



Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi Turkish Journal of Science and Engineering

www.dergipark.org.tr/tjse

Dimetil Eterin Buji Ateşlemeli Motorlarda HC Emisyonlarına Etkileri

İsmet Sezer^{1*}

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane - Türkiye

*Sorumlu yazar: isezer@gumushane.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ

Alınış tarihi: 14/05/2025

Kabul tarihi: 16/09/2025

Anahtar Kelimeler: Buji ateşlemeli motorlar, Dimetil eter, HC emisyonu, Yakıt katkısı

DOI: 10.55979/tjse.1699638

ÖZET

Alkoller ve eterler gibi oksijen içerikli yakıtlar yanmayı iyileştirmek ve emisyonları azaltmak için içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılabilirler. Bu alkol ve eter yakıtlar genellikle kömür, doğalgaz, biyokütle ve atık ürünler gibi bir kısmı yenilenebilir ve yerel olan çeşitli kaynaklardan üretilirler. Oksijen içerikli yakıtların çoğu daha temiz bir yanma sağlamalarının yanı sıra petrol kökenli yakıtlara benzer tutuşma ve yanma karakteristiklerine sahiptirler. Etanol ve metil tersiyer bütül eter (MTBE) benzinin oktan sayısını ve oksijen içeriğini artırmak için düşük karışım oranlarında kullanılan başlıca katkılardandır. Alkol ve eter yakıtların benzine katılması bu yakıtların yüksek oksijen içeriği sayesinde yanmanın iyileştirilmesini sağlar ve bu sayede yanma verimi artarken emisyonlar da azalır. Ancak, bu alkol ve eter yakıtların enerji içeriği benzine göre düşük olduğundan katkı olarak kullanıldıklarında genelde motorun yakıt tüketimi artmaktadır. Dimetil eter (DME) buji ateşlemeli motorlarda yakıt veya benzin katkı maddesi olarak uzun bir geçmişe sahip değildir. Ancak buji ateşlemeli motorlarda DME'yi benzinle birlikte kullanmak yanmayı iyileştirmek ve motorun termik verimini artırmak için olası çözümlerden biri olarak görülmektedir. Ayrıca, DME buji ateşlemeli motorlarda benzinle birlikte kullanıldığında yakıt ekonomisini ve emisyon performansını artırabileceği düşünülmektedir. Öte yandan, ulaşımdan kaynaklanan karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının ana kaynağı buji ateşlemeli benzinli motorlu araçlardır. Buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının yüksek oksijen içeriği sayesinde standart benzinli motorlara kıyasla daha düşük CO ve HC emisyonları üretebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda kullanımına yönelik yapılan çalışmaların sonuçlarının bir arada değerlendirilmesi gelecekteki çalışmalar ve pratik uygulamalar açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmalardan derlenmiştir. Bu derleme çalışması buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının özellikle HC emisyonu üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Effects of Dimethyl Ether on HC Emissions in Spark Ignition Engines

ARTICLE INFO

Received: 14/05/2025

Accepted: 16/09/2025

Keywords: Spark ignition engines, Dimethyl ether, HC emission, Fuel additive

DOI: 10.55979/tjse.1699638

ABSTRACT

The oxygenated fuels such as alcohols and ethers can be used in internal combustion engine as fuel and fuel additive for improving the combustion and reducing the emissions. These alcohol and ether fuels are usually produced from a variety of sources, some of which are renewable and local, such as coal, natural gas, biomass and waste products. Most oxygenated fuels have similar ignition and combustion characteristics to petroleum based fuels besides they give cleaner combustion. Ethanol and methyl tert-butyl ether (MTBE) are mainly used as additives at low blending ratio to enhance the octane number and oxygen content of gasoline. The addition of alcohol and ether fuels to gasoline lead to a more complete combustion due to the higher oxygen content, thereby leads to increased combustion efficiency and decreased engine out emissions. On the other hand, the energy content of alcohol and ether fuels is lower than gasoline; thereby fuel consumption of the engine will increase when using these alcohol and ether as a fuel additive. Dimethyl ether (DME) does not have a long history as a fuel or an additive to gasoline in spark ignition engines, but using of DME with gasoline in spark ignition engines is considered as one of the possible solutions to improve combustion and increase engine thermal efficiency. Moreover, it is considered that DME can enhance the fuel economy and emissions performance when it is used with gasoline in spark ignition engines. On the other hand, the main sources of carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions from transportation are gasoline engine vehicles. It is stated that using of DME in spark ignition engines can generate the lower CO and HC emissions compared to standard gasoline engines due to high oxygen content of DME. Therefore, it is important to evaluate together the results of the studies on the use of DME in spark ignition engines for future studies and practical applications. This study was compiled the papers which completed on using of DME as a fuel or fuel additive in spark ignition engines. The review study aims to investigate the effects of using DME in spark ignition engines especially on hydrocarbon (HC) emissions.

1. Giriş

Ekolojik sorunlar ve ham petrolün tükenme tehlikesi araştırmacıları daha gelişmiş yakma teknolojileri ve

yanmadan sonra emisyonları azaltmaya yönelik sistemlerin geliştirilmesi ile birlikte fosil kökenli olmayan alternatif yakıtlar aramaya yöneltmiştir. Temiz alternatif yakıtların kullanımı bahsedilen sorunların çözümüne yönelik umut

verici yöntemlerden birisi olarak görülmektedir (Semelsberger vd., 2006; Stepanenko & Kneba, 2019). Dimetil eter (DME) temiz ve verimli yanma sağlayarak zararlı emisyonları azaltabilecek alternatif yakıtlardan birisi olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, DME bir kısmı yenilenebilir olan ham petrol, doğal gaz, kömür, biyokütle, atık yağlar ve atık ürünler gibi çeşitli kaynaklardan yerel olarak da üretilmektedir (Awad vd., 2018a; Awad vd., 2018b). Biyokütle kaynaklardan üretilen DME kullanımıyla ilgili bir diğer önemli husus yakıt üretim zincirindeki karbondioksit (CO_2) emisyonunun azaltılmasıdır. Biyokütle'nin türüne bağlı olarak DME'nin üretim döngüsündeki CO_2 emisyonunun yaklaşık %92 oranında azaltılabildiği ifade edilmektedir (Kruczyński vd., 2017). Öte yandan, ulaşımdan kaynaklanan karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının ana kaynağının buji ateşlemeli benzinli motorlarla çalışan araçlar olduğu düşünülmektedir. DME yüksek oksijen içeriğine sahip olduğundan buji ateşlemeli motorlarda benzin veya diğer yakıtlarla birlikte DME kullanımının yanmayı iyileştirerek standart benzinli motorlara kıyasla daha düşük CO ve HC emisyonu değerleri sağlayabileceği ileri sürülmektedir (Putrasari & Lim, 2022). Esasen DME yanma hızı yüksek olmasına rağmen yüksek setan sayısına sahip olması nedeniyle vuruntu dayanımı düşük olduğundan buji ateşlemeli motorlarda kullanılmaya elverişli bir yakıt değildir (Arcoumanis vd., 2008). Bununla birlikte, DME kolay tutuşabilmesi ve hızlı yanabilmesi nedeniyle fakir karışımla çalışma koşullarında yanma verimini ve motor performansını artırmak için buji ateşlemeli motorlarda tutuşmayı ve yanmayı iyileştirici olarak kullanılabilir (Shi vd., 2019a). Yapılan deneysel çalışmalar direkt püskürtmeli benzinli motorlarda fakir karışımla çalışma koşullarında emme kanalına DME püskürtülmesinin termik verimi artırıp çevrim farklılıklarını azaltarak motorun daha kararlı çalışmasını sağladığını göstermiştir (Huang vd., 2021). Bu nedenle, son yıllarda yenilenebilir alternatif yakıtların kullanımını teşvik etmek için çift yakıtlı püskürtmeli motorlar geliştirilmektedir. Çift yakıtlı püskürtme sistemleri daha verimli bir yanma sisteminin geliştirilmesini amaçlayan sürdürülebilirlik ve çevrenin korumaya ilgili acil sorunlara çözüm bulmaya yönelik yeni bir teknolojidir. Direkt püskürtmeli benzinli motorlarla karşılaştırıldığında çift yakıtlı püskürtme sistemlerinin termik verimi artırdığı, HC ve azot oksit (NO_x) emisyonlarını azalttığı ancak CO emisyonunu belli oranda artırdığı tespit edilmiştir (Shi vd., 2019b). Bu nedenle, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda yakıt veya katkı olarak kullanımına yönelik yapılan çalışmaların sonuçlarının bir arada değerlendirilmesi yapılacak yeni çalışmalar ve pratik uygulamalar için oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması buji ateşlemeli motorlarda DME kullanımının HC emisyonları üzerindeki etkilerini literatüre dayalı olarak araştırmayı amaçlamaktadır.

2. Araştırma Boşlukları

DME'nin buji ateşlemeli motorlarda HC emisyonuna etkileri ile ilgili olarak birçok faktörün etkisi incelenmiş olsa bile, bu konuda bazı önemli araştırma boşlukları

bulunmaktadır. Bu konuda daha fazla araştırma yapılması gereken alanlar şöyle sıralanabilir.

1. DME'nin HC emisyonları üzerindeki etkilerinin motor tipine göre değişimi: Mevcut çalışmalar, DME'nin HC emisyonlarına etkilerini farklı motor tiplerine göre kıyaslamamaktadır. Farklı silindir hacimleri, sıkıştırma oranları, yakıt püskürtme sistemleri ve farklı egzoz sistemi teknolojilerinin etkisi üzerine daha fazla veri toplanması gerekir. Özellikle düşük hacimli ve yüksek verimli motorlarda DME kullanımının HC emisyonları üzerindeki etkisinin daha detaylı bir şekilde incelenmesi önemlidir.
2. DME'nin yakıt karışımı ve ateşleme zamanlaması üzerindeki etkileri: DME'nin buji ateşlemeli motorlarda kullanımı, yakıt karışımının özelliklerini ve ateşleme zamanlamasını etkileyebilir. Ancak, bu etkileşimlerin HC emisyonları üzerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılmamıştır. DME'nin hava-yakıt karışımı üzerindeki etkileri ve optimum ateşleme zamanlaması konusunda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.
3. Farklı yakıtların DME ile karışımlarının HC emisyonları üzerindeki etkileri: DME, motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra, diğer yakıtlarla karıştırılarak da kullanılabilir. DME'nin benzin, alkol yakıtlarla veya diğer gaz yakıtlarla karıştırılmasının HC emisyonları üzerindeki etkileri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Farklı oranlarda DME ve diğer yakıtların karıştırılmasının, motorun yanma süreçleri ve emisyonlar üzerindeki etkilerine dair daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.
4. Yüksek yük ve hızlarda DME'nin HC emisyonları üzerindeki etkileri: Çoğu çalışmada, motorun düşük yük koşullarındaki performansı incelenmiştir. Ancak, yüksek hız ve yüklerde DME'nin HC emisyonlarına etkileri çok daha az incelenmiştir. Yüksek yük ve hız koşullarında yakıt verimliliği ve HC emisyonlarının detaylı olarak incelenmesi, DME'nin pratikteki potansiyelini daha iyi değerlendirmek için önemlidir.
5. DME'nin egzoz sonrası sistemin performansı üzerindeki etkileri: Motorlarda DME kullanımı, katalitik konvertör, partikül filtresi vb. egzoz sonrası sistemlerin performansını etkileyebilir. DME'nin daha düşük karbon içeriği ve yanma sıcaklıkları, egzoz gazları üzerinde farklı reaksiyonlar oluşturabilir. Ancak, DME kullanımının egzoz sonrası sistemlerdeki etkinlik ve ömür üzerine etkilerine yönelik yapılan araştırmalar yetersizdir. Bu konuda daha fazla çalışma yapılması gereklidir.
6. Emisyon test standartlarının DME için uygunluğu üzerine araştırmalar yapılması: Motorlarda DME kullanımının HC emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için mevcut emisyon test standartları DME'nin özelliklerine uygun olmayabilir. DME'nin yüksek setan sayısı, düşük kaynama noktası vb. yakıt özelliklerini dikkate alacak şekilde mevcut emisyon test prosedürlerinin geliştirilmesi gereklidir.
7. Uzun süreli performans ve emisyon değişimleri: DME'nin motor performansı üzerindeki etkileri çoğunlukla kısa vadeli testlerle değerlendirilmiştir. Ancak,

DME ile çalışan motorların uzun vadeli dayanıklılığı, yakıt tüketimi ve emisyonları üzerindeki etkileri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Uzun süreli çalışma koşulları altında DME kullanımının motor ömrü, performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerinin araştırılması, motor tasarımı ve yakıt stratejilerinin optimizasyonu açısından önemlidir.

