

DİZEL MOTORLARDA DİMETİL ETER KULLANIMININ HC EMİSYONLARINA OLAN ETKİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

İsmet SEZER* 

Alınma: 17.05.2022; düzeltme: 11.08.2022; kabul: 14.11.2022

Öz: Bu çalışma, dizel motorlarda dimetil eter (DME)'in saf veya yakıt katkısı olarak kullanımı üzerine yapılmış çeşitli çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak derlenmiştir. Dizel motorlarda zararlı egzoz emisyonlarını azaltmanın birkaç yöntemi vardır. Bunlardan ilki motor tasarımında ve yakıt enjeksiyon sisteminde modifikasyonlar yaparak yanmanın iyileştirilmesidir, ancak bu pahalı ve zaman alıcı bir yöntemdir. İkinci yöntem ise katalitik konvektör ve partikül fitresi gibi donanımlar kullanmaktır, ancak bu donanımlar motor performansını olumsuz yönde etkilerler. Hem egzoz emisyonlarını azaltmak hem de motor performansını artırmak için uygulanan son yöntem çeşitli alternatif yakıtların veya yakıt katkılarının kullanılmasıdır. Dizel motorlardaki en önemli emisyonlar azot oksitler (NO_x) ve partikül maddelerdir (PM). Çoğu araştırmacı emisyonları azaltmanın en iyi yolunun doğalgaz, biyogaz, biyodizel gibi alternatif yakıtların veya konvansiyonel ve bu alternatif yakıtlarla birlikte çeşitli yakıt katkılarının kullanılması olduğunu bildirmektedir. Bu nedenle, alternatif yakıtlar ve yakıt katkıları üzerine yapılan çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar için oldukça önemlidir. Alternatif yakıtlar arasında oksijen içerikli yakıtlar büyük ilgi çekmektedir. DME içeriğinde oksijen bulunması, setan sayısının yüksek olması ve diğer istenen yakıt özellikleri nedeniyle dizel motorlarda kullanılmaya oldukça elverişlidir. Bu nedenle sunulan derleme çalışması, dimetil eterin dizel motorlarda yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılmasının hidrokarbon (HC) emisyonlarına olan etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor performansı, Dimetil eter, Yakıt katkıları, HC emisyonları

A Review Study on the Effects of Using Dimethyl Ether on HC Emissions in Diesel Engines

Abstract: This review study was created from the various studies which were completed on the use of dimethyl ether (DME) in diesel engines as a fuel or fuel additive. The several methods are available for the decreasing of the harmful emissions in diesel engines. The first method for the reduction of harmful emissions is improved the combustion by modification of engine design and fuel injection system, but this process is expensive and time consuming. The second method is the using various exhaust gas devices like catalytic converter and diesel particulate filter. However, the use of such devices affects negatively diesel engine performance. The last method to reduce emissions and also improve diesel engine performance is the use of various alternative fuels or fuel additives. The major pollutants of diesel engines are oxides of nitrogen (NO_x) and particulate matter (PM). It is very difficult to reduce NO_x and PM simultaneously in practice. The most researches declare that the best way to reduce these emissions is the use of various alternative fuels i.e. natural gas, biogas, biodiesel or using some additives with the alternative fuels and conventional diesel fuel. Therefore, it is very important that the results of various studies on alternative fuels or fuel additives are evaluated together to practice applications. Among the various alternative fuels, oxygenated fuels draw a great attention. DME is very suitable fuel for diesel engines due to its oxygen content, high cetane number and other desired fuel properties. Therefore, the

*Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100 Bağlarbaşı-Gümüşhane
İletişim Yazarı: İsmet Sezer (isezer@gumushane.edu.tr)

presented review study focuses on the usage of DME in diesel engines as a fuel or fuel additive. This review study investigates the effects of using DME on hydrocarbon (HC) emissions.

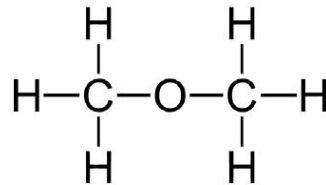
Keywords: Diesel engine performance, Dimethyl ether, Fuel additives, HC emissions

1. GİRİŞ

Dizel motorlar yüksek tork, düşük yakıt tüketimi ve benzin motorlarına kıyasla daha düşük hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) emisyonu seviyeleri nedeniyle motorlu taşıtlar için başlıca güç kaynağıdır (Yoon ve diğ., 2010). Ancak, dizel motorları atmosfere benzin motorlarından daha yüksek seviyede partikül madde (PM) ve azot oksit (NO_x) emisyonu yaymaktadırlar. Bu nedenle, birçok araştırmacı daha düşük emisyon değerlerine sahip dizel motorlar geliştirmeye yönelik ve daha temiz emisyon üretebilecek alternatif yakıtlar üzerine sürekli araştırmalar yapmaktadır (Youn ve diğ., 2011). Çeşitli alternatifler arasında, dimetil eter (DME) kömürden, doğalgazdan ve farklı biyokütle kaynaklarından üretilmesi nedeniyle oldukça umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Ayrıca, DME'in içeriğinde oksijen bulunması onu cazip hale getirmektedir (Alam ve Kajitani, 2001). Ancak, DME'nin düşük viskozite, yetersiz yağlayıcılık, düşük yanma entalpisi ve düşük kaynama noktası gibi fiziksel özellikleri, dizel motorların temel yapısında ve yardımcı donanımlarında modifikasyonlar yapılmasını gerektirmektedir. DME'nin saf olarak kullanılabilmesi dizel motorlu taşıtlar hala geliştirme aşamasındadır. Bununla birlikte, DME dizel yakıtı veya diğer alternatif yakıtlarla birlikte kullanılabilir (Mañi ve diğ., 2014). Bu nedenle, DME'in kullanımı üzerine yapılmış çalışmaların sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi pratik uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Bu derleme çalışması, dizel motorlarda DME kullanımının HC emisyonlarına olan etkilerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

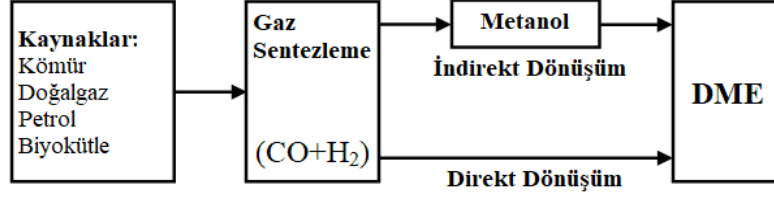
2. DİMETİL ETERİN KARAKTERİSTİKLERİ

DME, Şekil 1'de kimyasal yapısından da görüleceği gibi CH₃-O-CH₃ kimyasal formülüne sahip basit eterlerden birisidir. Genel olarak, DME'in fiziksel özellikleri sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)'nin özelliklerine çok benzerdir. Bu nedenle, DME'in depolanması, nakliyesi ve yakıt istasyonlarında taşıtların deposuna aktarılması ile ilgili gereklilik ve şartlar LPG ile aynıdır (Alam ve Kajitani, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi, DME direkt veya indirekt sentetik metotlarla üretilmektedir. Direkt üretim yönteminde DME doğrudan doğalgazdan üretilirken, indirekt üretim yönteminde metanolün sentetik dehidrasyonu ile üretilmektedir (Park ve Lee 2014). Enerji eşdeğerli değerlendirme yapıldığında, DME'in üretimi benzin veya dizel yakıtından daha ucuza mal olmaktadır. Büyük çapta üretim tesisleri dikkate alındığında DME'nin üretim maliyeti sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretim maliyetine benzerdir (Wattanavichien, 2009). DME, oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta gaz fazında olup zehirsizdir. Bu nedenle, DME'nin 0,5 MPa üzerindeki bir basınçta sıvılaştırılması gerekir. DME'in taşıt üzerinde yakıt tankından motora sevk edilebilmesi sırasında buhar tıkaçı oluşumunu engellemek için yakıt enjeksiyon sisteminde basıncın 1,7–2 MPa aralığına yükseltilmesi gerekir (Duan ve diğ., 2012; Kowalewicz ve Wojtyniak, 2005).



Şekil 1:

DME'in kimyasal yapısı (Park ve Lee 2014)



Şekil 2:

DME'in üretim yöntemleri (Azizi ve diğ., 2014)

Dizel yakıtı ve DME'in yakıt özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi DME'in yakıt özellikleri dizel yakıtından oldukça farklıdır. Yüksek buhar basıncı ve düşük kaynama noktası değerlerine sahip olduğundan DME atmosferik basınç ve oda sıcaklığında gaz fazındadır. Diğer taraftan, DME'in ısı değeri dizel yakıtının yaklaşık yarısı kadardır. Bu nedenle, yakıt besleme sistemi, yakıt püskürtme sistemi ve yanma odasının yeniden tasarlanması gerekmektedir (Huang ve diğ., 2009). DME'nin setan sayısı dizel yakıtından daha yüksek olması nedeniyle daha iyi tutuşma özelliklerine sahiptir. DME'in buharlaşma gizli ısı dizel yakıtına kıyasla oldukça yüksek olduğundan yakıt-hava karışımının sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur.

Tablo 1. DME ve dizel yakıtının özellikleri (Yoon ve diğ., 2010)

Özellik	DME	Dizel
Kimyasal formülü	CH ₃ -O-CH ₃	C _x H _y
Moleküler kütlesi, g/mol	46,07	170
Kaynama noktası, °C	-24,9	180-360
Sıvı fazdaki yoğunluğu, kg/lt	668	840
Sıvı fazdaki viskozitesi, cP	0,15	4,4-5,4
Alt ısı değeri, kJ/kg	28430	42500
Tutuşma sıcaklığı, °C	235	250
Setan sayısı	55-60	40-55
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	9	14,6
Elastisite modülü, N/m ²	6,37x10 ⁸	1,486x10 ⁹
Kütlesel karbon oranı	52,2	86
Kütlesel hidrojen oranı	13	14
Kütlesel oksijen oranı	34,8	0

DME, sadece C-H ve C-O kimyasal bağına sahip olup direkt C-C bağına sahip değildir ve içeriğinde %34,8 oksijen bulundurur. Bu özellikleri sayesinde, DME'nin yanması sırasında neredeyse hiç PM üretimi olmaz, düşük gürültü seviyesi ortaya çıkar ve yüksek oranda egzoz gazı resirkülasyonunu (EGR) tolere edilebildiğinden NO_x emisyonunun azaltılmasında dizel yakıtından daha avantajlıdır (Wattanavichien, 2009). DME'nin düşük viskozitesi yakıt besleme sisteminde sızıntılara neden olabileceğinden daha düşük toleranslı parçalar kullanılması gerekir. DME'in yetersiz yağlama özelliği yakıt sistemindeki hareketli parçalarda aşınmalara neden olabilir. Bu nedenle, DME'nin içerisine sızıntı ve aşınmayı önleyici katkıları katılması gereklidir. DME'in sıkıştırılabilirliği dizel yakıtından daha fazla olduğundan yakıt sisteminde yakıtın nakledilebilmesi için daha fazla pompalama işine ihtiyaç vardır. Genel olarak, DME korozif yapısı nedeniyle kauçuk esaslı materyallerin yapısını bozar. Bu nedenle, yakıt sistemindeki kauçuk esaslı materyaller DME'nin korozif etkilerine dayanıklı malzemelerle değiştirilmelidir (Yoon ve diğ., 2010). DME'in bir diğer avantajı ise metal malzemeler için korozif olmayışıdır (Park ve Lee, 2014).

