



**DİZEL MOTORLARDA ATIK TAŞIT LASTİKLERİNDEN
ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN YANMA VE EMİSYON
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Mesut UÇAR

Yüksek Lisans Tezi

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. İsmail TÜRK BAY
(İkinci Danışman: Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT)**

KASIM-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİZEL MOTORLARDA ATIK TAŞIT LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN
PİROLİTİK YAĞIN YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut UÇAR
(151136103)

Anabilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsmail TÜRKBAY

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.10.2017

KASIM 2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİZEL MOTORLARDA ATIK TAŞIT LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN
PİROLİTİK YAĞIN YANMA VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mesut UÇAR
(151136103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.10.2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 06.11.2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İsmail TÜRK BAY(F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü)
Doç. Dr. Şehmus ALTUN (B.Ü)

KASIM 2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada, dizel motorlarda atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi konu edilmiştir. Bu çalışmada, atık taşıt lastiklerinden vakum piroliz işlemleriyle elde edilen piroliz yağının bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi ve atık taşıt lastiklerin oluşturduğu çevre kirliliğinin azaltılarak dizel yakıtına ekonomik açıdan alternatif bir katkı maddesi olarak gösterilmesi amaçlanmıştır. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen verilerin kullanışsız olarak görülebilen atık taşıt lastiklerinin bundan sonraki değerlendirilmelerinde katma değeri yüksek bir yakıt olarak görülmesini temenni ederim.

Bu konuda araştırma yapmamda bana yol gösteren ve yardımcı olan tez danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. İsmail TÜRK BAY ve Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT' a, çalışmam sırasında bilgilerini benimle paylaşarak destek olan Prof. Dr. Yasin VAROL ve Arş. Gör. Mutlu OKCU hocalarıma ve deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan yakın arkadaşım Okan ÇELİK'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında finansal destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (FÜBAP), pirolitik yağ için destek veren Marmore Mühendislik Araştırma San. Tic. A.Ş. firmasına ve yazılım destekleri için AVL firmasına teşekkür ederim.

Ayrıca beni her zaman maddi ve manevi yönden destekleyen başta annem ve abilerim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mesut UÇAR
ELA ZIĞ - 2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLOLAR LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Dizel Motorları	14
1.2. Atık Taşıt Lastikleri	16
1.2.1. Taşıt Lastiğinin Yapısı.....	16
1.3. Taşıt Lastiklerinin Yakıt Olarak Kullanımı	18
1.3.1. Yanma.....	19
1.3.2. Gazlaştırma	19
1.3.3. Sıvılaştırma	19
1.4. Piroliz.....	20
1.4.1. Piroliz Ürünleri	21
1.4.2. Katı Ürün	21
1.4.3. Sıvı Ürün.....	21
1.4.4. Gaz Ürün.....	22
2. MATERYAL ve METOT	23

2.1.	Deneysel Çalışma	23
2.1.1.	Deney Test Motoru	25
2.1.2.	Egzoz Emisyon Cihazı.....	26
2.1.3.	Yakıt Tüketimi Ölçüm Ünitesi	27
2.1.4.	Silindir İçi Basıncın Ölçülmesi.....	29
2.1.5.	Deneyde Kullanılan Yakıtlar	30
2.1.6.	Deneylerin Yapılışı	32
2.2.	Sayısal Çalışma.....	33
2.2.1.	Sayısal Analiz Programının Tanıtımı	33
3.	BULGULAR	37
3.1.	Deneysel Bulgular	37
3.1.1.	Farklı Motor Yüklerine Göre Elde Edilen Bulgular	37
3.1.2.	Farklı Motor Devirlerine Göre Elde Edilen Bulgular.....	52
3.2.	Sayısal Bulgular.....	62
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	68
5.	ÖNERİLER	70
	KAYNAKLAR	71
	ÖZGEÇMİŞ	76

ÖZET

Bu tez çalışmasında dizel motorlarında atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağının yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi konu edilmiş ve uygulamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar 4 silindirli 4 zamanlı 1.9 litre hacme sahip multijet bir dizel motorunda yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda yakıt olarak saf dizel(%100 dizel), B10(%90 dizel + %10 benzin), B20(%80 dizel + %20 benzin), B30(%70 dizel + %30 benzin), P10(%90 dizel + %10 pirolitik yağı), P20(%80 dizel + %20 pirolitik yağı) ve P30(%70 dizel + %30 pirolitik yağı) karışım yakıtları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada 2000 d/d sabit motor devrinde değişen motor yüklerde, ikinci aşamada ise %0 ve %25 sabit yük durumunda değişen motor devirlerinde motor performans ve emisyon değerleri analiz edilmiştir. Sayısal çalışmalar ise motor performans ve emisyon analiz programı olan AVL FIRE isimli programda saf dizel, B10, B20 ve B30 yakıt karışımları tanımlanarak gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin standart dizel yakıtı %30'a kadar pirolitik yağı ilavesinin motor performansı ve yanma karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Ayrıca bazı emisyon değerlerinde olumlu değişimler, bazılarında ise olumsuz değişimler gözlenmiştir. Dizel yakıtı ilave edilen pirolitik yakıtın silindir basıncını ve ısı açığa çıkışını geciktirdiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, mevcut deneysel çalışmalarda atık lastik yağının standart bir dizel motorunda başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atık Taşıt Lastiği, Pirolitik Yağ, Dizel Motor, Kirletici Emisyonlar

SUMMARY

Experimental and Numerical Investigation on the Effects of Combustion and Emission Characteristics Pyrolytic Oil From Waste Tire Tires in Diesel Engines

In this thesis study, experimental and numerical investigation of the effects of combustion and emission characteristics of pyrolytic oil obtained from waste vehicle tires on diesel engines is discussed and implemented in practice. Experimental studies were carried out on a multijet diesel engine with 4 cylinders, 4 timings and a volume of 1.9 liters. In experimental studies, mixture fuels were used as fuel that pure diesel (100% diesel), B10 (90% diesel + 10% gasoline), B20 (80% diesel + 20% gasoline), B30 (70% diesel + 30% + 10% pyrolytic oil), P20 (80% diesel + 20% pyrolytic oil) and P30 (70% diesel + 30% pyrolytic oil). Experimental studies were carried out in two stages. The engine performance and emission values were analyzed at varying engine load ratios at constant engine speeds of 2000 rpm in the first stage and at varying engine speeds at 0% and 25% constant load in the second stage. Numerical studies were carried out in the virtual environment by defining pure diesel, B10, B20 and B30 fuel mixtures in the engine performance and emission analysis program called AVL FIRE.

When the test results are examined, the engine performance and combustion characteristics pyrolytic oil of addition up to 30% at the standard diesel fuel can not be significantly influenced that without any changes in the engine fuel system. In addition, positive changes in some emission values and negative changes in others have been observed. It has been understood that the pyrolytic fuel added to the diesel fuel retarded the cylinder pressure and heat output. As a result, it can be seen that waste tire oil can be successfully used in a standard diesel engine in existing experimental studies.

Keywords: Waste Vehicle Tire, Pyrolytic Oil, Diesel Engine, Pollutant Emissions

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Dört zamanlı dizel motorların gerçek çevrim diyagramı .	14
Şekil 1.2. Dört zamanlı dizel motorların çalışma prensibi.	15
Şekil 1.3. Taşıt lastiğinin kesit görünümü	17
Şekil 1.4. Atık taşıt lastiklerine uygulanabilecek ısıt işlem süreçleri	19
Şekil 1.5. Atık taşıt lastiğinin geri dönüşümünden elde edilen malzemeler	21
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü	23
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin genel görünümü	24
Şekil 2.3. Cussons P8160 marka dinamometrenin genel görünümü	24
Şekil 2.4. Deney test motorunun genel görünümü	25
Şekil 2.5. Egzoz emisyon cihazının genel görünümü	26
Şekil 2.6. Duman ölçüm cihazının genel görünümü	27
Şekil 2.7. Hassas terazinin genel görünümü	27
Şekil 2.8. Sensörlerden gelen sinyalleri işleyen bilgi işleyicinin (Data Logger) genel görünümü	29
Şekil 2.9. FebriS adlı programın ekran görüntüsü	29
Şekil 2.10. Farklı oranlarda dizel-benzin karışımlarının genel görünümü	31
Şekil 2.11. Farklı oranlarda dizel-pirolitik yağ karışımlarının genel görünümü	32
Şekil 2.12. AVL FIRE analiz programının giriş bölümünün genel görünümü	34
Şekil 2.13. Piston için girilen parametre değerleri ve yanma odasına yakıtın püskürtülme şeklinin görünümü	34
Şekil 2.14. Analiz Programında oluşturulan yanma odasının meshli görünümü	35
Şekil 2.15. Sanal ortamda oluşturulan yakıt karışımlarının oransal olarak genel görünümü	35
Şekil 3.1. Silindir içi basıncın motor yüküne bağlı değişimi	38
Şekil 3.2. Isı salınım oranının motor yüküne bağlı değişimi	40
Şekil 3.3. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının krank açısına bağlı olarak değişimi (%0 motor yükü)	42
Şekil 3.4. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının krank açısına bağlı olarak değişimi (%20 motor yükü)	43

Şekil 3.5. CO emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi.....	45
Şekil 3.6. CO ₂ emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi	46
Şekil 3.7. HC emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi.....	48
Şekil 3.8. NO _x emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi	49
Şekil 3.9. İ _s emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi	51
Şekil 3.10. Değişen motor yük durumlarında tüm karışım yakıtlarının özgül yakıt tüketimleri	51
Şekil 3.11. Değişen motor yük durumlarında tüm karışım yakıtlarının fren termal verimleri	52
Şekil 3.12. Silindir içi basıncın motor devrine bağlı değişimi	53
Şekil 3.13. Isı salınım oranının motor devrine bağlı değişimi	54
Şekil 3.14. CO emisyonunun motor devrine bağlı değişimi	55
Şekil 3.15. CO ₂ emisyonunun motor devrine bağlı değişimi	56
Şekil 3.16. HC emisyonunun motor devrine bağlı değişimi	57
Şekil 3.17. NO _x emisyonunun motor devrine bağlı değişimi	59
Şekil 3.18. İ _s emisyonunun motor devrine bağlı değişimi	60
Şekil 3.19. %25 sabit motor yükünde değişen motor devirlerinde özgül yakıt tüketiminin değişimi	61
Şekil 3.20. %25 sabit motor yükünde değişen motor devirlerinde fren termal veriminin değişimi	62
Şekil 3.21. Krank açısına göre silindir içi basınç değişimleri	63
Şekil 3.22. Krank açısına göre ısı salınım oranı değişimleri.....	63
Şekil 3.23. Krank açısına göre silindir içi sıcaklık değişimleri.....	64
Şekil 3.24. Krank açısına göre silindir içi CO emisyonu değişimleri	65
Şekil 3.25. Krank açısına göre silindir içi CO ₂ emisyonu değişimleri.....	66
Şekil 3.26. Krank açısına göre silindir içi NO _x emisyonu değişimleri.....	66
Şekil 3.27. Krank açısına göre silindir içi İ _s emisyonu değişimleri.....	67

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Piroliz yöntemleri ve çıkan ürünler .	20
Tablo 2.1. Deney motorunun özellikleri	25
Tablo 2.2. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri	26
Tablo 2.3. Duman ölçüm cihazının teknik özellikleri	27
Tablo 2.4. Dizel yakıtının kimyasal özellikleri	30
Tablo 2.5. Benzin yakıtının kimyasal özellikleri	30
Tablo 2.6. Pirolitik yağın kimyasal özellikleri	31
Tablo 2.7. Çalışmada kullanılan modeller	36

SEMBOLLER LİSTESİ

CO₂	: Karbon dioksit
CO	: Karbon monoksit
HC	: Hidrokarbon
PAH	: Poli-aromatik hidrokarbon
SO₂	: Kükürt dioksit
SO₃	: Kükürt trioksit
NO_x	: Azot oksit
NO	: Azot monoksit
PM	: Partikül madde
ZnO	: Çinko oksit
S	: Kükürt
NH₃	: Amonyak
H₂	: Hidrojen
T	: Sıcaklık
°C	: Santigrat derece
CH₄	: Metan
N₂	: Azot
Ar	: Argon
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit
CaO	: Kalsiyum oksit
NaOH	: Sodyum hidroksit
H₂S	: Hidrojen sülfür
COS	: Karbon mono sülfür
Na₂S	: Sodyum sülfür
CaS	: Kalsiyum sülfür
HDS	: Hidro desülfürizasyon
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
H₂SO₄	: Sülfürik asit
ZnCl₂	: Çinko klorür,
Na₂CO₃	: Sodyum karbonat

KISALTMALAR

HP	: Beygir gücü
KWh	: Kilowatt saat
kPa	: Kilopascal
kW	: Kilowatt
Mpa	: Megapascal
Nm	: Newton metre
STPO	: Scarp Tires Pyrolysis Oil
EGR	: Egzoz Gaz Resirkülasyonu
HLPY	: Ham Lastik Pirolitik Yakıtı
ppm	: Milyonda bir parça
LPY	: Lastik Pirolitik Yakıtı
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygınlaşan ve artarak devam eden modern ve refah içinde yaşamak anlayışı temel enerji ihtiyaçlarının ve kullanımlarının artmasına neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak da doğada var olan enerji kaynaklarının tükenme süreci hızlanmıştır. Temel enerji kaynaklarından birisi olan petrol ve türevlerinin insanoğlunun yaşamında çok önemli bir yer tuttuğu bilinmektedir. Ekonomiden sanayiye kadar hemen her sektör, doğrudan ya da dolaylı olarak petrole bağımlıdır. Bu nedenle, petrol piyasasında ortaya çıkan herhangi bir problem zincirleme reaksiyon ile hem ülkemizi hem de dünyayı olumsuz yönde etkilemektedir.

Dünyada nüfus artışına paralel olarak enerji gereksinimi her yıl giderek artmakta, buna karşılık fosil petrol rezervleri de hızla azalmaktadır. Petrolden üretilen yakıtlarının yoğun olarak kullanıldığı ulaşım sektörü, petrol yakıtlarına en bağımlı alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Ulaşım sektöründe kullanılan ana yakıtlar benzin ve dizeldir. Dünyanın birçok yerinde yakıt fiyatlarının artışı ve emisyon standartları dizel ve benzin yakıtlarının yerini alacak alternatif yakıtlar üzerine çeşitli çalışmaları beraberinde getirmiştir. Ulaşım sektöründe olduğu kadar, sabit tesisler için de birçok alternatif yakıt düşünülmüştür. Alternatif yakıtların bazıları esas olarak düşük ölçekli veya özel kullanım için düşünülürken, birçoğu da güncel hayattaki genel kullanım için büyük bir potansiyel oluştururlar. Bu bağlamda, alternatif yakıtlar günümüzde ticari ölçekte yaygın olarak kullanılmayan fakat kullanılabilme potansiyeli taşıyan yakıtlardır. Alkol, biyodizel ve petrol kökenli atıklardan elde edilen sıvı yakıtlar, içten yanmalı motorlar için başlıca alternatif yakıtlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Petrol kökenli atıklara iyi bir örnek olarak kullanılmış taşıt lastikleri gösterilebilir. Çünkü kömür, petrol, doğal gaz gibi atık taşıt lastikleri de hidrokarbonlardan oluşur. %90'dan fazlası organik olan ve ısı değeri 32,6-42,8 MJ/kg arasında değişebilen atık taşıt lastiği, ısı değeri 18,6-27,9 MJ/kg arasında değişen kömürden daha fazla ısı değere sahiptir. Bununla birlikte çeşitli işlemler sonucunda ısı değeri yaklaşık 40-45 MJ/kg olan dizel yakıtının ısı değerine de yaklaşabilirler[18].

Ülkemizdeki karayolu ulaşımı ve kullanılan araç sayısı düşünüldüğünde, milyonlarca taşıttan yine milyonlarca atık lastik elde edilmekte ve elde edilen atık lastiklerin büyük bir çoğunluğu yasa dışı yollarla doğaya terk edilmektedir. Bu lastiklerin biyolojik olarak çözünmesi uzun bir zaman almaktadır. Atık lastiklerin çok az bir kısmı da tuğla veya çimento üretim fabrikalarında pişirme amaçlı kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra atık lastikler parçalanıp beton içerisine katılarak betonun bazı özelliklerini iyileştirilmektedir. Bu lastikler çoğu zaman açık havada yasadışı ve uygunsuz olarak yakılması çevreye büyük zararlar vermektedir. Bu lastiklerin oluşturduğu yangınlar çok büyük hava, toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır. Bu duruma yönelik bazı güvenlik veya depolama tedbirlerinin alınması gerekmekte bu da bazı maliyetler oluşturmaktadır. Atık taşıt lastiklerinden piroliz işlemleriyle elde edilen yakıtların enerji üretiminde değerlendirilmesi halinde, hem gereksiz maliyetlerden kaçınılmış olacak hem de bir katma değer sağlanmış olacaktır. Bu atık lastiklerden elde edilen yağın yakıt olarak kullanımıyla ilgili farklı çalışmalar yapılmaktadır. Hem dizel hem de benzinli motorlarda yakıt olarak kullanılması araştırmacılar tarafından büyük ilgi görürken bazı kötü özelliklerinin giderilmesi için araştırma çalışmaları da yapılmaktadır. Bu konudaki birçok araştırmacı farklı çalışmalar yapmışlardır. Aşağıda literatürde yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Hita vd. [1] hurda lastiklerin piroliz işlemi ile yüksek kaliteli yakıt üretmek için gerekli fırsatlar ve zorluklarını inceledikleri çalışmalarında, piroliz işlemi üzerine özel bir odaklanma gerçekleştirmişlerdir. Piroliz işlemi ana hatlarıyla anlatılmış ve piroliz işleminden elde edilen ana ürünler ve bu ürünlerin özelliklerine göre değerlendirme yollarının mevcut durumları gözden geçirilmiştir. Scarp Tires Pyrolysis Oil (STPO) ekonomik ve enerjik bir ürün kompozisyonu olduğu vurgulanmıştır. Ama STPO'nun başlıca olumsuzlukları da belirtilmiştir. Bu olumsuzluklar yüksek kükürt içeriği, yüksek aromatik içeriği ve içerisindeki ağır moleküllerdir ($> 350^{\circ}\text{C}$). Endüstriyel açıdan bakıldığında, tüm bu olumsuzlukları aşmak ve yüksek kaliteli yakıt üretmek için en yaygın yaklaşım, katalizör aktivitesini artıracak şekilde seri yerleştirilmiş farklı katalizör yatakları ile damla yatak rejiminde çalışan, sabit yataklı reaktör kullanmak olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang vd. [2] atık lastiklerin termal pirolizinden üretilen alternatif yakıtlar ve dizel motorlarında kullanımı adlı çalışmalarında, atık lastik pirolizinden elde edilen katı, sıvı ve gaz ürünlerinin verimleri araştırılmıştır.

Çalışmalarında, lastikler çeşitli reaksiyon sıcaklıklarında sabit yatak reaktörü içinde piroliz edilmiştir. Çeşitli piroliz sıcaklıklarında elde edilen TPO (Tires Pyrolysis Oil) farklı

oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılmış ve daha sonra bir dizel motorunda test edilmiştir. Motor performansı, yakıt tüketimi, silindir basıncı, motor gücü ve SO₂ emisyonları incelenmiştir. Yakıt veriminin 350°C ile 400°C reaksiyon sıcaklığında arttığı ancak sıcaklığın 400°C ile 450°C aralığında iken verimin % 57'ye düştüğü belirtilmiştir. 400°C piroliz sıcaklığının en iyi sıvı ürün elde etmek için en uygun çalışma sıcaklığı olduğu vurgulanmıştır. Piroliz sıcaklığının artırılması yüksek kalorifik değerli TPO ürettiği ve bunun da motor beygir gücünü artırdığı vurgulanmıştır. Yüksek TPO oranı sonucunda TPO-dizel karışımının yüksek kükürt ve yüksek SO₂ emisyonu oluşturduğu anlaşılmıştır. Araştırmacılar, aynı motor devrinde yüksek TPO oranının ateşleme gecikmesinin uzamasına sebep olduğunu ve bunun da daha yüksek silindir basıncının oluşmasına yol açtığının görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Kumaravel vd. [3] dizel motorlar için alternatif yakıt olarak lastik piroliz yağı adlı çalışmalarında piroliz mekanizması, piroliz reaktörleri, ürün verimi, element analizi ve piroliz süreci olarak lastiğin karakteristik analizini incelemiştir. Hurda lastiğin pirolizi 250°C 'de başlatılmış ve 550°C 'de tamamlanmıştır. Lastik piroliz yağı kullanılan bir motorda ısı salınım oranı ve maksimum basınç artışı oranı gibi motor performansı, emisyon ve yanma parametreleri incelenmiştir. NO_x, HC, CO ve duman emisyonu yüksek aromatik içeriği nedeniyle ve uzun ateşleme gecikmesinin yüksek yüklerde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ateşleme gecikmelerinin DF (Diesel Fuel) yakıtına göre daha uzun olduğunun bulunduğu ifade edilmiştir. Atık lastik yağının TF (Tires Fuel) TF5, TF10, TF25 ve TF35 gibi piroliz yağı karışımlarıyla herhangi bir değişiklik yapmadan motorlarda kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır. CO, HC, SO₂ ve duman emisyonları TF50, TF75 ve TF100 için dizel yakıt emisyonlarından daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Alternatif bir yakıt olarak dizel motorlarda lastik piroliz yağı kullanmanın mümkün olduğunu belirtilmiştir.

Öztop vd. [4] buji ateşlemeli bir motorda atık otomobil lastiklerinden elde edilen yakıtın benzin yakıtı gibi kullanımını inceledikleri çalışmalarında, atık otomobil lastiklerinden elde edilen yakıtın buji ateşlemeli bir motordaki performansı ve egzoz emisyonu üzerindeki etkilerini deneysel bir çalışma olarak incelenmiştir. Atık lastiklerden elde edilen yakıtın benzin gibi direkt yakıt olarak kullanımı sınırlıdır ve kurşunsuz benzin ile karşılaştırıldığında viskozitesi daha yüksektir.

Bu nedenle atık lastik yakıtı hacimsel olarak %10'luk kademeli artışla %0'dan %100 'ye kadar kurşunsuz benzin ile karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlar daha sonra buji ateşlemeli bir motorda kullanılmıştır. Kullanılan test motoru %60'a kadar atık lastik yakıt içeren

karışım yakıtıyla normal çalışma şartlarında çalıştığı gözlenmiştir. Atık lastik yakıtının motor performans parametreleri ve emisyonları açısından motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan %60'a kadar benzin yakıtıyla karıştırılarak kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Han vd. [5] bir common-rail enjeksiyon sistemi üzerinde dizel ve benzin karışımlarının iki aşamalı püskürtülmesinin deneysel araştırılmasını yapmışlardır. Bu çalışmada yakıt enjeksiyon özellikleri, çevrimdeki enjeksiyon miktarı, enjeksiyon oranı ve enjeksiyon giriş basıncı karakteristikleri ile değişen benzin miktarı ve pilot enjeksiyon enerjisi incelenmiştir. Artan benzin miktarı çevrimde enjeksiyon süresi boyunca enjeksiyon oranı ve kütlelerinin yanı sıra basınç dinamikleri üzerinde ihmal edilebilir etkilere sahip olduğu görülmüştür. Ancak dizel basınç dalgasının, enjeksiyondan sonra dizel benzin karışımından daha hızlı ayrıştığı görülmüştür. Test koşulları için genişleyen pilot enjeksiyon enerjisi ana enjeksiyon boyunca enjektör girişinde artan basınç düşüşlerine ve ana enjeksiyon miktarının azalmasına neden olduğu belirtilmiştir.

Du vd. [6] önceden hazırlanmış motor yakıtları ile benzin/dizel karışımlarının direkt püskürtülmesinin yakıt ekonomileri ve emisyonları üzerine deneysel araştırma adlı çalışmalarında, benzin ve dizel karışımından oluşan yakıtın yanma, yakıt ekonomisi ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan testler 1800 d/d ve 3.2 bar, 5.1 bar aralığında belirtilen ortalama etkili basınç altında, farklı yüklerde ve sabit motor devrinde turbo şarjlı common-rail direkt enjeksiyon sistemine sahip bir motorda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yanma aşamaların ve Egzoz Gazı Resikülayonun (EGR) etkisi çeşitli yakıtlar için deneysel olarak değerlendirilmiştir. Karşımdaki benzin fraksiyonun artması ile ateşleme gecikmesinin uzaması ve yanma aşamalarının ortak ateşleme zamanları ile çeliştiği fark edilmiştir. EGR ve yüksek benzin fraksiyonlu karışımın birlikte uygulaması optimum yanma aşamalarında yakıt tüketiminde önemli artış olmadan aynı anda azot oksitleri ve duman emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Araştırmacılar, sıkıştırma ateşlemeli motorlardan daha düşük emisyon ve tipik buji ateşlemeli motorlardan daha yüksek verimlilikte bir bileşik yanma modu, EGR ve benzin/dizel karışımı yakıtın yanma aşamaların kontrolü ile sağlanabilir olduğu görüşüne ulaşmışlardır.

