

Metanol Benzin Karışımlarının Bir Benzin Motorunun Performans ve Emisyonları Üzerine Etkisi

İdris CESUR

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya.

e-posta: icesur@subu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7487-5676>

Geliş Tarihi: 08.02.2022

Kabul Tarihi: 08.04.2022

Öz

Anahtar kelimeler

Benzin motoru;
Metanol;
Motor performans;
Egzoz emisyonları

Buji ateşlemeli motorlardan salınan kirletici emisyonların azaltılması için kullanılan yöntemlerden biri de motorlarda alternatif yakıt kullanılmasıdır. Alternatif yakıt olarak metanol, belli oranlara kadar yakıt içerisine katılarak motorda herhangi bir yapısal değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Bu çalışmada, buji ateşlemeli motorlarda farklı oranlarda benzin metanol karışımlarının yakıt olarak kullanılmasının performans ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde benzin yakıtına kütleli olarak %10 ve %20 oranlarında metanol karıştırılmıştır. Çalışma farklı motor devirlerinde ve tam yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, motorda yakıt olarak %20 metanol karışımı yakıt kullanılması ile motor torku ve efektif güçte %3'e varan oranlarda azalmalar tespit edilmiştir. Motor performansındaki az miktardaki kötüleşmeye karşın HC, CO ve NOx emisyonlarında azalmalar saptanmıştır. HC emisyonundaki maksimum azalma miktarı %10 metanol karışımı yakıtta %17, NOx emisyonlarındaki maksimum azalma miktarı ise %20 metanol karışımı yakıtta %26'dır. Özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verim değerlerinde bir miktar kötüleşmeler görülmüştür.

Effect of Methanol Gasoline Blends on the Performance and Emissions of a Gasoline Engine

Abstract

Keywords

Gasoline engine;
Methanol;
Engine performance;
Exhaust emissions

One of the methods used to reduce pollutant emissions from spark ignition engines is the use of alternative fuels in engines. As an alternative fuel, methanol can be used in the engine without making any structural changes by adding it to the fuel up to certain proportions. In this study, the effects of using different ratios of gasoline methanol mixtures as fuel in spark ignition engines on performance and exhaust emissions were investigated experimentally. In the experiments, 10% and 20% by mass of methanol was mixed with gasoline fuel. The experiments were carried out at different engine speeds and full load conditions. As a result of the experimental study, reductions of up to 3% in engine torque and effective power were determined by using 20% methanol blended fuel as fuel in the engine. Despite the slight deterioration in engine performance, reductions in HC, CO and NOx emissions were observed. The maximum reduction in HC emissions is 17% in 10% methanol blended fuel, and the maximum reduction in NOx emissions is 26% in 20% methanol blended fuel. Some deterioration was observed in the specific fuel consumption and effective efficiency values.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Ham petrolden üretilen yakıtlara alternatif olabilecek yakıtların motorlarda kullanılması çevre ve yakıt maliyeti açısından oldukça önem kazanmıştır (Balki *et al.* 2016). Bu yakıtların motorlarda kullanılmasının temel amacı motorlardan salınan egzoz emisyonlarının

azaltılmasıdır (Balki *et al.* 2014). Bu nedenle araştırmacılar yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarını araştırmaya yönelmektedir (Zhang *et al.* 2010). Bu alternatif yakıtlar; etanol, metanol, butanoldür (Zhao *et al.* 2011). Metanol, içten yanmalı motorlarda yapısal bir değişikliğe gidilmeden kullanılabilen alternatif bir yakıttır

(Çelebi and Aydın. 2019). Metanol benzin yakıtına göre daha düşük viskoziteye sahiptir. Bu sayede atomizasyonu ve hava ile karışımları kolaydır (Lia et al. 2019). Alkol yakıtlar petrol yakıtlarına göre daha yüksek oksijen içeriği ve yüksek H/C oranına sahiptir (Liu et al. 207). Alkoller, yüksek buharlaşma enerjisine sahip yakıtlardır. Bu nedenle emme ve sıkıştırma zamanlarında silindir içi sıcaklıkları düşürmektedirler. Alkollerin bu soğutucu etkisi sayesinde emme zamanı silindir içine daha fazla hava alınabilmesine ve buda motorun volümetrik verimin iyileşmesine neden olmaktadır (Wu et al. 2016). Alkollerin yüksek laminer alev yayılım hızları ile yanma daha erken tamamlanmasına ve motorun termik verimini artırmaktadır (Sayin 2010, Vancoillie et al. 2013, Zhang et al. 2014).

