

Pilot Yakıt Olarak Dizel/n-Heptan, Dizel/Toluen Kullanan Dizel Bir Motorda CNG İlavesinin Etkileri

Salih ÖZER^{*,a}, Erdiñç VURAL^b

^{a,*} Muş Alparslan Üniversitesi Makine Mühendisliđi Bölümü, ORCID: 0000-0002-6968-8734, MUŞ 49100, TÜRKİYE

^b Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mülkiyet ve Koruma Bölümü, ORCID: 0000-0002-8018-2064, AYDIN 090100, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.02.2020
Kabul: 21.04.2020

Anahtar Kelimeler:

Dizel motor, CNG, n-heptan, toluen, motor performansı, egzoz emisyonu

^{*}Sorumlu Yazar:

e-posta:
s.ozer@alparslan.edu.t

r

ÖZET

Dünyada var olan emisyon kısıtlamaları nedeniyle dizel motorlarının üretim süreçleri sekteye uğramıştır. Çünkü dizel motorlarının diğer motor çeşitlerine göre çevreyi daha çok kirlettiği yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır. Bu nedenle dizel motorlarının emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmaların başında ise alternatif yakıtların kullanımı gelmektedir. Bu alternatif yakıtlardan ticari olarak kullanılabilen en önemli yakıtlar gaz yakıtlarıdır. Gaz yakıtları içerisinde ise sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) önemli bir yere sahiptir. Dizel motorlarında CNG kullanımında bazı kısıtlamaların olduğu bilinen bir gerçektir. Bu çalışma hem çevreci hem de ekonomik bir yakıt olan CNG'nin dizel motorlarında kullanımındaki olumsuzlukların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla pilot yakıt olarak kullanılan dizel yakıtına hacimce %2,5, %5 ve %10 oranında toluen ve n-heptan ilave edilerek her bir pilot yakıt karışımına da tüketilen sıvı yakıtın %20 ve %40 oranına denk CNG emme manifoldundan verilmiştir. Tüm yakıt karışımları ile motor deneyleri 1 kW, 2 kW, 3 kW ve 4 kW motor yüklerinde 3000 d/dak motor hızında tekrarlanmıştır. N-heptan katkılı pilot yakıtta CNG ilavesi ile birlikte fren özgül yakıt tüketiminde ve egzoz gazı sıcaklığında artış görülürken toluenli yakıt karışımı ile yakıt tüketiminde artış, egzoz gazı sıcaklığında ise azalma görülmüştür. Bunun yanında CNG ilavesi ile birlikte hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarında artış azotoksitler (NOx) ve is emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. n-heptan katkılı yakıtta CNG ilavesi ile birlikteyse tüm motor emisyon değerlerinde iyileşmenin olduğu görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2020.01.01>

Effects of CNG addition in a diesel engine using diesel/n-heptane, diesel/toluene as pilot fuel

ARTICLE INFO

Received: 20.02.2020
Accepted: 21.04.2020

Keywords:

Diesel engine, CNG, n-heptane, toluene, engine performance, exhaust emissions

^{*}Corresponding

Authors

e-mail:
s.ozer@alparslan.edu.tr

ABSTRACT

The production processes of diesel engines have been interrupted due to the emissions restrictions that exist in the world. Because diesel engines have been proven to pollute the environment more than other types of engines. Therefore, efforts to reduce the emissions of diesel engines have gained momentum. At the beginning of these studies is the use of alternative fuels. Of these alternative fuels, the most important commercially available fuels are gas fuels. In gas fuels, liquefied petroleum gas (LPG) and compressed natural gas CNG have an important place. It is a known fact that there are some restrictions on the use of CNG in diesel engines. This study aimed to eliminate the negative effects of CNG, which is both an environmental and economical fuel, on the use of diesel engines. For this purpose, toluene and n-heptane were added to the diesel fuel used as pilot fuel by 2.5%, 5% and 10% by volume and given to each pilot fuel mixture from the CNG intake manifold equivalent to 20% and 40% of the liquid fuel consumed. Engine experiments with all fuel mixtures were repeated at 3000 rpm with 1 kW, 2 kW, 3 kW and 4 kW engine loads. With the addition of CNG to the N-heptane-doped pilot fuel, the brake specific fuel consumption and exhaust gas temperature increased, while the toluene fuel mixture increased fuel consumption and

the exhaust gas temperature decreased. In addition, increase in hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) emissions along with CNG addition were found to decrease in azotoxits (NO_x) and soot emissions. with the addition of CNG to n-heptan added fuel, it was observed that there was an improvement in all engine emission values

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2020.01.01>

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava kirliliği, çevreye ve insanlara zarar veren etkenlerin başında kabul edilmektedir. Bu nedenle çevre kirliliğine neden olan etmenlerin azaltılması ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artış göstermektedir. Hatta ülkeler bazında antlaşmalar yapılmakta ve bu kirliliği sınırlandıracak kurallar ve kısıtlamalar üzerinde durulmaktadır [1]. Çağımızda şehirlerde hava kirliliğine neden olan en önemli kaynakların başında motorlu araçlar gelmektedir. Bu nedenle motorlu araçlara getirilen emisyon kısıtlamaları her geçen gün daha da zorlaştırılmaktadır. Fakat halen motor üreticileri klasik yakıtlarla (benzin, mazot, LPG) çalışan motorların üretimine ise devam etmektedir. Çünkü hali hazırda geliştirilmiş üretim yöntemleri ve standartlaşmış üretim teknikleri ile motor ve bu sektöre bağlı motorlu araçların üretimi devam etmektedir. Tüm bunlar yaşanırken insanlık bir çıkmaza girmektedir. Bir yanda içten yanmalı motorların çevre kirliliği yaydığı ve bazı sınırlandırmalara rağmen istenilen aşamaya gelemediği bilinmekte diğer tarafta ise insanoğlunun bu motorları birçok yerde kullanmasının zorunluluk haline geldiği aşikârdır. Özellikle dizel motorlardaki emisyonların bazı parametrelerinin sınırlandırılmaması nedeniyle birçok firma dizel motor üretiminden en azından binek taşıt araçları için vazgeçmeye başlamaktadır. Fakat üretimin durdurulmasının bir çözüm olmadığı bunun yerine benzer ve alternatif arayışların olduğu da bilinmektedir. Burada hali hazırda yapılacak çalışmaların başında dizel motorlarının emisyonlarının azaltılması gelmelidir. Günümüz şartlarında ise emisyonları azaltmanın en kolay yolu alternatif yakıtların kullanımı ile gerçekleşebilir. Bu nedenle yapılması gereken en önemli faaliyet bu motorların rektifiye edilmesi ve alternatif yakıtların kullanılarak hem çevreci hem ekonomik olmasının sağlanmasıdır.

Son yıllarda dizel motorlarındaki emisyonların azaltılması ile ilgili olarak gaz yakıtlarla ilgili yapılan çalışmalar artış göstermiştir. Özellikle doğalgaz [2-4] ve türevleri ile hidrojenin [5-7] gelecekte önemli bir alternatif yakıt olacağı üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Ayrıca içten yanmalı motorlarda (İYM) biyokütle ile ilgili (biyodizel, alkol) çalışmalarında

arttığı bir gerçektir [8-9]. Dizel yakıtına alternatif olarak sunulan yakıtlardan biyodizel ve gaz yakıtlar ticari olarak da pazarlanabilir aşamalara gelmiştir. Bunların arasında LPG ve türevleri ise dünya üzerinde ticari olarak yaygın bir satış ağına sahip olan gaz yakıt türüdür. Birçok firmanın benzinli araçlarda LPG kullanımını sağlayan sistemleri ticari olarak satışa sunuyor olmasında LPG'nin yaygınlaşmasında önemli bir aşamadır. Hatta bazı firmaların (Audi, Fiat, Mercedes, Opel, Seat, Skoda, Volkswagen, Temsa, Honda, Iveco, Man, Renault, Scania, Solaris vs.) artık sıfır araçlarını bile fabrikadan LPG montajlı satışı LPG ve türevlerinin geldiği ticari boyutu göstermektedir [10]. Benzinli motora sahip araçlarda LPG ve türevleri ekstra bir ilave gerektirmeden çalışabilmektedir. Buji ile ateşlenen LPG silindir içerisinde tutuşmakta ve yanma gerçekleşmektedir. Fakat bu durum dizel araçlarda biraz farklıdır. Bilindiği gibi dizel motorlarında sıkıştırılan havanın üzerine püskürtülen dizel yakıtı ile yanma gerçekleşmektedir. Bu nedenle %100 gaz yakıtların motor üzerinde bir değişiklik yapılmadan kullanılmasının bazı olumsuzlukları mevcuttur. Bu tür gaz yakıtlarının (LPG, CNG, LNG ve hidrojen) dizel araçlarında düzenlemeler yapılmadan kullanılmasında bazı sınırlandırmalar mevcuttur. Son yıllarda ise bu sınırlandırmalara yönelik yapılan araştırmalar hız kazanmaktadır.