Huang vd. [7] dizel / benzin / n-butanol karışımlarının dizel bir motor yakıtı olarak farklı EGR oranları altında kullanarak emisyonları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, farklı EGR şartları altında yüksek basınçlı common-rail bir motorda farklı

oranlarda karıştırılmış yakıt karışımlarının emisyon karakteristikleri analiz edilmiştir. Kullanılan yakıtın karışım oranları olarak saf dizel (D100), dizel/benzin (%70 dizel %30 benzin), dizel/n-butanol (%70 dizel %30 n-butanol) ve dizel/benzin/n-butanol (%70 dizel, %15 benzin, %15 n-butanol). Elde edilen verilere göre, artan EGR oranları ile silindir giriş basıncı azalmış ve her yakıtın yanmasının geciktiği görülmüştür. Ayrıca, % 30 EGR oranı ile D70G30, D70B30, D70G15B15 ve D100 yakıt karışımlarının yanma basıncı tepe noktalarında önemli bir farklılık görülmemiştir. EGR oranı % 40'a yükseltildiğinde, yanma basıncı tepe noktası ve ısı salım hızı tepe noktası D70G30 ve D70G15B15 karışımlarının D100 karışımından daha düşük olduğu görülmüştür. EGR oranı arttıkça, dört karışım için toplam partikül sayısı konsantrasyonları ilk başta azalmış, buna karşın devam eden süreçte arttığı gözlenmiştir. Küçük ve orta ölçekli EGR oranlarında ($\leq$ %20), en düşük toplam partikül sayısı konsantrasyonunun saf dizelde bulunduğu ardından sırasıyla D70G30, D70G15B15 ve D70B30 karışımlarında olduğu belirtilmiştir. Daha büyük EGR oranlarında ($\geq$ %30) en düşük toplam partikül sayısı konsantrasyonunun D70B30 karışımında ölçüldüğü ardından sırasıyla D70G15B15, D70G30 ve D100 karışımlarında olduğu vurgulanmıştır.

Jeon vd. [8] optik sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda yakıt olarak kullanılan benzin/dizel karışımının yanma performansı, alev ve is karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmada, optik tek silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda kullanılan benzin/dizel karışımı yakıtın çeşitli şartlar altında enjeksiyon zamanlaması ve basıncını incelemişlerdir. Ayrıca, KIVA-3V sürümü silindirde ki yakıt/hava karışımının oluşumunu modellemek için kullanılmıştır. Yakıt dağılması sürecini hızlandırmak için yüksek enjeksiyon basınçları kullanımının, kısa ateşleme gecikmesi ve kısa yanma süresine neden olduğu görülmüştür. Benzin/dizel karışımı yakıtı yüksek basınç altında enjekte edildiğinde, yanma bölümünde büyük ölçüde homojen bir yük olduğundan dolayı sinerjik bir etkiyle sonuçlandığı vurgulanmıştır. Karışım yakıtının, benzin içeriği artırıldığında, ateşleme gecikmesi ve yanma süresi kademeli olarak azaldığı ve kurum emisyonunun büyük ölçüde azaldığı belirtilmiştir.

Yanma alev görüntülerinde, yakıt enjeksiyon süreci boyunca sprey bulutu çevresinde saf dizel yakıt alevi ortaya çıktığı, buna karşın karışım yakıtının yanmasının yavaş başladığı ve piston tepesinden başlayarak bütün yönlere hızlıca yayıldığı görülmüştür. Benzin/dizel karışimli yakıtın düşük kurum emisyonları içeren beyaz-sarı bir alev ürettiği, öte yandan, geleneksel dizel yakıtının koyu kahverengi-sarı kurumlu bir alev ürettiği vurgulanmıştır.

Liu vd. [9] benzin/dizel/PODEn karışımından oluşan yakıtların dizel motorundaki emisyon karakteristiklerinin ve termal verimlerinin incelenmesi adlı çalışmada, dizel motorlarının termal verimliliğini artırmak ve emisyonlarını azaltmak için GDP (benzin/dizel/PODEn) karışımları önerilmiş ve incelenmiştir. PODEn (polioksimetilen dimetil eter) kimyasal formülü $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$ yüksek setan sayısı ve yaklaşık %50 oksijen içeriğine sahip bir madde olduğu belirtilmiştir. Benzin/dizel (GD) yakıt karışımı yanma verimini artırmak ve dizel motorların kurum emisyonlarını azaltmak için oluşturulmuştur. Deneyler saf dizel, benzin/dizel karışımları ve GDP karışımları ile beslenen bir dizel motorda çeşitli EGR koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında D100 (saf dizel) yakıtının GD ve GDP karışımlarından çok daha kısa ateşleme gecikmesine sahip olduğu ve iki aşamalı homojen-difüzyon bir yanma sunduğu anlaşılmıştır. Ayrıca PODE_{3-4} GD karışımının tutuşabilirliğini geliştirdiği, GDP30 karışımının GD50 den daha kısa ateşlemeye sahip olduğu vurgulanmıştır. EGR'nin her üç yakıt için NO_x emisyonlarını azalttığı fakat yüksek EGR oranlarında dizel yakıt için yüksek kurum emisyonları oluştuğu belirtilmiştir. GD karışımındaki PODE_{3-4} katkısı HC ve CO emisyonlarını azalttığı görülmüştür. GDP30 karışımının HC ve CO emisyonlarının %30 EGR oranında GD50 karışımından %63 ve %25 oranında ve hatta D100 (saf dizel) yakıtından bile daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak PODE_{3-4} katkısının dizel motorlarında kullanıldığında GD karışımlarının verimliliğinin artırabilir ve kirletici emisyonlarının azaltılabilir olduğu belirtilmiştir.

Huang vd. [10] dizel / benzin / n-butanol karışımlarının bir dizel motor yakıtı olarak düşük sıcaklık altında yanma ve emisyon karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında saf dizel, dizel/benzin, dizel/n-butanol ve dizel/benzin/n-butanol karışım yakıtları çok silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli bir motordaki yanma süreci ve emisyon özelliklerini deneysel olarak analiz edilmiştir. Dizel, n-butanol ve benzinin yakıt karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Motorda kullanılan yakıtlar farklı oranlarda karıştırılmış ve yakıt karışımlarının emisyon karakteristikleri incelenmiştir.

Kullanılan karışımlar ve oranları olarak saf dizel (D100), dizel/benzin (%70 dizel %30 benzin), dizel/n-butanol (%70 dizel %30 n-butanol) ve dizel/benzin/n-butanol (%70 dizel %15 benzin %15 n-butanol) olduğu belirtilmiştir. Karışım özelliklerinin etkisi ve EGR'nin motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak EGR oranı arttıkça, D100 ve D70B30 yakıtlarının yanması boyunca silindir yanma sıcaklığı ve basıncı azalmış, ısı yayılım oranının pik değeri ilk başta artmış daha sonra

azaldığı gözlemlenmiştir. EGR oranı %25 den küçük iken yakıt karışımlarının kurum, CO ve THC emisyonlarında önemli ölçüde bir değişim olamamış düşük seviyelerde kaldığı belirtilmiştir. Sabit bir EGR oranında dizele sonradan eklenen n-butanol ile PM (partikül madde) konsantrasyonunun azaldığı gözlemlenmiştir.

Tudu vd. [11] lastikten üretilmiş yakıt ile dizel yakıtı karışımının iç jet piston geometrilili bir sıkıştırma ateşlemeli motordaki yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri adlı çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, tek silindirli direk enjeksiyonlu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda lastik ve dizel karışım yakıtını kullanmışlardır. Kullanılan karışımın %40'lık kısmı atık lastiklerin geri dönüşümünde elde edilen hafif fraksiyonlu piroliz yağı (LFPO), %50'si dizel yakıtı ve %10'luk kısmı ise oksijenli dimetil karbondan (DMC) oluşturmuşlardır. Ek olarak, bu karışımın alternatif bir yakıt olarak kullanımı incelenmiştir. Türbülans yönlendirme sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorun yanma davranışını iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri olduğu belirtilmiş ve bu yüzden, bu çalışmada motor 40LFPO10DMC karışımı yakıt ile çalıştırıldığında, piston iç jetleri yardımıyla yanma odasında daha fazla türbülans yaratılması amaçlanmıştır. İç jet pistonlu 40LFPO10DMC karışımı yakıt için yanma süresi tam yükte temel motor çalışması ile karşılaştırıldığında yaklaşık % 10,4 azaldığı belirtilmiştir. İç jet pistonlu 40LFPO10DMC karışımı yakıt için CO₂ emisyonu tam yükte temel motor işlemi ile karşılaştırıldığında yaklaşık %16.68 oranında artığı görülmüştür. 40LFPO10DMC + IJP karışımının NO_x emisyonunun dizel yakıtından % 7,5 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmaya sonuç olarak bakıldığında, motorda iç jet pistonu kullanarak daha fazla türbülans sağlanıp 40LFPO10DMC karışımı ile beslendiğinde ısı veriminin geliştiği ve duman emisyonunun azaldığı anlaşılmıştır.

Pilusa [12] sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için lastikten üretilmiş yakıtın (Tyre Derived Fuel) kullanımı adlı çalışmada sıkıştırma ateşlemeli motorlar için alternatif yakıt olarak atık lastik ve kauçuk ürünleri pirolizden elde edilen yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırmıştır.

Piroliz işleminden elde edilen yakıt ile dizel yakıtının performansını karşılaştırmak için 6 silindirli 4 zamanlı bir ADE407T kamyon motorunda testler gerçekleştirilmiştir. Pirolizden elde edilen yakıtın vinil asetat, alkil nitrat ve organik polar çözücülerin bir kombinasyonu şeklinde ve yakıtın viskozitesi, setan indeksi, yağlama ve kalori değeri ayarlanabilir olduğu belirtilmiştir. Standart dizel yakıtın bazı özelliklerini tahmin etmek için kullanılan matematiksel ampirik bağıntılar ile TDF test özelliklerinin birbirine benzer olduğu

görülmüştür. Saf TDF kullanıldığında motor performans testlerinin normal bir eğilim gösterdiği ancak tork gücünde %5'lik hafif bir azalma fark edilmiş ve güçteki azalmanın yakıtın düşük kalorifik değere sahip olmasıyla ilgili olduğu belirtilmiştir. TDF kullanımının dizel yakıtla karşılaştırıldığında yanmamış hidrokarbon ve CO emisyonlarında azalma, fakat SO₂ emisyonunda artışla sonuçlandığı görülmüştür. TDF toplam kükürt seviyelerinin önerilenden daha yüksek sınırlarda olduğu da vurgulanmıştır.

Tudu vd. [13] lastikten üretilmiş yakıt ve dizel karışımı bir yakıt ile çalışan direkt enjeksiyonlu bir dizel motoruna dietil eterin etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, lastikten elde edilen yakıtın dizel ile karışımının küçük miktardaki ilavelerinin küçük güçlü direkt enjeksiyonlu bir dizel motordaki yanma, performans ve emisyon parametreleri üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Testler tek silindirli dört zamanlı hava soğutmalı 4,4kW gücünde 1500rpm sabit hızda direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda farklı yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, lastik pirolizinden elde edilen %40 oranda hafif fraksiyonlu piroliz yağı (LFPO) ile %60 oranında dizel yakıtı ile karıştırmışlardır. 40LFPO yakıtının setan sayısı dizel yakıtından daha az olduğundan, ateşleme kalitesini iyileştirmek için %1 ile %4 arasında dietil eter (DEE) ilave olarak karıştırılmıştır. Test sonuçlarının incelenmesiyle dietil eterin yakıt karışımına eklenmesi performansı, yanma ve duman emisyonlarını azalttığı vurgulanmıştır. 40LFPO-DEE karışımının ateşleme gecikmesini tam yükte yaklaşık 1-2°C azalttığı görülmüştür. 40LFPO dizel karışımına %4 oranında DEE eklenmesi bütün karışım çalışmalarıyla karşılaştırıldığında düşük CO emisyonu ve yanma açısından en iyi sonuçları verdiği belirtilmiş. Duman emisyonu için ise %3 oranında DEE ilavesi tüm çalışmalar içerisinde iyi bir sonuç verdiği vurgulanmıştır.

Murugan vd. [14] dizel motorlarında lastik piroliz yağı kullanımı adlı çalışmalarında, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda %10, %30 ve %50 oranlarında lastik piroliz yağının dizel yakıtı ile karışından oluşan yakıtın performans, emisyon ve yanma karakteristikleri testlerle değerlendirmişlerdir. TPO (Tires Pyrolysis Oil) taşıt atık lastiklerinden vakum piroliz yöntemiyle elde edilmiştir.

Yanma parametrelerinden ısı salınım hızı, silindir tepe basıncı ve maksimum basınç oranı analiz edilmiştir. NO_x, HC, CO ve duman emisyonlarının yüksek aromatik içeriği ve uzun ateşleme gecikme nedeniyle büyük yüklerde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Silindir tepe basıncı 71 bardan 74 bara kadar yükseldiği ve ateşleme gecikmesinin dizel yakıtından daha uzun olduğu vurgulanmıştır. CO emisyonları TPO-DF karışımlar için dizel yakıttan daha yüksek olduğu ancak değerlerin % 0,1'den az olduğu belirtilmiştir. Duman emisyonu

acısından tam yükte çalışan TPO50 yakıtı dizel yakıt ile karşılaştırıldığında yaklaşık %7 daha yüksek olduğu, tepe basıncı ve basınç artış oranının TPO-DF karışımının dizel yakıttan daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. Aromatik içeriğini ve viskozitesini azaltarak dizel motorlarda TPO yakıtının kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Murugan vd. [15] direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda kullanılan lastik piroliz yağı ile dizel yakıt karışımının performans, emisyon ve yanma özellikleri araştırmışlardır. Çalışmada atık taşıt lastiklerinden türetilen lastik piroliz yağının (TPO) özellikleri analiz edilmiş ve sıkıştırma ile ateşlemeli motor için yakıt olarak kullanılabilceğini savunmuşlardır. Fakat ham TPO yağının yüksek viskozitesi ve yüksek kükürt içeriğinin olumsuzluğu üzerinde durulmuştur. Bu olumsuzlukları gidermek için ham TPO'nun kükürdünün giderildiği ve sonra vakum damıtmayla damıtıldığı belirtilmiştir. TPO-dizel karışımları tek silindirli dört zamanlı ve hava soğutmalı bir dizel motorunda herhangi bir motor değişikliği olmadan alternatif yakıt olarak kullanılmış ve motorun performans, emisyon ve yanma karakteristikleri incelenmiştir. Motorun %90 oranında damıtılmış lastik piroliz yağıyla (DTPO) ve %10 oranında dizel yakıt (DF) ile çalışabiliyor olduğu ama motorun %100 DTPO ile çalışmada tatmin edici bir başarı sağlayamadığı belirtilmiştir. DTPO karışımının oranının artırılması ile termik verimin arttığını fakat dizel yakıtın termik veriminden yaklaşık %3 daha düşük olduğu vurgulanmıştır. NO_x emisyonunun dizel yakıt çalışmasından DTPO80 karışımının %21, DTPO90 karışımının %18 daha düşük olduğu görülmüştür. HC, CO ve duman emisyonlarının dizel yakıttan daha yüksek olduğu belirtilmiş ve bunun DTPO'nun doymamış hidrokarbon içeriğiyle ilgili olduğu belirtilmiştir. DTPO karışımının dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında daha uzun ateşleme gecikmesine sahip olduğu ve bunun tam yükte 2–2,5° CA (Crank Angle) değerinde olduğu vurgulanmıştır.

Ayanoğlu ve Yumrutaş [16] döner fırın ve kesikli piroliz reaktörüyle atık lastiklerden benzin ve dizel gibi yakıtlar üretmesi için araştırma yapmışlardır.

Çalışmalarında, bir döner fırın reaktöründe maksimum verimde %20, %12, %25, %8 ve %35 oranlarında sırasıyla daha fazla gaz, hafif sıvı, ağır sıvı, balmumu ve daha az karbon siyahı elde etmek için toplam ağırlığı 4 ton olan atık lastikler piroliz edilmiştir. Daha sonra, ağır ve hafif yağlar, farklı kütle oranında sırasıyla %2, %6, %10 oranlarında doğal zeolit (NZ) ve kireç (CaO) gibi katkı maddeleri ile 400 derecede reaksiyona sokulmuş ve kesikli reaktörde standart petrol yakıtları gibi sıvı yakıtlar üretilmiştir. Sonuçlar, benzin ve dizel yakıtlardan biriyle karşılaştırıldığında en iyi sonucun %10 CaO örneğinden elde edildiği belirtilmiştir. Hafif yağ karışımının benzine benzer bir yakıt olduğu belirtilmiş ve GLF (Gasoline Like

Fuel) olarak adlandırılmıştır. Diğer bir yakıtın ise dizele benzer olduğu belirtilmiş ve DLF (Diesel Like Fuel) olarak adlandırılmış ve bu yakıtların motorlarında yakılabilir olduğunu vurgulanmıştır. Ancak, yüksek kükürt içeriği ve düşük parlama noktasının bir soruna neden olabileceği belirtilmiştir. Atık lastiklerin karbon siyahı karakteristikleri proximate, ultimate, HHV ve BET analizleri tarafından analiz edilmiş ve sonuçlar karbon siyahının aktif karbon emici malzeme olarak kullanımını doğrulamıştır.

Aydın [17] atık taşıt lastiklerinden yakıt üretilmesi ve dizel motorlarında kullanımını araştırmıştır. Çalışmasında, atık taşıt lastiklerinden piroliz yöntemi ile elde edilen yakıtın dizel motorlarında kullanılabilecek bir yakıt olduğunu belirtmiş ve piroliz işlemi elde edilen yakıtın olumsuz özelliklerinin giderilmesi ve iyileştirilmesi için bazı çalışmalar yürütmüştür. Atık taşıt lastiklerinin pirolizi için bir piroliz reaktörü tasarımı yapılmış ve bu reaktör deneysel ölçekte üretim gerçekleştirilmek amacı ile tasarlanmış olup 1.15 litre hacme sahip bir yapıdan oluşmaktadır. Deneyler için, maksimum gücü 10 HP, silindir hacmi 406 cc, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı Rainbow LA186 marka bir dizel motoru kullanılmıştır. Atık lastiklerin pirolizinden elde edilen yakıtın yüksek kükürt içeriğini azaltmak amacıyla CaO, Ca(OH)₂ ve NaOH katalizörleri kullanılmıştır. Ayrıca sıcaklık, katalizör oranı ve N₂ akış hızı gibi değişkenlerin sıvı yakıt verimine etkisi araştırılmıştır. En yüksek ürün verimi 500 °C sıcaklıkta ve 200 cm³/dak N₂ akış hızında elde edilmiştir. Normal pirolizde elde edilen ürün ile karşılaştırıldığında, %5 Ca(OH)₂ kullanımında yakıtın kükürt oranının %34.25 daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu işlemler sonucunda oluşan yakıtın kükürt içeriğini dizel yakıtına daha da yaklaştırmak amacıyla asetik asit (H₂O₂) ve formik asit (H₂SO₄) değişik oranlarda kullanılmıştır. Diğer asitler de oldukça etkili olmakla beraber, %10 H₂SO₄ kullanımında kükürt oranı %75.27 oranında azaltılmıştır. Dolayısıyla, piroliz sırasında %5 Ca(OH)₂ daha sonra %10 H₂SO₄ ile yapılan işlemler ile elde edilen yakıtın kükürt oranı %83.75 azaltılmıştır.

Doğan [18] atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorunda kullanımını deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmasında, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorlar için alternatif bir enerji kaynağı olabileceğini belirtmiş ve bunun üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. İlk önce vakum pirolizi yardımı ile ham lastik pirolitik yakıtı (HLPY) üretilmiştir. Daha sonra motor testleri öncesinde, HLPY' nin özellikleri distilasyonlu asit-kil yöntemi ve oksidatif desülfürizasyon yöntemi ile iyileştirilerek lastik pirolitik yakıt (LPY) elde edilmiştir. Testler; tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda standart dizel yakıtı, LPY20 (%20 LPY+%80 dizel yakıt),

LPY40, LPY60, LPY80 ve LPY100 yakıtları ile, değişik yük (%25, %50, %75, %100), değişik hız (1400, 2000, 2600, 3200 d/d) ve çeşitli püskürtme basınçlarında (185, 205, 225, 245 bar) gerçekleştirilmiştir. Motor hızı, motor yükü, yakıt türü ve püskürtme basıncının tork, güç, fren özgül enerji tüketimi, efektif verim, NO_x, HC, CO, is emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde, motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin standart dizel yakıtına %40'a kadar LPY ilavesinin motor performansı ve yanma karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemeden bazı egzoz emisyonlarında (CO, HC ve is) iyileşmeler sağladığını görülmüştür. Bununla birlikte, standart dizel yakıtta %40'tan fazla LPY ilavesi motorun bütün çalışma koşullarında tutuşma gecikmesini önemli ölçüde artırarak motor performansını, emisyonları ve yanma karakteristiklerini olumsuz etkilediği anlaşılmıştır. Dizel yakıtta ilave edilen pirolitik yakıtın silindir basıncının ve ısı açığa çıkışını geciktirdiği, maksimum silindir basıncı, basınç artış hızını ve ısı açığa çıkış oranını artırdığı, tutuşma gecikmesini ve ani yanma periyodunu uzattığı, difüzyon kontrollü yanma periyodunu ve toplam yanma süresini kısalttığı belirtilmiştir.

Uçar [19] kullanılmış lastiklerin ve atık mineral yağların hidrokarbon kaynağı olarak değerlendirilmesi adlı doktora tezinde, iki adımlı süreçte (piroliz ve hidrojenleme) kullanılmış lastiklerin ve atık mineral yağların sıvı yakıtlara dönüştürülmesi amaçlamıştır. İlk süreçte kullanılmış lastiklerin ve atık mineral yağları karışımının 550, 650 ve 800 derecede pirolizlendirme işlemi gerçekleştirilmiş ve oluşan sıvı yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Atık taşıt lastiğin pirolizinden elde edilen sıvı yakıtın diğer atıklarda elde edilen piroliz yağlarından daha yüksek aromatik hidrokarbon içeriğine sahip olduğu görülmüştür. İkinci olarak piroliz yağları yakıt karakteristiklerini geliştirmek için farklı sıcaklık ve basınçlarda hidrojenlendirilmiştir.

Bu işlemlerde aktif karbon katalizörlerinden (Co-Ni/Ac, Co-Mo/Ac ve Ni-Mo/Ac) ve ticari bir katalizör (DHC-8) kullanılmıştır. Yüksek parafin içeriğine sahip atık mineral yağlar ile atık lastik pirolizinden elde edilen pirolitik yağların hidrojenlendirme işleminde ve özelliklerde Ni-Mo/Ac katalizörü kullanıldığında atık yağların birleşimlerinin değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak, elde edilen piroliz yağlarının özelliklerinin geliştirilerek yakıt ve petrokimya endüstrisinde aromatik hidrokarbonların üretiminde nafta beslemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Sharma ve Murugan [20] petrol dışı bir yakıt ile çalışan tek silindirli dizel motorunun (DI) dayanıklılık analizi adlı çalışmada, atık lastiklerin pirolizden türetilen lastik piroliz yağı

(TPO) ısı enerjisinin kaynağı olarak kullanılabileceği kanıtlanmak istemişlerdir. Daha önceki araştırmalarında bir dizel motorda test edilen % 20 lastik piroliz yağı (TPO) ve % 80 Jatropha metil eterden (JME) oluşan bir karışımın uygun bir karışım olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada da belirtilen karışım (JMETPO20) ile dizel yakıtı direkt enjeksiyonlu dizel motorunda çalıştırılarak dayanıklılık analizi yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, JMETPO20 karışımı ve dizel yakıtı ile çalışan motor IS 10000 standartlarına uygun olarak 7 saatlik döngülerde 14 test döngüsünde 100 saat boyunca çalıştırılmış. Dayanıklılık testinden sonra motor bileşenlerinin hayati parçaları silindir başı, piston tepesi ve meme enjektör ucu gibi parçalarının gözle kontrolü ve karbon birikimi olup olmadığına kontrol edilmiştir. Ayrıca kullanılan yağlama yağının birçok tribolojik özelliklerini analiz etmek için motor çalışmalarında her 25 saatte bir değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde yanma odasında ve enjektör meme ucunda karbon birikintisinin olduğu görülmüştür. Öte yandan, motor JMETPO20 karışımıyla çalıştırılırken operasyonel veya dayanıklılık problemlerinin oluşmadığı görülmüştür. Böylece JMETPO20 karışımının dizel motor için çevre dostu alternatif yakıt olarak kullanılabılır olduğu kanıtlanmıştır.

Umeki vd. [21] dizel ve lastik piroliz yağından oluşan yakıt karışımının fiziksel ve kimyasal özellikleri adlı çalışmalarında, atık taşıt lastiklerinin termal olarak bozulmasından elde edilen pirolitik yağ ve dizel yakıtı karışımının özellikleri araştırmışlardır. Atık lastik, pirolizinden elde edilen sıvı, tatsız ve kuvvetli bir kokusu olan siyah renkli yağdır. Pirolitik yağın bileşimi esasen aromatik bileşikler ve olefinlerden oluşan kompleks bir karışım olarak tanımlanabilir. Atık taşıt lastik yağının özgül ağırlığı 0.93 gr/cm^3 iken benzin ve dizelin sırasıyla 0.74 g/cm^3 ve 0.84 g/cm^3 olduğu belirtilmiştir.

Pirolitik yağın araştırma oktan sayısının (RON) benzin araştırma oktan sayısına (100'den yüksek) benzer bulunduğu belirtilmiştir. Pirolitik yağın motor oktan sayısının (MON) benzin motor oktan sayısından biraz düşük ama dizel yakıttan çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Atık lastik pirolitik yağı, araştırılan konvansiyonel yakıtlarla karşılaştırıldığında daha yüksek bir patlama direnci gösterdiği belirtilmiştir. Pirolitik yağ, benzinli ve dizel yakıtı arasında 42 kJ/kg ısı değeriine sahip olduğu vurgulanmıştır. Özellikle yakıt karışımlarında özgül ağırlık, viskozite ve buhar basıncı istenilen aralıkta olduğu görülmüştür. Lastik pirolitik yağının 20°C 'deki viskozitesi ve yoğunluğu sırasıyla $5.39 \text{ mm}^2/\text{sn}$ ve 0.93 gr/cm^3 olan siyah bir sıvı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, araştırılan TPO (Tires Pyrolysis Oil) doğrudan motor yakıtı olarak kullanılmak için uygun olmasa da,

TPO/Dizel karışımları için hükümet ve yönetmelikler tarafından belirlenen şartnameye uygun olduğu belirtilmiştir.

