

Ticari Buji Ateşlemeli Bir Motorda JP8 Askeri Jet Yakıtı ve Amorf Elementel Bor Yakıtlarının Kullanımının NO_x Emisyonlarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Emrah Kantaroğlu^{1*}, Ahmet Doğan²

^{1,2} Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale.

e-posta^{*}: emrahkantaroğlu@kku.edu.tr
e-posta^{*}: ahmet.dogan1@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6127-4318>
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1222-7145>

Geliş Tarihi:19.03.2024 ; Kabul Tarihi:29.05.2024

Öz

Bu çalışmada, ticari bir pistonlu motorda, katkı yakıtı olarak kullanılan JP8 ve amorf elementel borun, yanma ve yanma ürünlerinden azotoksitler (NO_x) olarak bilinen kirletici gazlar üzerindeki etkisi deneysel incelenmiştir. Honda L13A4 tipi çift bujili motorun emisyon deneyleri, motorun maksimum tork devri olan 2800 d/dk devrinde ve tam gaz kolu kelebek açıklığında yapılmıştır. Çalışmada öncelikle benzin saf olarak test edilmiş, ardından benzine kütle oran olarak %5-10-15-20 JP8 yakıtı katılmıştır. Son olarak ise yanma özelinde literatürde oldukça sınırlı kullanıma sahip hem otomotiv hem de havacılık sektöründe kullanılabilen amorf elementel bor yakıtı sabit %2 oranında bütün yakıtlara eklenmiş ve testler yapılmıştır. Testlerin sonunda, emisyon parametrelerinden NO_x oluşumunu tetikleyen egzoz gazı sıcaklığı ve NO_x emisyon miktarları incelenmiştir. Egzoz sıcaklığı, artan JP8 oranlarında (%5-10-15-20) benzine göre sırasıyla %13,017-%16,410-%18,857-%22,239 artmıştır. Bütün benzin_JP8 yakıtlarına %2' şer amorf elementel bor ilave edildiğinde bu oranlar benzine göre sırasıyla %92,129-%57,629-%60,457-%65,023 artmıştır. En yüksek egzoz sıcaklığı ve NO_x salınımı JP8_5_%2B yakıtında ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler

Amorf elementel bor;
JP8; Motor testi; NO_x.

Experimental Investigation of the Effects of JP8 Military Jet Fuel and Amorphous Elemental Bor Fuels Usage on NO_x Emissions in a Commercial Spark-Ignition Engine

Abstract

In this study, the effect of JP8, used as an additive fuel, and amorphous elemental boron on nitrogen oxides (NO_x), known as pollutants from combustion and combustion products, was experimentally investigated in a commercial piston engine. Emission tests of the Honda L13A4 type dual spark plug engine were conducted at the engine's maximum torque speed of 2800 rpm and full throttle valve opening. In the study, gasoline was initially tested in its pure form, then JP8 fuel was added to gasoline at mass ratios of 5-10-15-20%. Finally, amorphous elemental boron fuel, which has limited use in both automotive and aviation sectors, was added to all fuels at a fixed 2% ratio and tests were conducted. At the end of the tests, exhaust gas temperature triggering NO_x formation and NO_x emission levels were examined as emission parameters. Exhaust temperature increased by 13.017-16.410-18.857-22.239% with increasing JP8 ratios (5-10-15-20%) compared to gasoline. When 2% amorphous elemental boron was added to all gasoline_JP8 fuels, these ratios increased by 92.129-57.629-60.457-65.023% compared to gasoline, respectively. The highest exhaust temperature and NO_x emission were measured in JP8_5_%2B fuel.

Keywords

Amorphous elemental bor;
JP8; Engine test;
NO_x.