Motorlu araçlarda gaz yakıtlar arasında en yaygın kullanılanı her ne kadar LPG ise de son yıllarda LPG'nin bir türü de olan CNG'de yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu gaz türü sıkıştırılmış doğalgaz ismi ile anılmaktadır. 200 – 250 bar basınç aralığında depolanma kabiliyetine sahip olan bu gaz türü ısıtma, otomotiv ve ulaşım sektöründe yaygınca kullanılmaktadır. Son dönemlerde birçok araç üreticisi firma bu konu üzerinde çalışmalarına hız vermiştir. Genel olarak “doğalgaz yakıtlı motor” üretimi üzerindeki çalışmaların 2025 yılında sonuçlandırılacağı ve ticari olarak artık doğalgazlı motorların hayatımıza gireceği düşünülmektedir. Bunun içinde CNG dağıtım istasyonlarının sayısının artırılması için firmalar teşvik edilmektedir. Dünya her ne kadar elektrikli araç üretimine odaklanmış olsa da büyük iş makineleri başta olmak üzere kamyonlar ve otobüsler gibi güç ve tork isteyen araçlarda dizel

motor kullanımı zorunludur. Bunun içinde dizel motorlarının olumsuzluklarını azaltacak olan CNG kullanımı önemli bir yere sahiptir. Çünkü bu tür motorlara sahip taşıtlarda CNG hem çevreci hem de ekonomik boyutu ile teşvik edici bir yere sahiptir [11-12].

Senthilraja et al., [13] tek silindirli dört zamanlı bir motorda pamuk yağı biyodizeli etanol karışımına doğalgaz ilavesinin performans ve emisyonlar açısından etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada CNG'yi emme manifoldundan hava ile birlikte motora ilave etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular biyodizel etanol karışımı ile kullanılan bir motorda CNG ilavesinin NO_x ve CO₂ emisyonlarında azalmaya, CO ve HC emisyonlarının ise artışına neden olmuştur.

Zhang et al., [14] son yıllarda deniz taşımacılığında kullanılan gemilerin motorlarında kullanılan sıvılaştırılmış doğalgazın (LNG) çevreye bıraktığı etkileri incelemişlerdir. Bu amaçla bu tip motorlardaki en önemli emisyon olarak görülen partikül miktarının etkileri üzerinde durmuşlardır. Partikül emisyonları dizel motorlarında istenmeyen fakat yakıtın tam yanamaması sonucunda çevriyi fiziksel olarak da kirleten önemli bir emisyondur. Yaptıkları çalışmada dizel yakıtına LNG ilavesi ile birlikte partikül emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca laboratuvar koşullarında yapılan yanma incelemesinde de LNG'nin dizel yakıtına göre partikül emisyonları miktarı oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Jinwen et al., [15] 6 silindirli turbo şarjlı bir motorda dizel yakıtına kütlece değişik oranlarda doğalgaz ilavesinin motor performansına ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla doğalgazı emme manifolduna bir kendi yaptıkları gaz enjektörü aparatı ile ilave etmişlerdir. Bu çalışmada türbülanslı bir ilavenin silindir içerisindeki yanmaya etkilerini de araştırmışlardır. Bu amaçla imal ettikleri aparatın yönünü değiştirerek etkilerini de incelemişlerdir. Ayrıca doğalgazın silindir içerisine püskürme avansının yanma üzerindeki değişimlerini gözlemek için doğalgazın değişik püskürtme avanslarında silindir içerisine gönderilmesini sağlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar göstermiştir ki, dizel yakıtına doğalgaz ilavesi ile birlikte enjeksiyon zamanlamasının değiştirilmesi yanma süresini ve silindir içi basıncı değiştirerek emisyon değerlerini etkilemektedir. Ayrıca emme manifolduna bağlanan doğalgaz enjektörünün yönü de yanmada etkilidir.

Amin et al. [16] yaptıkları bu çalışmada karma olarak dizel/doğalgaz yakıt karışımı ile çalışan bir

motorun termik veriminin yükseltilmesi için doğalgaz basınç değerlerinin silindir içerisindeki yanmaya etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla çalışmalarını teorik hesaplama ve uygulamalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Teorik olarak hesaplamalarını uygulamaya dökerek sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çift yakıt ile çalışan bu sistemde pilot yakıt olarak kullanılan dizel yakıtının püskürtme basıncının aşırı artırılmasının termal verimi düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bunun yanında doğalgaz basıncının değiştirilmesinin yanmayı etkilediğini bildirmişlerdir.

Zhongshu et al., [17] pilot yakıt olarak motorin kullana bir motorda maksimum ne kadarlık bir doğalgaz ilavesi yapabileceğini araştırmışlardır. Bu amaçla altı silindirli turbo şarjlı bir motor kullanmışlardır. Deneyler sırasında motor performansı ve egzoz emisyonu değerlerini de ölçerek doğalgaz miktarının etkilerini karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda dizel yakıtına %75 oranına kadar doğalgaz ilave edilebileceğini görmüşlerdir. Ayrıca doğalgazın ilavesinin zamanlamasının önemine de vurgu yapmışlardır

Wang et al., [18] doğalgazlı bir motorda enjeksiyon ve ateşleme avanslarının etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Ateşleme avansının doğalgazla çalışan motorlarda yanma parametreleri açısından etkili bir mekanizma olduğunu bildirmişlerdir. Motorun birebir modeli üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada ayrıca motorun her bir avans değişimi sırasında silindir içi yanma ve ısı yayılımı grafiklerini de karşılaştırma imkanı bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmada doğalgazın avansının yanma parametrelerini doğrudan etkilediğini ve önemli bir değişken olduğunu bildirmişlerdir.

Distaso et al., [19] dizel yakıtı ile çalışan bir iş makinasında 800 ila 3500 dev/dak arasındaki motor hızlarında ve 5 farklı motor yük değerlerinde CNG ilavesinin motor performansı ve partikül emisyonları açısından etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak ise partiküllerin boyutları ve miktarını da incelemişlerdir. Dizel yakıtına doğalgaz ilavesi ile birlikte motor gücünün ve motor torkunun düştüğünü, partikül miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun yanında ise motor yükünün ve motor hızının partikül miktarı üzerinde etkili olduğunu görmüşlerdir. Bu amaçla yaptıkları çalışmada en yüksek partikül miktarının ise %80 motor yükünde oluştuğunu bildirmişlerdir.

Sezgin [20] yaptığı yüksek lisans tezinde bir dizel motoru CNG motoruna dönüştürerek %100 CNG ile

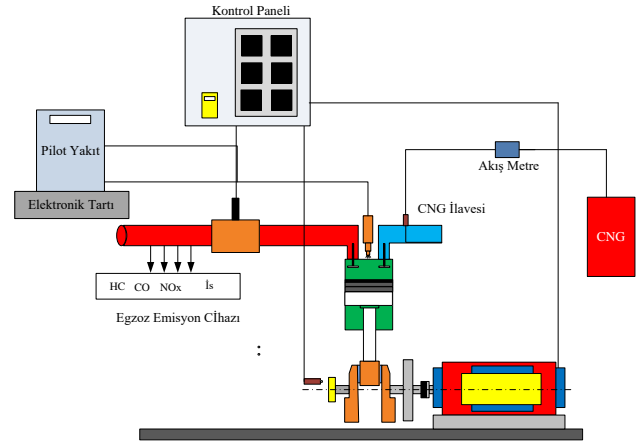
çalıştırılmasını sağlamıştır. Bu amaçla motor üzerindeki pistonu değiştirmiş ve enjektör yerine de buji takarak motorun fiziksel özellikleri üzerinde oynama yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar motor üzerindeki bu değişikliklerle motorun CNG ile çalıştırılabileceği göstermiştir.

CNG giderek artan bir talep ile motorlu araçlarda kullanılmaya devam etmektedir. Özellikle ağır iş makinelerinin emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak gelecekte çok kullanılacak bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Öyle ki gerek ticari firmalar gerekse araştırmacılar CNG'nin motorlu araçlarda kullanımı ile ilgili araştırmalarına hız vermiştir. Bu amaçla kurulmuş birçok CNG istasyonu bulunmaktadır ve sayısı dünya üzerinde de hızla artmaktadır. Benzinli motora sahip araçların CNG dönüşümü rahatlıkla yapılmaktadır. Fakat dizel araçlarla ilgili motorlarının çalışma sisteminden kaynaklanan sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle dizel araçların %100 CNG ile çalıştırılması için mekanik sistemlerinde köklü değişiklikler gerekmektedir. Bu tür değişim işlemleri hem maliyetli hem de zaman aldığı için birçok ticari firma CNG ilavesini dizel yakıtı ile belirli miktarlarda kullanmanın önermektedir.