Rinaldini vd. [22] atık plastik yağıyla (WPO) çalışan bir IDI motorunun performansı, emisyonu ve yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, standart dizel yakıtıyla çalışan doğal emişli bir dizel motorunda atık plastik pirolizinden elde edilen yağ test edilmiş ve motorun performans, emisyon ve yanma değerleri ölçülmüştür. Yanma safhasını analiz etmek için silindir içindeki basınç ölçülürken, testler hem tam yükte hem de kısmi yükte gerçekleştirilmiştir. WPO ve dizel yakıtı karşılaştırıldığında WPO yakıtının çıkış torku ve gücünün düşük olduğu ve iki yakıt arasındaki farkların %5-10 arasında değiştiği belirtilmiştir. Özgül yakıt tüketiminin, düşük ve orta devirlerde WPO kullanımının azaldığı, yüksek hızlarda hafifçe arttığı tespit edilmiştir. Kısmi yükte elde edilen veriler de tam yük testlerinin sonucu doğrulamıştır. WPO' da çalışırken, is emisyonunun genellikle önemli ölçüde düşük olduğu ve tam yükte %50'ye varan bir fark olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak, mevcut deneysel çalışmalarda atık plastik yağının standart bir üretim IDI dizel motorunu beslemek için başarılı bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Motorun güvenilirliğini ve performansının dayanıklılığını değerlendirmek için ileri testler gerekse bile, WPO dizel motorlarında fosil yakıtlar için uygun bir alternatif yakıt olduğunu vurgulanmıştır.

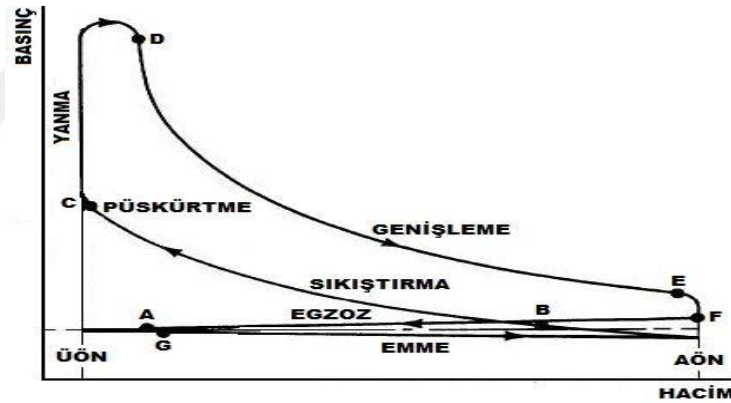
Başkovič vd. [23] %100 lastik piroliz yağının (TPO) common-rail dizel motorunda kullanımının fizibilite analizi adlı çalışmada, saf TPO'nun, yardımcı maddeler olmaksızın modern bir turbo şarjlı ve ara soğutmalı dizel motorunda kullanımını araştırmışlardır. Lastik piroliz yağının ana eksikliğinin dizel yakıtla kıyasla düşük setan sayısına sahip bir yakıt olduğu belirtilmiştir.

Şimdiye kadar TPO'nun dizel motorlarında başarılı bir şekilde kullanılmasının, setan sayısını arttırarak, motorun sıkıştırma oranını arttırarak veya emme havasını önceden ısıtarak mümkün olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada daha önce TPO ile birlikte kullanılmayan pilot enjeksiyonu içeren uyarlanmış enjeksiyon stratejisi kullanıldığı ve başarıya ulaşıldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak TPO emisyon seviyeleri ile dizel emisyon seviyeleri karşılaştırılabilir ve önerilen enjeksiyon stratejisi ile başarılabılır olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın önemi, modern turbo şarjlı ve intercool dizel motorunda saf TPO'yu başarıyla kullanmak için enjeksiyon stratejisi ilgili temel talimatları ayrıntılı olarak açıklamakla tanınabilir vurgusu yapılmıştır.

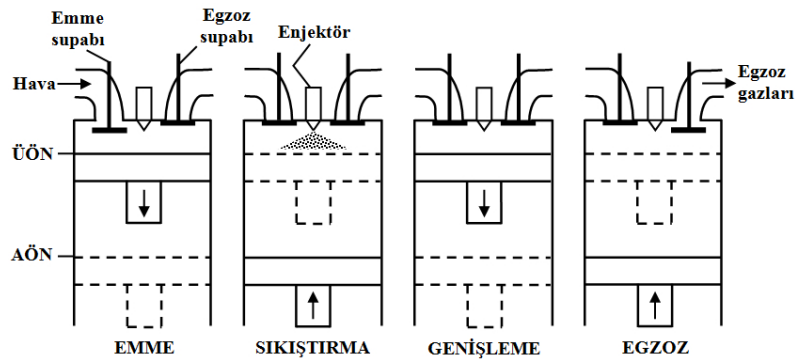
Yapılan literatür araştırmaları yukarıda sunulmuştur. Bu bağlamda, yapılacak çalışmanın mevcut çalışmalara katkı vereceği düşünülmektedir. Yapılan çalışmada dizel esaslı bir motorda standart dizel yakıtına ek olarak farklı oranlarda benzin ve pirolitik yağ karışımları kullanılacaktır. Bu nedenle, çalışmada kullanılacak dizel motorlar prensipleri ve kullanılacak yakıtlarla ilgili bazı bilgiler bundan sonraki bölümlerde sunulmuştur.

1.1. Dizel Motorları

Dört zamanlı ve sıkıştırma ile ateşlemeli ilkesine göre çalışan dizel motorlarının çalışma prensibi, ilk olarak 1892 yılında Alman mühendis Rudolf Diesel adlı kişi tarafından ortaya konulmuştur. Günümüze kadar bu motorlarda birçok gelişme ve iyileşme sağlanmasına rağmen temel çalışma prensibi aynı kaldığından Diesel motorları olarak adlandırılmaktadır. Aşağıdaki şekillerde gerçek çevrimi diyagramı ve çalışma prensibi belirtilmiştir.



Şekil 1.1. Dört zamanlı dizel motorların gerçek çevrim diyagramı [39].



Şekil 1.2. Dört zamanlı dizel motorların çalışma prensibi [39].

Dizel motorlar, yakın geçmişe kadar daha çok otobüs, kamyon, traktör, iş makineleri gibi yüksek güç gerektiren ağır taşıtlarda yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak aşağıda sıralanan avantajları ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde dizel motorları günümüzde hafif tip taşıtlarda da yaygın olarak tercih edilen bir konuma gelmişlerdir [39].

- Dizel motorlarının sıkıştırma oranları benzin motorlarına göre daha yüksek olduğundan verimleri % 35-40 gibi daha yüksek değerlerdedir.
- Verimlerinin yüksek olması ve benzin motorlarına göre daha fakir yakıt-hava karışımlarıyla çalışmaları nedeniyle dizel motorlarının yakıt sarfiyatları benzin motorlarına göre daha düşüktür.
- Dizel motorlarda kullanılan motorinin litre fiyatı benzine göre daha ucuzdur.
- Dizel motorlarda kullanılan motorin yangın açısından benzine göre daha emniyetlidir.
- Zehirleyici özelliği olan karbon monoksit (CO) gazının salınımı dizel motorlarında benzin motorlarına göre daha düşüktür.
- Dizel motorlarında üretilen moment yaklaşık sabit olduğundan çekiş karakteristikleri benzin motorlarından daha iyidir ve benzin motorlarına göre daha dayanıklı malzemelerden üretildiklerinden daha uzun ömürlüdürler.
- Benzin motorlarına kıyasla dizel motorları turbo şarj ve süper şarj gibi aşırı doldurma sistemlerinin uygulanmasına daha elverişlidir. Bu sayede motor hacmi değiştirilmeden daha yüksek güçlerin elde edilmesine imkân sağlarlar.

Yukarıdaki avantajlarının yanında dizel motorların bazı dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir [39].

- Dizel motorlarının devir sayıları benzin motorlarına göre daha düşük olduğundan güç / ağırlık oranları (özellik güçleri) daha düşük değerlerdedir.
- Dizel motorlarda dayanıklı malzemeler ve hassas yakıt donanımları kullanıldığında ilk alış ve bakım maliyetleri benzin motorlarına göre daha yüksektir.
- Dizel motorlarında sıkıştırma ve yanma basınçları benzin motorlarına göre daha yüksek olduğundan daha gürültülü ve titreşimli çalışırlar.
- Dizel motorlarının ilk harekete geçişleri ve soğuk havalarda çalışmaları benzin motorlarına göre daha uzun sürer.

- Dizel motorları yüksek oranda azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları yayarlar.

1.2. Atık Taşıt Lastikleri

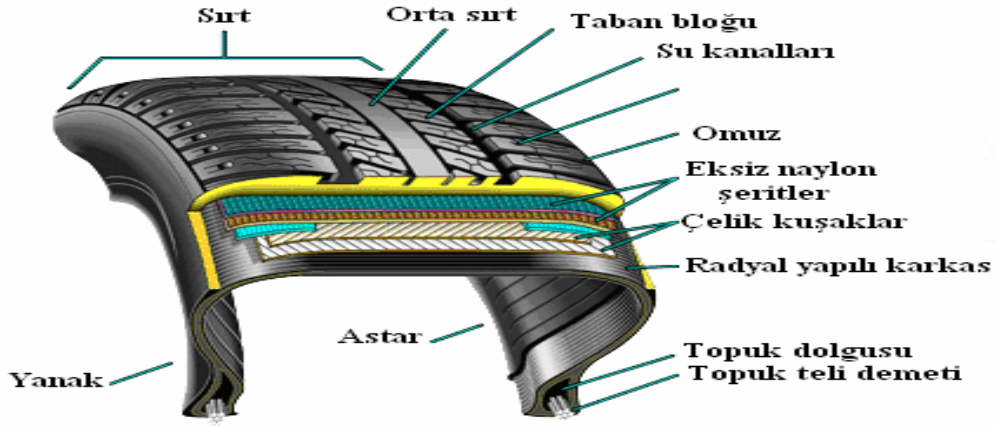
Atık taşıt lastiklerinin depolanması veya yok edilmesi önemli çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Yıpranmış atık taşıt lastiklerinin depolanması veya yok edilmesinde belediyeler ve çevre sorumluları ilgilenirken önemli çevresel problemlerle ve zorluklarla karşılaşmaktadırlar.

Taşıt lastiği, %25'i stiren olmak üzere yaklaşık %35 oranında stiren-bütadien, %8 oranında polibütadien, kauçuğu yumuşatmak için %20 oranında aromatik yağ, frenlemeye karşı kauçuğun dayanıklılığını artırmak amacıyla ilave edilmiş %33 oranında karbon siyahı ve bunlarla beraber çok az miktarda ZnO, S ve özellikle çok az miktarlarda olması nedeniyle belirlenmeyen diğer maddelerden oluşmaktadır. Bunların yanı sıra, üretim sırasında özel markalara veya özel kullanım amaçlarına bağlı olarak yüzden fazla farklı bileşik ilave edilebilmektedir [24].

Lastiğin yapısı kömüre benzediği için kömürün piroliz veya sıvılaştırılmasında uygulanan yöntemler, atık taşıt lastiklerinin de işlenmesinde kullanılabilir. Dolayısıyla, kimyasal yapıları, kolayca temin edilebilmeleri ve ucuz olmaları nedeniyle, atık taşıt lastiklerinin yakıt üretiminde kullanılması ile hem iyi bir hammadde kaynağı olabileceği hem de oluşturdukları çevre sorunlarına yönelik bir çözüm geliştirilmiş olacağı öngörülmektedir.

1.2.1. Taşıt Lastiğinin Yapısı

Taşıt lastiklerinin üretiminde petrol türevi olan suni kauçuk kullanılmaktadır. Yapışkan ve gevşek olan kauçuk malzemesi kükürtle ısıtılıp tutulunca, sert ve elastik hale gelmektedir. Böylece otomobil tekerleklerini kaplayan ve birçok avantajı beraberinde getiren lastik üretimi mümkün olmaktadır. Taşıt lastiklerinde genellikle kauçuğun yanında lastiğin mukavemetini artırmak için çelik tel, tekstil elyafı ve az miktarda kurum, yağ, reçine ve çinko oksit kullanılmaktadır.



Şekil 1.3. Taşıt lastiğinin kesit görünümü [17].

Sırt: Lastiğin zemine temas ettiği kauçuk bölümüdür. Yola tutunmayı, çekişi, su atmaya, soğutmaya sağlayan kanal ve bloklardan oluşturulmuştur. Üretim sırasında kuşakların üstüne yerleştirilir. İki veya tek katmanlı olup, farklı kauçuk karışımlardan meydana gelir. Lastiğin sırt deseni kalıpta, sırt karışımının şekillenmesi ile pişirme sırasında oluşturulur.

Eksiz Naylon Şeritler: Düzgün sürüş ve mukavemet sağlar.

Çelik Kuşaklar: Radyal lastiklerde sırt ile gövde arasında, gövdenin üst kısmında bulunan, lastiği çevresel olarak sararak yapıyı kuvvetlendiren çelik kuşaklar lastiğin önemli bir bileşenidir. Ana fonksiyonu, lastiğin sırt bölgesinde denge sağlamak, düzensiz aşınmayı engellemek, sürüş ve çekişe katkıda bulunmaktır.

Astar: Lastiğin hava geçirgenliğini önlemek amacıyla kullanılır, kauçuk karışımından yapılır.

Yanak: Lastiğin çevresi boyunca sırt ve topuk bölgeleri arasında kalan, yola temas etmeyen kauçuk kısımdır. Lastiğin yanak kısmında, mukavim ve hava etkilerine karşı dayanıklı karışım kullanılır.

Gövdeyi yandan gelecek sürtünmelere karşı korur ve lastiğe esneklik sağlar. Yüksek ve çok yüksek performans grubu lastiklerde, direksiyon hâkimiyetinin artırılması için çelik veya naylon takviyeler kullanılabilir. Taşıt lastiğine ait ilgili marka ve ebat yazıları yanak üzerinde bulunmaktadır.

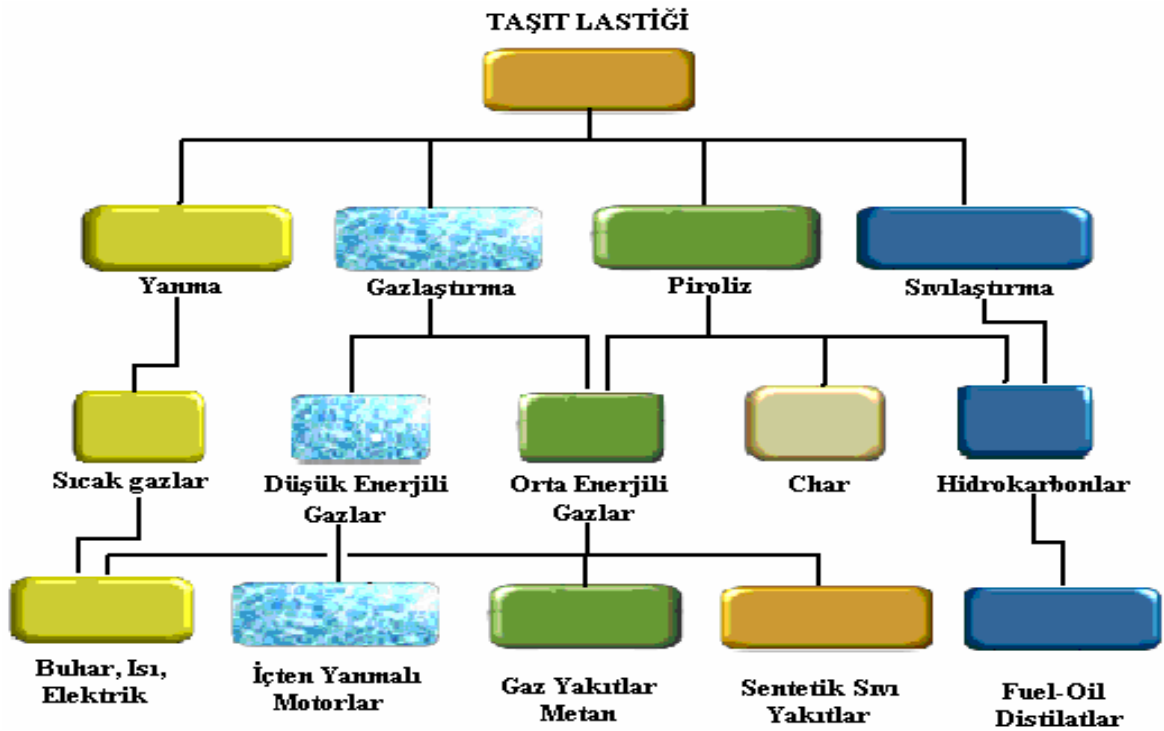
Radyal Yapılı Karkas: Hava basıncını lastik içinde tutan, yükü taşıyan ve sarsıntıları karşılayan kısımdır. Radyal lastiklerde kuşak, çapraz lastiklerde ise sırt veya darbe katının altında yer alır. Topuk tellerinin etrafında dönerek yanak bölgesinde biter. Çelik, naylon ve kortlardan oluşan lastiğin ana bileşenidir.

Omuz: Lastiğin sırtından yanak kısmına geçiş yaptığı kalın kauçuktan yapılmış üst yanak bölgesidir. Sırt ısını dışarı atabilmek için pencere yapıdadır. Görevi gövdeyi korumaktır.

Topuk: Lastiğin janta temas eden bölgesinde bulunan lastik bileşenlerinin tümüdür. Yan yana gelmiş ve kauçuk karışımı ile birbirine bağlanmış topuk teli demeti, topuk dolgusu ve jant yastığı başlıca topuk bileşenleridir. Topuk, lastiğin janta iyi oturmasını ve sıkıca bağlanmasını sağlar.

1.3. Taşıt Lastiklerinin Yakıt Olarak Kullanımı

Atık taşıt lastiklerini yakarak yok etme, işleyerek değerlendirme, kazanlarda doğrudan yakma, betonarme yapılarda güçlendirme ve ısı yalıtımı gibi işlemlerde kullanılmaları her ne kadar yaygın kullanım alanlarını oluştursa da bu yöntemlerin bazı sakıncaları ve sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu değerli atıklardan sıvı yakıt, gaz yakıt ve kömür elde ederek kullanımı geri kazanım için uygulanabilir bir yöntemdir. Bu amaçla kullanılacak en önemli yöntemlerin başında “Piroliz” gelmektedir. Piroliz işlemi, katı veya sıvı halde bulunan büyük molekülü organik bileşiklerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda ısıl parçalanmasıdır.



Şekil 1.4. Atık taşıt lastiklerine uygulanabilecek ısıt işlemlerinin süreçleri [17].

1.3.1. Yanma

Yanma, yanıcı bir madde içerisinde yakıtı oluşturan bileşimlerin oksijenle ile reaksiyona girerek ısı ve ışık meydana getirmesidir. Bu yöntemle atık taşıt lastiği yakılarak bertaraf edilebilir. Ancak bu yöntemin dezavantajı atık taşıt lastiği içerisindeki hidrokarbonların yanı sıra diğer maddelerin de yanmaya katılmasıyla ortaya çıkan istenmeyen gaz emisyonlarıdır. Ayrıca atık lastik her sistemde yakılmaya elverişli bir madde değildir.

1.3.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, karbonlu maddelerin tümünün bir yakıt gazına tamamen dönüştürülmesi için katı yakıtın sınırlı miktarda oksijen veya hava ile tepkimeye girdiği bir yüksek sıcaklık (800-900°C) sürecidir [25]. Gazlaştırma işlemi iki ana grupta toplanmaktadır. Hava gazlaştırılmasından elde edilen düşük enerjili gazlar ısı ve elektrik üretimi için kullanılır [26]. Sentez gazı ise kimya sanayinde yaygın kullanıma sahip olup düz ve dallanmış yapıdaki parafin ve olefinlerin, aromatik hidrokarbonların, metanol, NH_3 , H_2 ve asetik asit gibi önemli organik maddelerin sentezinde kullanılmaktadır [27].

1.3.3. Sıvılaştırma

Sıvılaştırma; düşük sıcaklıkta, yüksek basınçta ve katalizör (H_2 veya CO) varlığında gerçekleştirilen ve maksimum sıvı ürün elde edilen bir ısıt süreçtir. Hammaddenin kurutulmasına gerek olmayan sıvılaştırmada elde edilen ürün, fiziksel ve kimyasal olarak, piroliz sıvı ürünlerinden daha kararlı yapıdadır ve hidrokarbon üretimi için saflaştırma işlemlerine gerek yoktur. Sıvılaştırma genellikle yüksek kısmi basınçlı hidrojen ortamında yapılmakta ve piroliz işleminde elde edilen üründen daha düşük oksijen içeren ürün elde edilmektedir. Yüksek basıncın maliyeti arttırması, kullanılan çözücü ve katı üründen sıvı ürünün ayrılmasındaki zorluk bu yöntemin olumsuz yönleridir [28].

1.4. Piroliz

Piroliz, bir katı ürünün oksijensiz bir ortamda ısıtılarak sıvı, katı ve gaz ürünlere dönüştürülmesi işlemidir. Bu ürünlerden her birinin özellikleri, reaksiyonun meydana geldiği reaktör sıcaklığı, ısıtma hızı, içinde kalma süresi gibi parametrelere bağlıdır. Sıcaklık ve işlem koşullarına bağlı olarak piroliz işlemi; geleneksel piroliz, yavaş piroliz, hızlı ve flash piroliz olmak üzere dört alt sınıfa ayrılır. Ayrıca vakum, ultra ve hidropiroliz gibi ileri piroliz teknolojileri de mevcuttur [29].

Tablo 1.1. Piroliz yöntemleri ve çıkan ürünler [29].

Piroliz Teknolojisi	Reaksiyon Süresi	Isıtma Hızı	Sıcaklık (°C)	Ürünler
Karbonazasyon	Günlerce	Çok Düşük	T<400	Katı
Geleneksel	5-30 dk	Düşük	T<600	Katı, Sıvı, Gaz
Hızlı	0,5-5 sn	Çok Yüksek	650	Biyoyakıt
Flash (Gaz)	<1 sn	Yüksek	T<650	Biyoyakıt
Flash (Sıvı)	<1 sn	Yüksek	T<650	Kimyasallar, Gaz
Ultra	<0,5 sn	Çok Yüksek	1000	Kimyasallar
Vakum	2-30 sn	Orta	400	Biyoyakıt
Hidropiroliz	<10 sn	Yüksek	T<500	Biyoyakıt
Metanoliz	<10 sn	Yüksek	T<700	Kimyasallar

Geleneksel piroliz; yüksek verimli, ucuz maliyete sahip kararlı yöntemler olup, piroliz ürünleri gaz, katı ve sıvı ürünlerdir. Gaz ürün için 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklar kullanılırken sıvı ürün için düşük sıcaklıklar tercih edilir [30, 31].

Flash piroliz; genellikle 500°C sıcaklıkta, çok hızlı ısıtma hızlarında ve çok kısa alıkonma sürelerinde gerçekleşir. Sıvı ürün genellikle katran, biyoyakıt olarak adlandırılır ve hidrokarbon yakıtlara dönüştürülebilir. Buradan elde edilen sıvı ürünler kazanlarda, ocaklarda ve motorlarda yakıt olarak kullanılabilir [32].

Hızlı piroliz; yüksek sıcaklıklarda çok kısa alıkonma zamanı ile sıvı ürün üretimi için günümüzde tercih edilen teknolojidir. Hızlı piroliz, reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak (650-1000°C) flash veya ultra piroliz olarak da adlandırılabilir [33].

Vakum piroliz; biyokütle birçok fırın reaktöründe vakum altında piroliz edilmektedir. Fırından çıkan buharların yoğunlaştırılması ile birincil sıvı ürünlerin elde edilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Pirolitik sıvı ısıtma amacı ile yakıt veya özel tip kimyasallar olarak değerlendirilmektedir [29, 33, 34].

Hidropiroliz; süreci hidrojen atmosferinde gerçekleştirilen bir süreçtir. Biyokütlenin hidrokarbonlarca zenginleştirilmiş sıvılara dönüştürülmesinde yüksek bir uygulama potansiyeline sahiptir [29, 35].

1.4.1. Piroliz Ürünleri

Genel olarak tüm piroliz işlemlerinde elde edilen ortak ürünler katı, sıvı ve gaz ürünlerdir. Elde edilen katı ürün çoğunlukla karbon siyahı (char) olarak adlandırılır.



Şekil 1.5. Atık taşıt lastiğinin geri dönüşümünden elde edilen malzemeler

1.4.2. Katı Ürün

Pirolizden elde edilen katı ürün, genellikle gözenekli bir yapıya sahiptir ve aktif karbon gibi kullanılmaya elverişlidir. Karbon siyahı (char) olarak da bilinen katı ürün, inorganik maddeleri, organik bileşiklerin ısı bozulmasından elde edilen karbonlu atıkları ve dönüşüme uğramayan organik atıkları içermektedir. Kimyasal bileşimi piroliz koşullarına bağlıdır. Piroliz sürecinden elde edilen katı ürünün ısı değeri, linyit ve kokun ısı değerine yakındır [29].