1. Giriş

Endüstriyel faaliyetler, taşımacılık, enerji üretimi ve tarım gibi insan faaliyetlerinin yan ürünü olarak atmosfere salınan emisyon gazları, çevre üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu gazlar, sera etkisi, asit yağmurları, hava kirliliği ve ozon tabakasının incilmesi gibi çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Emisyon gazları, günlük yaşamsal faaliyetlerden kaynaklı olarak atmosfere salınan kirlenici ve zararlı gazlardır. Bu gazlar, yenilenemeyen fosil yakıtların ulaşımda ve endüstriyel işlemlerde yanması, tarımsal ve orman faaliyetlerinin durması ve çevresel atık maddelerin artması birçok nedene bağlı olarak salınmaktadır. Emisyon gazlarının azaltılması ve kontrolü, çevresel sürdürülebilirliği artırmak ve insan sağlığını korumak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle mevcut motor teknolojilerinin geliştirilmesi ya da yeni yakıt arayışları zorunlu bir hal almıştır. Azalan petrol rezervleriyle beraber artan çevresel kirlilik sorunları, yakıtların maksimum verimle ve daha çevreci bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, ulaşımda içten yanmalı motor kullanımı iyiden iyiye kısıtlanmaya başlanmış ve alternatif bir ulaşım imkânı sağlayacak olan elektrikli motor teknolojileri hızla bu çalışmaların esas konusu haline gelmiştir (Ari 2020). Dünyada önümüzdeki 10 yıl içerisinde başta AB ülkeleri olmak üzere, ABD, Kanada, Hindistan, Çin gibi birçok ülke benzin ve dizel yakıt kullanımını sınırlandıracığını ve hatta içten yanmalı motora sahip araç satışını yasaklayacağını açıklamıştır. Türkiye ise 2030-2050 yılları arasında bu geçişi tamamlayacağını ön görmektedir (<https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa,12.12.2023>). Türkiye’de Ocak 2024 itibarıyla 15.333.952,00 otomobilin %1,5’i hibrit ve %0,6’sı tamamen elektrikli. Yani hali hazırda kullanılmakta olan 15.011.939,00 adet içten yanmalı motora sahip otomobil bulunmaktadır (<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024,04.03.2024>). Bahsedilen sınırlamalar ve anlaşmalar için gerekli süreler beklenirken içten yanmalı motor kullanımı tüm yüksek potansiyeliyle devam etmektedir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan hidrokarbon türevli yakıtların tamamında kirlenici ve çevreye zararlı emisyon salınımı yapılır. Çevre kirliliğinin en önemli bölümünü içten yanmalı motorlardan kaynaklanan egzoz gazı emisyonları oluşturmaktadır (Abdel-Rahman 1998). Motor içerisinde meydana gelen yanma prosesi sonucunda çevreye salınan egzoz gazı, çeşitli kirlenici bileşenlerin yanı sıra karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) gibi temel yanma ürünlerini de içermektedir. Bu kirleniciler arasında en önemli üç bileşen karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (UHC) ve nitrojen oksitlerdir (NO_x) (Abuşoğlu 2009). Yüksek motor sıcaklığında yanma stabilitesindeki bozulmalar, CO emisyonlarının ve yakıt tüketiminin artmasına neden olur. Motordaki artan yakıt tüketimi, UHC gibi kirlenici maddelerin emisyonunun artmasına neden olur. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarla doğrudan ilişkili olan NO_x ve partikül madde (PM) emisyonları artmakta, insan sağlığı ve bitkisel üretim üzerinde ciddi etkiler oluşturmaktadır (Hao vd. 2023). Aşağıda, NO_x emisyonlarının çevresel etkilerini ve kirlenici potansiyelini inceleyen literatür çalışmaları verilmiştir. Literatürde oldukça fazla sayıda, NO_x emisyonlarının hava kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. NO_x emisyonları, atmosferdeki önemli kirlenicilerden biri olarak kabul edilir ve çeşitli insan faaliyetleri tarafından atmosfere salınır. Bu emisyonlar, fosil yakıtların yanması, endüstriyel işlemler, taşımacılık ve tarım gibi kaynaklardan kaynaklanır (Elliott & Bibb 2018). NO_x, atmosferde nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) formunda bulunur ve zararlı çevresel etkilere neden olur (<https://www.epa.gov/no2-pollution>, 19.0.2024). NO_x emisyonlarının hava kalitesi üzerindeki etkisi, ozon oluşumu ve asit yağmurları gibi faktörler aracılığıyla incelenebilmektedir (Huang vd., 2019). Yan vd. (2021) in çalışmasında, NO_x'in atmosferde diğer kirlenicilerle etkileşimleri ve hava kirliliği üzerindeki rolü de ele alınmıştır. NO_x emisyonlarının insan sağlığına olan etkileri de literatürde vurgulanmıştır. Bu doğrultudaki çalışmalarda, NO_x'in solunum yolu rahatsızlıkları, astım ve diğer solunum problemlerine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir (Chen vd. 2017). Ayrıca, NO_x'in uzun vadeli maruziyetiyle ilişkilendirilen

kronik sağlık sorunlarına neden olduğu da saptanmıştır (Brook vd. 2010). NO_x emisyonlarının azaltılması ve kontrolüne yönelik stratejiler de vardır. Temiz enerji kaynaklarının kullanımı, emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesi, düzenleyici standartların belirlenmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması gibi çeşitli yaklaşımlar, NO_x emisyonlarının azaltılması için önerilmektedir (Barrett vd. 2014). NO_x emisyonlarının oluşumu, yanma olayının bir sonucudur. Yüksek sıcaklıklar ve basınçlar altında, hava ve yakıt karışımının yanması sırasında azot ve oksijen gazları arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda NO_x bileşikleri oluşur (Heywood, 2018). NO_x emisyonlarının kontrolü için çeşitli teknolojiler ve stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında, egzoz gazı geri dönüş sistemi (EGR), selektif katalitik indirgeme (SCR), yakıt enjeksiyonu optimizasyonu ve yanma parametrelerinin iyileştirilmesi gibi yöntemler bulunmaktadır (Liu vd. 2020). NO_x emisyonlarının azaltılması için uygulanan stratejiler, emisyon standartlarının belirlenmesi ve düzenleyici önlemlerin alınmasıyla desteklenmektedir. Dünya çapında, çevresel düzenlemeler ve emisyon standartlarının sıkılaştırılması, yanma olayının gerçekleştiği her alan gibi içten yanmalı motorlardan da kaynaklanan NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik önemli adımlar atılmaktadır (Zhao vd. 2019).