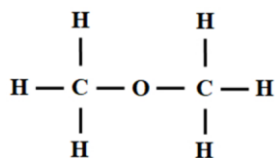
Bu araştırma boşlukları, DME'nin buji ateşlemeli motorların HC emisyonlarına etkileri üzerine daha derinlemesine çalışmalar yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu alandaki gelecekteki çalışmalar, daha temiz ve verimli motor teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı ümit edilmektedir.

3. Çalışmanın Metodolojisi

Bu derleme çalışmasında, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanımının HC emisyonlarına etkisini değerlendirmek için mevcut literatür sistematik bir yaklaşımla incelenmiştir. Araştırma kapsamında, öncelikle bilimsel literatür yaygın olarak bilinen veri tabanları kullanılarak taranmış, güncel ve hakemli yayınlar tercih edilmiş ve DME'nin sadece buji ateşlemeli motorlarda kullanıldığı deneysel veya simülasyon temelli çalışmalar tespit edilmiştir. Bu kriterleri karşılamayan çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Ayrıca, sadece özet bilgiler içeren konferans bildirileri, patentler ve teknik raporlar dikkate alınmamıştır. Seçilen çalışmalar, DME'nin motor tipi, yakıt karışım oranı, ateşleme parametreleri, motor devri ve yük koşullarına göre sınıflandırılmıştır. Her çalışma bulunan HC emisyonu değerleri grafiklerle gösterilerek değerlendirilmiştir. DME'nin HC emisyonlarına etkisini artıran veya azaltan parametreler belirlenmiş, ortak eğilimler ve farklılıklar vurgulanmıştır. İncelenen çalışmaların sonuçları, deneysel yöntemler ve motor karakteristikleri çerçevesinde yorumlanmış ve bulgular analiz edilerek olası nedenleri tartışılmıştır. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler Çizelge şeklinde verilmiş ve literatürdeki boşluklar ve gelecekteki araştırmalara yönelik öneriler sunulmuştur. Bu yöntem çerçevesinde gerçekleştirilen çalışma, DME'nin buji ateşlemeli motorlarda HC emisyonlarına etkilerini bütüncül bir bakış açısıyla analiz etmeyi ve bu alandaki bilgi eksikliklerini gidermeyi amaçlamaktadır.

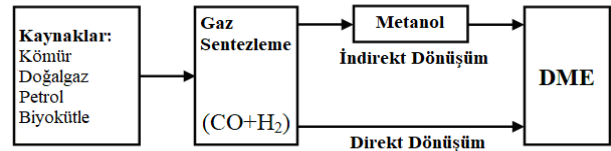
4. Dimetil Eterin Yakıt Özellikleri

Şekil 1'de görüldüğü gibi DME, $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) kimyasal formülüne sahip en basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'nin fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ile benzerdir. Bu nedenle DME'nin taşınması, depolanması ve yakıt istasyonlarında araçlara dolumu ile ilgili olarak LPG ile benzer şartların sağlanması gerekmektedir (Alam & Kajitani, 2001).



Şekil 1. DME'nin kimyasal yapısı (Park & Lee, 2014)
Figure 1. Chemical structure of DME (Park & Lee, 2014)

Şekil 2'de görüldüğü gibi DME direkt veya endirekt üretim metotlarıyla üretilebilmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken endirekt üretim yönteminde metanolden suyun uzaklaştırılması (dehidrasyon veya kondenzasyon) reaksiyonu ile DME üretilmektedir (Park & Lee, 2014). Enerji eşdeğeri bazında düşünüldüğünde DME üretimi, benzin veya dizel yakıtından daha düşük maliyetlidir. Büyük ölçekli üretim dikkate alındığında DME'nin üretim maliyeti sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretim maliyetlerine benzerdir (Wattanavichien, 2009). Neredeyse zehirsiz olan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığı koşullarında gaz fazında olup sıvılaştırılabilmesi için 5 barın üzerindeki basınçlarda sıkıştırılması gerekmektedir. Taşıt üzerinde kullanımı sırasında ise yakıt deposundan motora sevk edilirken buhar tıkaçı oluşumunu önleyebilmek için yakıt dağıtım hattında basıncın 17 ila 20 bar değerlerine çıkarılması gerekmektedir (Kowalewicz & Wojtyniak, 2005; Duan vd., 2012).



Şekil 2. DME'nin üretim metotları (Azizi vd., 2014)

Figure 2. DME production methods (Azizi et al., 2014)

Benzin, LPG ve DME yakıtlarının özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, DME LPG ile yakın değerlere sahipken benzinden oldukça farklı değerlere sahiptir. DME oldukça yüksek buhar basıncı ve düşük kaynama noktası sıcaklığına sahip olması nedeniyle oda sıcaklığında ve atmosfer basıncı altında gaz fazındadır. Diğer taraftan DME'nin enerji içeriği (ısıl değeri) LPG ve benzine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, DME'nin kullanımı sırasında yakıt dağıtım ve püskürtme sistemleri ile yanma sisteminin uygun şekilde modifiye edilmesi gerekmektedir (Huang vd., 2009). DME'nin düşük oktan sayısı ve yüksek setan sayısı değerine sahip olması onun kolay tutuşabilirliğinin göstergesidir. Ayrıca, DME'nin buharlaşma gizli ısısının benzine göre oldukça yüksek olması DME'nin emme kanalına püskürtülmesi durumunda taze dolgu sıcaklığının düşmesini sağlayarak motorun hacimsel veriminin artışına katkı sağlayacaktır. Bu özelliği sayesinde DME soğutucu akışkan (RE170) olarak da kullanılabilir. DME'nin içeriğinde %34.8 oksijen bulunmakta olup kimyasal yapısında sadece C-H ve C-O kimyasal bağları vardır ve doğrudan C-C bağı bulunmaz. Bu kimyasal özellikleri sayesinde DME'nin yanması sonucunda sifra yakın partikül madde (PM) emisyonu ve daha düşük motor gürültüsü oluşur ve yüksek oranlarda egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) uygulanarak NO_x emisyonu önemli ölçüde azaltılabilir (Wattanavichien, 2009). DME'nin düşük viskozitesi nedeniyle özellikle yüksek basınçlar altında yakıt besleme sisteminde sızıntılara neden olmaması için düşük toleranslı parçaların kullanılması gerekir. DME'nin zayıf yağlama özelliğine sahip olması nedeniyle yakıt püskürtme sistemindeki hareketli parçalarda aşınma oluşumunu

önlemek için içerisine yağlayıcı ve sızıntıyı önleyici uygun katkıların katılması önerilmektedir. DME'nin sıkıştırılabilirliği sıvı yakıtlara kıyasla yüksek olduğundan yakıt besleme hattında nakledilebilmesi için daha fazla pompalama işi gerekmektedir. DME korozyon yapısı nedeniyle kauçuk veya lastik esaslı malzemelerin kimyasal

yapısını bozucu bir etkiye sahip olduğundan yakıt sistemindeki bu tür malzemelerin korozyon etkilere dayanıklı malzemelerle değiştirilmesi gerekmektedir (Yoon vd., 2010). Öte yandan, DME'nin metal esaslı malzemeler üzerinde korozyon etkiye sahip olmaması bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Park & Lee, 2014).

Çizelge 1. Benzin, LPG ve DME'nin özellikleri (Yeom & Bae, 2009; Sun vd., 2022)

Table 1. Characteristics of gasoline, LPG, and DME (Yeom & Bae, 2009; Sun et al., 2022)

Özellik	Benzin	LPG	DME
Kimyasal formülü	C_xH_y	$C_3H_8-C_4H_{10}$	C_2H_6O
Molekül kütlesi, g/mol	46.07	44.1–58.2	46.07
Yoğunluğu (kg/L)	0.72–0.78	0.49–0.58	0.668
Viskozitesi (cP)	0.006	0.0074	0.15
Kaynama noktası (°C)	43–170	–27	–24.9
Donma noktası (°C)	–107.4	–189	–141.5
Parlama noktası (°C)	–42.78	–104	–41.1
Tutuşma sıcaklığı (°C)	300–450	470	350
Reid buhar basıncı (psi)	8–15	170	116
Kütleli oksijen içeriği (%)	–	–	34.8
Kükürt içeriği (ppm)	200	5–40	–
Yanma hızı (cm/s)	30–60	40	42.9–61
Tutuşabilir karışım oranları (%)	1.4–7.6	2.15–9.6	3.4–27
Stokiyometrik hava–yakıt oranı	14.7	15.7	9
Buharlaştırma gizli ısı (kJ/kg)	290–420	358.2	461.6
Alt ısı değeri (MJ/kg)	44.1	46.3	28.43
Oktan sayısı	80–90	94–112	–
Setan sayısı	8.14	–	55–60

5. Dimetil Eterin Hc Emisyonuna Etkileri

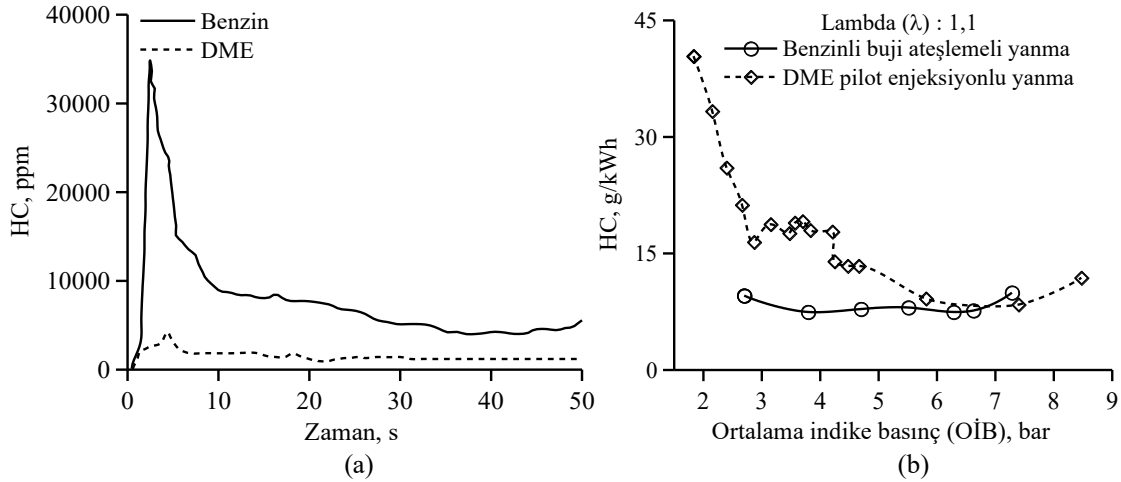
Şekil 3(a)'da HC emisyonunun rölantide ilk çalışma sırasında benzin ve DME için zamanla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu ilk çalışma sırasında özellikle benzin için önce hızlıca artıp yaklaşık 5 saniye (s) sonra hızlıca düşmektedir. Soğukta ilk çalışma sırasında motorun ilk hareketini sağlamak için elektronik kontrol ünitesi (EKU) tarafından silindire fazladan yakıt gönderilmesi ve silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle püskürtülen sıvı benzinin atomize olması ve buharlaşması zorlaşmaktadır. Bunun sonucunda, yakıtın oksidasyonu tam gerçekleşmediğinden oluşan eksik yanma nedeniyle yüksek CO ve HC emisyonu değerleri ortaya çıkmaktadır. Soğukta ilk çalışma sırasında oluşan yüksek emisyon seviyeleri içten yanmalı motorlarda çözülmesi gereken önemli sorunlardan biridir. Diğer taraftan, DME'nin benzine göre oldukça düşük HC emisyonu değerleri verdiği Şekil 3(a)'da görülmektedir. DME için maksimum HC emisyonu 4192 ppm olarak belirlenmiş olup bu değer benzinle çalışma sırasında ortaya çıkan maksimum değer sadece %11.8'i kadar olduğu belirtilmiştir. DME motora gaz fazında gönderildiğinden kısa sürede havayla homojen olarak karışabilmekte ve

kimyasal yapısında doğrudan C–C bağı olmadığından düşük sıcaklıkta daha hızlı oksitlenmektedir. Bunun sonucunda, sıkıştırma sürecinde silindir içi sıcaklık daha hızlı yükselerek yanma için uygun koşullar olduğundan verimli bir yanma gerçekleşir. Bu nedenlerle, DME kullanıldığında ilk çalışma sırasında ve sonrasında benzine göre oldukça düşük HC emisyonu değerlerinin ortaya çıktığı belirtilmiştir. Diğer taraftan, ilk çalışmadan kısa bir süre sonra motorun ısınması sonucunda HC emisyonu değerlerinin hem benzin hem de DME için hızlıca azaldığı görülmektedir. Ancak, DME'nin yüksek yanma hızına sahip olması nedeniyle daha verimli bir yanma sağlayarak benzine göre oldukça düşük yaklaşık 1000–1300 ppm seviyesinde HC emisyonu değerleri verdiği belirtilmiştir (Ji vd., 2013).

