



**ATIK TRAFO YAĞI VE DİZEL YAKIT
KARIŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU İLE
MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYON
PARAMETRELERİNİN TEK SİLİNDİRLİ DİZEL BİR
MOTORDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Nihat Sami ŞEN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER
2023**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI

**ATIK TRAFO YAĞI VE DİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ
KARAKTERİZASYONU İLE MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYON
PARAMETRELERİNİN TEK SİLİNDİRLİ DİZEL BİR MOTORDA DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

(Characterization of Waste Transformer Oil and Diesel Fuel Mixtures and Experimental
Investigation of Engine Performance and Exhaust Emission Parameters in a Single Cylinder
Diesel Engine)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nihat Sami ŞEN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Erzurum
Haziran, 2023

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Nihat Sami ŞEN tarafından hazırlanan “Atık Trafo Yağı ve Dizel Yakıt Karışımlarının Karakterizasyonu ile Motor Performans ve Egzoz Emisyon Parametrelerinin Tek Silindirli Dizel Bir Motorda Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışması 14/06/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç.Dr. Faruk YEŞİLDAL

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır.

Jüri Üyesi Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER

(Danışman):

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır.

Jüri Üyesi: Dr.Öğr.Üyesi Orhan ARPA

Dicle Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER* danışmanlığında sunulan “Atık Trafo Yağı ve Dizel Yakıt Karışımlarının Karakterizasyonu ile Motor Performans ve Egzoz Emisyon Parametrelerinin Tek Silindirli Dizel Bir Motorda Deneyisel Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%3	30
Kuramsal Temeller	%7	30
Materyal ve Yöntem	%12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	%2	20
Sonuçlar ve Öneriler	%0	20
Tezin Geneli	%7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Nihat Sami ŞEN	Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER
14.6.2023	14.6.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır.	İmza: Aslı ıslak imzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca elinden gelen bütün katkıları sağlayan, emeğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER'e teşekkürlerimi sunar ve bana verdiği tüm emekler için kendisine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamız kapsamında motor deneylerini yapmamıza yardımcı olarak büyük katkı sağlayan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Orhan ARPA' ya verdiği emekler için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamızın kimyasal analizlerini yaparak, büyük katkı sağlayan değerli hocam Doç.Dr.Hatice Tuba DOĞAN'a verdiği emekler için çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar her konuda, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen sevgili eşim ve aileme çok teşekkür ederim.

Nihat Sami ŞEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK TRAFİO YAĞI VE DİZEL YAKIT KARIŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU İLE MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYON PARAMETRELERİNİN TEK SİLİNDİRLİ DİZEL BİR MOTORDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Nihat Sami ŞEN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Amaç: Bu tez çalışmasıyla ortaya çıkacak olan yüksek lisans teziyle; ömrünü tamamlamış atık trafo yağı ile dizel yakıt farklı oranlarda homojen bir şekilde karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının ayrıntılı karakterizasyonu (TG-DSC, FT-IR, yoğunluk, viskozite, bulutlanma noktası, akma noktası) yapılmış ve hazırlanan yakıt karışımlarının motor performans parametreleri ile egzoz emisyonları deneysel olarak incelenerek içten yanmalı dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Isı transfer akışkanı olarak kullanılan ömrünü tamamlamış atık trafo yağı dizel yakıtla %10 %20 %30 ve %40 oranında karıştırılarak (sırasıyla TD10, TD20, TD30 ve TD40) elde edilen yakıtın termokimyasal özellikleri araştırılmıştır. Hazırlanan 5 farklı yakıt numunesi, dört zamanlı, tek silindri, hava soğutmalı dizel bir motorda tam yükte 1000- 1500-2000 ve 2500 dev/dak hızlarda test edilmiştir. Deneylerde, tüm karışımlar için, egzoz emisyon değerleri ve egzoz gazı sıcaklığı ölçümleri yapılarak fren gücü, tork ve fren özgül yakıt tüketimi değerleri hesap edilmiştir.

Bulgular: Tüm motor devirlerinde her bir yakıtın ürettiği ortalama tork ve fren gücü değerleri en yüksek D100 yakıtında olurken, en düşük tork ve fren gücü değerleri sırasıyla %14,03 ve %16,01 oranlarıyla TD40 yakıtında gözlenmiştir. TD karışımları arasında en iyi ortalama tork ve fren gücü değerlerine TD10 sahip olmuştur. TD harmanları arasında tüm hızlarda en düşük ortalama BSFC değeri TD10 harmanından (214,52 g/kWh) elde edilirken, en yüksek ortalama BSFC değeri TD40 harmanından (261,83 g/kWh) elde edildi. Genel olarak BSFC, yoğunluğa ve ısıl değere bağlı olarak artmıştır. Tüm karışımlar arasında en düşük ortalama CO emisyonları TD10 yakıt karışımında gözlenirken, en yüksek ortalama CO emisyonları TD30 yakıt karışımında gözlemlendi. NOx emisyonları dizel yakıtla göre en fazla TD30 yakıtında %23,98 azalma göstermiştir. En yüksek ortalama EGT değeri TD40 yakıtında (509,38°C), en düşük EGT değeri ise TD10 yakıtında (471,90°C) ölçülmüştür.

Sonuç: Tüm yakıt karışımlarının yoğunluk, viskozite, akma ve bulutlanma noktası gibi önemli yakıt özelliklerinin ASTM ya da EN standartlarını karşılamıştır. Ömrünü tamamlamış atık trafo yağının yüksek viskozite, özgül ağırlık ve düşük kalorifik değerleri bakımından dizel yakıtla göre dezavantaj sağladığı görülmüştür. Kimyasal analiz sonuçları açısından tüm atık trafo yağ karışımlarının dizel motorlar için gerekli standartları sağladığı sonucuna varılmıştır. Ömrünü tamamlamış atık trafo yağının dizel motorda yakıt olarak kullanılmasıyla CO ve NOx emisyonlarında iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ömrünü Tamamlamış Atık Trafo Yağı, Alternatif Yakıt, Motor Performansı, Egzoz Gazı Emisyonları.

Haziran 2023, 74 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CHARACTERIZATION OF WASTE TRANSFORMER OIL AND DIESEL FUEL MIXTURE AND THE ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS PARAMETERS IN A SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE

Nihat Sami ŞEN

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Purpose: With the master's thesis that will emerge with this thesis study; Investigation of the characterization of the fuel components obtained by homogeneously mixing the diesel used in diesel engines with residual transformer oil in certain proportions and examining the expected performance parameters and emission values in the case of using these fuels in a diesel engine, and using their properties as an alternative fuel in internal combustion diesel engines.

Method: The thermochemical properties of the fuel obtained by mixing 10%, 20%, 30% and 40% of the spent transformer oil used as heat transfer fluid with diesel fuel (TD10, TD20, TD30 and TD40, respectively) were investigated. Prepared 5 different fuel samples were tested in a four-stroke, single-cylinder, air-cooled diesel engine at 1000-1500-2000 and 2500 rpm at full load. In the experiments, exhaust emission values and exhaust gas temperature measurements were made for all mixtures and braking power, torque and brake specific fuel consumption values were calculated.

Findings: At all engine speeds, the average torque and brake power values produced by each fuel were highest in the D100 fuel, while the lowest torque and brake power values were observed in the TD40 fuel with rates of 14.03% and 16.01%, respectively. Among the TD blends, TD10 had the best average torque and brake power values. Among the TD blends, the lowest average BSFC value was obtained from the TD10 blend (214.52 g/kWh) et al speeds, while the highest average BSFC was obtained from the TD40 blend (261.83 g/kWh). In general, BSFC has increased depending on density and calorific value. Among all blends, the lowest average CO emissions were observed in the TD10 fuel blend, while the highest average CO emissions were observed in the TD30 fuel blend. Compared to diesel fuel, NO_x emissions showed a 23.98% reduction at most in TD30 fuel. The highest average EGT value was measured for the TD40 fuel (509.38°C), while the lowest EGT value was measured for the TD10 fuel (471.90°C).

Results: All fuel mixtures; Important fuel components such as configuration, viscosity, pour and cloud point met ASTM or EN standards. According to the high viscosity, fastness and low calorific values of waste transformer oil, which has completed its life, it has criterion values compared to diesel fuel. In terms of chemical analysis results, the standards criteria required for diesel engines of all waste transformer oil mixtures have been changed. By using the spent transformer oil as fuel in the diesel engine, CO and NO_x emissions are recovered.

Keywords: End of Life Waste Transformer Oil, Alternative Fuel, Engine Performance, Exhaust Gas Emissions.

June 2023, 74 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	9
İçten Yanmalı Motorlar.....	9
İçten yanmalı motorların sınıflandırılması.....	10
MATERYAL VE METOT	33
Yakıt Karışımlarının Hazırlanması	33
Atık Trafo Yağı ve Dizel Yakıtın Karakteristik Özelliklerinin Tespiti	34
TG/DSC analizi.....	35
FT-IR analizi	35
Motor Test Düzenneği ve Ekipmanları	35
Test motorunun özellikleri	36
Emisyon cihazının özellikleri.....	37
Elektronik kontrol ünitesi.....	38
Ölçümü Yapılan Motor Performans Parametreleri	39
Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri	40
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	41
Test Yakıtlarının Karakteristik Analizleri.....	41
TG / DSC analizi.....	42
FT-IR analizi	43
Test yakıtlarının Motor Performans Analizleri	46
Tork (T).....	47
Fren gücü (BP).....	48
Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC).....	49

Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri	50
CO emisyonu.....	50
NO emisyonu	51
NOx emisyonu	52
Egzoz gaz sıcaklıkları (EGT).....	53
SONUÇ ve ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	61



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çeşitli özelliklerine Göre Motorların Türleri	10
Tablo 2. Dizel Yakıtlara Ait Bazı Karakteristik Özelliklerin Açıklamaları ve Mevcut Standart Şartlarına Göre Belirlenen Sınırları	15
Tablo 3. Etanol ve Dizelin Yakıt Olarak Karşılaştırılması	19
Tablo 4. Dizel ve Biyodizel yakıtların Karakteristik Özellikleri	20
Tablo 5. Bitkisel Bazlı Biyoyakıtlar ve Test Edilen Çeşitli Özellikleri	20
Tablo 6. Farklı Yakıt Türlerine Göre Ülkemizdeki Kara Taşıt Miktarları	24
Tablo 7. Benzin & LPG Emisyonlarının Karşılaştırılması	25
Tablo 8. Binek Kara Araçları EURO Standartları ve Değişimleri	26
Tablo 9. Dizel Yakıtlı Mini Ticari Otomobillere Ait EURO Standartları ve Değişimleri	27
Tablo 10. Benzin Yakıtlı Mini Ticari Otomobillere Ait EURO Standartları ve Değişimleri	28
Tablo 11. Dizel ve Benzin Yakıtlı Kara Araçlarının EU6 Emisyon Sınırları	28
Tablo 12. Trafo Yağı Çeşitli Özellikleri	31
Tablo 13. Trafo Kapasitelerine Göre Kullanılması Gereken Yaklaşık Trafo Yağı Miktarları	32
Tablo 14. Hazırlanan Karışımların Hacimsel Oranları ve Miktarları	33
Tablo 15. Test Yakıtlarının Karakterizasyonunda Kullanılan Ekipmanlar ve Yöntemler	34
Tablo 16. Test Motorunun teknik Özellikleri	36
Tablo 17. Egzoz Emisyon Cihazının Teknik Özellikleri	38
Tablo 18. Yakıt Numunelerinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri	41
Tablo 19. Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve Karışımlarının Absorbans Bant Aralığı	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı yanma çanakları olan piston çeşitleri.....	4
Şekil 2. Dört zamanlı dizel motor	9
Şekil 3. 1906 Yılı İmalı Tek Silindire Sahip Dizel Motor	12
Şekil 4. Dizel motor yakıt sistemi ve parçaları	13
Şekil 5. P-v ve T-s diyagramları	13
Şekil 6. Setan cetveli	15
Şekil 7. Biyokütle üretim teknolojileri, prosesleri ve elde edilen ürünler.....	18
Şekil 8. Partikül madde boyutlarının değerlendirilmesi	23
Şekil 9. Dizel egzoz gazının bileşenleri	25
Şekil 10. Trafo yağının trafo içerisinde gösterimi.....	29
Şekil 11. Hazırlanan numunelerin görselleri	34
Şekil 12. Test motorunun ve egzoz analizörünün şematik diyagramı.....	35
Şekil 13. Tek silindirli dizel test motoru	37
Şekil 14. Testo 350 egzoz emisyon cihazına ait görsel.....	38
Şekil 15. Elektronik kontrol ünitesine ait görsel	38
Şekil 16. Yanma ve tork oluşumu	39
Şekil 17. TD20 numunesinin TG and DSC eğrileri	43
Şekil 18. Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve karışımlarının kızılötesi spektrumları.....	44
Şekil 19. Standart dizel ve atık trafo yağının distilasyon eğrileri	46
Şekil 20. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki tork değerleri.....	47
Şekil 21. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki fren gücü değerleri	48
Şekil 22. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki BSFC değerleri	49
Şekil 23. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki CO emisyon değerleri	50
Şekil 24. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki NO emisyon değerleri	51
Şekil 25. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki NOx emisyon değerleri.....	52
Şekil 26. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki egzoz gazı sıcaklıkları.....	53

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

°C	Sıcaklık
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ATY	Atık Trafo Yağı
BD	Rafine Edilmiş Atık Trafo Yağı
BP	Fren Gücü
BSFC	Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
BTDC	Before Top Dead Center
BTE	Fren Termal Verim
CA	Crank Angle
CCWTO	Katalitik Parçalanmış Atık Trafo Yağı
CeO₂	Seryum oksit
CH	Hidrokarbon
CH₂	Metilen
CH₃	Metil Grubu
CI	Sıkıştırma İle Ateşlemeli Motor
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
D100	%100 Euro Dizel
DAYTAM	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
dev/dak	devir/dakika
DI	Direkt Enjeksiyonlu
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi
EGT	Egzoz Gazı Sıcaklığı
EN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi Analizi
g/cm³	gram/santimetreküp
g/kWh	gram/ kilowattsaat
HC	Hidrokarbonlar
HCF	Hidrokarbon İçerikli Yakıt
Hu	Yakıt Alt Isıl Değeri

ID	Ignition Delay
kJ/kWh	kilojoule/kilowatt saat
kWh	kilowatt saat
mL	mililitre
mm²/sn	milimetrekare/saniye
Mn	Mangan
my	Kütlesel Yakıt Debisi
Nm	Newtonmetre
NO	Azot monoksit
NO_x	Azotoksit
ÖTATY	Ömrünü tamamlamış Atık Trafo Yağı
P_{max}	Maksimum silindir basıncı
PO30Bu20CN1	%30 atık pirolitik yağ, %20 bütanol,%50 dizel yakıt
ppm	Parts Per Million
rpm	devir/dakika
RWTO	Rafine Atık Trafo Yağı
SO₂	Kükürtdioksit
T	Tork
T100	%100 Atık Trafo Yağı
TD	Atık Trafo Yağı ve Dizel yakıt Karışımı
TD10	%10 atık trafo yağı, %90 euro dizel yakıt
TD20	%20 atık trafo yağı, %80 euro dizel yakıt
TD30	%30 atık trafo yağı, %70 euro dizel yakıt
TD40	%40 atık trafo yağı, %60 euro dizel yakıt
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TG	Tutuşma Gecikmesi
TGA	Termogravimetrik Analiz
TWTO	Transesterlenmiş Atık Trafo Yağı
WCO	Waste Cooking Oil
wf	Sürtünme Kuvvetinin Yaptığı İş
ZnO	Çinko Oksit
ρ_y	Yakıt Yoğunluğu

GİRİŞ

18 ve 19.yy daki yeni icatlar ile birlikte farklı bir çizgiye taşınan enerji ihtiyacı, modern hayatın teknolojiyle birlikte gelişmesiyle gün geçtikçe daha da artmış ve ilerleyen dönemlerde daha da artacağı bilinmektedir. Bu nedenle enerjiye ihtiyaç duyulan her alanda; tasarruf yapmak, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji üretmek, yeniden dönüşümü yapılarak atık maddelerden enerji üretimi sağlamak için yapılan araştırmalar hız kesmeden artmaktadır.

Üretimi fosil kaynaklardan gerçekleştirilen petrol ve türevi maddeler rafine edilerek içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmaktadır.

Elektriksel yalıtım özelliği ile yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilme yeteneğine sahip olan trafo yağları transformatör çekirdeğini ve sargılarını korur. Petrolden çeşitli işlemler neticesinde ve damıtma ile üretilen trafo yağları, yüksek dielektrik dayanımına, düşük elektrik kayıplarına, daha iyi kimyasal kararlılığa, daha yüksek akma noktası ve düşük viskozite gibi transformatör uygulamaları için birçok kimyasal, elektriksel ve fiziksel özelliklere sahiptir (Heathcote, 2007). Yakıt olarak kullanılabilecek kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olan bu madeni yağlar, asıl kullanım fonksiyonlarını tamamlayarak atık hale gelmektedir ve çevreye verebileceği zararın önüne geçebilmek için uygun teknolojiler kullanılarak bertaraf edilmesi gerekmektedir (Anonim, 2009). Ülkemizde bu yağların atık olarak yılda 30.000 ton'a kadar ulaştığı tahmin edilmektedir (Gedik, 2012).

Bu çalışmamızda dizel motorlarda kullanılan motorinin belli oranlarda artık trafo yağı ile homojen bir şekilde karıştırılarak elde edilen karışım yakıtın karakteristik özellikleri ve bu yakıtın motor performans değerleri egzoz emisyon değerleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenerek alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Deneyler tek silindirli bir dizel motorunda dizel yakıtı ile %10 %20 %30 ve %40 oranında atık trafo yağı karıştırılarak elde edilen yakıtın 1000- 1500-2000 ve 2500 dev/dak hızlarda yakılarak üretilen güç, tork, egzoz emisyon değerleri, egzoz gazı sıcaklığı ve efektif yakıt sarfıyatı na etkisi incelenmiştir.

Çalışmamızın önemi; önümüzdeki yıllarda fosil kaynaklı petrol ve türevi maddelerden üretilen yakıtların tüm dünyadaki arzı karşılayamayarak tükeneceği bilinmektedir. Bu mevcut yakıtların kullanımını azaltmak ve sınırlı kaynakları daha uzun süre daha verimli kullanabilmek

için atık maddelerden yeni yakıt alternatiflerini test ederek mevcut yakıt kaynaklarına olan arzı azaltabilmek ve ömrünü tamamlamış atık maddelerin enerji olarak geri dönüşümünü sağlayabilmektir.

Konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasında dizel motorda kullanılmak üzere genelde standart dizel yakıtı ile alternatif olarak kullanılabilecek ürünün karışımları denenmiştir. Bu ürünler genel olarak etanol metanol gibi alkol bazlı ürünler, hayvansal ve bitkisel bazlı biyodizel ürünler, yanıcı özelliği olan ve çeşitli sektörlerde kullanılarak fonksiyonunu tamamlamış kullanılmış atık yağlar gibi yenilenebilir enerji olarak geri dönüşümü sağlanabilir maliyet etkinlik yaratabilecek ve çevreye zararı daha az olabilecek ürünlerdir. Örneğin, araştırmacılar biyodizel yakıt arayışlarında ekonomiyi de yerelleştirebilmek adına kendi yaşadıkları bölgelerde bulunan yerel bitki ve hayvansal biyokütleleri kullanmışlardır. Bu yakıtları kullanım ihtiyacına göre tarım makineleri motorları, ağaç kesme motorları, jeneratörler, araba motorları gibi sistemlerde kullanılabilirliği yönünden bu sistemlerin çalışma prensiplerine göre test etmişlerdir. Sonuçta birçok farklı ürün ve karışımın saf olarak veya kimyasal iyileştirmeler yapılarak dizel motorlarda kullanılabileceğini, motor performansı ve egzoz emisyonu yönünden olumlu sonuçlar sağladığını tespit etmişlerdir. Literatürde atık trafo yağı gibi farklı endüstriyel alanlarda kullanılarak ömrünü tamamlayan madeni yağlar veya enerji potansiyeline sahip petrol bazlı atık maddelerin geri dönüşümünden elde edilen yağlardanda alternatif yakıt olarak üretilen ürünlere ait araştırmalar bulunmaktadır.

Konu ile ilgili olarak literatürde yapılan araştırmalara yönelik incelemeler aşağıda sunulmuştur.

Oral *et al.* (2022) yaptıkları çalışmada, 5000 W sabit yük altında çalışan dizel motorlu bir jeneratörde sabit miktarda kullanılmış motor yağlama yağı ile farklı miktarlarda, değişik alkol türleri ilave ederek oluşturulan karışımların yakıt tüketimi ve emisyon sonuçlarını belirlemişlerdir. Yapılan deneysel inceleme neticesinde özgül yakıt tüketiminin alkol ilavesi ile artış gösterdiği, dizel-atık yağ karışımına alkol ilavesi ile ölçülen CO, HC ve is emisyonlarında ise azalma olduğu gözlemlenmiştir.

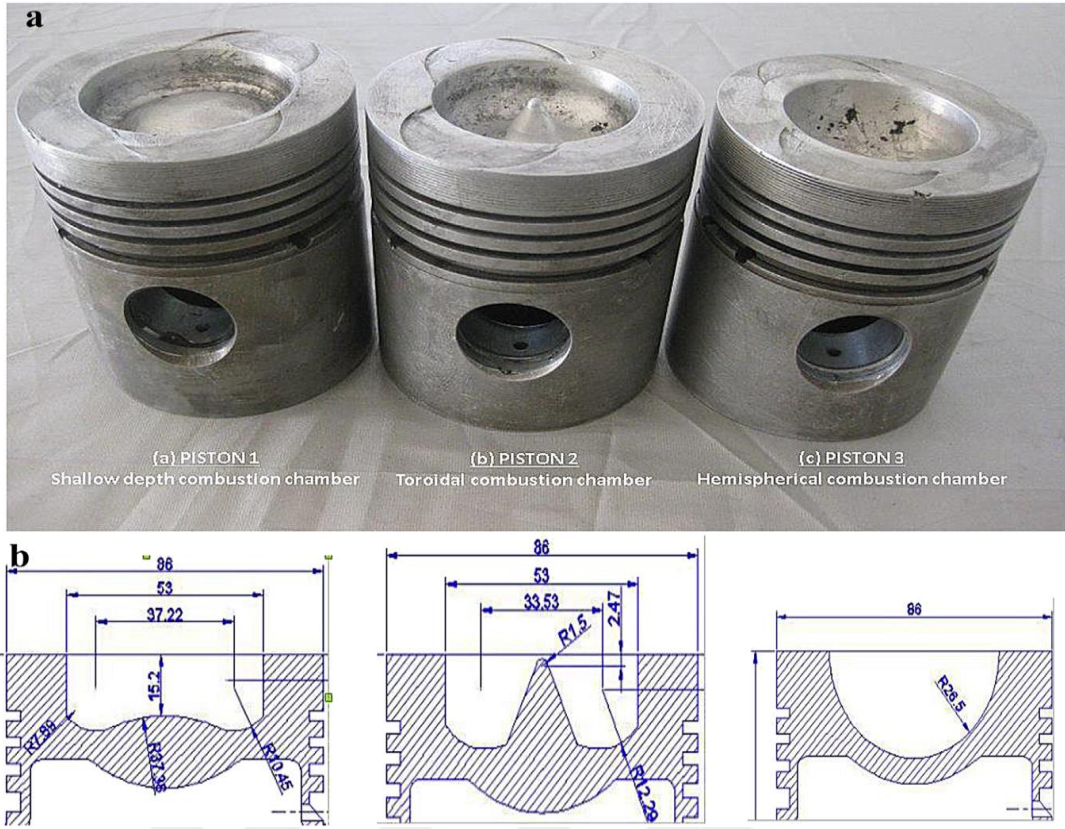
Arpa *et al.* (2019) tarafından, atıkların geri dönüşümünü çevreye zarar vermeden gerçekleştirebilmek amacıyla yaptıkları çalışmada atık hale gelmiş yağlama/motor yağından (DBY) pirolitik distilasyon metoduyla üretilen yakıt, daha sonra hacimsel olarak % 60, % 40 ve % 20, oranlarına göre normal dizel yakıtına eklenerek, tek silindirli dizel bir motorda yakıt olarak denenmiştir. Deney sonucunda motor devri yükseldikçe CO emisyonunun tüm karışımlar için artış gösterdiği, CO₂ emisyonlarının normal dizele göre numuneler için daha düşük olduğu, 2500dev/dak hızda %20DBY-%80 motorin karışımından oluşan yakıt hariç

olmak üzere bütün NO, NOX egzoz emisyon değerlerinin normal dizel yakıttan düşük çıktığı, %40DBY - %60Dizel karışımının tüm farklı hız ölçümlerinde dizel yakıttan daha yüksek HC emisyonu ürettiği, %20DBY-%80 dizel karışımli yakıtın ise tüm farklı hızlardaki ortalamalar baz alındığında dizel yakıttan daha az HC emisyonu ürettiği test edilmiştir.

