, CO₂ ve NO_x emisyonları ölçülürken, AVL 415S ile is emisyonu ölçülmüştür. AVL DiCom 4000 cihazı CO ve CO₂ için % hacim olarak, THC ve NO_x için ppm olarak; AVL 415S ise is emisyonlarını FSN veya mg/m³ olarak vermesine rağmen, yapılan çalışmada tüm emisyon değerleri VDMA Egzoz Emisyon Mevzuatına uygun olarak özgül değerlere g/kWh dönüştürülmüştür.

Deneyel Prosedür

Daha önceden de değinildiği gibi, tüm deneyler tek silindirik, 4 stroklu diesel bir CFR araştırma motorunda yapılmış ve DC dinamometre ile yüklenmiştir. Çalışmada kullanılan hidrojen yakıtı %99.99 saflıkta olup, Linde Grup'tan (İstanbul, Türkiye) temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan motorin ise, EN590 standardına uygun bir yakıttır. Diesel enjektörlerinin püskürtme avansı üst ölü noktadan 22°KA öncedir. Hidrojen püskürtme avansı ise, emme strokunda tam üst ölü noktadadır. Deneyel çalışma noktasının belirlenmesinde, amaç kısmi yüklerde hidrojenin etkisini incelemek olduğu için, ESC çevrimi esas alınmış, C motor hızına karşılık gelen 1300 dev/d sabit motor hızı belirlenerek toplam yakıtın (hidrojen+motorin) enerjisinin %25'i kadar enerji sabit olacak şekilde hidrojen debisi tüm yük koşullarında ayarlanmıştır. %37, %47 ve %65 yük kademesine karşılık gelen 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde, motorin yakıt ile motorin+hidrojen çift yakıtı (%25 hidrojen enerji oranı) karşılaştırılmıştır. Test koşulları hakkında detaylı bilgi Tablo 2'de verilmiştir. Toplam ölçüm belirsizliği Kline ve McClintock yöntemine göre hesaplanmış, Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 2. Test koşulları.

Motor gücü	Motor hızı	H ₂ enerji içeriği	Motorin enerji içeriği	Motorin püskürtme avansı	H ₂ püskürtme avansı
1.4 kW	1300 dev/d	%0	%100	22°	ÜÖN
	1300 dev/d	%25	%75	22°	ÜÖN
1.7 kW	1300 dev/d	%0	%100	22°	ÜÖN
	1300 dev/d	%25	%75	22°	ÜÖN
2.4 kW	1300 dev/d	%0	%100	22°	ÜÖN
	1300 dev/d	%25	%75	22°	ÜÖN

Tablo 3. Doğruluk ve ölçüm belirsizliği.

Ölçülen parametre	Ölçüm cihazı	Doğruluk
Motor torku	Kuvvet algılayıcı	±0.05 Nm
Motor hızı	Artımlı enkoder	±5 dev/d
Motorin debisi	Sika VZ 0.2	±1% (Okunan değer)
Hidrojen debisi	New-Flow TLF 23	±1% (Tüm skala)
CO	AVL DiCom 4000	0.01 % hacim
CO ₂	AVL DiCom 4000	0.1 % hacim
THC	AVL DiCom 4000	1 ppm
NO _x	AVL DiCom 4000	1 ppm
İs	AVL 415S	0.4% Vol.
Hesaplanan sonuçlar		Belirsizlik
Güç		±0.61% (1.4 kW) ±0.55% (1.7 kW) ±0.46% (2.4 kW)
Fren özgül yakıt tüketimi		±2.57% (1.4 kW) ±2.12% (1.7 kW) ±1.87% (2.4 kW)

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

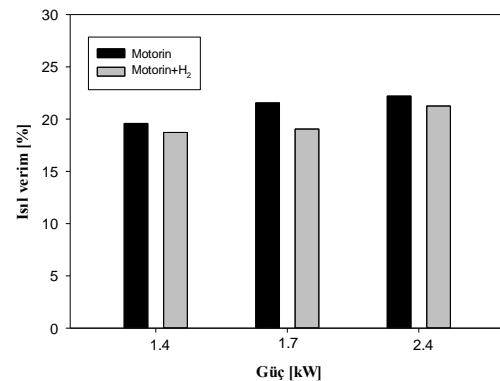
Yapılan deneysel çalışmada, 1.4kW,1.7kW ve 2.4kW motor gücünde (sırasıyla %37, %47 ve %65 yük şartında), 1300 d/d sabit motor hızında, motorin yakıtı ile motorin+hidrojen çift yakıtının (%25 hidrojen enerji içeriği) ısı verim, fren özgül yakıt tüketimi, CO, CO₂, THC, NO_x ve is emisyonları ile silindir içi basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karşılaştırılmıştır. Çalışmalar esnasında, hidrojenin enerji içeriğinin %25'i geçmesi durumunda, zaman zaman alev tepmesi ile

karşılaşılabildiği için, bu değer geçilmemiştir. Belirlenen deney şartlarında çalışmalar esnasında erken ateşleme, vuruntu veya alev tepmesi gibi herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır.