Literatüre baktığımızda; Nuthan Prasad et al.(2020), tek silindirli dört zamanlı bit motora tam yük şartlarında ve değişken sıkıştırma oranlarında yakıt olarak metanol karışımlarının kullanılmasının performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimleri araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, motor performansında iyileşmeler olur iken NOx emisyonlarında artmalar tespit etmişlerdir. Elfasakhany (2015), bir benzin motorunda farklı oranlarda alkol benzin karışımları kullanılmasının performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel çalışma sonucunda alkol benzin karışımları ile CO ve HC emisyonlarını azaldığı hacimsel verim, motor torku ve efektif güçte artmalar tespit etmiştir. Zhao (2011), farklı oranlarda metanol benzin karışımlarını elektronik kontrol ünitesi yardımı ile motora enjekte etmiştir. Deneysel çalışma sonucunda benzin-metanol karışımlarının enerji içeriğinin azalması nedeniyle metanol oranı% 50'ye kadar yükseldiğinde motorun yanma performansının kötüleştiğini gözlemlemiştir. Agarwal et al. (2014), kısmi yük şartlarında buji ateşlemeli motorda benzin yakıtına göre %10 ve %20 metanol-benzin karışımlarının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, metanol-benzin karışımlarının termik verimin arttığı, NO, CO emisyonlarını azaldığını saptamışlardır. Vancoillie et al. (2013) farklı oranlarda metanol benzin karışımlarının motor

performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda efektif verimin arttığını, NOx ve CO₂ emisyonlarında azalmalar tespit etmişlerdir. Abu-Zaid ve ark.(2004), benzin metanol karışımını yakıt olarak kullandıkları bir buji ateşlemeli motorda, motorun performans parametrelerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma, tam yük konumu ve farklı devirlerde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, belli oranlara kadar benzin içerisine katılan metanolün motor performansını olumlu yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Çalışmalarında en iyi sonuç; %15 metanol-%85 benzin karışımlarıdır. Çanakçı et al. (2012), bir benzin motorunda, yakıt olarak etanol-benzin ve metanol-benzin yakıtlarının kullanılmasının etkileri araştırmışlardır. Deneylerde, farklı yük , devir ve karışım oranları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; emisyon değerlerinde (CO, HC ve NOx) azalmalar, özgül yakıt sarfiyatında ise artmalar saptamışlardır.

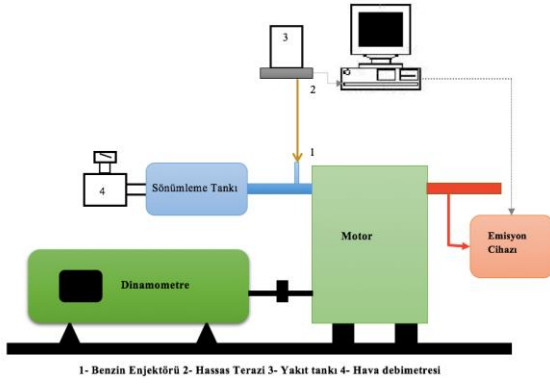
Metanol yukarıdaki avantajlara sahip olması nedeniyle motorlarda benzin yakıtına ilave yakıt olarak motorlarda kullanılmaya devam edilecektir (Nidhi 2019, Chen et al. 2019, Chen et al.2019. Bu çalışmada; motorlarda farklı oranlarda yakıt olarak metanol benzin karışımlarının kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki değişimler deneysel olarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Deneylerde; iki silindirli, doğal emişli, enjeksiyonlu ve su soğutmalı bir buji ateşlemeli motor kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan Lombardini marka deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 1'de ve Şekil 1'de ise deney düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.

Çizelge 1. Motorunun Teknik Özellikleri

Deney Motoru	Lombardini
Piston çapı (mm)	72
Strok uzunluğu (mm)	62
Silindir sayısı	2
Strok hacmi (dm ³)	0.505
Efektif Güç (kW)	15
Sıkıştırma Oranı	10.7
Soğutma tipi	Su
Yakıt tipi	Enjeksiyon



Şekil 1. Denei Düzenegi

Deneilerde 20 kW kapasiteye sahip elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Motorun tork ve güç miktarının belirlemek için S tipi ve 0,01 kg hassasiyetli yük hücresi sisteme monte edilmiştir. Her deney öncesi yük hücresinin kalibrasyonu yapılmıştır.