1.4.3. Sıvı Ürün

Sıvı ürün, elementel bileşimi oksijenli hidrokarbonların karmaşık bir karışımıdır. Sıvı ürünün karmaşık yapısı, ligninin bozulması ve fenolik bileşiklerin oluşması ve bunların

karşılıklı etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Sıvı ürün çoğunlukla, piroliz sıvısı, yağ, biyo-yağ veya tar olarak adlandırılmaktadır [29, 30, 36]. Piroliz sıvısının görünümü genellikle koyu renktedir. Hammaddeye ve kullanılan piroliz teknolojisine bağlı olarak, siyah, koyu kahverengi, kırmızı veya koyu yeşil olabilir. Piroliz sıvısında bulunan su oldukça önemli bir etkiye sahiptir [30, 37, 38].

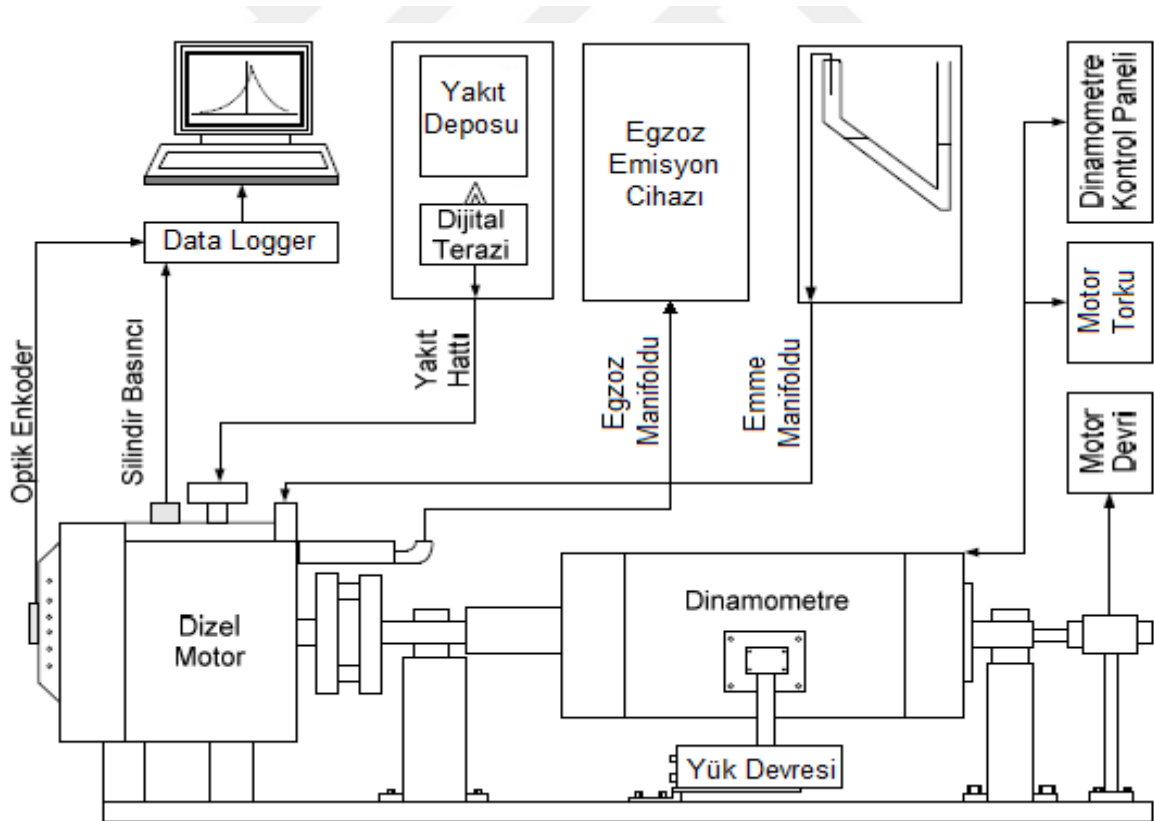
1.4.4. Gaz Ürün

Pirolizden elde edilen gaz ürün karmaşık ısı parçalanma işlemlerinden elde edilen doymuş (metan gibi), doymamış hidrokarbon karışımları ve gazları (H_2 , CO gibi) içerir. Genel olarak H_2 , CO_2 , CO, CH_4 , H_2O ve organik bileşimlerinin buharlarından oluşur. Elde edilen gaz ürün; güç santrallerinde, ısıtma işlemlerinde kullanılabilir [29].

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın ve benzinin dizel motorlarında kullanımının sayısal ve deneysel araştırılması konu edilmiş olup deneyler Fırat üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 4 silindirli ve 4 zamanlı 1.9 multijet dizel motoru ve Cussons P8160 marka motor dinamometre (bremze) tezgahı, Bosch BEA 150 marka egzoz emisyon ve duman ölçüm cihazları kullanılmıştır. Aşağıda deney düzeneğinin şematik görünümü ve genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 2.2. Deney düzeneğinin genel görünümü

Deneyler, Cussons P8160 marka bir motor test dinamometresinde yapılmıştır. Motor test dinamometresi, test motorunu boşa çevirebilmek ve yüklemek için kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Cussons P8160 marka dinamometrenin genel görünümü

2.1.1. Deney Test Motoru

Deneylerde 4 silindirli ve 4 zamanlı Fiat 1.9 Multijet marka su soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Deney motorunun özellikleri ve genel görünümü aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.1. Deney motorunun özellikleri

Motor Tipi	Direk Enjeksiyonlu Dizel Motor
Marka	Fiat
Silindir Sayısı	4
Toplam Silindir Hacmi	1.910 litre
Çap	82 mm
Strok	90.4 mm
Sıkıştırma Oranı	18:1
Soğutma Şekli	Su Soğutmalı
Enjektör Sistemi	Common Rail
Enjektör Nokta sayısı	6
Püskürtme Tipi	Çok Püskürtmeli (Multijet)
Püskürtme Başlangıç ve Bitiş Açıları	-20 °KA/-10 °KA 5 °KA/15 °KA
Enjektör Püskürtme Açısı	140°
Enjektör Nozul Çapı	0.145 mm
Maksimum Tork	250 Nm
Maksimum Güç	102 BG
Maksimum Devir	4000-4500 d/d
Maksimum Tork Devri	2000 d/d
Rölanti Devri	850-900 d/d



Şekil 2.4. Deney test motorunun genel görünümü

2.1.2. Egzoz Emisyon Cihazı

Egzoz emisyonları ve duman ölçümü Bosch BEA 150 marka egzoz emisyon cihazında yapılmış olup cihazın teknik özellikleri ve genel görünümü aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.2. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri [40].

	Ölçme Aralığı	Hassaslık
CO ₂	0.000-10.00 %Vol	0.001 %Vol
CO	0.00-18.00 %Vol	0.01 %Vol
HC	0-9.999 ppm Vol	1 ppm Vol
O ₂	0.00-22.00 %Vol	0.01 %Vol
λ	0.500-9.999	0.001
NO	0-5000 ppm Vol	<=1 ppm Vol



Şekil 2.5. Egzoz emisyon cihazının genel görünümü

Tablo 2.3. Duman ölçüm cihazının teknik özellikleri[40].

	Ölçme Aralığı	Hassaslık
Oposite Gradyanı	0-100 %	0.1 %
Absorsyon Katsayısı	0-9.99 d/d	0.01 d/d



Şekil 2.6. Duman ölçüm cihazının genel görünümü

2.1.3. Yakıt Tüketimi Ölçüm Ünitesi

Deneylerde test motorunun tükettiği yakıt kütleli olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir zaman diliminde yakıt deposundaki yakıtın ağırlığı hassas terazi ve bir kronometre yardımı ile ölçülmüştür. Kütleli yakıt tüketimini ölçmek için CAS marka 0,01gr hassasiyetli terazi kullanılmış olup terazinin genel görünümü aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.7. Hassas terazinin genel görünümü

Özgöl yakıt tüketimi ve efektif verimin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır. Kronometre yardımı ile belirli bir zaman aralığında hassas terazide ölçülen yakıt miktarı kaydedilmiş ve birim zamanda tüketilen yakıt miktarı kg/h olarak hesaplanmıştır. Sürtünme işi rotorun bir devirde yaptığı sürtünme kuvvetinin işidir. Formüldeki $F \cdot l$ yani kuvvet çarpı kuvvet kolu (moment) direk deneydeki verilere göre bulunmuştur. Hesaplanan kütleli yakıt debisi motor gücüne oranlanarak özgöl yakıt tüketimi bulunmuştur. Efektif verim için ise kullanılan her bir karışım yakıtı için alt ısı değeri hesaplanmış ve formüldeki yerine konularak efektif verim hesaplanmıştır.

Sürtünme işi

$$W_f = 2\pi \cdot F \cdot l \quad (2.1.)$$

Motor Gücü

$$P_e = (W_f \cdot (n/60)) / 1000 \quad (2.2.)$$

Özgöl Yakıt Tüketimi

$$B_e = (3600 \cdot \dot{m}_y) / P_e \quad (2.3.)$$

Efektif Verim

$$\eta_e = (3.6 \cdot 10^6) / (B_e \cdot H_u) \quad (2.4.)$$

W_f = Sürtünme işi (Nm/devir)

P_e = Motor Gücü (kW)

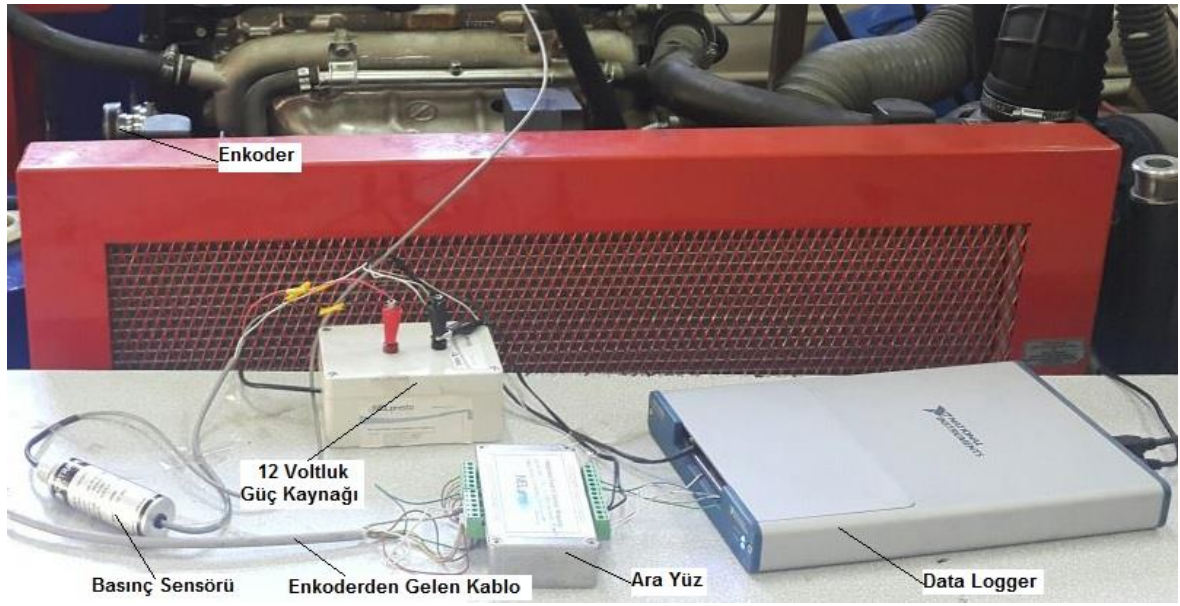
B_e = Özgöl Yakıt Tüketimi (g/kWh)

η_e = Efektif Verim (%)

H_u = Yakıt Alt Isıl Değeri (kJ/kg)

2.1.4. Silindir İçi Basıncın Ölçülmesi

Silindir içi basıncın ölçülmesinde ve kaydedilmesinde NEL Presto firmasının FebrİS adlı program yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca krank mili pozisyonunun ölçümünde optik enkoder kullanılmıştır. Silindir içinde basıncı ölçen basınç sensörü, sensörlerden gelen sinyalleri alan ara yüz ve sinyalleri işleyen data logger(bilgi işleyici) ve FebrİS adlı program yazılımının ekran görüntüsü aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 2.8. Sensörlerden gelen sinyalleri işleyen bilgi işleyicinin (Data Logger) genel görünümü



Şekil 2.9. FebrİS adlı programın ekran görüntüsü

2.1.5. Deneyde Kullanılan Yakıtlar

Deneylerde üç farklı yakıt olarak dizel, benzin ve pirolitik yağların farklı deneylerde farklı oranlarda karışımlarından meydana gelen karışım yakıtları kullanılmıştır. Pirolik yağ ise İstanbul merkezli bir firma olan Marmore mühendislik adlı bir geri dönüşüm tesisinden temin edilmiş ve içine herhangi bir katkı maddesi eklenmemiştir. Deneyde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo2.4-6).

Tablo 2.4. Dizel yakıtının kimyasal özellikleri

Özellikler	Dizel
Kimyasal Formül	$C_{13}H_{28}$
Mol Ağırlığı (g/kmol)	184
Ady. Alev Sıcaklığı (K)	2327
Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	43300
Yoğunluk (kg/m^3)	830
Gizli Buharlaşma Isı (kJ/kg)	620
Vizkozite (mm^2/sn)	3,9
Buhar Basıncı (kPa)	0,34
Setan Sayısı	55
Stokiyometrik H/Y Oranı	14,7
H/C Oranı	2,15

Tablo 2.5. Benzin yakıtının kimyasal özellikleri

Özellikler	Benzin
Kimyasal Formül	$C_6H_{14}-C_7H_{16}$
Mol Ağırlığı (g/kmol)	86-100
Yoğunluk (kg/m^3)	727
Kaynama Noktası (K)	305-490
Tutuşma Sıcaklığı (K)	493-573
Donma Noktası (K)	243-263
Buharlaşma Isısı (kJ/kg)	490
Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	39800-44345
Buhar Basıncı (kPa)	41-103
Hava-Yakıt Oranı	14,5
Araştırma Oktan Sayısı (ROS)	91-100
Motor Oktan Sayısı (MOS)	82-92

Tablo 2.6. Pirolitik yağın kimyasal özellikleri

Özellikler	Pirolitik Yağ
Yoğunluk (kg/m ³)	909
Kinematik Vizkozite (mm ² /sn)	4,86
Parlama Noktası (K)	303
Akma Noktası (K)	249
Maksimum Kül (%)	0,025
Maksimum Kükürt (%)	0,98
Alt Isıl Değeri (kj/kg)	42676
Oktan Sayısı	110

Deneylerde kullanılan saf dizel, dizel-benzin ve dizel-pirolitik yakıt karışımlarının genel görünümü aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 2.10. Farklı oranlarda dizel-benzin karışımlarının genel görünümü



Şekil 2.11. Farklı oranlarda dizel-pirolitik yağ karışımlarının genel görünümü

2.1.6. Deneylerin Yapılışı

Deneylere başlamadan önce test motoru üzerinde gerekli tüm ayarlamalar ve bakımlar özenli bir şekil yapılarak tamamlanmıştır. Deneyde kullanılacak yakıt karışımları her deney öncesi hazırlanmıştır.

Deneylerde maksimum torku 250 Nm olan motorda dizel, dizel-benzin ve dizel-pirolitik yakıtlarının farklı oranlarda karışımlarından oluşan yakıtlar kullanılmıştır. Tüm deneyler iki farklı aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada motor 2000 d/d (maksimum tork devri) sabit devrinde %0, %10(25Nm), %20(50Nm), %30(75Nm), %40(100Nm) ve %50(125Nm) motor yüklerinde saf dizel, D90-B10(%90 dizel %10 benzin), D80-B20(%80 dizel %20 benzin), D70-B30(%70 dizel %30 benzin) yakıtlarıyla çalıştırılarak ve tüm ölçümler yapılmıştır. Ardından motor yine aynı şartlarda D90-P10(%90 dizel %10 pirolitik yağ), D80-P20(%80 dizel %20 pirolitik yağ), D70-P30(%70 dizel %30 pirolitik yağ) karışımlarından oluşan yakıtlar kullanılarak çalıştırılmış ve gerekli tüm ölçümler alınmıştır. İkinci aşamada ise motor bu sefer %0 ve %25 sabit motor yüklerinde saf dizel, D80-B20 ve D80-P20 yakıtları kullanılarak 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 gibi farklı devirlerde çalıştırılarak tüm gerekli ölçümler ve değerler alınarak deneyler tamamlanmıştır.

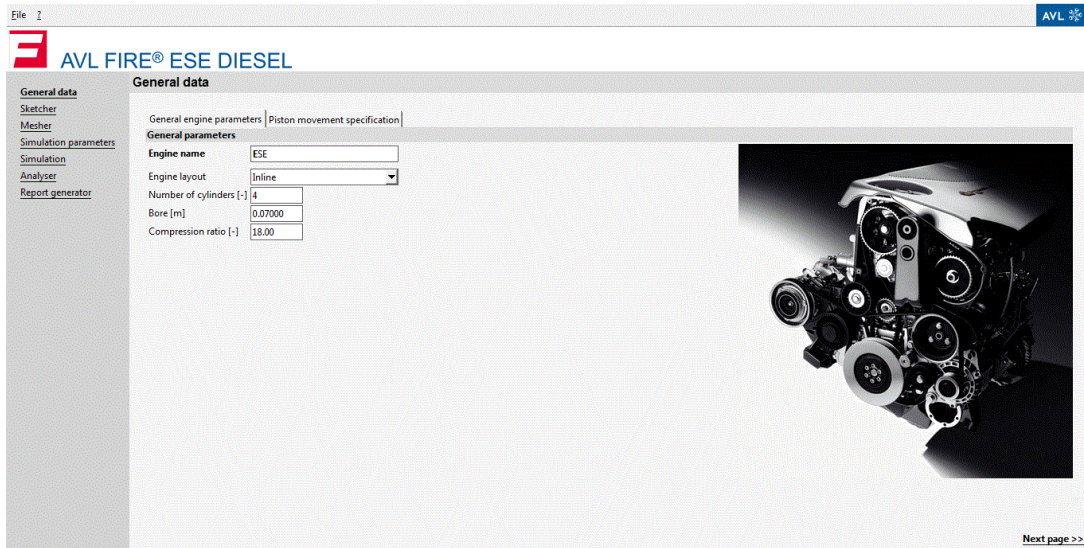
Deneyler sırasında kullanılan herhangi bir karışım yakıtı için ölçümler alınırken şu sıranın takip edilmesine dikkat edilmiştir.

İlk önce depoya konulan yakıt karışımıyla, motor belirli bir dereceye kadar ısınması için boşta çalıştırılmıştır. Motor ısısı istenilen seviyeye ulaştıktan sonra motora gerekli yükleme dinamometre tarafından sağlanmıştır. Motora istenilen yük verildikten hemen sonra hassas terazi üzerinde bulunan deponun ilk ağırlığı not edilmiştir. Egzoz emisyonları CO, CO₂, NO_x, HC ve İS emisyonları emisyon cihazı tarafından ölçülüp not edilmiştir. Dinamometre üzerinde bulunan hava tüketim sensöründen hava tüketim miktarı okunup yazılmıştır. Silindir içi basıncı ve motor çevrimleri bilgisayara bağlı data logger tarafından işlenip FebriS adlı program tarafından analiz edilip kaydedilmiştir. Tüm ölçümler ve analizler yapıldıktan sonra yakıt deposunun ağırlığının son hali hassas teraziden okunup kaydedilmiş ve kullanılan yakıt karışımı için bir deney tamamlanmıştır. Deney bittikten sonra motor bir sonraki deneye geçilmeden önce soğuması için belirli bir süre çalıştırılmadan bekletilmiştir. Yeni bir deneye başlamadan önce bir önceki deneyden depoda kalan yakıt karışımı tamamen bitene kadar boşaltılmıştır. Bütün deneyler için bu işlemler sırasıyla tekrarlanmıştır. Bütün deneyler herhangi bir olumsuzluk yaşanmadan tamamlanmış ve deneylerden alınan sonuçlar yorumlanmak için grafiklere dönüştürülmüştür.

2.2. Sayısal Çalışma

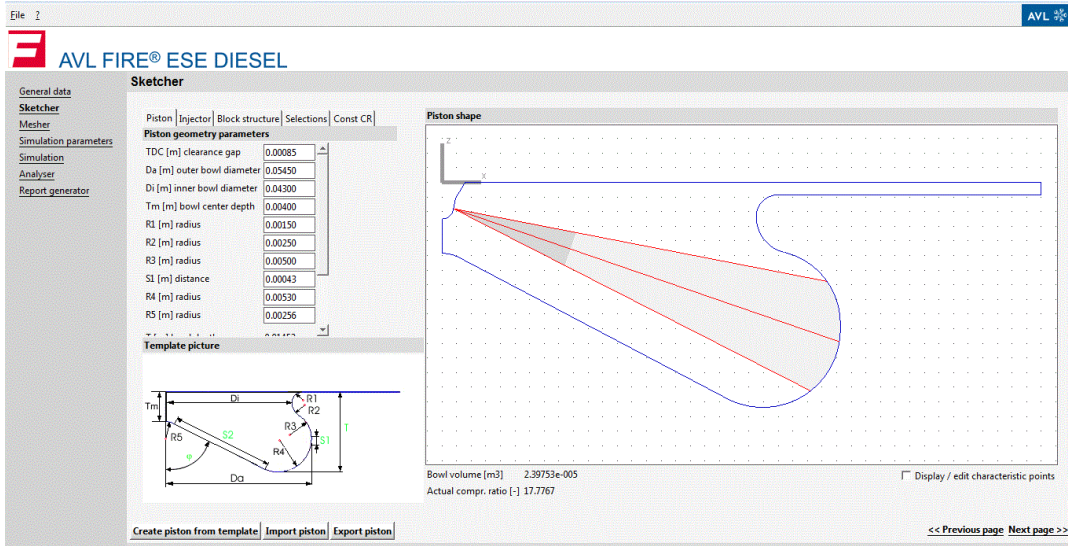
2.2.1. Sayısal Analiz Programının Tanıtımı

Sayısal analiz çalışmaları AVL FIRE adlı analiz programında gerçekleştirilmiştir. Aşağıda analiz programının genel görünümü ve analiz için yapılan işlem basamakları gösterilmiştir.

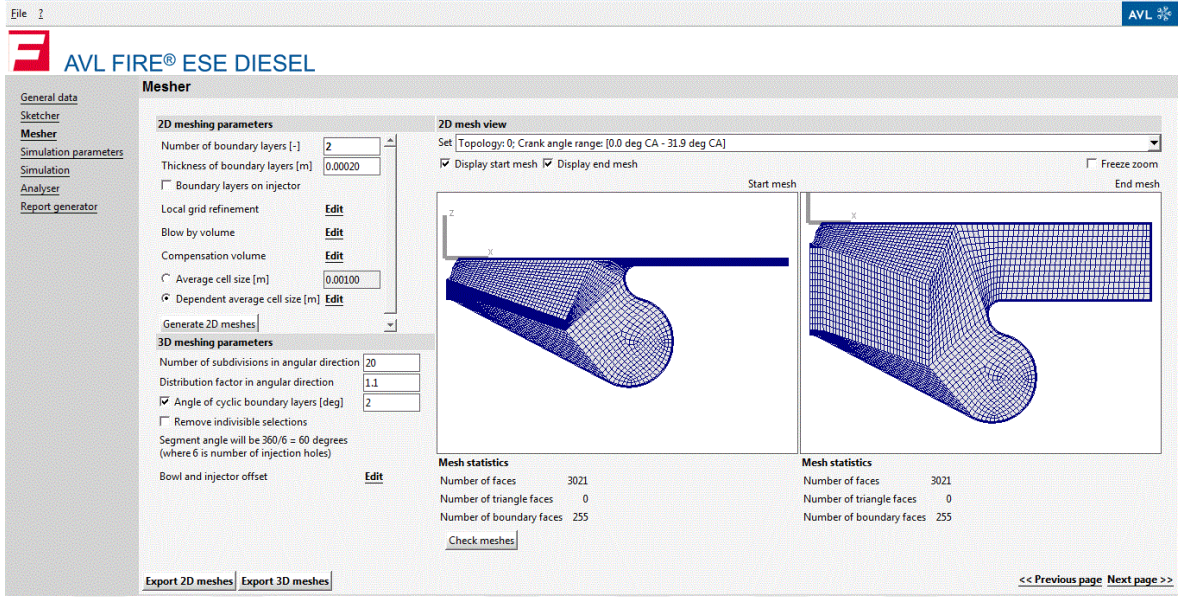


Şekil 2.12. AVL FIRE analiz programının giriş bölümünün genel görünümü

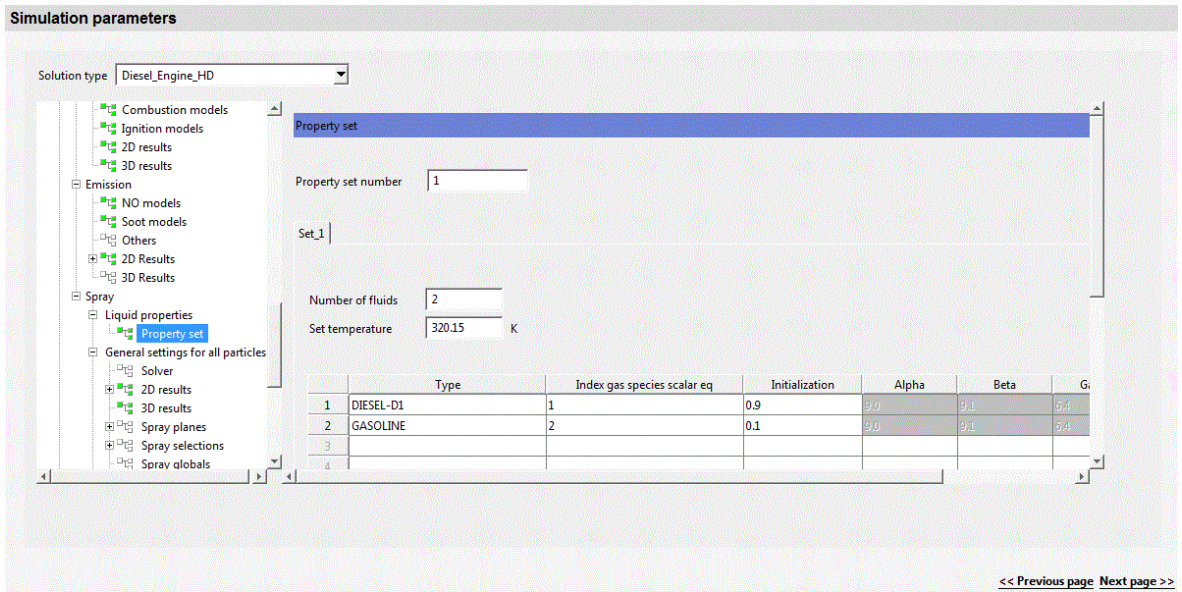
Sayısal analiz programında çözüm yapabilmek için deneysel çalışmada kullanılan motorun piston, silindir, enjeksiyon gibi motor elemanlarının ölçüleri ve motor çalışma koşullarının sayısal değerleri programa girilerek sanal bir motor ortamı oluşturulmuştur. Aşağıda oluşturulan sanal motorun parametrelerinin olduğu program ekranları görülmektedir. Öncelikle deneysel motorun yanma odasına uygun olarak sayısal ordamda yanma odası oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model için bir sonraki aşamada ağ yapısı oluşturulmuş ve sınır şartları verilmiştir. Daha sonra analiz parametreleri sırasıyla programa girilmiş, çoklu püskürtme yapısı ve farklı yakıt karışımları belirlenmiştir. Daha sonra analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.13. Piston için girilen parametre değerleri ve yanma odasına yakıtın püskürtülme şeklinin görünümü



Şekil 2.14. Analiz Programında oluşturulan yanma odasının meshli görünümü



Şekil 2.15. Sanal ortamda oluşturulan yakıt karışımlarının oransal olarak genel görünümü

Bu tez kapsamında, çözümlere geçilmeden önce incelenen motor şartlarında ağ yapısı test edilmiş ve ağ yapısından bağımsız çözüm elde edilmiştir. Ağ yapısından bağımsız çözümü elde etmek için farklı hücre sayılarında ağ yapısı kullanılarak sabit çalışma şartları için farklı çözümler elde edilmiştir. Çalışmada, çözümlenen kesit model için ve piston ÜÖN' da iken 12000, 20000, 50000, 80000, 120000 ve 180000 hücre sayıları için çözüm yapılmıştır.