Pramod *et al.* (2022) yaptıkları çalışmada, dizel yakıt ve işlenmiş trafo yağının farklı oranlardaki (%10, %20, %30 ve %40) karışımlarından elde ettikleri yakıtın dizel bir motorda yakılmasıyla; karışımların fren ısı verimlerinin düşüş eğiliminde olduğunu, frene özgü yakıt tüketimlerinin ise (%10, %20, %30 ve %40) karışım oranlarına göre sırasıyla artış eğiliminde olduğunu göstermişlerdir.

Prasanna *et al.* (2015) çalışmalarında atık trafo yağının (WTO), atık uçucu külün katalizör olarak kullanıldığı katalitik kırma (yüksek kaynama noktalı hidrokarbonlar, kısa zincirli düşük kaynama noktalı hidrokarbonlar çevrilir) işleminden geçirilerek hazırlanan, katalitik olarak parçalanmış atık trafo yağının (CCWTO) dizel bir motorda yakıt olarak kullanımını test etmişlerdir. CCWTO ile dizel yakıtın hacimsel olarak belli oranlarda karışımı ile yapılan deneylerde; %50 CCWTO-%50 Dizel karışımli yakıtın normal dizel yakıta göre fren termal verimi ve en yüksek ısı yayma oranında %7,4 bir artış ile motor performans ve yanma özelliklerinde faydalı olduğunu aynı zamanda da, CO, HC emisyonlarında da %13,2 oranında azalma olduğu nu deneysel olarak test ederek göstermişlerdir.

Prasanna *et al.* (2015) yaptıkları çalışmada, atık trafo yağının vizskozitesini düşürmek için kimyasal işleme tabi tutarak (konsantre sülfürik asit ile ön işleme tabi tutarak, alkali bir katalizör ile alkalın trans-esterleştirmeye tabi tutulur.) hidrokarbon içerikli yakıt (HCF) elde etmişlerdir. Bu elde edilen yakıtı ise yanma çanağı modifiye edilerek; sığ derinlikli yanma odası olan (piston-1), toroidal yanma odası olan (piston-2) ve yarım küre yanma odası olan (piston-3) olmak üzere üç yanma çanağı geometrisine sahip dizel bir motorda normal dizel yakıtı ile farklı hacimlerde karıştırarak test etmişlerdir. Deney sonuçlarında özellikle piston-2 tasarımı dizel motorunda HCF – %25 ve dizel – %75 karışımli yakıt ile fren termal verimin %10,2 artış gösterdiği, açık dudaklı piston-2’ nin türbülansı zenginleştirdiği, böylece hava/yakıt karışım sürecini arttırarak fren termal veriminde iyileşme olduğunu, %100 HCF yakıtın her üç silindir tipinde de HCF25 ve D100’ e göre CO emisyonunda azalış olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 1. Farklı yanma çanakları olan piston çeşitleri (Prasanna *et al.* 2015)

Nabi *et al.* (2013) araştırmalarında atık trafo yağı (WTO) ve rafine edilmiş atık trafo yağı RWTO ile hacimsel olarak belli yüzdelerde dizel karışımlarından hazırladığı WTO-10 (WTO 10 % ve Dizel 90 %), WTO-15 (15% WTO ve Dizel 85%), WTO-20 (20% WTO ve Dizel 80%) RWTO-20 (RWTO 20% ve Dizel 80%), RWTO-15 (RWTO 15% ve Dizel 85%), RWTO-10 (RWTO 10% ve Dizel 90%) yakıtları sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanılmasının uygunluğunu araştırmıştır. Yaptıkları deneylerde; fren özgül yakıt tüketiminin motor yükünün azaldıkça tüm karışımlarda azaldığını, atık trafo yağı-dizel (WTO-10-15-20) karışımlarının, dizel yakıta göre daha düşük olduğunu, rafine edilmiş atık trafo yağı karışımların (RWTO) ise WTO karışımlardan da daha düşük olduğunu, egzoz gazı sıcaklıklarının ise fren gücü arttıkça artış eğiliminde olduğunu ve farklı fren güçlerinde RWTO > WTO > dizel olduğunu göstermişlerdir.

Sethuraman *et al.* (2022), çalışmalarında Atık Yemeklik Yağ (WCO-Waste Cooking Oil) ve Atık Trafo Yağı (WTO-waste transformer oil) ile Hindistan cevizi kabuğu aktif karbon kullanılarak hem WTO hemde WCO ile %20B-%80D, %40B-%60D oranında karışımlar hazırladılar. Elde edilen yakıt karışımları direk enjeksiyonlu, su soğutmalı ve tek silindirli dizel motorunda kullanılarak test edildi. Sonuçta atık trafo yağı ve atık yemeklik yağ için %20 dizel ile karıştırılan yakıt ürünlerinde artan fren gücü ile birlikte Fren Termal Verimde (BTE) artış ve Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC) ölçümlerinde düşüş, CO - CO₂ - HC emisyon

değerlerinde azalma ve NO_x üretiminde ise yükselme olduğu ve B20 WCO karışımının en yüksek Fren Termal Verimi değerini elde ettiğini gösterdiler.

Dabi *et al.* (2022) deneysel çalışmalarında; enerji ihtiyacını yerleştirmek amacıyla kırsalda sulama ve elektrik üretiminde kullanılan bağımsız sıkıştırma ateşlemeli dizel motorlarda yine bölgede yetişen Demir Ağacı, Hint Kestane Gülü olarak bilinen latince ismi Mesua Ferrea olan ağaçtan elde edilen biyokütle bazlı bitkisel yağın yakıt olarak kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Deneylerinde %20 Mesua Ferrea-%80Dizel (MF20) karışımı hazırlayarak bu yakıtta %5 ve % 10 oranlarında etanol ilave etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre MF20 karışıma kıyasla %5 etanol karışımı (MF20E05) ile Fren Termal Veriminin %3,5 arttığı, CO emisyonunun %34'e kadar azaldığı, NO_x emisyonunun ise %57'ye kadar azaldığı, HC emisyonunun yaklaşık %19 kadar arttığı ve %10 etanol karışımı (MF20E10) ile Fren termal veriminin %1-4 oranında arttığını, HC emisyonunun ise %9 oranında arttığını ortaya koymuşlardır.

Prasanna *et al.* (2015) çalışmalarında, standart ve geciktirilmiş enjeksiyon zamanlamalı Trans-esterlenmiş (alkoliz işlemi olarak da bilinir, trigliseridlerin viskozitesini azaltmak için kullanılır.) atık trafo yağından (TWTO) elde edilen yakıtın yanmasında enjeksiyon zamanlamasının etkilerini araştırılmıştır. Enjeksiyon zamanlaması 23° bTDC'den 20° bTDC'ye geciktirildiğinde;

- Trans-esterlenmiş atık trafo yağının (TWTO) motor performansı açısından uygun bir şekilde dizel motorlarda alternatif yakıt olarak değerlendirilebileceğini,
- Trans-esterlenmiş atık trafo yağının FTIR analizi sonuçlarına göre, normal dizel yakıtına benzer özelliklerde olduğunu,
- Fren termal verimliliğinde azda olsa bir iyileşme gösterdiğini,
- Sabit hızlı dizel bir motorda daha yüksek is olmasına rağmen termal veriminde artış gözlemlendiğini,
- TWTO ile egzoz emisyonlarında genel bir azalma olduğunu,
- Maksimum yük altında HC (hidrokarbon), NO_x, Karbon Monoksit (CO), emisyonlarında sırasıyla %10, %17,24, %11,57 oranında azalmanın gerçekleştiği görülmüştür.

Ajay *et al.* (2020) çalışmalarında; öncelikle Atık Trafo yağının karakteristik özelliklerini belirleyerek rafine atık trafo yağı (BD) ile çeşitli karışımlar hazırlamış ve bu karışımları dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanarak motor performansı üzerinde çeşitli etkilerini test etmişlerdir. Deneyleri 1500 dev/dak sabit hızda, bir silindire sahip dizel motor ile gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta D100 baz alınarak yapılan karşılaştırmada, tüm farklı yük

koşullarında B30 karışımının en düşük oranda CO, HC, Duman opaklığı emisyon değerlerine ulaştığı, en yüksek seviyede CO₂ emisyonu ürettiği ve normal dizele göre sabit seviyede NO ürettiği gözlemlenmiş ve B30 karışımının diğer yakıt karışımları içinde en iyisi olduğu değerlendirilmiştir.

Yıldız (2019) yaptığı çalışmada; Atık Trafo Yağı ile standart dizel yakıtını %20, %40, %60 ve %80 oranlarında harmanlayarak elde ettiği karışımları direk püskürtmeli dört silindir, dört zamanlı, dizel motorlu jeneratörde sabit hızda, değişken yük altında test etmiştir. Deneysel veriler sonucunda, dizele göre karışım yakıtlarının kullanımıyla özgül yakıt tüketiminde %38 oranında düşüş olduğu, efektif verimin %39 artış sağladığı, HC ve NO_x emisyonlarında azalma olduğu, max.silindir basınç değerinin arttığını, yanma işleminin daha geç başladığını ve ortalama gaz sıcaklığının daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Sathiyamoorthi *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada, limon otu yağını normal dizelle çeşitli oranlarda karıştırarak biyodizel elde etmiş ve %2,5 ve %5 etanol konsantrasyonları ile karışımlara son halini vermiştir. Etanol kullanımı ile beraber BSFC, BTE, NO_x emisyonunda artış olduğu, ve yine etanol kullanımı ile birlikte duman ve HC emisyonlarında düşüş olduğunu tespit etmişlerdir.

Ortega *et al.* 2021, tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, biyodizel / dizel karışımlarında katkı maddesi olarak etanol kullanılmasının motor ısı verimini artırdığını kaydetmiştir. Biyodizel/ Dizel karışımı yakıtı %2 ve %4 oranlarında etanol ilave edilmesiyle birlikte ısı verim sırasıyla %0,8 ve %1,2 oranında artmaktadır. Egzoz gazı analizine göre ise CO, NO_x, HC, CO₂, emisyonlarında ve duman opaklığında azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Akboğa (2022) yapmış olduğu araştırmada farklı elektriksel yüklerle yüklenebilen bir jeneratörde standart dizel yakıtı, biyoetanol ve biyodizel karışımlarının efektif verim, özgül yakıt tüketimi, NO_x ve HC emisyon değerleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan deney ve gözlemler neticesinde elde edilen verilere göre; Dizel yakıt ile Etanol karışımı yakıt karşılaştırıldığında biyoetanol yakıtın özgül yakıt tüketimi %9-11 oranlarında daha düşük olduğu, ölçülen efektif verimin %6 arttığı, biyodizel yakıt kullanımında ise özgül yakıt tüketiminin %10-11 civarında daha yüksek olduğu, ölçülen efektif verimin ise kayda değer bir oranda değişiklik göstermediği sonuçlarını tespit etmiştir. Ayrıca, CO ve NO_x emisyon değerlerindeki değişimle ilgili olarak %10 etanol karışımının yük 3,6 kW olduğunda en yüksek HC emisyonu ürettiği, 10,2 kW yükte en yüksek HC emisyonunu dizel yakıtın yakılmasıyla üretildiği, elde edilen en büyük NO_x emisyonunun 3,6kW lık yüklemde dizel yakıt tarafından üretildiği, 10,2 kW yükte ise en yüksek NO_x emisyonunun %30 Biodizel-%70 Dizel karışımı yakıt tarafından üretildiği sonuçlarına ulaşmıştır.

Altun *et al.* (2007) çalışmalarında ülkemizin en önde gelen tarımsal ürünlerinden birisi olan fındık bitkisi yağının biodizel yakıt olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneylerde bir silindirli dizel motorda yakmak üzere fındık yağından üretilmiş biyodizel test etmişlerdir. Yüksek viskozite değerine sahip olan fındık yağında viskozitesiyi düşürmek için, ayrıca büyük viskozite değerlerinin neden olabileceği değerlendirilen çeşitli sorunları önleyebilmek amacıyla, saf fındık yağ üzerine hacimce % 25, % 50, % 75 dizel yakıt eklenerek farklı karışım yakıtlar elde edilmiştir. Elde edilen fındık yağı / Dizel karışımlarının test edilmek üzere yakıt olarak kullanılarak, farklı motor hızlarında ve farklı yükler altında motor performansına etkileri ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlara göre ise karışım (fındık yağı/dizel) yakıtlarından elde edilen motor gücü ve motor momentinin standart dizele ait verilerden düşük, BSFC'nin ise dizele göre yüksek çıktığını belirtilmiştir.

Sürer *et al.* (2022) yaptıkları çalışmada; Bir çok ülkede alternatif yakıt olarak kullanılan biodizel yakıtın yüksek viskozite değeri nedeniyle daha iyi bir yakıt olarak kullanımı için çeşitli eklentiler yapıldığını, bir çok araştırmada transesterifikasyon yönteminin uygulandığını belirterek, karbon nanotüp (Karbon nanotüp-MWCNT katı toz halinde , koyu siyah renkli ve saflığı> %96'dır. Dış çap 4-16 nm, iççapı 2-6nm, uzunluk 15-35µm'dir. Özgül yüzey alanı ise 240 m² /g'dır.) katkı maddesini-dizel- biyodizel karışımından elde edilen yakıtın direkt enjeksiyonlu ve dizel tek silindirli motorda yakılmasıyla elde edilen performans ve egzoz emisyonlarına ait değerleri incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre en yüksek termik verim değerinin 100 PPM değerinde nanotüp katkılı yakıtta %39,3 olarak ölçüldüğü, nanotüp katkılı yakıtın yanma başlangıcını öne çektiği, HC emisyonunu %26 azalttığı, CO emisyonunu %20 azalttığı, is emisyonlarını %7,9 azalttığı, NOx emisyonunu %11 oranında artırdığı sonuçlarını tespit etmişlerdir.

Öner *et al.* (2023), çalışmalarında atık araç lastiklerinin geri dönüşümünden sağlanan ham prolitik yağ ile harmanlanan değişik miktarlardaki dizel-bütanol karışımlarını dizel bir motorda test ederek motor performans ve emisyon değerleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Motor deneyi 1500 ve 2000 d/dak' da iki farklı hızda ve 0 - 12,5 – 25 - 37,5 - 50 Nm motor yüklerinde, 7 farklı karışım ile yapılmıştır. Hazırlanan karışımların dizel oranı hacmen %50 olacak şekilde sabitlenerek değişik oranlarda prolitik yağ ve bütanol eklenmiş ve ayrıca her karışıma %1 oranında setan sayısı iyileştirici eklenmiştir. Deneyler neticesinde, %50PO+%50D karışımında bile motorda vuruntusuz bir çalışma gözlemlendiği, karışımlarda bulunan bütanolün düşük setan indisi değeri nedeniyle NOx emisyonunda genel olarak azalma , bütanolün %10'dan yüksek olduğu karışımlarda silindir içi basınçla birlikte sıcaklık artışından dolayı NOx emisyonunda artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca özgül yakıt tüketiminin en fazla

PO30Bu20CN1 karışımında, en az ise D100 ile gerçekleştiği, en düşük fren termal verimi değerinin 1500 ve 2000 rpm hızlarda sırayla % 8.28 ve %6.72 ile PO30Bu20CN1 karışımından elde edildiğini göstermiştir.

Canbaz (2022), çalışmasında buji ateşlemeli bir motorda standart dizel yakıtına alternatif olarak kenevir yağından elde ettiği biodizel yakıtı kullanmıştır. %10 Kenevir Tohumu Yağı-%90 dizel ve %20 Kenevir Tohumu Yağı-%80 Dizel olmak üzere 2 tip karışım yakıt hazırlamıştır. Deneylerini 0,5 kW-3 kW aralığında farklı yükler ile yaparak %100 dizel yakıt ile hazırladığı karışımlar arasındaki fren özgül yakıt tüketimi (BSFC), Fren Efektif Verimi (BTE), HC, CO, NOX, İS, O₂, CO₂ emisyon değerlerinin tespitini yapmıştır.

Üstün (2021), çalışmasında hacimsel olarak %10 atık fuzel yağı ve %90 dizel yakıtından oluşan karışım yakıtı içine 8ppm, 12ppm ve 16ppm organik reçine esaslı mangan ilave etmiştir. Hazırlanan yakıtların; T, BP, BSFC, EGT ve CO, HC, NO_x ve CO₂ üzerine etkilerini detaylı bir şekilde araştırmıştır. Sonuçlar dizel yakıt ile kıyaslanmıştır. 12ppm Mn ilave edilen karışım yakıtının, %10fuzel yağ+%90 Dizel karışımı ile 8ppm ve 16ppm Mn ilaveli numunelere kıyasla T ve BP değerlerinde dizele yakın değerlere ulaşıldığı, EGT' yi düşürdüğü, ortalama CO₂ değerinde, %13,17, NO_x değerinde ise %17,02 azalma sağladığını göstermiştir.

Behçet and Eroğlu (2021), çalışmalarında, petrol kökenli atık plastik maddelerin geri dönüşümünden elde edilen sıvılaştırılmış ürünü dizel motorlarda yakıt olarak test etmişlerdir. Plastik şişe ve kapaklarından oluşan atık plastik maddeleri sıvılaştırmak için piroliz proses tekniğini kullanılmışlardır. Test yakıtı olarak “%20 piroliz sıvısı + %80 Dizel karışımı” ile %100 dizel yakıtı, su soğutmalı, tek silindirli dizel bir motorda test edilmiş ve yakıtların motor performansı ve emisyonları kıyaslanmıştır. Yapılan deney neticesinde “%20 piroliz sıvısı + %80 Dizel karışımı” yakıtın kullanılmasıyla motor moment ve motor gücü değerlerinde dizele göre azalma gerçekleşirken, BSFC değerlerinde ise artış görülmüştür. Ayrıca, karışım yakıtın CO, HC ve CO₂ emisyonları dizele nazaran artış gösterirken, NO_x emisyonunda azalış olduğunu ortaya koymuşlardır.

KURAMSAL TEMELLER

İçten Yanmalı Motorlar

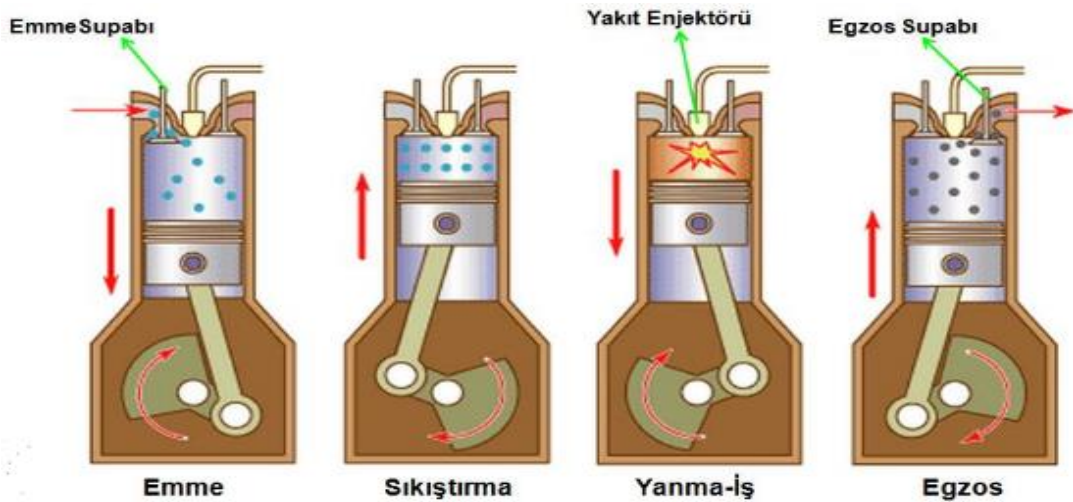
Bir enerji girdisini mekanik enerjiye çeviren makineye motor denir.

İçten yanmalı motorlar ise; işletme akışkanının önemli bir kısmının çevrimi müteakip sistemden dışarı atıldığı yanma ürünlerinden oluşan, hava yakıt karışımının silindir içerisinde tuttuğu, sonuç olarak basınç enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü motorlardır (Borat et al. 1995).

Kullanılabilirliği, uygulanabilirliği, ekonomik ve sağlam yapıları nedeniyle piston uygulamalı motorlar en çok kullanılan içten yanmalı motorlardır. Bu motorlar termodinamik çevrim tipine ve yakıt çeşidine göre değerlendirilirler (Kılıç, 2004).

İlk piston uygulamalı içten yanmalı motor “Street” tarafından 18.yy da üretilmiştir. Silindirin hareketini sağlamak için gerekli ısıyı ocak vasıtasıyla elde etmiş, terabantin esansı kullanarak ocağın yakıt ihtiyacını karşılamıştır. Piston levye ile yukarı kaldırılarak havayı silindire dolmasını sağlamıştır. Piston kafasına bir delik açarakta buraya temas ettirilen bir alev vasıtasıyla yanmanın gerçekleşmesini yukarı hareketi sağlamıştır. Soğutmayı ise su ile gerçekleştirmiştir (Küçükşahin, 1990).

Basınç artışı nedeniyle, kendiliğinden ateşleme yapan motorlar dizel motor, bir buji vasıtasıyla ateşlenerek yanmanın sağlandığı motorlarda Otto çevrimli motorlar denilmektedir (Grohe, 1999).



Şekil 2. Dört zamanlı dizel motor (www.otomobilteknoloji.blogspot.com)

İçten yanmalı motorların sınıflandırılması

Tablo 1. Çeşitli özelliklerine Göre Motorların Türleri (Borat vd, 1995)

1.	Strok Sayısına Göre	:	*	4 Stroklu
		:	*	2 Stroklu
2.	Termodinamik Çevrim Türüne Göre	:	*	Yanmanın Sabit Hacimde Olduğu (Otto)
		:	*	Yanmanın Sabit Basınçta Olduğu (Diesel)
		:	*	Yanmanın Kısmen Sabit Hacim Kısmen Sabit Basınçta Olduğu (Seilinger)
3.	Isı Enerjisini Mekanik Enerjiye Dönüştürme Prensibine Göre	:	*	Öteleme hareketli pistonlu motorlar (2 ve 4 zamanlı dizel ve benzinli motorlar)
		:	*	Döner pistonlu motorlar (yanma gazları pistonu sadece dönme hareketi verir)
4.	Karışım Teşkiline Göre	:	*	Hava Yakıt Karışımının Silindir Dışında Oluşturulması
		:	*	Hava Yakıt karışımının Silindir İçinde Oluşturulması
5.	Soğutma Şekline Göre	:	*	Sıvı Soğutmalı
		:	*	Hava Soğutmalı
6.	Yağlama Prensibine Göre	:	*	Yakıtı yağ karıştırmak
		:	*	Çarpmalı yağlama
		:	*	Cebri pompalı yağlama
7.	Kullanılan Yakıtı Göre	:	*	Sıvı Yakıtlı (Benzin, Motorin, Kerozen, Alkol, Bitkisel Yağ)
		:	*	Gaz Yakıtlı (Doğal Gaz CNG, LPG)

Tablo 1. (devamı)

8. Silindir Tazına G6re	Yerleřtirme	:	*	Tek silindirli motor
			*	Sıra Tipi motor
			*	V motor
			*	Karşı silindirli (Boxer) motor
			*	W motor
			*	Karşı pistonlu motor
			*	Yıldız (radial) motor
			*	H motor
9. Yanma Odasının şekli ve S6bapların Yerleřimlerine G6re		:	*	T kafası, L yada ricardo kafası, F kafası, 6çgen çatı kafa, I yada CFR standart, Yarı k6resel kafa, Oyuk pistonlu
10. Taze Dolgunun Silindirlere Doldurulma şekline G6re		:	*	Doğal Emiřli
			*	Aşırı Doldurulmalı

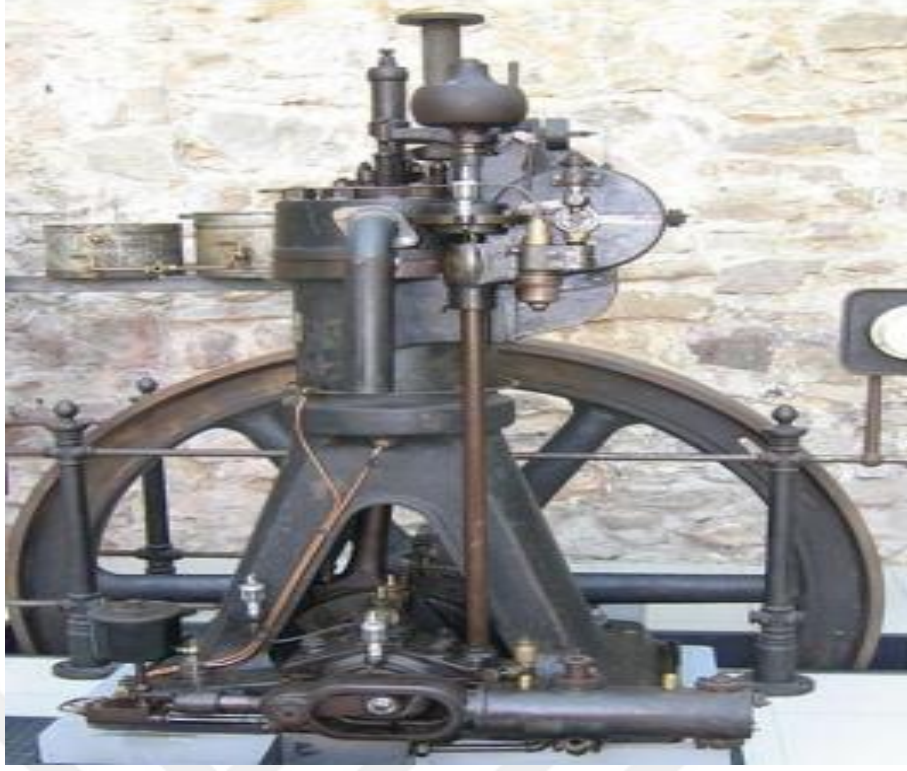
Yukarıda sıralanan ilk 3 madde haricindeki sınıflandırmalar temel olmayıp, motor ve motor yardımcı sistemlerinin mekanik detayları ve bu sistemlerin cinsine bağlı olarak yapılan sınıflandırmalardır (Borat vd., 1995).