İçten yanmalı motorlar, NO_x emisyonlarının önemli kaynaklarından biridir ve bu emisyonların azaltılması için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi alternatif yakıt kullanımlarıdır. Bu çalışmada havacılık yakıtı JP8 ve amorf elementel bor yakıtlarının NO_x emisyonlarına etkileri incelenmiştir. İnsanın ısınma veya aydınlatma ihtiyacını eski zamanlardan beri karşılayan kerosen veya gazyağı, kimyasal işlemlerde veya günlük hayatta taşımacılıkta kullanılmaktadır. Özellikle NATO tarafından verilen kodla JP8 askeri uçak yakıtı olarak da kullanılmaktadır. Parlama noktası 40 °C olan gazyağı, petrolden üretilmektedir. Motorinin içinde bulunan ve dizel yakıtta donmaya veya soğuk havalarda viskozite artışına neden olan parafin nedeniyle dizel yakıtlar düşük sıcaklıkta

akışkanlığını kaybeder. Bu nedenle oldukça düşük sıcaklıklarda ve basınçta çalışma durumunda olan turbofan, turbojet, turboprop ve turboşaft motorlarında dizel yakıt kullanılmamaktadır. Parafin, dizel yakıtta bulunduğu gibi oldukça az oranlarda benzinde de bulunur. Bu açıdan her bir yakıt türünde de düşük sıcaklıklarda akışkanlığın korunması için gazyağı ilavesi kullanılır. Kerosen, benzinden daha zor alev almaktadır, bunun yanında yanması sonunda benzinden daha fazla ısı açığa çıkarmaktadır. Fakat, yanma açısından çok ince olan gazyağı saf halde kullanıldığında yarattığı aşırı sıcaklık ile motorun yanmasına ya da pistonların yatak sarmasına sebebiyet verebilmektedir (Kantaroğlu ve Yontar, 2017). Kerosen, parlama noktasının altında herhangi bir ısı kaynağı veya ateş temasında kendiliğinden yanmaz, bu nedenle havacılık yakıtları adına oldukça güvenlidir. Böylece tehlike arz eden kazalarda yangın veya patlama riski oldukça düşüktür. Kerosenin bir diğer önemli özelliği de donma noktasının oldukça düşük olmasıdır. Yaklaşık olarak -47 °C ila -49 °C aralığında donma noktasına sahip olan kerosenin içerisinde su yoksa, çok soğuk ortamlarda tank manifoldlarından donmadan kolayca hatlara sevk edilebilir ve motora gönderilebilir. Günümüzde jet motorlu uçaklarda kullanılan gazyağı, "JET-A, JET-A1, JET-B, JP-4, JP-5, JP-7 ve JP-8" adlarıyla bilinmektedir. Kütlece belirli oranlarda benzin ile karıştırılması sonucunda NATO ülkelerinde bulunan jetlerin yakıtı olarak kullanılan kerosen, yoğunlukça benzine çok yakın olduğundan dolayı kolayca karıştırılarak, belirli alanlarındaki ihtiyaçlar doğrultusunda kullanılabilir (Kantaroğlu ve Yontar, 2017).

Bu çalışmada, motorda oluşan NO_x emisyonlarının ve egzoz gazı sıcaklıklarının değişimini incelemek amacıyla, ilk olarak benzin tek başına test edilmiş ve baz veriler ölçülmüştür. Bir sonraki testte, benzine kütlece olarak %5-10-15-20 oranlarında JP8 yakıtı katılarak ölçümler yapılmıştır. Yapılan son testte ise, literatürde rastlanmayan ve hem otomotiv hem de havacılık sektörüne hitap eden amorf elementel bor karışımları kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Benzin ve JP8 karışımlarının her birine kütlece olarak %2 amorf elementel bor ilave edilmiş ve testler bu yakıtlarla yapılmıştır. Bor

ilavesinin sabit seçilmesinin nedeni, borun net etkisinin bütün benzin_JP8 karışımlarında ortaya konulmak istenmesidir. Literatürdeki çalışmalardan farklı bir yakıt yelpazesi taşıyan bu çalışma ile, esas olarak havacılık sektöründe kullanılan JP8 askeri jet yakıtının buji ateşlemeli bir motorda kullanımı ve bunun yanında yanma davranışları halihazırda tam olarak belirlenemeyen bor türevli yakıt etkileri incelenmiştir. Bu açıdan bakıldığında çalışma önem arz etmektedir. Literatürde emisyonlara karşı alınacak önlemlerin araştırıldığı ve farklı alternatif yakıtların kullanıldığı oldukça fazla çalışma mevcuttur. Ancak burada, havacılık ve otomotiv yakıtı olan JP8'in ve sınırlı kullanıma sahip amorf elementel borun kullanımıyla ilgili NO_x oluşumu ve egzoz gaz sıcaklığı incelemeleri ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Bu anlamda literatürde bu seviyede inceleme yapılmadığı düşünüldüğünde konunun literatüre sağlayacağı katkılar mevcuttur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada motor testleri ile benzine ilave edilen JP8 ve JP8-amorf elementel bor karışımlarının NO_x emisyonuna ve egzoz gazı sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Bu incelemede belirlenen karışım oranları ve deney sabitleri deney matrisleriyle Çizelge 1'de verilmiştir. Testler; Çizelge 1'de gösterildiği gibi motorun maksimum tork devri olan 2800 d/dk hızında ve 9 farklı yakıt için yapılmıştır. Test sırasında emisyonlardan CO, CO₂, UHC, NO_x, O₂ ve Lambda parametreleri ölçülmektedir. İncelemede, JP8 kütle oranı %5-10-15-20, Amorf Elementel Bor kütle oranı her bir karışıma sabit %2 şeklindedir. Motor test koşulları olarak, motor hızı 2800 d/dk (sabit), kelebek açıklığı %100 (sabit) olarak belirlenmiştir. Kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2' de verilmiştir.

