

## Dizel Motorlarda Yakıtta Hidrojen Katkısının Yanma, Performans ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Müjdat FIRAT<sup>1</sup>, Mutlu OKCU<sup>2</sup>, Yasin VAROL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü 23119 Merkez, Elazığ

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü 23119 Merkez, Elazığ,  
mujdatfirat@gmail.com

(Geliş/Received:21.11.2016; Kabul/Accepted:30.01.2017)

### Özet

Günümüzde içten yanmalı motorların emisyon değerlerinin azaltılması işlemi önemli bir olaydır. Sunulan çalışmada dizel motorlarda, hidrojen kullanımının motor performansına ve emisyon değerlerine etkisinin sayısal olarak araştırılmasını amaçlanmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan modelin geçerliliği, deneysel verilerle doğrulanarak sağlanmıştır. Bu çalışmada, dizel bir motorda farklı oranlarda hidrojen kullanılmış ve sonuçları çalışma kapsamında sayısal olarak sunulmuştur. Saf dizel yakıtı ve saf dizel yakıtına ek olarak % 2, % 4 ve % 6 oranlarında hidrojen eklenerek analizler yapılmıştır. Sayısal analizler AVL-FIRE yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlar her bir karışım oranı için ayrı ayrı elde edilmiş ve sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre motor performansında hidrojen miktarına bağlı olarak iyileşmeler gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AVL-FIRE, Emisyon, İçten Yanmalı Motor, Hidrojen

### Investigation of hydrogen enrichment on combustion characteristics, performance and emissions of diesel engines

#### Abstract

In recent years, the process of reducing emissions of internal combustion engines are critical event. The present study numerically explores combustion of hydrogen and its shows the contribution of hydrogen to engine performance and emissions effect for diesel engines. The used model in the numerical study was determined according to experimental data. In the study, the different ratios of hydrogen have used in diesel engines and the obtained results have been presented. The different ratios of hydrogen are % 2, % 4 and % 6, and its are added to pure diesel. Transient numerical simulations are performed using the AVL-FIRE commercial software. The simulations results are separately obtained and presented. According to the results, engine performans improved depending on the amount of hydrogen.

**Keywords :** AVL-FIRE, Emission, Internal Combustion Engines, Hydrogen

#### 1. Giriş

Enerji ihtiyacı, günden güne artan talepler dolayısıyla ülkeler arasında ekonomik ve stratejik bakımdan önemli bir vakıa haline gelmiştir. Dünya ülkeleri artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için farklı arayışlara girmiştir. Bu bağlamda ülkeler farklı enerji kaynakları aramakta veya var olan enerji kaynakları arasında dönüşüm yaparak, bu artan enerji ihtiyacını karşılamaya çalışmaktadırlar. Kullanımdaki enerjinin mevcut durumunu devam ettirmek, sürdürülebilir bir kalkınma ve ülkelerin geleceği

için, yeni veya yenilenebilir kaynakların etkili kullanımının şart olduğu artık herkes tarafından kabul görmektedir. Günlük yaşantımızda enerji ve enerjiye olan ihtiyaç, farklı çeşitleri ve kullanım alanlarıyla öngörülemez bir talep alanı oluşturmuştur. Gerek ticari kaygılar gerekse ülke menfaatleri doğrultusunda gittikçe önemli hale gelen enerji, ülkelerin siyasi konumlarını dahi etkilemektedir. Artan nüfus, şehirleşme ve endüstrileşme enerji gereksiniminin daha da artmasına neden olmaktadır. Bu artan ihtiyaç neticesinde geliştirilmek istenen çözümler alternatif enerji kaynağı bulma, var olan enerjiyi

depolama ve kullanılan kaynakların tasarrufu noktalarına yoğunlaşmıştır. Artan teknoloji ile yaşam kalitesi artmaktadır. Fakat bu gelişim insanoğlunun çevreye verdiği hasarın boyutlarını da arttırmaktadır. Özellikle motorlu araç sayısının artması çevre ve hava kirliliğinin yanı sıra insan sağlığı açısından da büyük bir tehlike oluşturduğu düşünülmektedir.