Dizel motorlar

Dizel motor ilk kez isim babası da olan Alman m6hendis “Rudolf Diesel” tarafından 1892 yılında tasarlanmış ve akabinde 1893 yılında ise “İçten Yanmalı Kuvvet Makinelerinin Çalışma şekli ve İmalatı” çalışması ile patentlenmiştir (Yardım, 2015).

Rudolf Diesel, 6lkesinin petrole olan ihtiyacını azaltmak ve Almanyanın b6y6k k6m6r rezervlerinin kullanımını artırmak için yakıtı k6m6r olan motor yapmayı planlamıştır. Ancak çalışmalarının neticesinde k6m6r tozu yanması nedeniyle açığa çıkan k6l ciddi bir problem olmuştur. Bu nedenle k6m6r dışında yakıtlar kullanmayı d6ř6nm6řt6r. Rudolf Diesel, tasarladığı motorun tanıtımını 1900 yılındaki Paris D6nya Fuarında yer fıstığından 6rettiği yağdan elde ettiği biyodizel yakıt ile gerçekleştirmiştir (elik,2014).

Elde edilen verimlerin y6ksek olması ve kullanılabilcek yakıtların ucuz olması, diesel motorların lokomotif, gemi, iř makineleri, b6y6k kara araçları, arazi araçları, enerji çevrim santralleri vb. y6ksek g6ce ihtiyaç duyulan sistemlerde kullanımları yaygınlaşmıştır (engel ve Boles, 1996).



Şekil 3. 1906 Yılı İmalî Tek Silindire Sahip Dizel Motor (Çelik, 2014)

Dizel motorların yakıt sistemi

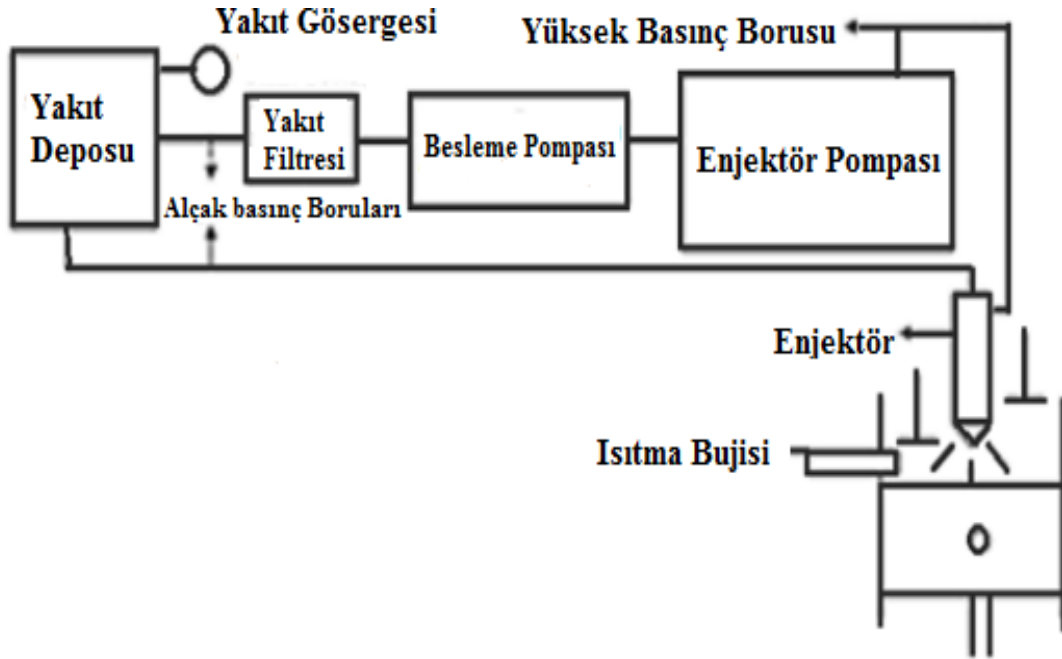
Yakıt sisteminin temel vazifesi yakıtı sıkıştırma zamanının bitiminde silindir hacmine püskürtmek ve yanma olayını sağlamaktır. Sistem; pompa ile yakıt deposundan emilen yakıtın enjektör pompasına gelerek, enjektöründe silindir hacminde sıkıştırılan, ısıtılan taze hava üstüne yakıtı püskürterek yanmayı sağlamak üzere görevini yerine getirir (Çelik, 2014).

Dizel motorlarda yakıt püskürtme işlemi direk silindir hacmine gerçekleştirilir. Yakıtın belli bir zamanda, belirli bir debide belirli bir miktarda yanma odasına püskürtülmesi gerekmektedir. Yakıtın yanma odasında parçalanıp damlacıklara ayrılması, yanma odasında homojen olarak dağılması ve buharlaşması motor performansını önemli derecede etkiler. Bu duruma etki eden en önemli sistemde motor yakıt püskürtme tertibatıdır (Borat *et al.*, 1995).

Dizel yakıt püskürtme sistemi ve genel parçaları:

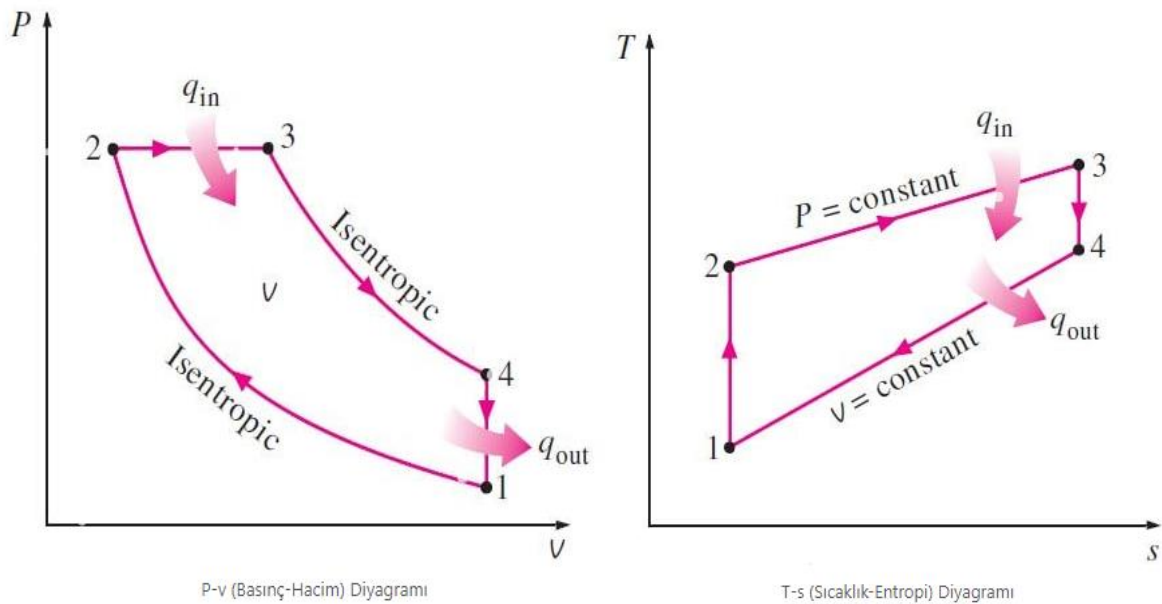
- 1- Depo,
- 2- Yakıt İbresi,
- 3- Sevk (transfer) pompası: Depodan aldığı yakıtı filtrelerde meydana gelecek basınç kaybınıda yenecek şekilde enjektör pompasına gönderir
- 4- Yakıt filtresi: Depo ile sevk pompası arasında veya hem burada hemde sevk pompası ile yakıt pompası arasında bulunurlar. İki yada üç kademe olabilirler.
- 5- Mazot-su ayırıcısı: sistemde bulunabilecek suyu ayırır.

- 6- Mazot-enjektör pompası: Yakıtın basıncını artırarak enjektörlere sevk eder.
- 7-Hava filtresi: Yanmada kullanılacak havanın motor içine girmeden önce filtrelenmesini sağlar
- 8- Yüksek basınç boruları: Yakıtın pompadan enjektörlere ulaşmasını sağlarlar.
- 9- Enjektörler: Dizel yakıt sisteminin sonlandırıcı parçalarıdır. Gerekli miktarda yakıtı yanma odasının içerisine püskürtürler. parçalarından oluşur (Çelik, 2014), (Borat et al. 1995).



Şekil 4. Dizel motor yakıt sistemi ve parçaları

İdeal dizel çevrimi



Şekil 5. P-v ve T-s diyagramları (Çengel ve Boles, 1996)

1-2 : İzantropik sıkıştırma (Sabit entropide sıkıştırma) işlemi ile entropi değeri sabit kalır, sıcaklık ile basınç artarken hacimde düşerek azalır.

2-3: Sabit basınç altında ısı girişi gerçekleşir. Söz konusu hal değişimi esnasında basınç aynı kalır, hacim – sıcaklık - entropi artar. Bu hal değişimi ile birlikte sıkıştırılmış ve ısınmış havanın üstüne diesel yakıtla püskürtme yapılır ve yanmanın başlaması sağlanır.

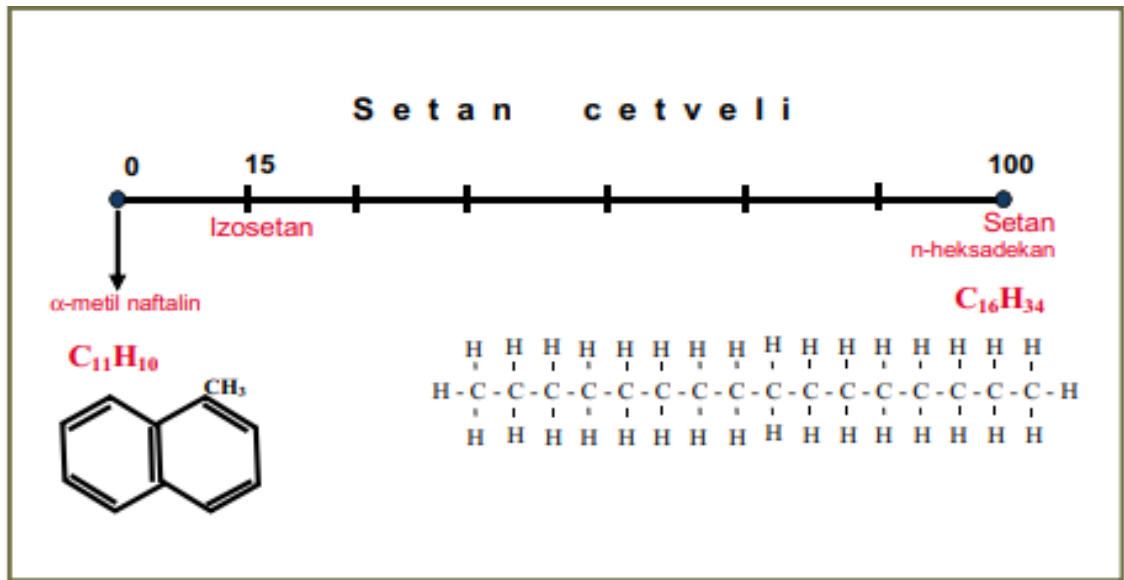
3-4: İzantropik (Sabit entropi) genişleme ile gerçekleşen hal değişimi ile piston hacmi artar, entropi değişmez, basınç ile sıcaklık azalır.

4-1: Isı çıkışının sabit hacimde gerçekleşmesidir. Bu hal değişimi ile egzoza ait gazlar dışarı atılır. Sabit hacimde, basınç, sıcaklık, entropi değerleri azalır (Çengel ve Boles, 1996).

Dizel yakıtın motor özelliklerine etkisi

Dizel motorlarda kullanılan yakıtın özelliklerine bağlı olarak motor performans değerlerinde çeşitlilikler gözlenir. Çalışma kolaylığı, gürültüsüz çalışması, ekonomik yakıt sarfıyatı, aşınma, düşük sıcaklıkta çalışabilme, düşük egzoz emisyon değerleri, güç üretimi vb. özellikler yakıt temel özelliğine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin aynı motor sadece setan sayıları birbirinden farklı değerdeki 2 yakıt ile çalıştırılırsa setan sayısı büyük olan yakıtla daha kolay çalışır. Yakıt viskozitesinin yüksek olması yanma özelliğini olumsuz etkiler ve gücün azalmasına sebebiyet verir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlar yanmadan ve mekaniksel nedenlerle ses üretir yakıt içerisindeki setan sayısının yüksekliği dizel vuruntusu denilen gürültünün azalmasını sağlar. Setan indisi de setan sayısı gibi yakıtın kendi kendine tutuşabilirliğinin bir göstergesidir. En önemli avantajı, yakıtın yoğunluk ve distilasyon değeri ile kolaylıkla hesaplanabilmesidir (Beşergil, 2009).

Setan indisi, yakıtın daha çok yoğunluk ve distilasyon değerlerinden faydalanarak hesap edilen bir terimdir. Özetle açıklamak gerekirse, yakıtın tutuşma kabiliyetini yakıtın sahip olduğu fiziksel özelliklerden yararlanılarak belirlenmesidir (Doğan et al. 2012).



Şekil 6. Setan cetveli

Setan cetveli; bilim insanları tarafından suni olarak hazırlanmıştır. Tutuşma kabiliyeti en zayıf olan hidrokarbonun (α -metil naftalin) setan sayısı 0 olarak, tutuşma kabiliyeti en yüksek olan hidrokarbonun (n-heksadekan) setan sayısı ise 100 olarak kabul edilmiştir. Bu hidrokarbonların kimyasal formülleri şekil-6’ da görülmektedir (Öcal, 2007).

Kalorifik değer, belli bir miktardaki yakıtın ne kadar enerji üreteceğini gösteren özelliktir. kcal/kg, kcal/L, kcal/m³ birimleri ile ifade edilir. Motorlarda kullanılan yakıtın kalorifik değerinin yüksek olması yanma sonrası motordan elde edilen güç ve moment gibi parametrelerin iyileşmesini sağlar.

Dizel yakıtların karakteristik özellikleri için yukarıda örnek olarak verilen kararsız parametreler nedeniyle aşağıdaki Tablo-2’ de gösterilen uluslararası standartlaştırmalar geliştirilmiştir (Beşergil, 2009).

Tablo 2. Dizel Yakıtlara Ait Bazı Karakteristik Özelliklerin Açıklamaları ve Mevcut Standart Şartlarına Göre Belirlenen Sınırları (ASTM D975 - EMA) (Beşergil, 2009)

Özellik	Açıklama	No.1	No.2	Test ASTM*
API gravite, maks.	Yüksek olması (yoğunluğun düşük olması) yakıt sarfiyatını artırır	43	39	D287
Alevlenme Noktası (°C, min.)	Dizel yakıtlarda bu özelliğin düşük değerlerde bulunması motor performans parametrelerine etki etmez. Yakıt tutuşabilme sıcaklığı yada çeşitli yanma özelliklerindeki etkilemez. Ama yakıtların güvenilir olarak taşınabilmesi, nakliyesi, dolması boşalması gibi nedenlerle alevlenme noktası min. Değerlerde olması istenir ve bu yüzden sınırlandırılmıştır.	38	52	D93

Tablo 2. (devamı)

Bulutlanma noktası, °C	Akma ve bulutlanma noktası, motorun kolay çalışması, yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymadan çalışmasına etken olan özelliklerdir. Deney tüpünü aşağı bakacak şekilde eğdiğimizde akmaya başladığı sıcaklık akma noktası olarak belirlenir. Bu değerden sonrada donma sıcaklığı noktası tespit edilir.			D2500 D4539 IP309
Distilasyon (% hacimce, °C)	Distilasyon testleri yakıtların uçuculuğu yada buharlaşma geçişi için gereken sıcaklık skalasını ifade eder..			D 86
Viskozite (40 °C)	Yakıtlar, enjektörler, yakıt pompaları vb. hareket halindeki parçalarıda yağlamak üzere görev alır. Bu sebeple yakıt viskozitesi en önemli özelliklerdendir. Belli bir sınır içerisinde kalmalıdır. Viskozite değeri belirlenen bu sınırlar dahilinde olmayan yakıtlar çeşitli akşamlarda aşınmaya ve korozyona sebep olur.	1.3- 2.4	1.9- 4.1	D 445
Isıl Değer	Motordan elde edilen güç ve ekonomik yakıt sarfiyatı için tasarımsal faktörler önem arz eder. Yakıt ekonomisi, yakıttan elde edilen enerjide bağlıdır ve yakıtın ısı değeri direk yakıt viskozite değeri ile bağlantılıdır.			
Setan sayısı (min.)	Dizel yakıtının tamamen yanabilmesini ve neticesinde motorun kolayca çalışabilmesini ifade eder. Dizel motorun, piston sıkıştırma basıncının, ortam sıcaklığına yada soğutucunun sıcaklığı vb. değişkenlerin düşük olması neticesinde, sıkışma sıcaklığında azalacağı için, motorda kolay çalışmanın ve yakıtta tam yanmanın sağlanması için setan sayısının yüksek olması gerekir.	40	40	D613
Setan indisi	Hesap edilen setan indeksi motor testleri ile tespit edilen değerden ayırmak için “setan indeksi” şeklinde ifade edilir.	40	40	D976
Aromatiklerin miktarı(maks.)	Aromatik bazlı maddeler, dizel yakıtında rafinasyonda ortaya çıkan hidrokarbon bileşiklerde doğal olarak bulunurlar. Benzen grubuna dahil bileşiklerdendir. Aromatik bazlı bileşiklerin varlığı yakıt yanma sıcaklığını azaltır.	35	35	D1319
Oksidasyon Stabilitesi (mg/L, maks.)	Dizel yakıtının depolanması ve kullanma şartları nedeniyle önem arz eder.	15	15	D2274

Tablo 2. (devamı)

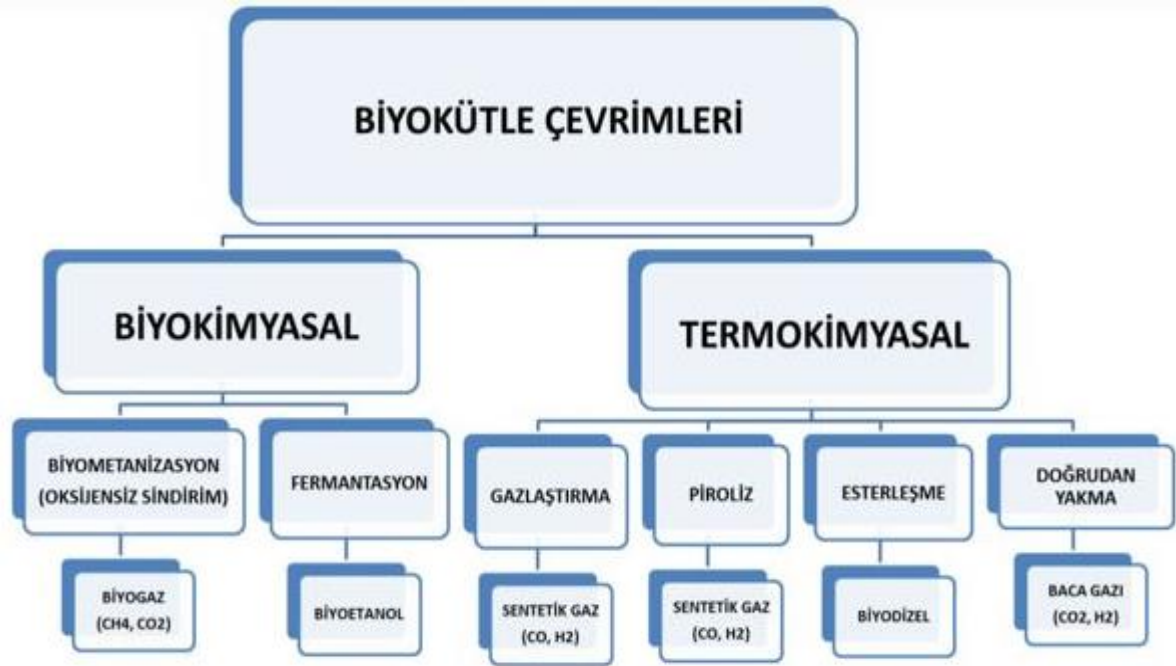
Yağlayıcı özellik (g.dak.)	Dizel yakıtının yağlayıcılığını tanımlar.	3100	3100	D6078 / D6079
Yakıt Enjektörü Temizliği	Dizel yakıtın içine 10 ppm' den az olacak şekilde yağlama katkısı madde ilavesi yapılarak aşınma miktarının oldukça düşmesi sağlanır. Kirlenmeyi önüne geçilir. Kirlenen enjektörler bütün ekipman ve yakıt tertibatında çok fazla miktarda is oluşturur, yakıtın akışkanlığını olumsuz etkiler, bu nedenle motorun güç kaybetmesine sebebiyet verir.			L/10 enjektör
Akıştaki Kayıp (% , maks.)	Dizel yakıtın içine 10 ppm' den az olacak şekilde yağlama katkısı madde ilavesi yapılarak aşınma miktarının oldukça düşmesi sağlanır. Kirlenmeyi önüne geçilir. Katkısı madde fazlalığı motor içinde tortu birikimine ve bu sebepten dolayı başkaca sorunlara sebebiyet verir	6	6	Depozit testi
CRC derecesi (% maks.)	Yakıt deterjan katkı maddesi eklemek suretiyle enjektörler üzerindeki karbonsal birikimin ve kirlenmelerin önüne geçilir.	10	10	Deterjan testi.
Korozyon miktarı (Cu, 3sa. 50 °C, maks.)	Kullanılan yakıtı zaman içinde çeşitli malzemelerde meydana getireceği korozyon ve hasara sebep olur	No.3	No.3	D130
Su (PPM)	Yakıttaki su ve tortular yakıt filtresini ve enjektörlere etki ederek bunların ömrünün azalmasına neden olur.	200	200	D1744
Tortular (ppm)	Yakıttaki su ve tortular yakıt filtresini ve enjektörlere etki ederek bunların ömrünün azalmasına neden olur.	10	10	D2276/ D5452
Su & tortular (% hacimsel, maks.)	Yakıttaki su ve tortular yakıt filtresini ve enjektörlere etki ederek bunların ömrünün azalmasına neden olur.	0,05	0,05	D2709/ D1796
Sülfür miktarı (% maks.)	Sülfür içerikli bileşikler, yakıt yandıktan sonra egzoz çıkışında sülfata dönen SO ₂ ve SO ₃ vb. asit bazlı yan ürüne dönüşür ve motordaki aşınma oranını artırır.	0,50	0,50	D2622
Sülfür açısından fakir yakıt	Sülfür açısından fakir yakıtlar, bu özelliğin azalacağı için yakıt enjeksiyon tertibatına zarar verilmemesi için yakıt içine yağlayıcı özellikli katkı ilavesi yapılır.	0,05	0,05	
Karbonsal kalıntı (son %10'da, maks.)	Yanmaya etki eden kalıntının ölçüsüdür.	0,15	0,35	D524
Kül miktarı (% maks.)	Kül oranının fazla olması enjektör ucunda tıkanma, yanmadan kaynaklı kalıntılara ve enjeksiyon tertibatında aşınmalara sebebiyet verir.	0,01	0,01	D482

Alternatif yakıt arayışları

Gelişen teknolojiye bağlı olarak mevcut içten yanmalı motorlar sürekli gelişmektedir. Bu motorlarda kullanılan fosil kaynaklı yakıtların sonlu olması, atmosfere yaydıkları zararlı atık gazlar, düşük yakıt maliyet arzı vb. nedenlerle alternatif yakıt arayışları ortaya çıkmıştır.