Literatür bölümünde de belirttiğimiz gibi CNG ile yapılan çalışmalarda motor avansının değiştirilmesinin motor performansı ve emisyonlar açısından olumlu yada olumsuz sonuçlar oluşturduğu bildirilmiştir. Motor avansının değiştirilmesi günümüz taşıtlarında elektronik kontrol ünitesinden gerçekleştirilmektedir. Fakat yakıt içerisine bazı kimyasallar katılarak da değiştirilebileceğini ifade eden çalışmalarda mevcuttur. n-heptan ve toluen bu tür kimyasallardan bir kaçıdır. Yapılan çalışmalar n-heptan ve toluenin dizel yakıtının içerisine karıştırılması ile motor avansını etkilediği bildirmektedir [21]. Bu çalışma tek silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda CNG ilavesinin pilot yakıtı ilave edilen n-heptan ve toluenin kullanımı ile nasıl değiştiğini amaçlamıştır. Bu sebeple öncelikle pilot yakıt içerisine hacimce %2,5, %5 ve %10 oranında n-heptan ve toluen ilave edilmiştir. Sonrasında pilot yakıt ile çalıştırılan bu motorda emme manifoldundan bir akış metre ile %20 ve %40 oranında CNG ilave edilerek etkileri incelenmiştir. Bu amaçla kullanılan deney düzeneğindeki motor 3000 d/dak motor hızında 1 kW, 2 kW, 3 kW ve 4 kW motor yüklerinde çalıştırılarak her bir yakıt karışımı için yakıt tüketim değeri, egzoz gaz sıcaklık ve egzoz emisyon (HC, CO, NOx ve is) değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

2. MATERYAL METOT (MATERIAL METHOD)

Motor deneyleri tek silindirli sıkıştırılmalı ile ateşlemeli dört zamanlı Genpower marka jeneratörün GDG 7000 modelinde gerçekleştirilmiştir. Dizel motor direk enjeksiyon sistemine sahiptir. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de verilmektedir. Deneylerde kullanılan yakıtların teknik özellikleri Tablo 1'de, jeneratörün teknik özellikleri ise Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 1. Deney Düzeneğinin Şematik Resmi. (Schematic Picture Of The Experimental Assembly)

Tablo 1. Deney Yakıtlarının Teknik Özellikleri. (Technical Properties Of Experimental Fuels)

Özellik	Dizel	CNG (%90 CH ₄)	n- heptan	Tolun
Kimyasal Formül	C ₄ -C ₁₂	CH ₄ - C ₂ H ₆ - C ₃ H ₈	C ₇ H ₁₆	C ₇ H ₈
Karbon/hidrojen Oranı (m/m)	-	0.73	0.840	0.913
Setan Sayısı	47	-	56	7.4
Yoğunluk (g/cm ³)	0.824	0.71	0.684	0.866
Stoichiometric hava/yakıt oranı	14.7	16.79	15.30	9.8
Alt ısı Değer (Mj/kg)	43.5	47.17	44.9	40
Burharlaşma Isısı (Mj/kg)	0.41	0.508	0.317	0.351
Parlama Noktası (°C)	483	540	-40	4

Tablo 2. Jeneratörün Teknik Özellikleri. (Technical Specifications Of The Generator)

Motor	
Model	186 FAG
Tip	Hava Soğutmalı- 4 Zamanlı
Silindir Hacmi	418 cm ³
Maksimum Çıkış gücü	5.7 kW

Sıkıştırma Oranı	19:1
Çalıştırma Şekli	Marşlı
Jeneratör	
Maksimum Çıkış Gücü	7 kVA
Sürekli Çalışma Gücü	6 kVA
Frekans	50 Hz

Motorun yükleme işlemi kontrol paneli üzerinde bulunan yükler sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında çekilen gücün değişip değişmediği kablo üstü bir ampermetre ve voltmeter ile düzenli olarak kontrol edilmiştir. Her bir test aşamasında da motor devri düzenli olarak ölçülerek bilgisayar ile kayıt altına alınmıştır. Egzoz emisyon ölçümleri için mobidyc 5000 ölçüm cihazı kullanılmıştır. Tablo 3'de deney araçlarının ölçüm doğruluğu ve hesaplanan belirsizlikler verilmektedir.

Tablo 3. Ölçüm aletlerinin doğruluğu ve belirsizlikler. (Accuracy of measurement instruments and uncertainties)

	Birimi	Doğruluk	Belirsizlik
Motor Gücü	kW	-	± %0,35
Yakıt Debisi (kg/h)	kg/h	-	± %0,85
Özgül Yakıt Tüketimi (Sıvı Yakıt)	gr/kWh	-	± %2,15
Özgül Yakıt Tüketimi (CNG)	gr/kWh	-	± %2,69
Termik Verim	%	-	± %1,01
HC	ppm	0-10	± %1,6
CO	% vol.	0-20	± %2,1
O ₂	% vol.	0-2000	± %0,13
İs	%	0-21	± %2,6
NO _x	ppm	0-5000	± %2,9
Motor Devri	rpm	±1 (d/d)	-
Yakıt Tüketimi	g	± %0.001	-
Sıcaklık	(°C)	±1	-
Zaman	(s)	±1	-

CNG, motor sistemine çelik bir tüpten 200 bar basınçta sıkıştırılmış halde gönderilmiştir. Tüp 12,5 m³'lük gaz depolama kapasitesine sahiptir. CNG'nin silindir içerisinde gönderilmesi için tasarlanan sistem ana vana, gaz basıncının düşürülmesi için düşürme regülatörü, hassas gaz vanası, kütle akış kontrol valfi ve geri tepme valfinden oluşmaktadır. Bu aşamadan geçen gaz motorun emme manifolduna verilerek silindir içerisine gönderilmiştir. Dizel yakıtının tüketim miktarı ise 0,001 hassasiyetindeki bir terazi ile gazın tüketim miktarı ise akış metre üzerinden tespit edilmiştir.

Pilot ateşleyici olarak kullanılacak olan dizel yakıtının içerisine hacimce %2,5, %5 ve %10 oranında toluen ve n-heptan ilave edilerek sıvı yakıt karışımları oluşturulmuştur. Bu karışımlardan sadece dizel yakıt

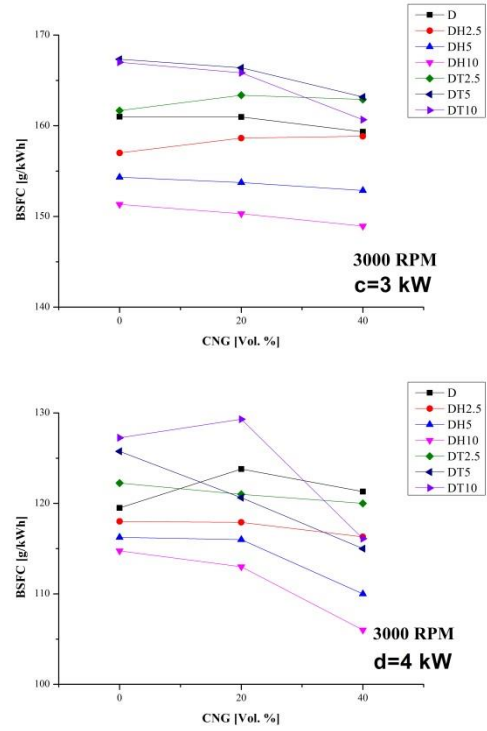
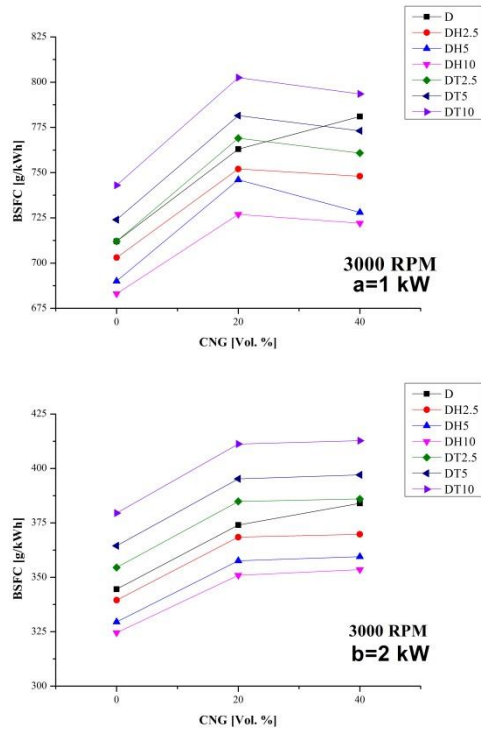
olanlarına D, toluenle oluşturulanlara DT2.5, DT5 ve DT10, n-heptan ile oluşturulanlara da DH2.5, DH5 ve DH10 kısaltmaları verilmiştir. Motor deneyleri sabit motor hızında (3000 d/dak) yapılmıştır. Bu amaçla jeneratör öncelikle D, DT2,5 DT5, DT10, DH2.5, DH5 ve DH10 yakıtı ile 1 kW, 2 kW, 3 kW ve 4 kW güç üretecek şekilde yüklenmiştir. Bu aşamada emisyon değerleri (CO, NO_x, HC ve is) ve yakıt tüketim değerleri kayıt altına alınmıştır. Yapılan bu ön çalışmaların sonrasında ise motorun saatlik yakıt tüketim değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler baz alınarak emme manifoldundan kütlece %20 ve %40 oranında CNG gazı akış metre üzerinden kontrol edilerek ilave edilmiştir. Tüm bu aşamalarda motorun kararlı hale geçmesi beklenmiş, motorun emisyon değerleri ile yakıt tüketim değerleri tekrar ölçülerek yeniden kayıt altına alınmıştır. CNG her defasında akış metre üzerinden kontrol edilerek silindir içerisinde kg/h olarak ilave edilmiştir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi (Brake Specific Fuel Consumption)