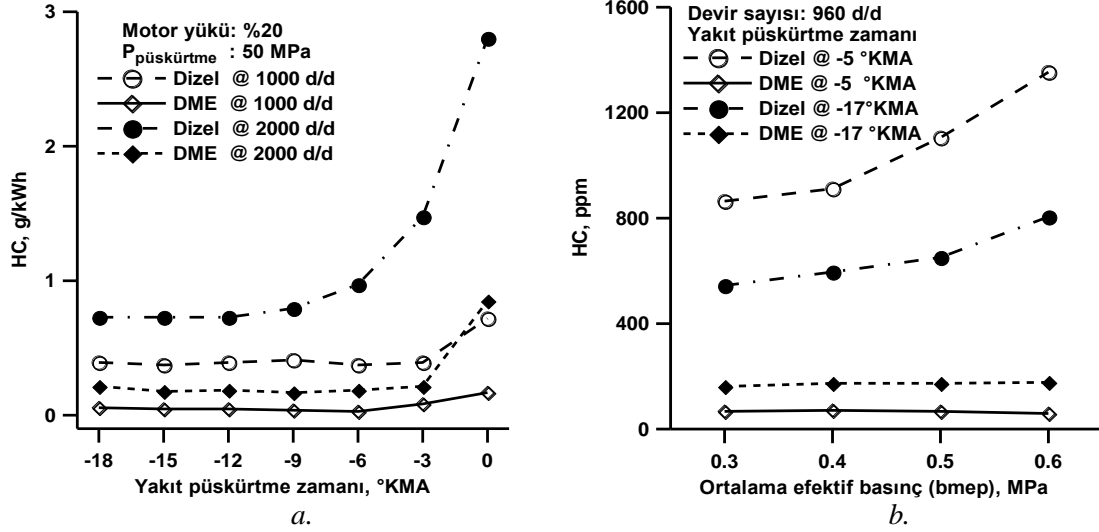
3. DİMETİL ETER İLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde, DME'in üretim teknolojileri, yakıt özellikleri, yanma karakteristikleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine yapılmış oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Üretim teknolojileri üzerine yapılmış çalışmalarda (Azizi ve diğ., 2014; Lecksiwilai ve diğ., 2016; Inayat ve diğ., 2017) farklı üretim teknikleri incelenmiş ve bunlar maliyet açısından değerlendirilmiştir. Yakıt özellikleri üzerine yapılmış çalışmalarda (Teng ve diğ., 2001; Park ve Lee 2013; Park ve Lee, 2014; Maji ve diğ., 2015) özellikle DME'in dizel yakıtından farklı olan içeriğinde oksijen bulunması, düşük yoğunluk ve düşük viskozite gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra düşük yağlayıcılık gibi yetersiz yönleri incelenmiştir. Püskürtme karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Suh ve Lee, 2008; Kim ve diğ., 2011; Genbao ve diğ., 2012; Xu ve diğ., 2012; Guangxin ve diğ., 2013; Jalanapurkar ve diğ., 2015; Lim ve Iida, 2015; Mohan ve diğ., 2017) DME'in düşük yoğunluk ve düşük viskozite sayesinde püskürtme karakteristiklerini nasıl iyileştirdiğiyle ilgili incelemeler yapılmıştır. Yanma karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Oda ve diğ., 2004; Song ve diğ., 2004; Ying ve diğ., 2005; Chapman ve Boehman, 2008; Park, 2012; Khunaphan ve diğ., 2013; Park ve Lee, 2013; El-Hagar, 2014; Jeon ve diğ., 2014; Baskaran, 2015; Wang ve diğ., 2015; Lamani ve diğ., 2017; Benajes ve diğ., 2018a; Benajes ve diğ., 2018b) DME'in tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, kütleli yanma oranı, silindir basıncı ve yanma sıcaklıkları gibi parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor performans karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalarda (Chen ve diğ., 2000; Kajitani ve Chen, 2003; Kajitani, 2004; Semelsberger ve diğ., 2006; Arcoumanis ve diğ., 2008; Jang ve Bae, 2009; Namasivayam ve diğ., 2010; Ying ve diğ., 2010; Li, 2011; Sezer, 2011; Patil ve Thipse 2012; Wang ve diğ., 2013; Ryu ve diğ., 2014; Taghavifar ve diğ., 2014; Deepak ve diğ., 2015; Prabhakaran ve diğ., 2015; Vispute ve Pawar, 2016; Abhishek ve diğ., 2017; Hewu ve Longbao 2017; Kropiwnicki ve diğ., 2017; Smolec ve diğ., 2017; Theinnoi ve diğ., 2017) DME'in döndürme momenti (tork), efektif motor gücü, özgül ve toplam yakıt tüketimi ve efektif verim gibi başlıca performans parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Egzoz emisyonu karakteristikleriyle ilgili yapılan çalışmalarda (Wang ve diğ., 2000; Longbao ve diğ., 2002; Ying ve diğ., 2006; Xinling ve Zhen, 2009; Park ve diğ., 2010; Kim ve diğ., 2012; Loganathan ve diğ., 2012a; Loganathan ve diğ., 2012b; Zhu ve diğ., 2012; Yoon ve diğ., 2013; Hou ve diğ., 2014; Park ve diğ., 2014; Thomas ve diğ., 2014; Wang ve diğ., 2014; Yanju ve diğ., 2014; Zhao ve diğ., 2014; Roh ve diğ., 2015; Kim ve Park, 2016; Park ve diğ., 2016; Bogdan ve diğ., 2017; Geng ve diğ., 2017; Ambekar ve Hole, 2018) DME'in daha çok karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), partikül madde (PM) veya is, azot oksitler (NO_x) ve karbondioksit (CO₂) gibi genel emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sunulan çalışmada ise sadece DME'in HC emisyonlarına etkileri üzerine yoğunlaşmıştır.

4. DİMETİL ETERİN HC EMİSYONLARINA ETKİLERİ

Şekil 3a'da HC emisyonunun dizel ve DME yakıtları için farklı devir sayılarında püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Dizel motorlarda HC emisyonu esas olarak püskürtme zamanı sonunda enjektörden püskürtülen yakıtın yanma odasının uzak noktalarında ortamda kalan hava ile çok fakir karışım oluşturması nedeniyle yanamamasından kaynaklanmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu değerleri artan devir sayısı ile artmaktadır. Bu durumun, devir sayısının artmasıyla yanma için kalan sürenin azalmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Diğer taraftan, DME'in dizel yakıtına göre daha düşük HC emisyonu değerleri verdiği bildirilmiştir (Youn ve diğ., 2011). Şekil 3b'de HC emisyonunun dizel ve DME yakıtları için farklı püskürtme zamanı değerleri için motor yükü (ortalama efektif basınç) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME dizel yakıtına göre daha düşük HC emisyonu değerleri vermiş ve dizel yakıtı için HC emisyonu artan motor yükü ile artmıştır. DME'in daha düşük HC

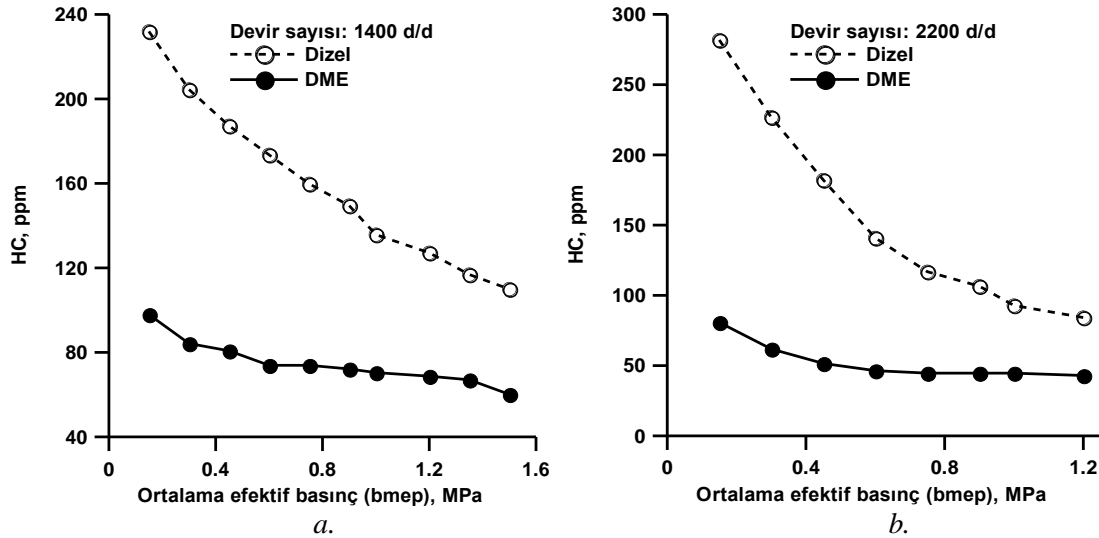
emisyonu vermesinin, DME'in fakir yanma özelliklerine sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Alam ve Kajitani, 2001).



Şekil 3:

HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME için a. Püskürtme zamanı ile (Youn ve diğ., 2011) b. bmep ile (Alam ve Kajitani, 2001) değişimi

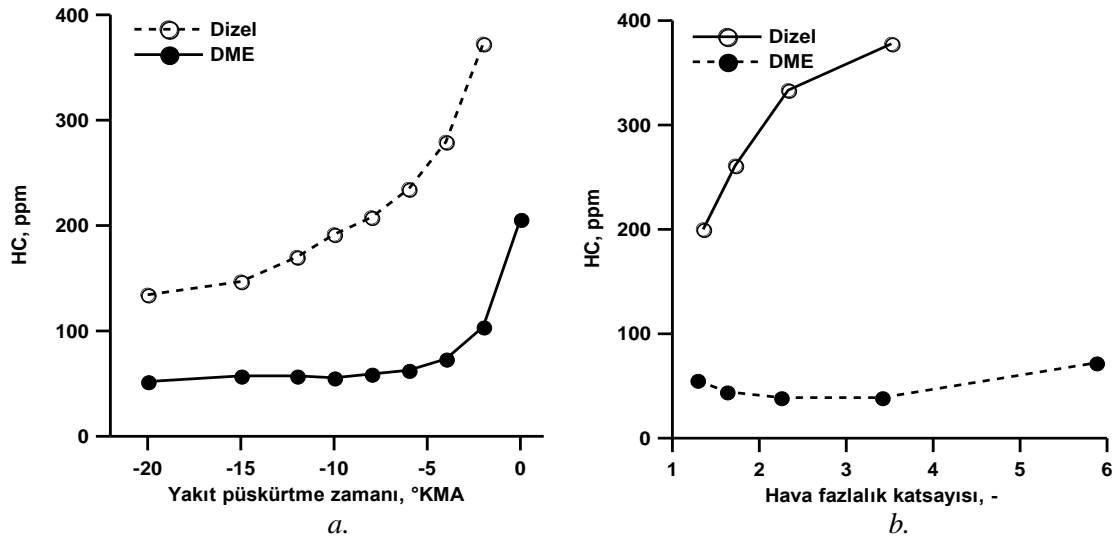
Şekil 4a ve 4b'de farklı motor yükleri ve devir sayıları için HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME için değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. HC emisyonu değerleri dizel ve DME yakıtları için artan motor yükü ile azalma eğilimi göstermiştir. Tüm motor yükü ve devir sayıları için DME dizel yakıtına kıyasla oldukça düşük HC emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun DME'in düşük kaynama noktası ve yüksek buharlaşma özellikleri sayesinde daha iyi atomizasyon, daha homojen bir karışım ve daha verimli yanma sağlamasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Huang ve diğ., 2009).



Şekil 4:

HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME için a. 1400 d/d devir sayısında b. 2200 d/d devir sayısında bmep ile değişimi (Huang ve diğ., 2009)

Şekil 5a'da HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. HC emisyonu genel olarak yakıt-hava karışımının homojen olarak karışmaması nedeniyle yanma odasının yakıtça zengin bölgelerinde eksik yanma nedeniyle oluşur. Şekilde görüldüğü gibi DME dizel yakıtına kıyasla oldukça düşük HC emisyonu değerleri vermiştir. Bunun birkaç nedeninin olduğu belirtilmiştir. DME, daha kısa tutuşma gecikmesi süresine sahip olduğundan yakıt olarak DME kullanıldığında yanma odası içerisinde oluşan yakıtça zengin ve fakir karışım bölgeleri daha az olmaktadır. Ayrıca, DME'in içeriğinde %34,8 oranında oksijen bulunmakta ve kimyasal yapısında direkt karbon bağı bulunmamaktadır. Diğer taraftan, DME'in yüksek buharlaşma oranı iyi bir yakıt-hava karışımı oluşmasını sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, yanma sonunda kalan yanmamış yakıt-hava karışımı DME kullanıldığında daha az olmakta ve HC emisyonu miktarı azalmaktadır. Diğer taraftan, DME'in daha kısa yakıt demeti uzunluğuna sahip olması ve hızlı buharlaşma özelliği sayesinde yanma odası cidarlarına ulaşan sıvı yakıt miktarı ve yanma sonunda kalan yanmayan yakıt miktarı azalmaktadır. Bunun sonucunda DME kullanıldığında HC emisyonu değerlerinin azaldığı belirtilmiştir (Park ve Lee, 2013). Şekil 5b'de dizel yakıtı ve DME için HC emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME daha düşük HC emisyonu değerlerine sahiptir. Bu durumun DME'in yapısındaki oksijen sayesinde daha verimli bir yanma sağlamasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Oda ve diğ., 2004).

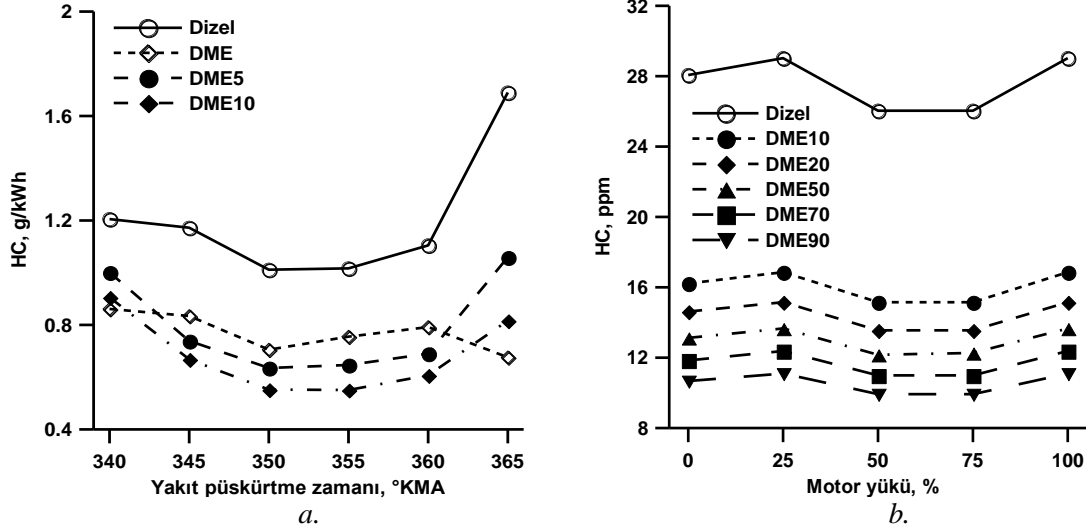


Şekil 5:

HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME için **a.** Püskürtme zamanı ile (Park ve Lee, 2013) **b.** Hava fazlalık katsayısı ile (Oda ve diğ., 2004) değişimi

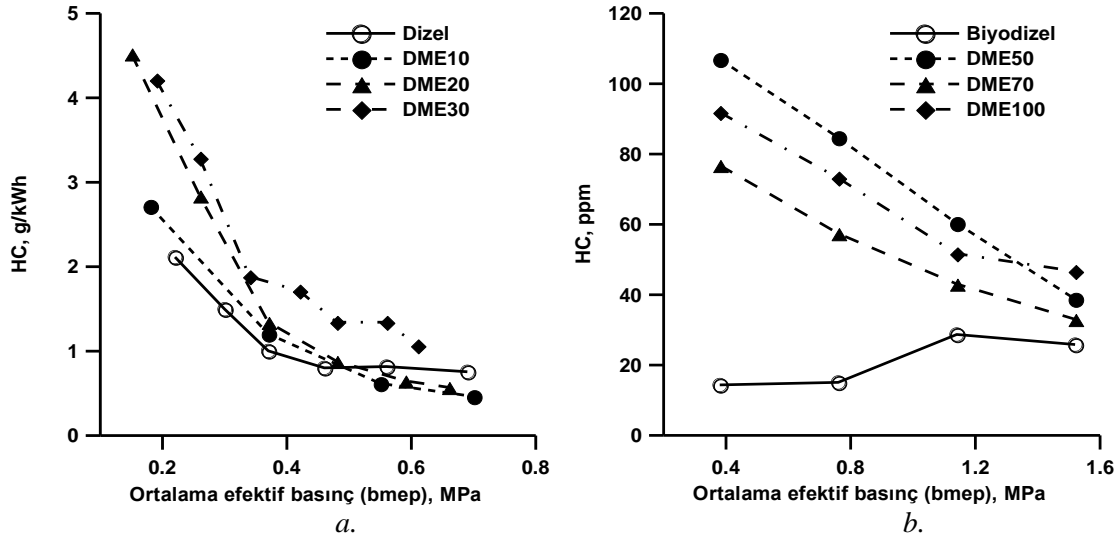
Şekil 6a'da HC emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. HC emisyonu tüm püskürtme zamanı değerlerinde DME için dizel yakıtına göre daha düşük değerler almıştır. Bu durumun, DME'nin dizel yakıtına kıyasla daha basit bir kimyasal yapıya yani kimyasal olarak daha düşük karbon/hidrojen oranına sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca, DME'in daha kısa yakıt demeti boyu ve hızlı buharlaşma özelliği nedeniyle yanma odası cidarlarına ulaşan sıvı yakıt miktarı doayısıyla HC emisyonu azalmaktadır. Diğer taraftan, DME-dizel yakıt karışımları da dizel yakıtına göre daha düşük HC emisyonu değerleri vermiş, hatta DME5 ve DME10 karışımları çoğunlukla saf DME'den daha düşük HC emisyonu değerleri sağladığı bildirilmiştir (Lim ve Iida, 2015). Şekil 6b'de HC emisyonunun dizel yakıtı ve farklı dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yakıt karışımı içindeki DME oranı arttıkça HC emisyonu değerleri azalmıştır. Bu durumun, DME'in kimyasal olarak daha basit bir yapıya yani daha düşük karbon/hidrojen oranına sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca

DME'in kimyasal yapısında bulunan oksijenin dizel-DME karışımları kullanıldığında daha homojen bir yakıt-hava karışımı oluşturarak daha verimli bir yanma sağladığı ifade edilmektedir (Ambekar ve Hole, 2018).



Şekil 6:

HC emisyonunun dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için a. Püskürtme zamanı ile (Lim ve Iida, 2015) b. Motor yükü ile (Ambekar ve Hole, 2018) değişimi

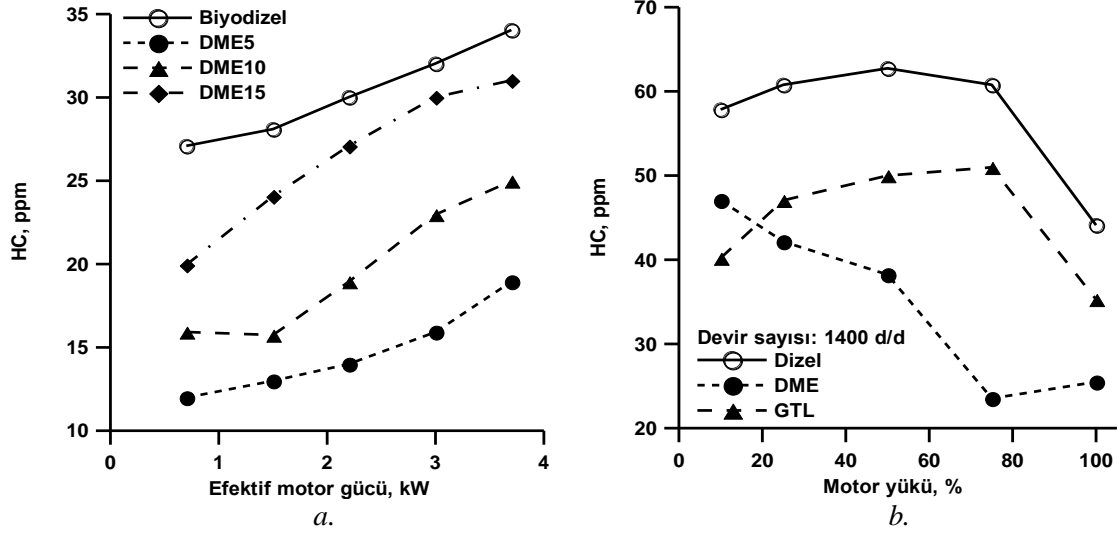


Şekil 7:

HC emisyonunun a. Dizel yakıtı ve dizel-DME karışımları için (Ying ve diğ., 2006) b. Biyodizel yakıtı ve biyodizel-DME karışımları için (Hou ve diğ., 2014) bmep ile değişimi

Şekil 7a'da HC emisyonunun dizel yakıtı ve farklı dizel-DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. HC emisyonu düşük ve orta motor yüklerinde (0,6 MPa'a kadar) DME20 ve DME30 karışımları için dizel yakıtına kıyasla daha yüksek değerler almıştır. Yüksek motor yüklerinde HC emisyonu tüm yakıtlar için azalmış olup DME10 ve DME20 karışımları dizel yakıtından daha düşük değerler vermiştir. Düşük ve orta motor yüklerinde yanma odasına püskürtülen yakıt miktarı az olduğundan silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri düşük değerler almakta ve üretilen HC emisyonu değerleri artmaktadır. Yüksek motor yüklerinde ise silindir içi sıcaklıklar arttığından yanma odasına püskürtülen yakıt daha hızlı buharlaşarak daha homojen

yakıt–hava karışımı oluşturmakta ve daha verimli bir yanma olması nedeniyle HC emisyonu azalmaktadır (Ying ve diğ., 2006). Şekil 7b’de HC emisyonunun biyodizel yakıtı ve farklı biyodizel–DME karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Tüm yakıt ve karışımlar için motor yükü arttıkça HC emisyonu değerleri azalmaktadır. Yakıt karışımları içindeki DME miktarı arttıkça HC emisyonu değerleri artmaktadır. 0,76 MPa motor yükünde HC emisyonu değerleri biyodizel, DME50, DME70 ve DME100 için sırasıyla 15 ppm, 84 ppm, 62 ppm ve 69 ppm’dir. Bunun, DME oranının yüksek seçilmesiyle yakıt–hava karışımının aşırı fakirleşmesi sonucu yanmanın bozulmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir (Hou ve diğ., 2014).



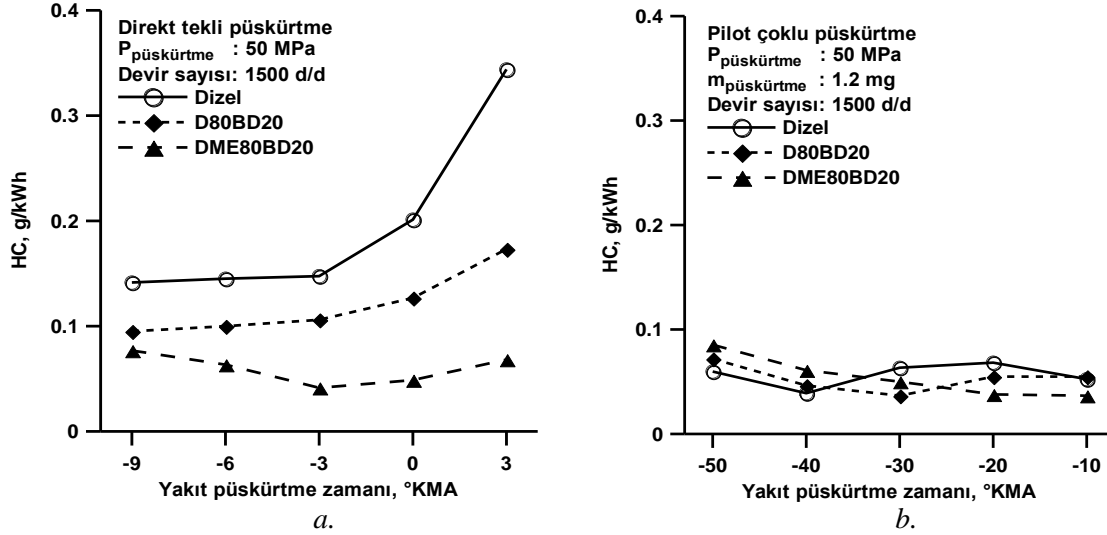
Şekil 8:

HC emisyonunun **a.** Biyodizel–DME karışımları için motor gücü ile (Loganathan ve diğ., 2012a) **b.** Dizel, DME ve GTL yakıtları motor yükü ile (Xinling ve Zhen, 2009) değişimi

Şekil 8a’da HC emisyonunun biyodizel ve farklı biyodizel–DME karışımları için motor gücü ile değişimi verilmiştir. Biyodizel yakıtına kıyasla DME karışımları daha düşük HC emisyonu değerleri vermiş ancak karışımdaki DME miktarı arttığında HC emisyonu değerleri artmıştır. HC emisyonu değerleri tam yük durumunda biyodizel için 34 ppm olup DME5, DME10 ve DME15 karışımları için sırasıyla 19 ppm, 25 ppm ve 27 ppm değerlerini almıştır. Tam yük durumunda DME15 karışımı kullanıldığında HC emisyonu %20 azalmıştır. DME’in içeriğinde bulunan oksijenin HC emisyonunun azalmasını sağladığı ifade edilmektedir. Ayrıca, DME’in düşük yoğunluğu ve viskozitesinin yakıt karışımlarının püskürtme özelliklerini iyileştirerek yakıtın daha iyi atomize olmasını ve daha verimli bir yanma elde edilmesini sağlayarak HC emisyonunu azalttığı ifade edilmektedir. Ancak, yakıt karışımı içerisindeki DME oranının artırılmasının yanmanın bozulmasına neden olarak HC emisyonunu artırdığı ifade edilmektedir (Loganathan ve diğ., 2012a). Şekil 8b’de HC emisyonunun dizel yakıtı, gazdan türetilmiş likit (GTL) yakıt ve DME için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi GTL ve DME yakıtları kullanıldığında HC emisyonu önemli oranda azalmıştır. Dizel yakıtı ile kıyaslandığında, GTL ve DME yakıtları için HC emisyonunda sırasıyla %15,7 ve %40,1 oranlarında azalma meydana gelmiştir. HC emisyonu yakıt ile havanın homojen olarak karışmaması sonucunda yanma odası içerisindeki yakıtça zengin bölgelerde eksik yanma nedeniyle oluşmaktadır. GTL ve DME yakıtları kullanıldığında HC emisyonundaki azalmanın bu yakıtların yüksek setan sayısı ve düşük aromatik içeriğinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. Yüksek setan sayısı tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasını sağlayarak daha verimli bir yanma elde edilmesini sağlamakta ve böylece HC emisyonu azalmaktadır. Ayrıca, DME’in kimyasal yapısında bulunan % 34,8’lik oksijen ve DME’in hızlı buharlaşma özelliği

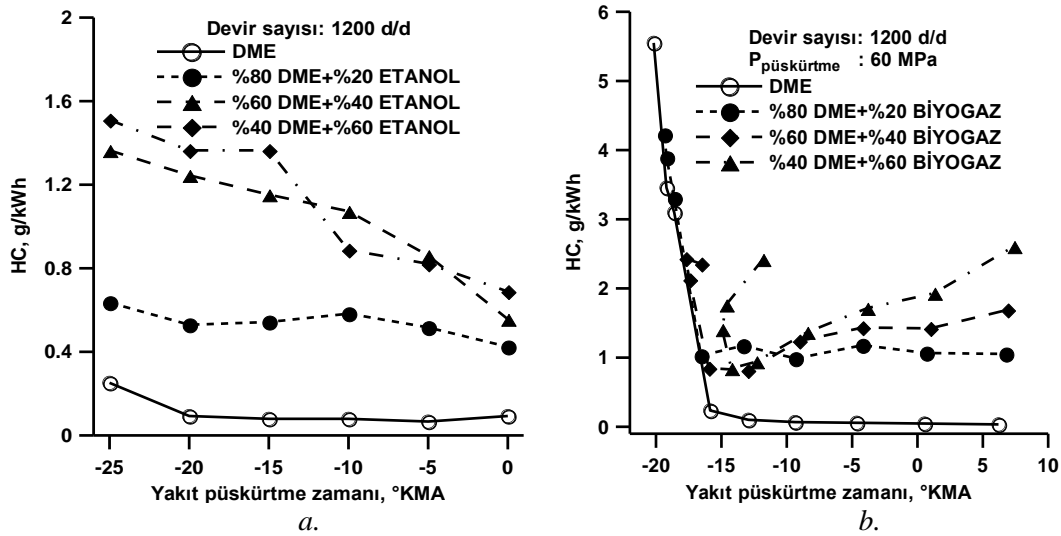
daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak yanmayı iyileştirmekte ve HC emisyonunu azaltmaktadır (Xinling ve Zhen, 2009).

Şekil 9a ve 9b’de HC emisyonunun şekillerde verilen yakıt ve karışımlar için tekli ve pilot püskürtme durumlarında püskürtme zamanı ile değişimleri verilmiştir. Tekli püskürtme durumunda püskürtme avansının artırılması dizel yakıtı ve dizel–biyodizel (D80BD20) karışımı için HC emisyonunun azalmasını sağlarken biyodizel–DME (DME80BD20) karışımı için artışa neden olmuştur. Diğer taraftan, D80BD20 ve DME80BD20 karışımları dizel yakıtına kıyasla daha düşük HC emisyonu değerleri vermiştir. Ayrıca, çoklu (pilot) püskürtme durumunda tekli püskürtmeye göre daha düşük HC emisyonu elde edildiği bildirilmiştir (Roh ve diğ., 2015).



Şekil 9:

HC emisyonunun a. Tekli püskürtme için b. Çoklu (pilot) püskürtme için püskürtme zamanı ile değişimi (Roh ve diğ., 2015)



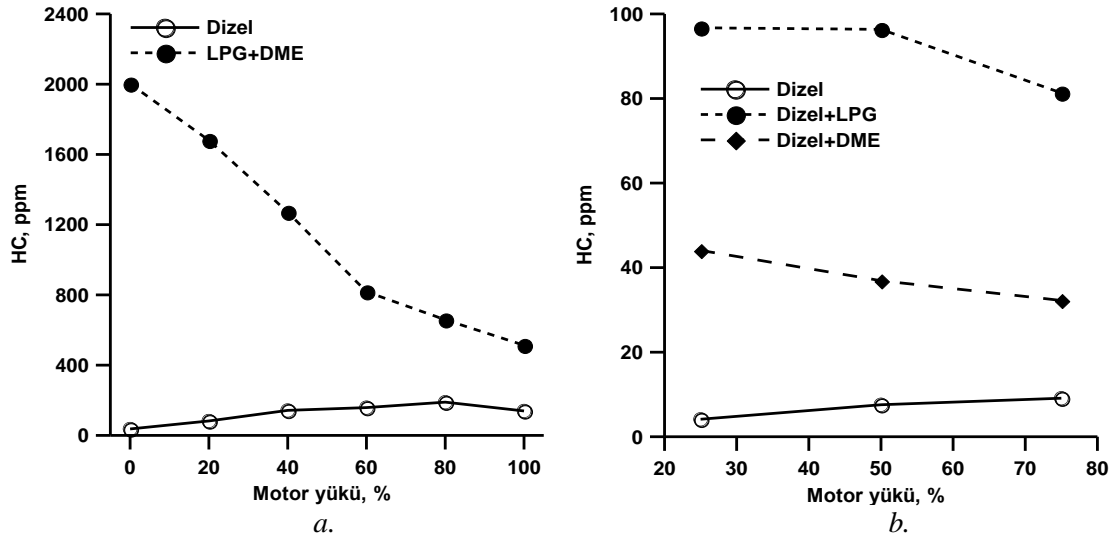
Şekil 10:

HC emisyonunun a. DME–etanol karışımları için (Park ve diğ., 2016) b. DME–biyogaz karışımları için (Park ve diğ., 2014) püskürtme zamanı ile değişimi

Şekil 10a’da HC emisyonunun çift yakıtla (DME–etanol) çalışma durumunda karışımdaki etanol oranı ve püskürtme zamanı ile değişimleri verilmiştir. HC emisyonu değerleri yakıt

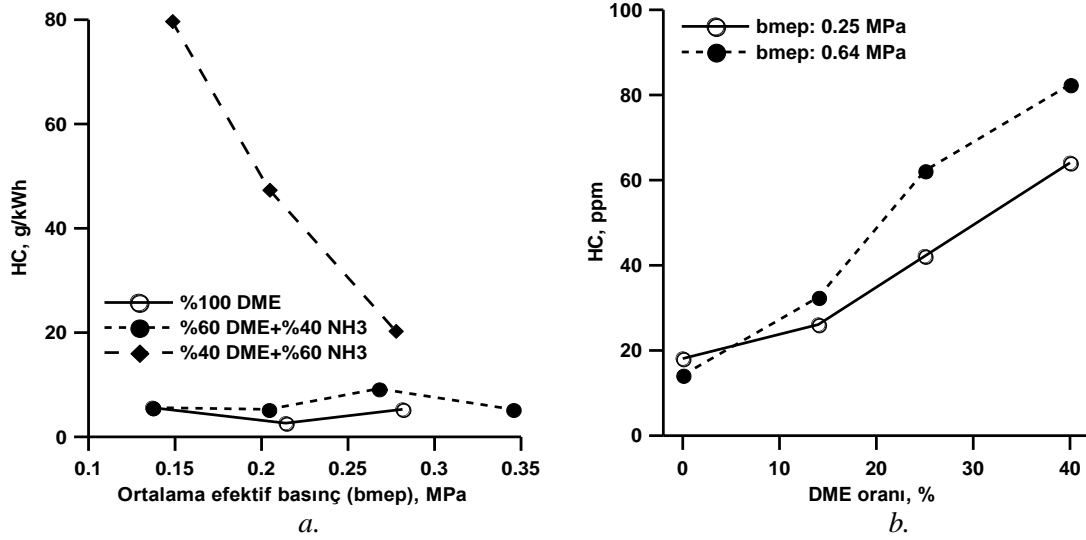
karışımı içindeki etanol oranı arttıkça artarken, püskürtme zamanının artırılmasıyla azalmıştır. Etanolün buharlaşma gizli ısısının yüksek olması nedeniyle karışımdaki etanol oranının artması yanma sıcaklıklarını düşürerek eksik yanmaya neden olmakta ve HC emisyonunu artırmaktadır. Diğer taraftan, DME yanma odasında ateşleme kaynağı olarak görev yaptığından karışımdaki DME oranının azalmasının HC emisyonunun artmasına katkı sağladığı ifade edilmektedir (Park ve diğ., 2016). Şekil 10b’de HC emisyonunun farklı DME–biyogaz karışımları için püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi -15°KMA (krank mili açısı)’nın üzerindeki püskürtme avansı değeri için HC emisyonu hızlı şekilde artış göstermiş ve karışımdaki biyogaz oranı artıp DME oranı azaldıkça HC emisyonu bir miktar artmıştır. DME yüksek setan sayısına sahip olması nedeniyle yanma odasında ateşleme kaynağı görevi görmektedir. Bu nedenle karışımdaki DME oranının azalıp biyogazın artmasının eksik yanmaya neden olduğu ve bu nedenle HC emisyonunun arttığı ifade edilmektedir (Park ve diğ., 2014).

Şekil 11a’da HC emisyonunun dizel yakıtı ve DME–LPG karışımı için motor yüküyle değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME–LPG karışımı özellikle %60 motor yüküne kadar dizel yakıtına göre oldukça yüksek HC emisyonu değerleri vermiştir. Düşük motor yüklerinde silindire alınan taze dolgu sıcaklığı düşmekte bu ise yanma sıcaklığını düşürerek eksik yanmaya neden olmakta ve böylece HC emisyonu artmaktadır. Motor yükü arttıkça silindire alınan LPG miktarı arttığından daha homojen bir karışım elde edilmekte ve DME erken tutuşma özelliği sayesinde daha hızlı ve verimli bir yanma sağlayarak HC emisyonunun önemli ölçüde azalttığı ifade edilmektedir (El–Hagar, 2014). Şekil 11b’de HC emisyonunun dizel yakıtı, dizel–LPG ve dizel–DME karışımları için motor yüküyle değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel–LPG ve dizel–DME karışımları dizel yakıtına göre daha yüksek HC emisyonu değerleri vermiştir. Bu durumun, LPG ve DME’in yüksek buharlaşma gizli ısısına sahip olması nedeniyle yanma sıcaklıklarını düşürüp eksik yanmaya neden olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Ayrıca, LPG ve DME’in segman yuvaları ve yanma odasının uzak noktalarındaki silindir duvarlarında çok fakir yakıt–hava karışımı oluşturarak alevin daha erken sönmeye neden olarak HC emisyonunun artmasına katkı sağladığı ifade edilmiştir (Khunaphan ve diğ., 2013).



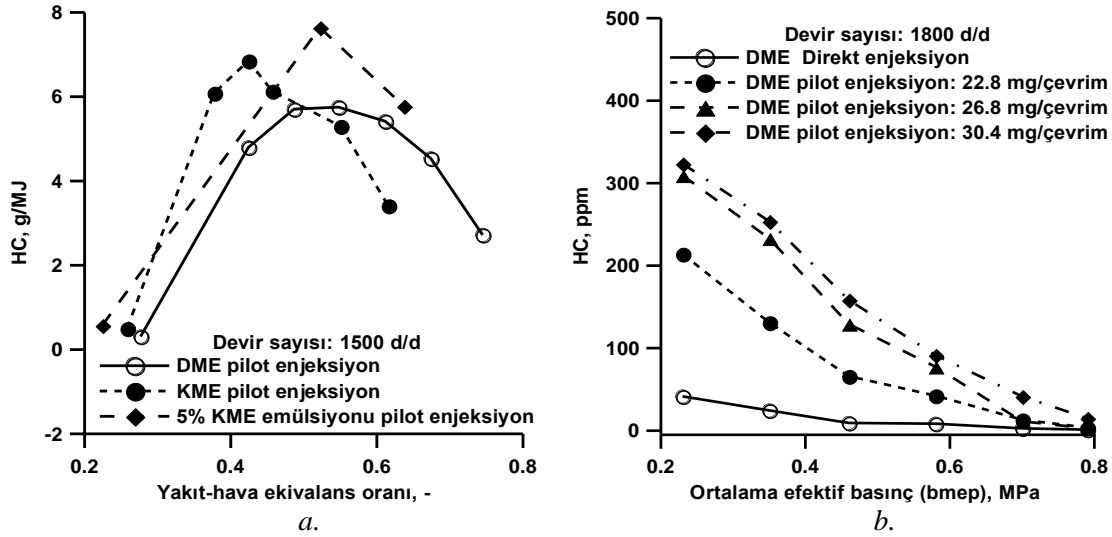
Şekil 11:

HC emisyonunun a. Dizel yakıtı ve DME–LPG karışımı için (El–Hagar, 2014) b. Dizel yakıtı, dizel–LPG ve dizel–DME karışımları için (Khunaphan ve diğ., 2013) motor yükü ile değişimi



Şekil 12:

HC emisyonunun a. DME ve DME-NH₃ karışımları için bmep ile (Ryu ve diğ., 2014) b. Dizel-DME çift yakıtlı motor için DME oranı ile (Wang ve diğ., 2013) değişimi



Şekil 13:

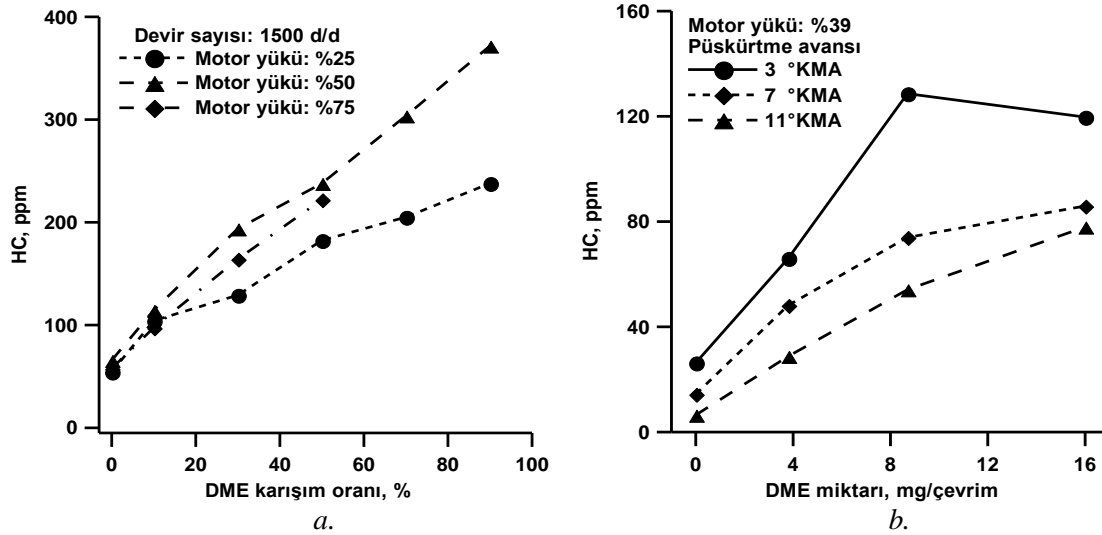
HC emisyonunun a. DME, Kolzayağı Metil Ester (KME) biyodizeli ve %5 KME emülsiyonunun pilot enjeksiyonu için yakıt-hava ekivalans oranı ile (Namasivayam ve diğ., 2010) b. DME'in direkt ve pilot enjeksiyonu için bmep ile (Ying ve diğ., 2010) değişimi

Şekil 12a'da HC emisyonunun DME ve DME-NH₃ karışımları için motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DME ve %60 DME+%40 NH₃ karışımı birbirine yakın HC emisyonu değerleri verirken %40 DME+%60 NH₃ karışımı özellikle düşük motor yüklerinde oldukça yüksek HC emisyonu değerleri vermiştir. Karışımındaki DME oranının azalmasının eksik yanmaya neden olarak HC emisyonunun artmasına katkı sağladığı ifade edilmektedir. Ancak, motor yükünün artması yanma sıcaklığını artırdığından yüksek motor yükünde HC emisyonu önemli oranda azalmıştır (Ryu ve diğ., 2014). Şekil 12b'de HC emisyonunun farklı motor yüklerinde dizel-DME çift yakıtlı motor için DME oranı ile değişimi verilmiştir. HC emisyonu genel olarak yanma odasının uzak noktalarında, segman yuvalarında ve silindir cidarlarındaki yağlama yağında hapsedilen yakıtın eksik yanmasıyla oluşmaktadır. Şekilde görüldüğü dizel-DME çift yakıtlı çalışma durumunda HC emisyonu önemli ölçüde artmaktadır. Bunun, DME

oranının artmasıyla oluşan fakir yakıt–hava karışımının eksik yanmaya neden olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir (Wang ve diğ., 2013).

Şekil 13a’da HC emisyonunun farklı yakıt–hava ekivalans oranı değerlerinde DME, Kolzayağı Metil Ester (KME) biyodizeli ve %5 KME emülsiyonunun pilot enjeksiyonları ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi incelenen üç yakıt içerisinde en düşük HC emisyonu değerleri DME yakıtı ile elde edilmiştir. %5 KME emülsiyon ve biyodizel yakıtları DME’ye göre daha düşük setan sayısı değerine sahip olduğundan daha uzun tutuşma gecikmesi süreleri ve alev hızları ortaya çıktığı ve eksik yanma nedeniyle HC emisyonunun arttığı ifade edilmektedir (Namasivayam ve diğ., 2010). Şekil 13b’de DME’in direkt ve farklı miktarlarda pilot enjeksiyonu için HC emisyonunun motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi pilot enjeksiyon durumlarında direkt enjeksiyona göre daha yüksek HC emisyonu değerleri elde edilmiştir. Bunun temel nedeninin düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle ortaya çıkan eksik yanma olduğu ifade edilmektedir (Ying ve diğ., 2010).

Şekil 14a’da HC emisyonunun farklı motor yüklerinde DME karışım oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan motor yükü ve DME oranı ile HC emisyonu artmıştır. %75 motor yükü değerinde HC emisyonu %50 motor yüküne göre bir miktar azalmıştır. Bunun nedeni motor yükü arttıkça yanma sıcaklığının artmasıdır. Homojen dolgulu çalışma durumunda direkt püskürtmeli çalışmaya göre daha fakir karışımla çalışma söz konusu olduğundan ve yakıt–hava karışımı yanma odasının uzak noktalarına ve segman yuvalarına taşındığından eksik yanma olmakta ve HC emisyonu artmaktadır. Bu nedenle, DME oranı arttıkça HC emisyonu oluşumunun arttığı belirtilmiştir (Theinnoi ve diğ., 2017). Şekil 14b’de HC emisyonunun farklı püskürtme avansı değerlerinde DME miktarı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi HC emisyonu artan DME oranı ile artarken püskürtme avansının artırılması HC emisyonu değerlerini azaltmıştır. Püskürtme avansının artırılmasının daha yüksek yanma sıcaklığı sağlayarak HC emisyonunun azalmasını sağladığı ifade edilmektedir (Wang ve diğ., 2014).

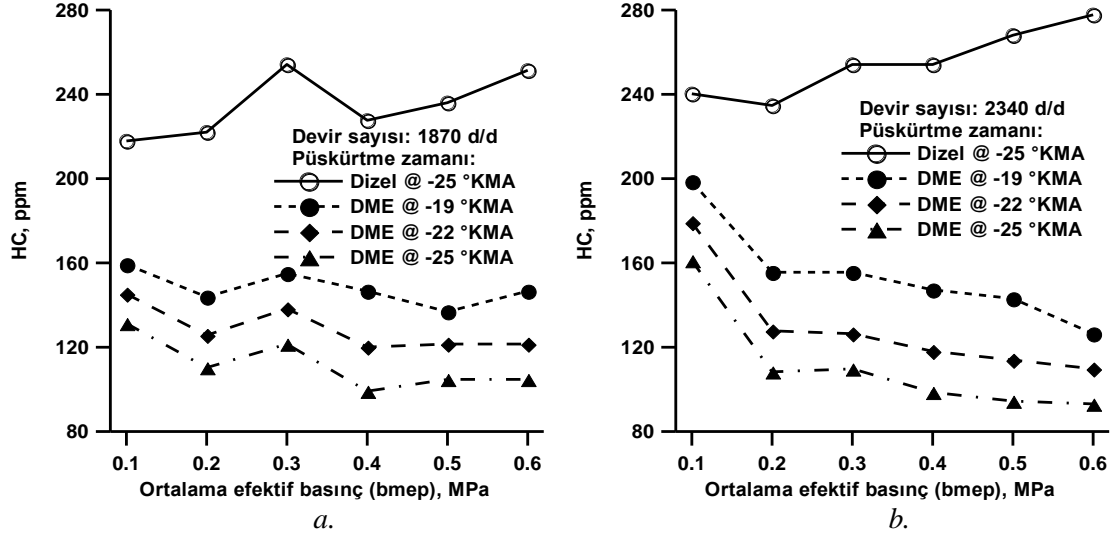


Şekil 14:

HC emisyonunun a. Farklı motor yükleri için DME oranı ile (Theinnoi ve diğ., 2017) b. Farklı püskürtme avansı değerleri için DME miktarı ile (Wang ve diğ., 2014) değişimi

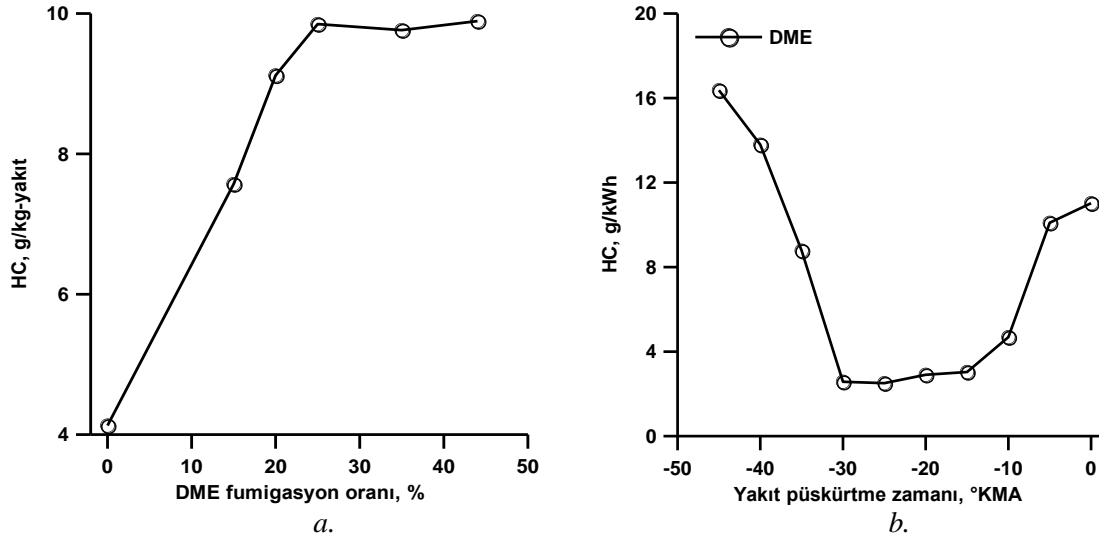
Şekil 15a ve 15b’de HC emisyonunun dizel ve DME yakıtları için farklı püskürtme avanslarında 1870 d/d ve 2340 d/d devir sayılarındaki değişimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında DME yakıtı HC emisyonunu 50–100 ppm aralığında azalmasını sağlamıştır. Bu durum, DME’in hızlı buharlaşma, fakir karışım teşekkülü ve yüksek setan sayısı gibi yanmayı iyileştiren yakıt özelliklerine sahip olmasının bir sonucudur. Diğer taraftan, püskürtme avansı artırıldığında HC emisyonunda azalma meydana gelmiştir. Bunun

nedeni, püskürtme zamanının geciktirilmesinin yanma sıcaklığını düşürerek eksik yanmaya neden olduğu şeklinde ifade edilmiştir (Zhu ve diğ., 2012).



Şekil 15:

HC emisyonunun dizel ve DME yakıtları için farklı püskürtme avanslarında a. 1870 d/d devir sayısında b. 2340 d/d devir sayısında bmeP ile değişimi (Zhu ve diğ., 2012)

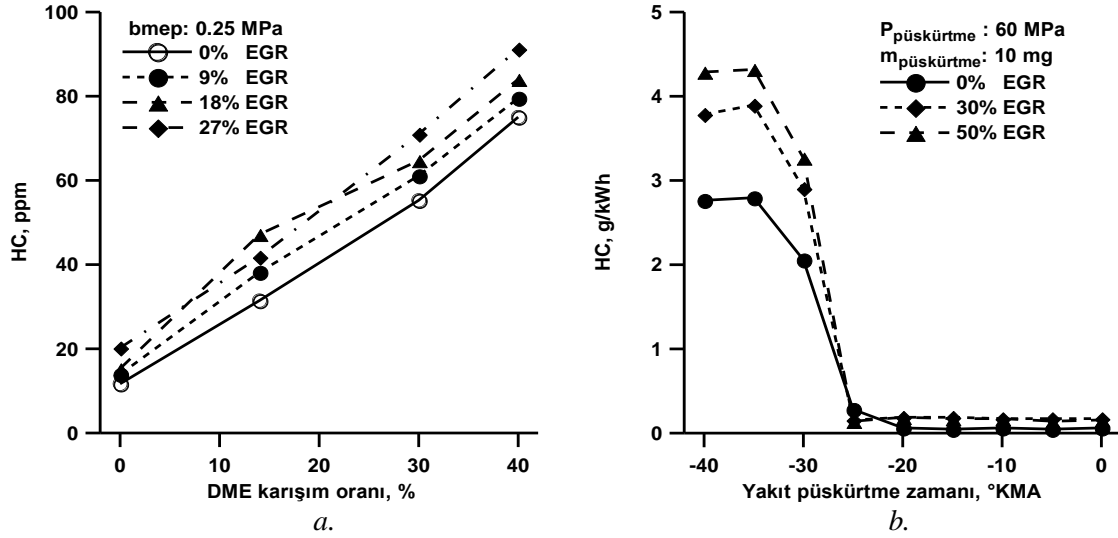


Şekil 16:

HC emisyonunun a. DME fumigasyon oranı ile (Chapman ve Boehman, 2008) b. Püskürtme zamanı ile (Park ve diğ., 2010) değişimi

Şekil 16a'da HC emisyonunun DME fumigasyon oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ön karışimli yanma durumunda DME fumigasyon oranı arttıkça HC emisyonu artmıştır. HC oluşumunun, ön karışimli çalışma durumunda yanma odasının uzak noktalarında ve segman yuvalarında hapsedilen yakıt hava karışımının tam olarak yanamamasından kaynaklandığı ifade edilmektedir (Chapman ve Boehman, 2008). Şekil 16b'de HC emisyonunun püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi $-30\text{ }^{\circ}\text{KMA}$ ila $-10\text{ }^{\circ}\text{KMA}$ püskürtme avansı aralığında en düşük HC emisyonu değerleri elde edilmiş diğer püskürtme avansı değerlerinde HC emisyonu artış göstermiştir. Bilindiği üzere, HC emisyonu eksik yanma

ürünü olup püskürtme avansının uygun şekilde ayarlanması ile kontrol edilebileceği ifade edilmiştir (Park ve diğ., 2010).



Şekil 17:

HC emisyonunun farklı EGR oranlarında a. DME karışım oranı ile (Hou ve diğ., 2014) b. Püskürtme avansı ile (Yoon ve diğ., 2013) değişimi

Şekil 17a'da HC emisyonunun farklı EGR oranlarında DME karışım oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi direkt püskürtmeye kıyasla ön karışimli yanma durumunda DME oranı arttıkça HC emisyonu artış göstermiştir. Ön karışimli çalışma durumunda segman yuvaları ve yanma odasının uzak noktalarında hapsedilen yakıt-hava karışımının eksik yanması sonucu HC emisyonunun arttığı ifade edilmektedir. Diğer taraftan, EGR oranının artırılması yanma sıcaklıklarını düşürdüğünden HC emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, EGR oranının artması silindirdeki oksijen konsantrasyonunu azaltarak eksik yanmaya neden olduğundan HC emisyonunu artırdığı belirtilmiştir (Hou ve diğ., 2014). Şekil 17b'de HC emisyonunun farklı EGR oranlarında püskürtme zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi EGR oranının artması özellikle yüksek püskürtme avansı değerlerinde HC emisyonunun artmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, EGR oranı arttıkça yanma odası içindeki oksijen miktarının azalması sonucu yanma sıcaklıklarının düşmesidir. Diğer taraftan, püskürtme zamanının -25 °KMA ve üzerindeki değerlerinde HC emisyonu artış göstermiştir. Bu durumun, püskürtülen yakıtın yanma odasının uzak köşeleri ve segman yuvaları gibi sınır tabaka bölgelerinde birikerek tam yanamamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, erken püskürtmenin yanma sıcaklığını düşürerek eksik yanmaya neden olduğu bildirilmiştir (Yoon ve diğ., 2013).

5. SONUÇLAR

Bu çalışma dimetil eterin dizel motorlarda kullanımının HC emisyonlarına etkileri üzerine yapılmış bir derlemedir. Yapılan derleme çalışmasından elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Dimetil eter düşük kaynama noktası, yüksek buharlaşma oranı, düşük viskozite, fakir karışımla çalışmayı sağlayacak düşük stokiyometrik hava-yakıt oranı ve yüksek setan sayısı gibi dizel motorlarda kullanılmaya elverişli yakıt özelliklerine sahiptir. Ancak, viskozitesi, ısıl değeri ve yağlayıcılık özelliği dizel yakıtına kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, dimetil eterin kullanımı için motor ve yakıt sistemi tasarımında değişiklikler yapılması gerekebilmektedir.

- HC emisyonu eksik yanma ürünü olup aşırı fakir veya zengin karışım bölgelerinde oluşmakta ve yanma sıcaklığının azalmasıyla artış göstermektedir. Bu nedenle, HC emisyonu çoğunlukla yanma odasının uzak noktaları ve segman yuvaları gibi düşük sıcaklığa sahip sınır bölgelerinde oluşmaktadır.
- Dimetil eter saf olarak kullanıldığında özellikle yüksek motor devirlerinde ve motor yüklerinde yanma sıcaklıkları arttığından genellikle HC emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Dizel yakıtıyla kıyaslandığında DME saf olarak kullanıldığında HC emisyonunda %42,6–95,6 oranlarında azalma sağlayabilmektedir.
- Dimetil eter dizel veya biyodizel yakıtlarıyla birlikte kullanıldığında da özellikle %20'ye kadar olan düşük karışım oranlarında HC emisyonunun azalmasını sağlayabilirken %30 ve üzerindeki karışım oranlarında HC emisyonunun artışına neden olabilmektedir. Dizel–DME karışımları dizel yakıtı ile kıyaslandığında HC emisyonunda %24,8–61,9 oranlarında azalma sağlarken biyodizel–DME karışımları %44,3–55,7 oranlarında azalma sağlayabilmektedir.
- Dimetil eter amonyak, etanol, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve biyogaz gibi alternatif yakıtlarla birlikte kullanıldığında genellikle HC emisyonunun artmasına neden olabilmektedir.
- Dimetil eter tek başına veya diğer yakıtlarla birlikte kullanıldığında püskürtme zamanlamasının uygun şekilde ayarlanması ile HC emisyonu azaltılabilmektedir.
- Dimetil eter tek başına veya diğer yakıtlarla birlikte kullanıldığında silindire gönderilen egzoz gazı resirkülasyon (EGR) oranının artırılması yanma odasında sıcaklığı ve oksijen miktarını azalttığından HC emisyonunun artmasına neden olabilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Makale tek yazarlı olduğundan herhangi bir çıkar çatışması söz konusu değildir.

YAZAR KATKISI

Makale tek yazarlı olduğundan çalışmaya yapılan tüm katkılar İsmet Sezer'e aittir.

KAYNAKLAR

1. Abhishek, Rahul, K., Santosh, K. ve Martha, O. (2017) Blending impacts of biogas and dimethyl ether (DME) on compressed ignition engine, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(4), 2174–2177.
2. Alam, M. ve Kajitani, S. (2001) DME as an alternative fuel for direct injection diesel engine, *4th International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka, 87–92.
3. Ambekar, Y. ve Hole, J. A. (2018) Preliminary optimization of duel fuel engine using dimethyl ether premixed combustion, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(10), 274–278.
4. Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R. ve Kinoshita, E. (2008) The potential of di–methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression–ignition engines: A review, *Fuel*, 87(7), 1014–1030. doi:10.1016/j.fuel.2007.06.007
5. Azizi, Z., Rezaeimanesh, M., Tohidian, T. ve Rahimpour, M. R. (2014) Dimethyl ether: A review of technologies and production challenges, *Chemical Engineering and Processing*, 82, 150–172. doi:10.1016/j.cep.2014.06.007
6. Baskaran, R. (2015) Analysis on synthesis, storage & combustion characteristics of DME as fuel in CI engines, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 3(1), 133–140.

7. Benajes, J., Novella, R., Pastor J. M., Hernández-López, A. ve Kokjohn, S. L. (2018a) Computational optimization of the combustion system of a heavy duty direct injection diesel engine operating with dimethyl-ether, *Fuel*, 218, 127–139. doi:10.1016/j.fuel.2018.01.020
8. Benajes, J., Novella, R., Pastor, J. M., Hernández-López, A. ve Kokjohn, S. L. (2018b) Computational optimization of a combustion system for a stoichiometric DME fueled compression ignition engine, *Fuel*, 223, 20–31. doi:10.1016/j.fuel.2018.03.022
9. Bogdan, J., Nicolae, B., Călin, I. ve Vlad, B.N. (2017) Study of emissions for a compression ignition engine fueled with a mix of DME and diesel, *Materials Science and Engineering*, 252, 1–9. doi:10.1088/1757-899X/252/1/012065
10. Chapman, E. M. ve Boehman, A. L. (2008) Pilot ignited premixed combustion of dimethyl ether in a turbodiesel engine, *Fuel Processing Technology*, 89, 1262–1271. doi:10.1016/j.fuproc.2008.08.010
11. Chen, Z., Konno, M. ve Kajitani, S. (2000) Performance and emissions of DI compression ignition engines fueled with dimethyl ether, *JSME International Journal*, 43(1), 82–88.
12. Deepak, K. M., Karthick, M., Dineshbabu, D., Srikanth, P. ve Ramachandran, M. G. (2015) Investigation on the effect of dimethyl ether in compression ignition engine, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 401–407.
13. Duan, J., Sun, Y., Yang, Z. ve 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*, Shanghai, 463–466. doi:10.2991/mems.2012.77
14. El-Hagar, M. M. E-G. (2014) Effect of diethyl ether and dimethyl ether with liquefied petroleum gas on combustion and emissions characteristics of diesel engine, *International Journal of Computer Science and Engineering*, 2(3), 193–198. doi:10.1080/17597269.2019.1608035
15. Genbao, L., Jianming, C., Minglong, L., Yuhua, Q. ve Zhaoyang, C. (2012) Experimental study on the size distribution characteristics of spray droplets of DME/diesel blended fuels, *Fuel Processing Technology*, 104, 352–355. doi:10.1016/j.fuproc.2012.06.008
16. Geng, P., Cao, E., Tan, Q. ve Wie, L. (2017) Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 523–534. doi:10.1016/j.rser.2016.12.080
17. Guangxin, G., Zhulin, Y., Apeng, Z., Shenghua, L. ve Yanju, W. (2013) Effects of fuel temperature on injection process and combustion of dimethyl ether engine, *Journal of Energy Resources Technology*, 135, 1–5. doi:10.1115/1.4023549
18. Hewu, W. ve Longbao, Z. (2017) Performance of a direct injection diesel engine fuelled with a dimethyl ether/diesel blend, *Journal of Automobile Engineering*, 217(9), 819–824. doi:10.1177/095440700321700907
19. Hou, J., Wen, Z., Jiang, Z. ve Qiao, X. (2014) Study on combustion and emissions of a turbocharged compression ignition engine fueled with dimethyl ether and biodiesel blends, *Journal of the Energy Institute*, 87, 102–113. doi:10.1016/j.joei.2014.03.021
20. Huang, Z., Qiao, X., Zhang, W., Wu, J. ve 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. doi:10.1007/s11708-009-0013-1
21. Inayat, A., Ghenai, C., Naqvi, M., Ammar, M., Ayoub, M. ve Hussin, M. N. B. (2017) Parametric study for production of dimethyl ether (DME) as a fuel from palm wastes, *Energy Procedia*, 105, 1242–1249. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.431
22. Jalanapurkar, M., Patel, K., Patel, T., Rathod, G. ve Granipa, H. (2015) A literature review on combine effect of di-methyl ether (DME) as an additive & the injection pressure on the

- performance & emission of 4 stroke C.I engine, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2(1), 262–266.
23. Jang, J. ve Bae, C. (2009) Effects of valve events on the engine efficiency in a homogeneous charge compression ignition engine fueled by dimethyl ether, *Fuel*, 88, 1228–1234. doi:10.1016/j.fuel.2008.11.001
 24. Jeon, J., Kwon, S., Park, Y. H., Oh, Y. ve Park, S. (2014) Visualizations of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME, *Applied Energy*, 113, 294–301. doi:10.1016/j.apenergy.2013.07.033
 25. Kajitani, S. (2004) A study of low compression ratio diesel engines operated with neat dimethyl ether (DME), *JSME TED Newsletter*, 42, 1–14.
 26. Kajitani, S. ve Chen, Z. (2003) Fundamental research on next generation fuel (dimethyl ether) engines, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 62, 133–144.
 27. Khunaphan, S., Hartley, U. W. ve Theinnoi, K. (2013) Characterization and potential of dimethyl ether (DME) as dual fuel combustion in a compression ignition engine, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2(3), 79–85.
 28. Kim, H. J. ve Park, S. H. (2016) Optimization study on exhaust emissions and fuel consumption in a dimethyl ether (DME) fueled diesel engine, *Fuel*, 182, 541–549. doi:10.1016/j.fuel.2016.06.001
 29. Kim, H. J., Park, S. H., Lee, K. S. ve Lee, C. S. (2011) A study of spray strategies on improvement of engine performance and emissions reduction characteristics in a DME fueled diesel engine, *Energy*, 36, 1802–1813. doi:10.1016/j.energy.2010.12.026
 30. Kim, H. J., Park, S. W. ve Lee, C. S. (2012), Numerical and experimental study on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether (DME) fueled compression ignition engine, *Oil & Gas Science and Technology*, 67(3), 479–489. doi:10.2516/ogst/2011130
 31. Kowalewicz, A. ve Wojtyniak, M. (2005) Alternative fuels and their application to combustion engines, *Journal of Automobile Engineering*, 219, 103–125. doi:10.1243/095440705X6399
 32. Kropiwnicki, J., Dominiczak, P. ve Kneba, Z. (2017) Analysis of the possibilities of using of DME fuel in motor boat drive systems, *Combustion Engines*, 171(4), 74–80. doi:10.19206/CE-2017-413
 33. Lamani, V. T., Yadav, A. K. ve Narayanappa, K. G. (2017) Influence of low-temperature combustion and dimethyl ether-diesel blends on performance, combustion, and emission characteristics of common rail diesel engine: a CFD study, *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 15500–15509. doi:10.1007/s11356-017-9113-3
 34. Lecksiwilai, N., Gheewala, S. H., Sagisaka, M. ve Yamaguchi, K. (2016) Net energy ratio and life cycle greenhouse gases (GHG) assessment of bio-dimethyl ether (DME) produced from various agricultural residues in Thailand, *Journal of Cleaner Production*, 134, 523–531. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.085
 35. Li, G. (2011) Dimethyl ether (DME): a new alternative fuel for diesel vehicle, *Advanced Materials Research*, 156–157, 1014–1018.
 36. Lim, O. T. ve Iida, N. (2015) A study on the spray and engine combustion characteristics of diesel-dimethyl ether fuel blends, *Journal of Automobile Engineering*, 229(6), 782–792. doi:10.1177/0954407014539673
 37. Loganathan, M., Anbarasu, A. ve Velmurugan, A. (2012a) Emission characteristics of jatropa-ethanol and jatropa-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine, *Journal of Mechanical Engineering*, 42(1), 38–46.
 38. Loganathan, M., Anbarasu, A. ve Velmurugan, A. (2012b) Emission characteristics of jatropa-dimethyl ether fuel blends on a DI diesel engine, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 1(8), 28–32.

39. Longbao, Z., Hewu, W. ve Ying, W. (2002) Experimental study on performances and combustion characteristics of DME powered vehicle, *Conference on Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities (BAQ 2002)*, Hong Kong, 1–6.
40. Maji, S., Ahmed, S., Siddiqui, W. A. ve Kumar, A. (2014) Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(11), 17221–17228.
41. Maji, S., Ahmed, S., Siddiqui, W. A., Aggarwal, S. ve Kumar A. (2015) Impact of di-methyl ether (DME) as an additive fuel for compression ignition engine in reduction of urban air pollution, *American Journal of Environmental Protection*, 3(2), 48–52. doi:10.12691/env-3-2-2
42. Mohan, B., Yang, W., Yu, W. ve Tay, K. L. (2017) Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethyl ether fuel, *Applied Energy*, 185, 1403–1410. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.128
43. Namasivayam, A. M., Korakianitis, T., Crookes, R. J., Bob-Manuel, K. D. H. ve Olsen, J. (2010) Biodiesel, emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines, *Applied Energy*, 87, 769–778. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.014
44. Oda, Y., Osafune, Y., Ueda, H. ve Fujimura, K. (2004) Clean combustion technology in diesel engines operated with dimethyl ether, *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review*, 40(6), 1–5.
45. Park, S. (2012), Optimization of combustion chamber geometry and engine operating conditions for compression ignition engines fueled with dimethyl ether, *Fuel*, 97, 61–71. doi:10.1016/j.fuel.2012.03.004
46. Park, S. H. ve Lee C. S. (2013) Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system, *Progress in Energy and Combustion Science*, 39, 147–168. doi:10.1016/j.peccs.2012.10.002
47. Park, S. H. ve 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. doi:10.1016/j.enconman.2014.06.051
48. Park, S. H., Kim, H. J. ve Lee, C. S. (2010) Effects of dimethyl-ether (DME) spray behavior in the cylinder on the combustion and exhaust emissions characteristics of a high speed diesel engine, *Fuel Processing Technology*, 91, 504–513. doi:10.1016/j.fuproc.2009.12.013
49. Park, S. H., Shin, D. ve Park, J. (2016) Effect of ethanol fraction on the combustion and emission characteristics of a dimethyl ether-ethanol dual-fuel reactivity controlled compression ignition engine, *Applied Energy*, 182, 243–252. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.101
50. Park, S. H., Yoon, S. H., Cha, J. ve Lee, C. S. (2014) Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine, *Energy*, 66, 413–422. doi:10.1016/j.energy.2014.02.007
51. Patil, K. R. ve Thipse, S. S. (2012) The potential of DME-diesel blends as an alternative fuel for CI engines, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(10), 35–41.
52. Prabhakaran, B., Thennarasu, P. ve Karthick, S. (2015) Performance and characteristics of a CI engine using DME (Dimethyl Ether), *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(2), 31–34.
53. Roh, H. G., Lee, D. ve Lee, C. S. (2015) Impact of DME-biodiesel, diesel-biodiesel and diesel fuels on the combustion and emission reduction characteristics of a CI engine according to pilot and single injection strategies, *Journal of the Energy Institute*, 88, 376–385. doi:10.1016/j.joei.2014.11.005

54. Ryu, K., Zacharakis–Jutz, G. E. ve Kong, S.–C. (2014) Performance characteristics of compression–ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether, *Applied Energy*, 113, 488–499. doi:10.1016/j.apenergy.2013.07.065
55. Semelsberger, T. A., Borup, R. L. ve Grene, H. L. (2006) Dimethyl ether (DME) as an alternative fuel, *Journal of Power Sources*, 156, 497–511. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.05.082
56. Sezer, I. (2011) Thermodynamic, performance and emission investigation of a diesel engine running on dimethyl ether and diethyl ether, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1594–1603. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.021
57. Smolec, R., Idzior, M., Karpiuk, W. ve Kozak, M. (2017) Assessment of the potential of dimethyl ether as an alternative fuel for compression ignition engines, *Combustion Engines*, 169(2), 181–186. doi:10.19206/CE–2017–232
58. Song, J., Huang, Z., Qiao, X. ve Wang, W. (2004) Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether, *Energy Conversion and Management*, 45, 2223–2232. doi:10.1016/j.enconman.2003.11.004
59. Suh, H. K. ve Lee, C. S. (2008) Experimental and analytical study on the spray characteristics of dimethyl ether (DME) and diesel fuels within a common–rail injection system in a diesel engine, *Fuel*, 87, 925–932. doi:10.1016/j.fuel.2007.05.051
60. Taghavifar, H., Khalilarya, S., Mirhasani, S. ve Jafarmadar, S. (2014) Numerical energetic and exergetic analysis of CI diesel engine performance for different fuels of hydrogen, dimethyl ether, and diesel under various engine speeds, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 9515–9526. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.03.256
61. Teng, H., McCandless, J. C. ve Scheneyer Jeffrey, B. (2001) Thermochemical characteristics of dimethyl ether alternative fuel for compression–ignition, *Society of Automotive Engineers*, Paper no 2001–01–0154.
62. Theinnoi, K., Suksumpong, P. ve Temwutthikun, W. (2017) Engine performance of dual fuel operation with in–cylinder injected diesel fuels and in–port injected DME, *Energy Procedia*, 142, 461–467. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.072
63. Thomas, G., Feng, B., Veeraragavan, A., Cleary, M. J. ve Drinnan N. (2014) Emissions from DME combustion in diesel engines and their implications on meeting future emission norms: A review, *Fuel Processing Technology*, 119, 286–304. doi:10.1016/j.fuproc.2013.10.018
64. Vispute, K. M. ve Pawar, T. J. (2016), Study and prospects of di–methyl ether as an alternative fuel in C.I. engine: review, *International Journal of Trend in Research and Development*, 3(4), 134–138.
65. Wang, H. W., Zhou, L. B., Jiang, D. M. ve Huang, Z. H. (2000) Study on the performance and emissions of a compression ignition engine fuelled with dimethyl ether, *Journal of Automotive Engineering*, 214, 101–106. doi:10.1243/0954407001527268
66. Wang, Y., Xiao, F., Zhao, Y., Li, D. ve Lei, X. (2015) Study on cycle–by–cycle variations in a diesel engine with dimethyl ether as port premixing fuel, *Applied Energy*, 143, 58–70. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.079
67. Wang, Y., Zhao, Y. ve Yang, Z. (2013) Dimethyl ether energy ratio effects in a dimethyl ether–diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, 54, 481–487. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.02.005
68. Wang, Y., Zhao, Y., Xiao, F. ve Li, D. (2014) Combustion and emission characteristics of a diesel engine with DME as port premixing fuel under different injection timing, *Energy Conversion and Management*, 77, 52–60. doi:10.1016/j.enconman.2013.09.011
69. Wattanavichien, K. (2009) Implementation of DME in a small direct injection diesel engine, *International Journal of Renewable Energy*, 4(2), 1–12.

70. Xinling, L. ve Zhen, H. (2009) Emission reduction potential of using gas-to-liquid and dimethyl ether fuels on a turbocharged diesel engine, *Science of the Total Environment*, 407, 2234–2244. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.11.043
71. Xu, S., Wang, Y., Zhang, X., Zhen, X. ve Tao, C. (2012) Development of a novel common-rail type dimethyl ether (DME) injector, *Applied Energy* 94, 1–12. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.030
72. Yanju, W., Kun, W., Wenrui, W., Shenghua, L., Xiao, C., Yajing, Y. ve Shanwen, B. (2014) Comparison study on the emission characteristics of diesel- and dimethyl ether-originated particulate matters, *Applied Energy*, 130, 357–369. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.058
73. Ying, W., Li, H., Longbao, Z. ve Wei, L. (2010) Effects of DME pilot quantity on the performance of a DME PCCI-DI engine, *Energy Conversion and Management*, 51, 648–654. doi:10.1016/j.enconman.2009.10.023
74. Ying, W., Longbao, Z. ve Hewu, W. (2006) Diesel emission improvements by the use of oxygenated DME/diesel blend fuels, *Atmospheric Environment*, 40, 2313–2320. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.016
75. Ying, W., Longbao, Z., Zhongji, Y. ve Hongyi, D. (2005) Study on combustion and emission characteristics of a vehicle engine fuelled dimethyl ether, *Journal of Automotive Engineering*, 219, 263–269.
76. Yoon, S. H., Cha, J. P. ve 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. doi:10.1016/j.fuproc.2010.04.017
77. Yoon, S. H., Han, S. C. ve Lee C. S. (2013) Effects of high EGR rate on dimethyl ether (DME) combustion and pollutant emission characteristics in a direct injection diesel engine, *Energies*, 6, 5157–5167. doi:10.3390/en6105157
78. Youn, I. M., Park, S. H., Roh, H. G. ve Lee, C. S. (2011) Investigation on the fuel spray and emission reduction characteristics for dimethyl ether (DME) fueled multi-cylinder diesel engine with common-rail injection system, *Fuel Processing Technology*, 92, 1280–1287. doi:10.1016/j.fuproc.2011.01.018
79. Zhao, Y., Wang, Y., Li, D., Lei, X. ve Liu, S. (2014) Combustion and emission characteristics of a DME (dimethyl ether)-diesel dual fuel premixed charge compression ignition engine with EGR (exhaust gas recirculation), *Energy*, 72, 608–617. doi:10.1080/17597269.2015.1036960
80. Zhu, Z., Li, D. K., Liu, J., Wei, Y. J. ve Liu, S.H. (2012) Investigation on the regulated and unregulated emissions of a DME engine under different injection timing, *Applied Thermal Engineering*, 35, 9–14. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.08.015