İçten yanmalı motorlarda kullanılabilecek yakıtların istenen bazı teknik özellikleri karşılaması gerekmektedir. Ucuz olmalı, kolay elde edilebilmeli, yüksek enerji verimliliğine, alçak buharlaşma basınç değerine, düşük hava sıcaklıklarında motorun çalışmasını kolaylaştıracak şekilde hızlı buharlaşmalı, oktan / setan sayısının yüksek olmalıdır, emisyon değerleri düşük olmalıdır ve turbolu sistemlere uygunluk göstermelidir. Kısa zaman diliminde, birçok alternatif yakıtın geliştirilmesiyle, enerji tüketimi azalarak, petrol fiyatlarının kontrolü daha mümkün hale gelecektir (Demirel, 2004).

Genel olarak biyokütleden elde edilen enerjiye yönelik ve dizel yakıtlara alternatif olarak değerlendirilen veya beraber kullanılması üzerine araştırmalar yapılan etanol, metanol vb alkol bazlı ürünler ve biyodizel ürünlerin yakıt olarak üretimine ilişkin üretim proseslerini, yöntemlerini ve elde edilen ürünler Şekil 7’ de gösterilmiştir.



Şekil 7. Biyokütle üretim teknolojileri, prosesleri ve elde edilen ürünler

Alkol yakıtlar

Alkollerin yanıcı özelliğe ve bulunabilir olmasından dolayı içten yanmalı motorlarda kullanılabilmesi fikri içten yanmalı motorların icadına kadar gitmektedir. İlk çalışmalarında Otto’ da yakıt olarak alkol denemiş, Henry Ford’ da ilk tasarladığı araçları yakıt olarak alkol kullanılacak şekilde yapmıştır (TMMOB, 1999).

Birçok alkol alternatif yakıt olarak kullanılabilir olsa da sadece metanol ve etanolün ekonomik olmasından ötürü içten yanmalı motorlarda pratik olarak kullanılabileceği söylenebilir (Marshall ve Owen 1995).

Etanol ve metanolün Oktan sayısı benzinden daha yüksektir. Bu nedenle daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabilir ve daha iyi verim elde edilebilir. Alkol yakıtlardan birim hacimdeki enerji benzine göre daha azdır. Bu nedenle aynı enerji için daha yüksek oranda alkol yakıt olarak sağlanmalıdır. Hacimsel olarak etanol benzinden 1.6 kat, metanol ise 2 kat fazla kullanılmalıdır. Etanol ve metanol kullanımlarında çevrim sıcaklığı düşmekte oksit ve azot miktarları azalmaktadır (Peker 2000).

Tablo 3. Etanol ve Dizelin Yakıt Olarak Karşılaştırılması (Usta *et al.*2004).

Yakıt Özellikleri	Dizel Yakıt	Etanol
Yoğunluk (15 °C’de, kg/m ³)	841,5	788
Kinematik Viskozite (40 °C’de)	2,9	0,67
Kükürt (% kütleli)	0,68	0
Alt Isıl değer (kJ/kg)	44631	26749
Setan sayısı	45-50	5-15

Bitkisel yağlar

Satandart dizel yakıtı yerine kullanılmak üzere bitki ve hayvansal kökenli yağ ve atıklardan üretilen mono alkil ester karışım yakıtlar biyodizel olarak adlandırılır. Bu yakıtlar yenilenebilir bir enerjidir. Biyodizel yağlar elde etmek için zeytin, soya, mısır, ayçiçeği vb birçok bitki ve hayvansal kütle kullanılmıştır. (Beşergil, 2009)

Mısır, ayçiçeği, kolza tohumu vb.bitki özlü yağlar normal bir şekilde dizel yakıtı olarak kullanılabilirler. Ancak bu yağlar transesterifikasyon işleminden geçirilerek viskoziteleri düşürülür ise daha kaliteli dizel yakıtları üretilebilir (Beşergil, 2009)

Yüksek oranda yağ asitleri içeren biyodizelin yağ asidi profili, onun yoğunluk, viskozite, akma noktası ve bulutlanma noktası gibi önemli yakıt özelliklerini etkilemektedir (Bedir and Doğan 2021).

Biyodizel yakıtların emisyon değerlerinde, normal dizel yakıtlarına göre CO, partiküllerin miktarı ve HC miktarı daha az, NO_x ise yüksektir. Biyodizellerin yakıtı fiziksel-

kimyasal çeşitli özellikler bakımından normal dizelle benzerdir. Örnek olarak biyodizel ve dizel yakıtın çeşitli özellikleri Tablo 4' de gösterilmiştir (Beşergil, 2009).

Tablo 4. Dizel ve Biyodizel yakıtların Karakteristik Özellikleri (Stojković, 2014 and Rahman, 2014).

YAKIT ÖZELLİĞİ	BİRİM	SINIR DEĞER (Min-max.)	BIYODİZEL	DİZEL
Molekül Ağırlığı	g/mol		296	120-320
Özgül Ağırlığı	kg/L	0,875-0,90	087-0,88	082-0,86
Kinematik Viskozite	mm ² /s	2 – 4,5	4,3	2,5 – 3,5
Alevlenme Noktası	°C	55 -	>100	>55
Setan Sayısı	-	49 -	>55	49 - 55

Bitkisel yağların çeşitli motor karakteristiklerine etkisi bir çok araştırmacı tarafından çeşitli testler sonucu tespit edilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapılan farklı çalışmalar Tablo-5' te özetlenmiştir (Dabi *et al.* 2022).

Tablo 5. Bitkisel Bazlı Bioyakıtlar ve Test Edilen Çeşitli Özellikleri (Dabi *et al.* 2022)

ARAŞTIRMACI	BİTKİSEL YAĞ	ÇEŞİTLİ KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ				
		BTE	BSFC	CO	HC	NO _x
(Almeida <i>et al.</i> 2002)	Palmiye yağı	–	↑	↑	↑	↓
(Pramanik 2003)	Jatrofa yağı	↓	↑	–	–	–
(Hebal <i>et al.</i> 2006)	Deccan kenevir yağı	↓	↑	↑	↑	–
(Wang <i>et al.</i> 2006)	–	–	↑	↑	↑	–
(Agarwal ve Agarwal , 2007)	Jatrofa yağı	↓	↑	↑	↑	–
(Agarwal <i>et al.</i> 2008)	Keten tohumu yağı	↓	–	–	–	–
	Mahua yağı	↑	–	–	–	–
	Pirinç kepeği yağı	↑	–	–	–	–
(Agarwal ve Rajamanoharan 2009)	karanja yağı	↓	↑	↑	↑	↓
(Devan ve Mahalakshmi 2009)	kaka yağı	↓	–	↑	↑	↓
(Chauhan <i>et al.</i> 2010)	Jatrofa yağı	↓	↑	↑	↑	↓
(Singh <i>et al.</i> 2010)	Hindistancevizi yağı	↓	↑	↑	–	↓
(Misra ve Murthy , 2011)	Sabun yağı	↓	–	↑	–	↓
(Yılmaz ve Morton , 2011)	Yer fıstığı, kanola ve ayçiçek yağı	↑	–	↑	↓	↑
(Sing, 2013)	Jatrofa yağı	↓	↑	–	–	–
(Şah ve Ganesh, 2016)	Ayçiçeği ve karanja yağı	↓	–	↑	–	↑

Madeni yağlar

Madeni (mineral) yağlar, rafine edilen petrolden geliştirilen ürünler içinde yağlayıcı olarak kullanılan üründür. Rafine edildikten sonra başkaca işlemlerde uygulanarak madeni yağın baz ham maddesi üretilir. Birbirinden farklılık gösteren viskozite değerleri olan bu yağ ürünleri ihtiyaca ve kullanım alanına göre katkı maddeleri ile birleştirilerek son ürün olarak elde edilirler (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2015).

Petrolden üretimi yapılan yağlama amaçlı kullanılan yağa “madeni yağlar”, sentetik temelli akışkan kullanılarak üretilen yağlar ise “sentetik yağlama yağları” olarak adlandırılır (Beşergil, 2009).

TS 13369 standartına uygun üretilen mineral bazlı yağ, kimyasal olarak 3 temel sınıfta ele alınırlar;

- * Alifatik bazlı yağlar; 1. Parafinler, 2. Naftenler
- * Aromatik bazlı yağlar
- * Alifatikler ve Aromatik bazlı olanlar

Bu yağların sanayi ve endüstride kullanım standartlarını karşılamaları için kullanılacak baz yağın seçimi önem arz eder. Kimyasal özellikler bakımından birbirinden çok farklı temel özelliklere sahip olan bu temel yağlar kullanılarak üretilen madeni yağ ürünleri çeşitli özelliklere sahip oldukları için yürürlükteki standart koşullarına uygun olarak baz yağ ve sentetik kullanılarak üretilmelidir (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2015).

Madeni yağ uygulama alanlarına göre;

- Otomotiv / Motor yağı,
- Endüstriyel ve sanayi yağları olarak değerlendirilir (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2015)

Her yıl tonlarca madeni yağ kullanım ömrünü tamamlayarak atık hale gelir. Bu yağların bertaraf edilmesi için toplama, nakliye faaliyetleri, depo alanları, kimyasal-fiziksel bir çok işlem, tesis/teknoloji gibi maliyeti yüksek gereksinimlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Motor egzoz emisyonları

HC bazlı, petrol türevi olan yakıt yandığında, ortaya çıkan gazlar hava hava kalitesinde kötüleşmeye sebep olmaktadır. Bunun kaynağı olarak fabrikalar, enerji tesisleri, tarım, konut ısıtma ve karayolu taşıtları vb. sayılabilir. Bunların içindede en yüksek kirletici olarak motorlu taşıt emisyonları yer almaktadır. Bu nedenle atık gazların bir takım egzoz çıkış verilerine uluslar

arası yönetmeliklerle sınırlandırma getirilmiştir. Bu maddeler havaya karışan hidrokarbonlar, NO_x, SO₂, Ozon, CO, SO₂ vb. parçacıklardır (Beşergil, 2009).

Çeşitli yakıtlar kullanılan içten yanmalı motorlarda yapılan performans artırıcı denemeler sonucunda yanma nedeniyle ortaya çıkan NO_x ve partikül emisyon değerlerinde ciddi ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Yakıtın kimyasal oluşumunun, emisyon üzerinde çok etki göstermemesine rağmen, bir takım değer ve kriterlere uluslararası standartlar ile sınırlama getirilmiştir. İçten yanmalı motorlar çalışırken devamlı havadan partikül zerrecikleri emiş yaparlar. Bu maddeler düşük miktarlarda ve çok küçük tanecikler olduğu için gözle görülmezler. Halbuki egzoz çıkışından atılan kara duman eksik yanmadan kaynaklanır ve yanma işleminde bir aksilik olduğuna gösterir. Bu problem çoğunlukla olması gerektiğinden daha fazla hava-yakıt karışımı oranı olmasından, hava filtresi kaynaklı, ejektör veya yakıt pompası kaynaklı olabilir (Beşergil, 2009).

Beşergil (2009), çevre kirliliğine neden olan emisyon gazlarını aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

Ozon: Sanayi, enerji endüstrisinde, tıp, temizlik vb. alanlarda kullanımı yaygındır. Renksiz bir gazdır. Havada bulunan bir takım uçucu toksit gazların üzerine güneş ışığının etkisi ile oluşur. Solunum rahatsızlıklarına ve şehirlerde sis oluşumuna sebep olur

Karbon Monoksit (CO): Yakıtın oksijen ile yanmasıyla ortaya çıkar. Renk ve kokusu bulunmaz. Ciddi miktarda maruz kalındığında kana nüfus ederek zehirlenme sonucu felç ve ölüme sebep olabilir. Motorlu araçlarda zengin karışımli yanmada daha fazla CO salınımı ortaya çıkar.

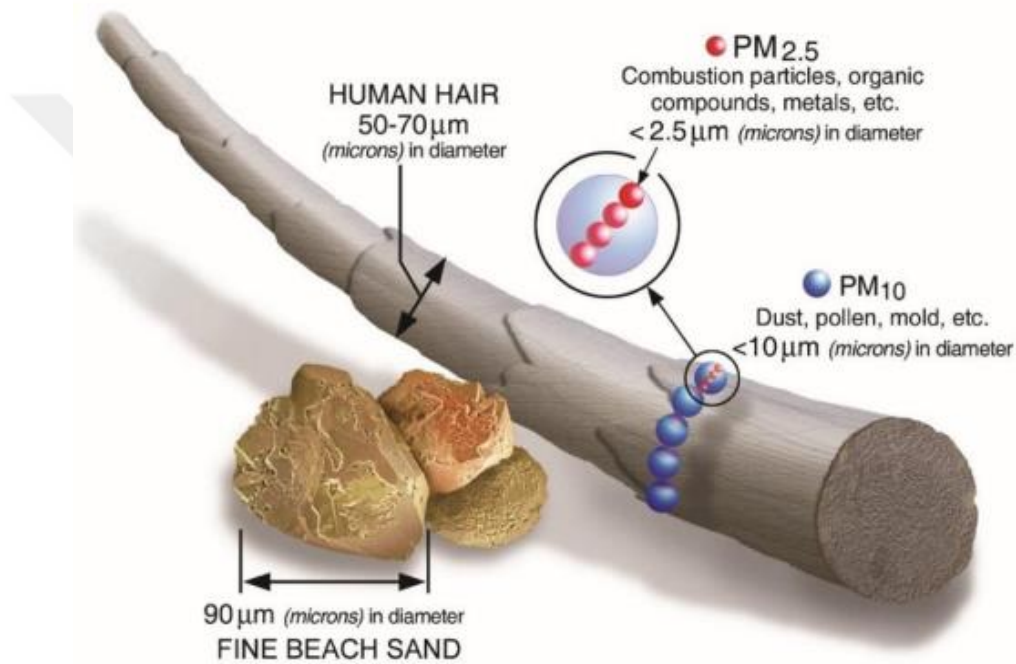
Nitrojen Oksitler (NO_x): “NO, NO₂, N₂O₂ ve benzeri bileşiklerin tümü azot oksit (NO_x) olarak isimlendirilir.”(Kelen, 2014). Ayrıca fosil kaynaklı yakıtların yanması esnasında oluşan nitrojen(N) ve Oksijen (O) içerikler yukarıda bahsedilen ozon oluşumunda sebep olan insan sağlığına zararlı gazlardır.

Sülfür Dioksit (SO₂): Sülfür içerikli yakıtların egzozdan atılmasıyla birlikte oksijen ile reaksiyonu sonucu meydana gelir. En çok katı yakıt (kömür) ve fuel oil kullanımından kaynaklanır. İnsan sağlığına zararlıdır akciğer ve karaciğer rahatsızlıklarına neden olur. Atmosferde bulunan SO₂ salınımını %3’ ü taşıt yakıtlarından kaynaklıdır.

Partikül (Tanecik- PM) Maddeler, Yanma olayında yetersiz oksijen olmasından kaynaklanır. Boyutlarına göre PM₁₀, 10 µ dan küçük ve PM_{2.5} 2,5 µ dan küçük olarak tespitleri yapılır. Çeşitli araştırmalara göre havadaki taneciklerin %66 oranında tozlardan, %2 oranında ise araç egzoz emisyonlarından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Kurşun: Benzizin performansını artırmak için benzin içerisine kurşun temelli bileşikler karıştırılır. Bir çok sektörde kullanılan kurşunun insan sağlığına zararı bilinmekte ve bir çok alanda olduğu gibi yakıtlardada kurşun içeriğinin azaltılması hatta yasaklanması ile kurşuna bağlı emisyonlar azalmıştır.

Toksik Organik Maddeler: Benzen dışında kalan organik maddelerin çoğu zehirli değildir. Oluşacak egzoz emisyonlarında benzen, polisik bazlı organik madde (POM), formaldehit gibi çeşitli bileşikler yasal mevzuatlar kapsamında oluşturulan uluslararası standartlara göre toksik madde olarak değerlendirilmiş ve egzoz çıkış miktarları sınırlandırılmıştır. (Beşergil, 2009).



Şekil 8. Partikül madde boyutlarının değerlendirilmesi (Tokgöz, 2019)

Farklı yakıtların emisyon karşılaştırması

Ülkemizde kullanılan araçların yakıt türüne göre dağılımı TÜİK verilerine göre sunulan Tablo 6’da görülmektedir.

Tablo 6. Farklı Yakıt Türlerine Göre Ülkemizdeki Kara Taşıt Miktarları (TÜİK, 2022)

Kullanılan yakıt türüne göre motorlu kara taşıt sayısı

Number of road motor vehicles by kind of fuel used

Yıl	Toplam	Benzin		Dizel		LPG		Elektrikli - Hibrit ⁽¹⁾		Bilinmiyor ⁽²⁾	
		Gasoline	(%)	Diesel	(%)	LPG	(%)	Electric - Hybrid ⁽¹⁾	(%)	Unknown ⁽²⁾	(%)
Year	Total										
2004	10 236 357	5 569 192	54.4	3 346 355	32.7	819 007	8.0	-	-	501 803	4.9
2005	11 145 826	5 606 321	50.3	3 836 399	34.4	1 298 830	11.7	-	-	404 276	3.6
2006	12 227 393	5 935 725	48.5	4 372 042	35.8	1 569 951	12.8	-	-	349 675	2.9
2007	13 022 945	5 980 516	45.9	4 850 837	37.2	1 880 023	14.4	-	-	311 569	2.4
2008	13 765 395	5 952 746	43.2	5 323 478	38.7	2 276 283	16.5	-	-	212 888	1.5
2009	14 316 700	5 887 559	41.1	5 654 350	39.5	2 592 695	18.1	-	-	182 096	1.3
2010	15 095 603	5 762 156	38.2	6 195 898	41.0	2 973 832	19.7	145	0.0	163 572	1.1
2011	16 089 528	5 709 606	35.5	6 899 420	42.9	3 335 566	20.7	270	0.0	144 666	0.9
2012	17 033 413	5 722 940	33.6	7 549 806	44.3	3 649 739	21.4	612	0.0	110 316	0.6
2013	17 939 447	5 733 725	32.0	8 169 410	45.5	3 934 753	21.9	1093	0.0	100 466	0.6
2014	18 828 721	5 788 505	30.7	8 782 462	46.6	4 161 003	22.1	3 195	0.0	93 556	0.5
2015	19 994 472	5 977 352	29.9	9 576 896	47.9	4 358 751	21.8	5 847	0.0	75 626	0.4
2016	21 090 424	6 142 806	29.1	10 337 907	49.0	4 527 674	21.5	9 536	0.0	72 501	0.3
2017	22 218 945	6 321 658	28.5	11 102 943	50.0	4 705 599	21.2	18 261	0.1	70 484	0.3
2018	22 865 921	6 390 297	27.9	11 592 878	50.7	4 785 035	20.9	30 167	0.1	67 544	0.3
2019	23 156 975	6 427 550	27.8	11 865 482	51.2	4 749 808	20.5	49 744	0.2	64 391	0.3
2020	24 144 857	6 782 575	28.1	12 311 225	51.0	4 904 546	20.3	82 710	0.3	63 801	0.3
2021	25 249 119	7 296 270	28.9	12 704 380	50.3	5 028 359	19.9	157 153	0.6	62 957	0.2

Kaynak: TÜİK, Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri

Source: TurkStat, Road Motor Vehicle Statistics

(1) Elektrikli, benzin-elektrik ve dizel-elektrik taşıtları kapsamaktadır.

(1) Includes electric, gasoline-electric and diesel-electric vehicles.

(2) Yakıt türü bilinmeyenler, ruhsat işlemlerinde yakıt türü boş bırakılan veya sehven hatalı veri girişi yapılan taşıtları kapsamaktadır.

(2) Unknown includes the vehicles that the type of fuel field in the licence is filled incorrectly or left blank.

- Bilgi yoktur.

- Denotes magnitude null.

Buna göre 2021 yılında trafikte bulunan araçların oranları yaklaşık;

- Dizel araç sayısı: %63
- Benzinli araç sayısı: % 11
- LPG' li araç sayısı : % 25
- Elektrik & Hibrit araç sayısı: % 0,8 olarak tespit edilmiştir.

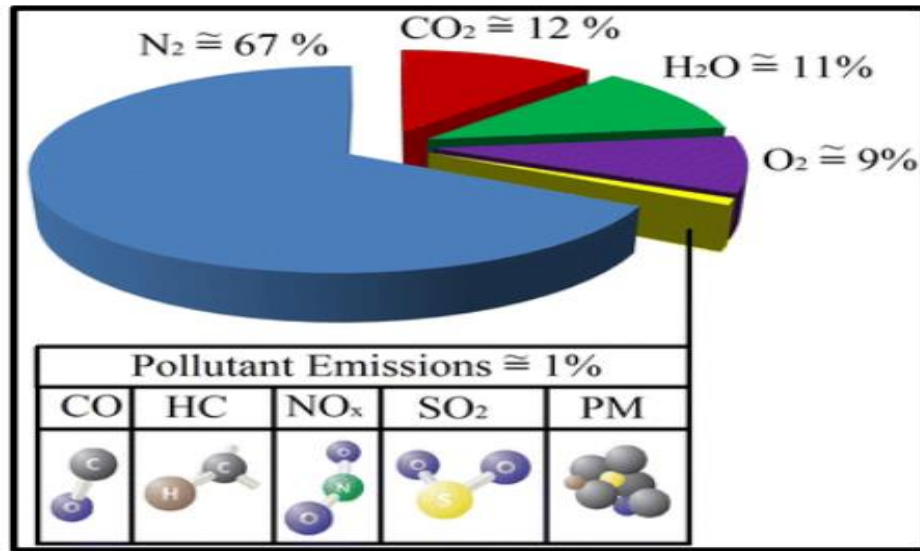
Düşük emisyon değerlerine sahip Elektrik & Hibrit araçların yıllara sari olarak sayısının arttığı, Tablo-7' de verilen değerlere göre benzinden daha düşük emisyon değerlerine sahip LPG' li araç sayısının benzin kullanımına göre fazla olduğu, dizel yakıtlı araçların ise % 63 gibi bir oranla en yüksek kullanım oranına sahip olduğu ancak 2019 yılından itibaren ufakta olsa azalma eğilimi içinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7. Benzin & LPG Emisyonlarının Karşılaştırılması (Tasic, 2011).

ATIK GAZLAR	YAKIT	
	BENZİN	LPG
HC (mg/km)	100 Birim	70 Birim
CO (mg/km)	100 Birim	70 Birim
CO ₂ (g/km)	100 Birim	90 Birim
NO _x (mg/km)	100 Birim	59 Birim

Benzin egzoz emisyon miktarlarına göre LPG egzoz emisyon miktarları Tablo 7 ‘ de gösterilmiştir (Tasic, 2011). Karşılaştırmanın kolay anlaşılması için benzin kullanılmasıyla ortaya çıkan atık gaz ölçüm değerleri 100 birim olarak alınmıştır.

Dizel yakıtına ait egzoz gazı bileşenleri ve oranları Şekil 9.’ da görülmektedir.



Şekil 9. Dizel egzoz gazının bileşenleri (Tokgöz, 2019).