Hücre sayının az olması çözüm kalitesini düşürürken fazla olması da çözüm kalitesine olumsuz yönde etki etmekte ve çözüm süresini aşırı şekilde uzatmaktadır. Bu değerler piston üst ölü noktada iken elde edilen değerlerdir. Bu çalışma sonucunda 80000 hücre sayılı çözüm kullanılmıştır. Piston alt ölü noktada iken çözüm modeli için yaklaşık 500000 hücre ile analizler yapılmıştır.

Çalışmada akışı ve yanmayı modellemek için bir çok yaklaşım ve alt model kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan modeller Tablo 2.7’ de görülmektedir.

Tablo 2.7. Çalışmada kullanılan modeller

Sprey modeli	WAVE
Sprey duvar etkileşim modeli	Walljet
Damlacık buharlaşma modeli	Dukowicz
Yanma Modeli	EFCM-3Z
Türbülans Modeli	k-Zeta-f
Ateşleme Modeli	Auto-ignition
NO oluşumu	Extended Zeldovich Mechanism
İs oluşumu	Kinetic Model

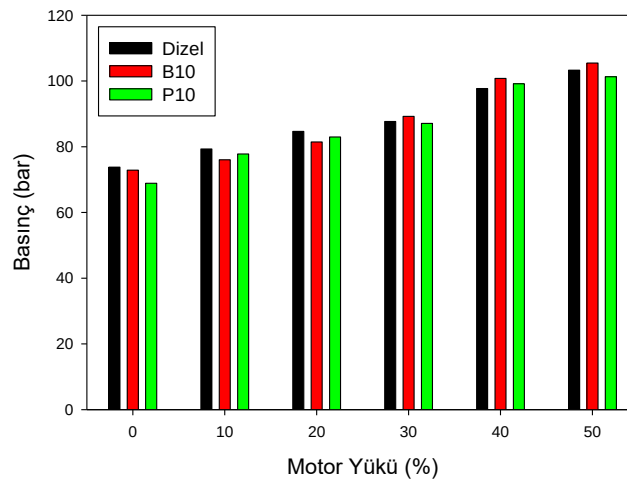
3. BULGULAR

3.1. Deneysel Bulgular

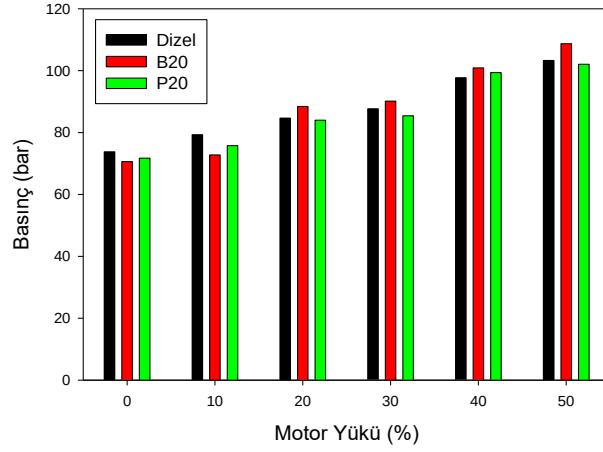
3.1.1. Farklı Motor Yüklerine Göre Elde Edilen Bulgular

Deneysel çalışmanın ilk kısmında maksimum motor torkunun elde edildiği devir olan 2000d/d sabit tutularak farklı motor yüklerinde (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50) deneyler yapılmıştır. %50 motor yükünde motor çalışmasında kısmen düzensizlikler başladığından motor deneyleri bu yükten sonra devam ettirilmemiştir. Farklı motor yükleri altında dizel-benzin ve dizel-pirolitik yağ karışımlarının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir.

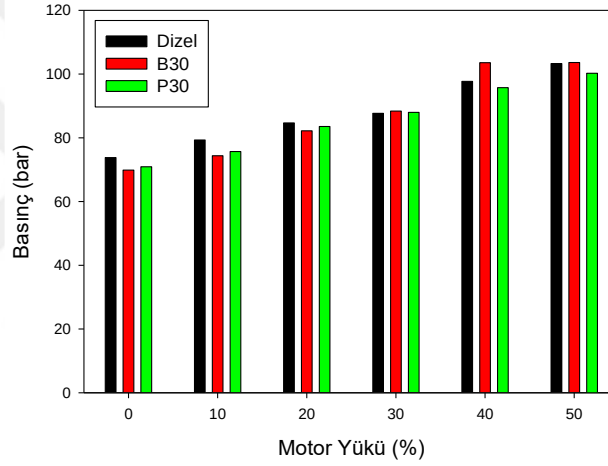
Şekil 3.1 (a-c) farklı karışım oranları için motor yüküne bağlı olarak silindir içi maksimum basıncın değişimini göstermektedir. Her üç karışım oranı için de %0 ve %10 motor yüklerinde dizel yakıtı için silindir içi basıncın daha yüksek olduğu görülmektedir. %30-%50 motor yükü gibi daha yüksek motor yüklerinde ise benzin karışımı durumların basınç değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Fakat aynı motor özellikle %50 motor yükünde pirolitik yağ karışımında basınç değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Pirolitik yağın daha düşük ısı değeri olduğu ve viskozitesinin yüksek olduğu düşünülürse yanmanın kısmen olumsuz etkilenebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çalışılan motor yüklerinde alternatif bir yakıt olabileceği gözlenmektedir.



a) %10 karışım oranı



b) %20 karışım oranı

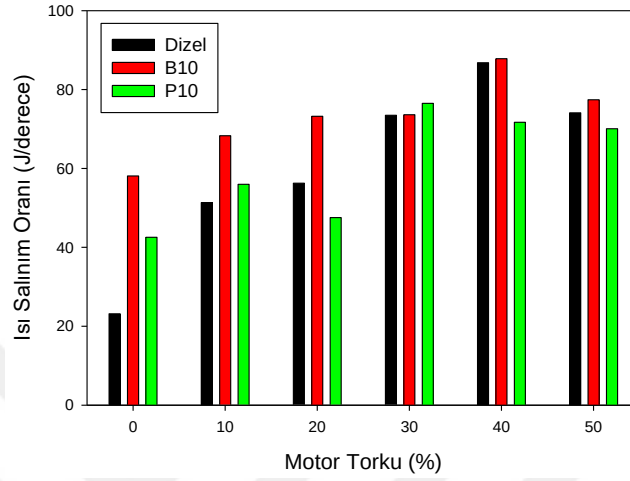


c) %30 karışım oranı

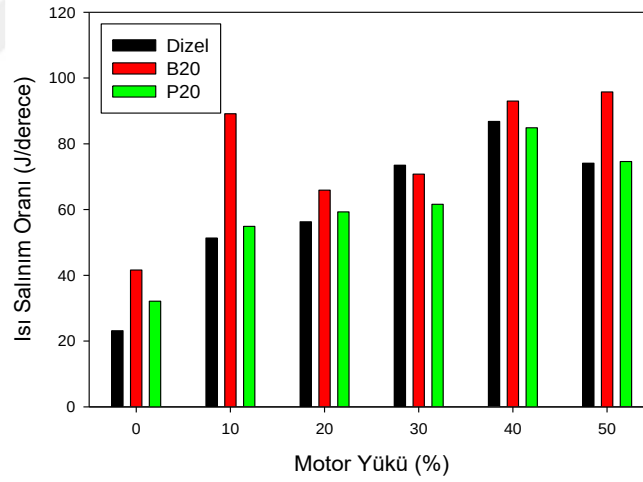
Şekil 3.1. Silindir içi basıncın motor yüküne bağılı değışimi

Şekil 3.2 (a-c) farklı karışım oranları için motor yüküne göre ısı salınım oranlarının değışimini göstermektedir. Her üç karışım için %20 ye kadar olan motor yüklerinde ısı salınımların gerek benzin gerekse pirolitik yağ karışımları için dizelden yüksek olduğı görölmektedir. Bu durum düşük motor yüklerinde ön karışım etkisinin sağlandığını göstermektedir. Özellikle %20 oranında (Şekil 3.2 (b)) benzin ve pirolitik yağ karışımı durumunda daha yüksek motor yüklerine kadar faydalı etkinin sürdüğü görölmektedir. %30 karışım durumunda (Şekil 3.2 (c)) %20 den sonraki motor yüklerinde dizel yakıtının ısı salınımının maksimum değıerinin yüksek olduğı görölmüştür. Bu grafik karışım oranı ve motor yüklerinin ısı salınımına etkisini net olarak göstermektedir.

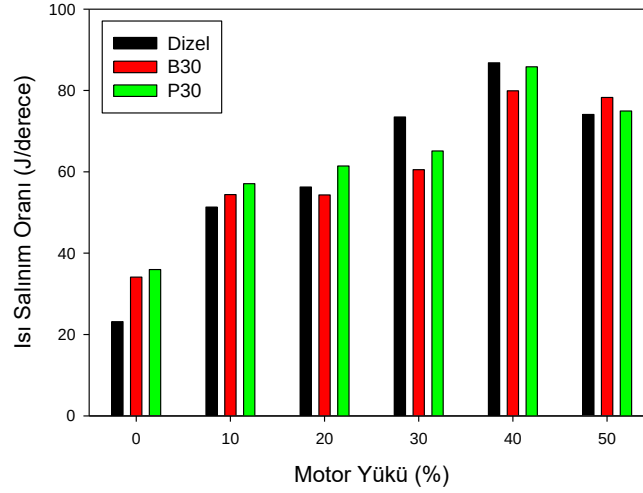
Benzinin viskozite değerine ve ısısal değerine bağlı olarak ön karışım durumunda ısısal salınımını etkilediği, pirolitik yağın düşük ısısal değerinin de genel olarak düşük ısısal salınımı yarattığı görülmektedir.



a) %10 karışım oranı



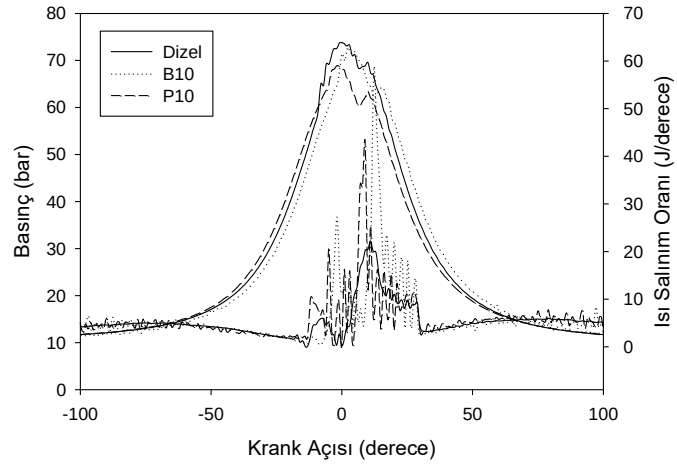
b) %20 karışım oranı



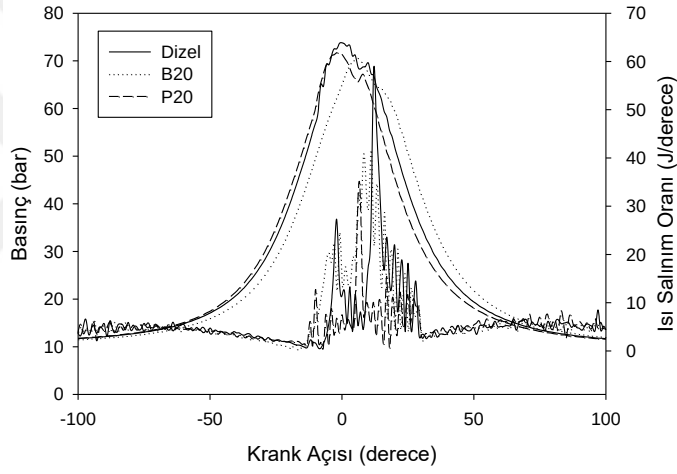
c) %30 karışım oranı

Şekil 3.2. Isı salınım oranının motor yüküne bağlı değişimi

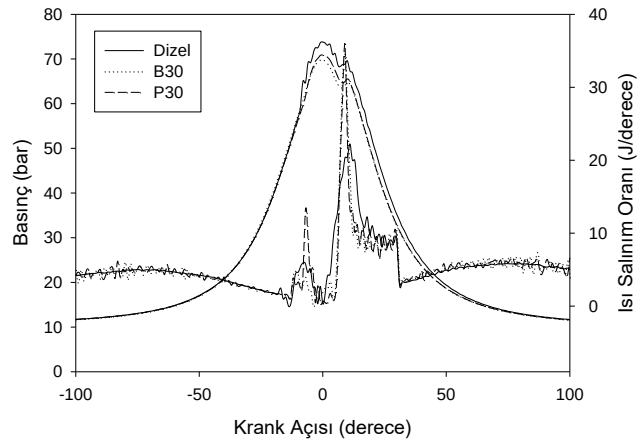
Şekil 3.3’de silindir içi basınç ve ısı salınımının krank açısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Silindir içi basınç değişimi karışım yakıtlarında kısmen düşüş göstermektedir. Pirolitik yağ karışımı durumunda ısı salınımlarının erken başladığı görülmüş, basınç yükselişi de daha erken krank açılarındaki başlamıştır. Aynı şekilde gerek ısı salınımları gerekse basınç değişimi daha erken krank açılarındaki bitmiştir. Dolayısıyla yanma daha erken başlayıp bitmektedir. %10 ve %20 karışım oranlarında basınç kaybı daha yüksek iken %30 karışımında (Şekil 3(c)) silindir içi basınçlar daha yakın olarak elde edilmiştir. %30 karışım durumu için yanma başlama ve bitiş açıları birbirine çok daha yakındır. Grafiklerde ayrıca çok püskürtmeli (multijet) motor etkisi de görülmektedir. Hem basınç hem de ısı salınım eğrilerinde iki adet yükselme olması her bir püskürtmenin etkisini göstermektedir. Birinci püskürtmede yakıt püskürtmesinden sonra ısı salınımı meydana gelmekte ve basınç da paralel olarak yükselmektedir. İkinci püskürtmeyle ise daha yüksek ısı salınımı elde edilmekte ve yanma tamamlanmaktadır.



a)



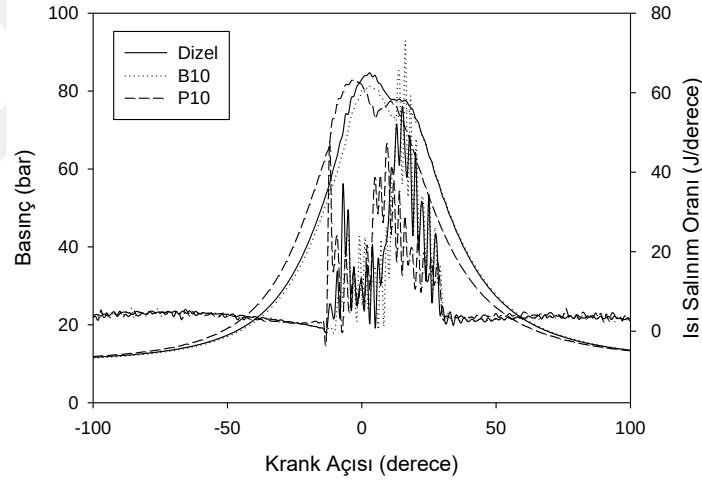
b)



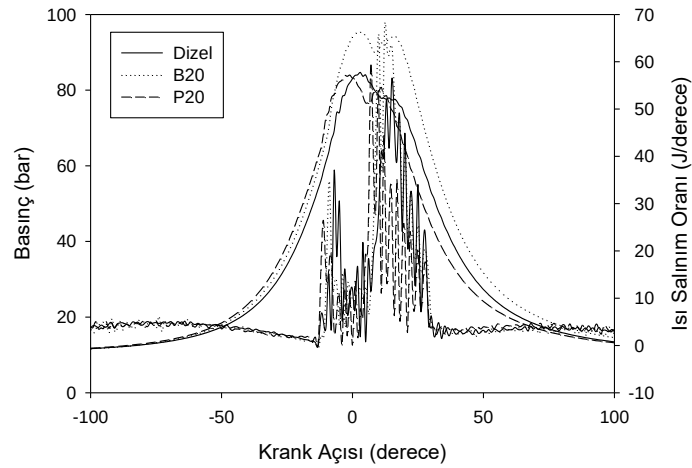
c)

Şekil 3.3. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının krank açısına bağlı olarak değişimi (%0 motor yükü)

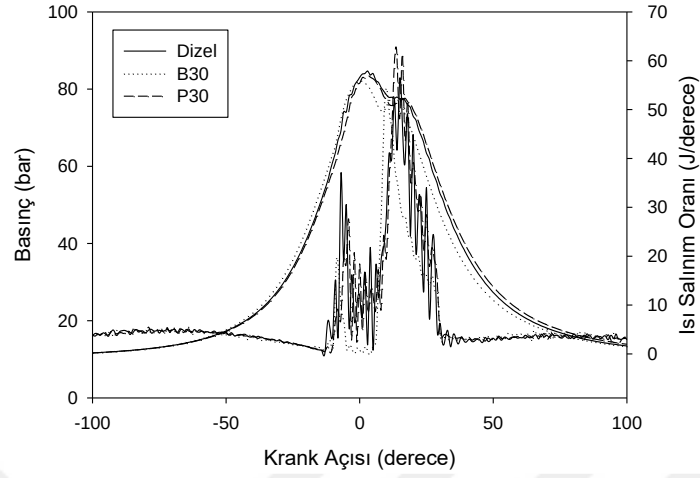
Şekil 3.4.'de %20 motor yükü altında silindir içi basınç ve ısı salınım oranları görülmektedir. Şekil 4 (a,b)'de %10 ve %20 karışım oranlarında özellikle pirolitik yağ karışımı durumunda ısı salınımının erken başladığı, silindir içi basıncın daha erken yükseldiği ve yanmanın daha önce başlayıp bittiği gözlenmiştir. Yine aynı karışım oranlarında karışım yakıtları için silindir içi basıncın daha düşük olduğu ve ısı salınım oranlarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. %20 karışım oranında benzin karışımı durumunda basınç dizel yakıtına göre çok yüksek olmakla birlikte pirolitik yağ karışımında ki silindir içi basınç da dizele yakın ve daha erken krank açısında elde edilmiştir. %30 karışım oranlarında ise (Şekil 4(c)) gerek yanma başlama açıları gerekse basınç değerleri her üç yakıt içinde yakındır. Fakat karışım yakıtların ısı salınımları daha yüksektir.



a)



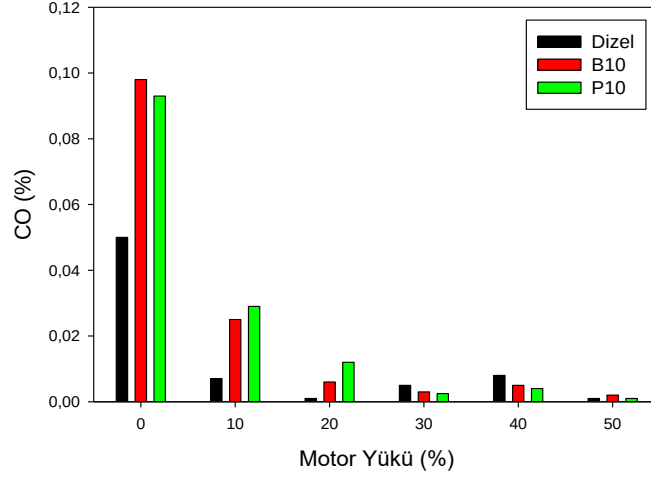
b)



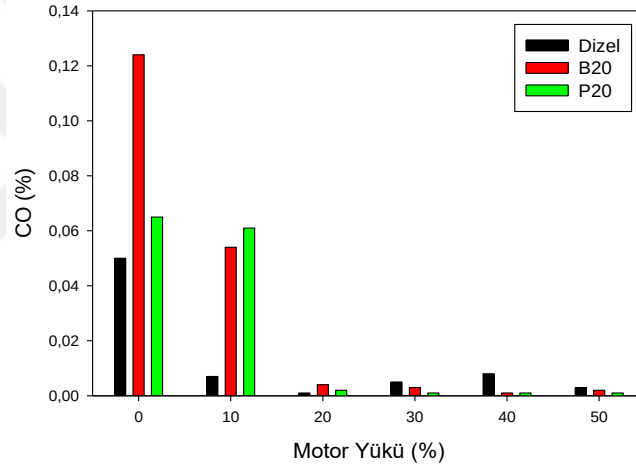
c)

Şekil 3.4. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının krank açısına bağlı olarak değişimi (%20 motor yükü)

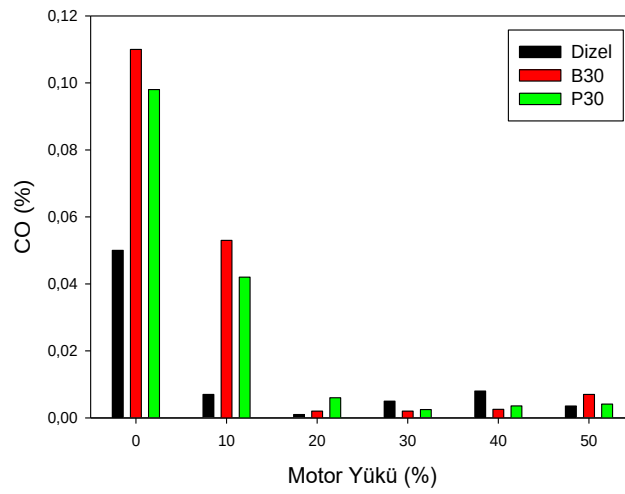
Şekil 3.5(a-c)'de 2000 d/d sabit motor devrinde farklı yakıt karışımlarında motor yüküne göre CO emisyonunun değişimi görülmektedir. Grafikten görüldüğü gibi CO emisyonu düşük motor yük oranlarında yüksek iken orta yüklerde düşüş göstermektedir. Bilindiği gibi CO emisyonu eksik yanma ürünü olup oluşumu püskürtülen yakıtın atomize olmasına ve yanma odasındaki oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir. Püskürtülen yakıt miktarına göre yakıt parçacıklarının yanma odasında oksijenle buluşma ve yanmanın gerçekleşmesine bağlı olan CO emisyonunun yüksek motor yüklerinde düşmesi beklenen bir sonuçtur. Düşük yüklerde ön karışımli yanmanın etkisiyle düşük sıcaklıkta yanma meydana gelmektedir. Yüksek yüklerde ise yanma sıcaklığı yükseldiğinden CO₂'ye dönüşüm oranı artmaktadır.