Şekil 3(b)'de HC emisyonunun benzinli buji ateşlemeli yanma ve DME pilot enjeksiyonlu yanma için ortalama indike basınç (OİB–motor yükü) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu DME pilot enjeksiyonlu–kontrollü kendiliğinden ateşlemeli (CAI) veya diğer adıyla homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) yanma durumunda özellikle düşük motor yüklerinde buji ateşlemeli yanmaya göre oldukça yüksek

değerler almıştır. Bu durumun, düşük motor yüklerinde DME pilot enjeksiyonlu yanma sırasında aşırı fakir yakıt–

hava karışımı kullanılması nedeniyle yanma verimindeki düşüşten kaynaklandığı belirtilmiştir (Zhang vd., 2013).



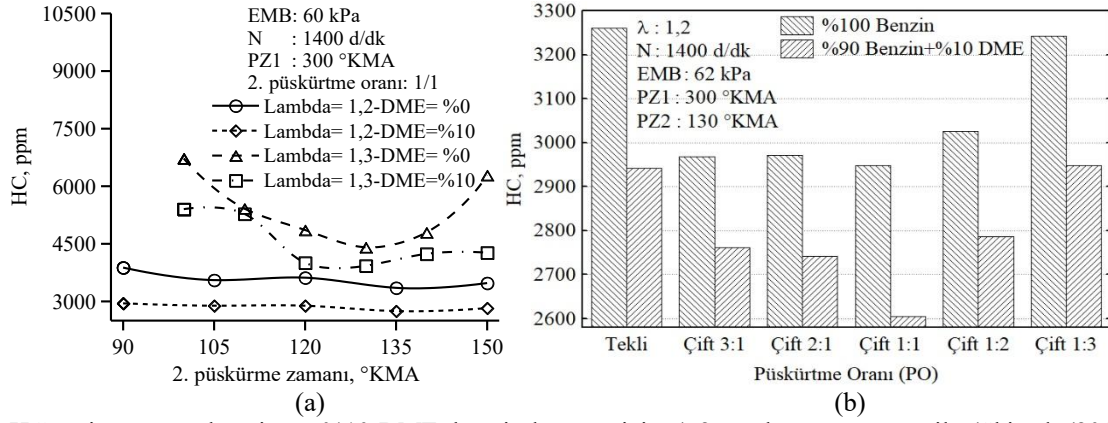
Şekil 3. HC emisyonunun a) benzin ve DME yakıtları için zaman ile (Ji vd. (2013))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir ve b) farklı yanma stratejileri için motor yükü ile (Zhang vd. (2013))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 3. Variation of HC emissions with a) time for gasoline and DME fuels (re-drawn using data from Ji et al. (2013)) and b) engine load for different combustion strategies (re-drawn using data from Zhang et al. (2013))

Şekil 4(a)’da HC emisyonunun benzin ve %10 DME–benzin karışımı için 60 kPa emme manifoldu basıncı (EMB–kısmi motor yükü), 1400 d/dk ve 1.2 ve 1.3 lambda (λ) değerlerinde 2. püskürtme zamanı (PZ2) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu $\lambda=1.2$ için PZ2’nin artmasıyla az miktarda azalırken $\lambda=1.3$ için PZ2 arttıkça önce azalmakta daha sonra artmakta olup $\lambda=1.2$ ’ye göre daha yüksek HC emisyonu değerleri ortaya çıkmıştır. $\lambda=1.3$ için daha yüksek HC emisyonu değerleri ortaya çıkmasının daha fakir karışımla çalışma nedeniyle artan çevrim farklılıklarından kaynaklandığı belirtilmiştir. PZ2 erkene alındığında fakir yakıt–hava karışımı sebebiyle buji etrafında tutuşabilir yeterli miktarda yakıtı sahip homojen bir karışım oluşmaması nedeniyle iyi bir tutuşma ve yanma gerçekleşmemesi sonucu HC emisyonunun arttığı ifade edilmiştir. PZ2 biraz geciktirildiğinde ise buji etrafındaki yakıt miktarının yeterli düzeye ulaşması sonucu tutuşmanın kolaylaşıp yanmanın iyileştiği ve HC emisyonunun azaldığı belirtilmiştir. Ancak, PZ2 çok fazla geciktirildiğinde piston yüzeyinde ve silindir duvarlarında biriken sıvı yakıt filminin yakıtça zengin bölgeler oluşturarak HC emisyonunu artırdığı ifade edilmiştir. Bu nedenle, direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motorlarda fakir karışımın neden olduğu olumsuzlukların PZ2’nin uygun şekilde ayarlanmasıyla azaltılabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan, aynı λ ve PZ2 değerleri için %10 DME–benzin karışımının daha düşük HC emisyonu verdiği şekilde görülmektedir. Segman yuvaları ve silindirin uzak köşeleri gibi düşük sıcaklıklı bölgelerde oluşan sıvı yakıt filminin yakıt–hava karışımı tamamen yanmadan alevin sönmemesinin HC emisyonu oluşumunun temel nedeni olduğu belirtilmektedir. Diğer taraftan, fakir yakıt–hava karışımlarının yanma sıcaklığını düşürerek HC emisyonunun artırdığı belirtilmiştir. DME’nin içeriğinde

oksijen olması, yapısında doğrudan C–C bağı bulunmaması ve düşük C/H oranına sahip olmasının yanma hızını artırarak fakir karışımla çalışma koşullarında HC emisyonunu azalttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, DME gaz fazında olduğundan daha homojen yakıt–hava karışımı oluşturarak kolay tutuşmayı sağlamakta ve silindir duvarlarında sıvı yakıt filmi oluşturmadığından alev cephesinin duvarlara daha fazla yaklaşmasını sağlamaktadır. Bu etkilerin sonucunda, benzinle birlikte DME kullanıldığında HC emisyonunun azaldığı belirtilmiştir (Shi vd., 2019a).

Şekil 4(b)’de HC emisyonunun benzin ve %10 DME–benzin karışımı için 62 kPa EMB, 1400 d/dk ve $\lambda=1.2$ değerlerinde 2. püskürtme oranı (PO2) ile değişimi verilmiştir. Direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motorlarda tekli püskürtmenin homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak çevrim farklılıklarını ve HC emisyonu artırdığı ve bu olumsuzlukların kademeli (çift) püskürtme ile azaltılabileceği belirtilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu PO2’nin artmasıyla önce azalmış daha sonra artmıştır. Çift püskürtme stratejisinde; püskürtülen yakıtın bir kısmı silindir içerisinde homojen olmayan bir ön karışım oluştururken bujinin yakınına yapılan ikinci püskürtme zengin tutuşabilir bir karışım oluşturarak kararlı bir tutuşma ve güçlü bir yanma sağlamaktadır. Böylece, çift püskürtme yapıldığında 3:1, 2:1 ve 1:1 PO2 değerleri için HC emisyonu azalmış, 1:2 ve 1:3 PO2 değerleri için ise artmıştır. Ayrıca, direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motorda %10 DME–benzin karışımı kullanıldığında HC emisyonu tüm püskürtme senaryolarında azalmıştır. Bunun, DME’nin içeriğinde oksijen olması ve kimyasal yapısında direkt C–C bağı bulunmaması nedeniyle tam yanma sağlayıp yanma verimini artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Shi vd., 2019b).

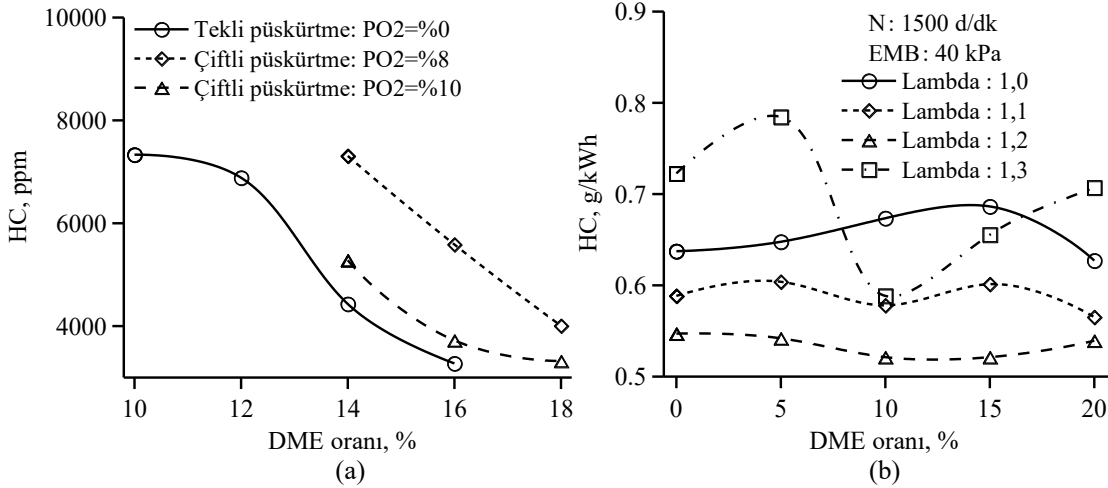


Şekil 4. HC emisyonunun benzin ve %10 DME–benzin karışım için a) 2. püskürtme zamanı ile (Shi vd. (2019a)’daki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) 2. püskürtme oranı ile (Shi vd. (2019b)’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 4. Variation of HC emissions for gasoline and 10% DME–gasoline blend with a) 2nd injection timing (redrawn using data from Shi et al. (2019a)) and b) 2nd injection ratio (redrawn using data from Shi et al. (2019b)).

Şekil 5(a)’da HC emisyonunun farklı PO₂ değerleri için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PO₂ değerlerinden bağımsız olarak değerlendirildiğinde DME oranı arttıkça HC emisyonunun sürekli azaldığı görülmektedir. DME’nin benzine göre kendiliğinden tutuşma sıcaklığının düşük, kimyasal yapısının basit ve içeriğinde oksijen bulunması sebebiyle tamamen yanmasının kolay olması ve DME oranı arttıkça motora gönderilen benzin miktarının azaltılması sonucu HC emisyonunun azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, DME’nin

tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin kısa olması nedeniyle genişleşme sürecinde yanmamış yakıtın yüksek sıcaklıkta kalma süresinin artmasıyla daha fazla yakıtın yakılmasının HC emisyonunun azalmasını sağladığı ifade edilmiştir. Öte yandan, aynı DME oranında, PO₂ miktarının artmasının da HC emisyonunu azalttığı şekilde görülmektedir. PO₂ miktarının artmasının PO₁’yi azaltması sonucu tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin kısalmasını ve silindir içi sıcaklığın artmasını sağlayarak HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir (He vd., 2020).



Şekil 5. HC emisyonunun a) farklı PO₂ değerleri için DME oranı ile (He vd. (2020)’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) farklı λ değerleri için DME oranı ile (Yang vd. (2023)’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 5. Variation of HC emissions with a) DME ratio for different PO₂ values (redrawn using data from He et al. (2020)) and b) DME ratio for different λ values (redrawn using data from Yang et al. (2023)).

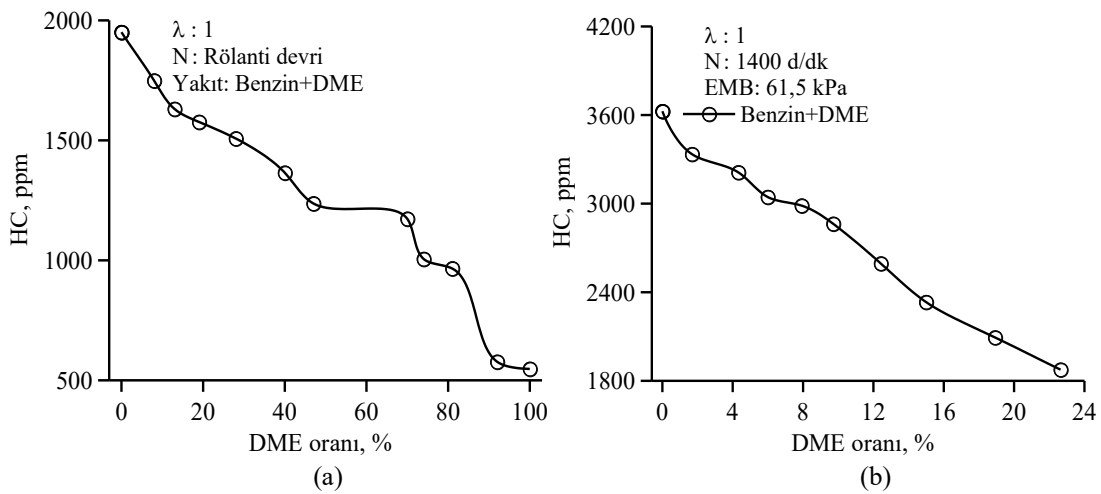
Şekil 5(b)’de benzin–DME karışımı ile çalışan yakıtın doğrudan silindire püskürtüldüğü buji ateşlemeli (DFSI) bir motorda HC emisyonunun farklı λ değerleri için DME oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi belirli bir λ değeri için HC emisyonu DME oranının değişimine bağlı olarak dalgalanma göstermiştir. DME’nin düşük sıcaklıkta kolay tutuşma özelliği sayesinde yanma verimini artırmasının ve HC emisyonunu azaltmasının beklendiği

ancak DME’nin yüksek difüzyon, düşük kaynama sıcaklığı ve hızlı buharlaşma özellikleri nedeniyle DFSI motorda oluşan silindir içi güçlü hava akımından etkilenmesinin kaçınılmaz olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, alev cephesi ile silindir duvarları arasındaki etkileşim silindir içi hava akışından etkilenmekte ve oluşan bu söndürme etkileri nedeniyle HC emisyonu değişebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, belirli DME oranı için HC emisyonu

önce azalmış daha sonra λ 'nın yükselmesiyle artmış ve en düşük HC emisyonu değerlerine $\lambda=1.2$ 'de ulaşıldığı bildirilmiştir. λ 'nın 1'den 1.2'ye yükselmesiyle HC emisyonları %0, %5, %10, %15 ve %20 DME oranları için sırasıyla %14.1, %16, %22.6, %24 ve %14.1 oralarında azaldığı belirlenmiştir. Fakir karışımla çalışma durumunda yakıt karışımının tam yanması için yeterli oksijen bulunması sonucunda HC emisyonunun azaldığı, ancak, $\lambda>1.2$ sınırı aşıldığında yanma hızının yavaşlamasıyla silindir duvarına yakın bölgelerde alev sönmesinin arttığı ve HC emisyonunun yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca, $\lambda>1.2$ için artan çevrim farklılıklarının HC emisyonunu artırdığı bildirilmiştir (Yang vd., 2023).