Egzoz emisyonlarında EURO standartları

AB tarafından geliştirilen egzoz emisyon şartlarını tespit eden ve sınırlandıran standartları EURO (1, 2, ...) olarak tarihsel gelişime göre isimlendirilmiştir. Tablo-8, 9 ve Tablo-10’ da verilen yıl bilgileri, standartın öneri şeklinde kabul edilme tarihini belirtir. Belirtilen standartların devreye girme tarihi ile hangi modelleri içerdikleri değişiklik göstermektedir (Tokgöz, 2019).

Tablo 8, 9 ve 10’ da verilen tarihsel süreç ve bu sürece bağlı olarak emisyon standartlarındaki iyileşme rahatlıkla gözlemlenmektedir.

Tablo 8. Binek Kara Araçları EURO Satandartları ve Değişimleri (TOKGÖZ, 2019)

Seviye	Tarih	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
		g/km					#/km
Benzin							
Euro 1	1992.07	2.72	-	0.97	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.3	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09	1.0	0.10	-	0.06	0.005	-
Euro 6	2014.09	1.0	0.10	-	0.06	0.005	6.0×10 ¹¹
Dizel							
Euro 1	1992.07	2.72	-	0.97	-	0.14	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09	0.50	-	0.23	0.18	0.005	-
Euro 5b	2011.09	0.50	-	0.23	0.18	0.005	6.0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005	6.0×10 ¹¹

Günümüzde EU6 standartları yürürlükte olsada önümüzdeki süreçte EU7 standartları yürürlüğe girecek ve egzoz emisyon değerlerinde mevcut araçlarda dahil olmak üzere daha da iyileştirmeler gerçekleşecektir. EU7 2025 yılı itibariyle yürürlüğü girecektir. Ayrıca EURO 7 standartlarında eski EU standartları haricinde emisyon standartlarının haricinde yeni kısıtlama maddeleri ve ilk olarak elektrikli araçlar ile ilgilide hükümlerin yer aldığı, batarya kullanım sürelerinin sınırlandırıldığı bilinmektedir.

Tablo 9. Dizel Yakıtlı Mini Ticari Otomobillere Ait EURO Standartları ve Değişimleri (Tokgöz, 2019)

Kategori	Seviye	Tarih	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
			g/km					#/km
Dizel								
N ₁ , Sınıf I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	0.14	-
	Euro 2 IDI	1997.01	1.0	-	0.70	-	0.08	-
	Euro 2 DI	1997.01	1.0	-	0.90	-	0.10	-
	Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
	Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
	Euro 5a	2009.09	0.50	-	0.23	0.18	0.005	-
	Euro 5b	2011.09	0.50	-	0.23	0.18	0.005	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Sınıf II 1305- 1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.4	-	0.19	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.25	-	1.0	-	0.12	-
	Euro 2 DI	1998.01	1.25	-	1.3	-	0.14	-
	Euro 3	2001.01	0.80	-	0.72	0.65	0.07	-
	Euro 4	2006.01	0.63	-	0.39	0.33	0.04	-
	Euro 5a	2010.09	0.63	-	0.295	0.235	0.005	-
	Euro 5b	2011.09	0.63	-	0.295	0.235	0.005	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.63	-	0.195	0.105	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Sınıf III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.7	-	0.25	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1.5	-	1.2	-	0.17	-
	Euro 2 DI	1998.01	1.5	-	1.6	-	0.20	-
	Euro 3	2001.01	0.95	-	0.86	0.78	0.10	-
	Euro 4	2006.01	0.74	-	0.46	0.39	0.06	-
	Euro 5a	2010.09	0.74	-	0.350	0.280	0.005	-
	Euro 5b	2011.09	0.74	-	0.350	0.280	0.005	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₂	Euro 5a	2010.09	0.74	-	0.350	0.280	0.005	-
	Euro 5b	2011.09	0.74	-	0.350	0.280	0.005	6.0×10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005	6.0×10 ¹¹

Tablo 10. Benzin Yakıtlı Mini Ticari Otomobillere Ait EURO Standartları ve Değişimleri (Tokgöz, 2019)

Kategori	Seviye	Tarih	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
			g/km					
Benzin								
N ₁ , Class I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	-	-
	Euro 2	1997.01	2.2	-	0.50	-	-	-
	Euro 3	2000.01	2.2	0.20	-	0.15	-	-
	Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
	Euro 5	2009.09	1.0	0.10	-	0.06	0.005	-
	Euro 6	2014.09	1.0	0.10	-	0.06	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Class II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.4	-	-	-
	Euro 2	1998.01	4.0	-	0.65	-	-	-
	Euro 3	2001.01	4.17	0.25	-	0.18	-	-
	Euro 4	2006.01	1.81	0.13	-	0.10	-	-
	Euro 5	2010.09	1.81	0.13	-	0.075	0.005	-
	Euro 6	2015.09	1.81	0.13	-	0.075	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₁ , Class III >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.7	-	-	-
	Euro 2	1998.01	5.0	-	0.80	-	-	-
	Euro 3	2001.01	5.22	0.29	-	0.21	-	-
	Euro 4	2006.01	2.27	0.16	-	0.11	-	-
	Euro 5	2010.09	2.27	0.16	-	0.082	0.005	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16	-	0.082	0.005	6.0×10 ¹¹
N ₂	Euro 5	2010.09	2.27	0.16	-	0.082	0.005	-
	Euro 6	2015.09	2.27	0.16	-	0.082	0.005	6.0×10 ¹¹

Tablo 11. Dizel ve Benzin Yakıtlı Kara Araçlarının EU6 Emisyon Sınırları (TOKGÖZ, 2019)

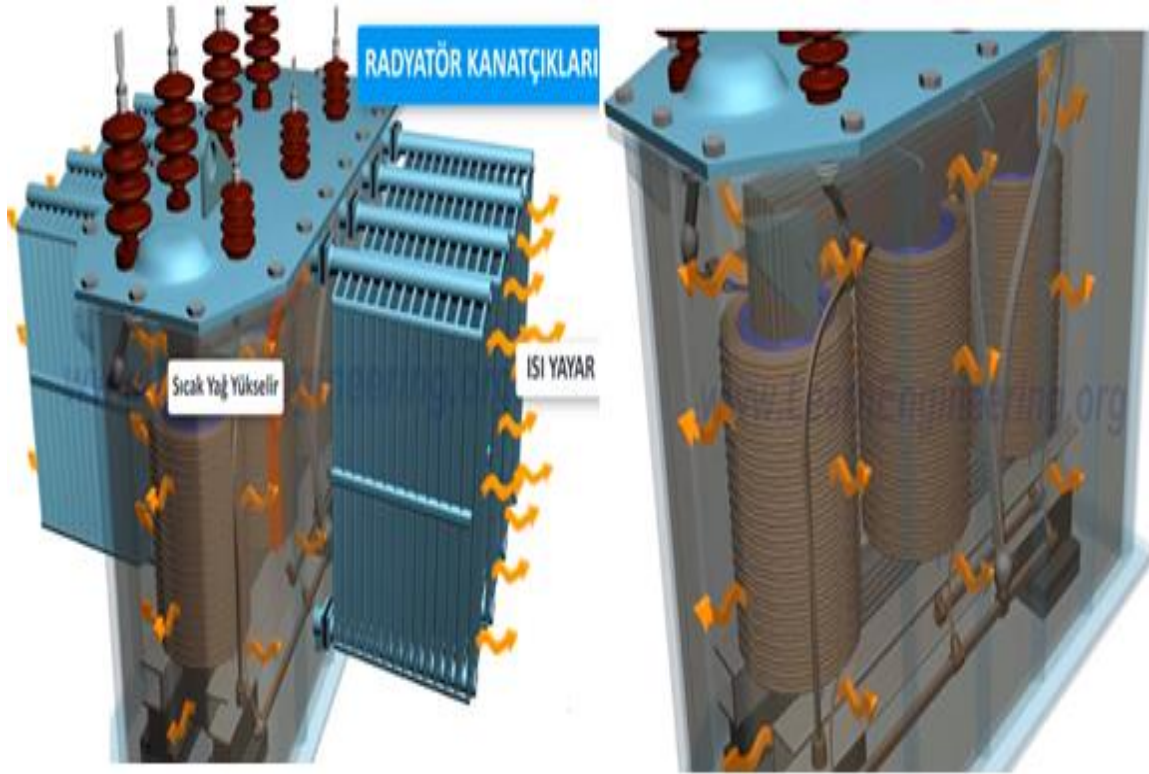
	Dizel araçlar için EU6 limitleri	Benzinli araçlar için EU6 limitleri
CO (mg/km)	0,50	1,0
HC (mg/km)	-	0,10
HC+NOx (mg/km)	0,17	-
NOx (mg/km)	0,08	0,06
PM (mg/km)	0,005	0,005
PN (#/km)	6,0×10 ¹¹	6,0×10 ¹¹

Trafo yağı ve özellikleri

Transformatörün çalışabilirliğini ve muhafazasını sağlamak amacıyla içindeki boşluğun bir sıvı ile doldurulması gereklidir. Bu sıvı/yağ kısa devre ve kıvılcım almayı engelleyicidir.

Bu nedenle transformatörler, imalat tamamlanmadan önceki son aşamada yalıtım yada trafo yağı olarak üretilen ve isimlendirilen uygun yağ ile doldurulur. (Anonim 2009).

Trafo yağları çok iyi elektriksel yalıtım özelliğine ile yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilme yeteneğine haizdir. Trafolarında kullanımlarında yalıtım yağları olarak adlandırılır. Yağ ile doldurulan transformatörlerde, sistemdeki ısıyı düşürmek ve ısı yalıtımı sağlamak, oluşabilecek kısa devreleri engellemek ve absorbe etmek için trafo yağları/yalıtım yağları kullanılır. Soğutucu akışkan görevi gördüğünde söylenebilir. Transformatör yağı, tamamen yağın içinde bulunan transformatör çekirdeğini ve sargılarını korur. Bu alanda kullanılan yağların başkaca mühim özelliklerinden biri ise trafolarında kullanılan izolatör parçaların oksitlenmesini önlemektir. Trafo yağları, atmosferde bulunan O₂ ile selülozun etkileşimini engelleyerek teması ve oksitlenmeye karşı direnç oluşturur (Anonim 2009).



Şekil 10. Trafo yağının trafo içerisinde gösterimi.

Petrolden çeşitli işlemler neticesinde ve damıtma ile üretilen madeni yağlar, yüksek dielektrik dayanımına, düşük elektrik kayıplarına, daha iyi kimyasal kararlılığa, daha yüksek akma noktası ve düşük viskozite gibi transformatör uygulamaları için birçok kimyasal, elektriksel ve fiziksel özelliklere sahiptir (Heathcote, 2007).

Transformatör, frekansta bir değişiklik olmaksızın enerjiyi bir seviyeden başka bir seviyeye aktaran statik bir cihazdır. Güç sisteminin can damarıdır ve trafonun ömrünü belirleyen ana bileşen trafo yağıdır. Makinenin ömrü izolasyon seviyesine bağlıdır ve

transformatörlerde madeni yağ soğutma ve izolasyon olmak üzere iki işlevi yerine getirir ve bu iki işlev trafonun ömrü ile bağlantılıdır madeni yağ yüksek kırılma direncine ve en iyi soğutmaya sahipse, trafoların ömrünün uzamasına neden olacaktır. (Rafiq *et al.* 2015)

Dünyadaki transformatörler, tasarlanan ömrün yakınında veya ötesinde çalışır, bu nedenle bu mevcut birimlerin güvenilirliği, yalıtım sistemlerinin yapısına ve durumuna bağlıdır (Bartley, 2006), (Chiesa end Das, 2009) , (Rajnak *et al.* 2019)

Trafo arızasına ilişkin mevcut istatistiksel veriler, trafoların ortalama ömrünün 18 yıl olduğunu, yani 36 ila 44 yıl olan öngörülebilir ömrün yaklaşık yarısı olduğunu ve yüksek gerilim trafolarının 1/3'ünün izolasyon arızası nedeniyle çöktüğünü göstermektedir (EPRI Portfolio 2007)

Trafo yağı bileşenleri

- Parafin
- Nafta
- Aromatik
- Olefinler

Parafin bazlı yağlar yüksek oranda mum içerikli mineral bazlı yağlardır. Nafta temelli mineral yalıtım yağları ise çok düşük oranda parafinik yada mumsu yapıdan oluşur. Nafta içerikli transformatör yağı, standart miktarlardan daha küçük ısı değerlerinde aromatik bazlı bileşenlerden oluşur. Kullanılması düşünülen yalıtım yağının uygunluğunun tespitini yapabilmek için, trafo yağına ait bir takım temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikler; dielektriksel dayanımı, öz direnç, dielektrik kayıpları, fiziksel (viskozite, , akma noktası, , parlama noktası, arayüz gerilimi) ve kimyasal özellikler (asitlik, su içeriği, çamur içeriği.) olarak sıralanır. (KARACA, 2022).

Trafo yağının genel standartları

Kaliteli transformatör yağları çok yüksek oranda parafin, düşük oranda ise aromatikler ve naftenikler içermeli, olefin ise hiç olmamalıdır. Trafo yağları, piyasada genelde mineral bazlı yağ olarak çeşitlendirilir. Aşağıdaki Tablo 12’de trafo / yalıtım yağlarının genel olarak istenilen karakteristik özellikleri belirtilmiştir (www.transcantrafo.com, 2022).

Tablo 12. Trafo Yağı Çeşitli Özellikleri (www.transcantrafo.com, 2022)

NO	KARAKTERİSTİK	TİPİK GEREKSİNİMLER
1.	30°C’de maksimum yoğunluk	0,89 gr/cm ³
2.	27°C’de max. kinematik viskozite	27 cSt
3.	Min. arayüz gerilimi	0, 04 N/m
4.	Min. parlama noktası	140°C
5.	Nokta için max.	-6°C
6.	Filtrasyon sonrası min. arıza gerilimi	60 kV (rms)
7.	90°C’de max. dielektrik yayılıma etkeni	0.002
8.	90°C’de min. Direnç miktarı	30 x 10 ¹² ohm
9.	27°C’de min. Direnç miktarı	1500 x 10 ¹² ohm
10.	Geçirgenlik miktarı	2.2
11.	Özısı değeri	2,06 kJ/kg°C
12.	Termal iletkenlik	0.12 W/ m°C
13.	Genişleme katsayısı	0.00078 /°C

Her yıl tonlarca madeni yağ gibi trafo yağlarında kullanım ömrünü tamamlayarak atık hale gelir. Bu yağların bertaraf edilmesi için; atık toplama, nakliye, depolama tesisleri, kimyasal-fiziksel arıtma, makine/tesis/teknoloji gibi maliyeti yüksek gereksinimlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Atık trafo yağının yeniden değerlendirilmesi

Her yıl önemli miktarda atık trafo yağı elde edilmekte ve atık yağ olarak ayrılmaktadır. Çünkü kurulan trafo sayısı artmakta ve mevcutların yağ değişimi yapılmaktadır. Bu durumda atık trafo yağının yeniden değerlendirilmesi için araştırma çabalarını artırmaktadır. (Behera *et al.* 2014).

Trafo yağları genellikle naftanik olarak bilinen yapıda üretilirler. Trafo ünitelerinde kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra atık olarak nitelendirilirler. Atık yağların bir kısmı yasal mevzuatlar çerçevesinde lisanslı geri dönüşüm tesislerinde yeniden nitelik kazandırılabilirler. Ülkemizde bu yağların atık olarak yılda 30.000 ton’ a kadar ulaştığı tahmin edilmektedir (Gedik, 2012).

Tablo 13. Trafo Kapasitelerine Göre Kullanılması Gereken Yaklaşık Trafo Yağı Miktarları
(www.ulusoyelektrik.com.tr)

TRAFO GÜCÜ	YAĞ MİKTARI
100 kVA	150
400 kVA	290
800 kVA	430 kg
1600 kVA	680 kg
2500 kVA	1.040 kg

Dizel bir motorda alternatif yakıt olarak değerlendirilen bir ürünün test edilmesi aşamasında kullanılacak ürünün fiziksel ve termal özelliklerinin bilinmesi ve tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle trafo yağının dizel yakıtlara benzeyen birçok özelliği sebebiyle atık trafo yağlarının çeşitli iyileştirmeler yapılarak dizel motorlarda kullanılabileceğine yönelik bir çok araştırma yapılmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Atık Trafo Yağlarının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini test ederek motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi için yapılan kimyasal analizler ve motor deneylerine ilişkin çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan cihaz ve deney düzeneğine ait bilgiler aşağıda sunulmuştur.

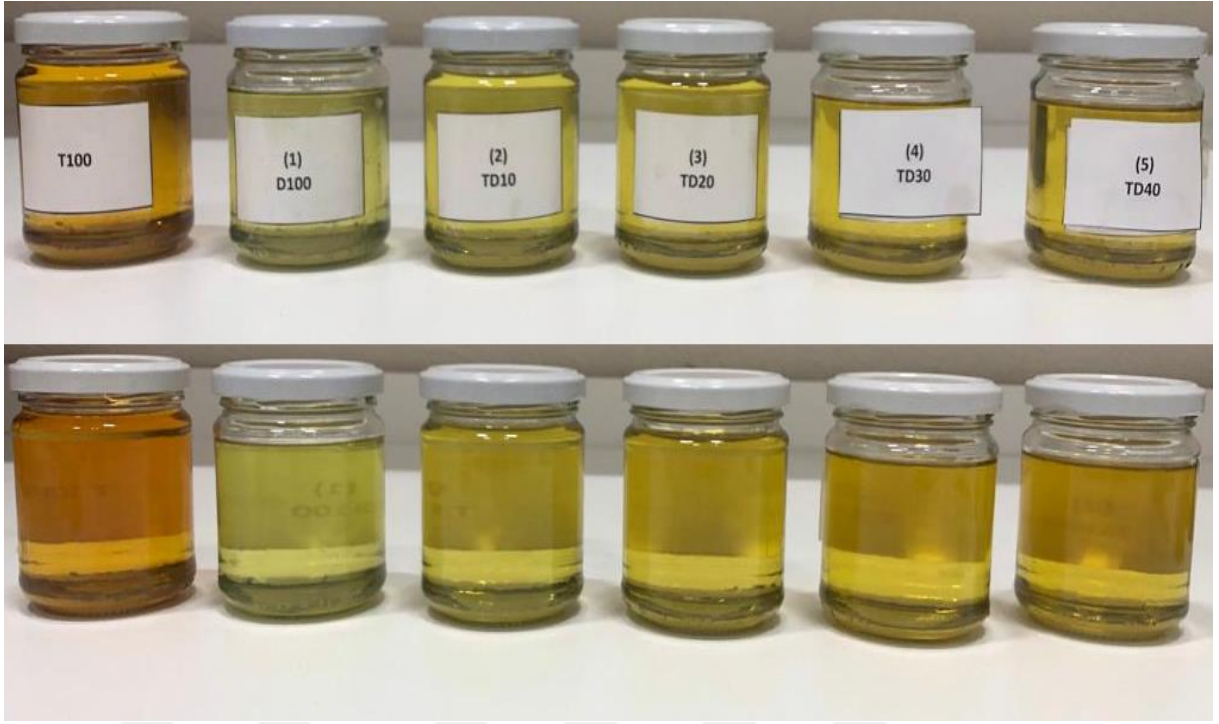
Yakıt Karışımlarının Hazırlanması

Deneylerde kullanılacak atık trafo yağı, TEİAŞ Erzurum Blg. Md. lüğünden alınmıştır. Bu numuneler öncelikle içerisinde bulunabilecek tortu ve sudan arındırılarak homojen hale getirilmiştir. Atık trafo yağı (ATY) ve dizel (D) yakıtlar test yakıtı olarak kullanılmak üzere hacimce %10 ATY-%90D, %20ATY-%80D, %30ATY-%70D, %40ATY-%60D olmak üzere 4 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlara ilaveten D100 yakıtı referans olarak deneylerde test edilmiştir. Hazırlanan karışımların hacimsel oranları ve miktarları Tablo-14’ de, numunelere ait görseller Şekil-11’ de gösterilmiştir.

Tablo 14. Hazırlanan Karışımların Hacimsel Oranları ve Miktarları

No.	Numune Adı	Ömrünü Tamamlamış Atık Trafo Yağı (%) (hacimsel)	Dizel (%)	Atık Trafo Yağı (ml.)	Dizel (ml.)	Toplam (ml.)
1.	D100	0	100	0	3200	3200
2.	TD10	10	90	320	2880	3200
3.	TD20	20	80	640	2560	3200
4.	TD30	30	70	960	2240	3200
5.	TD40	40	60	1280	1920	3200

Atık trafo yağının dizel yakıtı göre viskozite, yoğunluk, düşük kalorifik değer ve distilasyon sıcaklığı gibi olumsuz etkilerini azaltmak için dizel yakıt ile karışımlar halinde kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Karışımlar hazırlanırken yeniden filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerde kullanılacak her bir karışım ayrı ayrı 3200 ml olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil-11’de kullanım ömrünü tamamlayarak atık hale gelmiş ve diğer numunelere göre koyu bir renge sahip olan atık trafo yağında T100 olarak gösterilmiştir.



Şekil 11. Hazırlanan numunelerin görselleri

Atık Trafo Yağı ve Dizel Yakıtın Karakteristik Özelliklerinin Tespiti

Filtreleme yapılarak homojen hale getirilen atık trafo yağı, dizel ve deneylerde kullanılacak karışımların karakteristik özellikleri Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarında ve DAYTAM’ da tespit edilmiştir. Dizel ve atık trafo yağı ile ikili yakıt karışımlarının gerekli fizikokimyasal özellikleri (yoğunluk, kinematik viskozite, kalorifik değer akma ve bulutlanma noktası) ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarına göre test edilmiştir. Yapılan bu analizler ile ilgili ekipman ve yöntemlere dair ayrıntılar Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15. Test Yakıtlarının Karakterizasyonunda Kullanılan Ekipmanlar ve Yöntemler

Analiz	Ekipman	Marka, model
Yoğunluk (15°C)	Otomatik yoğunluk ölçer	Rudolph Research Analytical, DDM 2909
Kinematik Viskozite (40°C)	Dijital sabit sıcaklık kinematik viskozite banyosu	Koehler KV4000 series
Kalorifik değer	Kalorimetre	IKA C-200
Bulutlanma Noktası	Bulut ve Akma Noktası Banyosu	SETA (11010-2)
Akma Noktası	Bulut ve Akma Noktası Banyosu	SETA (11010-2)
Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) analizi	FTIR spektrofotometre	Bruker VERTEX 70v
TG /DSC analysis	Eşzamanlı Termal Analiz Cihazı (Simultaneous Thermal Analyzer)	Netzch STA 409

TG/DSC analizi

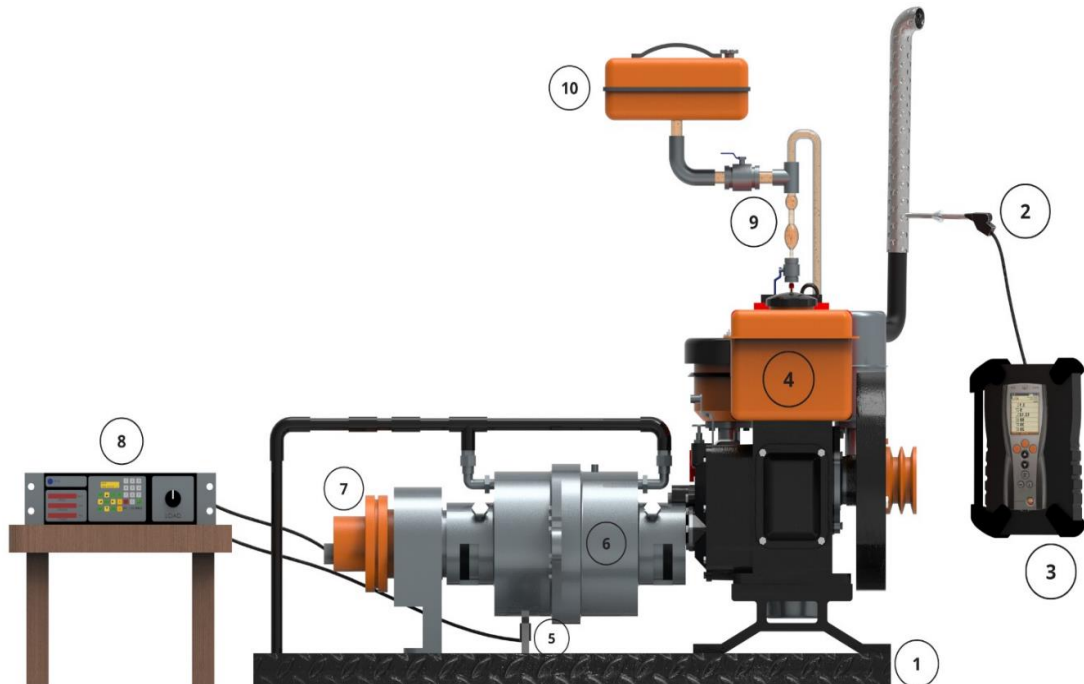
TG (Termogravimetri); bir maddenin ısıtılmasıyla veya soğutulmasıyla veya stabil sıcaklıkta tutulmasıyla zamana bağlı olarak kütle ağırlığının değişimini tespit eden bir tekniktir. DSC (Diferansiyel taramalı Kalorimetri) ise; bir maddenin ısıtılırken soğutulurken veya stabil sıcaklıkta tutulurken aldığı veya verdiği enerji miktarının tespit edildiği termal analiz yöntemidir. Erime, faz değişimi, kürlenme, cam geçişi, entalpi vb. termal özellikler tespit edilir. TG/DSC analizi Netzch STA 409 marka/model eş zamanlı termal analiz cihazında, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 25-600 °C aralığında hava ortamında yapılmıştır. Bu süre sonunda numunenin tamamen reaksiyona girdiği görülmüştür.