Motor Karakteristikleri

Isıl Verim

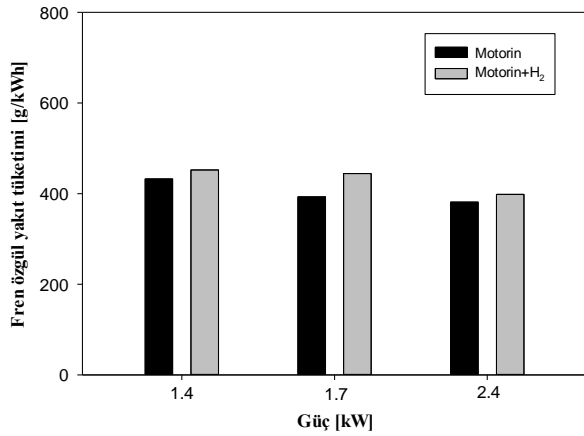
Dolgunun hidrojenle zenginleştirilmesinin ısı verim üzerindeki etkisi Şekil 3'te görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, ısı verim motorin+hidrojen kullanılmasıyla tüm yük şartlarında düşmektedir. Isıl verim, 1.4 kW motor gücünde motorin yakıtı ile yapılan çalışmada %19.59, motorin+hidrojen karışım yakıtı ile yapılan çalışmada %18.72 olarak hesaplanmıştır. 1.7 kW motor gücünde ise ısı verim, motorin yakıtı ile %21.56, motorin+hidrojen karışım yakıtı ile %19.06 olarak hesaplanmıştır. 2.4 kW motor gücünde ise, ısı verim motorin yakıtı ile %22.21, motorin+hidrojen karışım yakıtı ile %21.25 olarak hesaplanmıştır. Hidrojenin alev hızı motorinden 9 kat daha hızlıdır (Verhelst vd, 2005). Normalde, hidrojen ilaveli motorin yanması, yanma verimini arttırmaktadır. Varde ve Frame (Varde ve Frame, 1983) yapmış oldukları çalışmada, yanma fazının avansının hidrojen ilavesi ile değişmesinden dolayı, ısı verim üzerinde olumsuz etkisi olabileceğinden bahsetmişlerdir. Christodoulou ve Megaritis (Christodoulou ve Megaritis, 2013) ise Ford Puma diesel motorunda yapmış oldukları çalışmada, düşük hızlarda ısı veriminin bir miktar düştüğünden bahsetmişlerdir. Bunun nedenini ise deneysel olarak elde ettikleri hidrojen yanma veriminin düşmesine bağlamışlardır. Ayrıca, hidrojenin molar ısı kapasitesi N₂'nin molar ısı kapasitesinden bir miktar daha yüksek olması, silindir içi gazını seyrelten ve dolayısıyla yanma verimini düşüren bir başka neden olarak belirtilmiştir (Pan vd, 2014). Ayrıca, Owston ve diğerleri (Owston vd, 2007) yapmış oldukları çalışmada, hidrojen ilavesi ile ısı akısının arttığından bu durumun da ısı kayıplarının artmasına neden olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçların, ısı verim açısından, Christodoulou ve Megaritis (Christodoulou ve Megaritis, 2013), Varde ve Frame (Varde ve Frame, 1983) ve Zhou ve diğerlerinin (Zhou vd, 2014) çalışma sonuçlarıyla paralel oldukları görülmüştür.



Şekil 3. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde ısı verim üzerindeki etkisi.

Fren Özgül Yakıt Tüketimi

Şekil 4'te, çalışma şartlarında, dolgunun hidrojenle zenginleştirilmesinin fren özgül yakıt tüketimi değerleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Fren özgül yakıt tüketimi (föyt), tüketilen hidrojenin alt ısı değerinden yola çıkılarak elde edilen eşdeğer motorin miktarı, tüketilen motorin miktarına ilave edilerek, elde edilen sonuçlar motorin cinsinden bulunmuştur. Hidrojenle zengin şartta, çalışmadaki tüm yük şartlarında (%37, %47 ve %65) fren özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. 1.4 kW motor gücünde, yalnızca motorin yakıtı kullanıldığı durumda föyt değeri 432.4 g/kWh iken, motorin+hidrojen kullanıldığı şartta föyt değeri 452.4 g/kWh değerine çıkmaktadır. 1.7 kW motor gücünde ise, motorin yakıtı ile 392.9 g/kWh olarak bulunan föyt değeri, motorin+hidrojen kullanıldığı şartta 444.5 g/kWh değerine çıkmaktadır. 2.4 kW motor gücünde ise, yalnızca motorin kullanımı ile 381.4 g/kWh olarak ölçülen föyt değeri, motorin+hidrojen kullanıldığı şartta 398.5 g/kWh değerine yükselmektedir. Hidrojenle zengin şartta föyt değerlerinde 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücünde sırasıyla, %4.6, %13.1 ve %4.5 değerinde artış gözlemlenmiştir.



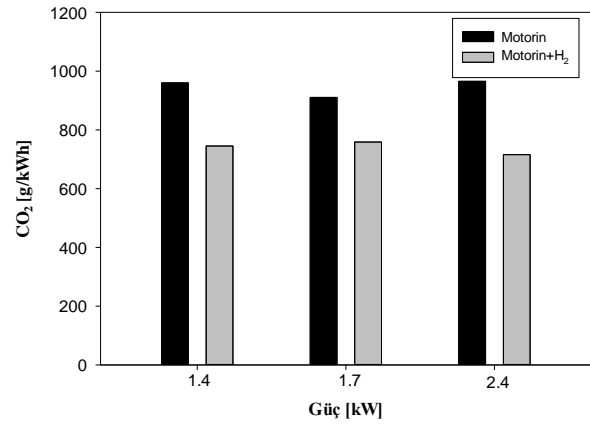
Şekil 4. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde fren özgül yakıt tüketimine etkisi.