Şekil 2'de değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin fren özgül yakıt tüketim değerine etkisini gösteren grafikler verilmektedir. Dizel yakıtına toluen ilavesi ile birlikte tüm motor yüklerinde yakıt tüketim değerlerinde dizel yakıtına göre artış n-heptan ilavesi ile birlikteyse azalma görülmektedir. Dizel yakıtına ilave edilen n-heptanın ısı değerinin ve setan sayısının yüksek olması kısmen yanmayı olumlu etkilemiş ve yanmanın iyileşmesi ile birlikte yakıtın tamamından verim elde edilmesini sağlamıştır. Öbür taraftan toluen ilavesi ile birlikte yakıt tüketim değeri artmaktadır. Bu durumu yakıt karışımlarının düşen ısı değeri ve setan sayısı ile açıklamak mümkündür. Her iki yakıt karışımının pilot ateşleyici olarak kullanıldığı durumda CNG ilavesi ile birlikte 1 kW ve 2 kW motor yüklerinde yakıt tüketim değerleri artarken 3 kW ve 4 kW motor yüklerinde CNG ilavesi ile birlikte yakıt tüketim değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. En yüksek azalma miktarı DH10 yakıt karışımının pilot yakıt olarak kullanıldığı karışımda gerçekleşmiştir. Düşük motor yüklerinde emme manifoldundan ilave edilen doğalgazın miktarının az olması emme manifoldu içerisinde hava ile oluşan karışımın akışkanlığını da etkilemektedir. Böylelikle silindir içerisinde oluşan hava+gaz yakıt karışımı daha yavaş bir şekilde teşkil etmektedir. Bu durumda silindir içerisinde yakıtın tamamından faydalanılmasına mani olmaktadır. Çünkü silindir

içerisine alınan yakıt tam olarak yanmadan egzoz supapları açılarak yakıt karışımının egzozdan atıldığı düşünülmektedir. Bu durum silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığı da etkilenmektedir. Fakat motor yükünün 3 kW ve 4 kW'ya çıkartılması ile birlikte silindir içerisine gönderilen doğalgazın miktarı artmaktadır. Böylelikle emme manifoldundan alınan doğalgazlı kütle yoğunluğu artmakta ve silindir içerisinde daha iyi bir karışım sağlanmaktadır. Ayrıca silindir içerisine alınan tüm yakıt karışımlarının setan sayısı artmaktadır. Artan setan sayısının dizel motorlarında performansın artırılmasında etkili olduğunu bildiren bir çok çalışma mevcuttur [22]. Artan yakıt miktarı ve setan sayısı ile birlikte her bir çevrimde silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığı artmakta ve her bir çevrim için CNG ilavesi ile birlikte yanma verimi artış göstermektedir. Artan yanma verimi ise yakıt tüketim değerini azalmaktadır. Çalışmanın sonuçları literatürdeki [23,24] çalışmaları ile benzerlik göstermektedir.

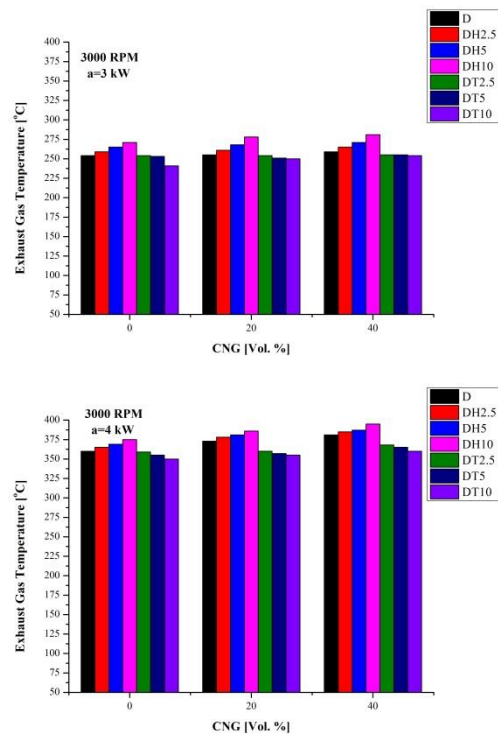


Şekil 2. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin fren özgül yakıt tüketimine etkisi. (The effect of CNG addition on brake specific fuel consumption in an engine powered by different pilot fuels)

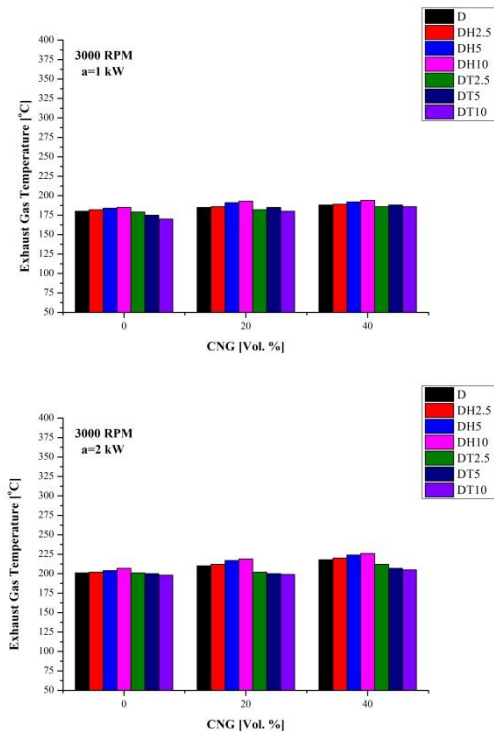
3.2. Egzoz Gaz Sıcaklığı (Exhaust Gas Temperature)

Şekil 3'te değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin egzoz gaz sıcaklığına etkisini gösteren grafikler verilmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı silindir içerisindeki yanmanın bir fonksiyonu olarak görülebilir. Yani silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığı fazlaştığında egzoz gaz sıcaklığı artmaktadır. Fakat bunun yanında silindir içerisinde yanmayan yakıt karışımının egzoz borusunda yanması ile birlikte de egzoz gazı sıcaklığının arttığı durumlardan bahsedilmektedir [25]. Bu nedenle egzoz gazı sıcaklığının yanmanın bir işlevsel durumu gibi düşünmekte fayda vardır. Dizel yakıtına n-heptan ilavesi ile birlikte egzoz gaz sıcaklığı artarken, toluen ilavesi ile birlikte ise azalma eğilimi göstermektedir. n-heptan ilavesi ile birlikte yakıt karışımlarının ısı değeri ve setan sayısı artmaktadır. Artan setan sayısı ve ısı değeri dizel motorlarında yanma verimini etkileyen önemli parametrelerinin başında gelmektedir [23]. Yakıt karışımlarının özelliklerinin iyileşmesi ile birlikte ise silindir içerisinde yanma kısmen iyileşmekte ve böylelikle egzoz gaz sıcaklığının artması beklenen bir durum olarak ortaya çıkmaktadır [26]. Bunun yanında

toluen ilavesi ile birlikte azalan ısı değer, tolueinin buharlaşma ısısının yüksek olması, tutuşma sıcaklığı ve karışımın setan sayısının azalması kısmen yanmayı kötüleştirmektedir. Bu durumda egzoz gaz sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Motor yükünün artırılması ile birlikte tüm yakıt karışımlarında egzoz gaz sıcaklığı artış göstermektedir. Çünkü dizel motorlarında motor yükünün artması demek silindir içerisine alınan yakıt miktarının artırılması ile mümkündür. Böylelikle silindir içerisine alınan daha fazla yakıtın yanması ile yanma sonu sıcaklığı artmaktadır. CNG ilavesi ile birlikteyse egzoz gaz sıcaklığında tüm yakıt karışımlarında ve motor yüklerinde artış görülmüştür. Çünkü CNG'nin ısı değeri pilot yakıt karışımlarına göre yüksektir. Dolayısı ile silindir içerisine ilave edilen CNG miktarının artması ile birlikte yakıt karışımlarının ısı değeri artmakta ve yanma sonu sıcaklığında artış görülmesi beklenen bir durumdur. Egzoz gaz sıcaklığındaki en yüksek değer DH10 pilot yakıt kullanımı ile %40 CNG ilavesinde 4 kW motor yükünde 395 °C olarak tespit edilmiştir. En düşük egzoz gaz sıcaklığı ise 1 kW motor yükünde %0 CNG ilavesi ile DT10 yakıt karışımının kullanılması ile 170 °C olarak ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçları literatürdeki çalışmalar [27] ile benzerlik göstermektedir.