FT-IR analizi

FT-IR analizi (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi); kızılötesi ışınlama yaparak malzemenin (katı, sıvı, gaz, çözelti vb.) bağ yapısını, moleküllerin bağlanma yerlerini, bileşenlerin çeşitlerini ve malzemenin kimyasal özelliklerinin tanımlamasını için kullanılan analiz tekniğidir. Deneylerde kullanılan T100, D100, TD10, TD20, TD30, TD40 yakıtlarının kızılötesi spektrumları “Bruker VERTEX 70v” marka/model cihazda 4000-400cm⁻¹ aralığında yapılarak tespit edildi.

Motor Test Düzeneği ve Ekipmanları

Motor deneyleri, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Motorlar Laboratuvarında Şekil 12’de şematik diyagramı görülen test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. Test motorunun ve egzoz analizörünün şematik diyagramı

- | | |
|-------------------------------|--------------------|
| 1) Motor Şasisi | 6) Dinamometre |
| 2) Egzoz Gazı Analiz Probu | 7) Takometre |
| 3) Egzoz Gazı Analizörü | 8) Kontrol Ünitesi |
| 4) Tek Silindirli Dizel Motor | 9) Yakıt Büreti |
| 5) Yük Hücresi | 10) Yakıt Kabı |

Deneylerde dört zamanlı, tek silindirli, su soğutmalı bir dizel motorunda dizel yakıtı ile %10 %20 %30 ve %40 hacimsel oranında atık trafo yağı karıştırılarak elde edilen yakıt karışımları 1000- 1500-2000 ve 2500 dev/dak hızlarda yakılarak motordan üretilen güç, tork, egzoz emisyon değerleri, egzoz gazı sıcaklığı ve efektif yakıt sarfiyatı deneysel olarak tespit edilmiştir.

Deneylerden önce test motoru 3000 dev/dak'da dizel yakıt (D100) ile bir süre çalıştırılmıştır. Tüm test yakıtları için motor performans ve egzoz emisyon parametreleri 2 kere yapılarak ortalama değerler kullanılmıştır. Deneyler ilk olarak, verimli yanmayı sağlayarak motorun kararlı hale gelebilmesi için 3000 dev/dak'da çalıştırıldıktan sonra elektronik kontrol paneli vasıtasıyla su freni yapılarak test motoruna uygulanan yük artırılmış ve devir sayıları 2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak'ya düşürülerek deney verileri ölçülmüştür. Yakıt sarfiyatına ait ölçümler, yakıt buretinden geçen ve test motorunda yakılan 50 ml yakıtın yanma süresinin kronometre ile ölçülmesiyle yapılmıştır. Tüm ölçümler 2 kez tekrarlanmıştır.

Yapılan motor deneyleri sonucunda motor performans ve emisyon ölçümleri araştırma bulguları ve tartışma kısmında irdelenmiştir.

Test motorunun özellikleri

Deneylerde kullanılan dizel motor, dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı ve Antor markasının, 4 LD 820 modelidir. Test motorunun teknik özellikleri Tablo-16' da, görseli ise Şekil 13'de gösterilmiştir.

Tablo 16. Test Motorunun teknik Özellikleri

Motor Marka & Modeli	Antor / 4 LD 820
Motor Tipi	Dört Zamanlı
Yakıt Tipi	Dizel
Çap	102 mm
Strok	100 mm
Süpürme Hacmi	817 cm ³
Sıkıştırma Oranı	17:01
Soğutma Tipi	Hava Soğutmalı

Tablo 16. (devamı)

Maksimum Motor Hızı	3000 rpm
Maksimum Güç	12,7 kW ve 3000 rpm
Maksimum Tork	50 N.m ve 1600 rpm
Enjeksiyon Basıncı	20 MPa
Özel Yakıt Tüketimi	255 g/kW. h ve 2800 rpm
Motor Konumu	Dikey



Şekil 13. Tek silindirli dizel test motoru

Emisyon cihazının özellikleri

Egzoz emisyonlarının ve egzoz gazı sıcaklıklarının ölçülmesi için Testo 350 egzoz gazı analizörü kullanılmıştır. Tüm ölçümler 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak hızlarda 50 s boyunca yapılmıştır. Ölçüm verileri cihaz hafızasına kaydedilmiştir.

Tablo 17. Egzoz Emisyon Cihazının Teknik Özellikleri

Parametre	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0-10000 ppm	±10 %
SO ₂	0-5000 ppm	± 10 %
NO	0-4000 ppm	±10 %
NO _x	0-500 ppm	± 5 %
Egzoz Gazı Sıcaklığı (°C)	-200- +1370 °C	±1 °C



Şekil 14. Testo 350 egzoz emisyon cihazına ait görsel

Elektronik kontrol ünitesi

Elektronik kontrol ünitesi vasıtasıyla testlerin gerçekleştirildiği 2500, 2000, 1500, 1000 dev/dak hızlarda üretilen güç ve tok değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Şekil-15’ de görülen kontrol ünitesinin motor hızı ve fren gücü ölçüm hassasiyetleri sırasıyla ± 5 dev/dak ve ± 0,5055 HP’dir.

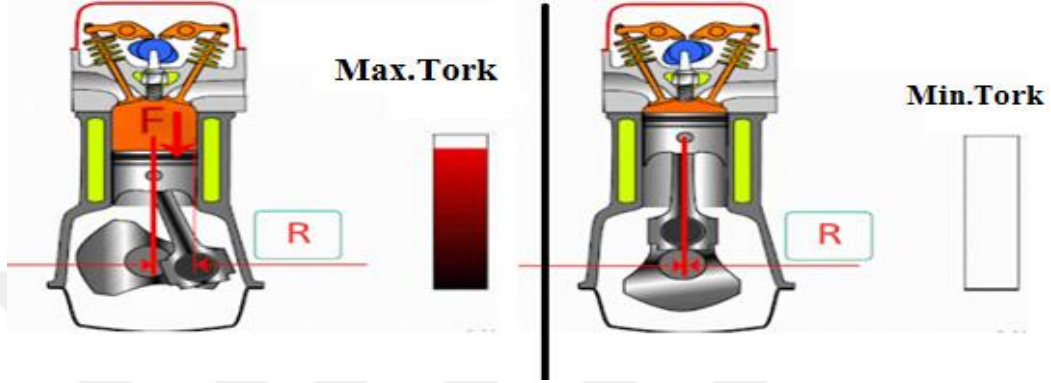


Şekil 15. Elektronik kontrol ünitesine ait görsel

Ölçümü Yapılan Motor Performans Parametreleri

Yapılan deneyler kapsamında tek silindirli dizel motordan farklı devirlerde elde edilen Tork (T) , Fren Gücü (BP) ve Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC) gibi motor performans parametreleri tespit edilmiştir. Ölçümü yapılan ve hesaplanan parametrelere ait temel formülasyonlar aşağıdaki gibidir.

$$\text{Torque (N.m)} = F \times r \quad (1)$$



Şekil 16. Yanma ve tork oluşumu

w_f : Motor 1 devir yaptığında sürtünme kuvvetinin yaptığı iştir.

$$w_f (N.m/dev) = 2 * \pi * r * F \quad (2)$$

BP (fren gücü) : Motorun frende bulunan efektif gücüdür.

Deney motorumuzda frenleme elektrikli dinamometre tertibatı ile sağlanmaktadır.

Devir sayısı takometre yardımıyla ölçülür.

Devir sayısı n (dev/s) olarak alındığında,

$$BP (kW) = w_f * n = \frac{2 * \pi * r * F * n}{10^3} = \frac{(2 * \pi * n * T)}{10^3} \text{ olarak hesaplanır.} \quad (3)$$

BSFC (Özgül Yakıt Sarfıyatı) : Belli çalışma şartlarındaki bir motorun Δt (s) zaman aralığında tükettiği yakıtın hacmi Δv (cm^3), yakıtın yoğunluğu ρ_y (g/cm^3) ise özgül yakıt sarfıyatı;

$$BSFC \left(\frac{g}{kWh} \right) = \frac{3600 * \Delta v * \rho_y}{BP * \Delta t} = \frac{(3600 * \dot{m}_y)}{BP} \quad (4)$$

$$\text{Kütleli Yakıt Debisi : } \dot{m}_y (g/s) = \Delta v * \rho_y / \Delta t \quad (5)$$

BTE (Fren Termal Verim) : Motor milinden alınan işin verilen toplam enerjiye oranıdır.

H_u = Yakıt Alt Isıl Değeri (kJ/kg)

$$BTE (\%) = \frac{BP}{\dot{m}_y * Hu} = \frac{3,6 * 10^6}{BSFC * Hu} \quad \text{olarak hesaplanır.} \quad (6)$$

Ölçümü Yapılan Egzoz Emisyon Parametreleri

Deneylerde kullanılan 5 adet yakıt numunesinin herbiri için 1000, 1500, 2000, 2500 dev/dak hızlardaki egzozdan atılan CO, NO, NO_x gazlarının emisyon değerleri ve Egzoz gazı sıcaklıkları ölçümleri 2 şer kez yapılarak kaydedilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Test Yakıtlarının Karakteristik Analizleri

Dizel, atık trafo yağı ve yakıt karışımlarının bazı fizikokimyasal özelliklerinin incelenmesi neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 18’ de verilmiştir.

Tablo 18. Yakıt Numunelerinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri

YAKIT ÖZELLİĞİ	TEST METHOD	T100	TD40	TD30	TD20	TD10	D100
Yoğunluk (15 °C) (kg/ m ³)	TS EN ISO 12185	876,5	846,6	845,6	840	837,4	832,3
Kinematik viskozite (40°C), mm ² /s	TS EN 1451 ISO 3104	10,6	4,5	4,3	4	3,7	3
Bulutlanma noktası, °C	TS EN 116	-20	-6	-5	-3	-1	+2
Akma noktası, °C	TS 1233 ISO 3016	≤ -40	≤ -40	≤ -40	≤ -40	≤ -40	-35
Alt Isıl Değer (Mj/kg)	ASTM D 240	44,530	45,933	46,092	46,222	46,402	46,632

Yoğunluk yakıtın atomizasyon verimini etkileyen önemli bir yakıt özelliğidir (Venkatesan *et al.* 2019). Tablo 3 incelendiğinde, , %100 atık trafo yağı (T100), %100 Dizel (D100) ve trafo-dizel (TD) karışımlarının yoğunluklarının 832,3 ile 876,5 kg/ m³ aralığında olduğu, çok fazla değişiklik göstermediği ve tüm değerlerin ASTM standartlarına uyduğu görülmektedir. D100’ün yoğunluğu, 832,3 kg/m³ iken, atık trafo yağı-dizel ikili karışımlarının yoğunluklarının, dizel oranının azalmasıyla bir miktar arttığı görülmektedir. Yine T100’ün en yüksek yoğunluğa (876,5) sahip olduğu da görülmektedir. Analize tabi tutulan numunelerin yoğunluk sıralamaları T100 > TD40 > TD30 > TD20 > TD10 > D100 şeklindedir.

Kinematik viskozite yakıtın akıcılığını gösteren önemli bir yakıt özelliğidir. Viskozitesi standart aralıkların üstünde olan yakıtın akışı zor olduğu için, bu yakıt enjeksiyon ekipmanının çalışmasını ve sprej atomizasyonunu olumsuz etkileyecektir (Al-Samaraae *et al.* 2020). Tablo 3’ de görüldüğü gibi, tüm TD karışımlarının kinematik viskozite değerleri, 3,7 - 4,5 mm²/s aralığında değişmekte olup hem EN hem de ASTM standartlarını karşılamaktadır. En düşük kinematik viskozite değerine (3 mm²/s) sahip olan D100’ünde değeri EN standart aralıklarındadır. T100’ ün kinematik viskozite değeri (10,6 mm²/s) standart aralıkların dışında

olmakla birlikte oldukça da yüksektir. Analize tabi tutulan numunelerin kinematik viskozite sıralamaları $T100 > TD40 > TD30 > TD20 > TD10 > D100$ şeklindedir. Atık trafo yağlarının yüksek viskoziteleri onların saf olarak araç yakıtı olmalarını engellemektedir. Bu nedenle pek çok araştırmacı, çalışmalarında atık trafo yağlarını dizel yakıtla karıştırarak kullanmıştır (Yadav *et al.* 2015).

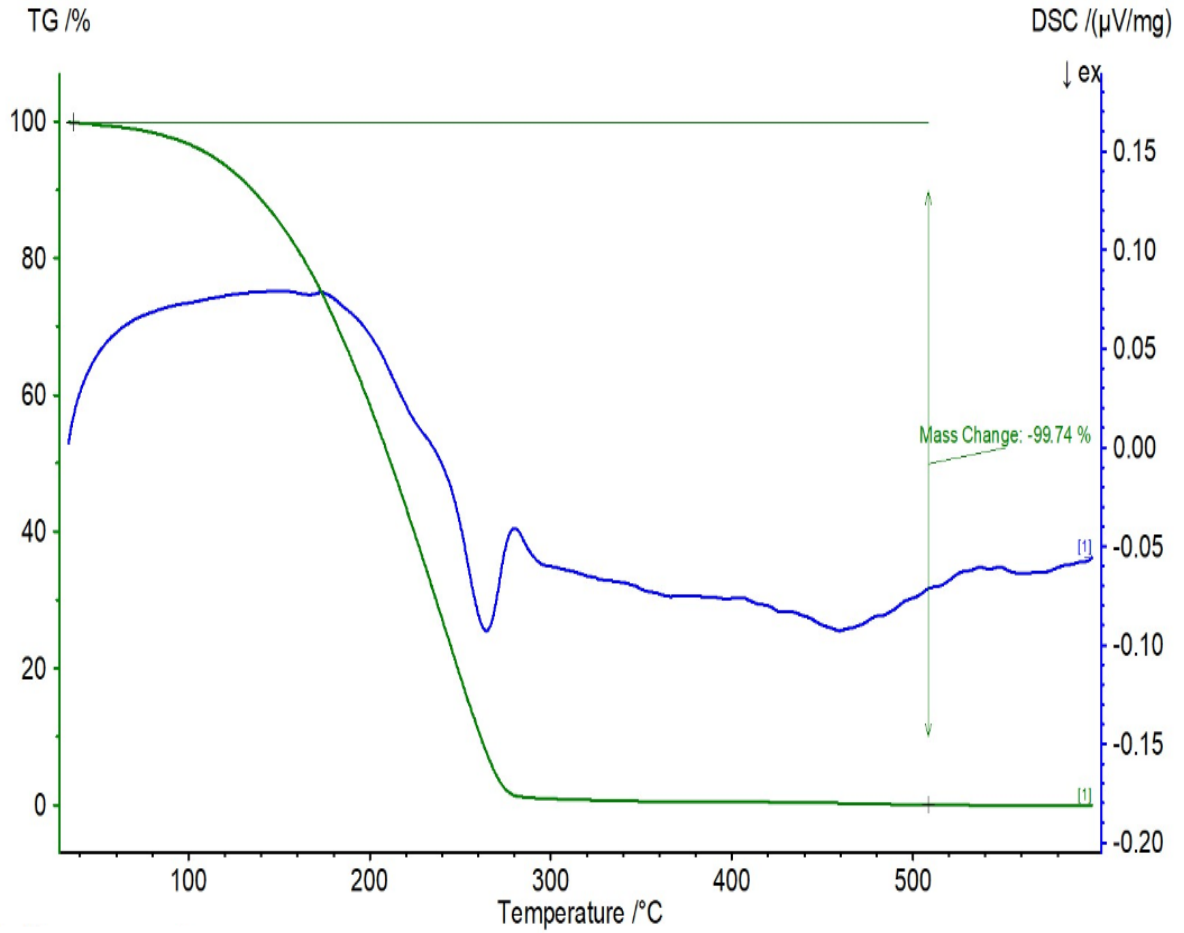
Bulutlanma ve akma noktası yakıtların düşük sıcaklıklarda performansını etkileyen en önemli soğuk akış özelliklerindendir. Bulutlanma noktası, yakıt soğutulurken ilk wax kristal bulutunun meydana geldiği sıcaklıktır ve oluşan bu kristal bulutu yakıt filtrelerini tıkama potansiyeline sahiptir. Soğumanın devam etmesi ile birlikte oluşan wax kristallerinin miktarı artar. Yakıtın jelleşmesi için çözeltide yeterli miktarda wax'ın olduğu ve yakıtın artık pompalanamaz hale geldiği sıcaklık ise akma noktası olarak adlandırılır (Khan, 2021; Doğan, 2016). Tablo 3' de görüldüğü gibi T100'ün bulutlanma (-20°C) ve akma noktaları ($\leq -40^{\circ}\text{C}$) oldukça düşüktür. Karaca and Doğan 2022' de yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etti. D100 dizel yakıtın bulutlanma ve akma noktası sırasıyla +2 ve -35°C dir. Diğer karışımlarda D100'den başlayarak dizel oranı azaldıkça bulutlanma noktasının daha düşük sıcaklıklara doğru ilerlediği, akma noktalarının ise oldukça düşük sıcaklıklarda ($\leq -40^{\circ}\text{C}$) olduğu görülmektedir. Bu durum, atık trafo yağının akma ve bulutlanma noktasının dizele nazaran daha düşük olmasından dolayıdır.

Akma ve bulutlanma noktası için EN standartları bir aralık vermediği için, burada tüm değerler, standartlara uygun olarak kabul edilebilir.

TG / DSC analizi

TG/DSC analizi Netzch STA 409 marka/model eş zamanlı termal analiz cihazında, $10^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında ve $25-600^{\circ}\text{C}$ aralığında hava ortamında yapılmıştır. Bu süre sonunda numunenin tamamen reaksiyona girdiği görülmüştür.

En iyi yanma performansı sergileyen TD20 numunesinin TG-DSC analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen TGA termogramı Şekil 17' de gösterilmiştir. Numunenin reaksiyonu sonucunda DSC eğrisinde ekzotermik bir pik görülmektedir. TD20 numunesi için reaksiyon başlama sıcaklığı 55°C ve reaksiyon bitiş sıcaklığı ise 280°C civarındadır.

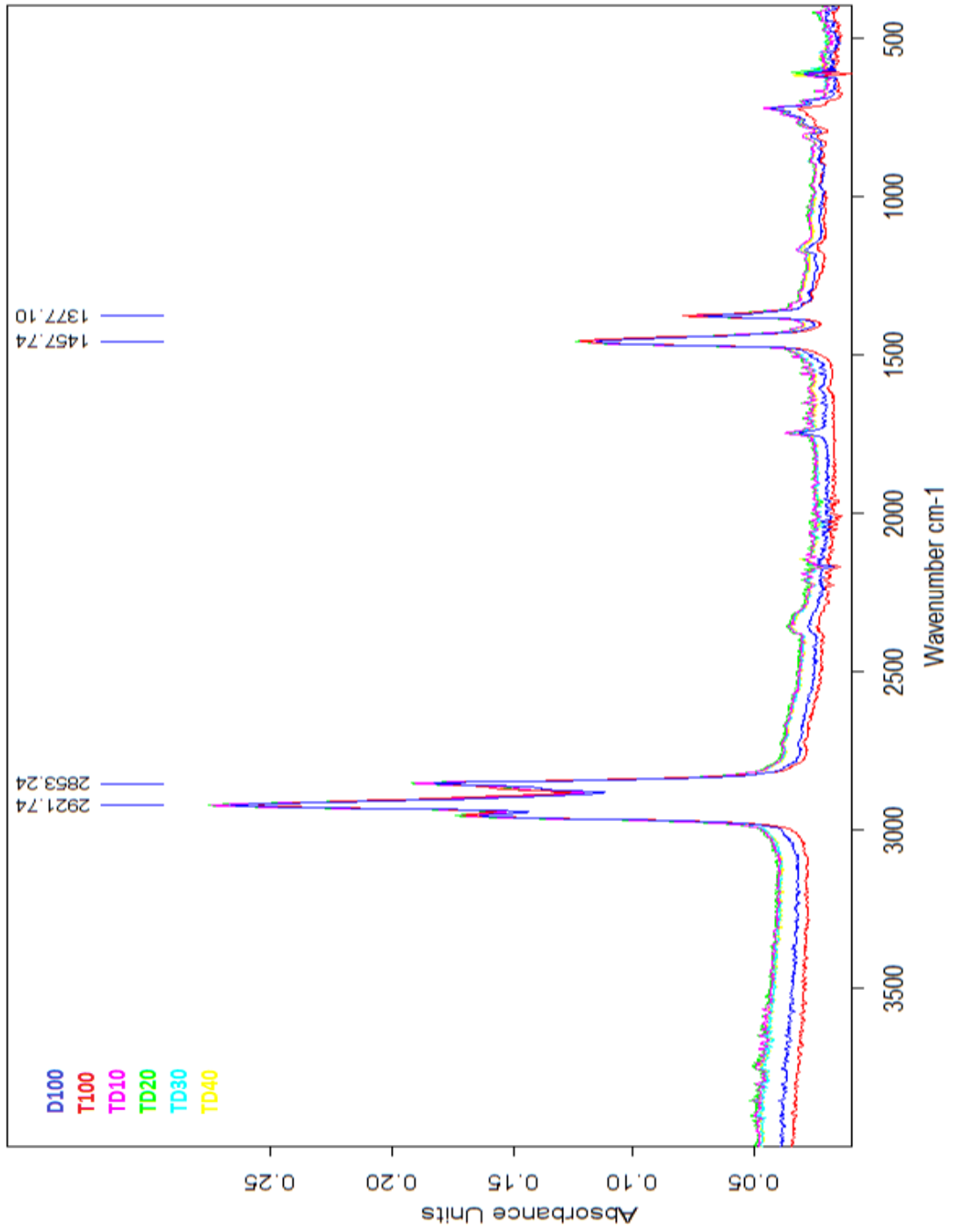


Şekil 17. TD20 numunesinin TG (ağırlık kaybı, %) and DSC eğrileri

FT-IR analizi

Deneylerde kullanılan T100, D100, TD10, TD20, TD30, TD40 yakıtlarının kızılötesi spektrumları “Bruker VERTEX 70v” marka/model cihazda $4000-400\text{cm}^{-1}$ aralığında yapılarak tespit edildi. Tüm numunelere kızılötesi ışınlama yapmak suretiyle malzemenin (katı, sıvı, gaz, çözelti vb.) bağ yapısı ve moleküllerin bağlanma yerleri tespit edilmiştir. Dizel (D100), atık trafo yağı (T100) ve TD10, TD20, TD30, TD40 yakıt karışımlarının kızılötesi spektrumları Şekil 18’ de gösterilmektedir.

Buna göre, her ikisi de petrol rafineri ürünü D100 ve T100’ün ve onların farklı oranlardaki karışımlarından oluşan numunelerin aynı pikleri (2921cm^{-1} , 2853cm^{-1} , 1457cm^{-1} , 1377cm^{-1}) verdiği görülmektedir. Numunelere ait kızılötesi spektrumlar Şekil-18’de gösterilmiştir.