Emisyon Karakteristikleri

Karbon Dioksit

Şekil 5'te, CO₂ emisyonunun hidrojenle zengin ve yalnızca motorin yakıtına göre değişimi görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, dolgunun hidrojenle zenginleştirildiği şartta CO₂ emisyonları ciddi miktarda düşmektedir. CO₂ emisyonu sadece motorin yakıtı kullanımı ile 1.4 kW motor gücünde 960.2 g/kWh olarak ölçülürken, motorin+hidrojen kullanımında 745.3 g/kWh olarak ölçülmüştür. 1.7 kW motor gücünde ise, yalnızca motorin yakıtı kullanımı ile 910.4 g/kWh olarak ölçülen CO₂ emisyonu değeri, motorin+hidrojen kullanıldığı şartta 758.9 g/kWh değerine düşmüştür. 2.4 kW motor gücünde ise motorin+hidrojen kullanıldığı şartta 965.4 g/kWh değerinden 715.9 g/kWh değerine düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, özgül CO₂ emisyonu değerleri dolgunun hidrojenle

zenginleştirildiği şartta 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW güç değerleri için sırasıyla %22.3, %16.6 ve %25.8 oranında düşmüştür. CO₂ emisyonundaki düşüşün temel sebebi hidrojenin karbon içermemesidir (Bari ve Esmail, 2010). Ayrıca, hidrojen ilavesi ile toplam yakıtın H/C oranı artacağı için, yanma süresi kısalmakta ve yanma verimi artmaktadır (Ghazal, 2013; White vd, 2006). Diğer taraftan, hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı sayesinde motorin yakıtı demetinin heterojenliği iyileşmekte ve daha üniform ön karışımli tutuşabilir karışım oluşmaktadır (Szwaja ve Grab-Rogalinski, 2009). Bütün bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, hidrojen ilavesi ile özgül CO₂ emisyonları düşmektedir.

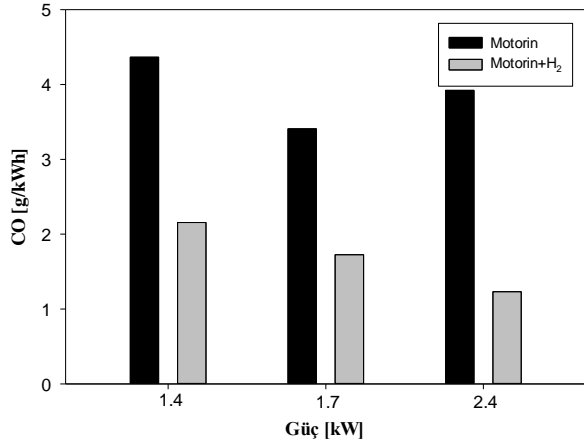


Şekil 5. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi.

Karbon Monoksit

Şekil 6, çalışma şartlarında ki (1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW) yalnızca motorin yakıtı ve hidrojen+motorin yakıtı ile elde edilen özgül CO emisyonlarını göstermektedir. CO emisyonlarının hidrojen ilavesi ile tüm güçlerde ciddi miktarda düştüğü görülmektedir. 1.4 kW motor gücünde yalnızca motorin yakıtı ile 4.36 g/kWh CO emisyonu açığa çıkarken, motorin+hidrojen kullanılmasıyla bu değer 2.15 g/kWh değerine düşmektedir. Yine, 1.7 kW motor gücünde CO emisyonu motorin+hidrojen kullanılmasıyla 3.4 g/kWh değerinden 1.72 g/kWh değerine düşerken, 2.4 kW motor gücünde 3.92 g/kWh değerinden 1.23 g/kWh değerine düşmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, motorin+hidrojen kullanılmasıyla özgül CO emisyonlarında sırasıyla %50, %49 ve %68 oranında düşüş bulunmuştur. Çalışmada, karbon monoksit açısından ölçülen tüm değerler, emisyon regülasyonlarının altında kalmaktadır. Ancak, motorin+hidrojen kullanımıyla yapılan çalışmada elde edilen ölçümlere göre belirlenmiş yüzdesel değerler, AVL DiCom 4000 cihazının hacimce %0.01 doğrulukta ölçülmesi ve çalışmadaki ölçüm değerlerinin cihazın ölçüm alt sınırının altında kalmasından dolayı, yüzdesel belirlenmiş düşüş değerlerinin tam kesin olduğundan bahsetmemiz mümkün olamamıştır. Hidrojenin ilavesi ile cihazın ölçebildiğinden daha düşük değerler de elde edilmiş olabileceğinden bu değerlerin artması söz konusu olabilir. Hidrojenin yüksek alev hızı silindir içi basıncın artmasına ve yanma veriminin bir miktar daha