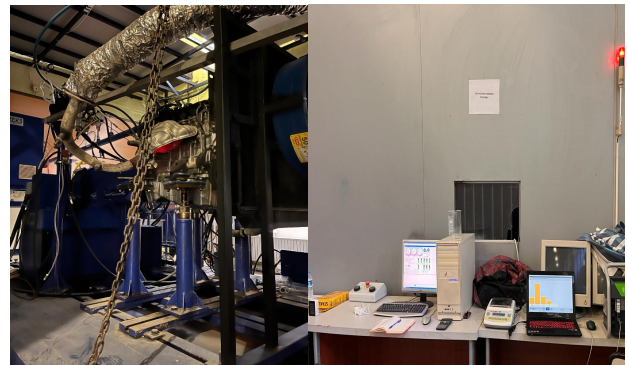
Çizelge 1. Karışım oranları ve inceleme matrisi.

Deney	Yakıt İsmi	Kütle Oran (%)	Kelebek Açıklığı (%)	Motor Hızı (d/dk)
1	JP8_0	%100 Benzin + %0 JP8	100	2800
2	JP8_5	%95 Benzin + %5 JP8	100	2800
3	JP8_10	%90 Benzin + %10 JP8	100	2800
4	JP8_15	%85 Benzin + %15 JP8	100	2800
5	JP8_20	%80 Benzin + %20 JP8	100	2800
6	JP8_5_%2B	%98 JP8_5 + %2 Bor	100	2800
7	JP8_10_%2B	%98 JP8_10 + %2 Bor	100	2800
8	JP8_15_%2B	%98 JP8_15 + %2 Bor	100	2800
9	JP8_20_%2B	%98 JP8_20 + %2 Bor	100	2800

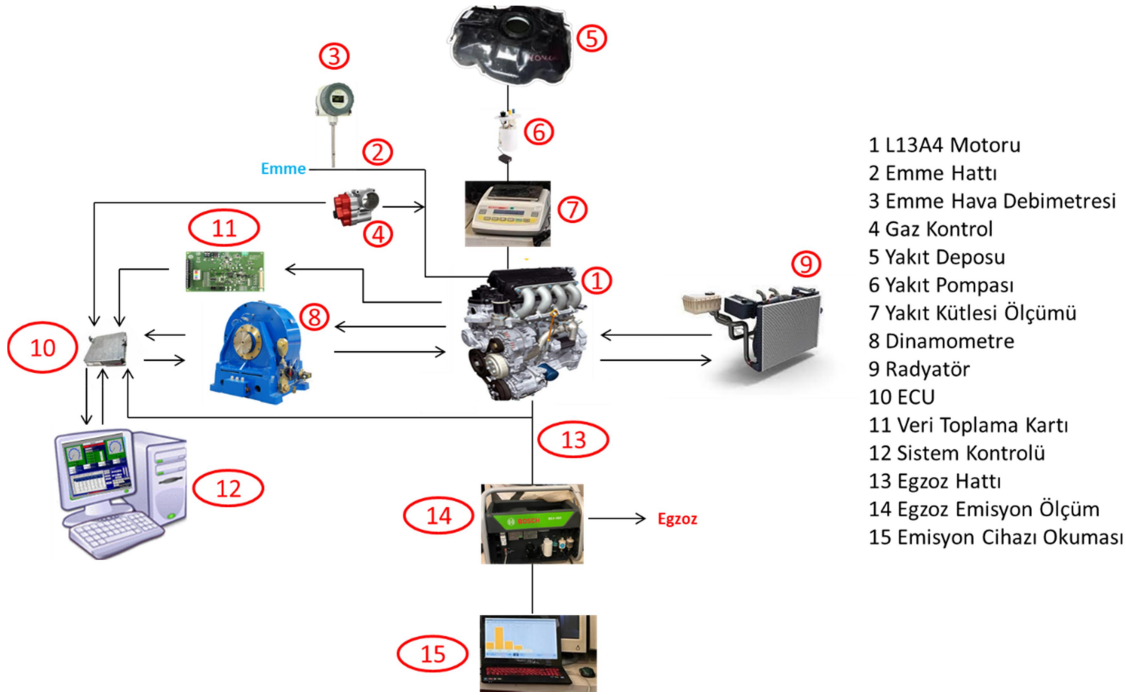
Çizelge 2. Yakıt özellikleri (Bowden vd. 1985; Brown vd. 1991; Kantaroğlu ve Doğan, 2024).

Yakıt	Benzin	JP8	Bor
Kimyasal formül	C ₈ H ₁₈	C _{10.17} H _{19.91}	B
Yoğunluk (15 °C), kg/L	0,690	0,797	2,34
Molar C/H oranı	0,44	0,51	-
Parlama noktası, °C	15,6	40	-
Isıl değeri, MJ/kg	44,3	43,23	58,74
Enerji yoğunluğu, MJ/L	34,2	34,62	131

Motor test sistemi; Honda L13A4 i-DSI test motoru, Tuzeks TUD100 eddy-current manyetik alan dinamometresi, kontrol-ölçüm-veri toplama sistemi ve emisyon ölçüm cihazı olarak sıralanan dört temel bileşen oluşmaktadır. Mevcut motor test sisteminin fotoğrafı Şekil 1' de ve şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Motor test sistemi.



Şekil 2. Motor test sistemi şeması.

Test motoru: NO_x parametresi incelenen test motoru, Honda-Jazz 2004 modelinde bulunan Honda L13A4 tipi i-DSI ardışık çift buji ateşlemeli ticari bir motordur. Bu motorun teknik özellikleri Çizelge 3’ de verilmiştir.

Çizelge 3. Motor özellikleri (Migita vd. 2002).

Model	Honda L13A4
Silindir Sayısı	4
Motor Hacmi	1,339 cm ³
Sıkıştırma Oranı	10,8:1
Silindir Çapı	73 mm
Strok Uzunluğu	80 mm
Motor Gücü	63 kW (5700 d/dk)
Motor Torku	119 Nm (2800 d/dk)

Dinamometre: Motor test sisteminde, eddy-current tipi manyetik alan dinamometresi bulunmaktadır. Dinamometre özellikleri Çizelge 4’ de verilmiştir.

Çizelge 4. Dinamometre özellikleri (Kantaroğlu, 2022).

Ölçüm	Parametre
Model	TUD100
Maksimum güç, kW	100
Maksimum tork, Nm	500
Standard hız, d/dk	8000
Maksimum hız, d/dk	12000

Kontrol-ölçüm sistemi: Bu sistem sensörler, yükselticiler, veri aktarıcılar ve motor test yazılımından oluşmaktadır.

Emisyon ölçüm cihazı: Egzoz gazı emisyon ölçümleri ise BOSCH BEA550 cihazı ile yapılmaktadır. Motor performans değerlerinin ölçüldüğü sürekli rejim anında emisyonlarda (CO, CO₂, UHC, NO_x ve O₂) ölçülmektedir. Emisyon ölçüm cihazından bu gaz parametreleri kullanılarak, Brettschneider Denklemi ile λ (lambda) hesaplanır. Denklemden, oksijen ihtiva eden bileşenlerle, karbon ve azot ihtiva eden bileşenlerin birbirine göre dengesini hesaplar. Egzozdaki, H_{cv} (hidrojen/karbon oranı) ve O_{cv} (oksijen/karbon oranı) ile K₁ (yakıt için düzeltme faktörü) kullanılan bu denklem ilk bulunduğu yıllardan itibaren son halini alana kadar çeşitli konfigürasyonlar geçirmiştir (Brettschneider 1997, Singer vd. 1998, Torok vd. 2018). Motor testi sırasında, ticari motorun gerçek zamanlı kullanımı gereği Lambda ölçümü yapılmıştır.

$$\lambda = \frac{[\text{CO}_2] + \frac{[\text{CO}]}{2} + [\text{O}_2] + \frac{[\text{NO}]}{2} + \left(\left(\frac{[\text{H}_{\text{cv}}]}{4} \cdot \frac{3,5}{3,5 + \frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2]}} \right) - \frac{\text{O}_{\text{cv}}}{2} \right) \cdot ([\text{CO}_2] + [\text{CO}])}{\left(1 + \frac{\text{H}_{\text{cv}}}{4} - \frac{\text{O}_{\text{cv}}}{2} \right) \cdot ([\text{CO}_2] + [\text{CO}] + (K_1 \cdot [\text{HC}]))} \quad (1)$$

Emisyon cihazı sızdırmazlık ve oksijen sıfırlamaları ile her test başlangıcında kendini kalibre etmektedir. Bu şekilde ölçümler istenilen hassasiyetlerde yapılabilmektedir. Emisyon ölçüm cihazının ölçüm ara yüzü Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. BEA550 arayüzü.

Motor test sisteminde ilgili bütün ekipmanların ölçüm doğrulukları kullanılarak belirsizlik analizleri yapılmıştır. Motor emisyonlarından ölçümü yapılan CO, CO₂, UHC, NO_x, O₂ ve Lambda'nın ölçümü sırasında kullanılan BEA 550 cihazının ölçüm doğrulukları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Emisyon ölçüm doğrulukları (Kantaroğlu, 2022).

Parametreler	Ölçüm aralığı	Birim	Doğruluk
1 CO	0,000-10,000	%vol.	%±0,001
2 CO ₂	0,00-18,00	%vol.	%±0,01
3 O ₂	0,00-22,00	%vol.	%±0,01
4 HC	0-9999	ppmvol	±1
5 NO _x	0-5000	ppmvol	±1
6 Lambda	0,500-9999	-	±0,001

3. Bulgular

Bu çalışmada, buji ateşlemeli pistonlu bir motorda benzin-JP8-amorf elementel bor katkılarının NO_x emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde saf benzin ve benzine belirli kütle oranlarında (%5-10-15-20) JP8 havacılık yakıtı katılarak testler yapılmıştır. Bu testlerin ardından bütün karışım oranlarına %2 oranında amorf elementel bor ilave edilerek ticari bir otomobil motorunda testler

yapılmıştır. Motor testleri motorun maksimum katalog tork devri olan 2800 d/dk' da ve tam yükte (%100 gaz kelebek açıklığı) yapılmıştır. Bütün karışım oranları için, emisyon parametrelerinden NO_x değişimleri ölçülmüştür.

Ölçüm sonuçlarının NO_x bakımından değerlendirilmesi için öncelikle egzoz gazı sıcaklığının ve dolayısıyla da silindir içi yanma sonu sıcaklığının irdelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Şekil 4'te bütün karışım oranları için egzoz gazı sıcaklığı verilmiştir.

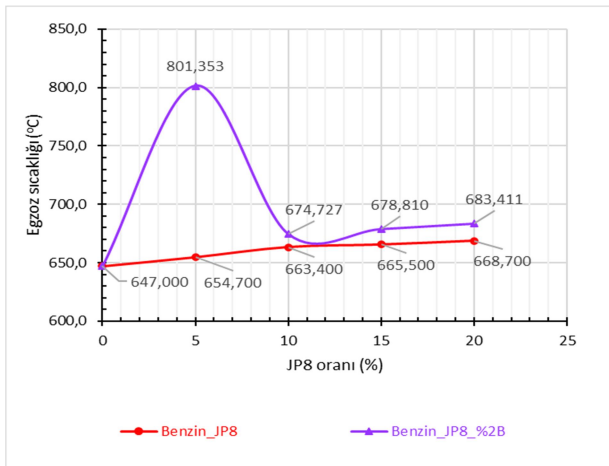
Şekil 4'e bakıldığında artan JP8 oranlarında (%5-10-15-20) benzine göre sırasıyla %13,017-%16,410-%18,857-%22,239 oranında egzoz gazı sıcaklığı artışı olmuştur. Literatürdeki çalışmaların, benzin-JP8 karışımları özelinde yeterli seviyede olmaması dolayısıyla, ortaya konan JP8 etkileri, literatürdeki dizel-JP8 karışımı çalışmalarından belli seviyede ayrılmaktadır. (Labeckas ve Slavinskas 2015). Çizelge 2 incelenirse benzinin birim kütledeki ısı değeri, JP8'in ısı değerinden %2,48 daha yüksektir. Ancak yoğunluklar incelendiğinde birim hacimde silindir içerisine alınan JP8 kütlesi, benzin kütlesinden daha yüksektir. Dolayısıyla JP8'in alt ısı değeri belirli bir miktar benzinden düşük olsa da silindir içerisine aynı hacimde daha fazla miktarda JP8 alınmasıyla, silindir içerisine daha fazla enerji girişi olmuştur. Bu da JP8 ilavesi ile egzoz gazı sıcaklığının artmasına neden olmuştur. Ayrıca JP8'in enerji yoğunluğunun da benzinden %1,23 yüksek olması bu durumu desteklemektedir. Bütün karışım oranlarına ilaveten %2 amorf elementel bor ilavesi yapıldığında ise benzine göre egzoz gazı sıcaklığı sırasıyla %92,129-%57,629-%60,457-%65,023 oranında artmıştır. Burada bor ilavesinin bütün benzin-JP8 yakıtlarına sabit bir oranda katılmasıyla borun net etkisi ortaya konulmuştur. Bor türevlerinin benzinle karşılaştırılmasının tutuşma gecikmesini azaltması ve yanma sırasındaki sıcaklığı yükseltmesi bu durumun oluşumunda etkilidir (Sofuoğlu vd., 2024). Borun yüksek uçuculuk etkilerinin de yanma verimine etkileri pozitifdir ve bu da NO_x artışına neden olmaktadır (Değirmenci, 2022).

Şekil 5'te de bütün karışım oranları için ölçülen NO_x parametreleri verilmektedir. Şekil 3'deki yorumlara

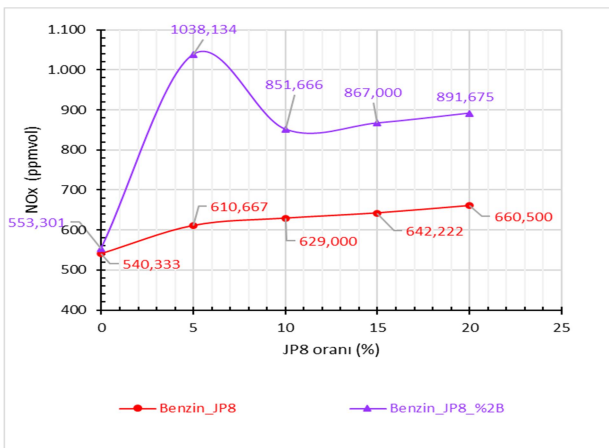
dayanarak artan silindir içi sıcaklıklar neticesinde, hava içerisinde bulunan azot ve oksijen gazlarının yüksek sıcaklık altında bozunması ve yeniden NO, NO₂ gibi farklı molar konsantrasyonlarda azot oksitler oluşturmasıyla NO_x emisyonları artmıştır.

Silindir içi sıcaklığın artmasına bağlı olarak hava içerisindeki nitrojen ve oksijenin bozunarak bileşikler oluşturmasıyla ortaya çıkan NO_x emisyonları karışımların tamamında artmıştır. Jones ve Brown (2020) yaptıkları çalışmada benzer nedenlerle JP8'in NO_x emisyonlarını arttırdığını belirtmiştir. Çeşitli araştırmalar, JP8 jet yakıtının yanması sırasında nitrojen oksitler (NO_x) emisyonlarının atmosfere salındığını göstermektedir (Smith et al., 2018; Thompson ve Lee, 2020).

Her iki şekilde de %95 benzin-%5JP8 karışımlarına ilave edilen elementel bor ile egzoz sıcaklığının ve NO_x emisyonlarının diğer karışımlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Burada borun aktivitesinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Benzine JP8 ve amorf elementel bor ilavesinin egzoz gazı sıcaklığına etkisi.



Şekil 5. Benzine JP8 ve amorf elementel bor ilavesinin NO_x emisyonlarına etkisi.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, buji ateşlemeli pistonlu bir motorda benzin-JP8-amorf elementel bor yakıtlarının NO_x emisyonlarında oluşturdukları değişim etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Testler ilk olarak saf benzin ile ve devamında karışimli yakıtlarla %5-10-15-20 oranlarında kütleli olarak katılan havacılık yakıtı JP8 yakıtı ile yapılmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki etkiler ortaya konmuştur.

- Artan JP8 oranlarında (%5-10-15-20) benzine göre egzoz sıcaklığının artmıştır.
- Artan JP8 oranlarında (%5-10-15-20) benzine göre NO_x emisyonları artmıştır.
- Her bir karışıma ilave edilen %2 amorf elementel bor ile egzoz sıcaklığı artmıştır.
- Her bir karışıma ilave edilen %2 amorf elementel bor ile NO_x emisyonları artmıştır.
- Her iki parametrede de JP8_5_%2B yakıtı en yüksek değeri vermiştir.
- Bütün karışım oranlarına ilaveten %2 amorf elementel bor ilavesi yapılan durumda yanma iyileşmiştir.
- İncelemelerde, NO_x açısından negatif etkiler %2 amorf elementel bor ilavesiyle düşük JP8 oranlarında daha belirgin hale gelmiştir.

Burada, hem JP8' in hem de amorf elementel borun yanma sonu sıcaklığının arttırmasının, yanma verimini arttırması açısından bir avantaj gibi görünmesine rağmen, NO_x emisyonları bakımından bir dezavantaj bulunduğu görülmektedir.

Semboller	
i-DSI	Ardışık çift buji ateşleme
C ₈ H ₁₈	Benzin
C _{10.17} H _{19.91}	JP8
B	Bor
λ	Lambda
CO ₂	Karbondioksit
H ₂ O	Su
CO	Karbonmonoksit
UHC	Yanmamış hidrokarbon
NO _x	Azot oksitler
NO	Azot monoksit
NO ₂	Azot dioksit
H _{cv}	Egzozdaki hidrojen/karbon oranı
O _{cv}	Egzozdaki oksijen/karbon oranı
K ₁	Yakıt düzeltme faktörü
EGR	Egzoz gazı geçiştirimi
SCR	Selektif katalitik indirgeme

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123M914 numaralı ve "Çift-Buji Ateşlemeli Ticari Bir Otomobil Motorunda Benzin-JP8-Amorf Elementel Bor Karışımlarının Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi" projesi ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

5. Kaynaklar

- Abdel-Rahman, A., A., 1998. On the emissions from internal combustion engines: A Review. *International Journal of Energy Research*, 22, 483-513.
- Abuşoğlu, A., and Kanoğlu, M., 2009. Emission characteristics analysis of diesel engine powered cogeneration. *Journal of Thermal Science and Technology*, 29, 45-53.
- Ari, Y.O., 2020. A general outlook on the global electric car market. *Kirklareli University Journal of Social Sciences*, 4, 193-203.
- Barrett, S. R. H., Falzon, B. G., & Yuan, J., 2014. Global health impacts of future aviation emissions under alternative control scenarios. *Environmental Science & Technology*, 48(20), 12063–12071.