Motorlu araçlar ve fosil yakıtların yanması konulu birçok araştırmaya göre, fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan karbon monoksit, hidrokarbon ve azot bileşiklerinin yarısı, benzin ve dizel motorlarından kaynaklanmaktadır [1].

Farklı kaynak arayışında en önemli parametrenin, kullanılacak yakıtın kirlitici bir yakıt olmaması özellikle arzu edilir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda hidrojen diğer yakıt türlerine göre çok daha az kirlitici olması nedeniyle, alternatif enerji araştırmalarında en çok araştırılan ve ilgi gören madde haline geldiği düşünülmektedir. Sunulan çalışmada hidrojenin kullanılmasının esas nedeni de yukarıda bahsedilen özelliklere uygun olması ve farklı kaynaklardan hidrojenin temin edilebilmesidir.

Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda yani otobüs, kamyon, traktör ile tarım makineleri gibi tüm taşıtlarda kullanılabilmesi, sınırlı rezerve sahip petrol ürünlerinin yerini alması ve çevreye dost bir enerji olması, son yıllarda araç üreten şirketlerin büyük ilgisini çekmiştir. Petrolün sınırlı ömrü ve artan çevre kirliliği, hidrojen yakıtı kullanımının yaygınlaşmasına yol açmaktadır. Hidrojen yakıtının ilk kullanım alanlarından biri jet uçakları olup, bu konuda ilk olarak 1957 yılında yapılan denemelerden sora yapılan çalışmalar artık ticari uygulama aşamasına gelmiştir [2].

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle karbon esaslı olmayan hidrojen, yanma sonucunda yanma ürünü olarak su oluşturan ve çevre dostu olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Hidrojen-hava karışımının geniş alevlenme limitine sahip olması, motorun fakir karışım oranlarında, yüksek ısıl verimde ve düşük emisyon değerlerinde bir gaz kelebeği olmaksızın çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, pompalama kayıplarının azalmasına ve motorun kısmi yüklerde çalışması durumunda, termik verimin artmasına neden olmaktadır. Hidrojenin

yüksek yanma hızı, yanmanın neredeyse sabit hacimde tamamlanmasına sebep olmakta ki bu durum termodinamik açıdan iyi bir yanmayı temsil etmektedir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı oldukça yüksek olması, son gaz bölgesinde kendi kendine tutuşma olmaksızın, motorun kısmen yüksek sıkıştırma oranında çalışmasına olanak sağlamaktadır. Kısmen artırılabilen sıkıştırma oranı, motorun termik verimi ile gücünde bir artışa sebep olacaktır. Ayrıca yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda hidrokarbon ve karbon monoksit gibi egzoz emisyonları yok denecek kadar az düzeydedir. Çünkü hidrojen motorlarında tek karbon kaynağı yağlama yağı iken kirlitici emisyon kaynağı ise yüksek sıcaklıklarda oluşan azot oksitlerdir. Diğer taraftan hidrojen motorlarında CO, CO<sub>2</sub>, HC ve is emisyonu yoktur [3-4].

Yukarıda bahsedilen tüm durumlar göz önüne alındığında hidrojenini içten yanmalı motorlarda kullanımının oldukça arttığı gözlemlenmiştir.

Çeper B.A. 'Hidrojen-Doğal Gaz Karışımlarının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması' başlıklı bir doktora tezi çalışması yapmıştır. Yapılan çalışmada, farklı yüzde oranlarına sahip hidrojen-doğal gaz karışımlarının yanma ve emisyon performans karakteristiklerini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen verilere göre ilave edilen hidrojen miktarı CO oranını azaltmakta buna paralel olarak artan ısıl verimden dolayı da NO emisyonları artmaktadır. Ayrıca hidrojen miktarı arttıkça yanma sürecinin daha iyi olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu saptamıştır [5].