Motorun tükettiği yakıt sarfiyatını belirlemek için kütleli yakıt ölçüm düzenegi tasarlanmıştır. Sistem hassas terazi, yakıt pompası, basınç saati, regülatör ve bilgisayardan oluşmaktadır. Hassas terazideki bilgiler bilgisayara aktarılmaktadır. Yazılan program ile istenilen süredeki yakıt debisi görülmektedir. Denei düzenegine yakıt sistemi titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Tasarlanan program sayesinde deneysel çalışmada insandan kaynaklanan hatalar minimize edilmiştir.

Motorlarda salınan egzoz emisyonlarını ölçmek için deneilerde, MRU Delta 1600L marka emisyen ölçüm cihazı kullanılmıştır. Emisyen cihazı; CO, CO₂ değerlerini % olarak, HC ve NO_x emisyen değerlerini ise ppm olarak ölçmektedir.

Deneilerde, motorun gerekli yerlerinden sıcaklık değerlerini ölçmek için NiCr-Ni tip termokupullar kullanılmıştır.

Deneilerde esnasında sistematik ve rastgele belirsizliklerin belirlenmesi için kısmi diferansiyel yöntemi ile belirsizlik analizi yapılmıştır. Belirsizlik analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Hesaplanan belirsizlikler

Parametreler	Sistematik belirsizlikler, ±
Motor Yüğü, N	0.1
Motor Devri, d/d	1.0
Yakıt Zamanı, s	0.1
Sıcaklık, °C	1
Yakıt tüketimi, g	0.01
NO _x , ppm	5
CO, %	0.06
HC, ppm	12
	Toplam Belirsizlik,%
Özgül Yakıt sarfiyatı, g/kWh	1.2
Moment, Nm	1.0
Efektif güç, kW	1.3

Metanol benzin karışımları karışımı kütleli olarak hazırlanmıştır. Deneilerde kullanılan metanol, % 99,9 saflıkta endüstriyel kullanımlı metanoldür. Metanol karıştırma işlemi esnasında faz ayrışması olmaması için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Çizelge 3’de benzin ve metanol yakıtının teknik özellikleri verilmiştir. Deneilerde %10 metanol+%90benzin (M10) ve %20 metanol ve %80 benzin (M20) karışımları kullanılmıştır.

Çizelge 3. Benzin ve Metanol Yakıtının Özellikleri

Yakıt Özellikleri	Metanol	Benzin
Oksijen içeriği	50%	0
Yoğunluk (kg/l)	0.79	0.735
Stokiyometrik	6.45	14.6
hava/yakıt oranı	19.66	44.5
Alt ısı değeri (MJ/kg)	22.3	46.6
Üst ısı değeri (MJ/kg)	64.8	30-220
Kaynama noktası (°C)	-98	-57
Donma noktası (°C)	11	-45
Parlama noktası (°C)	470	-300
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	109	80-98
Araştırma oktan sayısı	88.6	81-84
Motor Oktan numarası	0.6	0.29
Viskozite (at 20°C) (CP)		

Standart %100 benzin (STD) ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların motorlarda kullanılması durumunda denei sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla motor aynı koşullar altında çalıştırılmıştır (ateşleme avansı, enjeksiyon basıncı, giriş hava sıcaklığı ve basıncı). Motorun ateşleme avansı 10° krank açısıdır.

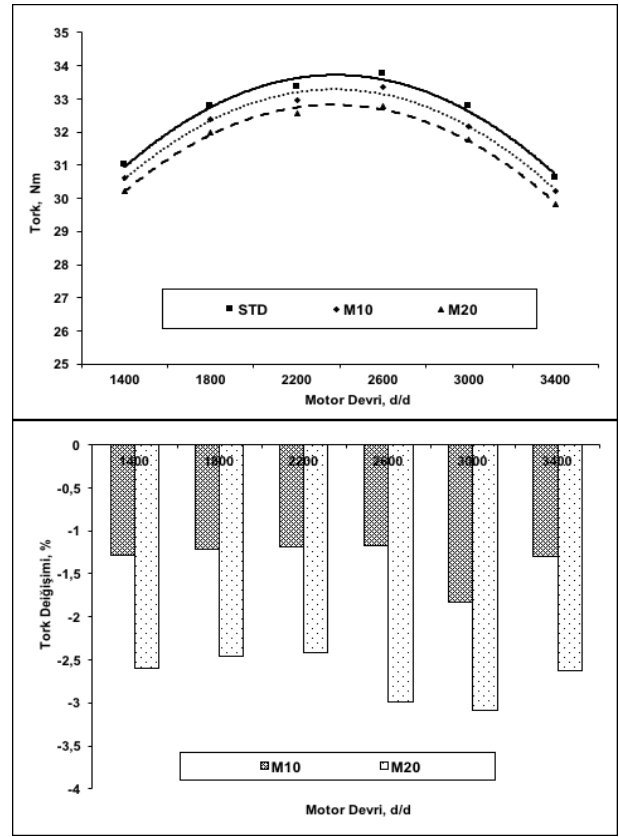
Deneiler tam yük şartlarında ve 1400 ile 3400 d/d arasında 400 d/d aralıklar ile yapılmıştır. Deneiler ilk önce benzin yakıtı ile yapılmış olup daha sonra