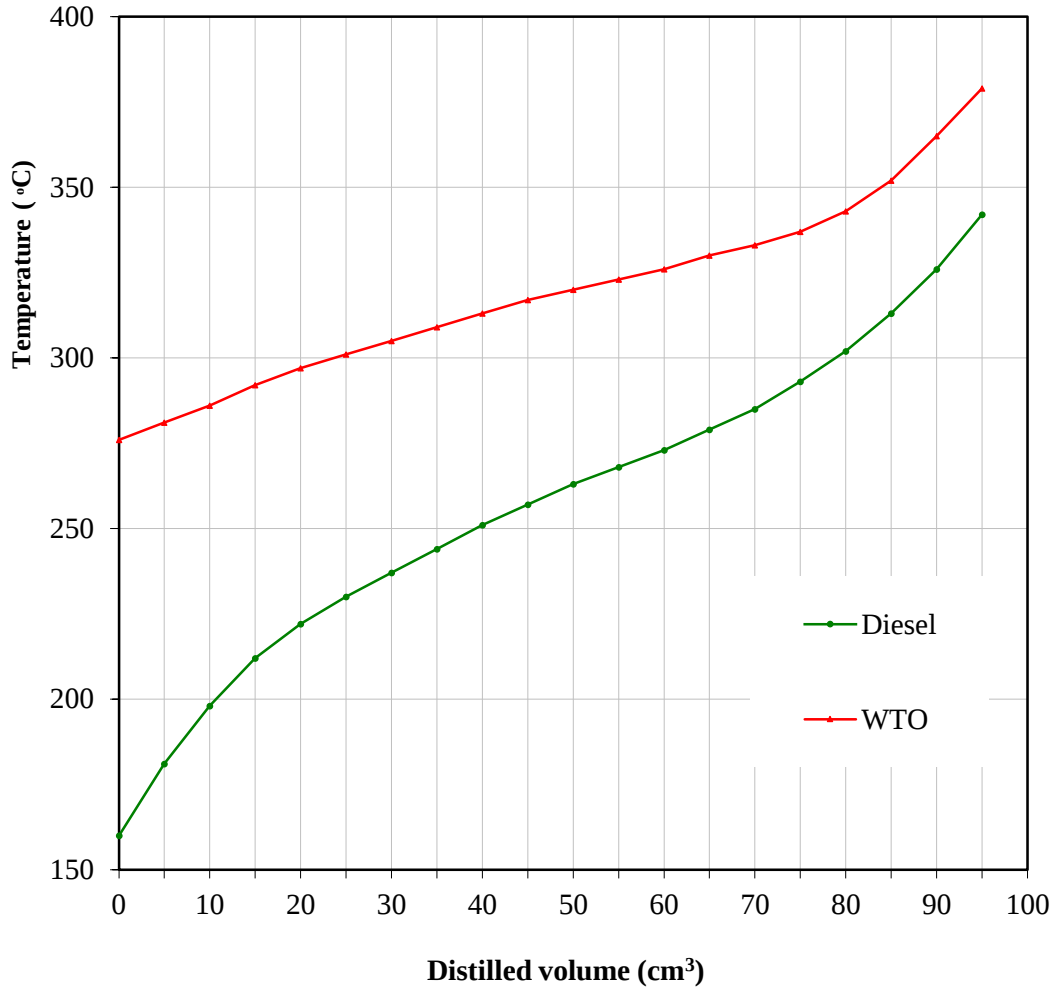
Şekil 18. Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve karışımlarının kızılötesi spektrumları

Tablo 19. Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve Karışımlarının Absorbans Bant Aralığı

Absorpsiyon bantları (cm ⁻¹)	Numune çeşidi	Fonksiyonel grup
3000-2900	D100 - T100	C-H Germe titreşimi (C-H stretching vibration)
	TD10 - TD20	
	TD30 - TD40	
2900-2850	D100	CH ₂ asimetrik ve simetrik titreşim (CH ₂ asymmetric and symmetric vibration)
	T100	
	TD10	
	TD20	
	TD30	
	TD40	
1500-1400	D100	CH ₂ Makaslama titreşimi (CH ₂ Scissoring vibration)
	T100	
	TD10	
	TD20	
	TD30	
1377	TD40	CH ₃ bükülmesi (CH ₃ bending)
	D100 - T100	
	TD10 - TD20	
	TD30 - TD40	

Numunelerin absorbans bant aralıkları ve onlara atfedilen fonksiyonel gruplar (Al-Samarae *et al.* 2020) Tablo 19’ da gösterilmiştir.

Ayrıca, Şekil 19’da atık trafo yağı ve standart dizel yakıt numunelerinin distilasyon eğrileri verilmiştir. Atık trafo yağının distilasyon sıcaklıklarının dizel yakıtından daha yüksek olduğu görülmektedir. Atık trafo yağının %10, %50 ve %90 hacimlerinin buharlaşma sıcaklıkları sırasıyla 286 °C, 320 °C ve 365 °C olarak elde edilmiştir. Buna karşılık dizel yakıtının aynı hacimlerde buharlaşma sıcaklıkları 198 °C, 263 °C ve 326 °C olarak elde edilmiştir. Bu durum atık trafo yağının yüksek viskozite değeri ile bir araya geldiğinde dizel motorun saf atık trafo yağı ile düzgün bir şekilde çalışamayacağını ve dizel yakıtı içindeki atık trafo yağı oranının artmasıyla yanma sonu sıcaklığının yükseleceğini göstermektedir.

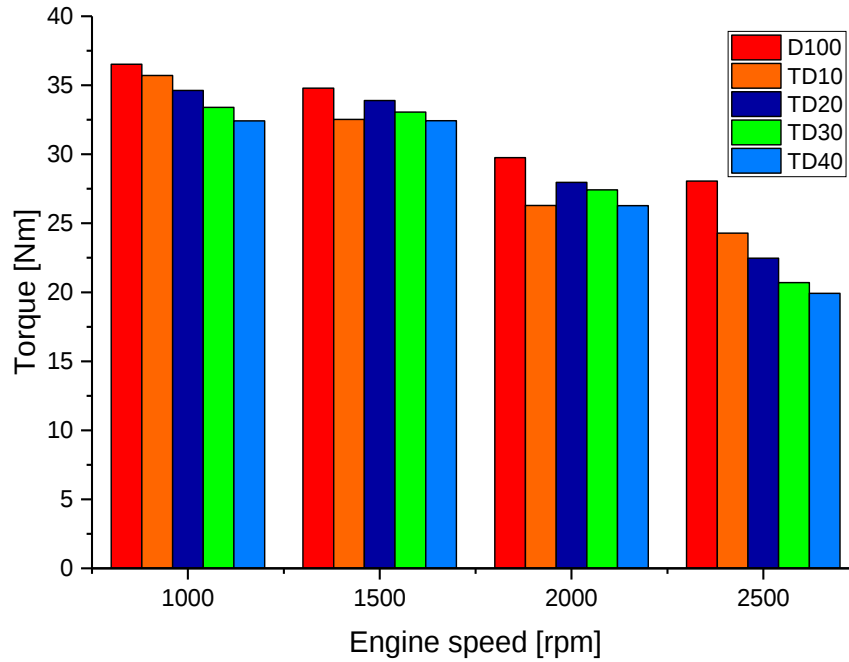


Şekil 19. Standart dizel ve atık trafo yağının distilasyon eğrileri

Test yakıtlarının Motor Performans Analizleri

Deneyler 5 farklı test yakıtının 1000, 1500, 2000, 2500 dev/dak hızlarda tek silindirli dizel bir motorda yakılmasıyla yapılmıştır. Her devirde üretilen Tork (T), Fren Gücü (BP), Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC) değerleri ölçülmüştür. Değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

Tork (T)



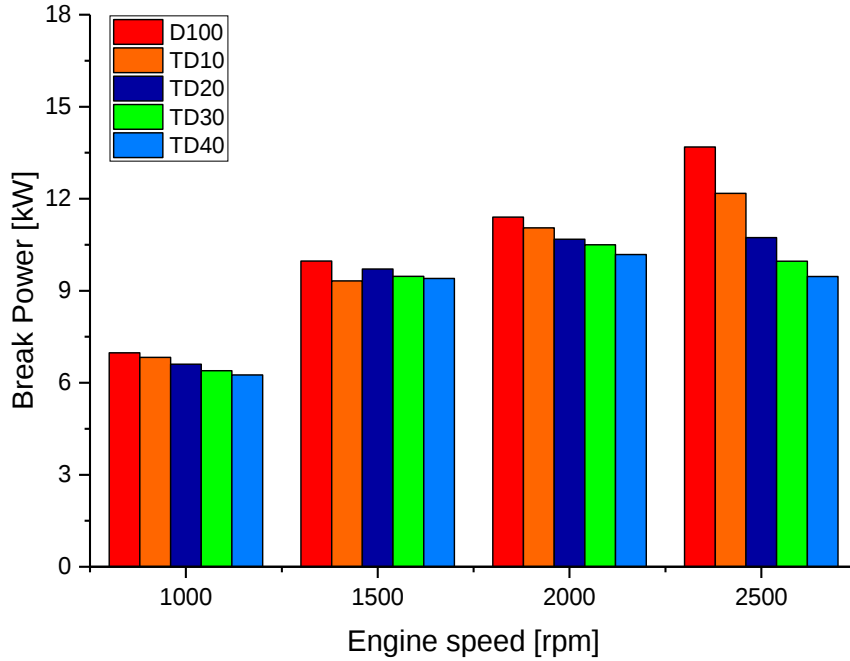
Şekil 20. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki tork değerleri

5 farklı test yakıtından farklı devirlerde elde edilen Tork değerleri Şekil 19’da grafikte verilmiştir. Yapılan deneylerde, her devir sayısında D100 yakıtı için üretilen tork değeri diğerlerine göre daha yüksektir. Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama değerlere bakıldığında ise D100 yakıtına göre %14,03 oranında düşüşle en düşük ortalama tork değeri TD40 karışımından, en yüksek ortalama tork değeri ise %8,12 düşüş ile TD10 karışımından elde edilmiştir. TD karışımlarından üretilen torkun, D100’e göre düşüş göstermesinin nedeni atık trafo yağının düşük kalorifik değer ile yüksek yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip olmasıdır. TD yakıt karışımlarında atık trafo yağı oranı arttıkça tork değeri bir azalma göstermiştir. (Wongkhorsub and Chindaprasert, 2013), (Kalargaris *et al.* 2017), (Damodharan *et al.* 2017), (Kumar *et al.* 2013)

Tüm test yakıtları için dizel motordan üretilen maksimum tork değerleri en düşük devir olan 1000 dev/dak hızda; D100 için 36,53 Nm, TD10 için 35,71 Nm, TD20 için 34,63 Nm, TD30 için 33,40 Nm, TD40 için 32,41 Nm olarak ölçülmüştür. Tüm yakıtlarda devir sayısı arttıkça üretilen tork değeri düşüş göstermiştir. Maksimum tork değerlerinin elde edildiği 1000 dev/dak hızdaki TD karışımları arasında en yüksek tork değeri TD10 karışımından elde edilmiştir. Yakıt numunesindeki atık trafo yağı içeriği arttıkça diğer motor devirlerinde tork değerinde azalma gözlenmiştir. Şekil 5’te görüleceği gibi WTO nun distilasyon eğrisi dizel yakıtı göre daha yukarıdadır. Bu durum atık trafo yağının dizel yakıtı göre daha yüksek

sıcaklıklarda yanmaya başladığını dolayısıyla yanma sonu sıcaklığı ve basıncının daha yüksek olmasıyla açıklanabilir.

Fren gücü (BP)

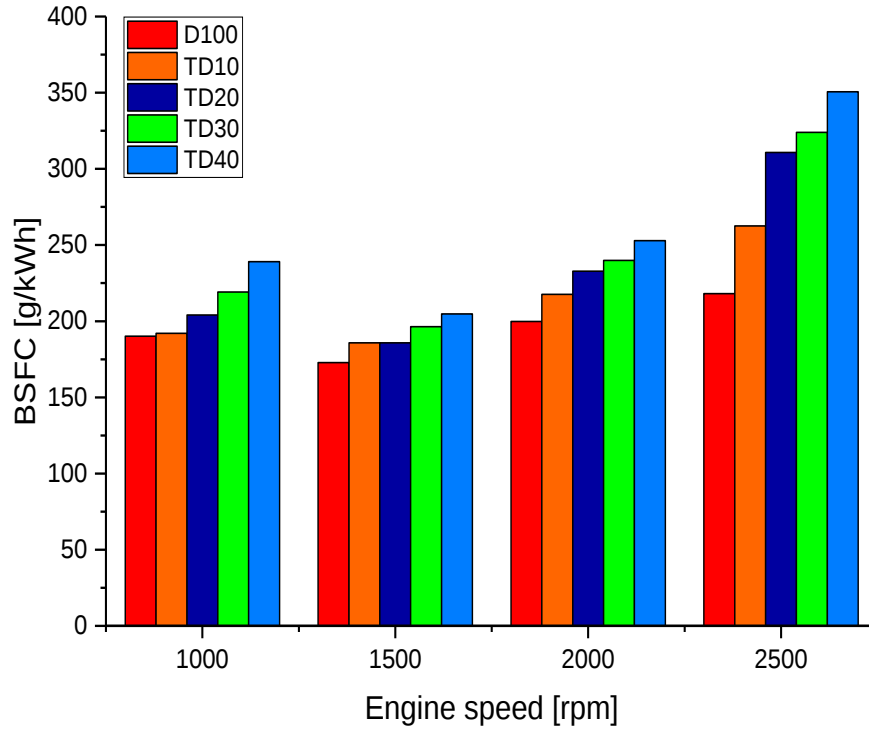


Şekil 21. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki fren gücü değerleri

Yapılan deneylerde D100 yakıtı kullanıldığında her devirde üretilen Fren Gücü (BP), diğer yakıt karışımlarından daha yüksek olarak ölçülmüştür. Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama değerlere bakıldığında ise D100 yakıtına göre %16,01 azalışla en düşük ortalama Fren Gücü TD40 yakıtından, en yüksek ortalama Fren Gücü değeri ise %6,32 düşüşle TD10 yakıtından elde edilmiştir.

TD karışımlarından üretilen fren gücünün, D100' e göre düşüş göstermesinin nedeni atık trafo yağının yüksek yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip olmasıdır. TD yakıt karışımlarında atık trafo yağı oranı arttıkça BP değeri düşüş göstermiştir. (Wongkhorsub and Chindaprasert, 2013), (Kalargaris *et al.* 2017), (Damodharan *et al.* 2017), (Kumar *et al.* 2013)

Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)



Şekil 22. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki BSFC değerleri

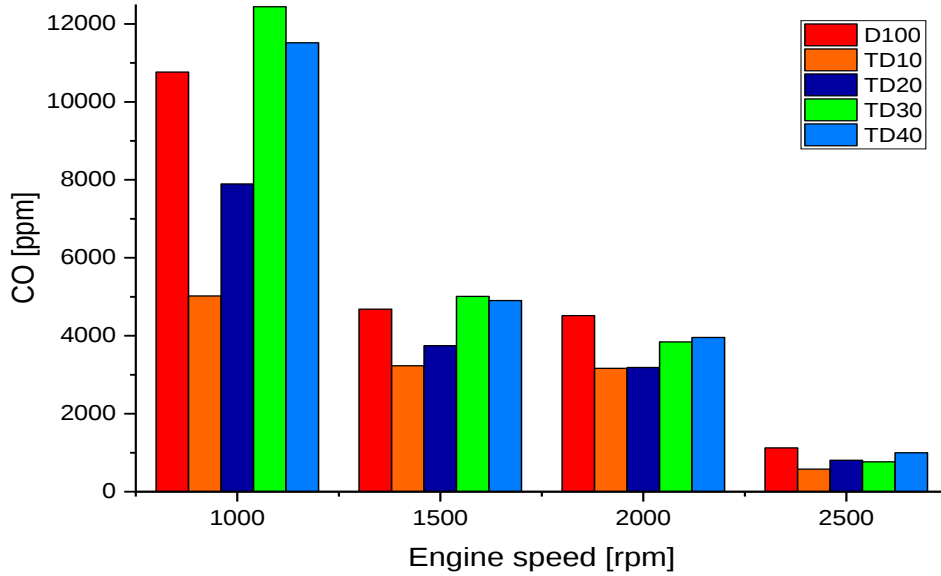
Fren özgül yakıt tüketimi, motordan elde edilen birim güç için tüketilmesi gereken yakıt miktarı olarak ifade edilir. Şekil 8 incelendiğinde ayrı ayrı tüm devirlerdeki en düşük özgül yakıt tüketimi ve tüm devirlerdeki ortalama en düşük özgül yakıt tüketimi D100 yakıtından, en yüksek değerler ise TD40 yakıtından elde edilmiştir. En düşük BSFC değerleri D100 ve TD karışımları için 1500 dev/dak hızda gerçekleşmiştir. Tüm devirlerdeki ortalama özgül yakıt tüketimi D100 yakıtı baz alındığında sırasıyla; TD10'da %9,9 artış, TD20'da %19,5 artış, TD30'da %25,4 artış ve TD40'da ise %34,1 oranında artış göstermiştir. TD karışımları içerisinde tüm devirlerdeki ortalama en düşük BSFC TD10 (214.52 g/kWh) karışımından en yüksek ortalama BSFC ise TD40 (261.83 g/kWh) yakıtından elde edilmiştir.

BSFC değerine etkiyen en önemli parametre yoğunluk ve yakıt kalorifik değeridir. Genel olarak karışım içerisindeki trafo yağının miktarı arttıkça, yoğunluk artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değerlerinde artış gerçekleşmiştir. TD karışımları içerisinde en düşük BSFC değeri, TD10 karışımından elde edilmiştir. Bunun nedeni karışım yakıtlarının içinde en düşük yoğunluğa sahip olmasıdır Oral *et al.* (2022) ve Arpa *et al.* (2019). BSFC değerindeki artışa ilişkin benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından desteklenmektedir. (Sarvestany and Farzad, 2014), (Kana and Shaija, 2022), (Keskin *et al.*2007).

Test Yakıtlarının Emisyon Analizleri

Deneylerde kullanılan 5 adet yakıt numunesinin herbiri için 1000, 1500, 2000, 2500 dev/dak hızlardaki egzozdan atılan CO, NO, NO_x gazlarının emisyon ve EGT değerleri ölçülmüştür. Değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

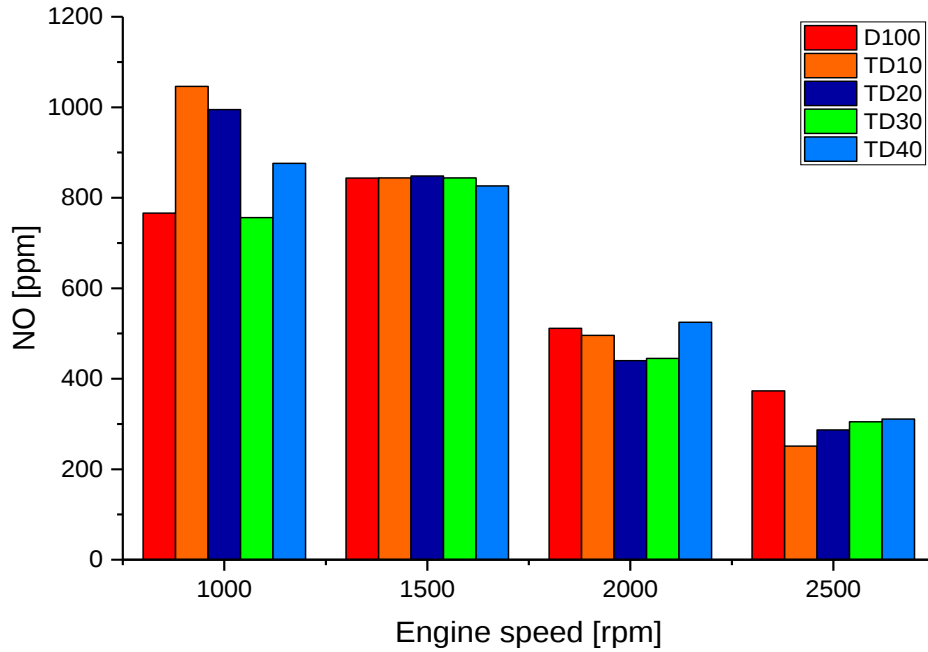
CO emisyonu



Şekil 23. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki CO emisyon değerleri

Farklı devirlerde yapılan testlere göre devir sayısı arttıkça tüm yakıtlar için ayrı ayrı CO emisyonunda azalma gerçekleşmiştir. Dolayısıyla en düşük CO emisyon değerleri 2500dev/dak hızda ölçülmüştür. Bunun nedeni, motor devir sayısını düşürmek için yapılan motor yüklemesi ile birlikte devir sayısı düştükçe azalan hava hareketleri nedeniyle yanma kalitesi düşer. Bu nedenle motor yüküne bağlı olarak zengin yanma gerçekleştiğinden düşük hızlarda eksik yanma gerçekleşir. Bunun sonucunda düşük devirlerde CO emisyonu artar. (Arpa *et al.* 2019), (Ruhul *et al.* 2017). CO emisyonlarının düşük olmasının önemi düşünüldüğünde en düşük değerlerin ölçüldüğü 2500dev/dak hızdaki ölçümler; D100 – 938 ppm, TD10 – 577ppm, TD20 – 808 ppm, TD30 – 767 ppm, TD40 – 999 ppm olarak tespit edilmiştir. Her yakıt için ayrı ayrı tüm devirlerde ölçülen CO emisyonlarının ortalamasına bakıldığında ise D100 yakıtına kıyasla TD10 karışımında %22 düşüş, TD20 karışımında % 18,87 düşüş, TD30 karışımında %22,97 artış, TD40 karışımında %19,15 artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle atık trafo yağı oranının daha düşük TD10 ve TD 20 yakıt karışımlarının tüm hızlardaki ortalamaya göre ölçülen CO emisyonu açısından dizel yakıtı göre gayet iyi CO emisyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

NO emisyonu



Şekil 24. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki NO emisyon değerleri

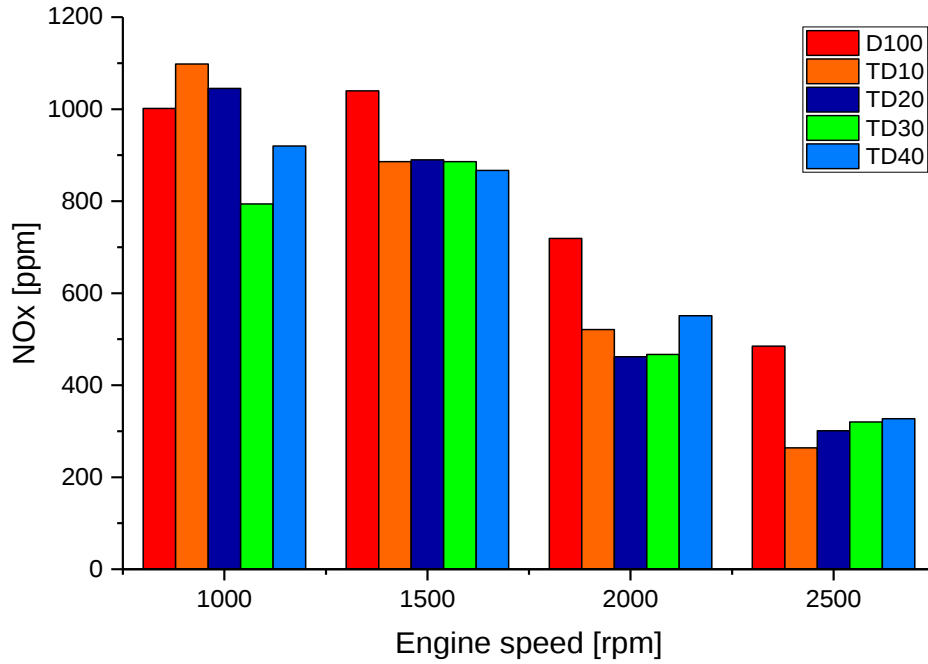
Farklı devirlerde yapılan testlere göre devir sayısı arttıkça tüm yakıtlar için ayrı ayrı NO emisyonunda genel olarak bir azalma gerçekleşmiştir. Dolayısıyla en düşük NO emisyon değerleri 2500dev/dak hızda ölçülmüştür. Arpa *et al.* (2019) çalışmalarında, düşük devirlerde yapılan deneylerde motor yüklerinin yüksek olması bu nedenle sıcaklığın artması ve hava miktarının düşük olması nedeniyle NO ve NOx emisyonlarında daha yüksek değerler oluştuğunu açıklamışlardır.