Gül E.K. yaptığı yüksek lisans tezi kapsamında, içten yanmalı bir motorda hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı ve motor performansının incelendiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada neden hidrojenin içten yanmalı motorlarda (iym) kullanıldığı, hidrojenin genel özellikleri, hidrojenin üretilmesi ve depolanması ile ilgili birçok bilgiye yer vermiştir. Çalışma sonucunda elde edilen izlenimlere göre motorda yapılacak bazı ufak modifikasyonlarla motorun hidrojenle çalıştırılabileceği ifade edilmiştir. Fakat hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için, öncelikle hidrojen üretim maliyetlerinin

düşürülmesinin gerektiği ve araç üzerinde depolama ve güvenlik önlemleri gibi konularda çalışmalar yapılmasının doğru olacağı vurgulanmıştır. Son olarak motor püskürtme sistemi, ateşleme sistemi, soğutma ve yağlama sistemlerinde, araç üzerinde uzun süre kullanımda problem oluşturmayacak şekilde yeni tasarımlar yapmanın şart olduğunu savunmuştur [4].

Verhelst S. vd., hidrojenli içten yanmalı bir motorda EGR oranının belirlenmesini içeren bir çalışma yapmışlardır. Hidrojen motorlarında NOx emisyonlarının yüksek çıkmasını EGR kullanarak düşürülmesini öngörmüşlerdir. Hidrojenli içten yanmalı motorda EGR oranının belirlenmesi için üç farklı metot kullanmışlardır. Tüm metotlar tek silindirli bir hidrojen motorunda uygulanmış ve çalışma deneysel veriler çerçevesinde desteklenmiştir. Hem analitik hem de deneysel veriler ışığında en etkin yöntemin O<sub>2</sub> kütle denge metodu olduğunu belirlemişlerdir [6].

Knop Vincent vd yaptıkları çalışmada 3 boyutlu CFD kodu kullanarak hidrojen katkılı bir yakıt kullanılan içten yanmalı bir motorda yanma olayını modellemişlerdir. Yapılan çalışmada kısa adı ECFM olan Genişletilmiş Tutarlı Alev Modelini kullanmışlardır. Ayrıca NO emisyonlarının belirlenmesinde, güncellenen ve genişletilen Zeldovitch modelini kullanmışlardır [7].

Rakopoulos C.D. vd. hidrojenli kıvılcım ateşlemeli bir motorda CFD kodu kullanarak yanmanın gelişimini sayısal simülasyonlar vasıtasıyla analiz etmişlerdir. Kullanılan paket programda RNG k-ε turbülans modelini tercih etmişlerdir. Hesaplamalarda silindir basıncı, toplam ısı yayılım oranı grafikleri ve NOx emisyon miktarları farklı motor yüklerinde elde etmişlerdir [8].

Dhole A.E. vd. dizel bir motorda çift yakıt olarak farklı gazların kullanıldığı ve bu durumun motor emisyon ve performans değerleri üzerine etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmayı 4 silindirli, turbo şarjlı ve 62.5 kW güce sahip bir dizel motorda gerçekleştirmişlerdir. İkinci yakıt olarak kullanılan hidrojen, jeneratör gazı ve bu ki elemanın karışımından oluşan üçüncü bir karışım hallerini fren termal verimlilik adı altında bir parametre kıyası ile değerlendirmişlerdir. Elde

edilen sonuçlar üç farklı yakıt için üç farklı değer vermiştir. Ayrıca emisyon değerleri (HC, CO,NOx) içinde bir kıyas yapmışlardır. Çalışma sonucunda tüm parametreler kıyaslandığında en ideal değerlerin hidrojen ve jeneratör gazı karışımından elde edildiğini vurgulamışlardır [9].

Yapılan araştırmalarda hidrojenin, içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt oluşturabileceği saptanmıştır. Bunun yanında, yine içten yanmalı motorlarda hidrojenin ikinci yakıt olarak kullanımının da emisyon, performans ve yanma üzerine önemli etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir.