metanol karışimli yakıtlar ile devam edilmiştir. Deneyle esnasında ölçülen değerler, motor kararlı hale geldikten sonra kayıt altına alınmıştır.

3. Bulgular

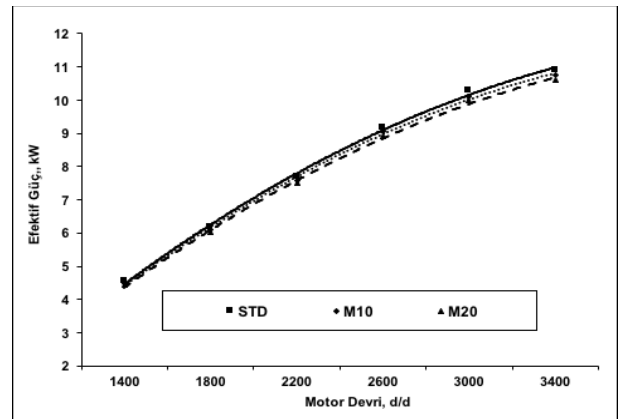
Çevreye salınan egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla motorlarda alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak alkollerin alt ısı değerleri düşük olması nedeniyle motorlarda belli oranlara kadar benzin ile karıştırılmaktadır. Literatüre bakıldığında optimum karışım oranları %5-%20 arasındadır. Bu çalışmada performans parametreleri çok fazla kötüleşme olmadan salınan egzoz emisyonların azaltılmak amacıyla benzin yakıtına %10 ve %20 kütleli oranlarda metanol karıştırılmıştır.

Buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak benzin ve farklı oranlarda metanol benzin karışımları kullanılması durumunda motor momentindeki değerler ve yüzdesel farklar Şekil 2’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm karışım oranlarında momente azalmalar tespit edilmiştir. Maksimum azalma miktarı M20 yakıtlı motorda elde edilmiştir. M20 yakıt motorda maksimum azalma miktarı 3000 d/d’da %3’dür. M10 yakıt motorda ise azalma miktarı daha düşüktür. Motor momentindeki azalmaların nedeni metanolün alt ısı değerinin benzin yakıtına göre düşük olmasıdır. Bu nedenle karışım yakıtlı motorun enerjisi benzin yakıtına göre daha düşük olması daha az güç ve moment üretilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca sahip olduğu gizli buharlaşma ısı emme havasının sıcaklığını azaltarak volümetrik verimi arttırmaktadır. Volümetrik verimdeki artış moment miktarını arttırmaya yeterli olmamaktadır.



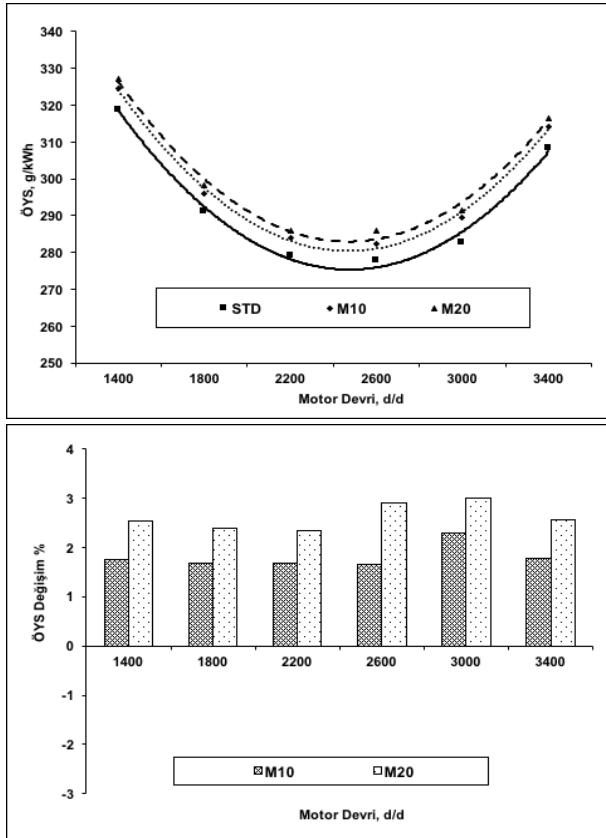
Şekil 2. STD ve farklı oranlardaki metanol karışimli yakıtların, motor moment değerleri ve yüzdesel değişim oranları