Tüm yakıtlar içinde en düşük NO emisyon değerlerine D100 yakıtı sahiptir. Diğer yakıt karışımlarının tüm devirler için ortalama ürettikleri NO emisyonu ise D100 baz alındığında sırasıyla; TD30 için %17,32 artış, TD40 yakıtı için %26,71 artış, TD20 için %28,31 artış ve TD10 için %31,65 oranında artış gözlemlenmiştir. Yakıt yoğunluğunun artması silindire giren yakıt/hava oranının da artmasına neden olur ve karışım daha zengin bir hale gelir. Bu da bazı emisyonların artmasına neden olmaktadır (Doğan, 2012).

Genel olarak 4 farklı trafo yağı dizel karışımının dizel yakıtı göre NO emisyonlarının arttığı tespit edilsede farklı devirlere göre inceleme yapıldığında D100 yakıtına kıyasla 1500 dev/dak hızda TD10 karışımının NO emisyonunda %6,88 azalma, TD20 - %4,4 azalma, TD30 - 4,85 azalma, TD40' ta ise % 6,88 oranında azalma gerçekleşmiştir. 2000 dev/dak hız için; TD10 - %0,6 azalma, TD20 - %11,82 azalma, TD30 - %10,82 azalma, TD40 - %5,21 artış gerçekleşmiştir.

Yapılan deney sonucu elde edilen verilere göre 1500 dev/dak ve 2000 dev/dak hızlarda TD10, TD20 ve TD30 karışımlarının NO emisyon değerlerinin D100 yakıtından düşük olduğu dolayısıyla D100 yakıtına göre bu karışımların NO emisyonu açısından 1500 ve 2000 dev/dak hızlarda daha faydalı olduğu tespit edilmiştir.

NOx emisyonu



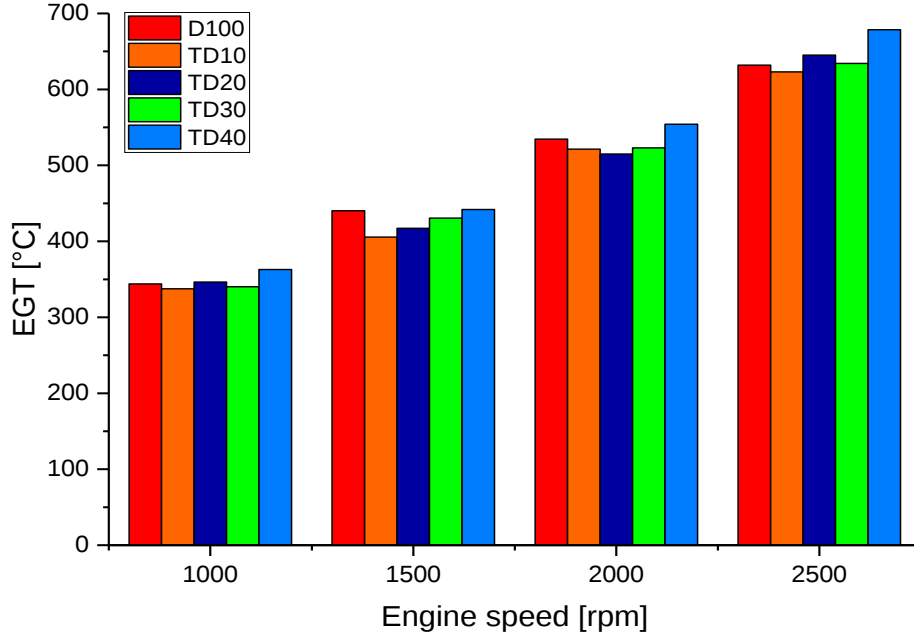
Şekil 25. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki NOx emisyon değerleri

NOx emisyonu ölçümlerine göre tüm yakıtlar için devir sayısı arttıkça NOx emisyon değerlerinin azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla en düşük NOx emisyon değerleri 2500dev/dak hızda ölçülmüştür. Arpa *et al.* (2019) çalışmalarında, düşük devirlerde yapılan deneylerde motor yüklerinin yüksek olması bu nedenle sıcaklığın artması ve hava miktarının düşük olması nedeniyle NO ve NOx emisyonlarında daha yüksek değerler oluştuğunu açıklamışlardır.

1500, 2000, 2500 dev/dak hızlarda en yüksek NOx salınımı D100 yakıtında, 1000 dev/dak hızda ise TD10 > TD20 > D100 > TD40 > TD30 şeklinde gerçekleşmiştir. Azot oksitler genel olarak motorlarda yakıtın yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu açığa çıkar (Borat *et al.*, 1992). Karışımlardaki trafo yağı oranı arttıkça da TD10, TD20 ve TD30 için NOx emisyon değerlerinde azalma olduğu TD40' ta ise diğer karışım yakıtlara nazaran artış olduğu gözlemlenmiştir. Her yakıt için farklı devirlerde üretilen NOx emisyonlarının ortalamasına bakıldığında ise en yüksek emisyon değeri 811,33 ppm ile D100 yakıtı olmuş ve bu baz alındığında sırasıyla TD10 - %14,68 düşüş, TD20 - %16,88 düşüş, TD30 - %23,98 düşüş, TD40

- %17,88 düşüş göstermiştir. TD yakıt karışımlarında gerçekleşen düşük NO_x emisyonları sis ve yer seviyesi ozon oluşumunda azalmayı sağlayacaktır (TOKGÖZ, 2019).

Egzoz gaz sıcaklıkları (EGT)



Şekil 26. Test yakıtlarının farklı devirlerdeki egzoz gazı sıcaklıkları

Egzoz gazı sıcaklıkları her yakıt için devir sayısı yükseldikçe artış göstermiştir. Dolayısıyla 1000 dev/dak hızda en düşük egzoz gazı sıcaklıkları ölçülmüştür.

Her yakıt için farklı devirlerde ölçülen egzoz gazı sıcaklıklarının ortalamasına bakıldığında en yüksek ortalama EGT değerleri TD40 > D100 > TD30 > TD20 > TD10 olarak tespit edilmiştir. D100 (487.68°C) yakıtı baz alındığında ise her devirde ölçülen EGT ortalamasına göre en düşük egzoz gazı sıcaklığı %3,24 azalma ile TD10 (471.90°C) karışımında, en yüksek değer ise TD40 (509.38°C) yakıtında gözlemlenmiştir. Yüksek egzoz sıcaklıkları enerji kaybına işaret eder ve düşük EGT yakılan yakıttan daha fazla iş elde edildiğini gösterir Arpa *et al.* (2019).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı dizel bir motorda dizel yakıtı ile %10 %20 %30 ve %40 oranında atık trafo yağı karıştırılarak elde edilen yakıt karışımları 1000- 1500-2000 ve 2500 dev/dak hızlarda yakılarak 4 farklı devirde motordan üretilen güç, tork, egzoz emisyon değerleri, egzoz gazı sıcaklığı ve efektif yakıt sarfiyatı deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- FT-IR analizi ile atık trafo yağı ve karışımlarının, dizel yakıtı yakın karakteristik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.
- D100 yakıtı katılan atık trafo yağı yüzdesi arttıkça, yoğunluk ve viskozite artış, bulutlanma noktası ise düşüş göstermiştir. Yüksek viskozite, özgül ağırlık ve düşük kalorifik değerleri bakımından dezavantaj sağlamıştır.
- Tüm yakıt karışımlarının yoğunluk, viskozite, akma ve bulutlanma noktası gibi önemli yakıt özelliklerinin ASTM ya da EN standartlarını karşıladığı görülmüştür.
- TG-DSC analizi TD20 numunesinin en iyi yanma performansını göstermiştir.
- Tüm yakıt karışımları dizel motorlarda kullanıma uygundur.
- Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama tork değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD40 yakıtında görülmüştür. TD karışımları içerisinde en iyi ortalama Tork değerine D100' e göre % 8,12 düşüşle TD 10 sahiptir.
- Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama BP değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD40 yakıtında görülmüştür. TD karışımları içerisinde en iyi ortalama BP değerine TD 10 sahiptir. TD10 yakıtı maksimum BP değerine (12,18 kW) 2500 dev/dak hızda ulaşmıştır.
- Tüm devirlerdeki ortalama en düşük fren özgül yakıt tüketimi D100 yakıtından, en yüksek değerler ise TD40 yakıtından elde edilmiştir. En düşük BSFC değerleri D100 ve TD karışımları için 1500 dev/dak hızda gerçekleşmiştir. Tüm devirlerdeki ortalama özgül yakıt tüketimi D100 yakıtı baz alındığında sırasıyla; TD10'da %9,9 artış, TD20'de %19,5 artış, TD30'da %25,4 artış ve TD40'da ise %34,1 oranında artış göstermiştir. TD karışımları içerisinde tüm devirlerdeki ortalama en düşük BSFC TD10 karışımından en yüksek ortalama BSFC ise TD40 yakıtından elde edilmiştir. Genel olarak BSFC yoğunluğa bağlı olarak artış göstermiştir.

- Tüm yakıtlar için devir sayısı arttıkça CO emisyonları azalmıştır. Tüm devirlerde ölçülen CO emisyonlarının ortalamasına bakıldığında ise D100 yakıtına kıyasla TD10 karışımında %22 düşüş, TD20 karışımında % 12,87 düşüş, TD30 karışımında %22,97 artış, TD40 karışımında %19,15 artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle atık trafo yağı oranının daha düşük olduğu TD10 ve TD 20 yakıt karışımlarının tüm hızlardaki ortalamaya göre ölçülen CO emisyonu açısından dizel yakıtı göre çok daha iyi CO emisyon değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm devirler için ortalama en düşük NO_x emisyon değeri TD30 yakıtı, en yüksek ise D100 yakıtında gerçekleşmiştir. Tüm TD karışımlarının NO_x emisyonları D100'e göre düşmüştür. En düşük NO_x emisyon değeri ölçülen TD30karışımı D100' kıyasla 23,98% azalmıştır.
- Her yakıt için farklı devirlerde ölçülen egzoz gazı sıcaklıklarının ortalamasına bakıldığında en yüksek ortalama EGT değerleri TD40 > D100 > TD30 > TD20 > TD10 olarak tespit edilmiştir. D100 yakıtı baz alındığında ise her devirde ölçülen EGT ortalamasına göre en düşük egzoz gazı sıcaklığı %3,24 azalma ile TD10 karışımında gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- A. Keskin, M. Gürü, ve D. Altıparmak, 2007. “Biodiesel production from tall oil with synthesized Mn and Ni based additives: Effects of the additives on fuel consumption and emissions”, *Fuel*, c. 86, sayı 7–8, ss. 1139–1143, doi: 10.1016/j.fuel.2006.10.021.
- A. M. Ruhul *et al.* 2017. “Evaluating combustion, performance and emission characteristics of *Milletia pinnata* and *Croton megalocarpus* biodiesel blends in a diesel engine”, *Energy*, c. 141, ss. 2362–2376, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.11.096.
- AKBOĞA, İ.H., 2022. Elektrikli Bir Dizel Motorlu Jeneratörde Farklı Elektiriksel Yük Ve Yakıtlardaki Performans Analizi, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Batman.
- Altun, Ş., Öner, C., Sugözü, İ., Akbaş, B., 2007. Fındık yağının dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması ve yanma karakteristiklerinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4 (2), ss.15-24.
- Anonim, 2009. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü PCB ve PCT İçeren Atıkların Yönetimi El Kılavuzu Nisan 2009, 41-48
- Bedir and Doğan., 2021. Comparison of catalytic activities of Ca-based catalysts from waste in biodiesel production, ISSN:15567230, <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1883159>
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S., 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and building materials*, 68, 501-516.
- Beşergil, B. Yakıtlar Yağlar Ege Üniversitesi Yayını, İzmir, 2009 <https://bilsenbesergil.blogspot.com/> Erişim Tarihi:10.12.2022
- Borat O., Balcı M., Sürmen A., 1992. “Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği”, Teknik Eğitim Vakfı Yayını, Ankara,
- Borat O., Balcı, M., Sürmen A., 1995. İçten Yanmalı Motorlar, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları.
- C. Wongkhorsub ve N. Chindaprasert, 2013. “A Comparison of the Use of Pyrolysis Oils in Diesel Engine”, *Energy Power Eng.*, c. 05, sayı 04, ss. 350–355, doi: 10.4236/EPE.2013.54B068.
- Canbaz, E., 2022. Kenevir Yağından Elde Edilen Biyodizelin Dizel Motor Parametrelerine Etkilerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Çelik, S., 2014. İçten yanmalı motorlar., Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları. https://selahattincelik.com/wp-content/uploads/2014/01/MOTORLAR_DERS-NOTU_Ders1_Ders_2.pdf Erişim Tarihi: 04.12.2022
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, İstanbul, ISBN:975-8431-91-9.
- D. Damodharan, A. P. Sathiyagnanam, D. Rana, B. Rajesh Kumar, ve S. Saravanan, 2017. “Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of n-butanol addition on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel

- blends”, *Energy Convers. Manag.*, c. 131, ss. 117–126, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.10.076.
- Demirel H.T., 2004. Diesel motorlarda alternatif yakıt olarak biyodiesel kullanımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğan, O., Çelik, M. B. and Özdalyan, B., 2012. The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 95 340-346.
- EPRI Portfolio, 2007. Transmission reliability and performance: 37.002, extending transformer life, <http://www.epri.com/portfolio/> . Erişim Tarihi: 11.12.2022
- Grohe, H., 1999. Otto and Diesel Engines Book, Bilim Teknik Yayınevi, 8. baskı, ISBN: 978975540088.
- <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Ulastirma-ve-Haberlesme-112> Erişim tarihi:11.12.2022
- <https://www.transcantrafo.com/trafo-izolasyon-malzemeleri.html/> Erişim Tarihi 11.12.2022
- <https://www.ulsoyelektrik.com.tr/tr> , Erişim tarihi:11.12.2022
- I. Kalargaris, G. Tian, ve S. Gu, 2017. “Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil”, *Fuel Process. Technol.*, c. 157, ss. 108–115, doi: 10.1016/J.FUPROC.2016.11.016.
- İ. V. Öner, A. E. Atabani, ve T. Durnagöl, 2023. “Recycling of waste tires to crude pyrolytic oil: Engine performance, combustion characteristics and emissions analysis of diesel-butanol-crude pyrolytic oil blends in CI diesel engines”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, c. 56, doi: 10.1016/j.seta.2023.103023.
- J. Ajay ve G. Viswanath, 2020. “A study on waste transformer oil blended with BD IC engine application”, içinde *Materials Today: Proceedings*, c. 22, ss. 865–868. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.034.
- K. Gedik, 2012. Atık yağlardan kaynaklanan çevre sorunları, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Atık yönetimi sempozyumu, Antalya/Türkiye
- KARACA T., 2022. Biyodizel/Atık Trafo Yağı/Dizel Karışımlarının Bazı Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum
- KELEN, F., 2014. Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(1-2), 80-87.
- Kılıç, A., 2004. Dört zamanlı aşırı doldurmalı Dizel motorun termik hesabı, Cumhuriyet Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıl İçi Projesi, Sivas.
- Küçükşahin, F., 1990. Dizel Motorları, Beta yayın Dağıtım A.Ş., Ekim 1990, ISBN: 9754861390.
- M. Heathcote, J & P Transformer Book. 2007. doi: 10.1016/B978-0-7506-8164-3.X5000-5.
- M. Chiesa, Sarit K. Das, 2009. Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 335, Issues 1–3, 2009, Pages 88-97, ISSN 0927-7757
- M. Rafiq, Y.Z. Lv, Y. Zhou, K.B. Ma, W. Wang, C.R. Li, Q. Wang, 2015. Use of vegetable oils as transformer oils – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume

- M. Rajnak , M. Timko , P. Kopcansky , K. Paulovicova , J. Kuchta , M. Franko , J. Kurimsky , B. Dolnik , R. Cimbala, 2019. "Transformer oil-based magnetic nanofluid with high dielectric losses tested for cooling of a model transformer," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 4, pp. 1343-1349, Aug. 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.008047.
- M. Vergel-Ortega, G. Valencia-Ochoa, J. Duarte-Forero,2021. Experimental study of emissions in single-cylinder diesel engine operating with diesel-biodiesel blends of palm oil-sunflower oil and ethanol,Case Studies in Thermal Engineering,Volume 26, 101190,ISSN 2214-157X
- Marshall E.L., OWEN K., 1995. Motor Gasoline, Hartnolls Ltd, Bodmin, Cornwall, UK
- Maryom Dabi, Ujjwal K. Saha, 2022. Performance, combustion and emissions analyses of a single-cylinder stationary compression ignition engine powered by Mesua Ferrea Linn oil-ethanol-diesel blend, Cleaner Engineering and Technology, Volume 8
- Materials Today: Proceedings,Volume 22, Part 3,2020, Pages 865-868,ISSN 2214-7853
- Md Nurun Nabi, Md Shamim Akhter, Md Atiqur Rahman, 2013. Transformer Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engine, Procedia Engineering, Volume 56, Pages 401-406, ISSN 1877-7058.
- N. S. Sarvestany ve A. Farzad, 2014. "Effects of magnetic nanofluid fuel combustion on performance and emission characteristics", J. Dispers., Erişim: 24 Şubat 2023. [Çevrimiçi].Availableat:<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01932691.2013.874296>
- N. Sethuraman, D. Karthikeyan, S. Vinodraj, R. Thamizhvel, Gowtham Kumarasamy, 2022. Performance and emission characteristics on CI engine by using waste cooking oil and waste transformer oil as substitute fuel with coconut shell as a catalyst, Materials Today: Proceedings, Volume 72, Part 4,,Pages 2469-2475,ISSN 2214-785
- O. Arpa , M. Demir and R. Yumrutař, 2019. "Atık Yağlama Yağından Elde Edilen Yakıt-Motorin Karışımlarının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarının Araştırılması", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 191-201, Mar. 2019, doi:10.24012/dumf.523585.
- Oral F. , Çolak N.Y. , Şimşek D., 2022. Küçük etkili enerji bileşenleri kullanılan dizel jeneratörde ek yakıt olarak atık motor yağı ve alkol tüketimi emisyon etkileri Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2022; 38(2): 865-874.
- Öcal, M., 2007. MMO, Mühendis ve Makina , Cilt : 48, Sayı: 568, 24-25
- PEKER A., 2000. Benzin ve Dizel Motorların Performansına Alternatif Yakıtların ve Katkı Maddelerinin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pramod N. Belkhode, Vinod N. Ganvir, Anand C. Shende, Sagar D. Shelare, 2022. "Utilization of waste transformer oil as a fuel in diesel engine", Materials Today: Proceedings, Volume 49, Part 2.
- R. Behçet ve A. Eroğlu, 2021."Evaluation As Diesel Engine Fuel Of Waste Plastics In Malatya", J. Inst. Sci. Technol., c. 11, sayı 1, ss. 563-574, doi: 10.21597/jist.798105.
- R. R. Al-Samaraae *et al.* 2020. "Perspective of safflower (*Carthamus tinctorius*) as a potential biodiesel feedstock in Turkey: characterization, engine performance and emissions analyses of butanol-biodiesel-diesel blends", Biofuels, c. 11, sayı 6, ss. 715-731, doi: 10.1080/17597269.2017.1398956.

- R. Sathiyamoorthi, G. Sankaranarayanan, 2017. The effects of using ethanol as additive on the combustion and emissions of a direct injection diesel engine fuelled with neat lemongrass oil-diesel fuel blend, *Renewable Energy*, Volume 101.
- Rahman, M. M., Pourkhesalian A. M., Jahirul, M. I., Stevanovic, S., Pham, P. X., Wang, H., Masri, A. R., Brown, R. J., and Ristovski, Z. D., 2014. Particle emissions from biodiesels with different physical properties and chemical composition“, *Fuel*, vol. 134, no. June, pp. 201–208.
- S. Kumar, R. Prakash, S. Murugan, ve R. K. Singh, 2013. “Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine”, *Energy Convers. Manag.*, c. 74, ss. 323–331,doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2013.05.028.
- S. Prasanna Raj Yadav, C.G. Saravanan, 2015. Engine characterization study of hydrocarbon fuel derived through recycling of waste transformer oil, *Journal of the Energy Institute*, Volume 88, Issue 4.
- S. Prasanna Raj Yadav, C.G. Saravanan, M. Kannan, 2015. Influence of injection timing on DI diesel engine characteristics fueled with waste transformer oil, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 54, Issue 4, Pages 881-888, ISSN 1110-0168,
- S. Rajesh Kana ve A. Shaija, 2022. “Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine using waste avocado biodiesel with manganese-doped alumina nanoparticles”, *Int. J. Ambient Energy*, c. 43, sayı 1, ss. 1437–1444,doi: 10.1080/01430750.2019.1707112.
- S. Üstün, 2021. “Investigation of engine performance and emission characteristics of organic-based manganese addition into waste fusel oil-diesel mixture”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, c. 36, sayı 3, ss. 1515–1529,doi: 10.17341/gazimmfd.826801.
- Stojković, I. J., Stamenković, O. S., Povrenović, D. S., and Veljković, V. B., 2014. Purification technologies for crude biodiesel obtained by alkali-catalyzed transesterification“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 1–15.
- Sürer E. , Solmaz H. , Yılmaz E. , Calam A. , İpci D., 2022. Dizel-biyodizel karışımına karbon nanotüp katkısının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2022; 38(2): 1055-1064.
- T. H. Doğan, 2016. “The testing of the effects of cooking conditions on the quality of biodiesel produced from waste cooking oils”, *Renew. Energy*, c. 94, ss. 466–473,doi: 10.1016/j.renene.2016.03.088.
- T. Karaca ve T. H. Doğan, 2022. “Removal of water in waste transformer oil considered as an alternative fuel by a factory tea waste-based adsorption process”, *Biomass Convers. Biorefinery*, doi: 10.1007/s13399-022-03365-5.
- T. M. Y. Khan, 2021. “Direct transesterification for biodiesel production and testing the engine for performance and emissions run on biodiesel-diesel-nano blends”, *Nanomaterials*, c. 11, sayı 2, ss. 1–20, doi: 10.3390/nano11020417.
- H. Venkatesan, J. Lionel Fernandes, ve S. Sivamani, 2019. “Effect of nano-enriched emulsified Pongamia biodiesel on combustion, performance and emission parameters of a compression ignition engine”, *World J. Eng.*, c. 16, sayı 6, ss. 737–750, doi: 10.1108/WJE-03-2019-0070.
- Tasic, T., Pogorevc, P., & Brajlili, T.. 2011. Gasoline and LPG exhaust emissions comparison. *Advances in Production Engineering & Management*, 6(2), 87-94.
- TMMOB Kimya Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 2015,

Madeni Yağlar Hakkında Bilgi Notları

TMMOB, 1999. Araçlarda LPG Dönüşümü yayın No:217

TOKGÖZ M.A., 2019. Motorlu Kara Taşıtlarında Karbon Dioksit ve Hava Kirleticisi Emisyonlarının Tarihsel Gelişimi ve Elektrikli Araçlara Geçiş ile Sağlanabilecek Potansiyel Emisyon Azaltımları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Usta, N., Çelikten, İ., Özer, C., 2004. “Effects of ethanol addition on performance and emissions of an IDI Diesel engine running at different injection pressures”, *Energy Conversion and Management*, 45(15), 2429-2440

Bartley, WH., 2005. International analysis of transformer failures, part 2. International Engineering Insurance Association (IMIA) , 78 (1).

S. P. Raj Yadav ve C. G. Saravanan, 2015. “Engine characterization study of hydrocarbon fuel derived through recycling of waste transformer oil”, *J. Energy Inst.*, c. 88, sayı 4, ss. 386–397, doi: 10.1016/j.joei.2014.10.006.

Yangyi Wu, Xiyuan Zhang, Zhao Zhang, Xichang Wang, Zhenlong Geng, Chao Jin, Haifeng Liu, Mingfa Yao, 2020. Effects of diesel-ethanol-THF blend fuel on the performance and exhaust emissions on a heavy-duty diesel engine, *Fuel*, Volume 271.

Yardım, M., H., Motor Teknolojisi, Nobel Yayınevi, 3. Basım, Eylül 2015

A. Yıldız, 2019. “The use of waste transformer oil as alternative fuel in a diesel power generator”, *Int. J. Automot. Eng. Technol.*, c. 8, sayı 3, ss. 117–124, doi: 10.18245/ijaet.564043.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Nihat Sami ŞEN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	