Şekil 6(a)'da HC emisyonunun benzin–DME karışımları için stokiometrik karışımla ($\lambda=1$) rölantide çalışma

durumunda DME oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu artan DME oranıyla hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bunun, DME'nin gaz fazında olmasının daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturup silindir duvarlarında sıvı yakıt filmi oluşturmaması nedeniyle yanma veriminin artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, DME'nin düşük kaynama noktası sıcaklığı, yüksek oksijen içeriği, kimyasal yapısında doğrudan C–C bağı olmaması ve kısa yakıt demeti uzunluğuna sahip olması sonucu yanma öncesi koşulları iyileştirdiği ve düşük sıcaklıkta yüksek oksidasyon özelliği ile sıkıştırma sürecinde sıcaklığı yükseltip yanma verimini artırdığı ve HC emisyonunu düşürdüğü belirtilmiştir (Ji vd., 2017).



Şekil 6. HC emisyonunun farklı benzin–DME karışımları için a) rölanti devrinde (Ji vd. (2017)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) 1400 d/dk motor devrinde (Ji vd. (2011)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) DME oranı ile değişimi

Figure 6. Variation of HC emissions with DME ratio for different gasoline–DME blends at a) idle speed (redrawn using data from Ji et al. (2017)) and b) 1400 rpm engine speed (redrawn using data from Ji et al. (2011))

Şekil 6(b)'de HC emisyonunun benzin–DME karışımları için $\lambda=1$, 1400 d/dk ve 61.5 kPa EMB değerinde DME oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan DME oranıyla HC emisyonu azalmakta ve saf benzin için 3630 ppm olan HC emisyonu değeri %22.7 DME oranında %48.7 azalarak 1879 ppm değerine ulaşmaktadır. HC emisyonundaki bu düşüşün DME'nin benzine kıyasla daha yüksek H/C oranına, daha düşük karbon ve içeriğinde oksijen olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, DME'nin gaz fazında olmasının daha homojen bir yakıt–hava karışımı sağlamasının, yüksek yanma hızına sahip olmasının ve molekül yapısının daha küçük olmasının daha verimli bir yanma sağlayarak HC emisyonunun azalttığı belirtilmiştir (Ji vd., 2011).

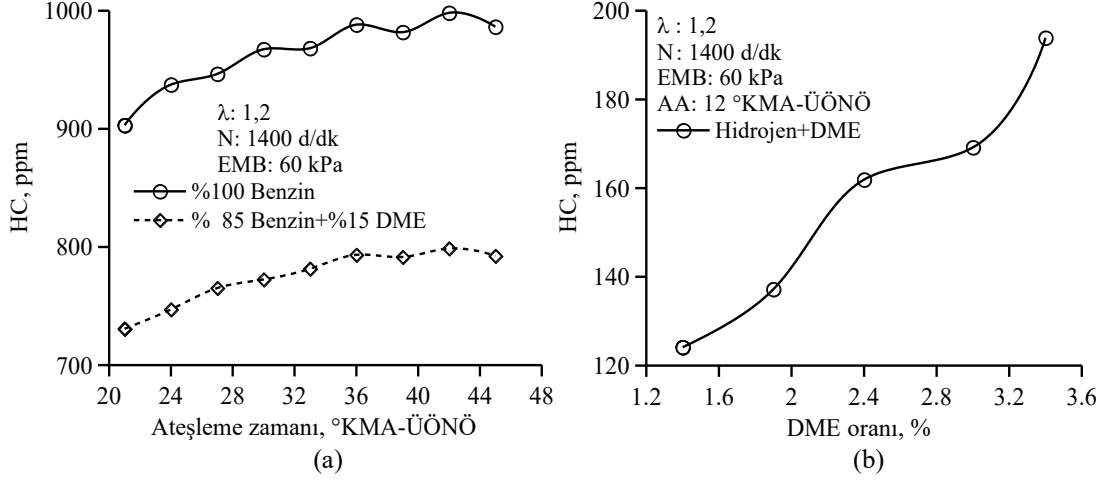
Şekil 7(a)'da HC emisyonunun benzin ve %15 DME–benzin karışımı için $\lambda=1.2$, 1400 d/dk ve 60 kPa EMB değerlerinde ateşleme zamanı (AZ) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu benzin ve benzin–DME karışımı için artan ateşleme zamanı ile bir miktar artarken DME katkısı HC emisyonunun azalmasını sağlamıştır. AZ'nin üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) 21°KMA (krank mili açısı) değerinden 45°KMA değerine

doğru artırılmasının silindir sıcaklığını düşürmesi nedeniyle yakıtın oksitlenme hızının ve yakılabilecek yakıt miktarının azaldığı ve bunun sonucunda HC emisyonunun arttığı belirtilmiştir. Bu nedenle, ateşleme zamanının uygun miktarda azaltılmasının HC emisyonunu düşürdüğü Şekil 7(a)'da açıkça görülmektedir. DME'nin setan sayısının yüksek olması nedeniyle kolay ve hızlı tutuşması ve DME'nin yanma hızının yüksek olması sayesinde benzin–DME karışımı kullanıldığında alevin silindirin uzak mesafelerine ulaşarak HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, DME'nin gaz fazında olmasının silindir duvarları ve piston yüzeylerindeki sıvı yakıt filmi oluşumunu azaltarak HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Diğer taraftan, DME'nin içeriğinde oksijen olmasının ve kimyasal yapısında direkt C–C bağı bulunmamasının yanmayı iyileştirerek yanma sıcaklığını artırıp HC emisyonunu azalttığı bildirilmiştir (Shi vd., 2018).

Şekil 7(b)'de HC emisyonunun hidrojen–DME karışımları için $\lambda=1.2$, 1400 d/dk, 60 kPa EMB ve 12 °KMA ateşleme avansı (AA) değerlerinde DME oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu artan

DME oranıyla sürekli artmış ve %2.4 DME oranında yaklaşık 190 ppm değerine kadar ulaşmıştır. Ancak, 190 ppm HC emisyonu değerinin oldukça düşük seviyede olduğu belirtilmiştir. HC emisyonundaki bu artışın

DME'nin düşük sıcaklıktaki oksidasyonu ve parçalanması sırasında CO ve HC bileşenlerinin açığa çıkmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Cong vd., 2021).

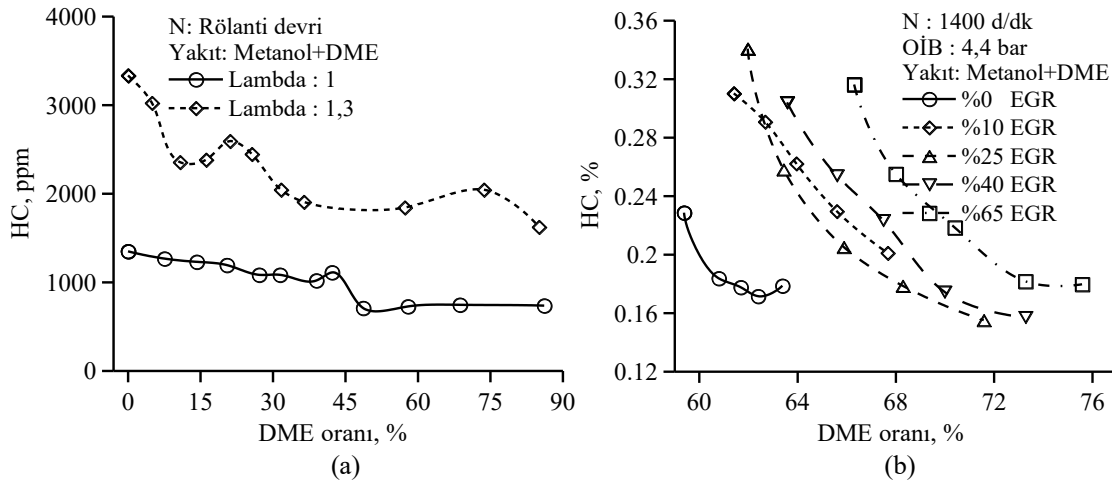


Şekil 7. HC emisyonunun a) farklı benzin–DME karışımları için ateşleme zamanı ile (Shi vd. (2018))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir ve b) farklı hidrojen–DME karışımları için DME oranı ile (Cong vd. (2021))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 7. Variation of HC emissions with a) ignition timing for different gasoline–DME blends (redrawn using data from Shi et al. (2018)) and b) DME ratio for different hydrogen–DME blends (redrawn using data from Cong et al. (2021))

Şekil 8(a)’da HC emisyonunun metanol–DME karışımları için rölantide çalışma durumunda $\lambda=1$ ve $\lambda=1.3$ değerleri için DME oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi $\lambda=1.3$ değerinde fakir karışımla çalışma nedeniyle HC emisyonu $\lambda=1$ ’e göre yükselmiş ve $\lambda=1$ ve $\lambda=1.3$ değerlerinde artan DME oranı ile HC emisyonu azalmıştır. Saf metanol için 1330 ppm olan HC emisyonu %86.3 DME oranında %44.5 oranında azalarak 739 ppm değerine ulaştığı belirtilmiştir. HC emisyonu kısmi veya eksik

yanma ürünü olup yakıt özellikleri, hava–yakıt oranı, AA gibi çalışma parametrelerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. DME’nin düşük kaynama noktası sıcaklığına ve yüksek difüzyon hızına sahip olması nedeniyle sıkıştırma sürecinde daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak ateşleme öncesinde açığa çıkan ısı miktarını ve silindir içi sıcaklığı artırıp yakılan yakıt miktarının artmasını ve HC emisyonunun azalmasını sağladığı belirtilmiştir (Liang vd., 2011).