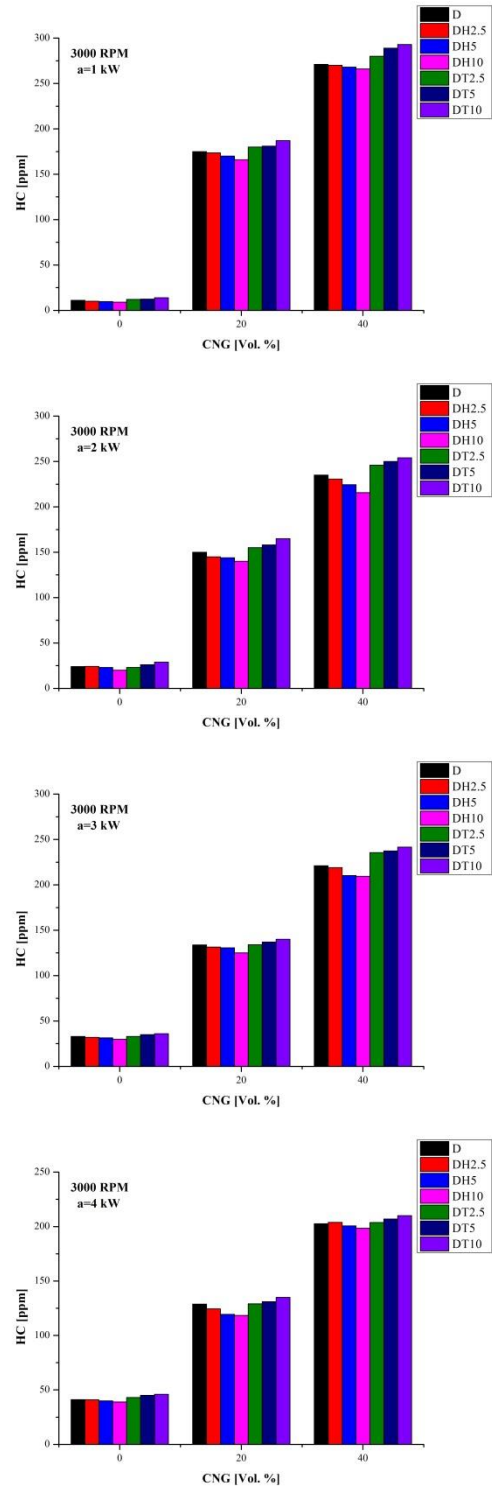
Şekil 3. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin egzoz gaz sıcaklığına etkisi. (Effect of CNG addition on exhaust gas temperature in an engine powered by different pilot fuels)



3.3. Hidrokarbon (HC) emisyonları (Hydrocarbon (HC) emissions)

Şekil 4'te değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin HC emisyonlarına etkisini gösteren grafikler verilmektedir. Dizel yakıtına n-heptan ilavesi ile birlikte tüm motor yüklerinde HC emisyonlarında azalma olduğu görülmektedir. Bu durumu dizel yakıtına ilave edilen n-heptanın miktarı ile de değiştiği görülmüştür. Bilindiği gibi n-heptan ilavesi ile birlikte yakıt karışımlarının ısı değeri ve setan sayısı artmaktadır. Artan ısı değeri ve setan sayısının ise yanmayı kısmen iyileştirerek HC emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. Öbür taraftan dizel yakıtına toluen ilavesi ile birlikte ise HC emisyonlarında artış görülmektedir. Toluenin düşük setan sayısı, ısı değeri ve buharlaşma gizli ısısı değerlerinin dizel yakıtına ilave edilmesi ile birlikte yakıt karışımının yakıt özelliklerini de kötüleştirdiği düşünülmektedir. Bu durumda toluen ilavesinin silindir içerisnde yanmayı kısmen kötüleştirdiği düşünülmektedir. Çünkü içten yanmalı motorlarında HC emisyonlarının oluşumunu tetikleyen önemli bir etken yakıt karışımının kısmen soğuk karışım bölgele ile karşılaşması ve soğuk

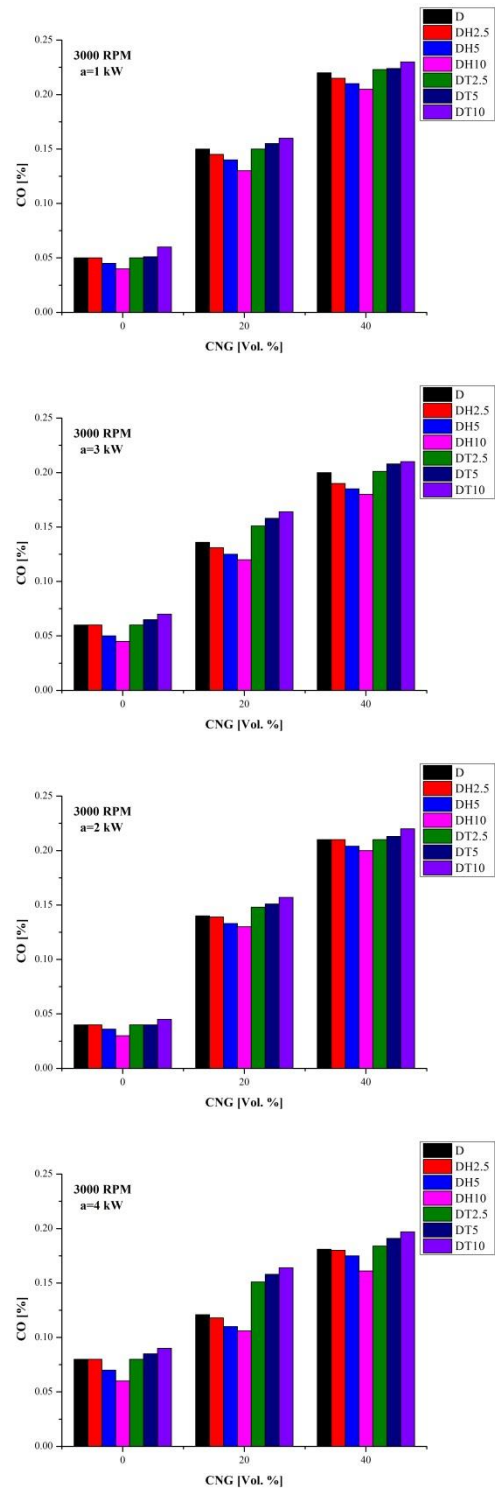
silindir cidarlarına çarpmasıdır. Yüksek uçuculuğu ve gizli buharlaşma ısıları yüksek olan yakıtların silindir içerisinde kısmen soğuk karışım bölgelerinin oluşmasında etkili olduğunu ifade eden çalışmalarda [28, 29] mevcuttur. Bu nedenle toluenin düşük setan sayısı ve ısı değeri ile birleşen buharlaşma gizli ısısının kısmen yanmayı kötüleştirdiği ve HC emisyonlarını arttırdığı düşünülmektedir. CNG ilavesi ile birlikte tüm motor yüklerinde ve tüm pilot yakıt karışımlarında HC emisyonları artmıştır. Silindir içerisinde CNG'nin kısmen yanmadan atıldığı bu nedenle HC emisyonlarının artış gösterdiği düşünülmektedir. Çünkü silindir içerisine alınan yakıt karışımının tam manasıyla yanmadan egzoz sübapının açılması yanmamış yakıt karışımının egzozdan atılmasına neden olacaktır. Bu nedenle çift yakıtlı çalışan dizel motorun emme manifoldundan gönderilen CNG'nin silindir içerisine alınması ve tam manasıyla yanması için gereken sürenin tam olarak yetmediği düşünülmektedir. Bu nedenle genel olarak CNG ile yapılan çalışmalarda CNG'nin zamanlamasının ayarlanmasına yöneliktir. Pilot yakıt olarak kullanılan karışıma n-heptan ilavesi ile birlikte HC emisyonları azalma eğilimi göstermiştir. Bu durumu n-heptanın ısı değeri, setan sayısı ve çabuk alev almasının etkili olduğu düşünülmektedir. Fakat toluenin aynı etkiyi vermediği pilot yakıtı ilave edilen toluen ile HC emisyonların arttığı görülmektedir. Toluen kullanımı ile meydana gelen artışı ise toluenin düşük ısı değeri ve buharlaşma gizli ısısı ile açıklamak mümkündür. Çünkü toluen karışımı ile silindir içerisinde kısmen soğuk bölgeler oluşmakta ve bu da HC emisyonlarını artırmaktadır. Tüm yakıt karışımlarında ve CNG ilavesi ile birlikte motor yükünün artması ile hafif bir azalış eğilimi görülmektedir. Çalışmanın sonuçları literatürdeki [30] çalışması ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin HC emisyonuna etkisi. (Effect of CNG addition on HC emission in an engine powered by different pilot fuels)