a) %10 karışım oranı



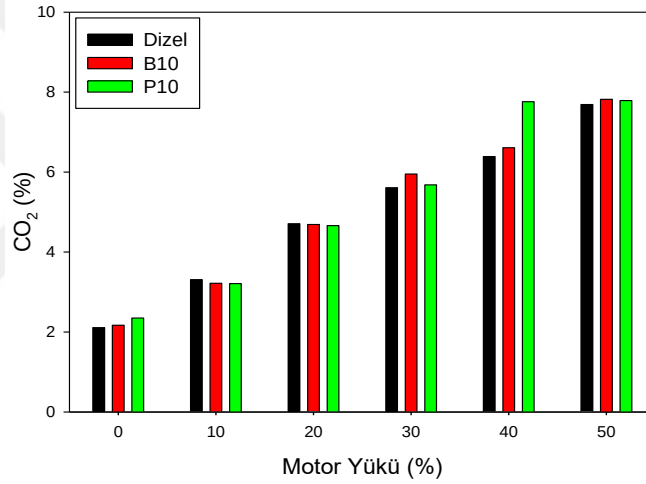
b) %20 karışım oranı



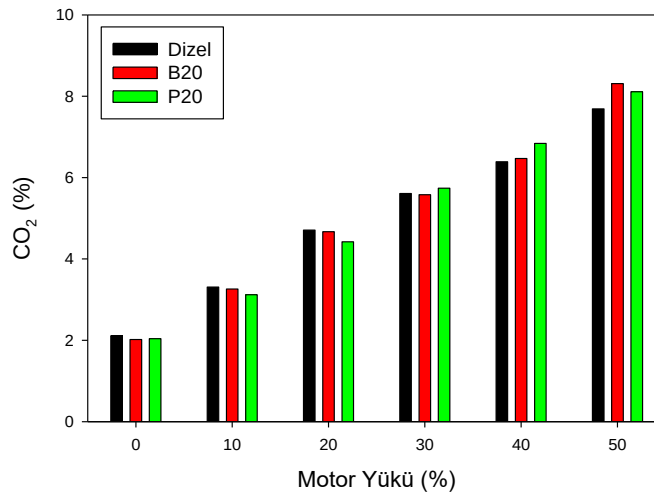
c) %30 karışım oranı

Şekil 3.5. CO emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi

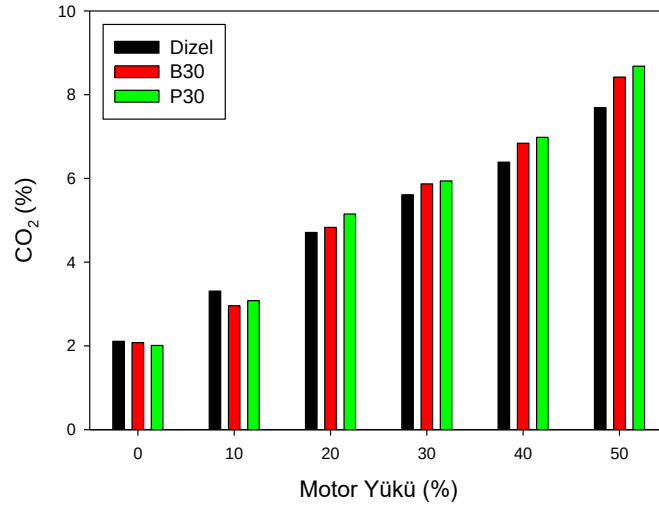
Şekil 3.6'da farklı yakıt karışım oranlarında ve motor yüküne bağlı olarak CO₂ emisyonunun değişimi görülmektedir. Şekil 3.5 ile birlikte bu grafik incelendiğinde CO emisyonlarının CO₂'ye dönüşümü net olarak görülmektedir. Düşük motor yüklerinde CO₂ oluşumunun az olduğu ve bu motor yüklerinde dizel yakıtına ait CO₂ emisyonlarının yüksek olduğu görülmektedir. Artan motor yüklerinde karışım yakıtlar için CO₂ emisyonunun dizelden daha yüksek olduğu da görülmüştür. CO₂ tam yanma ürünü olduğundan yüksek motor yüklerinde karışım yakıtlarının ön karışıma bağlı olarak yanma kalitesini artırdığı bu grafikten çıkarılmaktadır.



a) %10 karışım oranı



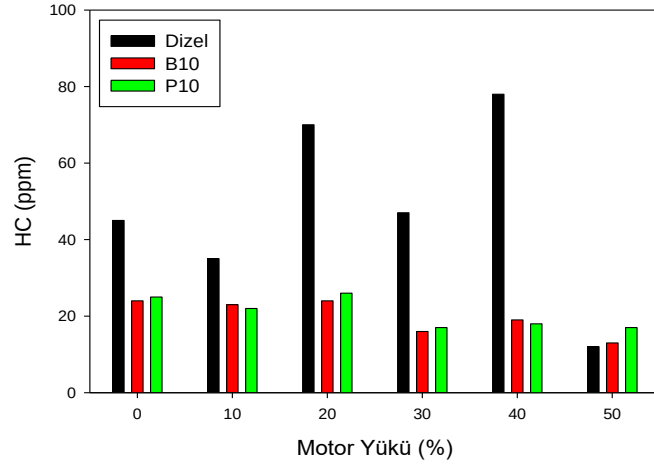
b) %20 karışım oranı



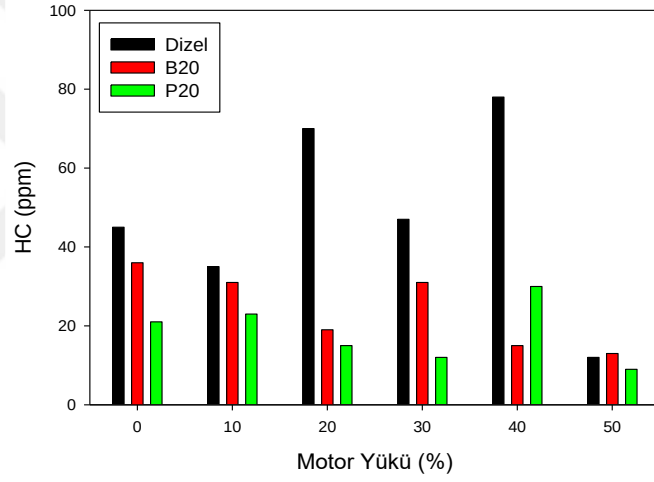
c) %30 karışım oranı

Şekil 3.6. CO₂ emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi

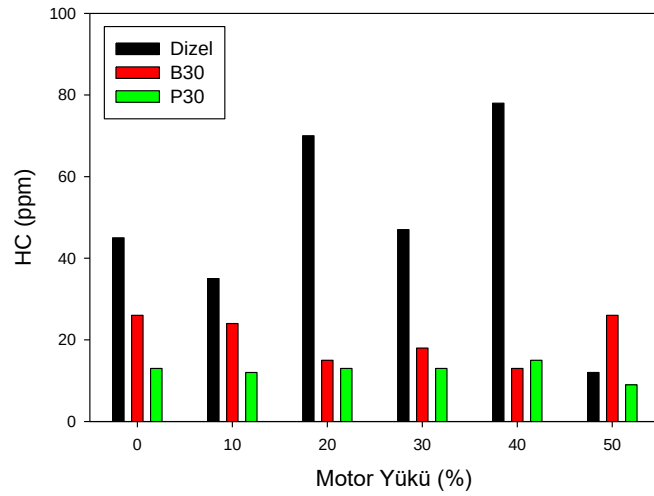
Şekil 3.7’de farklı yakıt karışım oranlarında ve değişen motor yüklerinde HC emisyonunun değişimi görülmektedir. Bilindiği gibi HC emisyonları eksik yanma ürünü olup yanmamış yakıtı ifade etmektedir. Grafiğe bakıldığında saf dizel yakıtının artan motor yükleriyle birlikte artan azalan bir grafik oluşturduğu görülebilir. Bu durumun nedeni olarak değişen yüklerde silindir içerisine alınan havanın yetersizliği ve yanma için geçen sürenin azalması olarak gösterilebilir. Dizel-benzin ve dizel-pirolitik yağ karışımlarının her oranı ve her motor yükünde saf dizel yakıtından daha düşük HC emisyonu oluşturduğu görülmektedir. Hem benzin hemde pirolitik yağın tutuşma sıcaklığının dizelden daha düşük olması ve ön karışım etkisi ile yanmanın daha iyi gerçekleştiği bu grafikte de görülmektedir. Bu grafik Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 deki CO ve CO₂’ sonuçlarını da doğrulamaktadır. Ayrıca, grafikte her üç karışım oranı için %50 motor yükü durumunda HC emisyonlarının karışım yakıtları için dizele yaklaştığı hatta geçtiği de gözlenmiştir. Dolayısıyla %40 dan sonraki motor yüklerinde ön karışım etkisinin kaybolduğu ve yanmanın kötüleştiği görülmektedir.



a) %10 karışım oranı



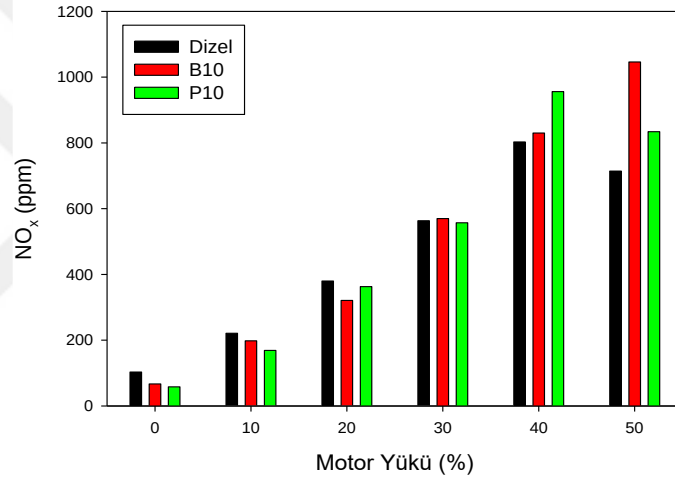
b) %20 karışım oranı



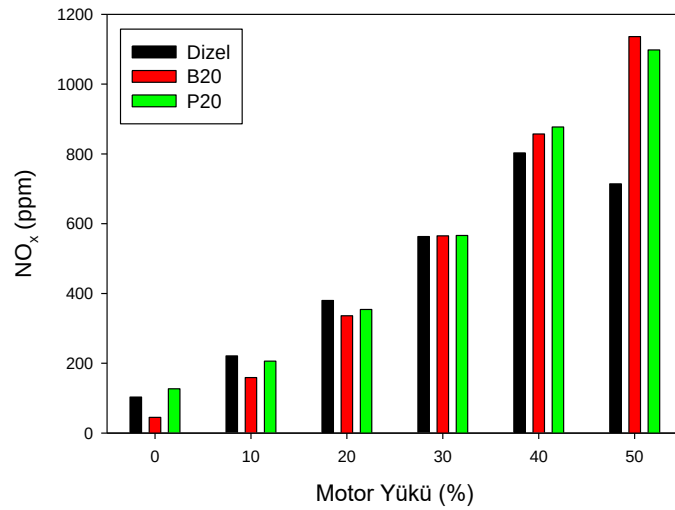
c) %30 karışım oranı

Şekil 3.7. HC emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi

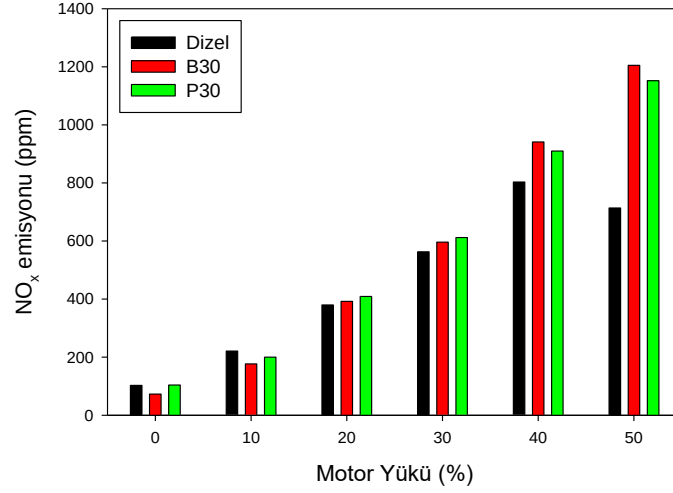
Şekil 3.8 (a-c)'de farklı karışım oranları (%10, %20, %30) ve değişen motor yüklerinde (0-%50) NO_x emisyonunun değişimi görülmektedir. Ön karışımli yanma prensibine uygun olarak düşük sıcaklıklı yanma konseptinin düşük yüklerde sağlandığı bu grafikte açıkça görülmektedir. %10 ve %20 karışım oranlarında (Şekil 3.8 (a,b)) %30 motor yüklerine kadar düşük sıcaklık etkisi devam ettiğinden karışım yakıtları kullanılması durumunda dizel yakıtından daha az NO_x emisyonu oluşmuştur. Artan motor yüklerinde ise yanma sıcaklığı arttığından NO_x emisyonunda artış gözlenmiştir. %30 karışım durumunda ise (Şekil 3.8 (c)) düşük sıcaklık etkisinin daha düşük motor yüklerinde kaldığı gözlenmiştir.



a) %10 karışım oranı



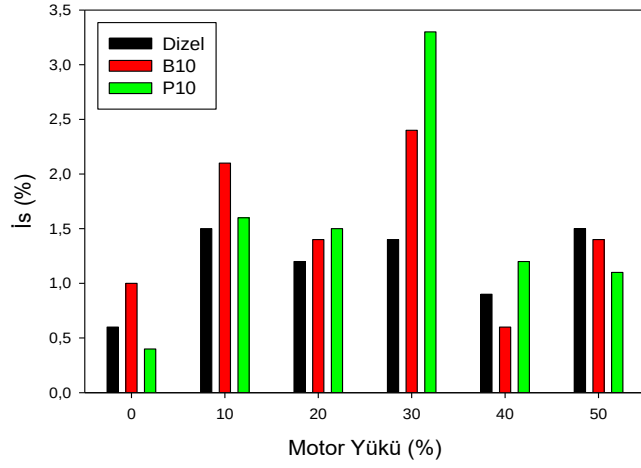
b) %20 karışım oranı



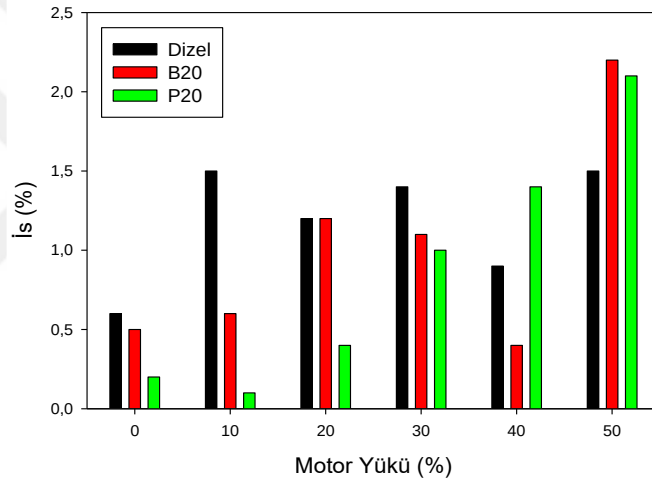
c) %30 karışım oranı

Şekil 3.8. NOx emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi

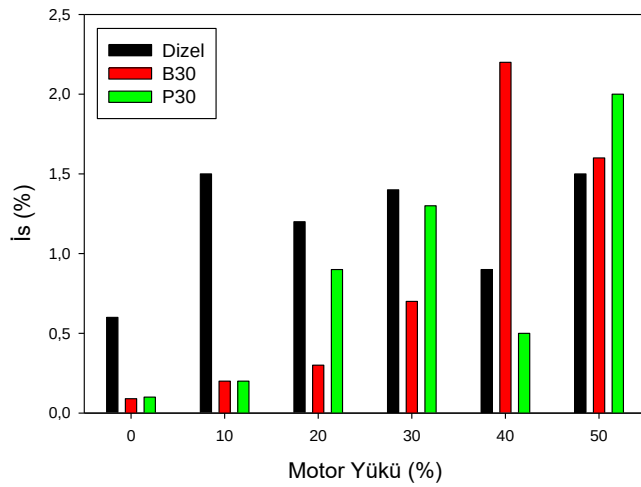
Şekil 3.9’da farklı yakıt karım oranlarında ve değişen motor yükleri altında is emisyonlarının değişimi görülmektedir. İs emisyonları bilindiği üzere dizel motorlar için oldukça önemli olup yanma kalitesini belirlemektedir. %10 karışım durumunda (Şekil3.9 (a)) düşük yüklerde özellikle pirolitik yağ karışımlarında is emisyonu düşük çıkmıştır. Fakat genel olarak is emisyonu bu karışım oranı için dizel yakıtından yüksektir. Ön karışım kalitesi ve yanma süresi bu emisyonun yüksek çıkmasını doğrudan etkilemektedir. İs emisyonlarının özellikle %20 ve %30 karışım oranlarında (Şekil 3.9 (b,c)) %30 motor yüklerine kadar daha düşük seyretmesi önemli bir sonuçtur. Bu sonuç ön karışımli yanmanın etkilerini açıkça göstermektedir. Fakat yükselen motor yüklerinde is emisyonu oluşumu tüm karışım oranları için artmıştır.



a) %10 karışım oranı



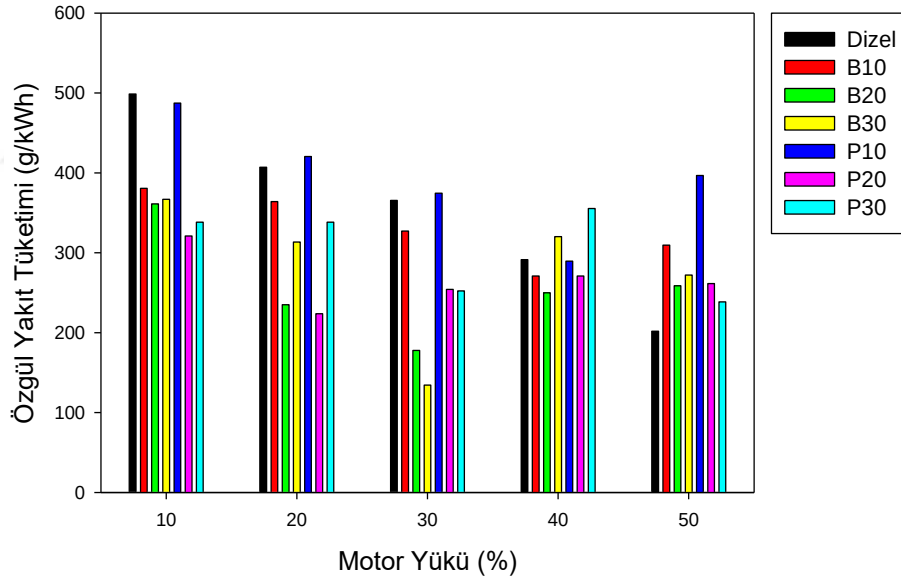
b) %20 karışım oranı



c) %30 karışım oranı

Şekil 3.9. İş emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi

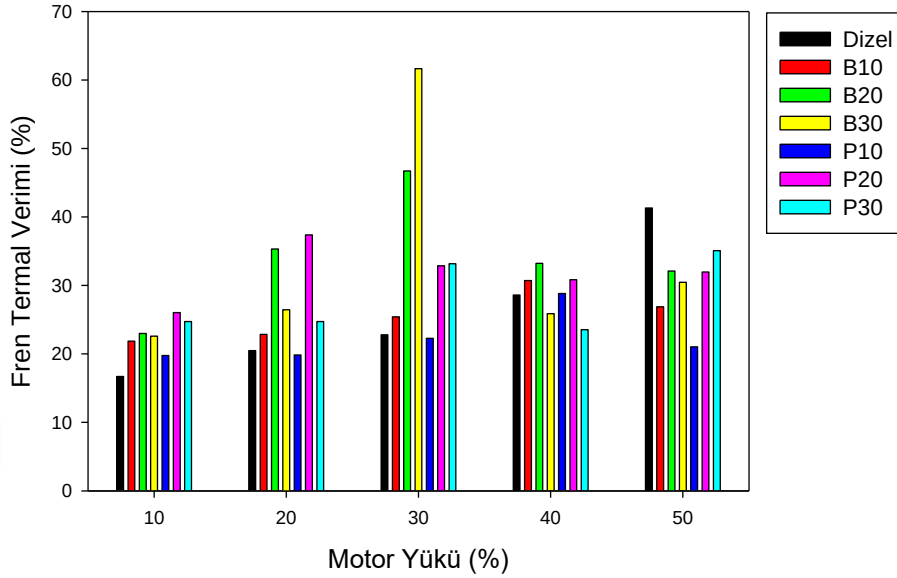
Şekil 3.10'da 2000 d/d sabit motor devrinde tüm yakıt karışımları için değişen motor yüklerinde (%0, %10, %20, %30, %40 ve %50) özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmektedir. Motorlarda özgül yakıt tüketimi birim zamanda birim güç elde etmek için harcanan yakıt miktarı olup efektif verimle ters orantılı olarak değişmektedir. Bunun sonucunda efektif verim artıkça özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Grafiğe bakıldığında her üç yakıt içinde artan yük oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi kademeli olarak azalmaktadır. %30 motor yüküne kadar özgül yakıt tüketimindeki azalma net olarak görülürken artan motor yüklerinde yakıt tüketimi de artmıştır. Özellikle %50 motor yükünde karışım yakıtları için yakıt tüketimi dizel yakıtından fazladır. Bir diğer önemli sonuç, hem benzin hem de pirolitik yağ kullanımı durumunda en iyi yakıt tüketimi verisi %20 karışım oranında alınmaktadır.



Şekil 3.10. Değişen motor yük durumlarında tüm karışım yakıtlarının özgül yakıt tüketimleri

Şekil 3.11'de 2000 d/d sabit motor devrinde tüm yakıt karışımları için değişen motor yüklerinde fren termal veriminin değişimi gösterilmektedir. Motorlarda efektif verim krank milinden elde edilen efektif işin veya gücün bu gücü elde etmek için harcanan yakıt ısısına oranı şeklinde tanımlanmakta olup hacimsel ve mekanik verimlerin tamamını kapsamaktadır. Bunun sonucunda grafikten de görüldüğü gibi artan motor yükü oranına bağlı olarak efektif verim kademeli olarak artmaktadır.

En yüksek efektif verim B30 yakıt karışımında %30 motor yükünde elde edilmiş olup artan motor yüklerine bağlı olarak azalma gerçekleşmiştir.



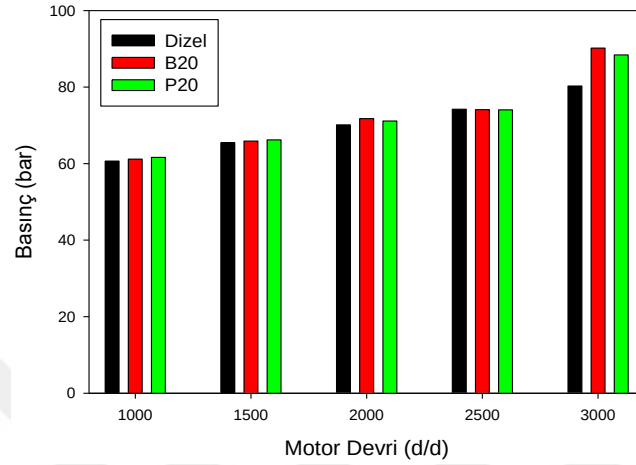
Şekil 3.11. Değişen motor yük durumlarında tüm karışım yakıtlarının fren termal verimleri

3.1.2. Farklı Motor Devirlerine Göre Elde Edilen Bulgular

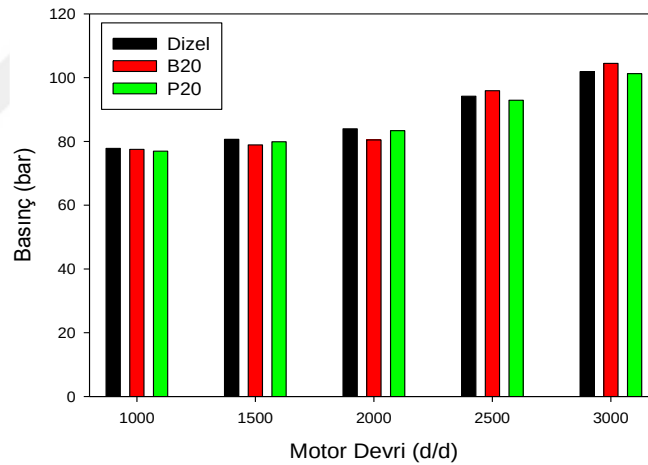
Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında motor devrine (1000 d/d, 1500 d/d, 2000 d/d, 2500 d/d ve 3000d/d) bağlı olarak deneyler tekrarlanmıştır. Birinci bölümde motor yükü ve karışım oranlarına bağlı olarak yakıtların etkisi net olarak gösterilirken, bu bölümde sabit karışım oranı ve farklı iki motor yükü için motor devrinin etkisi gösterilmiştir.

Şekil 3.12 (a,b) %20 karışım oranları için motor devir sayısına bağlı olarak silindir içi maksimum basıncın değişimini göstermektedir. Motor yükünün sıfır olduğu durumda (Şekil 3.12 (a)) genel olarak karışım yakıtları dizele benzer maksimum basınç dağılımı göstermektedir. 3000d/d gibi yüksek devirlerde ise karışım yakıtları daha yüksek maksimum basınç göstermiştir. Gerek ön karışım etkisi gerekse yanma hızı göz önünde bulundurulduğunda yüksek devirlerde karışım yakıtların daha yüksek basınç sağladığı görülmektedir. %25 motor yükü altında ise (Şekil 3.12 (b)) 2000 d/d motor devrine kadar dizel yakıtının daha yüksek basınç sağladığı, yüksek motor devirlerinde ise benzin karışımı durumun en yüksek basınç değerini gösterdiği görülmektedir.