- Brettschneider, J., 1997. Extension of the Equation for Calculation of the Air-Fuel Equivalence Ratio. *Preparing Mixtures for Diesel and SI Engines*, 972989. <https://doi.org/10.4271/972989>
- Brown, R. C., Kolb, C. E., Cho, S. Y., Yetter, H. R., Rabitz, Dryer, F. L., 1991. Boron Combustion Model Development with Kinetic Sensitivity Analysis and Measurement of Key Chemical Rate Parameters. Aerodyne Research, Inc. Billerica, MA 01821. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA235309.pdf> Son erişim tarihi: 20 Şubat 2024.
- Bowden, J. N., Owens, E. C., LePera, M. E. JP-8 and JP-5 AS, Compression Ignition Engine Fuel. Defense Technical Information Center (DTIC), Virginia 22060-6218 (800) 225-3842. <https://Discover.DTIC.mil> Son erişim tarihi: 20 Şubat 2024.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith Jr., S. C., Whitsel, L., & Kaufman, J. D., 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378.
- Chen, H., Goldberg, M. S., Villeneuve, P. J., & Burnett, R. T., 2017. Long-term exposure to traffic-related air pollution and cardiovascular mortality. *Epidemiology*, 28(1), 87–95.
- Elliott, S. J., & Bibb, J. S., 2018. The effects of NO_x emissions on ambient air quality and human health: A review. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11(9), 1029–1041.
- Değirmenci, H., 2022. 'Bor Katkılı Yakıtların Yanma Karakteristiklerinin Farklı Yakma Sistemlerinde İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Otomotiv Mühendisliği ABD, 118, Mersin.
- Hao, L., Ren, Y., Lu, W., Jiang, N., Ge, Y., Wang, Y., 2023. Assessment of heavy-duty diesel vehicle NO_x and CO₂ emissions based on OBD data. *Atmosphere*, 14, 1417.
- Heywood, J. B., 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill.

- Huang, G., Ma, H., Liu, S., Cao, Q., & Liu, H., 2019. Review of NO_x emissions and mitigation strategies for heavy-duty diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, 229, 951–962.
<https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa> (12.12.2023)
<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024> (04.03.2024)
<https://www.epa.gov/no2-pollution> Environmental Protection Agency (EPA). (18.03.2024)
- Jones, M., & Brown, P., 2020. Effects of JP-8 Jet Fuel Combustion on Nitrogen Oxides Emissions in Aircraft Engines. *Journal of Aerospace Engineering*.
- Kantaroğlu, E. ve Yontar, A. A., 2017. Buji Ateşlemeli Bir Motorda JP-8 Askeri Jet Yakıtının Kullanımının İncelenmesi. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Tam Metin, Kırıkkale.
- Kantaroğlu, E., 2022. Ticari Bir Otomobil Motorunda Benzine CNG Katkısının Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkisinin HAD Analizi ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği ABD, 249, Kırıkkale.
- Kantaroğlu, E. and Doğan, A., 2024. Ticari Bir Pistonlu Motorda JP8-Elementel Bor Katkısının Performansa Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi, vol. 16, no. 2, pp. 1–11, Jan. 2024.
- Labeckas, G. ve Slavinskas, S., 2015. Combustion phenomenon, performance and emissions of a diesel engine with aviation turbine JP-8 fuel and rapeseed biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 105, 216-229.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.065>
- Liu, F., Li, Y., Wu, Z., & Zuo, W., 2020. Development of SCR-DeNO_x catalysts for NO_x removal in diesel engines: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 268, 118755.
- Migita, H., Amemiya, T., Yokoo, K., & Iizuka, Y., 2002. The new 1.3-liter 2-plug engine for the 2002 Honda Fit. *JSAE Review*, 23(4), 507-511.
[https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00235-7](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00235-7)
- Singer, B. C., Harley, R. A., Littlejohn, D., Ho, J., & Vo, T., 1998. Scaling of Infrared Remote Sensor Hydrocarbon Measurements for Motor Vehicle Emission Inventory Calculations. *Environmental Science & Technology*, 32(21), 3241-3248.
<https://doi.org/10.1021/es980392y>
- Smith, A., Johnson, B., & Davis, R., 2018. Impacts of JP-8 Jet Fuel Composition on NO_x Emissions. *Journal of Combustion*, 2018.
- Sofuoğlu, D., Değirmenci, H., Yontar, A. A., 2024. Trietil Borat, Benzin ve Trietil Borat-Benzin Karışımının Yanma Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Boron*, 9(1), 9-19.
- Thompson, T., & Lee, D., 2020. Environmental Impact of Aviation Emissions and Aviation Fuel Alternatives: A Review. *Journal of Air Transport Management*, 87, 101865.
- Torok, A., Zoldy, M., & Csefalvay, E., 2018. Effects of Renewable Energy Sources On Air-Fuel Ratio. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 25(3), 473-477.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.4370>
- Yan, J., Lin, J., Zhang, X., Li, C., & Sun, Y., 2021. The roles of NO_x and VOCs in ozone formation in Beijing during the COVID-19 lockdown period. *Atmospheric Environment*, 245, 118008.
- Zhao, Y., Wang, X., & Xu, J., 2019. Influence of operating conditions on NO_x emission and combustion characteristics of diesel engine under various intake oxygen concentration and exhaust gas recirculation rate. *Applied Thermal Engineering*, 148, 740–750.