3.4. Karbon monoksit (CO) Emisyonları (*Carbon monoxide (CO) emissions*)

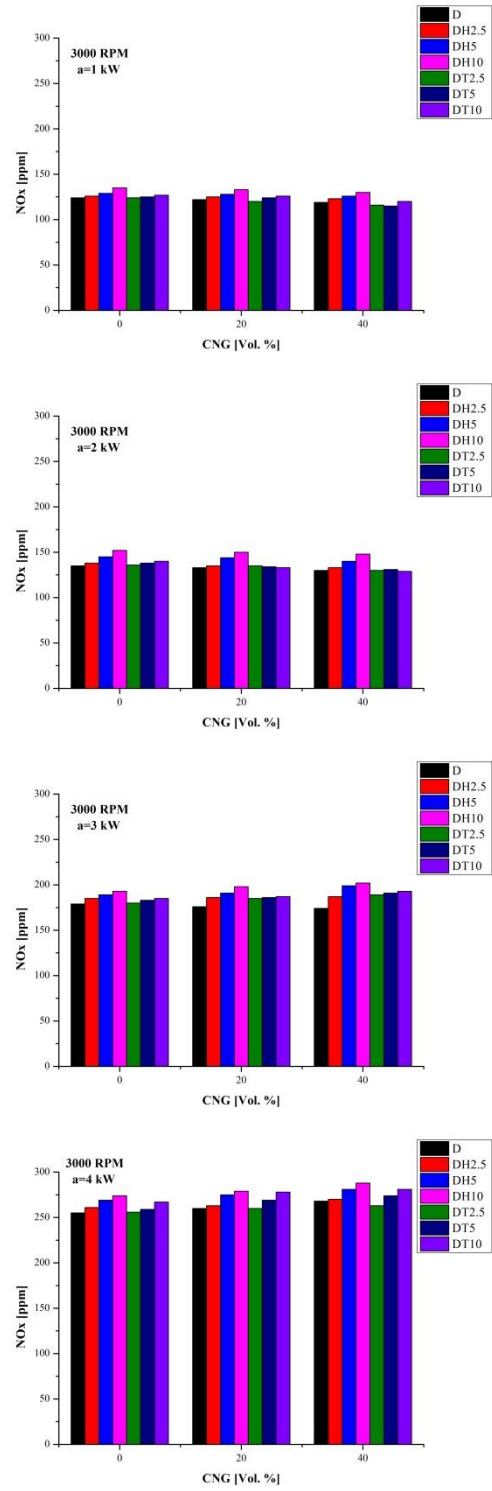
Şekil 5’de değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin CO emisyonlarına etkisini gösteren grafikler verilmektedir. CO emisyonları yanmamış karbon (C) atomlarının egzozdan atılması ile oluşmaktadır. Dizel motorlarında CO emisyonları yok denilecek kadar az oluşmaktadır. Çünkü dizel motorlar hava fazlalığı ile çalışmaktadır. Bu nedenle sürekli yanabilecek miktardan fazla silindir içerisine hava alınmaktadır. Saf dizel yakıtı ile yapılan çalışmada motor yükünün artmasına bağlı olarak CO emisyonun arttığı görülmektedir. Dizel yakıtının içerisine n-heptan ilavesi ile birlikte ise tüm motor yüklerinde CO emisyonlarının düştüğü görülmektedir. Toluen ilavesi ile ise CO emisyonları artmaktadır. Tüm yakıt karışımlarında pilot yakıt ile çalışan motorda CNG ilavesi ile birlikte CO emisyonlarında artış görülmektedir. Düşük ve orta devirlerde hızla artan CO emisyonları motor yükünün artması ile birlikte azalma eğilimi göstermektedir. Çünkü motor yükünün artması ile birlikte silindir içerisine alınan sıvı+gaz yakıt kütlesi artış göstermektedir. Bu artış ise silindir içerisindeki yanma sonu sıcaklığını artırmakta ve böylelikle yanmanın kısmen iyileşmesini sağlamaktadır. Bunun yanında n-heptan katkılı pilot yakıtta CNG ilavesi ile birlikte CO emisyonlarında azalma görülmektedir. Bu durumu n-heptanın yüksek ısı değeri ve yakıt karışımının setan sayısı ile ifade etmek mümkündür. Çünkü n-heptanlı pilot yakıt ile pilot tutuşturma evresi CNG’nin yanabilmesi için daha ideal bir ortamın oluşmasını sağlamaktadır [30]. Böylelikle CO emisyonlar azalmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda CNG ilavesi ile benzer sonuçların oluştuğundan bahsedilmektedir [31, 32].



Şekil 5. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin CO emisyonuna etkisi. (*The effect of CNG addition on CO emission in an engine powered by different pilot fuels*)

3.5. Azot oksit (NO_x) Emisyonları (Nitrogen oxide (NO_x) emissions)

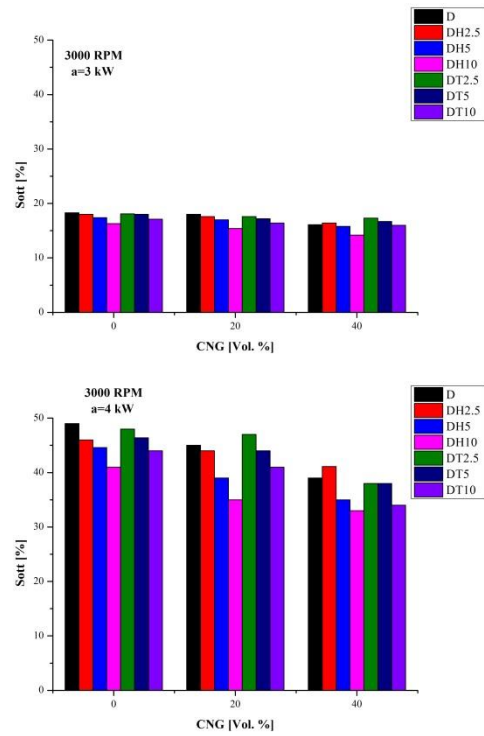
Şekil 6'da değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin NO_x emisyonlarına etkisini gösteren grafikler verilmektedir. Azot oksitler, silindir içerisinde hava ile giren azot (N) gazlarının yüksek sıcaklık altında reaksiyona girerek NO ve bileşenlerine dönüştüğü durumlarda meydana gelmektedir. Yapılan çalışmalarda NO_x emisyonlarının oluşumunda silindir içi sıcaklık, tutuşma gecikmesi ve hava/yakıt oranının öneminden bahsedilmektedir [33]. Grafikler incelendiğinde NO_x emisyonlarının motor yükünün artması ile arttığı görülmektedir. Dizel motorlarında motor yükünün artması silindir içerisine alınan yakıt miktarının artırılması ile olmaktadır. Bu nedenle motor yükünün artmasına bağlı olarak silindir içerisine alınan yakıt miktarı artmakta buda NO_x emisyonlarının artışına neden olmaktadır. Dizel yakıtına n-heptan ve toluen ilavesi ile tüm motor yüklerinde ve yakıt karışımlarında NO_x emisyonları artış göstermiştir. Fakat n-heptan ile yapılan çalışmalarda artışın, toluenli yakıtlarla yapılandır daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumu ilave edilen kimyasalların ısı değerleri, buharlaşma ısıları ve setan sayılarının farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu konuda literatürde farklı sonuçlardan bahsedilmektedir. Özellikle bu tür ilave yakıtların dizel yakıtına katılması ile NO_x emisyonlarını azalttığını [34] ifade eden çalışmalar mevcut ise de NO_x emisyonlarını arttırdığı bildiren çalışmalarda [35] mevcuttur. Bunun yanında CNG ilavesi ile birlikteyse NO_x emisyonlarında motor yüküne göre değişik durumların oluştuğu görülmüştür. CNG ilavesi ile birlikte ise düşük motor yüklerinde (1 kW ve 2 kW) azalma eğilimi gösteriyorken, yüksek motor yüklerinde (3 kW, 4 kW) artış eğilimi göstermektedir. CNG ilavesi ile birlikte silindir içine alınan yakıt kütlelerinin ısı değeri artış göstermekte, buda her bir çevrim için yanma sonu sıcaklığını kısmen arttırmaktadır. Bu durumda NO_x emisyonları artış göstermiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları literatürdeki [36, 37] çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 6. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin NO_x emisyonuna etkisi. (Effect of CNG addition on NO_x emission in an engine powered by different pilot fuels)