Pirolitik yağın daha düşük ısıl değerde olduğu ve vizkozitesinin yüksek olduğu düşünülürse yanmanın kısmen olumsuz etkilenebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çalışılan motor yüklerinde alternatif bir yakıt olduğu gözlenmektedir.



a) %0 motor yükü

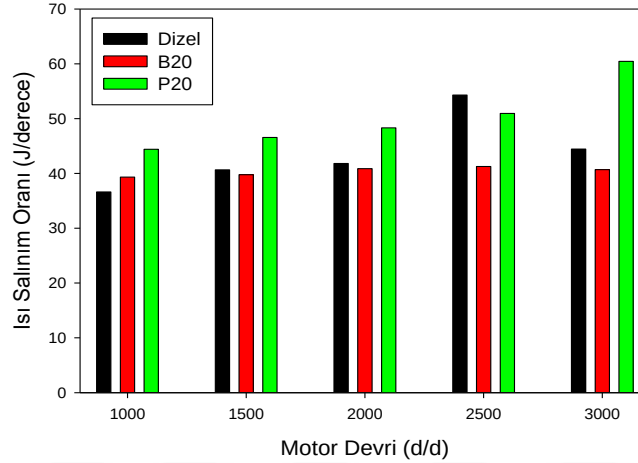


b) %25 motor yükü

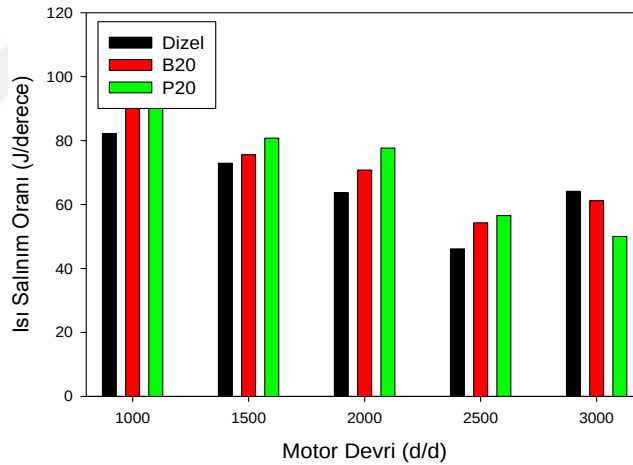
Şekil 3.12. Silindir içi basıncın motor devrine bağı değışimi

Şekil 3.13 (a,b) %20 karışım oranları için motor devrine göre ısı salınım oranlarının değışimini göstermektedir. Her iki motor yükü için farklı motor devirlerinde ısı salınımların gerek benzin gerekse pirolitik yağ karışimleri için dizelden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum yüksüz durumda düşük devirlerde belirgin iken, motor yükü altında 3000 d/d' ya kadar görülmektedir. Bu durum düşük motor yüklerinde ön karışım etkisinin sağlandığını göstermektedir. Özellikle %25 motor yükünde (Şekil 3.13 (b)) benzin ve pirolitik yağ karışımı durumunda daha yüksek motor devirlerine kadar faydalı etkinin sürdüğü

görülmektedir. Bu grafik karışım oranı ve motor devirlerinin ısı salınımına etkisini net olarak göstermektedir. Karışım yakıtların viskozite değerine ve ısıl değerine bağlı olarak ön karışım durumunda ısı salınımını etkilediği görülmektedir.



a) %0 motor yükü

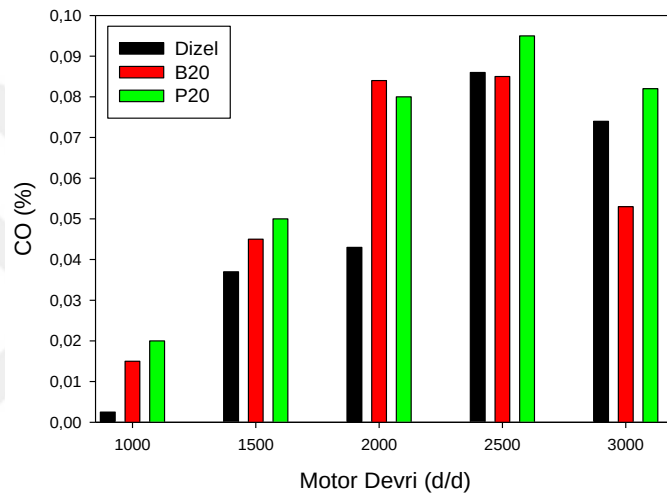


b) %25 motor yükü

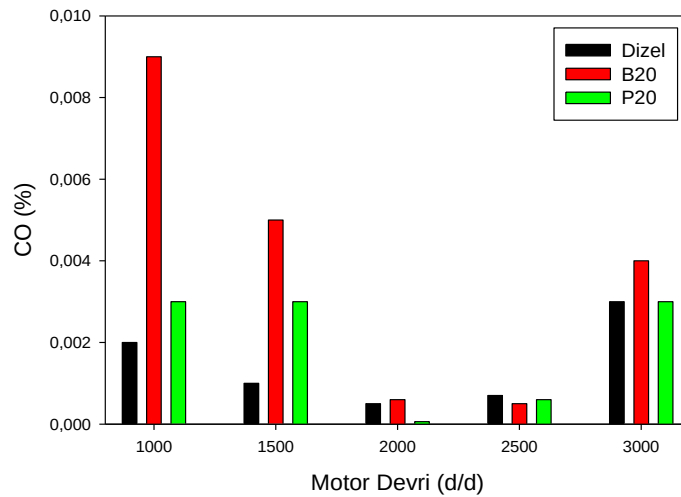
Şekil 3.13. Isı salınım oranının motor devrine bağlı değişimi

Şekil 3.14 (a,b)'de %0 sabit yük durumunda saf dizel(%100 dizel), B20(%80 dizel %20 benzin) ve P20(%80 dizel %20 pirolitik yağ) karışım yakıtları için 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d motor devirlerindeki CO emisyonunun değişimi gösterilmiştir. CO emisyonları eksik yanma ürünleri arasında yer alır. Bütün deney yakıtlarından saf dizel ve B20 karışım yakıtları için elde edilen CO emisyonu değerleri P20 karışım yakıtına göre genel olarak daha düşük çıkmıştır. Bununla beraber özellikle motorun düşük devirlerinde en düşük CO emisyonu değerleri saf dizel yakıtında elde edilmiştir.

1500 d/d motor hızından sonra deney yakıtlarından elde edilen CO emisyonu değerleri arasındaki fark artmıştır. Bunun yanı sıra, artan motor hızı ile bütün test yakıtları için CO emisyonu değerleri bir miktar artış göstermiştir. Bunun nedenleri, yanmanın kötüleşmiş olabileceği gibi, artan motor hızı ile yanma işlemi için gerekli olan sürenin azalması ve dolayısıyla yanmanın tamamlanamaması olduğu kanısına varılmıştır. Ayrıca karışımli yakıtlarda yanma sıcaklıklarının düşük olması CO emisyonunu artırmıştır. Yük altında bu durum daha net gözlenmektedir.



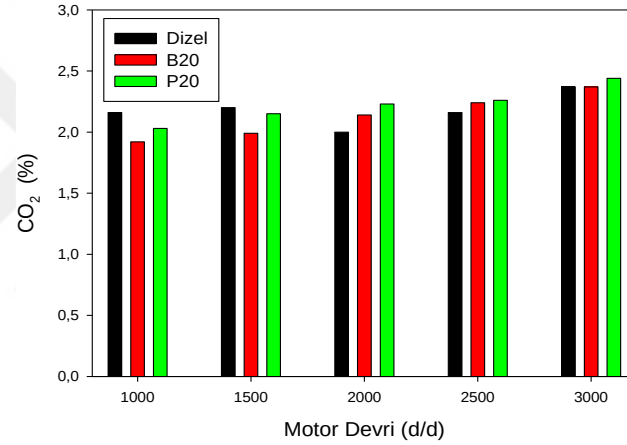
a) %0 motor yükü



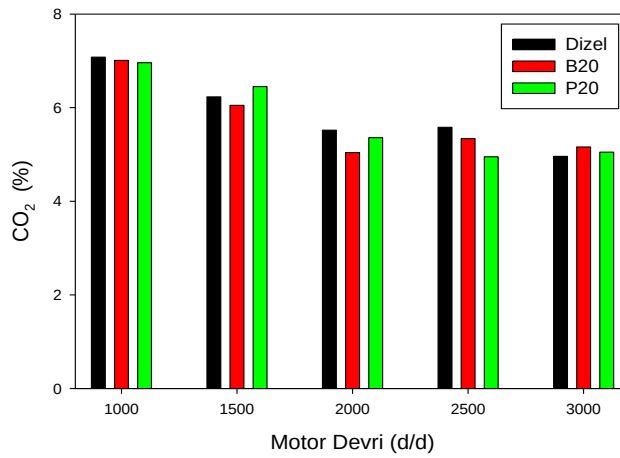
b) %25 motor yükü

Şekil 3.14. CO emisyonunun motor devrine bağlı değişimi

Şekil 3.15’de %0 ve %25 sabit yük durumunda saf diesel(%100 diesel), B20(%80 diesel %20 benzin) ve P20(%80 diesel %20 pirolitik yağ) karışım yakıtları için 1000, 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d motor devirlerindeki CO₂ emisyonunun değişimi gösterilmiştir. CO₂ emisyonu aslında çevrimdeki hava-yakıt karışımının yeterli miktarda oksijen bulunması durumunda ve yanmayı tamamlamak için yeterli süre bulunduğu tam yanma gerçekleştiğini gösterir. Grafiğe bakıldığında CO₂ emisyonlarının her üç yakıt içinde değişen motor devirlerine göre büyük farklılıklar oluşmadığı görülmektedir(Şekil 3.15 (a)). Bunun nedeni olarak bütün çalışma devirlerinde oksijen oranının ve yanma zamanının pek fazla değişmediği varsayılabilir. Sabit %25 yük altında ise (Şekil 3.15 (b)) artan devir sayısına bağlı olarak yanma süresinin kısalması neticesinde özellikle karışım yakıtlar CO₂ oluşumu azalmıştır. Bu durum yanmanın kısmen kötüleştiğini göstermektedir.



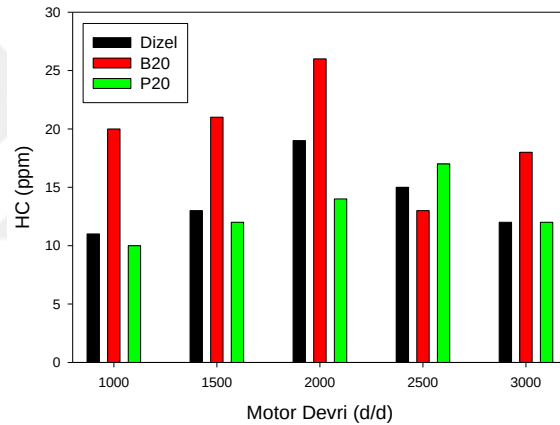
a) %0 motor yükü



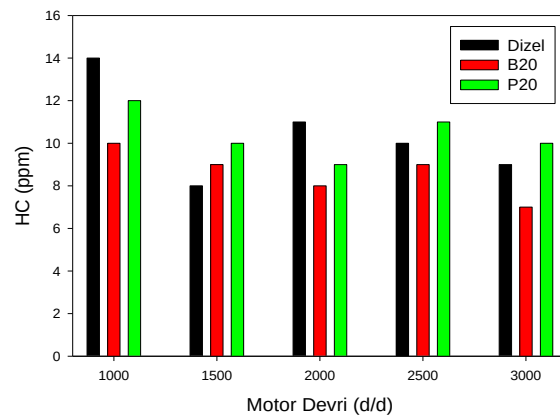
b) %25 motor yükü

Şekil 3.15. CO₂ emisyonunun motor devrine bağlı değişimi

Şekil 3.16 (a,b)' da farklı sabit yüklerde devir sayısına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi görülmektedir. HC emisyonları eksik yanma reaksiyonları sonucu ortaya çıkmaktadır. HC emisyonlarının oluşumu, yanma odasında oksijen eksikliği, yakıtın tutuşma gecikmesinin çok uzun olması, setan sayısının normalden daha düşük olması ve yakıtın buharlaşma sıcaklıklarının yüksek olması gibi nedenlere bağlanabilir. Deneylerde en yüksek HC emisyonu B20 karışım yakıtının kullanımında elde edilmiş olup bunu saf dizel ve P20 yakıtları izlemiştir. En düşük HC emisyonları ise P20 karışım yakıtının kullanımında elde edilmiştir. HC emisyonlarının yüksek olmasının önemli nedenleri arasında B20 yakıtının son distilasyon sıcaklıklarının çok yüksek olması ve setan sayısının düşük olması nedeniyle tutuşma gecikmesi sürelerinin uzun olduğu kanısı hakim olmuştur. Motor yük altındayken düşük devirlerde HC emisyonunun arttığı, yüksek devirlerde ise düştüğü grafikten çıkarılan bir diğer sonuçtur.



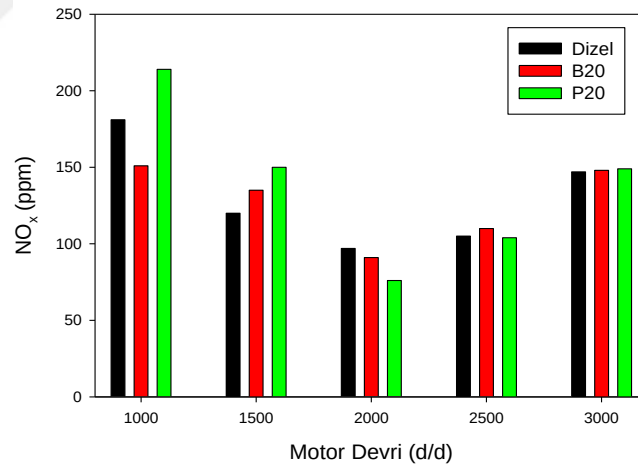
a) %0 motor yükü



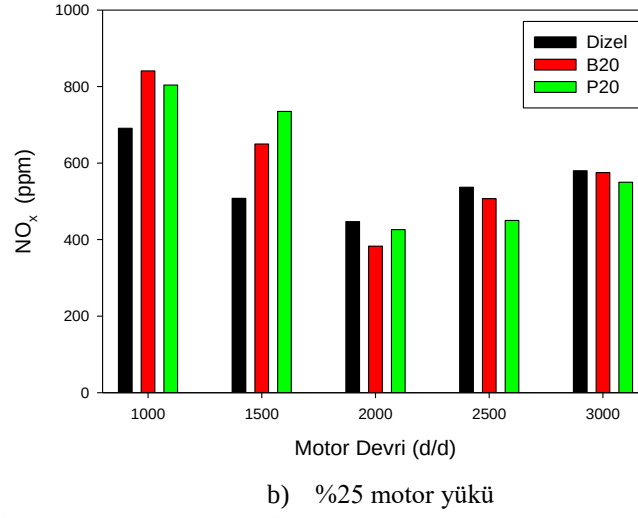
b) %25 motor yükü

Şekil 3.16. HC emisyonunun motor devrine bağlı değişimi

Şekil 3.17 (a,b)'de farklı devir sayılarına bağlı olarak sabit motor yükleri altında NO_x emisyonunun değişimi gösterilmiştir. Tüm test yakıtları için NO_x emisyonları, artan devir sayısı ile dikkate değer miktarlarda azalmıştır. Maksimum moment devri olan 2000 d/d motor hızında tüm deney yakıtları en düşük NO_x emisyonları vermiş olup bu devirden sonra NO_x oranı yükselmiştir. Düşük ve orta devirdeki motor hızlarında dizel yakıtı ve P20 karışım yakıt için NO_x emisyonları diğer B20 yakıtına nazaran daha yüksek çıkmıştır. Maksimum tork devri olan 2000 d/d da en düşük NO_x emisyonu değerleri P20 karışım yakıtında elde edilmiştir. Her iki motor yükü için düşük devir sayılarında NO_x emisyonlarının yüksek olması ön karışımın oluşumunun başarısız olduğunu göstermektedir. Bu durum motor hızına bağlı olarak motor içi hava akımının yavaş olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucu olarak da yanma odasında yerel olarak yüksek sıcaklıklar. Fakat yükselen devir sayılarında ön karışım etkisi görülmüş ve karışım yakıtlarının oluşturduğu NO_x miktarı dizelden daha düşük hale gelmiştir.

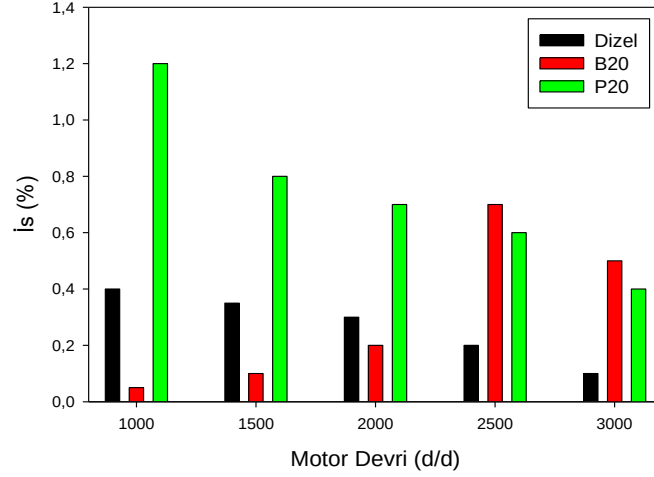


a) %0 motor yükü

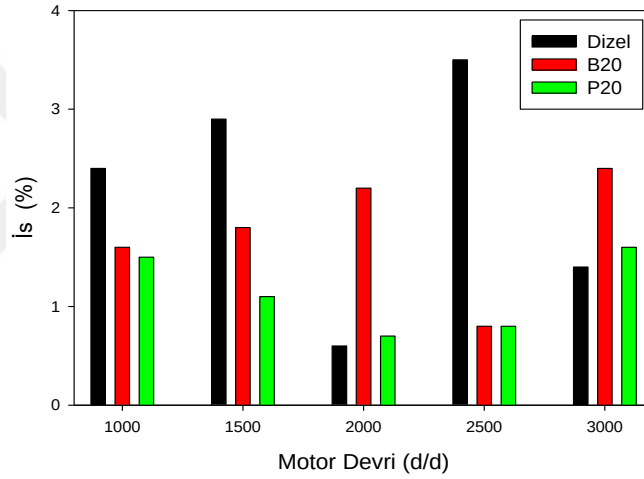


Şekil 3.17. NOx emisyonunun motor devrine bağlı değişimi

Şekil 3.18 (a,b)' de %0 ve %25 sabit yük durumunda %20 karışım oranı için değişen devir is emisyonunu değişimi gösterilmiştir. İs emisyonu, eksik yanmayla ortaya çıkan yanmamış karbon atomlarının toplanmasıyla oluşan zerreciklerdir. İs oluşumu yanma odasındaki sıcaklığa, oksijen miktarına ve zamana bağlıdır. Eğer is zerrecikleri yanma odasında yeterli sıcaklık, oksijen ve zaman bulamazlarsa is emisyonu artmaktadır. Yukarıdaki şekil incelendiğinde, P20 karışım yakıtın başlangıçta yüksek devir artıktıkça azaldığı görülmektedir. P20 yakıtının is emisyonunun yüksek olmasının nedeni pirolitik yağının kükürt içeriğinin yüksek olması ve bu yakıtların kullanımında yanmanın düzensiz bir hal almasıdır. Fakat %25 yük ve artan devir sayılarında karışım yakıtlar için is oluşumunun dizel yakıtından daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum ön karışımli yanmanın bir sonucudur. 3000 d/d' dan sonra is emisyonlarının tekrar artması ise yanma için gerekli zamanın bulunmadığını göstermektedir.



a) %0 motor yükü

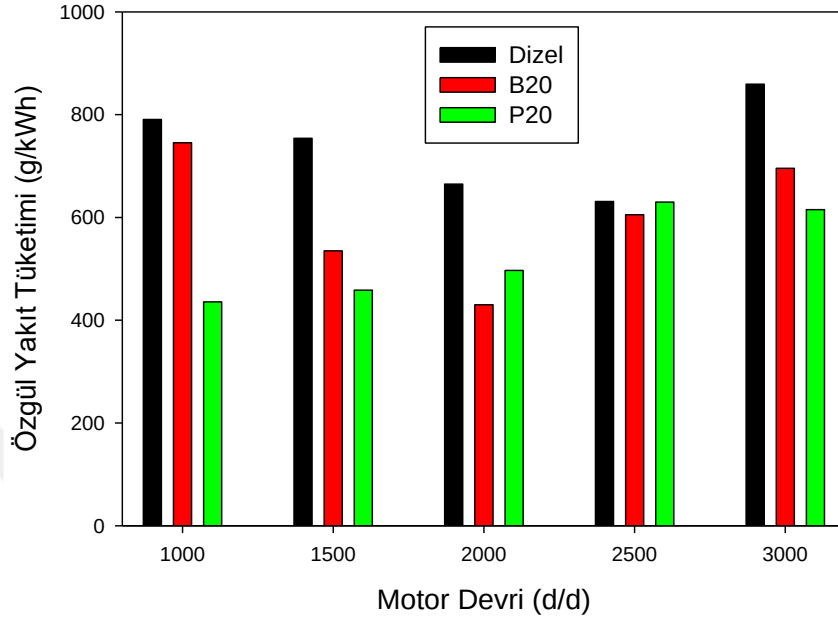


b) %25 motor yükü

Şekil 3.18. İS emisyonunun motor devrine bağlı değişimi

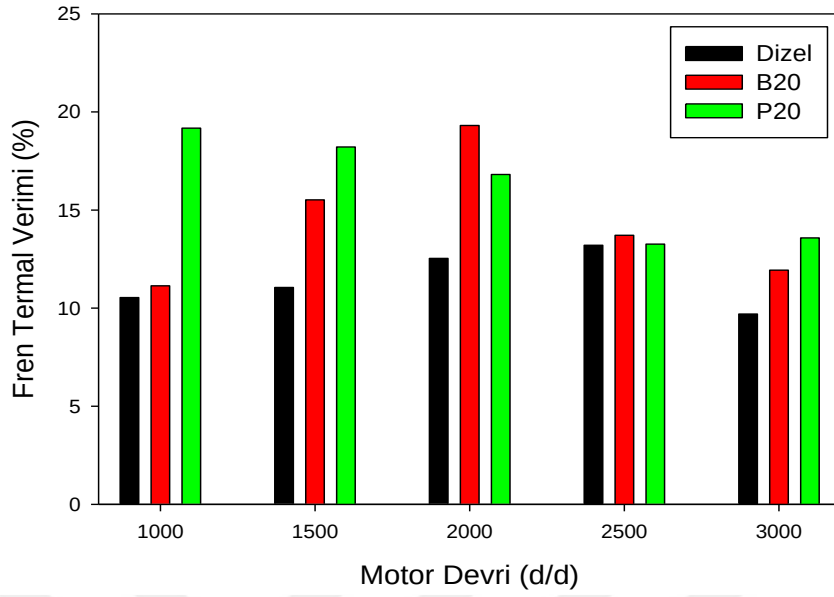
Şekil 3.19’da %25 sabit yük durumunda saf dizel(%100 dizel), B20(%80 dizel %20 benzin) ve P20(%80 dizel %20 pirolitik yağ) karışım yakıtları için değişen motor devirlerindeki özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmiştir. Saf dizel ve B20 yakıtları için, motorun özgül yakıt tüketimi, artan motor devri ile maksimum momentin elde edildiği devir olan 2000 d/d’ye kadar azalma göstermiştir. En düşük özgül yakıt tüketimi değerleri, bu yakıtlar için 2000 d/d elde edilmiştir. Bu devirden sonra özgül yakıt tüketimi değerleri tüm test yakıtları için artmıştır. Bunun nedenleri, artan mekanik kayıplar nedeniyle, motor gücü artış oranının ve momentinin düşmesi olduğu kanısına varılmıştır. Yakıtın ısıl değeri de özgül yakıt tüketiminde önemli bir rol oynamaktadır.

Ayrıca motorun yüksek devirlerinde, yanma için gerekli olan sürenin azalmasından dolayı, yanmanın tamamlanamaması da başka bir neden olarak gösterilebilir.



Şekil 3.19. %25 sabit motor yükünde değişen motor devirlerinde özgül yakıt tüketiminin değişimi

Şekil 3.20’de %25 sabit yük durumunda saf dizel(%100 dizel), B20(%80 dizel %20 benzin) ve P20(%80 dizel %20 pirolitik yağ) karışım yakıtları için değişen motor devirlerindeki fren termal veriminin değişimi gösterilmiştir. Saf dizel ve B20 yakıtları için, fren termal verimi artan motor devri ile maksimum momentin elde edildiği devir olan 2000 d/d’ye kadar artış göstermiştir. En yüksek fren termal verimi bu yakıtlar için 2000 d/d elde edilmiştir. P20 karışım yakıtı ise başlangıçta yüksek olup artan motor devirleri boyunca azalma eğilimi göstermiştir. Genel olarak tüm motor devirleri için fren termal veriminin karışım yakıtlar için daha yüksek olduğu görülmektedir.