Şekil 3.’de motor efektif gücünde devir sayısına göre meydana gelen değişimler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde, motorda farklı oranlarda benzin metanol karışimli yakıtların kullanılması durumunda efektif güçte benzin yakıtlı motor verilerine göre tüm devirlerde azalmalar elde edilmiştir. M10 yakıtlı motordaki azalma miktarı M20 yakıtlı motora göre daha azdır. Maksimum azalma miktarı M20 yakıtlı motordan elde edilmiştir. M20 yakıtlı motorda efektif güçteki maksimum azalma miktarı %3’dür.



Şekil 3. STD ve farklı oranlardaki metanol karışimli yakıtların, efektif güç değerleri

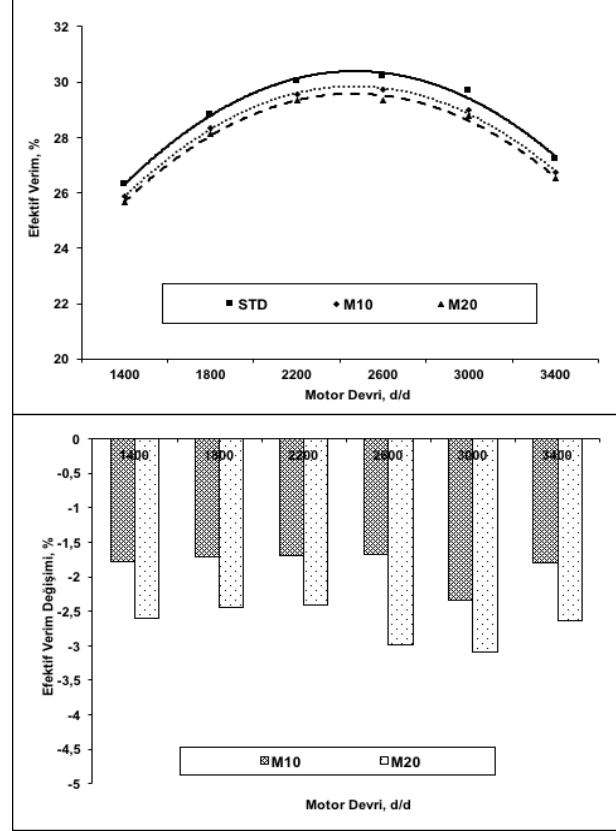
Şekil 4.'de motorda, benzin ve farklı oranlarda alkol benzin karışımları kullanılması özgül yakıt sarfiyatı (ÖYS) değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, tüm devir ve karışım oranlarında özgül yakıt sarfiyatı değerlerinde artmalar saptanmıştır. M10 yakıtlı motorun STD duruma göre maksimum artış oranı 3000 d/d'da % 2,2'dir. M20 yakıtı motorda ise maksimum artış oranı 3000 d/d'da %2,9'dur. M10 ve M20 yakıtlarda meydana gelen artmaların nedeni alkolün benzin yakıtına göre daha düşük alt ısıl değere sahip olmasıdır. Aynı enerji sağlamak için daha fazla yakıtı ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca, sahip olduğu stokiometrik yakıt/hava oranlarının yüksek olması nedeniyle aynı çıkış gücü için daha fazla yakıt kullanılmasına neden olmaktadır.