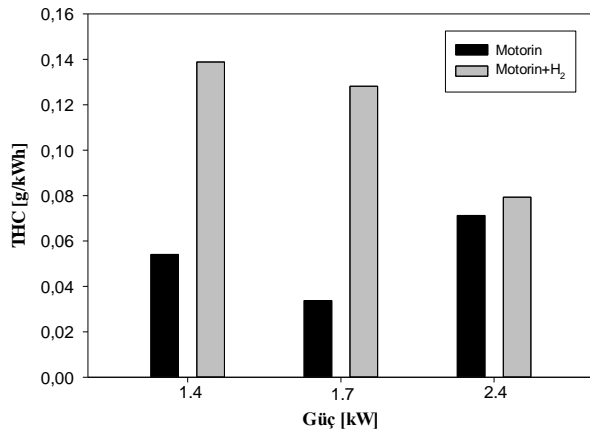
iyileşmesine sebep olur. Ayrıca, hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı nedeniyle, yanma öncesi daha homojen bir tutuşabilir karışım oluşur ve karışımın oksijene ulaşabilirliği artar (Ghazal, 2013). Bu durum, CO emisyonundaki düşüşü açıklamaktadır.



Şekil 6. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde CO emisyonu üzerindeki etkisi.

Toplam Hidrokarbon

Egzoz gazındaki yanmamış hidrokarbonlar genellikle toplam hidrokarbon (THC) ile ifade edilir (Heywood, 1988). Şekil 7’de, çalışma şartlarında ele edilen THC emisyonları gösterilmiştir. Motorin+Hidrojen kullanımıyla tüm yük kademelerinde THC emisyonlarının arttığı görülmektedir. 1.4 kW motor gücünde, motorin+hidrojen kullanımıyla özgül THC emisyonu 0.054 g/kWh değerinden 0.138 g/kWh değerine artmıştır. Benzer şekilde, 1.7 kW motor gücünde, THC emisyonları 0.033 g/kWh değerinden 0.128 g/kWh değerine artarken; 2.4 kW motor gücünde ise 0.071 g/kWh değerinden 0.079 g/kWh değerine artmıştır.



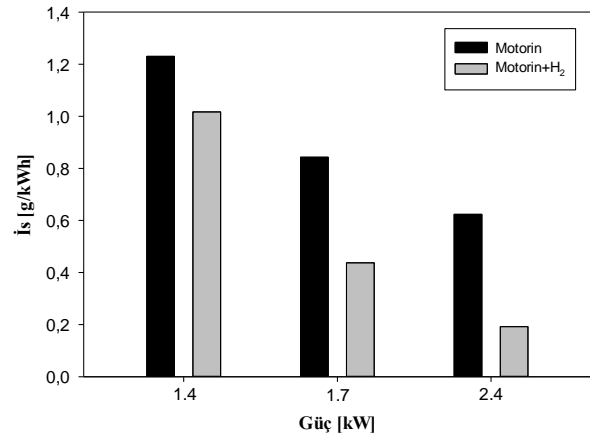
Şekil 7. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde THC emisyonu üzerindeki etkisi.

Elde edilen THC değerleri regülasyonlara göre oldukça düşük değerlerde olduğu gibi, motorin+hidrojen kullanımıyla THC emisyonlarındaki artış miktarları da regülasyonlara göre ihmal edilebilecek değerlerdedir.

Elde edilen sonuçlar, literatürdeki Zhou ve arkadaşlarının (Zhou vd, 2014) ve Horng-Wen Wu ve Zhan-Yi Wu’nun (Wu H.W.ve Wu Z.Y., 2012) yapmış oldukları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlarla paraleldir.

İs

Şekil 8’de, çalışmada elde edilen is emisyonlarındaki değişim görülmektedir. Özgül is emisyonu değerlerinin tüm yük kademelerinde motorin+hidrojen kullanımıyla düştüğü görülmektedir. 1.4 kW motor gücünde özgül is emisyonu 1.23 g/kWh değerinden 1.01 g/kWh değerine düşerken, 1.7 kW motor gücünde 0.84 g/kWh değerinden 0.43 g/kWh değerine, 2.4 kW motor gücünde ise 0.62 g/kWh değerinden 0.19 g/kWh değerine düşmektedir. Elde edilen sonuçlardan, 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücü için özgül is emisyonlarında sırasıyla %17, %48 ve %69 düşüş gözlemlenmiştir. Hidrojen ilavesi ile gerek toplam yakıtın H/C oranının artması (Saravanan vd, 2007), gerek se hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı sayesinde tutuşabilir karışımın homojenliğinin artması ve yakıtın daha fazla oksijene ulaşabilir olması (Ghazal, 2013; Szwaja ve Grab-Rogalinski, 2009), is oluşumunu da azaltmaktadır.

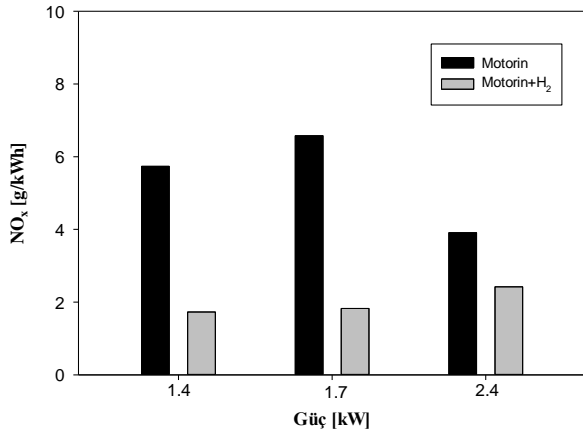


Şekil 8. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde is emisyonu üzerindeki etkisi.