3.6. İS Emisyonu (Smoke Emissions)

Şekil 7’de değişik motor yüklerinde farklı pilot yakıt karışımlarına CNG ilavesinin is emisyonlarına etkisini gösteren grafikler verilmektedir. Dizel motorlarında is emisyonları silindir içerisinde yanmayan yakıt zerreciklerinin egzozdan atılması ile oluşmaktadır. Dizel motorlarında is emisyonları silindir içerisinde yakıtların yanması için yeterli havanın olmaması, ve yakıt/hava karışımının ideal şekilde oluşmaması sonucu oluşmaktadır[38]. Motor yükünün artması ile birlikte tüm motor yüklerinde ve yakıt karışımlarında is emisyonlarında artma görülmektedir. Pilot yakıtta CNG ilavesi ile birlikte ise is emisyonlarında azalma eğilimi görülmektedir. Yakıt karışımına ilave edilen CNG miktarının artması ile birlikte ise emisyonlarındaki azalma eğilimi artış göstermeye devam etmektedir. Bu durumu silindir içerisine alınan yakıt karışımlarının ısı değerinin ve setan sayısının artmasının neden olduğu düşünülmektedir. Belirli bir yük için ihtiyaç duyulan yakıt içinde CNG miktarı arttıkça, is oluşumuna daha çok sebep olan, hava ile daha zor karışan, daha zor buharlaşan dizel yakıtı azaldığı için is emisyonu önemli miktarda düşmektedir. Çalışmanın sonuçları literatürdeki CNG/pilot yakıt sistemlerle yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla [39, 40] benzerlik göstermektedir.



Şekil 7. Farklı pilot yakıtlarla çalışan bir motorda CNG ilavesinin İS emisyonuna etkisi. (The effect of CNG addition on Is emission in an engine powered by different pilot fuels)

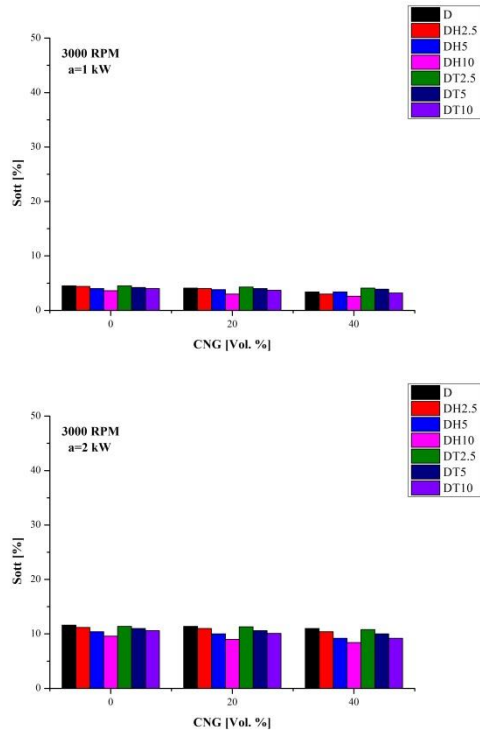
4. SONUÇLAR (RESULT)

Çalışmada dizel bir motorda pilot ateşleyici olarak kullanılan yakıtların miktarlarının etkileri ile kütlece CNG ilavesinin sonuçları irdelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre;

- En düşük FÖYT, 4 kW motor yükünde DH10 yakıt karışımının kullanılması ile %40 CNG ilavesinde 106 gr/kWh olarak tespit edilirken, aynı şartlar altında DT10 yakıt karışımının kullanılması sonucu yakıt tüketim değeri 116 gr/kWh yükselmiştir. Yine en yüksek FÖYT değerinin 802,5 gr/kWh ile 1 kW motor yükünde, %20 CNG ilavesinde DT10 pilot yakıtının kullanılması ile oluştuğu tespit edilmiştir.

- En yüksek egzoz gazı sıcaklığı DH10 pilot yakıt kullanımı ile %40 CNG ilavesinde 4 kW motor yükünde 395 oC olarak tespit edilirken en düşük sıcaklık değeri ise 1 kW motor yükünde %0 CNG ilavesi ile DT10 yakıt karışımı kullanılması sonucu 170 oC olarak ölçülmüştür.

- CO emisyonları 1 kW motor yükünde DT10 yakıt karışımı ile % 40 CNG ilavesinde 293 ppm değeri ile en yüksek değer ölçülürken aynı şartlarda DH10 yakıt karışımı ile 266 ppm değerine düşmüştür.



Tüm motor yüklerinde ve yakıt karışım değerlerinde en düşük HC emisyonu 1 kW motor yükünde %0 CNG ilavesi ile 9 ppm değerinde DH10 yakıt karışımının kullanılması ile oluşmuştur.

- Genel olarak bakıldığında n-heptanlı yakıt karışımının en düşük CO emisyonlarının oluşmasında etkili olduğu görülmektedir. En düşük CO emisyonu 2 kW motor yükünde %0,03 değeri ile %0 CNG ilavesinde oluşmuştur. Aynı şartlar altında %40 CNG ilavesi ile birlikteyse CO değerinin %0,2'ye çıktığı görülmüştür. Çalışmanın tümünde en yüksek CO emisyon değeri %40 CNG ilavesi ile birlikte DT10 pilot yakıt karışımının kullanımı ile %0,23 değeri ile oluşmuştur.

- Pilot yakıtı karıştırılan toluen ve n-heptan ilavesi ile birlikte tüm motor yüklerinde NOx emisyonları artış eğilimi göstermiştir. En düşük NOx emisyon değeri DT5 yakıt karışımı ile %40 CNG ilavesinde 115 ppm değeri ile elde edilirken, en yüksek NOx emisyon değeri DH10 yakıt karışımının kullanılması 288 ppm olarak ölçülmüştür.

- En düşük is değeri 1 kW motor yükünde DH10 pilot yakıtına %40 CNG ilavesi ile birlikte %2,6 olarak tespit edilirken, en yüksek is değeri 4 kW motor yükünde %0 CNG ilavesi ile D yakıtında 549 olarak tespit edilmiştir.

Çalışmanın sonuçları pilot yakıt/CNG ile çalışan bir motorda -heptan ve toluen ilavesinin motor performansı ve emisyonlar açısından olumlu sonuçları olduğunu göstermektedir. Fakat çalışmanın ticari bir boyut kazanması adına motor malzemelerine etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (References)

- [1] M. Akçay and S. Özer, "Experimental investigation on performance and emission characteristics of a CI diesel engine fueled with fusel oil/diesel fuel blends", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Published Online, 1-16 June 2019. Doi:10.1080/15567036.2019.1689317,
- [2] M. Y. E. Selim, M. S. Radwan and H. E. Saleh, "Improving the performance of dual fuel engines

running on natural gas/LPG by using pilot fuel derived from jojoba seeds", *Renewable Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1173-1185, October 2008. Doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.07.015

- [3] G. S. Fritz and I. E. Ralph, "Emissions from heavy-duty trucks converted to compressed natural gas", *SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles*, vol. 102, no. 2, pp. 538-552, 1993.
- [4] R. V. Basshuysen, *Natural gas and renewable methane for powertrains: Future strategies for a climate-neutral mobility*, Switzerland: Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [5] Der Volkswagen Deutschland, "TGI Golf", https://www.volkswagen.de/de/models/golf-tgi.html#vw_m246_m532_jump_id, *Der Volkswagen Deutschland* 2017, [Erişim Tarihi: 19/02/2020].
- [6] Ö. Can, "Bir DI dizel motorda etanol ön karışimli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [7] H. Zhao, *HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry*, England: Woodhead Publishing Limited, 19-509, 2007.
- [8] R. G. Papagiannakis and D. T. Hountalas, "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas", *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 18-19, pp. 2971-2987, June 2004. Doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.013
- [9] V. Pirouzpanah, R. K. Saray, A. Sohrabi and A. Niaei, "Comparison of thermal and radical effects of EGR gases on combustion process in dual fuel engines at part loads", *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 1909-1918, May 2007. Doi:doi.org/10.1016/j.enconman.2007.01.031.
- [10] A. Brozat, "Volkswagen Group expedites joint extension of gas mobility", <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.volkswagen-media-services.com%2Fen%2Fdetailpage%2F%2Fdetail%2FVolkswagen-Group-expeditesjoint-extension-of-gas-mobility%2Fview%2F4948078%2F&date=2017-12-21>, 2017, [Erişim Tarihi: 19/02/2020].
- [11] M. Karabektas, G. Ergen and M. Hoşöz, "The effects of using diethylether as additive on the performance and emissions of a diesel engine