Şekil 8. HC emisyonunun farklı metanol–DME karışımları için a) rölanti devrinde farklı hava fazlalık katsayılarında DME oranı ile (Liang vd. (2011))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir ve b) 1400 d/dk devir sayısında farklı EGR oranlarında DME oranı ile (Yao vd. (2006))’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 8. Variation of HC emissions with DME ratio for different methanol–DME blends a) at idle speed (redrawn using data from Liang et al. (2011)) and b) at different EGR rates at 1400 rpm (redrawn using data from Yao et al. (2006))

Şekil 8(b)’de HCCI bir motorlarda HC emisyonunun metanol–DME karışımları için 1400 d/dk ve 4,4 bar OİB

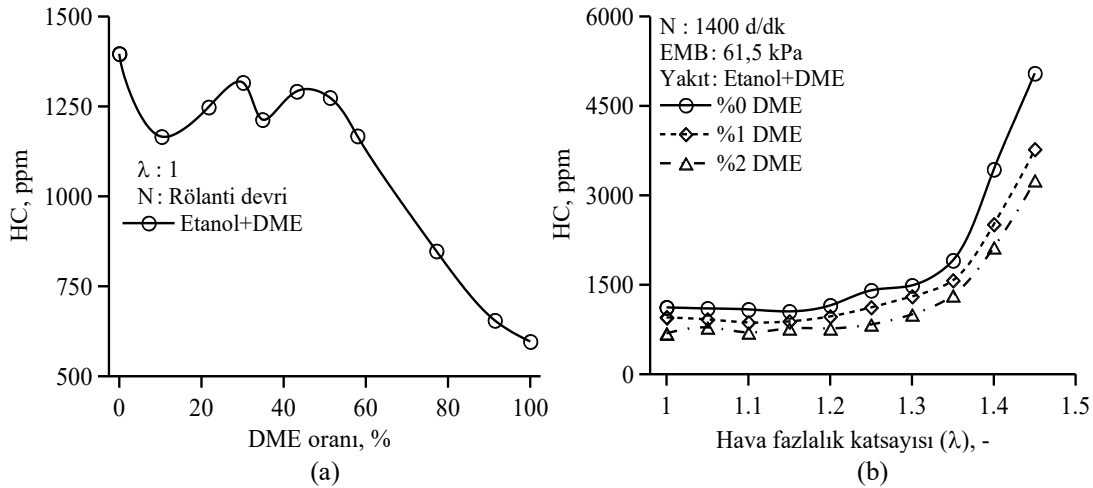
değerlerinde DME oranı ile değişimi verilmiştir. HCCI motorlar benzinli ve dizel motorlara göre oldukça fakir

karışımla çalışmaları nedeniyle düşük NO_x ve PM emisyonu değerlerine sahip olmalarına rağmen geleneksel motorlardan daha yüksek CO ve HC emisyonu değerlerine sahiptir. Şekilde görüldüğü gibi DME oranında EGR oranı arttıkça HC emisyonu artarken aynı EGR oranında DME oranı arttıkça HC emisyonu azalmaktadır. HC emisyonu genellikle silindir duvarları, piston yüzeyleri ve segman yuvaları gibi düşük sıcaklığa sahip alevin sönüdüğü bölgelerde üretilir. Ayrıca, HCCI motorların fakir ve tamamen homojen karışımla çalışmaları nedeniyle düşük yanma sıcaklıklarının ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu nedenle, yüksek yük değerlerinde daha fazla yakıt kullanılması sonucu yanma sıcaklığının artması nedeniyle düşük yükler göre daha az HC emisyonu ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, EGR'nin artırılmasının silindir sıcaklığını düşürerek HC emisyonunu artırdığı belirtilmiştir. Ancak, aynı EGR miktarında DME oranının artmasının silindir sıcaklığını artırarak HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Bu nedenle, HCCI motorlarda yüksek EGR oranlarında HC emisyonunu azaltabilmek için yüksek oranda DME kullanılması gerektiği belirtilmiştir (Yao vd., 2006).

Şekil 9(a)'da HC emisyonunun etanol-DME karışımları için rölantide $\lambda=1$ ile çalışma durumunda DME oranıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu artan DME oranıyla azalmış ve saf etanol için 1398 ppm olan HC emisyonunun %100 DME oranında %57.3 azalarak 597 ppm değerine ulaştığı belirlenmiştir. DME'nin düşük sıcaklıktaki oksidasyonu ve yüksek yanma hızı sayesinde erken tutuşma ve kısa süren yanma

sonucunda tam yanma gerçekleşmekte ve eksik yanma ürünü olan CO ve HC emisyonları CO_2 ve H_2O 'ya dönüşmektedir. Ayrıca, DME'nin gaz fazında ve yüksek difüzyon hızına sahip olmasının daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturarak yanma başlangıcı koşullarını iyileştirmesinin ve düşük sıcaklıktaki oksidasyon kabiliyetinin yüksek olmasının yanma sıcaklığını artırmasının HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Böylece, artan DME oranıyla HC emisyonunun azaldığı belirtilmiştir (Ji vd., 2012).

Şekil 9(b)'de HC emisyonunun etanol ve etanol-DME karışımları için 1400 d/dk ve 61.5 kPa EMB değerlerinde λ ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu saf etanol ve etanol-DME karışımları için özellikle $\lambda=1.3$ değerinden sonra artmış, etanol-DME karışımları saf etanole göre daha düşük HC emisyonu vermiş ve HC emisyonu artan DME oranı ile azalmıştır. $\lambda=1$ değerinde saf etanol için 1075 ppm olan HC emisyonu %34.7 azalarak %2 DME oranında 702 ppm değerine ulaştığı belirlenmiştir. Silindire gaz fazında gönderilen DME'nin kısa sürede buharlaşarak daha homojen yakıt-hava karışımı oluşturmamasının ve düşük sıcaklıktaki yüksek oksidasyon özelliğinin yanma öncesinde ve yanma sırasında sıcaklığı yükselterek HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. $\lambda=1.3$ değerinden sonra HC emisyonundaki artışın ise aşırı fakirleşen karışım nedeniyle yakıt-hava karışımının homojen yapısının bozulmasıyla yanmanın kötüleşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Liang vd., 2012).



Şekil 9. HC emisyonunun farklı etanol-DME karışımları için a) rölanti devrinde DME oranı ile (Ji vd. (2012)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) 1400 d/dk devir sayısında hava fazlalık katsayısı ile (Liang vd. (2012)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 9. Variation of HC emissions for different ethanol-DME blends with a) DME ratio at idle speed (redrawn using data from Ji et al. (2012)) and b) excess air ratio at 1400 rpm (redrawn using data from Liang et al. (2012))

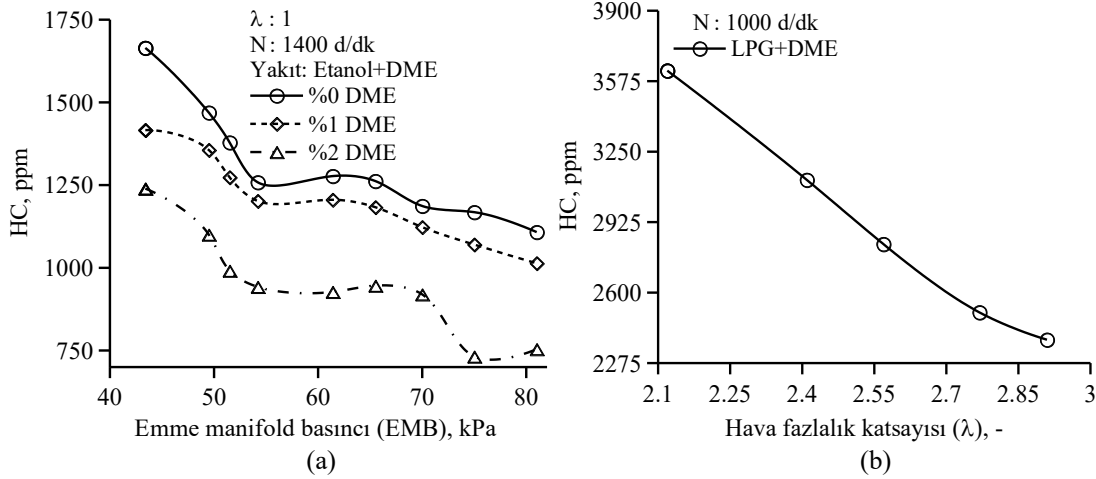
Şekil 10(a)'da HC emisyonunun etanol ve etanol-DME karışımları için 1400 d/dk ve $\lambda=1$ değerinde EMB ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu saf etanol ve etanol-DME karışımları için artan motor yüküyle azalmış, etanol-DME karışımları saf etanole göre daha düşük HC emisyonu vermiş ve HC emisyonu artan DME oranıyla azalmıştır. HC emisyonundaki en fazla düşüşün %2 DME oranında 75.1 kPa için %38 olduğu

belirlenmiştir. %2 DME oranında 43.4 kPa için 1238 ppm olan HC emisyonunun 81 kPa için yaklaşık %39.8 azalarak 745 ppm değerine ulaştığı belirlenmiştir. Motor yükü arttıkça motorun daha yüksek sıcaklıklarda çalışması sonucu artan silindir duvarı sıcaklığının alevin sönme mesafesini kısaltarak HC emisyonunun düşmesini sağladığı belirtilmiştir. Öte yandan, DME katkısı ile HC emisyonundaki azalmanın DME'nin gaz fazında olması ve

içeriğinde oksijen olması sayesinde daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturmasının yanında kimyasal yapısında direkt C-C bağı bulunmaması ve setan sayısının yüksek olması nedeniyle yanmayı iyileştirip yanma süresini kısaltmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Liang vd., 2013).

Şekil 10(b)'de HCCI bir motorlarda HC emisyonunun LPG-DME karışımları için 1000 d/dk'da λ ile değişimi

verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu artan λ ile sürekli azalmıştır. HC emisyonundaki bu azalmanın λ 'nın artmasıyla silindire gönderilen yakıt miktarının azalmasından ve buna bağlı olarak yanma süresinin kısaltmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Yeom & Bae, 2009).

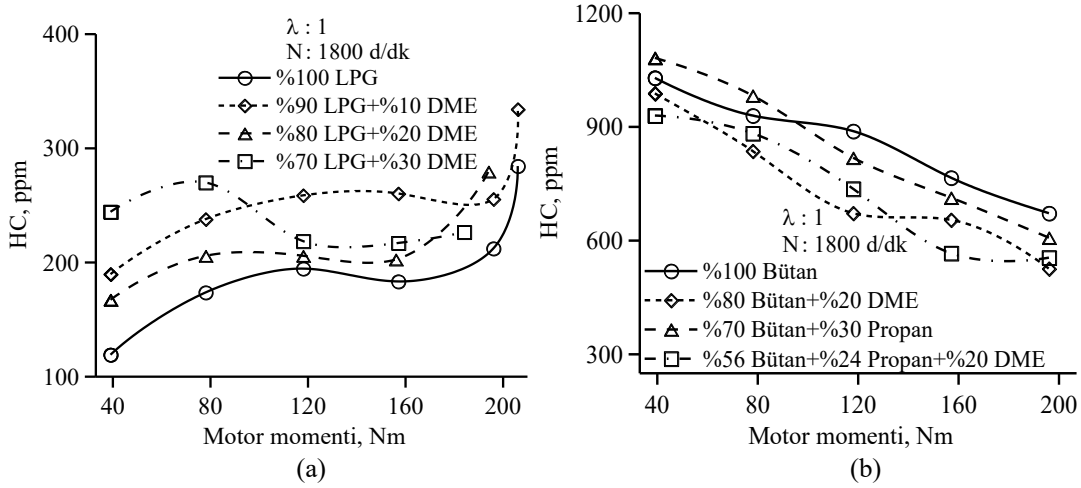


Şekil 10. HC emisyonunun a) etanol-DME karışımları için kısmi motor yükü ile (Liang vd. (2013)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) LPG-DME karışımları için hava fazlalık katsayısı ile (Yeom & Bae (2009)'daki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) değişimi

Figure 10. Variation of HC emissions with a) partial engine load for ethanol-DME blends (redrawn using data from Liang et al. (2013)) and b) excess air ratio for LPG-DME blends (redrawn using data from Yeom & Bae (2009))

Şekil 11(a)'da HC emisyonunun 1800 d/dk'da LPG ve farklı LPG-DME karışımları için motor momentiyle değişimi verilmiştir. Şekil 11(a)'da görüldüğü gibi HC emisyonu genel olarak momentin artmasıyla artmıştır. Bunun moment arttıkça motorun nispeten daha zengin yakıt-hava karışımıyla çalışması nedeniyle ortaya çıkan eksik yanmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, LPG-DME karışımları kullanıldığında HC emisyonu saf LPG yakıtına göre bir miktar artmıştır. Bunun, DME'nin düşük oktan sayısına sahip olması nedeniyle motorun vuruntulu çalışmasına neden olması sonucunda ortaya çıktığı belirtilmiştir (Lee vd., 2009).

Şekil 11(a)'da HC emisyonunun 1800 d/dk'da LPG ve farklı LPG-DME karışımları için motor momentiyle değişimi verilmiştir. Şekil 11(a)'da görüldüğü gibi HC emisyonu genel olarak momentin artmasıyla artmıştır. Bunun moment arttıkça motorun nispeten daha zengin yakıt-hava karışımıyla çalışması nedeniyle ortaya çıkan eksik yanmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, LPG-DME karışımları kullanıldığında HC emisyonu saf LPG yakıtına göre bir miktar artmıştır. Bunun, DME'nin düşük oktan sayısına sahip olması nedeniyle motorun vuruntulu çalışmasına neden olması sonucunda ortaya çıktığı belirtilmiştir (Lee vd., 2009).

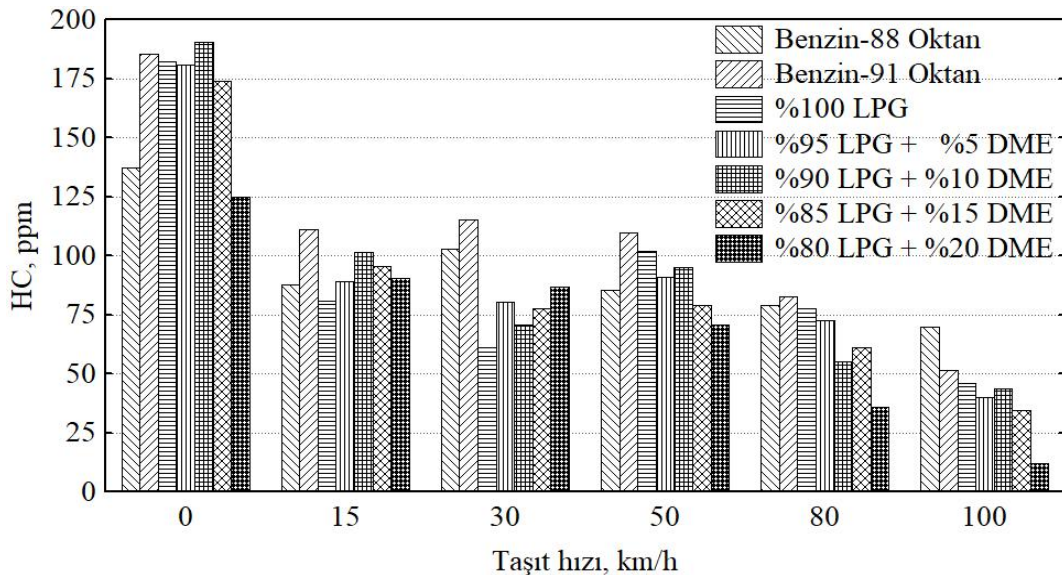


Şekil 11. HC emisyonunun a) LPG–DME karışımları için (Lee vd. (2009)’daki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) ve b) Bütan–Propan–DME karışımları için (Lee vd. (2011)’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir) motor momentini ile değişimi

Figure 11. Variation of HC emissions with engine torque for a) LPG–DME blends (redrawn using data from Lee et al. (2009)) and b) Butane–Propane–DME blends (redrawn using data from Lee et al. (2011))

Şekil 12’de buji ateşlemeli motora sahip bir taşıtta HC emisyonunun benzin, LPG ve farklı oranlarda LPG–DME karışımları için taşıt hızıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi taşıt hızı arttıkça HC emisyonu azalmış, 91 oktanlı benzin, 88 oktanlı benzine göre genelde daha yüksek HC emisyonu verirken LPG ve LPG–DME karışımları özellikle 91 oktanlı benzine göre daha düşük HC emisyonu vermiş ve özellikle orta ve yüksek taşıt hızlarında LPG–DME karışımı içindeki DME oranı arttıkça HC emisyonu azalmıştır. 91 oktanlı benzinle kıyaslandığında DME5, DME10, DME15 ve DME20 karışımları için HC emisyonunun sırasıyla %14, %15.2,

%21.4 ve %40 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Taşıt hızı arttıkça HC emisyonundaki düşüşün motorun daha fakir karışımla çalışmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. LPG ve LPG–DME karışımlarının gaz fazında olmasının silindir duvarları ve piston yüzeylerinde sıvı yakıt filmi oluşmasını engelleyerek alevin sönme etkilerini azaltıp HC emisyonunu düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, DME’nin içeriğinde oksijen olması, yapısında direkt bağlı karbon bulunmaması, setan sayısının ve yanma hızının yüksek olmasının HC emisyonunu azalttığı belirtilmiştir (Anggarani vd., 2015).



Şekil 12. HC emisyonunun LPG–DME karışımları için taşıt hızı ile değişimi (Anggarani vd. (2015)’deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir)

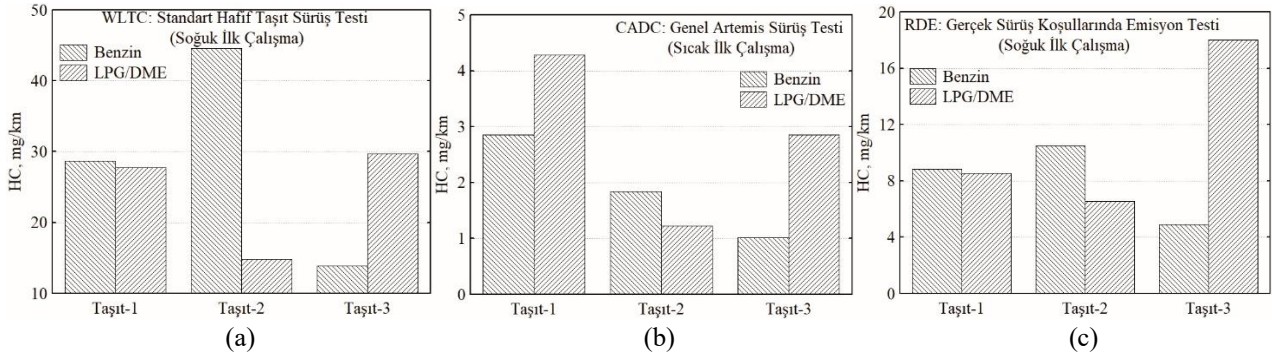
Figure 12. Variation of HC emissions with vehicle speed for LPG–DME blends (redrawn using data from Anggarani et al. (2015))

Şekil 13(a)–(c)’de benzin ve LPG–DME yakıtlı üç farklı taşıt için HC emisyonunun farklı sürüş testlerindeki

değişimleri verilmiştir. Taşıt-1 ve Taşıt-2’nin üç yollu katalitik konvektörle donatılmış manifold enjeksiyonlu

buji ateşlemeli motor sahip ve Taşıt-3'ün ise üç yollu katalitik konvektörle birlikte benzin partikül filtresi ile donatılmış doğrudan silindire enjeksiyonlu turbo şarjlı buji ateşlemeli motora sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 13(a)'da görüldüğü gibi benzin yerine LPG-DME karışımı kullanıldığında standart hafif taşıt sürüş testinde (WLTC) HC emisyonu Taşıt-1 için az miktarda ve Taşıt-2 için önemli miktarda azalırken Taşıt-3 için önemli miktarda artmıştır. Şekil 13(b)'de görüldüğü gibi benzin yerine LPG-DME karışımı kullanıldığında genel Artemis sürüş

testinde (CADC) HC emisyonu Taşıt-1 ve Taşıt-3 için önemli miktarda artarken Taşıt-2 için az miktarda azalmıştır. Şekil 13(c)'de görüldüğü gibi benzin yerine LPG-DME karışımı kullanıldığında genel gerçek sürüş koşullarında emisyon testinde (RDE) HC emisyonu Taşıt-1 ve Taşıt-2 için bir miktar azalırken Taşıt-3 için önemli miktarda artmıştır. HC emisyonundaki bu değişimlerde LPG ve DME'nin yakıt özelliklerinin yanı sıra taşıt özelliklerinin de etkili olduğu belirtilmiştir (Rossi vd., 2024).



Şekil 13.(a-c) Benzin ve LPG-DME yakıtlı üç farklı taşıt için HC emisyonunun farklı sürüş testlerindeki değişimi (Rossi vd. (2024)'deki veriler kullanılarak yeniden çizilmiştir)

Figure 13. (a-c) Variation of HC emissions in different driving tests for three different vehicles fueled with gasoline and LPG-DME (redrawn using data from Rossi et al. (2024))

Çizelge 2. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler
Table 2. Changes in HC emissions with the use of DME

Yakıt veya Karışım	DME oranı	Motor tipi ve çalışma koşulları	HC değişim oranı	Kaynak
Benzin ve DME	%100	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor rölantide çalışma	t=0.6 s için %42.8↓ t=1.5 s için %60.1↓ t=1.8 s için %85.1↓ t=2.4 s için %92.5↓ t=3.0 s için %90.1↓ t=4.5 s için %82.2↓ t=5.0 s için %83.5↓ t=10 s için %80.2↓ t=20 s için %85.7↓ t=30 s için %72.3↓ t=40 s için %71.8↓ t=50 s için %78.4↓	(Ji vd., 2013)
Benzin ve DME	%100	Tek silindirli buji ateşlemeli motor ve DME yakıtlı HCCI motor $\lambda=1.1$ 'de çalışma	OİB=2.6 bar için %72.1↑ OİB=3.7 bar için %141 ↑ OİB=4.6 bar için %70.7↑ OİB=5.5 bar için %14.3↑ OİB=7.3 bar için %15.4↓	(Zhang vd., 2013)
Benzin+DME	%10	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motor PO2=1/1, PZ1=300°KMA, $\lambda=1.2$, N=1400d/dk ve EMB=60kPa'da çalışma	PZ2: 90 °KMA için %24.1↓ PZ2: 105 °KMA için %18.8↓ PZ2: 120 °KMA için %20.2↓ PZ2: 135 °KMA için %18.1↓ PZ2: 150 °KMA için %18.8↓	(Shi vd., 2019a)
Benzin+DME	%10	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motor PO2=1/1, PZ1=300°KMA, $\lambda=1.3$, N=1400d/dk ve EMB=60kPa'da çalışma	PZ2: 100 °KMA için %19.6↓ PZ2: 110 °KMA için %2.58↓ PZ2: 120 °KMA için %17.6↓ PZ2: 130 °KMA için %10.9↓ PZ2: 140 °KMA için %11.6↓ PZ2: 150 °KMA için %32.1↓	(Shi vd., 2019a)
Benzin+DME	%10	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli motor PZ1=300°KMA, PZ2=130°KMA, $\lambda=1.2$, N=1400d/dk ve EMB=62kPa'da çalışma	PO2: 0 için %17.7↓ PO2: 3/1 için %45.2↓ PO2: 2/1 için %34.5↓ PO2: 1/1 için %16.1↓ PO2: 1/2 için %6.33↓ PO2: 1/3 için %6.99↓	(Shi vd., 2019b)
Benzin+DME	%10–16	Tek silindirli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor PO2=0	%10 DME için %8.33↓ %12 DME için %13.9↓ %14 DME için %44.6↓ %16 DME için %59.1↓	(He vd., 2020)
Benzin+DME	%14–18	Tek silindirli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor PO2=%8	%14 DME için %8.62↓ %16 DME için %30.2↓ %18 DME için %49.9↓	(He vd., 2020)
Benzin+DME	%14–18	Tek silindirli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor PO2=%10	%14 DME için %33.9↓ %16 DME için %53.5↓ %18 DME için %58.5↓	(He vd., 2020)
Benzin+DME	%0–20	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli (DFSI) motor N=1400d/dk, EMB=40kPa ve farklı $\lambda=1,1$ 'de çalışma	%5 DME için %2.63↑ %10 DME için %1.75↓ %15 DME için %2.19↑ %20 DME için %3.95↓	(Yang vd., 2023)
Benzin+DME	%0–20	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli (DFSI) motor N=1400d/dk, EMB=40kPa ve farklı $\lambda=1.2$ 'de çalışma	%5 DME için %0.94↓ %10 DME için %4.72↓ %15 DME için %4.72↓ %20 DME için %1.42↓	(Yang vd., 2023)

Çizelge 2. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler (Devamı)

Table 2. Changes in HC emissions with the use of DME (Continued)

Yakıt veya Karışım	DME oranı	Motor tipi ve çalışma koşulları	HC değişim oranı	Kaynak
Benzin+DME	%0–20	4 silindirli direkt püskürtmeli buji ateşlemeli (DFSI) motor N=1400d/dk, EMB=40kPa ve farklı $\lambda=1.3$ 'de çalışma	%5 DME için %8.57↑ %10 DME için %18.6↓ %15 DME için %9.29↓ %20 DME için %2.14↓	(Yang vd., 2023)
Benzin+DME	%0–100	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$ 'de rölantide çalışma	%8 DME için %10.3↓ %13 DME için %16.4↓ %19 DME için %19.2↓ %28 DME için %22.7↓ %40 DME için %30.1↓ %47 DME için %36.6↓ %70 DME için %39.8↓ %74 DME için %48.4↓ %80 DME için %50.5↓ %92 DME için %70.4↓ %100 DME için %70.4↓	(Ji vd., 2017)
Benzin+DME	%0–22.6	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1400d/dk ve EMB=61.5kPa'da çalışma	%1.7 DME için %8.01↓ %4.3 DME için %11.4↓ %5.9 DME için %16.1↓ %7.9 DME için %17.6↓ %9.7 DME için %21.1↓ %12.4 DME için %28.4↓ %14.9 DME için %35.6↓ %18.9 DME için %42.2↓ %22.6 DME için %48.3↓	(Ji vd., 2011)
Benzin+DME	%15	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1,2$, N=1400d/dk ve EMB=60kPa koşullarında çalışma	AA=21 °KMA için %19.1↓ AA=24 °KMA için %20.3↓ AA=27 °KMA için %19.2↓ AA=30 °KMA için %20.1↓ AA=33 °KMA için %19.3↓ AA=36 °KMA için %19.7↓ AA=39 °KMA için %19.4↓ AA=42 °KMA için %19.9↓ AA=45 °KMA için %19.7↓	(Ji vd., 2018)
Hidrojen+DME	%1.4–3.4	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1.2$, N=1400d/dk, EMB=60kPa ve AA=12°KMA koşullarında çalışma	%1.4 DME için %15.4↑ %1.9 DME için %23.5↑ %2.4 DME için %35.2↑ %3.0 DME için %37.9↑ %3.4 DME için %45.8↑	(Cong vd., 2021)
Metanol+DME	%7.5–86.3	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$ 'de rölantide çalışma	%7.5 DME için %6.1 ↓ %14.2 DME için %8.8 ↓ %20.5 DME için %11.5↓ %27.1 DME için %19.6↓ %31.4 DME için %19.6↓ %38.9 DME için %24.4↓ %42.2 DME için %17.6↓ %48.6 DME için %47.4↓ %57.9 DME için %46.1↓ %68.7 DME için %44.7↓ %86.3 DME için %45.4↓	(Liang vd., 2011)

Çizelge 2. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler (Devamı)

Table 2. Changes in HC emissions with the use of DME (Continued)

Yakıt veya Karışım	DME oranı	Motor tipi ve çalışma koşulları	HC değişim oranı	Kaynak
Metanol+DME	%4.9–85.1	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor $\lambda=1.3$ 'de rölantide çalışma	%4.9 DME için %9.3 ↓ %10.7 DME için %29.3↓ %16.1 DME için %28.5↓ %21.1 DME için %22.2↓ %25.6 DME için %26.6↓ %31.6 DME için %38.6↓ %36.4 DME için %42.8↓ %57.3 DME için %44.7↓ %73.6 DME için %37.7↓ %68.7 DME için %44.7↓ %85.1 DME için %51.3↓	(Liang vd., 2011)
Metanol+DME	%59.4–63.4	Tek silindirli HCCI motor N=1400d/dk, OİB=4.4bar ve EGR=%0 koşullarında çalışma	%57.3 DME için %2.68↓ %60.8 DME için %21.7↓ %61.7 DME için %24.4↓ %62.4 DME için %26.9↓ %63.4 DME için %23.9↓	(Yao vd., 2006)
Metanol+DME	%61.4–67.6	Tek silindirli HCCI motor N=1400d/dk, OİB=4.4bar ve EGR=%10 koşullarında çalışma	%61.4 DME için %4.53↓ %62.7 DME için %10.5↓ %63.9 DME için %19.3↓ %65.6 DME için %29.3↓ %67.6 DME için %38.1↓	(Yao vd., 2006)
Metanol+DME	%61.9–71.6	Tek silindirli HCCI motor N=1400d/dk, OİB=4.4bar ve EGR=%25 koşullarında çalışma	%61.9 DME için %2.61↓ %63.4 DME için %26.2↓ %65.9 DME için %41.3↓ %68.3 DME için %48.9↓ %71.6 DME için %55.6↓	(Yao vd., 2006)
Metanol+DME	%63.5–73.2	Tek silindirli HCCI motor N=1400d/dk, OİB=4.4bar ve EGR=%40 koşullarında çalışma	%63.5 DME için %4.95↓ %65.6 DME için %20.5↓ %67.5 DME için %30.1↓ %69.9 DME için %45.4↓ %73.2 DME için %50.8↓	(Yao vd., 2006)
Metanol+DME	%63.9–75.6	Tek silindirli HCCI motor N=1400d/dk, OİB=4.4bar ve EGR=%65 koşullarında çalışma	%63.9 DME için %2.55↓ %66.3 DME için %20.9↓ %67.9 DME için %36.2↓ %70.4 DME için %45.4↓ %73.2 DME için %54.5↓ %75.6 DME için %55.1↓	(Yao vd., 2006)
Etanol+DME	%0–100	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$ 'de rölantide çalışma	%10.3 DME için %16.5↓ %21.7 DME için %10.6↓ %30.1 DME için %5.72↓ %34.8 DME için %13.1↓ %43.2 DME için %7.48↓ %51.2 DME için %8.73↓ %57.9 DME için %16.3↓ %77.2 DME için %39.3↓ %91.3 DME için %53.1↓ %100 DME için %57.3↓	(Ji vd., 2012)

Çizelge 2. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler (Devamı)
Table 2. Changes in HC emissions with the use of DME (Continued)

Yakıt veya Karışım	DME oranı	Motor tipi ve çalışma koşulları	HC değişim oranı	Kaynak
Etanol+DME	%1	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor N=1400d/dk, EMB=61.5kPa ve farklı hava fazlalık katsayıları ile çalışma	$\lambda=1.0$ için %14.9↓ $\lambda=1.05$ için %16.7↓ $\lambda=1.1$ için %20.1↓ $\lambda=1.15$ için %15.9↓ $\lambda=1.2$ için %15.9↓ $\lambda=1.25$ için %20.3↓ $\lambda=1.3$ için %12.4↓ $\lambda=1.35$ için %17.6↓ $\lambda=1.4$ için %26.8↓ $\lambda=1.45$ için %25.2↓	(Liang vd., 2012)
Etanol+DME	%2	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor N=1400d/dk, EMB=61.5kPa ve farklı hava fazlalık katsayıları ile çalışma	$\lambda=1.0$ için %38.9↓ $\lambda=1.05$ için %28.9↓ $\lambda=1.1$ için %35.5↓ $\lambda=1.15$ için %27.1↓ $\lambda=1.2$ için %33.4↓ $\lambda=1.25$ için %40.6↓ $\lambda=1.3$ için %32.6↓ $\lambda=1.35$ için %30.7↓ $\lambda=1.4$ için %38.1↓ $\lambda=1.45$ için %35.6↓	(Liang vd., 2012)
Etanol+DME	%1	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1400d/dk ve farklı EMB koşullarında çalışma	EMB=43.4 kPa için %14.9↓ EMB=49.5 kPa için %7.68↓ EMB=51.5 kPa için %7.64↓ EMB=54.2 kPa için %4.48↓ EMB=61.4 kPa için %5.59↓ EMB=65.5 kPa için %6.26↓ EMB=70 kPa için %5.39↓ EMB=75 kPa için %8.37↓ EMB=81 kPa için %8.49↓	(Liang vd., 2013)
Etanol+DME	%2	4 silindirli doğal emişli manifold püskürtmeli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1400d/dk ve farklı EMB koşullarında çalışma	EMB=43.4 kPa için %25.3↓ EMB=49.5 kPa için %25.1↓ EMB=51.5 kPa için %28.1↓ EMB=54.2 kPa için %25.1↓ EMB=61.4 kPa için %27.4↓ EMB=65.5 kPa için %25.1↓ EMB=70 kPa için %22.5↓ EMB=75 kPa için %37.3↓ EMB=81 kPa için %31.9↓	(Liang vd., 2013)
LPG+DME	%10	6 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1800d/dk ve farklı moment koşullarında çalışma	39 Nm için %59.2↑ 78 Nm için %36.9↑ 118 Nm için %32.9↑ 157 Nm için %41.9↑ 196 Nm için %20.4↑ 206 Nm için %17.5↑	(Lee vd., 2009)
LPG+DME	%20	6 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1800d/dk ve farklı moment koşullarında çalışma	39 Nm için %40.3↑ 78 Nm için %18.4↑ 118 Nm için %5.77↑ 157 Nm için %10.5↑ 194 Nm için %31.7↑	(Lee vd., 2009)
LPG+DME	%30	6 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor $\lambda=1$, N=1800d/dk ve farklı moment koşullarında çalışma	39 Nm için %105↑ 78 Nm için %55.4↑ 118 Nm için %12.3↑ 157 Nm için %18.3↑ 184 Nm için %6.81↑	(Lee vd., 2009)

Çizelge 2. DME kullanımı ile HC emisyonundaki değişimler (Devamı)
Table 2. Changes in HC emissions with the use of DME (Continued)

Yakıt veya Karışım	DME oranı	Motor tipi ve çalışma koşulları	HC değişim oranı	Kaynak
LPG+DME	%5	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor farklı taşıt hızlarında çalışma	0 km/h için %0.71↓ 15 km/h için %10.3↑ 30 km/h için %31.6↑ 50 km/h için %10.7↓ 80 km/h için %6.61↓ 100 km/h için %13.9↓	(Anggarani vd., 2015)
LPG+DME	%10	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor farklı taşıt hızlarında çalışma	0 km/h için %4.58↑ 15 km/h için %25.4↑ 30 km/h için %15.8↑ 50 km/h için %6.92↓ 80 km/h için %28.9↓ 100 km/h için %5.56↓	(Anggarani vd., 2015)
LPG+DME	%15	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor farklı taşıt hızlarında çalışma	0 km/h için %4.57↓ 15 km/h için %18.3↑ 30 km/h için %27.4↑ 50 km/h için %22.6↓ 80 km/h için %21.5↓ 100 km/h için %24.9↓	(Anggarani vd., 2015)
LPG+DME	%20	4 silindirli doğal emişli buji ateşlemeli motor farklı taşıt hızlarında çalışma	0 km/h için %31.3↓ 15 km/h için %11.9↑ 30 km/h için %42.1↑ 50 km/h için %30.8↓ 80 km/h için %53.7↓ 100 km/h için %73.6↓	(Anggarani vd., 2015)

6. Sonuçlar

Bu çalışmada buji ateşlemeli motorlarda benzin veya diğer yakıtlarla birlikte DME kullanılması HC emisyonuna etkileri literatüre dayalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulguların ışığında DME'nin buji ateşlemeli motorlarda kullanılabilirliğinin olduğu görülmüş olup aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- HC emisyonunun esas olarak segman yuvaları ve silindirin uzak köşelerinde bulunan yakıtın tam yanmaması sonucunda ortaya çıktığı ve HC emisyonu miktarının kullanılan yakıtın özelliklerinden, hava-yakıt oranından, ateşleme avansından ve diğer çalışma koşullarından önemli ölçüde etkilendiği belirlenmiştir.
- DME pilot enjeksiyonlu HCCI yanma işleminin düşük motor yüklerinde geleneksel buji ateşlemeli yanmaya göre oldukça yüksek, orta ve yüksek motor yüklerinde ise buji ateşlemeli yanma ile yaklaşık aynı HC emisyonu değerleri verdiği tespit edilmiştir. Buji ateşlemeli motorda rölantide ilk çalışma durumunda saf DME kullanıldığında ortaya çıkan HC emisyonu değerinin benzinle elde edilen değerin sadece %11,8 kadar olduğu belirlenmiştir.
- Direkt püskürtmeli bir buji ateşlemeli motorda çift püskürtme yapılmasının tekli püskürtmeye göre daha düşük HC emisyonu sağladığı ancak çiftli püskürtmede ikinci püskürtmedeki yakıt miktarının ilk püskürtmeden fazla olması durumunda HC emisyonun arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, hava fazlalık katsayısının artırılmasının

HC emisyonunu artırdığı ve HC emisyonunu azaltabilmek için ikinci püskürtme zamanının uygun şekilde ayarlanması gerektiği belirlenmiş ve direkt püskürtmeli buji ateşlemeli bir motorda benzinle birlikte %10 oranında DME kullanılması yanmayı iyileştirerek HC emisyonunu azalttığı tespit edilmiştir.

- Buji ateşlemeli bir motorda stokiyometrik karışımla rölantide çalışma durumunda benzin ile birlikte DME kullanıldığında HC emisyonunun %100 DME oranına kadar sürekli azaldığı ve 61.5 kPa EMB altında 1400 d/dk'da stokiyometrik karışımla çalışma durumunda saf benzin için 3630 ppm olan HC emisyonunun %48.7 DME oranında %22.7 azalarak 1879 ppm'e ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, 60 kPa EMB altında 1400 d/dk ve $\lambda=1.2$ koşullarında %15 DME karışımı kullanıldığında saf benzine göre HC emisyonunun %18,9 azaldığı ancak benzin ve %15 DME karışımı için ateşleme avansının artırılmasının HC emisyonunu artırdığı belirlenmiştir.
- Buji ateşlemeli bir motorda 60 kPa EMB altında 1400 d/dk ve $\lambda=1.2$ koşullarında çalışma durumunda hidrojen ile birlikte DME kullanılması HC emisyonunu artırdığı ve artan DME oranı ile HC emisyonun sürekli arttığı ancak %3.4 DME oranında HC emisyonunun 200 ppm değerinin üzerine çıkmadığı tespit edilmiştir.
- Buji ateşlemeli bir motorda rölantide çalışma durumunda metanol-DME karışımları kullanıldığında artan DME oranıyla HC emisyonunun azaldığı saf metanol için 1330 ppm olan HC emisyonunun %86.3 DME oranında %44.5 azalarak 739 ppm'e ulaştığı belirlenmiştir.

Ayrıca, saf metanol ve metanol–DME karışımları için $\lambda=1.3$ değerinde $\lambda=1$ 'e göre daha yüksek HC emisyonu değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Öte yandan, HCCI bir motorda metanol–DME karışımları kullanıldığında HC emisyonunun artan DME oranıyla azaldığı aynı DME oranında EGR miktarının artırılmasının HC emisyonunu artırdığı belirlenmiştir.

- Buji ateşlemeli bir motorda stokiyometrik karışımla rölantide çalışma durumunda etanol–DME karışımları kullanıldığında HC emisyonunun artan DME oranıyla azaldığı saf etanol için 1398 ppm olan HC emisyonunun %100 DME oranında %57 azalarak 597 ppm'e ulaştığı belirlenmiştir. 61.5 kPa EMB altında 1400 d/dk ve $\lambda=1$ koşullarında çalışma durumunda saf etanol için 1075 ppm olan HC emisyonunun %2 DME oranında %34.7 azalarak 702 ppm'e ulaştığı belirlenmiştir. Saf etanol ve etanol–DME karışımları için $\lambda=1.3$ değerinden sonra HC emisyonunun arttığı, EMB'nin artırılmasının ise HC emisyonunu azalttığı %2 DME oranında ve 43.4 kPa EMB altında 1238 ppm olan HC emisyonunun 81 kPa EMB değerinde %39.8 azalarak 745 ppm'e ulaştığı tespit edilmiştir.

- Buji bir ateşlemeli motorda %30'a kadar DME içeren LPG–DME karışımları kullanıldığında HC emisyonunun artan motor momenti ve artan DME oranıyla arttığı, ancak LPG–DME karışımları için HC emisyonunun 300 ppm değerini geçmediği belirlenmiştir. Ancak, aynı motorda bütan–propan, bütan–DME ve bütan–propan–DME karışımları kullanıldığında HC emisyonunun motor momenti ve DME katkısı ile azaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, buji ateşlemeli bir motora sahip bir taşıtta LPG–DME karışımları kullanıldığında HC emisyonunun artan taşıt hızı ve artan DME oranı ile azaldığı saf benzinle kıyaslandığında HC emisyonunun DME5, DME10, DME15 ve DME20 karışımları için sırasıyla %14, %15.2, %15.6, %21.4 ve %40 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir.

- DME yüksek setan sayısına sahip olduğundan dizel motorlara için daha uygundur, ancak buji ateşlemeli motorlarda da uygun yakıt–hava karışımı ile yanma verimini artırabilir. DME'nin enerji içeriği benzine göre düşük olduğundan DME kullanımında genellikle güç ve moment genellikle biraz düşmekte ve yakıt tüketimi artabilmektedir. Öte yandan, DME oksijen içeriği sayesinde CO emisyonlarını genellikle azaltır ancak yüksek yanma hızı ve sıcaklığı nedeniyle NO_x emisyonlarını artırabilir. DME kullanımında ortaya çıkabilecek performans, yakıt tüketimi ve emisyonlarla ilgili olumsuzluklar uygun motor ayarlarıyla büyük ölçüde kontrol edilebilir.

- Gelecekte DME'nin yakıt özelliklerine uygun püskürtme sistemlerinin ve stratejilerinin, buji yapısının ve ateşleme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılabileceği gibi tasarım ve işletme parametrelerinin artırılması ve farklı yakıt karışımlarıyla ilgili çalışmalar da yapılabilir. Ayrıca, DME kullanımında yaygın olarak bilinen emisyonlara ek olarak formaldehit gibi yan ürünlerin oluşumu ve kontrol yöntemleri araştırılabilir. Öte yandan, DME'nin üretim ve lojistik maliyetlerinin

azaltılması, uzun süreli kullanımda DME'nin motor parçalarına ve ömrüne etkisi ile kapsamlı çevresel etkileri analiz edilebilir.

7. Semboller ve Kısaltmalar

λ	: Lambda–Hava fazlalık katsayısı
$^{\circ}$	: Derece
AA	: Ateşleme avansı
AZ	: Ateşleme zamanı
C	: Karbon
CADC	: Genel Artemis sürüş testi
CAI	: Kontrollü kendiliğinden ateşlemeli
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
DFSI	: Direkt silindire püskürtmeli buji ateşlemeli
DME	: Dimetil eter
EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu
EKU	: Elektronik kontrol ünitesi
EMB	: Emme manifoldu basıncı
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen dolgu sıkıştırma ile ateşlemeli
KMA	: Krank mili açısı
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
MTBE	: Metil tersiyer bütül eter
N	: Devir sayısı, d/dk
NO _x	: Azot oksitler
OİB	: Ortalama indike basınç, bar
OH	: Hidroksil
PM	: Partikül madde
PO	: Püskürtme oranı
PO1	: 1. püskürtme oranı
PO2	: 2. püskürtme oranı
PZ	: Püskürtme zamanı
PZ1	: 1. püskürtme zamanı
PZ2	: 2. püskürtme zamanı
RDE	: Gerçek sürüş koşullarında emisyon testi
ÜÖNÖ	: Üst ölü noktadan önce
WLTC	: Standart hafif taşıt sürüş testi

8. Teşekkür

Çalışmayı destekleyen herhangi kurum ya da kuruluş bulunmamaktadır. Ayrıca, makale herhangi bir tez veya projeden üretilmemiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale tek yazarlı olduğu için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Makale tek yazarlı olduğundan tüm katkının yazara ait olduğunu beyan ederim.

9. Kaynaklar

- Alam, M., & Kajitani, S. (2001). DME As An Alternative Fuel For Direct Injection Diesel Engine. *4th International Conference on Mechanical Engineering*. December 26–28, Dhaka, Bangladesh, 87–92.
- Anggarani, R., Maymuchar, Wibowo, C. S., & Sukaraharja, R. (2015). Performance and emission characteristics of dimethyl ether (DME)

- mixed liquefied gas for vehicle (LGV) as alternative fuel for spark ignition engine. *Energy Procedia*, 65, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.048>
- Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R., & Kinoshita E. (2008). The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. *Fuel*, 87, 1014–1030. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.007>
- Awad, O. I., Mamat, R., Ibrahim, T. K., Hammid, A. T., Yusri, I. M., Hamidi, M. A., Humada, A. M., & Yusop A. F. (2018a). Overview of the oxygenated fuels in spark ignition engine: Environmental and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 394–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.107>
- Awad, O. I., Mamat, R., Alib, O. M., Sidik, N. A. C., Yusaf, T., Kadrigam, K., & Kettner, M. (2018b). Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2586–2605. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.074>
- Azizi, Z., Rezaeimanesh, M., Tohidian, T., & Rahimpour, M. R. (2014). Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges. *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150–172. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2014.06.007>
- Cong, X., Ji, C., & Wang, S. (2021). Investigation into engine performance of a hydrogen–dimethyl ether spark–ignition engine under various dimethyl ether fuel fractions. *Fuel*, 306, 121429. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121429>
- Duan, J., Sun, Y., Yang, Z., & Sun, Z. (2012). Combustion and emissions characteristics of diesel engine operating on composite combustion mode of DME and diesel. *Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Material Science*, 27, 463–466. <https://doi.org/10.2991/mems.2012.77>
- He, B.-Q., Xu, S.-P., Fu, X.-Q., & Zhao, H. (2020). Combustion and emission characteristics of an ultra-lean burn gasoline engine with dimethyl ether auto-ignition. *Energy*, 209, 118437. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118437>
- Huang, Z., Qiao, X., Zhang, W., Wu, J., & Zhang, J. (2009). Dimethyl ether as alternative fuel for CI engine and vehicle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 3(1), 99–108. <https://doi.org/10.1007/s11708-009-0013-1>
- Huang, Y., Surawski, N. C., Zhuang, Y., Zhou, J. L., & Hong, G. (2021). Dual injection: An effective and efficient technology to use renewable fuels in spark ignition engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110921>
- Ji, C., Liang, C., & Wang, S. (2011). Investigation on combustion and emissions of DME/gasoline mixtures in a spark–ignition engine. *Fuel*, 90, 1133–1138. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.033>
- Ji, C., Liang, C., Zhu, Y., Liu, X., & Gao, B. (2012). Investigation on idle performance of a spark–ignited ethanol engine with dimethyl ether addition. *Fuel Processing Technology*, 94, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.006>
- Ji, C., Liang, C., Gao, B., Wei, B. Liu, X., & Zhu Y. (2013). The cold start performance of a spark–ignited dimethyl ether engine. *Energy*, 50, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.028>
- Ji, C., Shi, L., Wang, S., Cong, X., Su, T., & Yu, M. (2017). Investigation on performance of a spark–ignition engine fueled with dimethyl ether and gasoline mixtures under idle and stoichiometric conditions. *Energy*, 126, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.045>
- Kruczyński, S., Ślęzak, M., Gis, W., Orliński, P., Kulczycki, A., Dziegielewski, W., & Bednarski, M. (2017). Problems in fuelling spark ignition engines with dimethyl ether. *Combustion Engines*, 170(3), 154–158. <https://doi.org/10.19206/CE-2017-326>
- Kowalewicz, A., & Wojtyniak, M. (2005). Alternative fuels and their application to combustion engines. *Journal of Automobile Engineering*, 219, 103–125. <https://doi.org/10.1243/095440705X6399>
- Lee, S., Oh, S., & Choi, Y. (2009). Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel. *Fuel*, 88, 1009–1015. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.016>
- Lee, S., Oh, S., Choi, Y., & Kang K. (2011). Effect of n-Butane and propane on performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME-blended LPG fuel. *Fuel*, 90, 1674–1680. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.040>
- Liang, C., Ji, C., & Liu, X. (2011). Combustion and emissions performance of a DME-enriched spark–ignited methanol engine at idle condition. *Applied Energy*, 88, 3704–3711. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.056>
- Liang, C., Ji, C., Gao, B., Liu, X., & Zhu Y. (2012). Investigation on the performance of a spark–ignited ethanol engine with DME enrichment. *Energy Conversion and Management*, 58, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.004>
- Liang, C., Ji, C., & Gao, B. (2013). Load characteristics of a spark–ignited ethanol engine with DME enrichment. *Applied Energy*, 112, 500–506. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.039>
- Park, S. H., & Lee, C. S. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Conversion and Management*, 86, 848–863. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.051>
- Putrasari, Y., & Lim, O. (2022). Dimethyl ether as the next generation fuel to control nitrogen oxides and particulate matter emissions from internal combustion engines: a review. *ACS Omega*, 7, 32–37. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03885>
- Rossi, T., Lixi, S., Puricelli, S., Grosso, M., Faedo, D., & Casadei, S. (2024). Fuel consumption and exhaust emissions from Euro 6d vehicles fueled by innovative LPG/DME blend. *Journal of the Energy Institute*, 117, 101851. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101851>
- Semelsberger, T. A., Borup, R. L., & Greene, H. L. (2006). Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel. *Journal of Power Sources*, 156, 497–511. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.05.082>
- Shi, L., Ji, C., Wang, S., Cong, X., Su, T., & Wang, D. (2018). Combustion and emissions characteristics of a S.I. engine fueled with gasoline–DME blends under different spark timings. *Fuel*, 211, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.019>
- Shi, L., Ji, C., Wang, S., Su, T., Cong, X., Wang, D., & Tang C. (2019a). Effects of second injection timing on combustion characteristics of the spark ignition direct injection gasoline engines with dimethyl ether enrichment in the intake port. *Energy*, 180, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.056>
- Shi, L., Ji, C., Wang, S., Cong, X., Su, T., & Shi, C. (2019b). Impacts of dimethyl ether enrichment and various injection strategies on combustion and emissions of direct injection gasoline engines in the lean-burn condition. *Fuel*, 254, 115636. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115636>
- Stepanenko, D., & Kneba, Z. (2019). DME as alternative fuel for compression ignition engines—a review. *Combustion Engines*, 177(2), 172–179. <https://doi.org/10.19206/CE-2019-230>
- Sun, P., Feng, J., Yang, S., Wang, C., Cui, K., Dong, W., Du, Y., Yu, X., & Zhou, J. (2022). Particulate number and size distribution of dimethyl ether/gasoline combined injection spark ignition engines at medium engine speed and load. *Fuel*, 313, 122645. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122645>
- Wattanavichien, K. (2009). Implementation of DME in a small direct injection diesel engine. *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), 1–12.
- Yang, S., Sun, P., Feng, J., Cui, K., Wang, C., Dong, W., Yu, X., & Gu, Y. (2023). Combustion and emission characteristics of dimethyl ether/gasoline DFSI engine under different excess air coefficients. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103342. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103342>
- Yao, M., Chen, Z., Zheng, Z., Zhang, B., & Xing, Y. (2006). Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol. *Fuel*, 85, 2046–2056. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.016>
- Yeom, K., & Bae, C. (2009). Knock characteristics in liquefied petroleum gas (LPG)–dimethyl ether (DME) and gasoline–DME homogeneous charge compression ignition engines. *Energy & Fuels*, 23, 1956–1964. <https://doi.org/10.1021/ef800846u>
- Yoon, S. H., Cha, J. P., & Lee, C. S. (2010). An investigation of the effects of spray angle and injection strategy on dimethyl ether (DME) combustion and exhaust emission characteristics in a common–rail diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 91, 1364–1372. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.04.017>
- Zhang, H. F., Seo, K., & Zhao, H. (2013). Combustion and emission analysis of the direct DME injection enabled and controlled auto-ignition gasoline combustion engine operation. *Fuel*, 107, 800–814. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.067>