Azot Oksitler

Şekil 9’da, motorin yakıtı ve motorin+hidrojen yakıtı için çalışma şartlarında elde edilmiş NO_x emisyonu değerleri gösterilmektedir. Tüm motor güçlerinde motorin+hidrojen kullanımıyla özgül NO_x emisyonlarının düştüğü görülmektedir. 1.4 kW motor gücünde özgül NO_x emisyonları 5.73 g/kWh değerinden 1.72 g/kWh değerine, 1.7 kW motor gücünde 6.57 g/kWh değerinden 1.82 g/kWh değerine, 2.4 kW motor gücünde ise 3.91 g/kWh değerinden 2.42 g/kWh değerine düşmektedir. Elde edilen sonuçlardan, 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor güçlerinde sırasıyla %69, %72 ve %38 NO_x emisyonlarında düşüş görülmektedir. NO_x oluşumu silindir içindeki gaz sıcaklığı, oksijen konsantrasyonu ve reaksiyon süresi ile ilgilidir (Köse ve

Ciniviz, 2013). Normal şartlarda, hidrojen-motorin yanmasında, silindir içi pik sıcaklıkların artması ve NO_x emisyonlarında artış beklenmektedir (Bari ve Esmail, 2010). Ancak, White ve diğerleri (White vd, 2006) yapmış oldukları çalışmada, hidrojen ilavesi ile yanma veriminin artması için ultra fakir karışım ($\phi < 0.5$) şartının oluşması gerektiği, aksi taktirde termal NO_x 'lerde düşüş meydana geleceğinden bahsetmiştir. Rortveit ve diğerleri (Rortveit vd, 2002) ise N_2 , He ve CO_2 gazlarından oluşan seyrelticiin NO_x emisyonları üzerindeki etkisini incelemişler, elde ettikleri sonuçlara göre NO_x emisyonlarında ciddi miktarda düşüş meydana geldiğini bulmuşlardır. Frassoldati ve diğerleri (Frassoldati vd, 2006) silindir içerisini seyreltme ile termal NO_x emisyonlarının kontrol altına alınabildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, birçok çalışmada N_2 'nin NO_x emisyonunu kontrol altında tutmak ve EGR'yi simüle etmek amacıyla kullanıldığı bilinmektedir (Christodoulou ve Megaritis, 2014; Wang vd, 2014). Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, hidrojenin seyreltici gibi davranarak, tüm yük kademelerinde NO_x emisyonunda düşüşe neden olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Pan ve diğerlerinin (Pan vd, 2014) literatürde yer alan yapmış olduğu çalışma sonuçlarıyla benzerlik teşkil etmektedir.

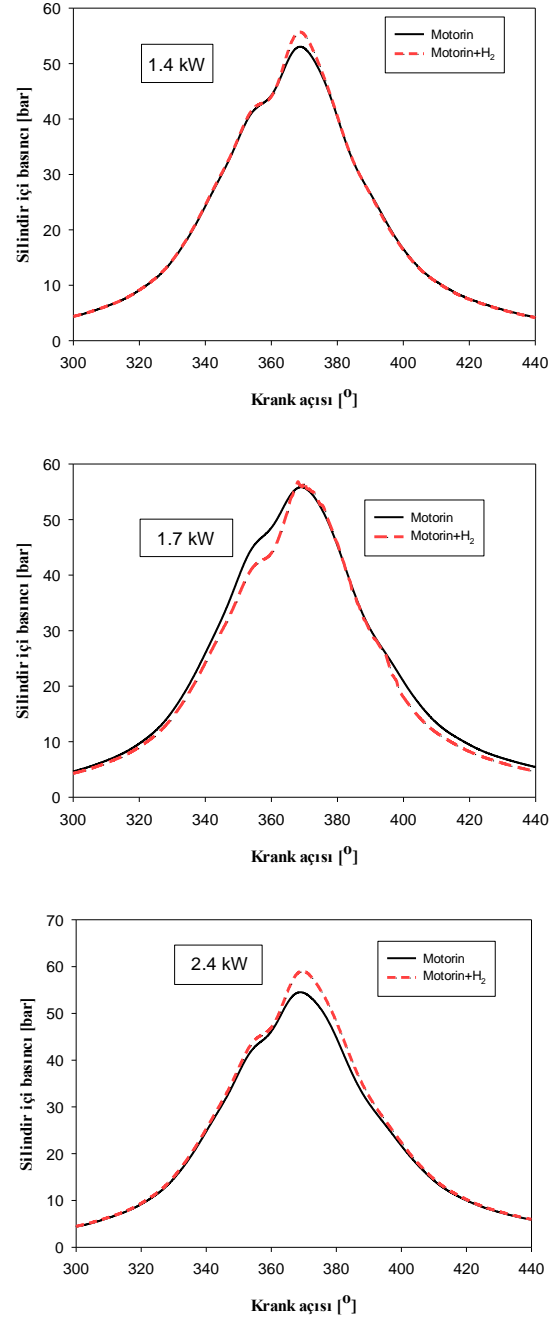


Şekil 9. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde NO_x emisyonu üzerindeki etkisi.

Yanma Karakteristikleri Silindir İçi Basıncı

Motorin+Hidrojen kullanımıyla 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücü değerleri için ölçülmüş krank açısına bağlı silindir içi basınç değişimi grafikleri Şekil 10'da görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre; motorin+hidrojen kullanımıyla 1.4 kW motor gücünde pik silindir gaz basıncı 52.98 bar değerinden 55.53 bar değerine artarken, 1.7 kW motor gücünde 55.72 bar değerinden 56.84 bar değerine, 2.4 kW motor gücünde ise, 54.24 bar değerinden 58.81 bar değerine artmıştır. Bu ölçüm verilerine göre, motorin+hidrojen kullanımında silindir içi pik basıncında 1.4 kW motor gücünde %4.8 oranında artış gözlenirken, 1.7 kW motor gücünde %2.0 oranında artış, 2.4 kW motor gücünde ise %8.4 oranında artış görülmektedir. Hidrojenin yüksek

alev hızından dolayı hızlı yanması ile basınç artış oranının artmış olması (Saravanan vd, 2007), yanma sonucu ulaşılan pik basınç değerlerini de artırmıştır. Benzer sonuçlar, literatürde yer alan Christodoulou ve Megaritis'in (Christodoulou ve Megaritis, 2013) çalışmasında da gözlemlenmiştir.

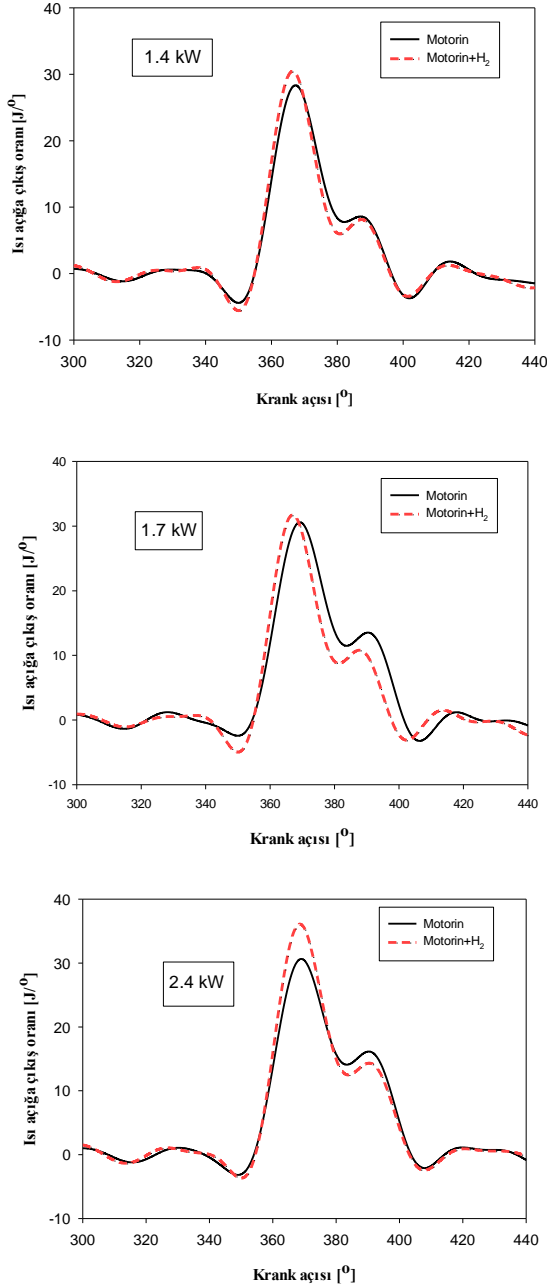


Şekil 10. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde, krank açısına bağlı olarak silindir gaz basıncı üzerindeki etkisi.

Isı Açığa Çıkış Oranı

Şekil 11'de, çalışmada elde edilen krank açısına bağlı ısı açığa çıkış oranı grafikleri görülmektedir. Motorin ile yanmada, klasik diesel yanma fazları gözlemlenirken, motorin+hidrojen yanmasında, hidrojenin yüksek alev

hızından dolayı kontrolsüz yanma fazında patlayıcı türde bir yanma görülmektedir (Saravanan vd, 2007). Motorin+hidrojen kullanımında, silindir içinde homojen fazdaki hidrojenin varlığı ile gerçekleşen ve krank mili açısına göre basınç değişiminin yüksek olduğu şarttaki kontrolsüz yanma fazında, vuruntu ihtimali yüksek olmasına karşın, yapılan çalışmada hidrojenin enerji içeriği toplam yakıtın %25'i ile sınırlandırıldığından vuruntuya rastlanmamıştır.



Şekil 11. Hidrojenin 1.4kW, 1.7kW ve 2.4kW motor gücünde, krank açısına bağlı olarak ısı yayma oranı üzerindeki etkisi.

Pik ısı açığa çıkış oranı, motorin+hidrojen kullanımıyla 1.4 kW motor gücünde 28.09 J/° değerinden 30.14 J/° değerine çıkarken, 1.7 kW motor gücünde 30.25 J/° değerinden 31.35 J/° değerine, 2.4 kW motor gücünde ise 30.41 J/° değerinden 36.02 J/° değerine çıkmaktadır.

Motorin+Hidrojen kullanımıyla ısı açığa çıkış oranında meydana gelen artışlar 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW değerleri için sırasıyla %7.3, %3.6 ve %18.4'tür. Tutuşma öncesi, silindir içinde homojen fazdaki hidrojenin varlığından dolayı, hidrojenin kontrolsüz yanma fazında daha fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar Saravanan ve Nagarajan'ın (Saravanan ve Nagarajan, 2009) sonuçları ile paraleldir.

SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, 1300 dev/d sabit motor hızında, 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücünde (%37, %47 ve %65 yük şartında), yalnızca motorin yakıtının ve motorin+hidrojen (enerji içeriği olarak hidrojen, %75+%25) çift yakıt kullanımının, performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir; -Isıl verim hidrojen ilavesi ile tüm yük şartlarında düşmektedir. Isıl verim, 1.4 kW motor gücünde, motorin yakıtı ile %19.59, motorin+hidrojen karışım yakıtında %18.72 olarak, 1.7 kW motor gücünde, motorin yakıtı ile %21.56, motorin+hidrojen karışım yakıtı ile %19.06 olarak ve 2.4 kW motor gücünde ise, motorin yakıtı ile %22.21, motorin+hidrojen karışım yakıtı ile %21.25 olarak hesaplanmıştır.

- Dolgunun hidrojenle zenginleştirilmesi durumunda CO₂ emisyonları ciddi miktarda düşmektedir. CO₂ emisyonu ölçüm değerleri motorin+hidrojen yakıtı kullanımı ile 1.4 kW motor gücünde 960.2 g/kWh değerinden 745.3 g/kWh değerine, 1.7 kW motor gücünde, 910.4 g/kWh değerinden 758.9 g/kWh değerine, 2.4 kW motor gücünde ise hidrojen ilavesi ile 965.4 g/kWh değerinden 715.9 g/kWh değerine düşmüştür.

- Benzer şekilde, dolgunun hidrojenle zenginleştirilmesi durumunda tüm yük şartlarında CO emisyonlarında da ciddi düşüş gözlemlenmiştir. %25 enerji içeriği olarak hidrojen ilavesi ile 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor güçlerinde, özgül CO emisyonlarında sırasıyla %50, %49 ve %68 oranında düşüş tespit edilmiştir.

- CO₂ ve CO dan farklı olarak, dolgunun hidrojenle zenginleştirilmesi durumunda THC emisyonları tüm yük kademelerinde artmaktadır. 1.4 kW motor gücünde, özgül THC emisyonu 0.054 g/kWh değerinden 0.138 g/kWh değerine, 1.7 kW motor gücünde, 0.033 g/kWh değerinden 0.128 g/kWh değerine, 2.4 kW motor gücünde ise 0.071 g/kWh değerinden 0.079 g/kWh değerine artmıştır. Elde edilen THC değerleri regülasyonlara göre oldukça düşük değerlerde olduğu gibi, aynı zamanda motorin+hidrojen kullanımıyla elde edilen THC emisyonlarındaki artış miktarı regülasyonlara göre ihmal edilebilecek düzeydedir.

- Motorin+Hidrojen kullanımıyla is emisyonlarında da ciddi miktarda düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücü için özgül is emisyonlarında sırasıyla %17, %48 ve %69 oranlarında düşüş gözlemlenmiştir.

- NO_x emisyonları tüm yük kademelerinde düşmüştür. 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW motor gücünde sırasıyla %69, %72 ve %38 oranlarında NO_x emisyonlarında düşüş görülmektedir.

- Motorin+Hidrojen kullanımıyla silindir içi pik basınçlarda; 1.4 kW motor gücünde %4.8, 1.7 kW motor gücünde %2 ve 2.4 kW motor gücünde ise %8.4 oranında artış görülmüştür.

- Isı açığa çıkış oranında meydana gelen artışlar 1.4 kW, 1.7 kW ve 2.4 kW değerleri için sırasıyla %7.3, %3.6 ve %18.4'tür.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 2011-06-01-YULAP01.

KAYNAKLAR

Bari S., Esmail M.M. Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89, 378–383, 2010.

Bika A.S., Franklin L.M., Kittelson D.B. Emissions Effects of Hydrogen as a Supplemental Fuel with Diesel and Biodiesel. *SAE Paper* No. 2008-01-0648, 2008.

Bose P.K., Maji D. An experimental investigation on engine performance and emissions of a singlecylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel and diesel as injected fuel with exhaust gas recirculation . *Int J Hydrogen Energy* 34, 4847– 4854, 2009.

Christodoulou F., Megaritis A. Experimental investigation of the effects of separate hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 38, 10126-10140, 2013.

Christodoulou F., Megaritis A. Experimental investigation of the effects of simultaneous hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine. *Int J Hydrogen Energy* , 39, 2692-2702, 2014.

Durat M., Parlak Z., Kapsız M., Parlak A., Fıçıcı F. Cfd and experimental analysis on thermal performance of exhaust system of a spark ignition engine. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology*, 33 (2),89-99, 2013.

European Environment Agency (EEA). Trends and projections in Europe 2013: Tracking progress towards Europe's climate and energy targets until 2020. Report No 10/2013, 2013.

Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. A wide range modeling study of NO_x formation and nitrogen

chemistry in hydrogen combustion. *Int J Hydrogen Energy*, 31:2310-28, 2006.

Ghazal O.H. Performance and combustion characteristic of CI engine fuelled with hydrogen enriched diesel. *Int J Hydrogen Energy*, 38, 15469-15476, 2013.

Gomes-Antunes J.M., Mikalsen R., Roskilly A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *Int J Hydrogen Energy*, 34, 6516–6522, 2009.

Gomes-Antunes J.M., Mikalsen R., Roskilly A.P. An investigation of hydrogen fuelled HCCI engine performance and operation. *Int J Hydrogen Energy*, 33, 5823–5828, 2008.

Gürbüz H., Buran D., Akçay İ.H. An experimental study on performance and cyclic variations in a spark ignition engine fuelled with hydrogen and gasoline. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology*, 33, 1, 33-41, 2013.

Heywood J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*; McGraw Hill, Inc.: New York, NY, USA, 1988.

Ikegami M., Miwa M., Shioji M. A study on hydrogen fuelled compression ignition engines. *Int J Hydrogen Energy*, 7, 341-353, 1982.

Kosar M., Ozdalyan B., Celik M.B. The usage of hydrogen for improving emissions and fuel consumption in a small gasoline engine. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology*, 31 (2), 101-108, 2011.

Köse H., Cinviz M. An experimental investigation of effect on diesel engine performance and exhaust emissions of addition at dual fuel mode of hydrogen. *Fuel Processing Technology* 114, 26–34, 2013.

Krieger R.B., Borman G.L. The computation of applied heat release for internal combustion engines, *ASME Paper* No.66-WA/DGP-4, 1966.

Liew C., Li H., Nuskowski J., Liu S., Gatts T., Atkinson R., Clark N. An experimental investigation of the combustion process of a heavy-duty diesel engine enriched with H₂. *Int J Hydrogen Energy*, 35, 11357-11365, 2010.

Liu Y., Yang J., Sun J., Zhu A., Zhou Q. A Phenomenological Model for Prediction Auto-Ignition and Soot Formation of Turbulent Diffusion Combustion in a High Pressure Common Rail Diesel Engine. *Int J Hydrogen Energy*, 4, 894-912, 2011.

Miyamoto T., Hasegawa H., Mikami M., Kojima N., Kabashima H., Urata Y. Effect of hydrogen addition to

- intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 36, 13138-13149, 2011.
- Miyamoto T., Mikami M., Kojima N., Kabashima H., Urata Y. Effect of Hydrogen Fraction in Intake Mixture on Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Diesel Engine. *SAE Paper* No. 2009-24-0086, 2009.
- Mohammadi A., Shioji M., Yasuyuki N., Ishikura W., Eizo T. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine. *Int J Hydrogen Energy*, 32, 296–304, 2007.
- Nieminen J., D'Souza N., Dincer I. Comparative Combustion Characteristics Of Gasoline And Hydrogen Fuelled ICEs; *Int J Hydrogen Energy*, 35, 5114-5123, 2010.
- Owston R.; Magi V., Abraham J. Wall Interactions of Hydrogen Flames Compared with Hydrocarbon Flames. *SAE Technical Paper* No. 2007-01-1466, 2007.
- Özer S., Akçay M., Gölcü M., Yazıcı H. Tek silindirli benzinli bir motorda kısmi yüklerde bütanol ilavesinin performansa ve emisyonlara etkisi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. Of Thermal Science and Technology*, 32 (2), 55-62, 2012.
- Pan H., Pournazeri S., Princevac M., Miller J.W., Mahalingam S., Khan M.Y., Jayaram V., Welch W.A. Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 39, 11336-11345, 2014.
- Rortveit G.J., Hustad J.E., Li S.C., Williams F.A. Effects of diluents on NO_x formation in hydrogen counterflow flames. *Combust Flame*, 130:48-61, 2002.
- Saravanan N., Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *Int J Hydrogen Energy*, 33, 1769–1775, 2008.
- Saravanan N., Nagarajan G. Experimental Investigation on Performance and Emission Characteristics of Dual Fuel DI Diesel Engine with Hydrogen Fuel. *SAE Paper* No. 2009-26-032, 2009.
- Saravanan N., Nagarajan G., Dhanasekaran C., Kalaiselvan K.M. Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 32, 4071 – 4080, 2007.
- Sayın C. Diesel engine emissions improvements by the use of sun flower methyl ester /diesel blends. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology*, 33 (2), 83-88, 2013.
- Sezer İ., Bilgin A. Comparative investigation the use of methanol and methyl tertiary butyl ether in gasoline on engine performance, CO emissions and fuel cost. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology*, 33 (2), 35-44, 2013.
- Szwaja S., Grab-Rogalinski K., Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int J Hydrogen Energy*, 34, 4413–4421, 2009.
- Varde K.S., Frame G.A. Hydrogen aspiration in direct injection type diesel engine-its effect on smoke and other engine performance parameters. *Int J Hydrogen Energy*, 8, 549-555, 1983.
- Verhelst S., Woolley R., Lawes M., Sierens R. Laminar and unstable burning velocities and Markstein lengths of hydrogen–air mixtures at engine-like conditions. *Int J Hydrogen Energy*, 30, 209–216, 2005.
- Wang Z., Zuo H., Liu Z., Li W., Dou H. Impact of N₂ dilution on combustion and emissions in a spark ignition CNG engine. *Energy Conversion and Management*, 85, 354–360, 2014.
- White C.M., Steeper R.R., Lutz A.E. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *Int J Hydrogen Energy*, 31, 1292-1305, 2006.