- fuelled with CNG”, *Fuel*, vol. 115, pp. 855-860, June 2014. Doi:doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.062.
- [12] R. Singh and S. Maji, “Performance and exhaust gas emissions analysis of direct injection CNG-diesel dual fuel engine”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol.4, no.3, pp. 837-838, March 2012. Doi:https://pdfs.semanticscholar.org/3f7f/f9bfc7590e351ae485ac6148aa360b68efca.pdf
- [13] R. Senthilraja, V. Sivakumar, K. Thirugnanasambandham and N. Nedunchezian, “Performance, emission and combustion characteristics of a dual fuel engine with Diesel Ethanol e Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel”, *Energy*, vol. 112, no.2016, pp. 899-907, Oct 2016. Doi:https://doi.org/10.1007/s11356-018-3681-8
https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.114
- [14] C. Zhang, A. Zhou, Y. Shen, Y. Li and Q. Shi, “Effects of combustion duration characteristic on the brake thermal efficiency and NOx emission of a turbocharged diesel engine fueled with diesel-LNG dual-fuel”, *Applied Thermal Engineering*, vol.127, no.2017, pp. 312-318, March 2017. Doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.034
- [15] J. You, Z. Liu, Z. Wang, D. Wang and Y. Xu, “Impact of natural gas injection strategies on combustion and emissions of a dual fuel natural gas engine ignited with diesel at low loads”, *Fuel*, vol. 260, no.2020, pp. 116414, May 2020, Doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116414.
- [16] A. Yousefi, H. Guob, M. Birouka and B. Likob, “On greenhouse gas emissions and thermal efficiency of natural gas/diesel dual-fuel engine at low load conditions: Coupled effect of injector rail pressure and split injection”, *Applied Energy*, vol. 242, no.2019, pp. 216-231, September 2019. Doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.093
- [17] Z. Wang, G. Du, D. Wang, Y. Xu and M. Shao, “Combustion process decoupling of a diesel/natural gas dual-fuel engine at low loads”, *Fuel*, vol. 232, no.2018, pp. 550-561, May 2018. Doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.152
- [18] Wang, T., Zhang, X., Zhang, J. and Hou, X. “Numerical analysis of the influence of the fuel injection timing and ignition position in a direct-injection natural gas engine”, *Energy Conversion Management*, vol. 149, no.2017, pp. 748–759, June 2017. Doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.004
- [19] E. Distaso, R. Amirante and P. R. D. Tamburrano, “Steady-state Characterization of Particle number Emissions from a Heavy-Duty Euro VI engine Fueled with Compressed Naturel Gas”, *Energy Procedia*, vol. 148, no.2018, pp. 671-678, January 2018. Doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.156
- [20] O. Sezgin, “Bir dizel motorda CNG dönüşümü”, Yüksek Lisans Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, Ocak 2019.
- [21] F. Zhang, H.F. Liu, J. Yu and M. Yao. “Direct numerical simulation of n-heptane/air auto-ignition with thermal and charge stratifications under partially-premixed charge compression ignition (PCCI) engine related conditions”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, no. 5, pp. 516-526, February 2016. Doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.100
- [22] V.E. Geo, G. Nagarajan and B. Nagalingam, “Studies on improving the performance of rubber seed oil fuel for diesel engine with DEE port injection”, *Fuel*, vol. 89, no.2010, pp. 3559-3567, June 2010. Doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.036
- [23] K. Murat, E. Gökhan and H. Murat, “The effects of using diethylether as additive on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with CNG”, *Fuel*, vol. 115, no.2014, pp. 855-860, October 2014. Doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.062
- [24] Oğuz, K. Demirci and C. Çınar, “HCCI-DI Bir Motorda Doğal Gaz Kullanımının Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 7, no. 2, pp. 317-330, June 2019. Doi: 10.29109/gujsc.521668
- [25] A. Aktaş and O. Doğan, “Çift Yakıtlı Bir Dizel Motorda LPG Yüzdesinin Performans Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol.25, no. 1, pp. 171-178, Nisan 2010.
- [26] B. Aydoğan, “An experimental examination of the effects of n-hexane and nheptane fuel blends on combustion, performance and emissions characteristics in a HCCI engine”, *Energy*, vol. 192, no. 1, pp. 116600, September 2020. Doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116600

- [27] X. Lü, J. Ma, L. Ji and Z. Huang, “Performance of a diesel engine run on diesel and natural gas in dual fuel mode of operation”, *Energy Procedia*, vol. 160, no.2019, pp. 215-222, August 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.139>
- [28] M. Yao, Z. Chen, Z. Zheng, B. Zhang and Y. Xing, “Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol”, *Fuel*, vol. 85, no.2006, pp. 2046-2056, Oct 2006. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.016>
- [29] D. Blasio, G. Belgiorno and C. Beatrice. “Parametric analysis of compression ratio variation effects on thermodynamic, gaseous pollutant and particle emissions of a dual-fuel CH₄-diesel light duty engine”. *SAE International Journal of Engines*, vol.8, no.5, pp.2253-2267 November 2015, Doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-0764>.
- [30] J.C. Corbin, W. Peng, J. Yang, D.E. Sommer, U. Trivanovic, P. Kirchen, J.W. Miller, S. Rogak, D.R. Cocker, G.J. Smallwood and P.L., Stephani, “Characterization of particulate matter emitted by a marine engine operated with liquefied natural gas and diesel fuels”, *Atmospheric Environment*, vol. 220, no. 1, pp. 117030, October 2020. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117030>
- [31] W. Chen, J. Pan, Y. Liu, B. Fan and H.L. Peter, “Otchere Numerical investigation of direct injection stratified charge combustion in a natural gas-diesel rotary engine”, *Applied Energy*, vol. 233–234, no. 1, pp. 453-467, August 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.038>
- [32] İ. Sezer, “Dietil eter–motorin karışımlarının motor performansına etkilerinin deneysel incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 27, no. 1, pp. 117-124, Mayıs 2012.
- [33] R. Dhanasekaran and S. Ganesan, B. Rajesh Kumar, S. Saravanan, “Utilization of waste cooking oil in a light-duty DI diesel engine for cleaner emissions using bio-derived propanol”, *Fuel*, vol. 235, no.2019, pp. 832-837, June 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.093>
- [34] M.A. Asokan, S.S. Prabu, P.K.K. Bade, V.M. Nekkanti and S.S.G. Gutta, “Performance, combustion and emission characteristics of juliflora biodiesel fuelled DI diesel engine”, *Energy*, vol. 173, no.2019, pp. 883-893, August 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.075>
- [35] H. Huang, Z. Zhu, Y. Chen, Y. Chen, D.L. Jizhen and Z.T Ouyang, “Experimental and numerical study of multiple injection effects on combustion and emission characteristics of natural gas–diesel dual-fuel engine”, *Energy Conversion and Management*, vol. 183, no.2019, pp. 84-96, September 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.110>
- [36] E. Ansari, T. Menucci, M. Shahbakhti and J. Naber, “Experimental investigation into effects of high reactive fuel on combustion and emission characteristics of the Diesel-Natural gas Reactivity Controlled Compression Ignition engine”, *Applied Energy*, vol. 239, no.2019, pp. 948-956, October 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.256>
- [37] A.A. Abdel-Rahman, “On The Emissions From Internal-Combustion Engines: A Review”, *International Journal Of Energy Research*, vol. 22, no. 6, pp. 483-513, December 1998.
- [38] J. Dong, X. Gao, G. Li and X. Zhang, “Study on Diesel-LPG Dual-Fuel Engines”, *SAE paper no: 2001-01-3679*, pp.1-10, September 2001. Doi:<https://doi.org/10.4271/2001-01-3679>
- [39] J. Zheng, J. Wang, Z. Zhao, D. Wang and Z. Huang, “Effect of equivalence ratio on combustion and emissions of a dual-fuel natural gas engine ignited with diesel” *Applied Thermal Engineering*, vol. 146, no. 5, pp. 738-751, August 2019. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.045>

Salih ÖZER

Salih ÖZER Aydın doğumludur. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde başladığı doktorasını 2015 yılında bitirmiştir. 2010 yılında Muş Alparslan Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak başlamıştır. İçten yanmalı motorlarda yanma ve biyoyakıt konularında çalışmaları mevcuttur. Halen Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliğinde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

Erdoğan VURAL

Erdoğan VURAL Aydın doğumludur. 2014 yılında Karabük Üniversitesi imalat mühendisliğinde doktorasını tamamlamıştır. 2009 yılında Bitlis Eren Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak başlamıştır. İçten yanmalı motorlarda performans ve kaplama konularında çalışmaları mevcuttur. 2018 yılından itibaren Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Germencik Meslek Yüksek okulunda Dr. öğretim görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır.