



Effect of using ethyl acetate as second fuel in dual fuel diesel engine on engine performance and exhaust emissions

Hasan Ali Çelik*

Department of Mechanical Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, 54050, Türkiye

Highlights:

- At full load, 3 ms ethyl acetate injection reduces total energy consumption by 12.66% compared to D100
- 2ms ethyl acetate injection reduces CO emissions by 51.64% at full load
- 1ms ethyl acetate injection decreases smoke opacity by 72.45% at full load

Keywords:

- Dual fuel diesel
- Ethyl acetate
- Performance
- Emissions

Article Info:

Research Article

Received: 29.08.2024

Accepted: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1540598

Correspondence:

Author: Hasan Ali Çelik

e-mail:

hasancelik@subu.edu.tr

phone: +90 533 368 66 66

Graphical/Tabular Abstract

According to the results, a decrease of 42.86% in HC, 1.09% in CO₂ and 1.88% in NO_x was observed with 1 ms EA injection. With 2 ms EA injection, BSFC decreased by 1.78%, CO by 51.64% and Smoke opacity by 72.45%. At 3 ms injection rate, E_{total} decreased by 12.66%. In the studies conducted by Sayın, et al. (2008), Barik, et al. (2017) and Zhou, et al. (2019); It was reported that BSFC can be reduced by increasing the combustion efficiency by the injection timing of alternative fuels such as ethyl acetate. According to the results of the studies conducted by Di, et al. (2009), Yanfeng, et al. (2007), and Santasnachok, et al. (2021), the use of fuels with high oxygen content, such as ethyl acetate, provides more oxygen in the combustion process, resulting in more complete combustion, which reduces harmful emissions such as CO, HC, and smoke opacity.

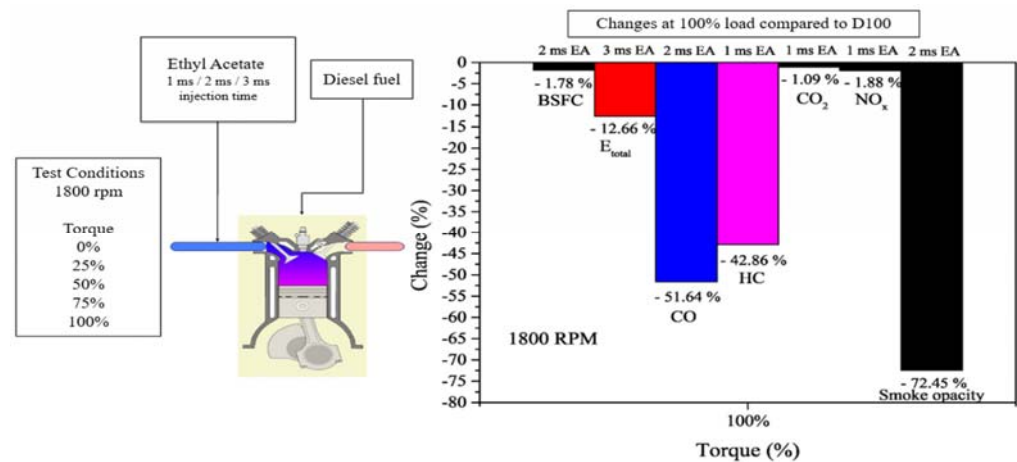


Figure A. Graphical summary of the effects of ethyl acetate as a secondary fuel on engine performance and emissions in a dual-fuel diesel engine

Purpose: This study aims to evaluate the effects of using ethyl acetate as a secondary fuel in a dual-fuel diesel engine on engine performance and exhaust emissions. By examining parameters such as torque, specific fuel consumption, total energy consumption, exhaust temperature, and various emissions (CO, HC, NO_x, etc.), the research seeks to determine the potential benefits of ethyl acetate in enhancing combustion efficiency and reducing harmful emissions in diesel engines.

Theory and Methods: The study explores the impact of ethyl acetate as a secondary fuel in a dual-fuel diesel engine using experimental methods. The engine was tested at a constant speed of 1800 rpm under varying loads with different ethyl acetate injection durations (1ms, 2ms, and 3ms).

Results: Using ethyl acetate as a secondary fuel in a dual-fuel diesel engine significantly affects engine performance and emissions. At full load, ethyl acetate injection resulted in a 72.45% reduction in smoke emissions, a 51.64% decrease in CO emissions, a 1.28% decrease in BSFC, and an increase in combustion efficiency. The findings indicate that ethyl acetate can enhance combustion efficiency and reduce harmful emissions when used alongside diesel fuel, particularly at higher loads (Figure A).

Conclusion: Incorporating ethyl acetate as a secondary fuel in dual-fuel diesel engines can significantly enhance combustion efficiency and reduce emissions. The study demonstrates that ethyl acetate injection leads to lower smoke, CO, and HC emissions, as well as reduced BSFC, making it a promising option for cleaner and more efficient diesel engine operation.



Çift yakıtlı dizel motorunda ikinci yakıt olarak etil asetat kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisi

Hasan Ali Çelik*

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 54050, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Tam yükte, 3ms etil asetat enjeksiyonu, D100'e kıyasla toplam enerji tüketimini %12,66 oranında azaltır
- 2ms etil asetat enjeksiyonu, tam yükte CO emisyonlarını %51,64 oranında azaltır
- 1ms etil asetat enjeksiyonu, tam yükte duman koyuluğunu %72,45 oranında azaltır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.08.2024

Kabul: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1540598

Anahtar Kelimeler:

Çift yakıtlı dizel,
etil asetat,
performans,
emisyon

Ö Z

Bu çalışma, çift yakıtlı bir dizel motorda performansı artırmak ve emisyonları azaltmak için ikincil yakıt olarak etil asetat kullanımını incelemektedir. Deneyler, sabit 1800 d/d motor hızında, %0 ile %100 arasında değişen yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Etil asetat, standart dizel yakıt ile birlikte emme manifolduna 1ms, 2ms ve 3ms süreyle enjekte edilmiştir. Analiz edilen temel parametreler arasında tork, özgül yakıt tüketimi, toplam enerji tüketimi, egzoz sıcaklığı, CO, HC, CO₂, O₂, NO_x, lambda ve is emisyonları yer almaktadır. Sonuçlar, etil asetat enjeksiyonunun genel olarak CO, CO₂, NO_x ve is emisyonlarını azalttığını, HC ve O₂ seviyelerini ise artırdığını göstermiştir. Tam yük koşullarında önemli iyileşmeler gözlemlenmiştir. 1ms enjeksiyon süresinde HC emisyonları %42,86, NO_x emisyonları %1,88 ve is emisyonları %72,45 oranında azalmıştır. 2ms enjeksiyonda fren özgül yakıt tüketimi %1,28 ve CO emisyonları %51,64 oranında düşmüştür. 3ms enjeksiyonda toplam enerji tüketimi %12,67 azalmıştır. Bu bulgular, etil asetatın yanma verimliliğini artırma ve özellikle yüksek yük koşullarında zararlı emisyonları azaltma potansiyelini vurgulamaktadır. Çalışma, etil asetatın daha temiz ve verimli bir dizel motor çalışması için umut vadeden bir ikincil yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Effect of using ethyl acetate as second fuel in dual fuel diesel engine on engine performance and exhaust emissions

H I G H L I G H T S

- At full load, 3ms ethyl acetate injection reduces total energy consumption by 12.66% compared to D100.
- 2ms ethyl acetate injection reduces CO emissions by 51.64% at full load.
- 1ms ethyl acetate injection decreases smoke opacity by 72.45% at full load.

Article Info

Research Article

Received: 29.08.2024

Accepted: 23.11.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1540598

Keywords:

Dual fuel diesel,
ethyl acetate,
performance,
emissions

ABSTRACT

This study examines the use of ethyl acetate as a secondary fuel in a dual-fuel diesel engine to enhance performance and reduce emissions. Experiments were conducted on a diesel engine running at a constant speed of 1800 rpm under various load conditions (0–100%). Ethyl acetate was injected into the intake manifold at durations of 1ms, 2ms, and 3ms, alongside standard diesel fuel. Key parameters analyzed included torque, specific fuel consumption, total energy consumption, exhaust temperature, CO, HC, CO₂, O₂, NO_x, lambda, and smoke emissions. Results indicated that ethyl acetate injection generally reduced CO, CO₂, NO_x, and smoke emissions while increasing HC and O₂ levels. At full load, significant improvements were observed. For 1ms injection, HC emissions decreased by 42.86%, NO_x by 1.88%, and smoke by 72.45%. At 2ms, brake-specific fuel consumption reduced by 1.28%, and CO emissions by 51.64%. With 3ms, total energy consumption dropped by 12.67%. These findings highlight the potential of ethyl acetate to improve combustion efficiency and reduce harmful emissions, particularly under high-load conditions. The study suggests that ethyl acetate could serve as a promising secondary fuel for cleaner and more efficient diesel engine operation.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : * hasancelik@subu.edu.tr / Tel: +90 533 368 66 66

1. Giriş (Introduction)

Küresel otomotiv endüstrisi, çevresel kaygılar ve sıkı emisyon düzenlemeleri daha sürdürülebilir ve verimli teknolojiler için baskı yaparken önemli bir dönüşüm geçirmektedir [1]. İçten yanmalı motor, özellikle dizel motorlar, ulaşım sektörünün yanı sıra endüstriyel ve tarımsal uygulamaların da önemli bir bileşeni olmaya devam etmektedir [2]. Dizel motorlar, benzinli motorlara kıyasla üstün termal verimlilikleri nedeniyle oldukça verimlidir ve bu da onları ağır hizmet tipi araçlar ve büyük iş makineleri için birincil tercih haline getirmektedir [3]. Ancak, bu avantajlarının yanında aynı zamanda yüksek seviyelerde nitrojen oksit (NOx), partikül madde (PM), karbondioksit (CO₂) ve diğer zararlı emisyonlar yayarak çevre kirliliğine de olumsuz etkileri bulunmaktadır [4]. Bu kirliticiler yalnızca hava kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda küresel ısınmaya ve halk sağlığı sorunlarına da önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [5]. Sonuç olarak, dizel motorların yüksek performans ve verimliliğini korurken çevresel etkisini azaltmaya yönelik çok fazla çalışma yapılmıştır [6]. Bu dengeyi sağlamanın umut verici bir yaklaşımı, dizel motorlarda çift yakıtlı sistemlerin kullanılmasıdır [7-10]. Çift yakıtlı motorlar, aynı anda iki farklı yakıt kullanarak çalışmaktadır [11-14]. Bu tür sistemler, hem dizel hem de alternatif bir yakıtın kombinasyonunu kullanarak motor verimliliğini artırabilir ve emisyonları azaltabilir [15, 16]. Birincil yakıt olarak dizel ve benzeri alternatif bir yakıt kullanılmaktadır. İkincil yakıt ise genellikle daha temiz yanan alternatif bir yakıt tercih edilmektedir. Bu yapılandırma, her iki yakıtın avantajlarından yararlanılmasını sağlayarak zararlı emisyonları azaltma ve yakıt verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir [17]. Çift yakıtlı motorlarda kullanılan yaygın alternatif yakıtlar arasında doğal gaz, etanol, biyodizel [18] ve hidrojen [19, 20] bulunmaktadır. Bunlar arasında etanol ve diğer oksijenli yakıtlar, dizel yakıtla birlikte kullanıldığında NOx [21] ve PM [22] emisyonlarını azaltma potansiyelleri nedeniyle önemli ilgi görmüştür. Ancak daha da verimli ve sürdürülebilir alternatif yakıt arayışı devam etmektedir [23]. Yüksek basınç ve sıcaklık altında çalışan dizel motorlardaki yanma süreci, havadaki nitrojenin oksidasyonu nedeniyle yüksek seviyelerde NOx oluşumuna da neden olmaktadır [24]. Dizel motorlardan kaynaklanan emisyonları azaltma çabaları, seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemleri ve dizel partikül filtreleri (DPF'ler) gibi gelişmiş son işlem teknolojilerinin geliştirilmesine yol açmaktadır [25]. Bu teknolojiler emisyonları azaltmada etkili olsa da, ek maliyetler, karmaşıklık ve bakım gereksinimleri ile birlikte gelmektedir. Ayrıca, emisyonları yalnızca son işlem sistemlerine güvenmek yerine, yanma sürecinin kendisi sırasında kaynağında en aza indirmenin yollarını bulmaya yönelik devam eden birçok çalışma gerçekleştirilmektedir [26-28].

Literatürde yapılan çalışmalar, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtlar, katkı maddeleri ve çalışma parametrelerinin motor performansını ve emisyonlarını iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır. Termal kaplamalar, su enjeksiyonu, propan-dizel karışımları, oktan sayısı ayarı, MWCNT katkı maddeleri ve alkol karışımları gibi stratejiler, yakıt verimliliğini artırmak, zararlı emisyonları azaltmak ve motor performansını optimize etmek için umut vadetmektedir. Ancak, optimum sonuçlar elde etmek için yakıt özellikleri, motor türü ve çalışma koşulları gibi faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır [29-32]. Çift yakıtlı yanma stratejileri ve alternatif yakıtların kullanımı burada devreye girmektedir. Çift yakıtlı motorlar, geleneksel dizel motorların oluşturduğu çevresel zorluklara çok yönlü ve pratik bir çözüm sunmaktadır [33]. Çift yakıtlı bir motorda, birincil yakıt, genellikle dizel, yanmayı başlatmak için kullanılırken, gaz veya sıvı alternatif yakıt olabilen ikincil yakıt, doğrudan yanma odasına veya emme manifoldu aracılığıyla verilmektedir. İkincil yakıtın yanması dizel yakıtıyla birlikte gerçekleşmekte ve bu da daha eksiksiz bir yanma

süreci ve birçok durumda zararlı emisyonlarda bir azalma ile sonuçlanmaktadır [34, 35]. Çift yakıtlı konfigürasyon, emisyonları dengelemek için daha temiz yanan ikincil bir yakıt kullanırken dizel tüketiminde bir azalmaya olanak tanımaktadır. Örneğin, doğal gaz, dizel ile karşılaştırıldığında daha düşük seviyelerde CO₂, NOx ve PM ürettiği için çift yakıtlı motorlarda genellikle ikincil yakıt olarak kullanılmaktadır [36-39]. Benzer şekilde, alkol bazlı bir yakıt olan etanol, yüksek oksijen içeriği ve yenilenebilir yapısı nedeniyle çift yakıtlı uygulamalarda kapsamlı olarak incelenmiştir. Ancak, yakıt uyumluluğu, yanma kararlılığı ve yakıt karışımlarının optimizasyonu gibi zorlukların, çift yakıtlı sistemlerin tam potansiyeline ulaşmasını sağlamak için ele alınması gerekmektedir [40]. Etil asetat (C₄H₈O₂), biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen bir esterdir. Nispeten yüksek oksijen içeriğine (kütlece %32) sahip uçucu ve yanıcı bir sıvıdır ve bu da onu oksijenli bir yakıt yapmaktadır. Oksijenli yakıtların, yanma odasına ek oksijen sağlayarak yanma sürecini iyileştirdiği, yakıtın tam oksidasyonunu teşvik ederek CO, HC ve PM gibi eksik yanma ürünlerinin oluşumunu azalttığı görülmüştür.

Etil asetatın yüksek oksijen içeriği ve yenilenebilir üretim potansiyeli, onu çift yakıtlı dizel motorlarda kullanım için çekici bir aday haline getirmektedir [41]. Etil asetatı ikincil yakıt olarak kullanmanın temel faydalarından biri, CO, HC, NOx ve PM emisyonlarını azaltma potansiyelidir. NOx oluşumu yanma sıcaklığı ve oksijenin mevcudiyeti ile yakından ilişkili olduğundan, etil asetat gibi oksijenli bir yakıtın kullanımı yanma sıcaklıklarını düşürmeye ve üretilen NOx miktarını azaltmaya yardımcı olabilmektedir [42]. Ek olarak, oksijenli yakıtlar, hidrokarbonların daha eksiksiz yanmasını teşvik ederek partikül madde öncüsü olan is oluşumunu azaltabilir. Dahası, etil asetat, dizel ile karşılaştırıldığında nispeten düşük bir karbon içeriğine sahiptir ve bu, çift yakıtlı bir konfigürasyonda kullanıldığında CO₂ emisyonlarında azalmaya yol açabilir. CO₂, küresel ısınmaya katkıda bulunan bir sera gazıdır ve emisyonlarını azaltmak, iklim değişikliğini hafifletme çabalarında kritik bir hedefdir [43]. Dizel yakıtının bir kısmını etil asetat ile değiştirerek, motorun genel karbon ayak izi azaltılabilir. Ancak, etil asetatın ikincil yakıt olarak kullanılması da çeşitli zorluklar sunmaktadır. Etil asetat, dizelden daha düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da aynı miktarda enerji üretmek için daha fazla yakıt gerektiği anlamına gelmektedir. Bu, özellikle yüksek yük koşulları altında yakıt tüketiminde artışa yol açabilmektedir. Ek olarak, etil asetatın uçuculuğu ve yanıcılığı, özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında güvenlik endişeleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle, etil asetatın çift yakıtlı motorlarda kullanımının hem güvenli hem de verimli olmasını sağlamak için motor tasarımı, yakıt enjeksiyon stratejileri ve çalışma koşullarının dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. İçten yanmalı motorlarda etil asetat kullanımını sınırlı ancak umut verici araştırmaların konusu olmuştur. Çalışmalar, etil asetatın dizel veya benzinle karışım halinde kullanıldığında egzoz emisyonlarını azaltabileceğini ve yanma özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Örneğin, Santasnachok ve Sutherasak [44], B10 (%10 biyodizel), etil asetat ve etanol karışımı kullanan bir dizel motorunun performansını araştırmıştır. Bulguları, karışımın CO₂, NOx ve is emisyonlarını azaltırken motor performansında da hafif bir düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Bu, etil asetatın dizel motorların çevresel performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu, ancak motor gücü ve verimliliği üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek için daha fazla optimizasyona ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Yeşilyurt ve ark. tarafından yürütülen başka bir çalışma [45], etil asetatın kıvılcım ateşlemeli bir motorda kullanımı araştırılmıştır. Etil asetatın benzinle karıştırıldığında CO ve HC emisyonlarını azalttığı, ancak motor gücünde hafif bir azalmaya yol açtığını çalışma sonucunda elde etmişlerdir. Araştırmacılar, etil asetatın alternatif bir yakıt olarak potansiyeli olmasına rağmen, ekonomik uygulanabilirliğinin ve

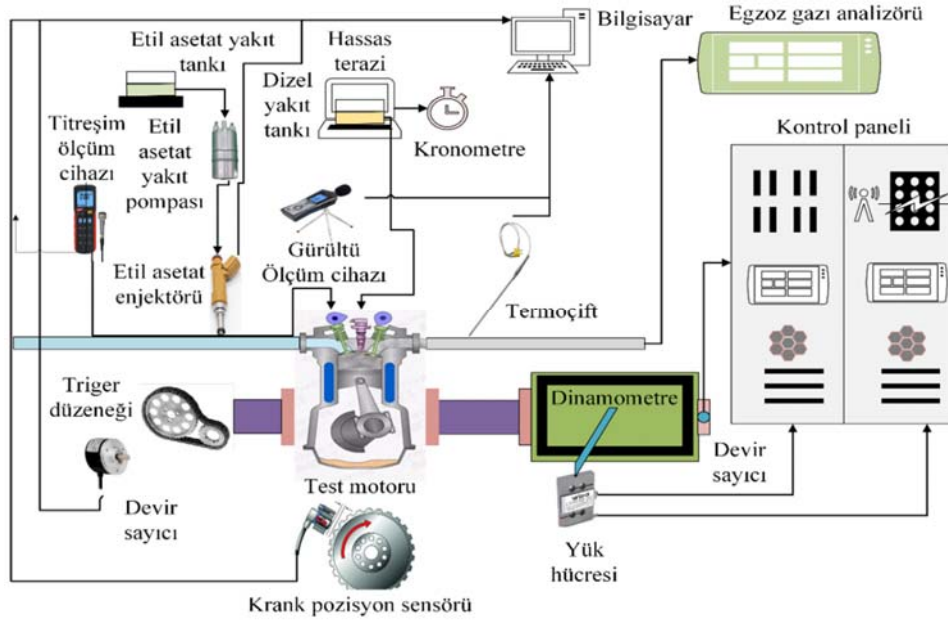
performans özelliklerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu çalışmalar, etil asetatın içten yanmalı motorlarda kullanımı hakkında değerli bilgiler sağlasa da, çift yakıtlı dizel motorlarda ikincil yakıt olarak uygulanmasına ilişkin araştırmalar hala yetersizdir. Çift yakıtlı motorların benzersiz yanma özellikleri, özellikle dizel ve etil asetat arasındaki etkileşim, motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkileri tam olarak anlamak için daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Bu çalışmada, bir dizel motorda etil asetatın ikincil yakıt olarak kullanılmasının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışma, özellikle farklı etil asetat enjeksiyon sürelerinin fren termal verimliliği (BTE), fren özgül yakıt tüketimi (BSFC), egzoz gazı sıcaklıkları ve NOx, CO, HC ve PM emisyonları gibi parametreleri nasıl etkilediğini inceleyecektir. Çift yakıtlı dizel motorlarda etil asetat kullanımına ilişkin potansiyel faydalar ve zorluklar hakkında kapsamlı bir sonuç elde edilmiştir. Bu araştırmanın bulguları, alternatif yakıtlar ve bunların içten yanmalı motorlardaki uygulamaları hakkında büyüyen bilgi birikimine katkıda bulunulmuştur. Ayrıca, elde edilen sonuçlar daha temiz ve daha verimli dizel motorların geliştirilmesinde pratik sonuçlar doğurabilir ve ulaştırma ve endüstriyel sektörlerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

2. Materyal ve metod (Material and method)

Deneyler Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi-Arifye Meslek Yüksekokulu-Motor Testi ve Simülasyon Laboratuvarında yapılmıştır. Deney düzeneğinin şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneylerde ANTOR 3LD510 marka, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu dizel motor kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Deneylerde motorun frenlenmesi için KEMSAN marka, elektrikli, 15 kW kapasiteli DC dinamometre kullanılmıştır. Test motoru dinamometreye krank mili çıkışından kaplin ile bağlanmıştır. Dinamometre koluna "S" tipi bir yük hücresi bağlanarak motor yükü ölçülmüştür. Dizel yakıt tüketimi, 0,1 gram hassasiyetli bir hassas terazi ve kronometre ile 60 saniyedeki gram cinsinden yakıt tüketim miktarı her test noktası için en az iki kez tekrarlanarak ölçülmüştür. Egzoz gaz sıcaklığı "K" tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Egzoz emisyonları BİLSA MOD 2210 WINXP-K marka cihaz ile ölçülmüştür. Emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Deneylerde etil asetatın çift yakıt olarak kullanılabilmesi için, motorun standart enjeksiyon sistemine ek olarak Şekil 1'de görüldüğü gibi emme manifolduna bir enjeksiyon sistemi adapte edilmiştir. Motora adapte edilen enjeksiyon sistemi elektronik kontrollü olarak kontrol edilebilmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the test engine)

Teknik Özellik	Değer (birim)
Marka ve model	ANTOR 3LD510
Yakıt	Dizel
Silindir sayısı	1
Soğutma tipi	Hava soğutmalı
Silindir çapı x strok boyu	85x90(mm x mm)
Toplam silindir hacmi	510 (cm ³)
Maksimum güç (N (DIN 70020))	12,0 HP (9,0 kW) @ 3000 d/d
Maksimum tork	32,8 Nm @1800 d/d
Sıkıştırma oranı	17,5:1
Maksimum hız	3000 d/d
Yağ kapasitesi yağ filtresi takılıken	1,75 (litre)

Tablo 2. Emisyon cihazının teknik özellikleri
(Technical specifications of the emission device)

Parametreler	Ölçüm sınırı	Hassasiyet
CO	0-%10	0,01%
CO ₂	0-%20	0,01%
HC	0-10000	1 PPM
O ₂	0-%25	0,01%
NO _x	0-5000	1 PPM
Lambda	0-5, 2000	0,001

Enjeksiyon avansı ve enjeksiyon sistemi kullanıcı tarafından kontrol edilebilmektedir. Motora eklenen etil asetat enjeksiyon sistemi; depo, yakıt pompası, enjektör, kam mili konum sensörü, krank mili devir sensörü ve elektronik kontrol ünitesi parçalarından oluşmaktadır.

Deneyle, test motorunun maksimum tork verdiği motor hızı olan 1800 d/d'de, %0, %25, %50, %75 ve %100 tork değerlerinde, D100, 1ms EA, 2ms EA ve 3ms EA yakıtları ile yapılmıştır. Motor torku, dinamometre koluna bağlanan bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Buradan motor gücü hesaplanmıştır. Motor hızı, dinamometre çıkış miline bağlı bir devir sayıcı kullanılarak ölçülmüştür. Motor yükü, dinamometre kontrol paneli üzerinden ayarlanmıştır. Yakıt tüketimi ölçümleri için iki farklı teknik kullanılmıştır. Ana yakıt olarak kullanılan dizel yakıt tüketimi ölçümü, hassas terazi ve kronometre kullanılarak ölçülmüştür. 1 dakikada tüketilen dizel yakıt miktarı gram cinsinden not edilmiştir. Her ölçüm en az iki kez tekrarlanmıştır. İkincil yakıt olarak kullanılan etil asetatın yakıt tüketimi ölçümü, enjektörün püskürtme karakteristiği belirlenerek ölçülmüştür. Enjektör karakteristiği belirlenirken, 2 dakika boyunca enjektörün tam açık kalması halinde kaç gram etil asetat püskürttüğü ölçülmüştür. Bu ölçüm 10 kez tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak g/ms cinsinden püskürtme karakteristiği belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre motor 1800 d/d hızda çalışırken dakikada; 1ms enjektör açıklığında 3,11g, 2ms enjektör açıklığında 6,22 g, 3ms enjektör açıklığında ise 9,33 g etil asetat püskürtüldüğü belirlenmiştir. Egzoz gazı sıcaklığı, egzoz manifolduna takılan k tipi termokupl ile ölçülmüştür. Egzoz emisyonları, BİLSA MOD 2210 WINXP-K marka egzoz emisyon ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylede kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Test yakıtı özellikleri (Test fuel properties)

Özellik	Dizel	Etil asetat
Doğrusal yapı formülü	C ₁₄ H ₃₀ (temsili)	CH ₃ COOC ₂ H ₅
Moleküler formül	C ₁₂ H ₂₄ - C ₁₆ H ₃₄	C ₄ H ₈ O ₂
H/C oranı	1,8-2,1	2,00
O/C oranı	-(oksijen içermez)	0,50
Moleküler kütle (kg/kmol)	170-200 (temsili)	88,10
Gravimetrik oksijen içeriği (%)	-	36,36
Yoğunluk @ 20 °C (kg/m ³)	820-845	897
Suda çözünürlük	Çözülemez	High
Kaynama noktası (°C)	150-370	77,22
Parlama noktası (°C)	52-96	-2,78
Araştırma oktan sayısı (RON)	-	116,00
Setan sayısı	40-55	-
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	14,5/1	7,80
LHV (MJ/kg)	42,5-43	23,79
LHV (MJ/L)	35,6-36,3	21,34

Herhangi bir deneysel çalışmada, sonuçların güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak için ölçülen değerlerle ilişkili belirsizlikleri ölçmek çok önemlidir. Bu bölüm, deneyler sırasında ölçülen çeşitli parametreler için yürütülen belirsizlik analizini ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Aşağıdaki Tablo 4'de kullanılan ölçüm cihazlarını ve belirtilen doğruluklarını özetlemektedir.

Tablo 4. Ölçüm Cihazları ve Doğruluk
(Measuring Instruments and Accuracy)

Parametre	Ölçüm cihazı	Doğruluk
Tork	Yük hücresi	±0,1 Nm
Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)	Kronometre	±0,5% okuma başına
Toplan enerji tüketimi (E _{total})	Kronometre ve yük hücresi	Birleşik belirsizlik analizi
Egzoz sıcaklığı	Termo kupl	±1°C
CO, HC, CO ₂ , O ₂ , NO _x	Egzoz gaz analizörü	CO ₂ ve O ₂ için ±0,1%, NO _x için ±1 ppm
Lambda	Egzoz gaz analizörü	±1% okuma başına
İs	İs ölçüm cihazı	±2% okuma başına

Her parametre için belirsizlikler, ölçüm cihazlarının doğruluğu ve belirsizliklerin hesaplamalar boyunca yayılmasına dayanarak hesaplanmıştır. Belirsizlikleri birleştirmenin standart yöntemi kullanılmıştır; bu, bireysel belirsizliklerin karelerinin toplamının karekökünü alma yöntemidir. Tork ölçümü; ±0,1 Nm doğrulukta tork dönüştürücüsü kullanılarak tork ölçümü için belirsizlik (U_{tork}) Eş. 1 ile ifade edilebilir.

$$U_{tork} = \pm 0,1 Nm \quad (1)$$

Özgül yakıt tüketimindeki belirsizlik, yakıt akış hızı ve tork ölçümlerindeki belirsizlikleri içermektedir. Yakıt akış hızındaki belirsizlik okumanın ±%0,5'i ve tork belirsizliği ±0,1 Nm ise, birleşik belirsizlik (U_{ÖYT}) Eş. 2 ile hesaplanır.

$$U_{ÖYT} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{m}_f}{\dot{m}_f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \quad (2)$$

Burada; $\Delta \dot{m}_f$ yakıt akış hızındaki, ΔT torktaki belirsizliktir.

Egzoz gaz emisyonlarındaki belirsizliğe örnek olarak, ±0,1% doğrulukta bir egzoz gazı analizörü kullanılarak yapılan CO ölçümleri için belirsizlik (U_{CO}) şudur (Eş. 3).

$$U_{CO} = \pm 0,1\% \quad (3)$$

Birden fazla ölçümden türetilen parametreler için birleşik belirsizlik, belirsizliklerin yayılması Eş. 4 formülü kullanılarak hesaplanır.

$$U_{birleşik} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 U_{x_1} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 U_{x_2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 U_{x_n}} \quad (4)$$

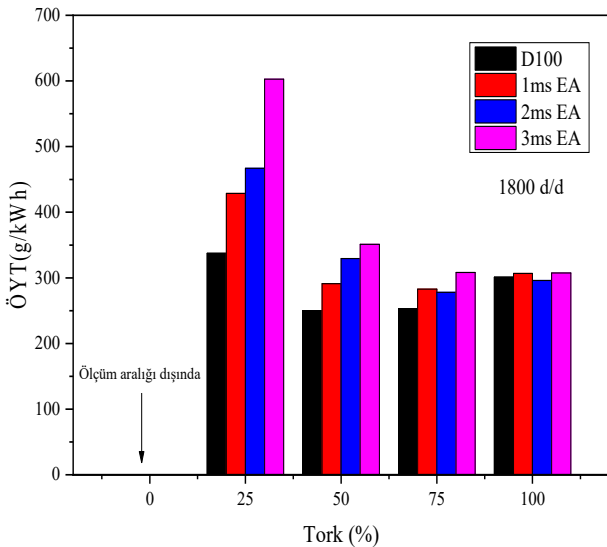
Burada, f türetilen parametredir, x₁, x₂ ... x_n ölçülen parametrelerdir, U_{x1}, U_{x2}, ..., U_{xn} ölçülen parametrelerdeki belirsizliklerdir.

Belirsizlik analizi, etil asetatın ikincil yakıt olarak kullanılması nedeniyle motor performansında ve emisyonlarda gözlenen değişimlerin önemli olduğunu ve deneysel hata aralığının ötesinde olduğunu doğrulamaktadır. Bu çalışma, kapsamlı bir belirsizlik

analizi sağlayarak bulguların güvenilirliğini ve doğruluğunu garanti altına alarak, etil asetatın çift yakıtlı dizel motorlarda kullanılmasının gelişmiş performans ve azaltılmış emisyonlar açısından potansiyel faydalarını güçlendirmektedir.

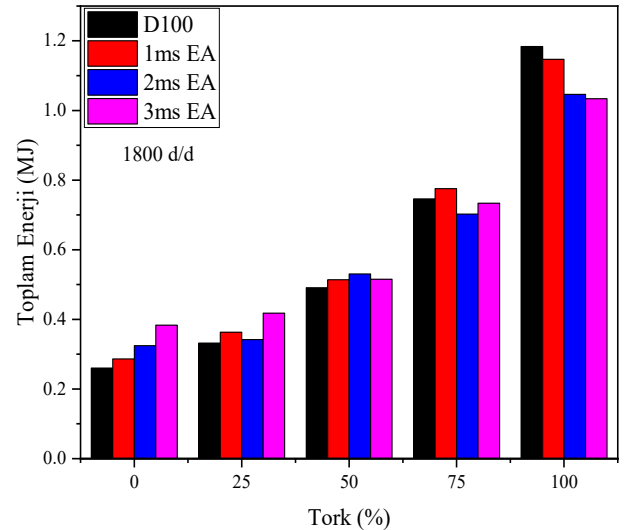
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Şekil 2’de motor torkuna göre özgül yakıt tüketimi değişimleri gösterilmiştir. %0 yükte hiçbir iş yapılmadığı için ÖYT hesaplamaları dışında kalmaktadır. Düşük yükte (%25) etil asetatın eklenmesiyle artan ÖYT, yakıt verimliliğinde bir düşüş olduğunu gösterir. Bunun nedeni, motorun etil asetat-dizel karışımının yanması için optimum koşullarda çalışmaması olabilir ve bu da eksik yanmaya ve aynı güç çıkışını korumak için daha yüksek yakıt tüketimine yol açmaktadır. %50 yükte, %25 yükte gözlenen eğilime benzer şekilde, ÖYT etil asetat enjeksiyonuyla artıyor ve bu da motorun üretilen güç birimi başına daha fazla yakıt tükettiğini göstermektedir. ÖYT’deki artış, etil asetat yanma sürecine katkıda bulunurken, genel verimliliğin, özellikle daha yüksek enjeksiyon sürelerinde azaldığını göstermektedir. %75 yükte, eğilim 2 ms enjeksiyonla ÖYT üzerindeki olumsuz etkide mütevazı bir azalma göstermektedir ve bu da 1 ms ve 3 ms’ye kıyasla biraz daha verimli bir yanma süreci olduğunu göstermektedir. Ancak, ÖYT’deki genel artış, etil asetat enjeksiyonunun tek başına dizel ile karşılaştırıldığında hala daha yüksek yakıt tüketimine yol açtığını göstermektedir. Tam yükte, ÖYT eğilimleri, 2 ms etil asetat enjeksiyonunun, tek başına dizel ile karşılaştırıldığında yakıt verimliliğini biraz artırdığını ortaya koymaktadır. Bu, tam yük koşulları altında, etil asetat-dizel karışımının, potansiyel olarak iyileştirilmiş atomizasyon ve yanma dinamikleri nedeniyle, bu belirli enjeksiyon zamanlamasında daha verimli yandığını göstermektedir [46]. 3 ms enjeksiyonla artan ÖYT, 2 ms’nin ötesinde etil asetat eklenmesinin verimliliği artırmadığını ve bunun yerine daha yüksek yakıt tüketimine yol açtığını göstermektedir. ÖYT verileri, etil asetatın ikincil yakıt olarak eklenmesinin genellikle çeşitli yüklerde, özellikle düşük yüklerde yakıt tüketiminde artışa yol açtığını göstermektedir. ÖYT’deki artış eksik yanma, optimum karışım oranı ve yüke bağlılık gibi birkaç faktöre bağlanabilir. Daha yüksek ÖYT değerleri, özellikle düşük yüklerde ve daha uzun enjeksiyon sürelerinde, etil asetatın tam olarak yanmadığını göstermektedir. Bu eksik yanma muhtemelen optimize edilmemiş hava-yakıt karışımından kaynaklanmaktadır ve gerekli güç çıkışına ulaşmak için daha yüksek yakıt tüketimine yol açmaktadır [47, 48].



Şekil 2. Motor torkuna göre özgül yakıt tüketimi değişimi (Specific fuel consumption variation according to engine torque)

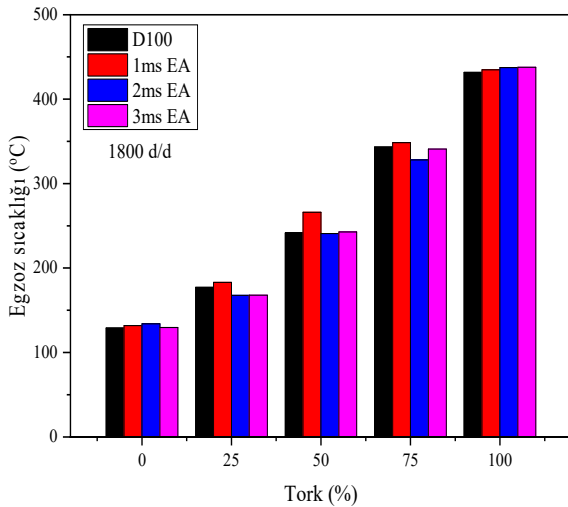
Şekil 3’te motor torkuna göre toplam enerji tüketimi değişimi gösterilmiştir. Toplam enerji tüketimi (Etotal), bir motorun çalışması sırasında genel enerji verimliliğini değerlendirmede önemli bir ölçüttür. Motorun belirli bir süre boyunca belirli bir miktarda güç üretmek için kullandığı toplam enerjiyi temsil eder ve megajul (MJ) cinsinden ölçülür. Daha düşük Etotal değerleri daha iyi enerji verimliliğini gösterir, yani istenen güç çıkışına ulaşmak için daha az yakıt tüketilir. Yüksüz durumda, etil asetatın eklenmesinin toplam enerji tüketiminde artışa yol açtığı görülmektedir. Bu, motorun yüksüz durumunu korumak için gereken enerjinin standart dizel tarafından yeterince karşılandığı, muhtemelen ikincil bir yakıt olarak etil asetat enjeksiyonuyla arttığını göstermektedir. %25 yükte, etil asetatın eklenmesiyle toplam enerji tüketimi, özellikle 1 ms ve 3 ms enjeksiyon zamanlamalarında artar. 2 ms’deki hafif düşüş, enerji verimliliğinde marjinal bir iyileşme olduğunu gösteriyor ve bu enjeksiyon zamanlamasının bu yükte motorun operasyonel özelliklerine daha iyi uyabileceğini gösteriyor. Ancak genel eğilim, etil asetat enjeksiyonunun motor çalışması için gereken enerjiyi artırdığını gösteriyor. %50 yükte, etil asetatın eklenmesi toplam enerji tüketimini %100 dizel ile karşılaştırıldığında tutarlı bir şekilde artırdığını göstermektedir, ancak artış 3 ms enjeksiyonla daha az belirgindir. Bu, etil asetatın yanmaya katkıda bulunmasına rağmen, genellikle ikincil yakıtlı kararlı yanmayı sürdürmek için ek yakıt ihtiyacı duyulması nedeniyle daha yüksek enerji kullanımına yol açtığını göstermektedir. %75 yükte, veriler 2 ms enjeksiyonla toplam enerji tüketiminde bir azalma olduğunu ortaya koyar ve bu enjeksiyon zamanlamasının yanma sürecini optimize ederek daha iyi enerji verimliliğine yol açabileceğini gösterir. 3 ms enjeksiyonla artış, etil asetatın daha fazla eklenmesinin verimliliği iyileştirmeye devam etmediğini ve hatta azalan getirilerle sonuçlanabileceğini göstermektedir. Tam yükte, toplam enerji tüketimi etil asetat enjeksiyonuyla, özellikle 2 ms enjeksiyonla azalır; burada Etotal %100 dizel ile karşılaştırıldığında yaklaşık %11,6 oranında azalmıştır. Bu, daha yüksek yüklerde, etil asetatın optimum zamanlamada (2 ms) enjekte edildiğinde yanma sürecini artırabileceğini ve enerji verimliliğinin artmasına yol açabileceğini göstermektedir. 3 ms enjeksiyonla görülen hafif artış, enjeksiyon süresinin uzatılmasının verimlilik kazanımları sağlamaya devam etmeyebileceğini ve potansiyel olarak enerji tüketimini artırabileceğini göstermektedir [49, 50].



Şekil 3. Motor torkuna göre toplam enerji tüketimi değişimi (Total energy consumption change according to motor torque)

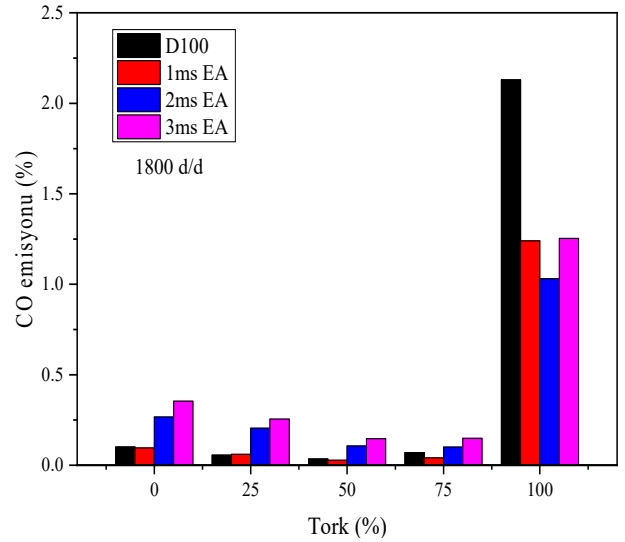
Şekil 4’te motor torkuna göre egzoz sıcaklığı değişimleri görülmektedir. Egzoz sıcaklığı, bir motorun termal verimliliğini ve yanma özelliklerini değerlendirmede önemli bir parametredir. Daha

yüksek egzoz sıcaklıkları genellikle daha eksiksiz yanmayı gösterir, ancak aşırı yüksek sıcaklıklar artan NOx oluşumuna ve potansiyel motor hasarına yol açabilir. Yüksüz durumda 1 ms ve 2 ms etil asetat enjeksiyonlarıyla egzoz sıcaklığındaki hafif artış, etil asetatın marjinal olarak daha yüksek bir yanma sıcaklığına katkıda bulunduğunu ve potansiyel olarak daha eksiksiz bir yanma veya daha hızlı bir yanma süreci olduğunu göstermektedir. 3 ms enjeksiyonda sıcaklık stabilizasyonu, ilave etil asetatın yüksüz durumda yanma sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmedikçe göstermektedir. %25 yükte 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla egzoz sıcaklığındaki artış, bu yükte yanma verimliliğinde hafif bir artış olduğunu göstermektedir. Ancak 2 ms ve 3 ms enjeksiyonlarla sıcaklıktaki düşüş, bu zamanlamalarda etil asetatın, muhtemelen eksik karıştırma veya gecikmiş yanma nedeniyle yanma sürecine tam olarak katkıda bulunamayabileceğini ve daha düşük sıcaklıklara yol açabileceğini göstermektedir. %50 yükte, egzoz sıcaklığı 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla önemli ölçüde artmıştır ve daha eksiksiz ve muhtemelen daha hızlı yanma olduğunu göstermektedir. 2 ms enjeksiyonla görülen hafif düşüş yanmada gecikme veya verimsizlik olduğunu gösterebilirken, 3 ms enjeksiyonla görülen stabilizasyon yanma sürecinin artan etil asetatla daha tutarlı hale geldiğini göstermektedir. %75 yükte egzoz sıcaklığı 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla hafifçe yükselmiş ve bu da gelişmiş yanmayı göstermektedir. 2 ms enjeksiyonla azalma, muhtemelen etil asetatın eksik yanması nedeniyle daha az verimli yanmayı göstermektedir. 3 ms enjeksiyonla sıcaklık artışı, etil asetat oranının artırılmasının bu yükte yanma kararlılığını iyileştirdiğini göstermektedir. Tam yükte, egzoz sıcaklığı etil asetatın eklenmesiyle, özellikle 2 ms ve 3 ms enjeksiyon zamanlamalarında istikrarlı bir şekilde artmıştır. Bu, etil asetatın yüksek yüklerde yanma sürecini, muhtemelen daha iyi atomizasyon ve karıştırma nedeniyle geliştirdiğini ve daha eksiksiz bir yanmaya yol açtığını göstermektedir. Tam yükte egzoz sıcaklığındaki istikrarlı artış, etil asetatın yanma sırasında açığa çıkan genel enerjiye önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Düşük yüklerde (0% ve %25) 1 ms ve 2 ms etil asetat enjeksiyonlarıyla egzoz sıcaklığındaki hafif artış, etil asetatın daha eksiksiz yanmayı teşvik ederek yanma verimliliğini artırdığını göstermektedir. Ancak, daha uzun enjeksiyon süreleri (2 ms ve 3 ms) ile %25 yükte sıcaklık düşüşü, yanma verimliliğinin karıştırma veya zamanlama sorunları nedeniyle optimum olmayabileceğini göstermektedir. Daha yüksek yüklerde (%50, %75 ve %100), etil asetatın eklenmesi egzoz sıcaklıklarını sürekli olarak artırmıştır. Bu eğilim, etil asetatın motorun daha yüksek basınçlarda ve sıcaklıklarda çalıştığı ve etil asetat-dizel karışımının tam yanmasına daha elverişli olduğu daha yüksek yüklerde yanmaya daha etkili bir şekilde katkıda bulunduğunu göstermektedir [51, 52].



Şekil 4. Motor torkuna göre egzoz sıcaklığı değişimi (Exhaust temperature change according to engine torque)

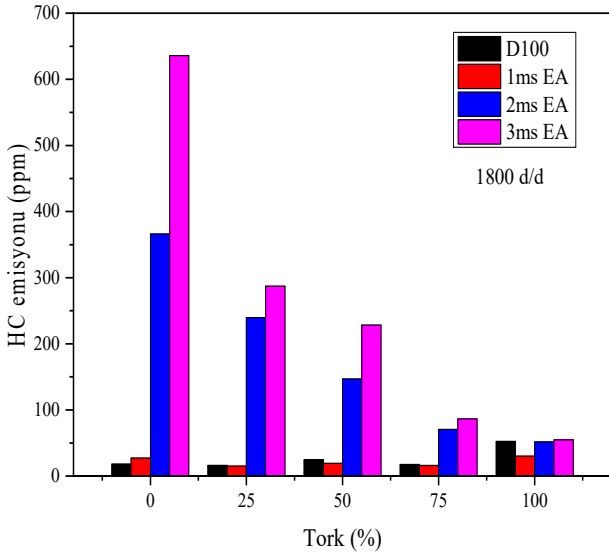
Şekil 5'te motor torkuna göre CO emisyonu değişimi görülmektedir. Karbon monoksit (CO) emisyonları, içten yanmalı motorlarda eksik yanmanın önemli bir göstergesidir. Daha yüksek CO seviyeleri, yakıtın tam olarak yanmadığını gösterir; bu, zayıf hava-yakıt karışımı, yetersiz oksijen veya düşük yanma sıcaklıkları gibi faktörlerden kaynaklanabilir. %0 yükte, etil asetatın eklenmesi başlangıçta 1 ms enjeksiyonla CO emisyonlarını hafifçe azaltır ve yanmada küçük bir iyileşme olduğunu gösterir. Ancak, enjeksiyon süresi 2 ms ve 3 ms'ye çıktıkça, CO emisyonları keskin bir şekilde artar ve bu da aşırı etil asetatın yetersiz karıştırma veya yetersiz oksijen mevcudiyeti nedeniyle eksik yanmaya katkıda bulunabileceğini gösterir. %25 yükte, CO emisyonları etil asetatın eklenmesiyle artar, özellikle 2 ms ve 3 ms enjeksiyon süreleriyle. Bu eğilim, daha düşük yüklerde yanma sürecinin etil asetat-dizel karışımı için tam olarak optimize edilmediğini ve daha yüksek seviyelerde eksik yanmaya ve dolayısıyla daha yüksek CO emisyonlarına yol açtığını gösterir. %50 yükte, 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla CO emisyonlarında hafif bir azalma gözlemlenir; bu, bu yükte etil asetatın yanma verimliliğini biraz artırdığını gösterir. Ancak, enjeksiyon süresi arttıkça CO emisyonları tekrar yükselir; bu da daha uzun enjeksiyon sürelerinin daha zengin karışımlara veya zayıf hava-yakıt karışımı nedeniyle eksik yanmaya yol açabileceğini yansıtır. %75 yükte, 1 ms enjeksiyonla CO emisyonlarındaki azalma, potansiyel olarak daha iyi hava-yakıt karışımı veya daha verimli yanma nedeniyle iyileştirilmiş yanmayı gösterir. Ancak, diğer yüklerde olduğu gibi, enjeksiyon süresini artırmak daha yüksek CO emisyonlarına neden olur ve etil asetat miktarı arttıkça daha az verimli yanmayı gösterir. Tam yükte, CO emisyonları etil asetatın eklenmesiyle, özellikle 2 ms enjeksiyonla önemli ölçüde azalır. Bu, etil asetatın daha yüksek yüklerde yanma verimliliğini artırdığını, muhtemelen daha iyi atomizasyon veya iyileştirilmiş hava-yakıt karışımından kaynaklanan daha eksiksiz yanma nedeniyle olduğunu gösterir. Ancak, 3 ms enjeksiyonda CO emisyonlarında görülen hafif artış, çok fazla etil asetat verildiğinde yanma verimliliğinde azalan getiriler veya hatta hafif bir tersine dönme olabileceğini göstermektedir [53].



Şekil 5. Motor torkuna göre CO emisyonu değişimi (CO emission change according to engine torque)

Şekil 6'da motor torkuna göre HC emisyonu değişimleri görülmektedir. Hidrokarbon (HC) emisyonları, öncelikle bir motordaki eksik yanmanın sonucudur. Yüksek HC emisyon seviyeleri, motordan önemli miktarda yanmamış yakıt çıktığını gösterir ve bu, zayıf hava-yakıt karışımına, düşük yanma sıcaklıklarına veya ateşleme hatalarına bağlanabilir [54-56].

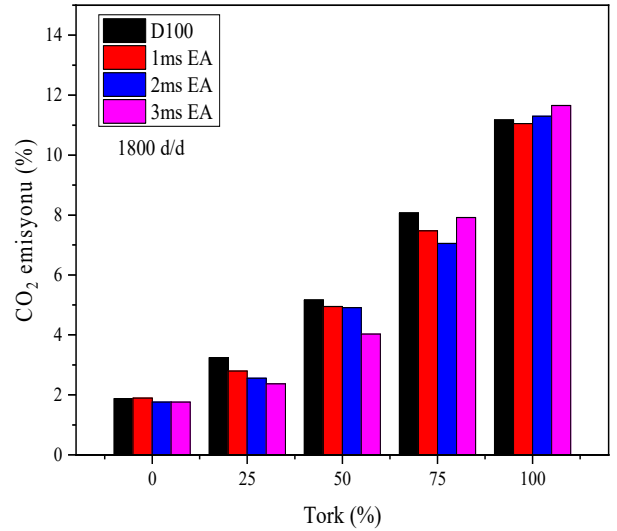
%0 yükte, en yüksek HC emisyonu, 3 ms enjeksiyonla 636 ppm'ye yükselir. Yüksüz durumda (%0 yük), etil asetat eklenmesi, özellikle daha uzun enjeksiyon süreleriyle HC emisyonlarında önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu, yüksüz durumda, yanma sürecinin, muhtemelen zayıf atomizasyon veya yakıtın tam oksidasyonunu engelleyen yetersiz yanma sıcaklıkları nedeniyle etil asetatın eklenmesiyle önemli ölçüde bozulduğunu göstermektedir. %25 yükte, 1 ms enjeksiyonla HC emisyonlarında hafif bir azalma, etil asetatla yanma verimliliğinde küçük bir iyileşme olduğunu göstermektedir. Ancak, enjeksiyon süresi arttıkça HC emisyonları önemli ölçüde artar ve motorun bu yük seviyesinde tam olarak yakamadığı ek yakıt nedeniyle eksik yanma olduğunu gösterir. %50 yükte, 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla HC emisyonlarında azalma, etil asetatın bu yükte daha verimli yanmaya katkıda bulunabileceğini gösterir. Ancak, daha uzun enjeksiyon süreleri HC emisyonlarında önemli bir artışa neden olur ve bu da motorun artan yakıt miktarını tam olarak yakmakta zorlandığını gösterir. %75 yükte, 1 ms enjeksiyonla HC emisyonlarındaki hafif azalma, etil asetat nedeniyle yanma verimliliğinde bir artışa işaret eder. Ancak, enjeksiyon süresi arttıkça, HC emisyonları tekrar yükselir, ancak düşük yüklerde olduğu kadar büyük bir artış göstermez; bu da motorun ek yakıtı daha yüksek yüklerde daha iyi idare edebildiğini ancak yine de tam yanma ile mücadele ettiğini gösterir. Tam yükte, HC emisyonları 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla önemli bir azalma gösterir ve bu da yüksek yük koşullarında yanma verimliliğinin arttığını gösterir. 2 ms enjeksiyonla HC emisyonları %100 dizel ile karşılaştırıldığında hafifçe azalır ve bu da motorun nispeten verimli yanmayı sürdürdürebildiğini gösterir. Ancak, 3 ms enjeksiyonla HC emisyonları hafifçe artar ve bu da yanma verimliliğinin aşırı etil asetat enjeksiyonuyla düşmeye başladığını gösterir.



Şekil 6. Motor torkuna göre HC emisyonu değişimi (HC emission change according to engine torque)

Şekil 7'de motor torkuna göre CO₂ emisyonu değişimleri görülmektedir. Karbondioksit (CO₂) emisyonları, bir motorun yanma verimliliğinin doğrudan bir göstergesidir. Daha yüksek CO₂ seviyeleri genellikle yakıtın daha eksiksiz yandığını gösterirken, daha düşük CO₂ emisyonları eksik yanmayı veya verimsiz bir yanma sürecini işaret edebilir. %0 yükte, etil asetat enjeksiyonu CO₂ emisyonları üzerinde karışık bir etki gösterir. 1 ms enjeksiyonla CO₂'deki hafif artış, marjinal olarak daha iyi yanmayı gösterir, ancak 2 ms ve 3 ms enjeksiyonlarla sonraki düşüş, muhtemelen ek etil asetatın neden olduğu hava-yakıt karışımındaki bozulmadan dolayı daha az verimli

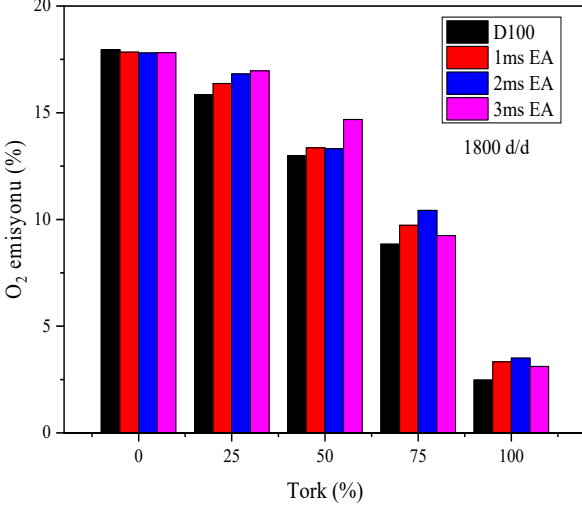
yanmayı gösterir. %25 yükte, artan etil asetat enjeksiyonuyla CO₂ emisyonlarındaki tutarlı düşüş, etil asetatın eklenmesinin daha az eksiksiz yanmaya yol açabileceğini gösterir. CO₂'deki azalma, motorun tüm yakıtı verimli bir şekilde yakmadığını, daha düşük CO₂'ye ve potansiyel olarak diğer yanmamış hidrokarbonların daha yüksek emisyonlarına yol açtığını gösterebilir. %50 yükte, etil asetat enjeksiyon süresi arttıkça CO₂ emisyonlarının azalmasıyla eğilim devam eder. Bu tutarlı azalma, yakıt karışımının tamamen oksidasyonunu engelleyen yetersiz yanma koşulları nedeniyle daha fazla etil asetat enjekte edildiğinde yanma verimliliğinde bir düşüşe işaret eder. %75 yükte CO₂ emisyonları başlangıçta 1 ms ve 2 ms enjeksiyonlarla azalır ve bu da yanma verimliliğinde bir miktar kayba işaret eder. Ancak 3 ms enjeksiyonla CO₂ emisyonları artar ve bu da motorun bu daha yüksek yükte ek etil asetatı daha iyi idare edebileceğini ve daha düşük enjeksiyon sürelerine kıyasla daha eksiksiz bir yanmaya yol açabileceğini gösterir. Tam yükte, CO₂ emisyonları 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla hafif bir düşüş gösterir, bu da yanma verimliliğinde marjinal bir düşüşe işaret edebilir. Ancak, daha uzun enjeksiyon sürelerinde (2 ms ve 3 ms) CO₂ emisyonları artar, özellikle 3 ms'de, bu da yakıt miktarı arttıkça motorun daha eksiksiz bir yanma elde ettiğini gösterir [57, 58].



Şekil 7. Motor torkuna göre CO₂ emisyonu değişimi (CO₂ emission change according to engine torque)

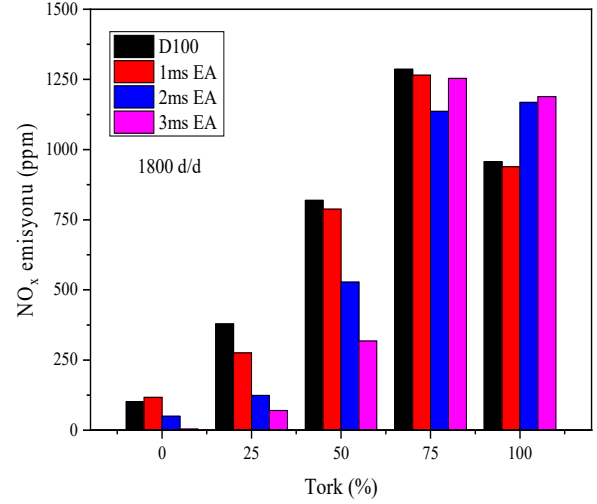
Şekil 8'de motor torkuna göre egzoz gazındaki O₂ değişimleri görülmektedir. Egzoz gazlarındaki oksijen (O₂) konsantrasyonu, bir motordaki yanma verimliliğini ve hava-yakıt karışımını değerlendirmede kritik bir parametredir. Düşük O₂ seviyeleri genellikle daha zengin yanmayı gösterirken, daha yüksek O₂ seviyeleri daha zayıf yanmayı veya eksik yakıt yanmasını gösterebilir. %0 yükte etil asetatın eklenmesi O₂ konsantrasyonunda yalnızca küçük değişikliklere neden olur ve bu da hava-yakıt karışımı üzerinde minimum etki olduğunu gösterir. O₂'deki hafif azalma, etil asetat ile biraz daha zengin bir yanma anlamına gelebilir, ancak bu değişim önemli değildir. %25 yükte, O₂ konsantrasyonu etil asetatın eklenmesiyle artar. Bu, yanmanın muhtemelen etil asetatın gelen ek oksijen veya yakıt karışımının daha az tamamlanmış yanması nedeniyle daha zayıf hale gelebileceğini düşündürmektedir. %50 yükte, daha uzun etil asetat enjeksiyon süreleriyle O₂ konsantrasyonundaki artış, yanma sürecinin daha zayıf hale gelebileceğini göstermektedir. 3 ms'deki daha büyük artış, hava-yakıt karışımında daha belirgin bir etki olduğunu ve muhtemelen eksik yanmaya yol açtığını göstermektedir. %75 yükte, O₂ konsantrasyonu başlangıçta 1 ms ve 2 ms enjeksiyonlarla artar ve bu da zayıf bir yanma sürecini göstermektedir. Ancak, 3 ms enjeksiyonla azalma,

muhtemelen motorun bu daha yüksek yükte ek yakıtı daha iyi kullanma yeteneği nedeniyle yanmanın tekrar daha zengin hale geldiği anlamına gelebilir. Tam yükte, O₂ konsantrasyonu etil asetatın eklenmesiyle artar ve daha zayıf bir karışım olduğunu göstermektedir, ancak daha sonra 3 ms enjeksiyonla hafifçe azaldığı görülmektedir. Bu değişimler, motorun artan yakıt miktarını daha etkili bir şekilde yakabileceği ve daha zengin bir yanmanın gerçekleşebileceği bir noktaya ulaştığını gösterebilir [59-61].



Şekil 8. Motor torkuna göre O₂ emisyonu değişimi (O₂ emission change according to engine torque)

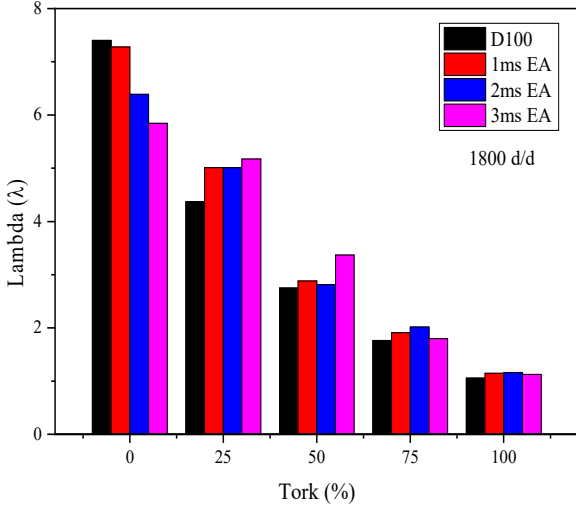
Şekil 9'da motor torkuna göre NO_x emisyonu değişimleri görülmektedir. Azot oksitler (NO_x), dizel motorlarda yanma işlemi sırasında üretilen önemli kirleticilerdir ve öncelikle yanma odasında bulunan yüksek sıcaklıklar ve aşırı oksijen nedeniyle oluşurlar. NO_x emisyonları, çevresel ve düzenleyici uyumluluğu doğrudan etkiledikleri için değerlendirilmesi gereken kritik bir parametredir. Yüksüz durumda (%0 yük), özellikle daha yüksek enjeksiyon sürelerinde etil asetatın eklenmesi, NO_x emisyonlarında önemli bir azalmaya yol açmaktadır. 2 ms ve 3 ms enjeksiyonlarla azalma, buharlaşan etil asetatın soğutma etkisi nedeniyle yanma sıcaklığının düşmüş olabileceğini ve daha düşük NO_x oluşumuna yol açabileceğini düşündürmektedir. %25 yükte, NO_x emisyonları etil asetat enjeksiyon süresinin artmasıyla sürekli olarak azalmaktadır. NO_x'teki azalma, olası soğutma etkisine ve NO_x oluşum hızını yavaşlatan etil asetatın varlığı nedeniyle azalan maksimum yanma sıcaklıklarına bağlanabilir. %50 yükte, NO_x emisyonları artan etil asetat enjeksiyon süresiyle kademeli olarak azalmaktadır. 2 ms ve 3 ms'de NO_x'teki belirgin azalma, etil asetatın yanma sıcaklığını düşürme etkisinin bu yükte daha belirgin olduğunu ve daha düşük NO_x oluşumuna yol açtığını göstermektedir. %75 yükte, etil asetatın NO_x emisyonları üzerindeki etkisi düşük yüklerden daha az belirgindir. 1 ms ve 3 ms enjeksiyonlarla NO_x'teki hafif azalma, soğutma etkisi mevcut olsa da motorun daha yüksek sıcaklıklarda çalıştığı daha yüksek yüklerde daha az etkili olduğunu göstermektedir. 2 ms enjeksiyonla düşüş, yakıt ve etil asetat arasındaki dengenin daha etkili NO_x azaltımına yol açtığı potansiyel bir noktayı göstermektedir. Tam yükte, etil asetatın eklenmesi başlangıçta 1 ms enjeksiyonla NO_x emisyonlarında hafif bir düşüşe neden olmaktadır. Ancak, 2 ms ve 3 ms enjeksiyonlarla NO_x emisyonları önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu sonuç, etil asetatın daha yüksek oksijen içeriğinin artan yanma sıcaklıklarına ve dolayısıyla daha fazla NO_x oluşumuna yol açması ve düşük yüklerde gözlemlenen soğutma etkisini bastırması nedeniyle olabilir [62, 63].



Şekil 9. Motor torkuna göre NO_x emisyonu değişimi (NO_x emission change according to engine torque)

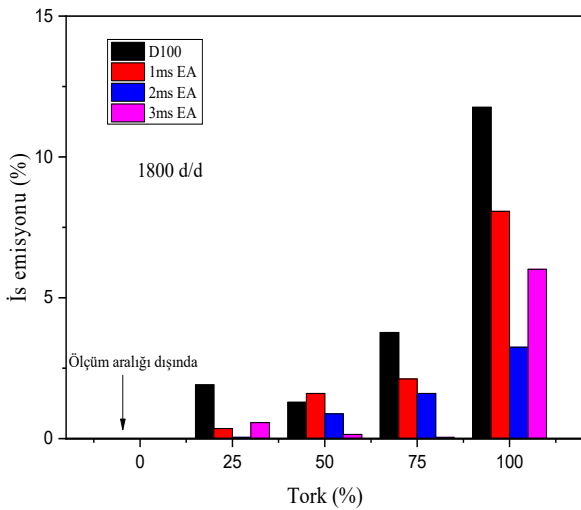
Şekil 10'da motor torkuna göre lambda değişimleri görülmektedir. Lambda, yanma odasındaki hava-yakıt oranının bir ölçüsüdür ve 1 değeri stokiometrik karışımı (tam yanma için ideal hava-yakıt oranı) gösterir. 1'den büyük değerler zayıf karışımları (aşırı hava) temsil ederken, 1'den küçük değerler zengin karışımları (aşırı yakıt) göstermektedir. Farklı yükler ve yakıt enjeksiyon stratejilerindeki lambda değişimlerini anlamak, motor performansını ve emisyonlarını optimize etmek için çok önemlidir. %0 yükte, etil asetatın eklenmesi lambda değerlerinde kademeli bir azalmaya neden olur ve bu da hava-yakıt karışımının etil asetat enjeksiyonunun artmasıyla daha zengin hale geldiğini göstermektedir. Bu, etil asetatın karışıma daha fazla yakıt eklemesi ve havanın göreceli miktarını azaltması nedeniyle beklenen bir durumdur. %25 yükte etil asetat enjeksiyonu özellikle 1 ms ve 3 ms enjeksiyon sürelerinde başlangıçta daha zayıf bir karışıma (daha yüksek lambda) neden olmaktadır. Bunun nedeni, yanma sürecini yavaşlatabilen ve tam yanma için biraz daha fazla hava gerektiren etil asetatın soğutma etkisi olabilir. %50 yükte, özellikle 3 ms enjeksiyonla, etil asetat enjekte edildiğinde daha zayıf bir karışımla eğilim devam etmektedir. Bu, etil asetat enjeksiyon süresi arttıkça, hava-yakıt karışımının giderek daha zayıf hale geldiğini, muhtemelen eklenen yakıtın seyreltme etkisinden dolayı, tam yanma için daha fazla havaya ihtiyaç duyabileceğini göstermektedir. %75 yükte, etil asetatın eklenmesi genellikle daha zayıf bir karışıma yol açar ve lambda değerleri 1 ms ve 2 ms enjeksiyonlar için artar. Ancak, 3 ms enjeksiyonla, daha zengin bir karışıma doğru bir kayma olduğunu gösteren hafif bir azalma vardır. Bu, daha uzun enjeksiyon süresinden kaynaklanan artan yakıt miktarının yanma için mevcut havayı yenmesinden kaynaklanıyor olabilir. Tam yükte, etil asetatın lambda üzerindeki etkisi daha azdır. Hava-yakıt karışımı, 1 ms ve 2 ms enjeksiyonlarla hafifçe daha zayıf hale gelir ve bu da yanma sürecinin etil asetat eklenmesiyle daha eksiksiz olabileceğini düşündürür. Ancak, 3 ms enjeksiyonla, %75 yükte gözlemlenen eğilime benzer şekilde, daha zengin bir karışıma doğru küçük bir kayma olur. Lambda verileri, etil asetatın ikincil yakıt olarak bir dizel motordaki hava-yakıt karışımını nasıl etkilediğine dair değerli bilgiler sağlamaktadır. Düşük yüklerde (%0 ve %25), etil asetatın eklenmesi özellikle daha uzun enjeksiyon sürelerinde genellikle daha zayıf bir karışıma sebep olmuştur. Bu, yanmamış hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonlarının azaltılması için faydalı olabilir, çünkü daha zayıf bir karışım genellikle daha eksiksiz yanmayı teşvik etmektedir. Orta menzilli yüklerde (%50 ve %75), etil asetat enjeksiyonuyla gözlemlenen daha zayıf karışımlar, yanma sürecini iyileştirerek yakıt verimliliğini artırabilir. Ancak, %75 yükte daha uzun enjeksiyon sürelerine sahip daha zengin karışımlara doğru hafif bir kayma,