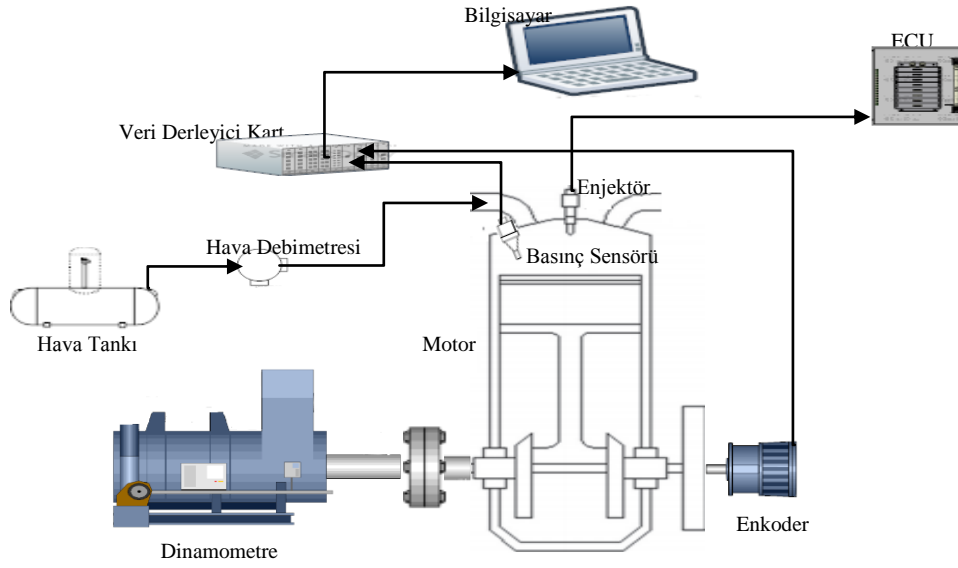
## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel yöntem

İçten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımına ilişkin deneysel çalışmalar literatür araştırması esnasında detaylı olarak anlatılmıştır. Bu şartlar altında kullanımı yaygın ve geçerli olan deneysel bir sistem bu çalışma esnasında kullanılmıştır. Dinamometre bağlanarak gerçek çalışma şartlarına yakın halde işletilen bir dizel motoruna krank açısı ve basınç sensörleri yerleştirilerek motor çalışmasına eş zamanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde çalışmanın amacına uygun olarak motora ait yanma verileri elde edilerek sayısal çalışmalar desteklenmiştir. Deneysel çalışma gerçek motor özelliklerini belirleyeceği gibi çalışmanın sayısal kısmı için de bir dayanak teşkil edecektir. Bu sebeple deneysel çalışma kıyaslama amacıyla yalnızca dizel yakıtı için yapılmıştır.

Şekil 1.' de deneysel sistemin şematik diyagramı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi oldukça sade ve işlevli bir deney seti kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen veriler anlık olarak yüksek okuma hızında bilgisayara aktarılıp kaydedilmiş ve bu şekilde çalışma anlık olarak takip edilmiştir. Deneylerde kullanılan motor aynı zamanda sayısal çalışmanın da temelini oluşturmaktadır. Bu sebeple günümüz teknolojisine uygun ve otomotiv endüstrisinde kullanımı yaygın özelliklere sahip bir motor seçilmiştir. Kullanılan motorun teknik özellikleri

## Dizel Motorlarda Yakıtta Hidrojen Katkısının Yanma, Performans ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi



Şekil 1. Deney sisteminin şematik gösterimi [10]

Tablo 1’ de verilmiştir. Motor bağlantıları tamamlandıktan ve motor düzenli çalışma konumuna getirildikten sonra, gereken ölçümlerin alınmasını sağlayacak olan krank açısı sensörü, basınç sensörü ve yanma analiz sistemi motor üzerine tespit edilmiştir.

Tablo 1. Deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan motorun teknik özellikleri	
Motor Tipi	Direk Enjeksiyonlu Dizel Motor
Marka	Fiat
Silindir Sayısı	4
Toplam Silindir Hacmi	1.910 lt
Çap	82mm
Strok	90.4mm
Sıkıştırma Oranı	18:1
Soğutma Şekli	Su Soğutmalı
Enjeksiyon Sistemi	Common Rail
Enjektör Nokta Sayısı	6
Püskürtme Tipi	Çok Püskürtmeli (Multijet)
Püskürtme Başlangıç ve Bitiş Açılı	-20°KA/-10°KA 5°KA/15°KA
Enjektör Açısı	Püskürtme 140°
Enjektör Nozul çapı	0.145mm
Maksimum Devir	4000-4500 devir/dakika
Maksimum Tork	280Nm
Maksimum Tork Devri	2000 devir/dakika
Rölanti Devri	850-900

## 2.2. Sayısal yöntem

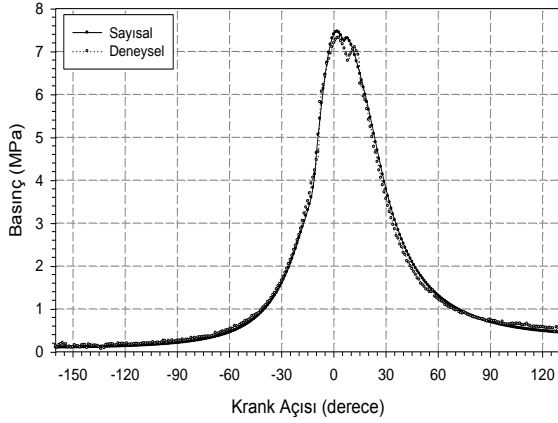
Bu çalışma kapsamında, bir içten yanmalı motorun detaylı analizlerinin yapılması ve geliştirilmesi ve sağlam önerilerin tespiti için en önemli kısım püskürtme oluşumu ve dağılımının tamamen açıklanabilmesidir. Püskürtme akışı, fiziksel olarak sıvı-gaz çift fazlı akışları kapsamında incelenmektedir. Püskürtme yapısını etkileyen, nozul geometrisi, basınç, Weber sayısı ve akışkan cinsi gibi birçok parametre bulunmaktadır. Çalışmada, püskürtme akışında, hız, basınç ve sıcaklık değerlerinin bulunabilmesi için, gerçek motor işletme şartlarında, türbülanslı akış rejiminde zamana bağlı olarak çözüm yapılmıştır.

Ayrıca çalışmada türbülans model için k-zeta( $\zeta$ )-f türbülans model, yanma için CFM ve ECFM-3Z modeli kullanılmıştır. Emisyon değerlerinden NO oluşumu için yaygın olarak kullanılan Zeldovich mekanizması kullanılmıştır. Diğer parametreler yine AVL-FIRE paket programı içerisinde yer alan uygun modeller kullanılarak gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır.

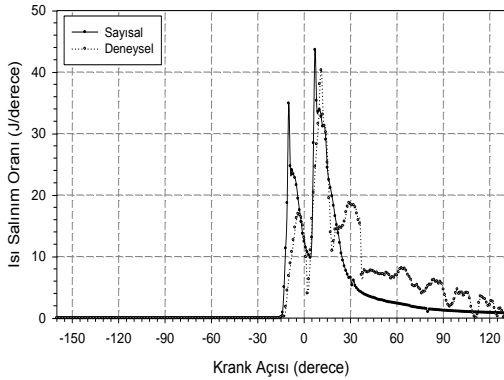
### 3. Bulgular

#### 3.1. Sayısal çalışmanın geçerliliği

Şekil 2’de 2000 d/d motor devri için silindir içi basınç ve ısı salınım oranının krank açısıyla değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde gerek basınç gerekse ısı salınım değerlerinin hem sayısal hem de deneysel çalışmada uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda hem silindir içi basınçlar hem de ısı salınımları artış göstermektedir. Bu bölümden sonra yapılan sayısal çalışmalar 2000 d/d motor devrinde sabit olarak çalışmalar gerçekleştirilmiş ve diğer parametreler incelenmiştir. Bu sebeple 2000 d/d için elde edilen deneysel sonuçların sayısal sonuçlarla uyumu ayrı bir önem taşımaktadır. Grafiklerde de görüldüğü gibi gerek basınç değişimleri gerekse ısı salınım oranları hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda oldukça yakın çıkmıştır. Bu şekilde bu devir sayısı için elde edilen sonuçlarda geçerlilik sağlanmıştır.



(a)



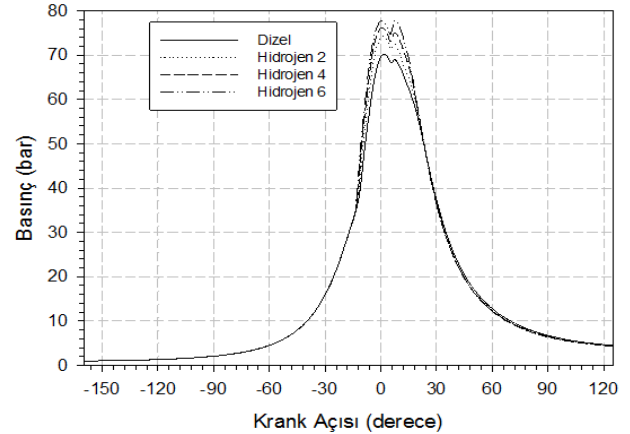
(b)

Şekil 2. 2000 d/d motor devrinde a) basınç, b)ısı salınım oranı

#### 3.2. Farklı hidrojen oranlarında dizel yanması için grafiksel sonuçlar

Alternatif yakıt arayışlarında en fazla tercih edilen bir diğer yakıt türü ise hidrojenidir. Bu çalışma kapsamında bir dizel motorda yakıtta % 2, % 4, %6 oranlarda hidrojen katkısının motor performansı ve silindir içi emisyon oluşumuna etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Yanma ve emisyonlar üzerine birçok parametre incelenerek hidrojenin etkisi araştırılmıştır. Genellikle deneysel olarak çalışmaları yapılan bu alternatif yakıt için bu çalışmada daha ağırlıklı sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.’de tüm karışım oranlarına ve saf dizel yakıtı için basınç değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi ilave edilen hidrojen yüzdesi arttıkça silindir içi maksimum basınç değerinin de arttığı görülmüştür. Bu durumun ilave edilen hidrojenle birlikte yanma olayının daha verimli olması ve bunun sonucunda da maksimum basınç değerinin arttığı düşünülmektedir.

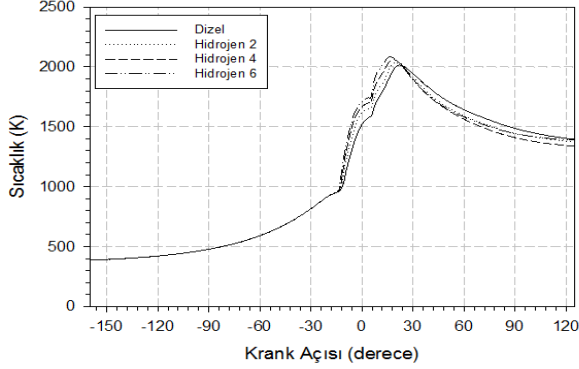


Şekil 3. Her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için krank açısı ile silindir içi basınç değişimi

Şekil 4.’de her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için silindir içi sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde karışım oranı arttıkça sıcaklık değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu durum özellikle -30 ile 30 krank açısı aralığında belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu sonucun silindir içerisindeki yanma sürecinin iyileştiğinin bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Kullanılan

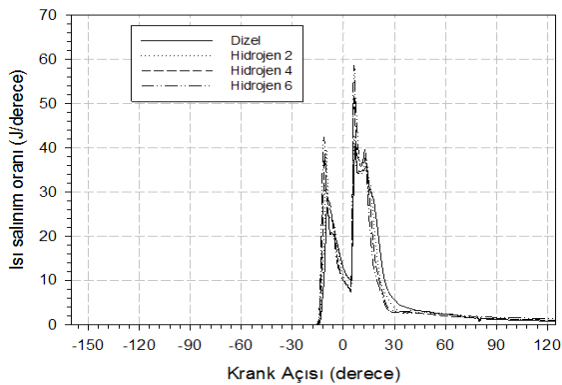
## Dizel Motorlarda Yakıtta Hidrojen Katkısının Yanma, Performans ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

motorun multijet yani çok püskürtmeli olduğu düşünülürse, tüm grafiklerde olduğu gibi sıcaklık grafiğinde de iki belirgin artış anlamlı hale gelmektedir.



Şekil 4. Her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için krank açısı ile silindir içi sıcaklık

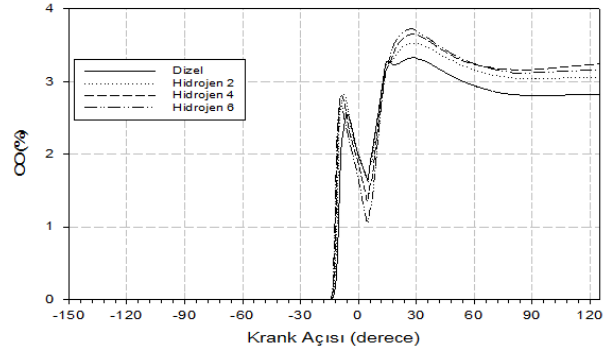
Şekil 5.'de her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için ısı salınım oranları görülmektedir. Bu grafik daha önceki verileri doğrular nitelikte olup karışım oranı arttıkça ısı salınım oranları da artmıştır. Bu şekilde bir önceki grafikte olan sıcaklık değişimleri de daha net açıklanmaktadır. Isı salınım oranı karışım oranlarıyla ilişkili olarak artış göstermiştir. Her iki püskürtmeden sonra yüksek hidrojen oranlarında ısı salınımı maksimum olarak gözlenmiş bunun da yanmanın daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür.



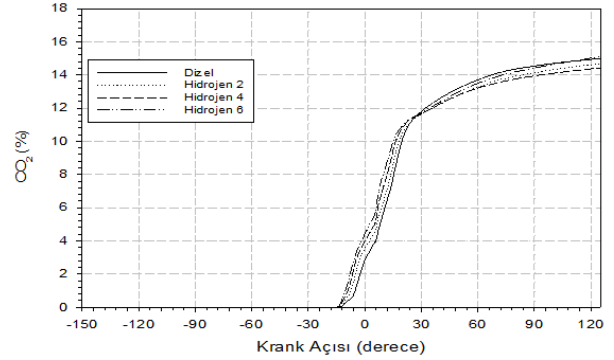
Şekil 5. Her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için krank açısı ile ısı salınım oranları değişimi

Şekil 6. a ve b'de farklı yakıt oranları ve saf dizel yakıtı için CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının karşılaştırmasını içermektedir. CO emisyonları incelendiğinde karışım oranı arttıkça özellikle 2.

püskürmeden sonra CO emisyonunun ortalama değer bazında düştüğü gözlenmektedir. Bu durum ısı salınımı ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak yanmanın hızlandığı ve yanmamış yakıt miktarının azaldığını göstermektedir. Elde edilen sonuç hidrojen ilaveli dizel yakıt kullanımının emisyonlar üzerine etkilerini yansıtması açısından önemlidir. CO<sub>2</sub> emisyonları da CO emisyonlarını destekler nitelikte elde edilmiştir. Karışım oranı arttıkça CO<sub>2</sub> emisyonu da artmıştır. Bu değişim yanmanın daha iyi gerçekleştiğini göstermektedir. Her iki sonuçta hem birbirini destekler niteliktedir hem de alternatif yakıt kullanımı açısından önemlidir.



(a)

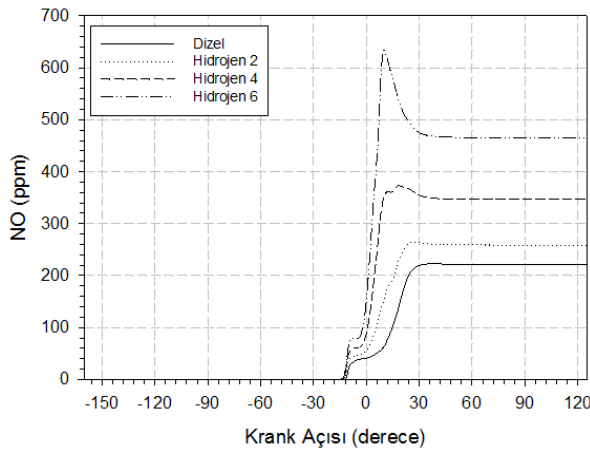


(b)

Şekil 6. Her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için krank açısı ile (a) CO emisyonu (b) CO<sub>2</sub> emisyonu değişimi