Şekil 4. STD ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların, özgül yakıt sarfiyatı değerleri (ÖYS) ve yüzdesel değişim oranları

Şekil 5.'de motorda benzin ve farklı oranlarda alkol benzin karışımları kullanılması efektif verim değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. M10 ve M20 yakıtların motorda kullanılması durumunda benzin yakıtına göre tüm devirlerde efektif verimde kötüleşmeler meydana gelmiştir. M10 yakıtlı motorun STD duruma göre

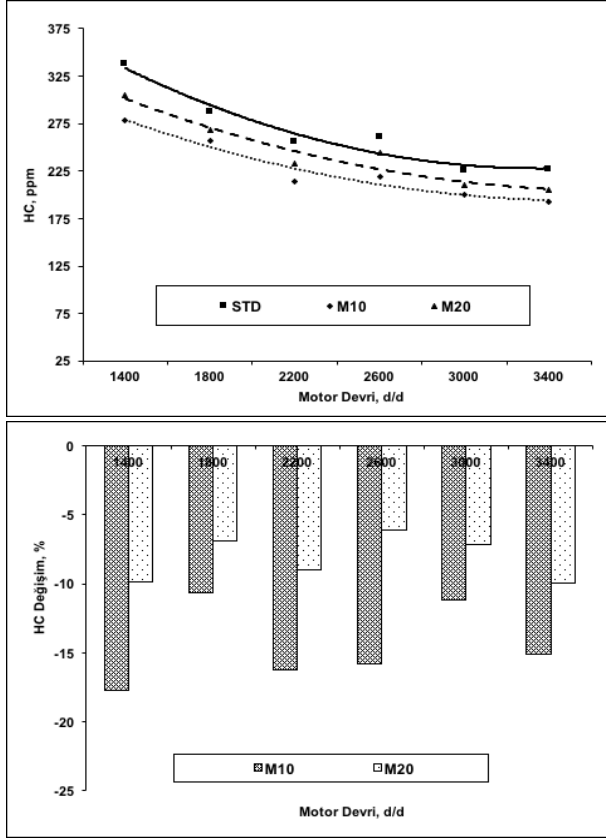
maksimum azalma oranı 3000 d/d'da % 2,3'dir. M20 yakıtı motorda ise maksimum azalma oranı ise 3000 d/d'da %3'dür. Efektif verim motorun tükettiği yakıt miktarının ne kadarının faydalı işe dönüştüğüne gösteren bir değerdir. Metanolün alt ısıl değerinin düşük ve stokiometrik yakıt/hava oranlarının yüksek olması nedeniyle göre aynı güç elde etmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5. STD ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların, efektif verim değerleri ve yüzdesel değişim oranları

Şekil 6'da STD ve farklı oranlarda metanol karışımı yakıt kullanılması HC emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. STD duruma göre M10 ve M20 yakıtların motorlarda kullanılması durumunda HC emisyonlarında tüm devirlerde azalmalar saptanmıştır. Maksimum azalma miktarı M10 yakıtlı motorda elde edilmiş olup 1400 d/d'da %17'dir. HC emisyonlarının azalmasının nedeni, alkolün kimyasal ve fiziksel özelliklerinin benzin yakıtına göre farklı olması nedeniyle yanma verimini etkilemesidir. Metanol yakıtının oksijen zengin bir yakıt olması ve yüksek yanma hızı yanma verimini iyileştirmektedir. Yanma verimi iyileşmesinden dolayı yakıttaki H ve C atomları hava ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek

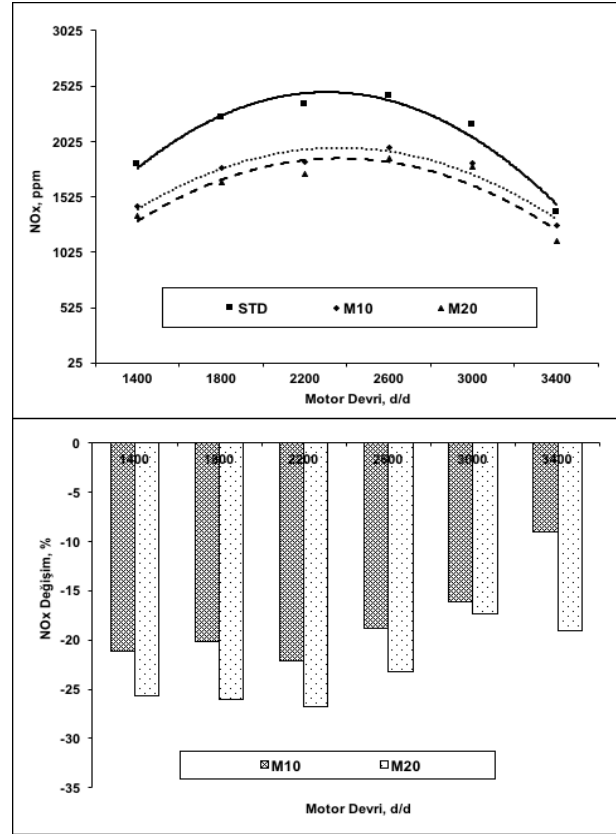
HC emisyonlarına dönüşmeden yanmasıdır. Ayrıca silindir içerisindeki yüksek alev hızı yanmanın daha kısa sürede tamamlanmasına neden olarak silindir duvarlarından ısı kaybı miktarını azalmaktadır. Bu etkenler HC emisyonlarında azalmalara neden olmaktadır.



Şekil 6. STD ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların, HC emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları

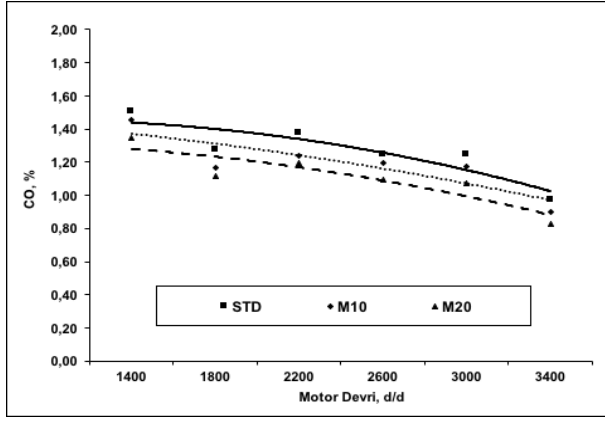
Şekil 7' de motorda benzin ve farklı oranlarda metanol benzin karışımı yakıt kullanılması durumunda NOx emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları görülmektedir. Motorda metanol benzin karışımı yakıt kullanılması durumunda tüm devir ve karışım oranlarında NOx emisyonlarında azalmalar tespit edilmiştir. M10 yakıtlı motorda maksimum azalma miktarı, 2200 d/d'da %22'dir. Motorda M20 yakıtı kullanılması durumunda ise maksimum azalma miktarı 2200 d/d'da %26'dır. NOx emisyonlarında azalmaların görülmesinin sebebi metanolün gizli buharlaşma ısılarının yüksek olmasıdır. Metanol, buharlaşma esnasında ortamdaki daha fazla ısı çekmesi adyabatik alev sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca emme prosesinde emme manifolduna püskürtülen metanol karışımı yakıt emme manifoldunun

sıcaklığını düşürmektedir. Azalan sıcaklıklar NOx emisyonlarının azaltılmaktadır.



Şekil 7. STD ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların, NOx emisyon değerleri ve yüzdesel değişim oranları

Şekil 8'de motorda farklı oranlarda metanol benzin karışımları kullanılması durumunda CO emisyonlarındaki değişim görülmektedir. Motorda M10 ve M20 yakıtları kullanılması durumunda CO emisyon değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir. CO emisyonlarında iyileşmelerin nedeni metanol karışımı yakıtın yanma veriminin iyileşmesinden kaynaklanmaktadır. Metanolün oksijenle zengin olması ve yüksek yanma hızı yanma reaksiyonlarının hızını ve verimini arttırmaktadır. Silindir içerisindeki yüksek alev hızı yanmanın daha kısa sürede tamamlanmasına neden olmaktadır. Yakıttaki C taneleri yüksek yanma hızı nedeniyle CO dönüşmeden yanmayı tamamladığı düşünülmektedir.



Şekil 8. STD ve farklı oranlardaki metanol karışımı yakıtların CO emisyon değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, motordan salınan emisyon değerlerini azaltmak amacıyla motorda farklı oranlarda metanol benzin karışımı yakıtlar kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda motorda M10 ve M20 yakıtı kullanılması durumunda motor torku ve efektif güçte bir miktar azalma olmuştur. Ayrıca efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatında bir miktar kötüleşmeler saptanmıştır. Egzoz emisyon değerlerine bakıldığında; benzin yakıtına göre HC, CO ve NO_x emisyonlarında azalmalar tespit edilmiştir. Sonuç olarak M10 ve M20 yakıtlarının motorlarda kullanılması ile benzin yakıtlı motor verilerine göre;