mevcut havayı boğmaya başlamadan önce ne kadar etil asetat enjekte edilebileceği konusunda bir sınır olabileceğini ve potansiyel olarak eksik yanmaya ve daha yüksek emisyonlara yol açabileceğini göstermektedir. Yüksek yüklerde (%100), lambda değerleri motorun %100 dizel ile stokiyometrik noktaya yakın çalıştığını gösterir. 1 ms ve 2 ms etil asetat enjeksiyonlarında lambda'daki hafif artış, yanmanın ikincil yakıtın eklenmesiyle daha verimli hale gelebileceğini göstermektedir. Ancak, 3 ms enjeksiyonla lambda'daki küçük düşüş, karışımın daha zengin hale gelmeye başladığını gösterir ve bu da düzgün bir şekilde kontrol edilmezse hem emisyonları hem de yakıt tüketimini olumsuz etkileyebilir [64-66].



Şekil 10. Motor torkuna göre lambda değişimi (Lambda variation according to engine torque)

Şekil 11'de motor torkuna göre is emisyonu değişimi görülmektedir. Duman opaklığı, yanma sırasında üretilen partikül maddenin önemli bir göstergesidir ve motor emisyonları ve hava kalitesi için önemli etkileri vardır. Duman opaklığı verileri, %100 dizel yakıtla karşılaştırıldığında farklı etil asetat enjeksiyon süreleriyle (1 ms, 2 ms ve 3 ms) çeşitli yüklerde (0%, %25, %50, %75 ve %100) ölçülmüştür. %0 Yükte duman opaklığı, %100 dizel ve tüm etil asetat enjeksiyon zamanlamalarını içeren tüm yakıt yapılandırılmalarında %0 olarak ölçülmüştür. Bu, yüksüz durumda kullanılan yakıttan bağımsız olarak önemli bir partikül emisyonu olmadığını göstermektedir.



Şekil 11. Motor torkuna göre is emisyonu değişimi (Soot emission change according to engine torque)

Etil asetat enjeksiyonuyla %25 yükte duman opaklığındaki keskin azalma, özellikle en düşük duman seviyelerinin kaydedildiği 2ms enjeksiyonla, yanma verimliliğinin iyileştiğini göstermektedir. %50 yükte, etil asetatın eklenmesi başlangıçta 1 ms enjeksiyonla duman opaklığını artırır ancak özellikle 3 ms'de daha yüksek enjeksiyon zamanlamalarında önemli ölçüde azaltır ve artan etil asetat içeriğiyle daha eksiksiz bir yanma sürecini göstermektedir. %75 yükte etil asetat enjeksiyonunun artmasıyla duman opaklığındaki önemli azalma, daha yüksek etil asetat içeriğinin yanma sırasında partikül madde oluşumunu etkili bir şekilde azalttığını göstermektedir; bu muhtemelen gelişmiş yakıt atomizasyonu ve daha verimli yanma nedeniyeldir. Tam yükte bile etil asetat eklenmesi duman opaklığını sürekli olarak azaltır ve 2 ms enjeksiyon en önemli azalmayı sağlar. 3 ms enjeksiyon, 2 ms'den biraz daha yüksek opaklıkla sonuçlanır ve bu da bu aşamada karışımın olası aşırı zenginleştirilmesini göstermektedir [67, 68].

4. Simgeler (Symbols)

$C_4H_8O_2$: Etil asetat
$C_{12}H_{24} - C_{16}H_{34}$: Dizel
E_{total}	: Toplam Enerji Tüketimi
MgO	: Magnezyum oksit
U_{CO}	: Karbon monoksit Ölçümleri İçin Belirsizlik
$U_{Birleşik}$: Birleşik Belirsizlik
$U_{ÖYT}$: Özgül yakıt tüketimindeki Birleşik Belirsizlik
ZrO_2	: Zirkonyum Dioksit
Δm_f	: Yakıt Akış Hızındaki Belirsizlik
ΔT	: Torktaki Belirsizlik

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

BSFC	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi
BTE	: Fren Termal Verimliliği
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
DPF	: Dizel Partikül Filtre
HC	: Hidrokarbon
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
NOx	: Nitrojen oksit
O ₂	: Oksijen
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
PM	: Partikül Madde
SCR	: Seçici Katalitik İndirgeme
D100	: Standart Dizel Yakıtı
EA	: Etil asetat

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, çift yakıtlı bir dizel motorda ikincil yakıt olarak etil asetat kullanımının etkisi, motor performansına ve egzoz emisyonlarına odaklanarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, etil asetatın değişen enjeksiyon sürelerinde (1 ms, 2 ms ve 3 ms) kullanılmasının, özellikle tam yük koşulları altında, hem yanma verimliliğinde hem de emisyon azaltımında önemli iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla HC emisyonlarında %42,86'lık önemli bir azalma gözlemlenmiştir ve bu sonuç, egzozdaki yanmamış hidrokarbonları azaltma potansiyelini göstermektedir. 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla NOx emisyonlarında %1,88'lik hafif bir azalma, çift yakıt yaklaşımının dizel motorlar için en zorlu emisyonlardan birini hafifletmeye yardımcı olabileceğini göstermektedir. 1 ms etil asetat enjeksiyonuyla is emisyonlarında %72,45'lik önemli bir azalma, sıkı çevre düzenlemelerini karşılamak için çok önemli olan daha temiz bir yanma sürecini göstermektedir. Tüm yük koşullarında etil asetat enjeksiyonunun is emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. En belirgin azalma tam yükte,

1 ms etil asetat enjeksiyonuyla yaklaşık %31,37 oranında, 2 ms etil asetat enjeksiyonuyla %72,45 oranında ve 3 ms etil asetat enjeksiyonuyla %48,89 oranındaki azalmalarla olmuştur. Bu sonuçlar, etil asetatın özellikle daha yüksek enjeksiyon oranlarında ve yüksek yük koşullarında is emisyonlarını azaltmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. 2 ms etil asetat enjeksiyonuyla ÖYT'de %1,28'lik bir azalma, daha düşük işletme maliyetlerine ve azaltılmış yakıt tüketimine yol açabilen gelişmiş yakıt verimliliğini yansıtmaktadır. 3 ms etil asetat enjeksiyonuyla toplam enerji tüketiminde %12,67'lik bir azalma, motor içinde gelişmiş enerji kullanımını göstermektedir.

Çalışma, etil asetatın çift yakıtlı bir dizel motorda ikincil yakıt olarak kullanıldığında yanma verimliliğini önemli ölçüde iyileştirme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmıştır. Bu faydalar özellikle tam yük koşullarında belirgindir ve etil asetatı dizel motor performansını artırmak için umut verici bir aday haline getirmektedir.

Enjeksiyon stratejilerini optimize etmek, etil asetat kullanımının uzun vadeli etkilerini değerlendirmek ve bu yaklaşımın ticari dizel motorlarda ölçeklenebilirliğini keşfetmek için daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir. Bu araştırma, daha temiz ve daha verimli dizel motor çalışmaları elde etmede yenilikçi yakıt stratejilerinin önemini vurgulamaktadır.

Kaynaklar (References)