Şekil 7. farklı karışım oranları ve saf dizel yakıtı için NO emisyonlarının değişimini göstermektedir. Silindir içi sıcaklıkların yüksek olması yanma bileşeni olan havanın içinde bulunan azotun NO emisyonlarına dönüşmesini tetiklemiştir. Bu durumda karışım oranı arttıkça NO emisyonları da artış göstermiştir. Bu değerler silindir içi emisyon oluşum değerleri olup yanma zamanı sonuna kadar geçen sürede görülmektedir. Bu sebeple bu emisyon türünde

bir artış meydana gelmektedir. Bu durum aynı zamanda hızlı ve kısmi düzensizliklerin bir sonucudur. Bu sebeple yanma kontrolü gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Dizel yakıtı içerisindeki ilave hidrojen oranı arttıkça NO emisyon değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bu durum silindir içerisinde oluşan yüksek sıcaklıklar sonucu oluşmuştur. Bu bağlamda, ilave hidrojen miktarı arttıkça yanma iyileşmiş ve silindir içi sıcaklık artmış buna paralel olarak da NO emisyonlarında artış meydana gelmiştir.



Şekil 7. Her bir karışım oranı ve saf dizel yakıtı için krank açısı ile NO emisyon değişimi

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bilindiği üzere içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt kullanımı yıllardır çalışılan ve hala geçerliliği devam eden önemli konulardan birisidir. En önemli enerji kaynaklarından biri olarak gösterilen hidrojenin farklı oranlarda dizel yakıtı içerisine eklenerek kullanımı da bu çalışma kapsamında araştırılarak sunulmuştur. İncelenen literatür ve elde edilen bulgular neticesinde bu çalışmadan elde edilen belirgin sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Hidrojen farklı oranlarda dizel yakıtı içerisine eklenerek kullanılabilir.
- Hidrojenin yüksek yanma ve buharlaşma hızı sayesinde içten yanmalı motorlarda yanma süresi azalmaktadır.
- Hidrojen katkı oranı arttıkça silindir içi basınç, sıcaklık, ısı salınım oranı ve NO emisyonları başta olmak üzere motor performansı ve bazı emisyon türleri artış göstermektedir.

- Hidrojen oranı arttıkça CO emisyonunda kısmi azalma gözlenirken buna bağlı olarak CO<sub>2</sub> ve is emisyonlarında kısmi artış gözlenmiştir.

- Hidrojen artışı motor performansını ve yanma hızını kesinlikle artırdığı sonuçlarda görülmektedir.

- Daha yüksek motor performansı ve düşük emisyon değerleri için yanmanın kontrol edilmesi gerektiği, püskürtme başlangıç-bitiş açılarının ve püskürtme süresinin ayarlanması gerektiği bu sonuçlar neticesinde ön görülmektedir.

#### 5. Kaynaklar

1. Birsen, B., (2008). Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 84s.
2. www.bilgiustam.com/ Hidrojen kullanma yöntemleri ve içten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımı. 20 Aralık 2015.
3. Köse, H., (2012). Hidrojenin çift yakıt modunda ilavesinin motor performans ve emisyon üzerine etkisinin deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 90s.
4. Gül, K.E., (2006). Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performans etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 110s.
5. Çeper, B.A., (2009). Hidrojen-doğal gaz karışımlarının içten yanmalı motorlarda kullanılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 154s.
6. Verhelst, S., Vancoillie, J., Naganuma, K., De Paepe, M., Dierickx, J., Huyghebaert, Y. and Wallner, T., (2013). Setting a best practice for determining the EGR rate in hydrogen internal combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 2490-2503.
7. Knop, V., Benkenida, A., Jay, S. and Colin, O., (2008). Modelling of combustion and nitrogen oxide formation in hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 5083-5097.
8. Rakopoulos, C.D., Kosmadakis, G.M. and Pariotis, E.G., (2010). Evaluation of a combustion model for the simulation of hydrogen spark-ignition engines using a CFD code, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 12545-12560.
9. Dhole, A.E., Yarasu, R.B., Lata, D.B. and Priyam, A., (2014). Effect on performance and emissions of a dual fuel diesel engine using hydrogen and

Dizel Motorlarda Yakıtta Hidrojen Katkısının Yanma, Performans ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

producer gas as secondary fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 8087-8097.

- 10.**Okcu, M., (2016). Dizel motorlarda yakıtta hidrojen katkısının yanma, performans ve emisyon üzerine etkilerinin incelenmesi, Doktora Semineri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 55s.