- Motor torku ve efektif güç değerlerindeki maksimum azalma miktarı %3,
- Özgül yakıt sarfiyatı değerinde maksimum artma miktarı M20 yakıtında %2,9,
- Efektif verimdeki maksimum azalma miktarı M20 yakıtında % 3,
- HC emisyonlarındaki maksimum azalma miktarı M10 yakıtlı motorda %17,
- NO_x emisyonlarında maksimum azalma miktarı M20 yakıtlı motorda % 26,
- CO emisyonlarında azalmalar elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Abu-Zaid, M., Badran, O., Yamin, J., 2004. Effect of Methanol Addition on the Performance of Spark Ignition Engines. *Energy Fuels*, **18(2)**, 312-315.
- Agarwal, A.K., Karare, H., Dhar, A., 2014. Combustion, performance, emissions and particulate

characterization of a methanol–gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine. *Fuel Processing Technology*, **121**, 16–24.

- Balki, M.K., Sayin, C., Sarıkaya, M., 2016. Optimization of the operating parameters based on Taguchi method in an SI engine used pure gasoline, ethanol and methanol. *Fuel* **180**, 630–637.
- Balki, M.K., Sayin, C., Canakci, M., 2014. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. *Fuel*, **115**, 901–906.
- Chen, Z.M., Wang, L., Zeng, K., 2019. Comparative study of combustion process and cycle-by-cycle variations of spark-ignition engine fueled with pure methanol, ethanol, and n butanol at various air–fuel ratios. *Fuel*, **254**, 115–683.
- Chen, Z.M., Wang, L., Yuan, X.N., Duan, Q.M., Yang, B., Zeng, K., 2019. Experimental investigation on performance and combustion characteristics of spark-ignition dual-fuel engine fueled with methanol/natural gas. *Applied Thermal Engineering*, **150**, 164–74.
- Çanakçı, M., Özsezen, A.N., Alptekin, E., Eyidoğan, M., 2012. Impact of Alcohol-Gasoline Fuel Blends on the Exhaust Emission of an SI. *Renewable Energy*, **52**, 111–117.
- Çelebi, Y., Aydın, H., 2018. An overview on the light alcohol fuels in diesel engines. *Fuel*, **236**, 890–911.
- Elfasakhany, A., 2015. Investigations on the effects of ethanol–methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: performance and emissions analysis. *Engineering Science and Technology an International Journal*, **18**, 713–719.
- Lia, X., Zhen, X., Wang, Y., Liu, D., Tian, Z., 2019. The knock study of high compression ratio SI engine fueled with methanol in combination with different EGR rates. *Fuel*, **257**, 116098.
- Liu, S.H., Eddy, R., Hu T.G., Wei, Y.J., 2007. Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, **27**, 1904–1910.
- Nidhi, K.A. Subramanian, 2018. Experimental investigation on effects of oxygen enriched air on performance, combustion and emission characteristics of a methanol fuelled spark ignition engine. *Applied Thermal Engineering*, **147**, 10-16.
- Nuthan Prasad, B.S., Kumar Pandey, J., Kumar, G.N., 2020. Impact of changing compression ratio on engine

characteristics of an SI engine fueled with equi-volume blend of methanol and gasoline. *Energy* **191**, 116605.

Sayin, C., 2010. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol-diesel blends. *Fuel*, **89**, 3410–3415.

Vancoillie, J., Demuyne, J., Sileghem, L., Van De Ginste, M., Verhelst, S., Brabant, L., 2013. The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark ignition engines. *Applied Energy*, **102**, 140–199.

Wu, B., Wang, L., Shen, X., Yan, R., Dong P., 2016. Comparison of lean burn characteristics of an SI engine fueled with methanol and gasoline under idle condition. *Applied Thermal Engineering* **95**, 264–270.

Zhang, Z., Wang, T., Jia, M., Wei, Q., Meng, X., Shu, G., 2014. Combustion and particle number emissions of direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation. *Fuel*, **130**, 177–88.

Zhang, Z.H., Cheung, C.S., Chan, T.L., Yao, C.D., 2010. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel/methanol compound combustion engine with and without diesel oxidation catalyst. *Sci Total Environ*, **408 (4)**, 865–72.

Zhao, H., Ge, Y.S., Tan, J.W., Yin, H., Guo, J.D., Zhao, W., 2011. Effects of different mixing ratios on emissions from passenger cars fueled with methanol/gasoline blends. *Journal of Environmental Sciences*, **23(11)**, 1831–1838.

Zhao, X., 2011. The combustion characteristics and performance for SI engine fueled with methanol/gasoline. Master Thesis, Tianjin University, Tianjin, China, 143.