- Bharadwaj A., Evolution of the Global Automobile Industry, *Prog Mater Sci*, 1, 1–9, 2018.
- Yue Z., Liu H., Advanced Research on Internal Combustion Engines and Engine Fuels, *Energies*, 16, 5940, 2023.
- Pierce D., Haynes A., Hughes J., Graves R., Maziasz P., Muralidharan G., et al., High temperature materials for heavy duty diesel engines: Historical and future trends, *Prog Mater Sci*, 103, 109–179, 2019.
- Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E., Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Front Public Health*, 8, 505570, 2020.
- Peel J.L., Haeuber R., Garcia V., Russell A.G., Neas L., Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health, *Biogeochemistry*, 114, 121–134, 2013.
- Lloyd A.C., Cackette T.A., Diesel Engines: Environmental Impact and Control, *J Air Waste Manag Assoc*, 51, 809–847, 2001.
- Wagemakers A.M.L.M., Leermakers C.A.J., Review on the Effects of Dual-Fuel Operation, Using Diesel and Gaseous Fuels, on Emissions and Performance, *SAE Tech Pap*, 2012.
- Monsalve-Serrano J., Belgiojorno G., Di Blasio G., Guzmán-Mendoza M., 1D Simulation and Experimental Analysis on the Effects of the Injection Parameters in Methane–Diesel Dual-Fuel Combustion, *Energies*, 13, 3734, 2020.
- Padala S., Woo C., Kook S., Hawkes E.R., Ethanol utilisation in a diesel engine using dual-fuelling technology, *Fuel*, 109, 597–607, 2013.
- Hegab A., La Rocca A., Shayler P., Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas, *Renew Sustain Energy Rev*, 70, 666–697, 2017.
- Jatoth R., Gugulothu S.K., Ravi kiran Sastry G., Experimental study of using biodiesel and low cetane alcohol as the pilot fuel on the performance and emission trade-off study in the diesel/compressed natural gas dual fuel combustion mode, *Energy*, 225, 120218, 2021.
- Wei L., Geng P., A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance, *Fuel Process Technol*, 142, 264–278, 2016.
- Guido C., Alfè M., Gargiulo V., Napolitano P., Beatrice C., Del Giacomo N., Chemical/Physical Features of Particles Emitted from a Modern Automotive Dual-Fuel Methane–Diesel Engine, *Energy Fuels*, 32, 10154–10162, 2018.
- Dimitriou P., Tsujimura T., Kojima H., Aoyagi K., Kurimoto N., Nishijima Y., Experimental and Simulation Analysis of Natural Gas–Diesel Combustion in Dual-Fuel Engines, *Front Mech Eng*, 6, 543808, 2020.
- Cameretti M.C., De Robbio R., Mancaruso E., Palomba M., CFD Study of Dual Fuel Combustion in a Research Diesel Engine Fueled by Hydrogen, *Energies*, 15, 5521, 2022.
- Alimoradian B., Mockford I.J., A dual fuel system for converting automotive diesel engines for fuelling with natural gas, *SAE Australasia*, 48, 1988.
- Akbarian E., Najafi B., A novel fuel containing glycerol triacetate additive, biodiesel and diesel blends to improve dual-fuelled diesel engines performance and exhaust emissions, *Fuel*, 236, 666–676, 2019.
- Hashemi-Nejhad A., Najafi B., Ardabili S., Jafari G., Mosavi A., The Effect of Biodiesel, Ethanol, and Water on the Performance and Emissions of a Dual-Fuel Diesel Engine with Natural Gas: Sustainable Energy Production through a Life Cycle Assessment Approach, *Int J Energy Res*, 2023, 4630828.
- Khatir N., Khatir K.K., Hydrogen enrichment on diesel engine with biogas in dual fuel mode, *Int J Hydrogen Energy*, 45, 7128–7140, 2020.
- Kumar G., Kim S.H., Lay C.H., Ponnusamy V.K., Recent developments on alternative fuels, energy and environment for sustainability, *Bioresour Technol*, 317, 124010, 2020.
- Razak N.H., Hashim H., Yunus N.A., Klemeš J.J., Reducing diesel exhaust emissions by optimisation of alcohol oxygenates blend with diesel/biodiesel, *J Clean Prod*, 316, 128090, 2021.
- Chen H., Wang J., Shuai S., Chen W., Study of oxygenated biomass fuel blends on a diesel engine, *Fuel*, 87, 3462–3468, 2008.
- Elishav O., Mosevitzky Lis B., Miller E.M., Arent D.J., Valera-Medina A., Grinberg Dana A., et al., Progress and Prospective of Nitrogen-Based Alternative Fuels, *Chem Rev*, 120, 5352–5436, 2020.
- Nabi M.N., Rasul M.G., Arefin M.A., Akram M.W., Islam M.T., Chowdhury M.W., Investigation of major factors that cause diesel NOx formation and assessment of energy and exergy parameters using e-diesel blends, *Fuel*, 292, 120298, 2021.
- Herner J.D., Hu S., Robertson W.H., Huai T., Collins J.F., Dwyer H., et al., Effect of advanced aftertreatment for PM and NOx control on heavy-duty diesel truck emissions, *Environ Sci Technol*, 43, 5928–5933, 2009.
- Song X., Johnson J.H., Naber J.D., A review of the literature of selective catalytic reduction catalysts integrated into diesel particulate filters, *J Automob Eng*, 16, 738–749, 2014.
- Guan B., Zhan R., Lin H., Huang Z., Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines, *J Environ Manage*, 154, 225–258, 2015.
- Park S.Y., Rutland C.J., Narayanaswamy K., Schmiege S.J., He Y.S., Brown D.B., Development and validation of a model for wall-flow type selective catalytic reduction system, *J Automob Eng*, 225, 1641–1659, 2011.
- Sürer E., Solmaz H., Yılmaz E., Calam A., İpci D., Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 1055–1064, 2022.
- Cesur İ., Çelik H.A., Effects of water injection on a partially ceramic coated piston spark plug ignition engine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2133–2146, 2023.
- Oral F., Çolak N.Y., Şimşek D., The effects of waste engine oil and alcohol use as additional fuel in a diesel generator used in small-scale power generation on emission, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 865–874, 2022.
- Solmaz H., Calam A., Halis S., İpci D., Yılmaz E., Investigation of the effects of intake manifold pressure on performance and combustion characteristics in an HCCI engine, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (4), 1735–1750, 2022.
- Pedrozo V.B., May I., Dalla Nora M., Cairns A., Zhao H., Experimental analysis of ethanol dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine: An optimisation at low load, *Appl Energy*, 165, 166–182, 2016.
- Ambarita H., Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode, *Case Stud Therm Eng*, 10, 179–191, 2017.
- Pedrozo V.B., May I., Guan W., Zhao H., High efficiency ethanol-diesel dual-fuel combustion: A comparison against conventional diesel combustion from low to full engine load, *Fuel*, 230, 440–451, 2018.
- Senthilraja R., Sivakumar V., Thirugnanasambandham K., Nedunchezian N., Performance, emission and combustion

- characteristics of a dual fuel engine with Diesel–Ethanol–Cotton seed oil Methyl ester blends and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel, *Energy*, 112, 899–907, 2016.
37. Boretti A., Advantages of converting Diesel engines to run as dual fuel ethanol–Diesel, *Appl Therm Eng*, 47, 1–9, 2012.
 38. Liu J., Guo Q., Guo J., Wang F., Optimization of a diesel/natural gas dual fuel engine under different diesel substitution ratios, *Fuel*, 305, 121522, 2021.
 39. Karim G.A., A review of combustion processes in the dual fuel engine—The gas diesel engine, *Prog Energy Combust Sci*, 6, 277–285, 1980.
 40. Tutak W., Jamrozik A., Comparative Analysis of Combustion Stability of Diesel/Ethanol Utilization by Blend and Dual Fuel, *Process*, 7, 946, 2019.
 41. Çakmak A., Improvement of exhaust emissions in a diesel engine with the addition of an oxygenated additive to diesel-biodiesel blends, *Energetika*, 68, 79–90, 2022.
 42. Çakmak A., Kapusuz M., Özcan H., Experimental research on ethyl acetate as novel oxygenated fuel in the spark-ignition (SI) engine, *Energy Sources Part A*, 45, 178–193, 2023.
 43. Liu Y., Liu W., Liao H., Ashan H., Zhou W., Xu C., An Experimental and a Kinetic Modelling Study of Ethanol/Acetone/Ethyl Acetate Mixtures, *Energies*, 15, 2992, 2022.
 44. Santasnachok M., Sutherasak E., Performance and Emission of a Diesel Engine Fuelled with B10-Ethyl Acetate-Ethanol Blends, 2021 9th Int Conf Smart Grid Clean Energy Technol, 51–56, 2021.
 45. Yeşilyurt M.K., Erol D., Yaman H., Doğan B., Effects of using ethyl acetate as a surprising additive in SI engine pertaining to an environmental perspective, *Int J Environ Sci Technol*, 19, 9427–9456, 2022.
 46. Koçyiğit S., Özer S., Çelebi S., Demir U., Bio-based solutions for diesel engines: Investigating the effects of propolis additive and ethanol on performance and emissions, *Therm Sci Eng Prog*, 48, 102421, 2024
 47. Abd Alla G.H., Soliman H.A., Badr O.A., Abd Rabbo M.F., Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine, *Energy Convers Manag*, 41, 559–572, 2000.
 48. Lounici M.S., Loubar K., Tarabet L., Balistrrou M., Niculescu D.C., Tazerout M., Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions, *Energy*, 64, 200–211, 2014.
 49. Cong D.N., Duc K.N., Duy V.N., Performance and pollutant characteristics of an old generation diesel engine fuelled with dual-fuel diesel-dimethyl ether, *Int J Ambient Energy*, 44, 555–563, 2023.
 50. Toledo E., Guerrero F., Amador G., Toledo M., Experimental Assessment of the Performance and Fine Particulate Matter Emissions of a LPG-Diesel Dual-Fuel Compression Ignition Engine, *Energies*, 15, 9035, 2022.
 51. Dev S., Guo H., Liko B., A Study on the High Load Operation of a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Engine, *Front Mech Eng*, 6, 545416, 2020.
 52. Guan W., Wang X., Zhao H., Liu H., Exploring the high load potential of diesel-methanol dual-fuel operation with Miller cycle, exhaust gas recirculation, and intake air cooling on a heavy-dutydiesel engine, *J Automob Eng*, 22, 2318–2336, 2020.
 53. Pham V.C., Choi J.H., Rho B.S., Kim J.S., Park K., Park S.K., et al., A Numerical Study on the Combustion Process and Emission Characteristics of a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Marine Engine at Full Load, *Energies*, 14, 1342, 2021.
 54. Mittal M., Donahue R., Winnie P., Gillette A., Exhaust emissions characteristics of a multi-cylinder 18.1-L diesel engine converted to fueled with natural gas and diesel pilot, *J Energy Inst*, 88, 275–283, 2015
 55. Lata D.B., Misra A., Medhekar S., Effect of hydrogen and LPG addition on the efficiency and emissions of a dual fuel diesel engine, *Int J Hydrogen Energy*, 37, 6084–6096, 2012.
 56. Rimkus A., Stravinskas S., Matijošius J., Comparative Study on the Energetic and Ecologic Parameters of Dual Fuels (Diesel–NG and HVO–Biogas) and Conventional Diesel Fuel in a CI Engine, *Appl Sci*, 10, 359, 2020.
 57. Sanli A., Yılmaz I.T., Gümüş M., Assessment of combustion and exhaust emissions in a common- rail diesel engine fueled with methane and hydrogen/methane mixtures under different compression ratio, *Int J Hydrogen Energy*, 45, 3263–3283, 2020.
 58. Demir U., Çelebi S., Özer S., Experimental investigation of the effect of fuel oil, graphene and HHO gas addition to diesel fuel on engine performance and exhaust emissions in a diesel engine, *Int J Hydrogen Energy*, 52, 1434–1446, 2024.
 59. Yousefi A., Birouk M., Lawler B., Ghareghani A., Performance and emissions of a dual-fuel pilot diesel ignition engine operating on various premixed fuels, *Energy Convers Manag*, 106, 322–336, 2015.
 60. García A., Monsalve-Serrano J., Villalta D., Lago Sari R., Gordillo Zavaleta V., Gaillard P., Potential of e-Fischer Tropsch diesel and oxymethyl-ether (OMEx) as fuels for the dual-mode dual-fuel concept, *Appl Energy*, 253, 113622, 2019.
 61. Haghighat Shoar F., Najafi B., Mosavi A., Effects of triethylene glycol mono methyl ether (TGME) as a novel oxygenated additive on emission and performance of a dual-fuel diesel engine fueled with natural gas-diesel/biodiesel, *Energy Reports*, 7, 1172–1189, 2021.
 62. Verma S., Das L.M., Bhatti S.S., Kaushik S.C., A comparative exergetic performance and emission analysis of pilot diesel dual-fuel engine with biogas, CNG and hydrogen as main fuels, *Energy Convers Manag*, 151, 764–777, 2017.
 63. Demir U., Kozan A., Özer S., Experimental investigation of the effect of urea addition to fuel on engine performance and emissions in diesel engines, *Fuel*, 311, 122578, 2022.
 64. Yontar A.A., Injection parameters and lambda effects on diesel jet engine characteristics for JP- 8, FAME and naphtha fuels, *Fuel*, 271, 117647, 2020.
 65. Coşkun G., Demir Ü., Yazar S., Investigation the performance of 0-D and 3-D combustion simulation softwares for modelling HCCI engine with high air excess ratios, *Sak Univ Fen Bilim Enst Derg*, 21, 750–758, 2017.
 66. Çelebi S., Duzcan B., Demir U., Uyumaz A., Haşimoğlu C., Effects of light naphtha utilization on engine performance in an homogeneous charged compression ignition engine, *Fuel*, 306, 121663, 2021.
 67. Özer S., Demir U., Koçyiğit S., Effect of using borax decahydrate as nanomaterials additive diesel fuel on diesel engine performance and emissions, *Energy*, 266, 126412, 2023.
 68. Barik D., Murugan S., Simultaneous reduction of NOx and smoke in a dual fuel DI diesel engine, *Energy Convers Manag*, 84, 217–226, 2014..