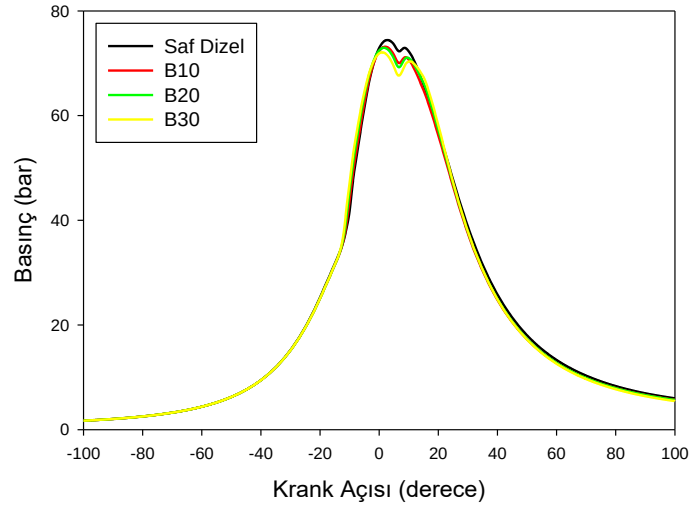


Şekil 3.20. %25 sabit motor yükünde değişen motor devirlerinde fren termal veriminin değişimi

3.2. Sayısal Bulgular

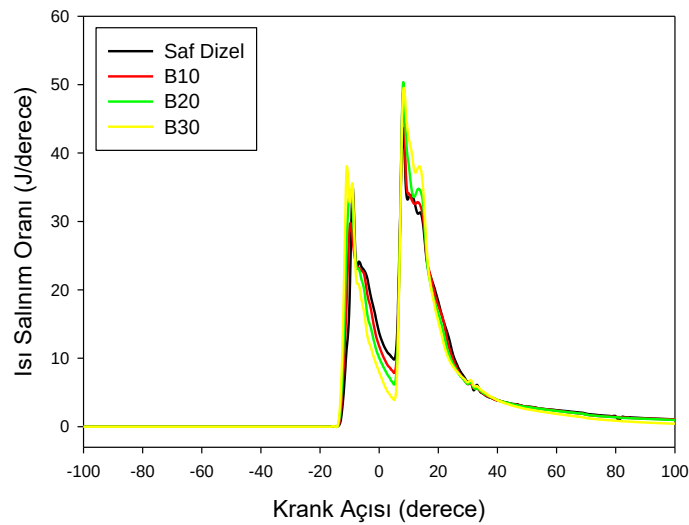
Tez çalışmasının bu kısmında AVL FIRE yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal çalışma bir geçerlilik ve detaylı analiz için yapılmıştır. Sayısal çalışmada deneysel çalışmaya paralel olarak, deneysel çalışmada kullanılan motor oluşturulmuştur. Oluşturulan motorda saf dizel, B10, B20 ve B30 yakıtları için analizler yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Sayısal çalışmada pirolitik yağa yönelik çalışmalar yakıtın özel bir yakıt olması ve kesin sonuçların elde edilememesi sebebiyle yapılmamıştır.

Şekil 3.21’de farklı yakıt karışımları için silindir içi basınç değişimi görülmektedir. Elde edilen grafikte deneysel çalışmaya paralel olarak dizel yakıtında en yüksek silindir içi basınç değerleri elde edilmiştir. Benzin karışımlı yakıtlar için ise karışım oranı arttıkça silindir içi basınçta kısmen düşme olduğu görülmüştür. Yanmanın başlama açısı ve maksimum basıncın meydana geldiği açı değiştiği için bu düşmenin meydana geldiği görülmektedir.



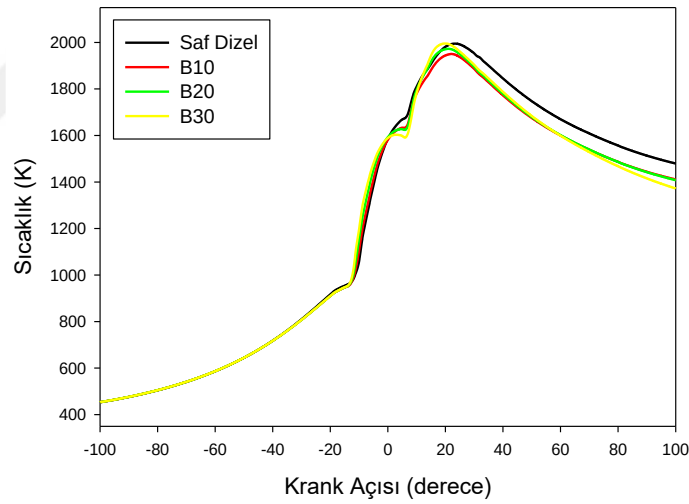
Şekil 3.21. Krank açısına göre silindir içi basınç değişimleri

Şekil 3.22’de farklı yakıt karışımları için krank mili acısan bağlı olarak ısı salınım oranları görülmektedir. Elde edilen grafikte yine deneysel verilere paralel olarak karışım oranı arttıkça ısı salınım oranının arttığı görülmektedir. Bu durum yakıtların ısıl değerlerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Benzinin yüksek ısıl değerleri silindir içerisinde yüksek bir ısı salınım meydana getirmiştir. Bu grafik krank açısına göre çoklu püskürtme durumunda ısı salınımlarını net olarak göstermektedir. Görüldüğü gibi hem birinci hem de ikinci püskürtme esnasında en yüksek ısı salınımları B30 yakıt karışımı için elde edilmiştir.



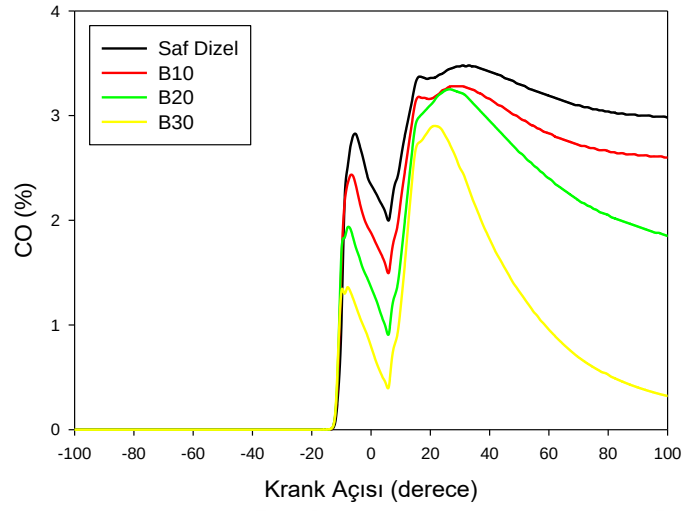
Şekil 3.22. Krank açısına göre ısı salınım oranı değişimleri

Şekil 3.23’de silindir içi sıcaklık değişimleri sayısal çalışma sonucunda farklı karışım oranları için krank açısına bağlı olarak elde edilmiştir. Silindir içi sıcaklık değerleri aynı zamanda yanma hakkında bilgi vermesi bakımından önemlidir. Çok püskürtmeli motor şartlarına göre elde edilen grafikte birinci püskürtmeden sonra sıcaklığın en yüksek B30 karışım durumunda meydana geldiği görülmektedir. Bu süreçte, B10 karışımlı yakıt durumu ise dizel yakıta en yakın sonucu vermiştir. Birinci püskürtmenin sonlarına doğru yanma ile birlikte sıcaklıklar karışım yakıtları için düşmeye başlamış ikinci püskürtmeyle birlikte tekrar yükselmiştir. Isı salınımının da etkisiyle özellikle B20 ve B30 yakıtları için bu süreçte de dizel yakıtının sıcaklık değerlerini geçmiştir. Fakat devam eden süreçte hızla düşerek ilerleyen krank açılarında dizelden daha düşük bir yanma sıcaklığı elde edilmiştir. Elde edilen bu grafik püskürtme açıları optimize edilerek çok daha düşük yanma sıcaklıklarının karışım yakıtları için elde edilebileceğini göstermektedir.



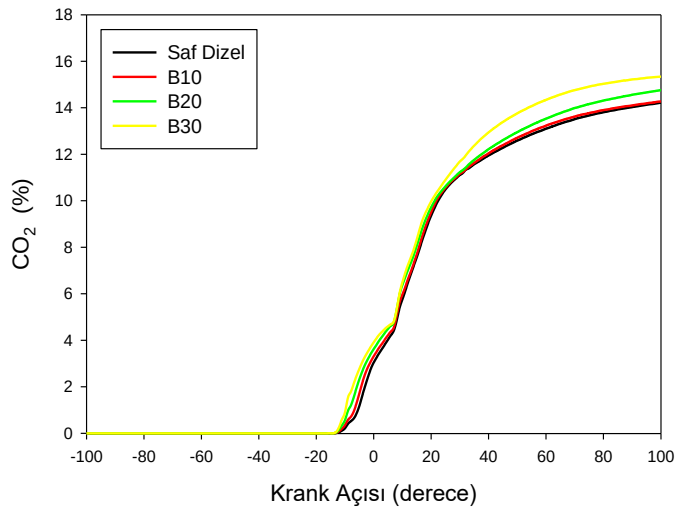
Şekil 3.23. Krank açısına göre silindir içi sıcaklık değişimleri

Şekil 3.24’de farklı karışım oranları için krank açısına bağlı olarak silindir içi CO emisyonları görülmektedir. Benzin karışımlı yakıt durumları için buharlaşmanın hızlanması ve yakıt partiküllerinin daha hızlı oksijenle buluşması neticesinde yanma kalitesi yükselmiş ve CO emisyonunda düşme olduğu görülmüştür. Her iki püskürtme durumunda da en düşük CO değerleri B30 yakıtında elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla B20 ve B10 yakıtlarında düşük CO emisyonları gözlenmiştir.



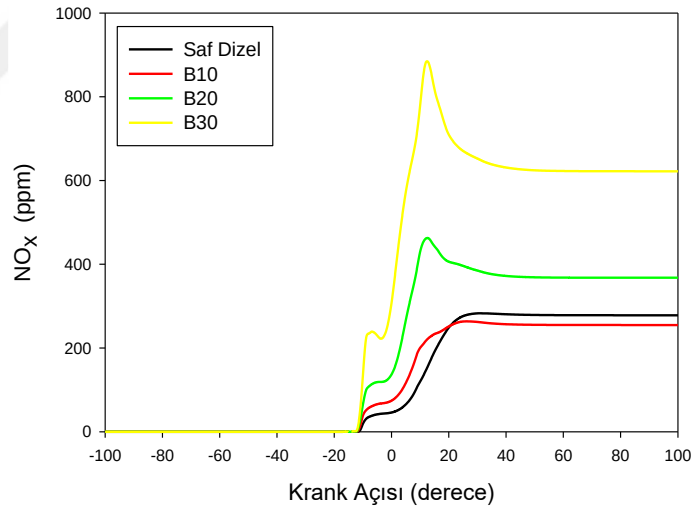
Şekil 3.24. Krank açısına göre silindir içi CO emisyonu değişimleri

Şekil 3.25’de farklı karışım oranları için krank açısına bağlı olarak CO₂ emisyonlarının silindir içi değişimi gözlenmektedir. CO emisyonlarının düşmesi bu emisyonların CO₂ emisyonuna dönüştüğünün temel bir göstergesidir. Buna bağlı olarak karışım oranı arttıkça CO₂ emisyonunun arttığı gözlenmiştir. CO₂ emisyonu tam yanma ürünü olması sebebiyle, benzin karışımlı yakıtların yanma kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir.



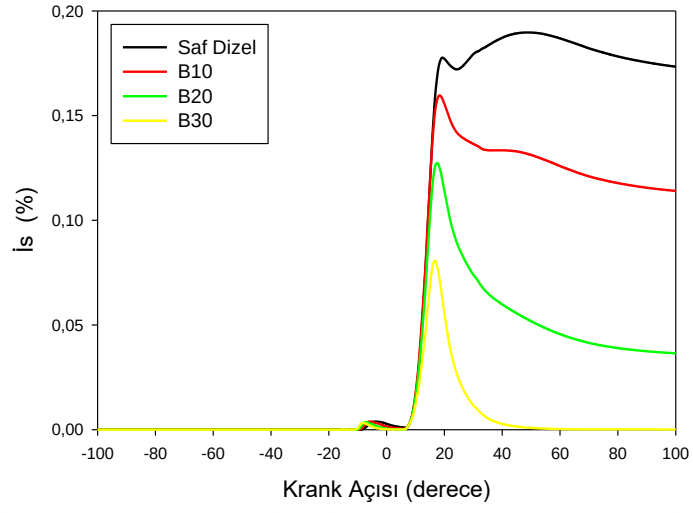
Şekil 3.25. Krank açısına göre silindir içi CO₂ emisyonu değişimleri

Şekil 3.26’da farklı karışım oranları için krank açısına bağlı olarak silindir içi NO_x emisyonları görülmektedir. NO_x emisyonları temel olarak yanma sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklanan reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu grafikte sunulan NO_x emisyonlarının silindir içi emisyonlar olduğu göz önünde bulundurulduğunda silindir içi sıcaklık değişimine bağlı yorumlanmıştır. Silindir içi sıcaklık değerlerinin püskürtme esnasında B30 da yüksek olması sebebiyle anlık NO_x yükselmesi olduğu bu grafikte görülmektedir. Onu takip eden B20 karışım durumu için de yine NO_x emisyonunun yüksek olduğu görülmüştür. B10 karışımında ise daha düşük NO_x emisyonunun görülmesi düşük sıcaklı yanmanın bir sonucudur. Silindir içi sıcaklık değişiminde olduğu gibi püskürtme zamanlaması optimize edilerek NO_x emisyonlarının da düşürülebileceği bu grafikte görülmektedir.



Şekil 3.26. Krank açısına göre silindir içi NO_x emisyonu değişimleri

Şekil 3.27’de farklı karışım oranları için krank açısına bağlı olarak silindir içi is emisyonlarının değişimi görülmektedir. İS emisyonları eksik yanma ürünü olup alev cephesinde meydana gelen sönmelerle artmaktadır. Benzin karışımlı yakıt durumlarında yanma kalitesinin artmasına bağlı olarak is emisyonlarında düşme meydana geldiği görülmektedir. Dizel yakıtı kullanımda en yüksek is emisyonu elde edilirken, karışım oranı arttıkça is emisyonları düşme göstermiştir.



Şekil 3.27. Krank açısına göre silindir içi $\dot{Q}_s$ emisyonu değişimleri

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ve grafikler yardımıyla genel olarak bulunan sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Bu çalışmadaki test sonuçları, tüm çalışma şartları dikkate alınarak beraberce değerlendirildiğinde, motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin standart dizel yakıtı oransal olarak %30'a kadar benzin ve pirolitik yağ ilavesinin motor performansını önemli ölçüde düşürmeden bazı egzoz gaz emisyonlarını iyileştirerek kullanılabileceğini göstermektedir.

Silindir içi basıncın düşük motor yüklerinde karışımli yakıtlar için bir miktar düştüğü, yüksek motor yüklerinde ise dizele yakın olduğu gözlenmiştir. Silindir içi basınçta motor devrine göre çok ciddi bir değişiklik olmazken yüksek motor devirlerinde karışım yakıtların daha yüksek silindir için basınç sağladığı gözlenmiştir.

Isı salınım oranları değişen motor yüklerinde karışım yakıtlar için genel olarak yükselmiştir. Ayrıca karışım oranı arttıkça ısı salınım oranının da arttığı gözlenmiştir. Farklı motor devirlerinde ısı salınımların gerek benzin gerekse pirolitik yağ karışımları için dizelden yüksek olduğu görülmektedir.

CO %10'a kadar olan motor yüklerinde artış göstermiştir. Bu yük aralığında karışım yakıtları dizele göre daha fazla CO oluşturmuştur. Artan motor yüklerinde ise CO emisyonu ciddi oranda düşmüştür. Bütün deney yakıtlarından motor devrine göre saf dizel ve B20 karışım yakıtları için elde edilen CO emisyonu değerleri P20 karışım yakıtına göre genel olarak daha düşük çıkmıştır.

CO₂ emisyonu motor yüküne bağılı olarak tüm yakıtlar için artış göstermiştir. Özellikle %20'den sonraki motor yüklerinde karışım yakıtları için CO₂ oluşumu daha yüksektir. CO₂ emisyonunun devir sayısına bağılı olarak ciddi oranda değişmediği, fakat yük altında ilen yüksek devirlerde düştüğü gözlenmiştir.

Motor yüküne göre HC emisyonlarında karışım yakıtları için ciddi oranda düşme gözlenmiştir. En düşük HC oluşumu ise genel olarak pirolitik yağ karışımında gözlenmiştir.

NO_x emisyonları motor yükü arttıkça artmaktadır. Düşük motor yüklerinde karışım yakıtları ve özellikle pirolitik yağ karışımli durumlar daha az NO_x oluşumu sağlamıştır. Artan motor yüklerinde ise dizelden daha fazla NO_x oluşturmuşlardır. Maksimum moment

devri olan 2000 d/d motor hızında tüm deney yakıtları en düşük NO_x emisyonları vermiş olup bu devirden sonra NO_x oranı yükselmiştir.

İs emisyonları karışım oranına bağlı önemli değişiklikler göstermiştir. %10 karışım oranında dizelden daha fazla is emisyonu oluşurken %20 ve %30 karışım oranlarında is emisyonları düşmüştür. %25 yük ve artan devir sayılarında karışım yakıtlar için is oluşumunun dizel yakıtından daha düşük olduğu görülmüştür.

Her üç yakıt içinde artan yük oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi kademeli olarak azalmaktadır. %30 motor yüküne kadar özgül yakıt tüketimindeki azalma net olarak görülürken artan motor yüklerinde yakıt tüketimi de artmıştır. Özellikle %50 motor yükünde karışım yakıtları için yakıt tüketimi dizel yakıtından fazladır. Bir diğer önemli sonuç, hem benzin hem de pirolitik yağ kullanımı durumunda en iyi yakıt tüketimi verisi %20 karışım oranında alınmaktadır. Özgül yakıt tüketimi çalışılan motor devirlerinde karışım yakıtları için daha düşük olarak elde edilmiştir.

Fren termal verimi motor yüküne bağlı artış göstermektedir. Ayrıca bu verim değişimi için tüm yük oranlarında %20 karışım durumlarının oldukça iyi olduğu gözlenmektedir. Fren termal verimi çalışılan tüm motor devirlerinde karışım yakıtları için daha yüksek olarak elde edilmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan dizel motorlarında atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın yanma ve emisyon karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi sonucunda elde edilen bilgiler ışığında bazı öneriler yapılabilmektedir.

Atık taşıt lastiklerinden üretilen pirolitik yağın içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması için çalışmalar artırılabilir.

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen yağın özelliklerinin dizel veya benzin yakıt özelliklerine daha da yaklaştırılması amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılabilir.

Bu katkı maddelerinin kullanımında yakıtın performans ve emisyon parametreleri açısından motordaki davranışları araştırılabilir.

Ayrıca püskürtme açılarında optimizasyona gidilerek çok daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

Konu üzerinde sayısal çalışmalar geliştirilerek test süreleri ve maliyetleri düşürülerek daha verimli sonuçlar alınabilir.

Sonuç olarak, ülkemizin içinde bulunduğu ekonomik şartlar da göz önüne alınarak özellikle enerji sorunu açısından bakıldığında, enerji potansiyeline sahip kullanılmış ve atık durumdaki taşıt lastiklerinin, kurulacak geri dönüşüm tesisleri ve uygun piroliz yöntemleri uygulanarak elde edilecek pirolitik yağın dizel yakıtına ek alternatif bir katkı maddesi olarak değerlendirilmesi son derece faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Hita I., Arabiourrutia M., Olazar M., Bilbao J., Arandes J.M., Castaño P.,** Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016) 745–759.
- [2] **Wang W.C., Bai C.J., Lin C.T., Prakash S.,** Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine, *Applied Thermal Engineering* 93 (2016) 330–338.
- [3] **Kumaravel S.T., Murugesan A., Kumaravel A.,** Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016) 1678–1685.
- [4] **Öztop H. F., Varol Y., Altun Ş., Firat M.,** Using Gasoline-like Fuel Obtained from Waste Automobile Tires in a Sparkignited Engine, *Energy Sources, Part A*, (2014) 36:1468-1475.
- [5] **Han D., Duan Y., Wang C., Lin H., Huang Z.,** Experimental study on the two stage injection of diesel and gasoline blends on a common rail injection system, *Fuel* 159 (2015) 470–475.
- [6] **Du J., Sun W., Guo L., Xiao S., Tan M., Li G., Fan L.,** Experimental study on fuel economies and emissions of direct-injection premixed combustion engine fueled with gasoline/diesel blends, *Energy Conversion and Management* 100 (2015) 300–309.
- [7] **Huang H., Liu Q., Wang Q., Zhou C., Mo C., Wang X.,** Experimental investigation of particle emissions under different EGR ratios on a diesel engine fueled by blends of diesel/gasoline/n-butanol, *Energy Conversion and Management* 121 (2016) 212–223.

- [8] **Jeon J., Lee J.T., Kwon S.I., Park S.,** Combustion performance, flame, and soot characteristics of gasoline–diesel pre-blended fuel in an optical compression-ignition engine, *Energy Conversion and Management* 116 (2016) 174–183.
- [9] **Liu H., Wang Z., Wang J., He X.,** Improvement of emission characteristics and thermal efficiency in diesel engines by fueling gasoline/diesel/PODEn blends, *Energy* 97 (2016) 105-112.
- [10] **Huang H., Zhou C., Liu Q., Wang Q., Wang X.,** An experimental study on the combustion and emission characteristics of a diesel engine under low temperature combustion of diesel/gasoline/n-butanol blends, *Applied Energy* 170 (2016) 219–231.
- [11] **Tudu K., Murugan S., Patel S.K.,** Effect of tyre derived oil-diesel blend on the combustion and emissions characteristics in a compression ignition engine with internal jet piston geometry, *Fuel* 184 (2016) 89–99.
- [12] **Pilusa T.J.,** The use of modified tyre derived fuel for compression ignition engines, *Waste Management* (2016).
- [13] **Tudu K., Murugan S., Patel S.K.,** Effect of diethyl ether in a DI diesel engine run on a tyre derived fuel-diesel blend, *Journal of the Energy Institute* 89 (2016) 525-535.
- [14] **Murugan S., Ramaswamy M.C., Nagarajan G.,** The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines, *Waste Management* 28 (2008) 2743–2749.
- [15] **Murugan S., Ramaswamy M.C., Nagarajan G.,** Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends, *Fuel Processing Technology* 89 (2008) 152-159.
- [16] **Ayanoğlu A., Yumrutaş R.,** Rotary kiln and batch pyrolysis of waste tire to produce gasoline and diesel like fuels, *Energy Conversion and Management* 111 (2016) 261–270.
- [17] **Aydın H.,** Atık taşıt lastiklerinden yakıt üretimi ve dizel motorlarında kullanımının araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2011).

- [18] **Doğan O.**, Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2012).
- [19] **Uçar S.**, Evaluation of scarp tires and waste mineral oils as hydrocarbon source, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2004).
- [20] **Sharma A., Murugan S.**, Durability analysis of a single cylinder DI diesel engine operating with a non-petroleum fuel, *Fuel* 191 (2017) 393–402.
- [21] **Umeki E.R., Fernandes de Oliveira C., Torres R.B., Gonçalves dos Santos R.**, Physico-chemistry properties of fuel blends composed of diesel and tire pyrolysis oil, *Fuel* 185 (2016) 236–242.
- [22] **Rinaldini C.A., Mattarelli E., Savioli T., Cantore G., Garbero M., Bologna A.**, Performance, emission and combustion characteristics of a IDI engine running on waste plastic oil, *Fuel* 183 (2016) 292–303.
- [23] **Bašković U.Z., Vihar R., Seljak T., Katrašnik T.**, Feasibility analysis of 100% tire pyrolysis oil in a common rail Diesel engine, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.01.156.
- [24] **Mastral, A.M., Murillo, R., Callen, M.S. and Garcia, T.**, 1999. Application of coal conversion technology to tire processing, *Fuel Processing Technology*, **60** (3), 231-242.
- [25] **Bridgwater, A.V.**, 1991. Review of thermochemical biomass conversion, *Crown Company*, UK.
- [26] **Pişkin, E.**, 1987. Polimer teknolojisine giriş, *İnkılap Kitabev*, Ankara,
- [27] **Bridgwater, A.V.**, 1984. The thermochemical processing system, *Thermochemical processing of biomass*, A.V. Bridgwater (Eds.), pp:35-52, Butterworths, UK.
- [28] **Meier, D. and Rupp, M.**, 1991. Direct catalytic liquefaction technology of biomass: Status and review, Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilisation, A.V. Bridgwater and G. Grassi (Eds.), pp:155-176, *Elsevier Applied Science*, London.

- [29] **Şimşek, Y. E.**, 2006. C3 enerji bitkisi olan enginar (*cynara cardunculus L.*) saplarının pirolizi ve biyoyakıt üretiminin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [30] **Bridgwater, A.V. and Cottam, L.M.**, 1992, Opportunities for biomass pyrolysis liquids production and upgrading, *Energy & Fuels*, **6**, 113-120.
- [31] **Bridge, S.A. and Bridgwater, A.V.**, 1990, The principles of flash pyrolysis for liquid fuels production, Biomass for Energy and Industry, *5th E.C. Conference*, G. Grassi, G. Gosse and Dos Santos (eds.), *Elsevier Applied Sci.*, London.
- [32] **Bridgwater, A.V.**, 1994. Catalysis in thermal biomass conversion, *Applied Catalysis, A General*, **116**, 5-47.
- [33] **Bridgwater, A.V., Toft, A.J. and Brammer, J.G.**, 2002. A Techno-Economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **6**, 181-248.
- [34] **Lemieux, R., Roy, C., Caumia, B.D. and Blanchette, D.**, 1987. Preliminary engineering data for scale up of a biomass vacuum pyrolysis reactor: Production analysis and upgrading of oil from biomass, K.S. Vorres (ed.), *Ame. Chem. Soc. Div. Of Chem.*, Washington, **32**, 12-20.
- [35] **Barth, T.**, 1999. Similarities and differences in hydrolysis and source rocks, *Organic Geochemistry*, **30**, 1495-1507.
- [36] **Lucchesi, A. and Maschio, G.**, 1989. Thermochemical conversion of biomass: A study of pyrolysis of biomass, Pyrolysis as a basic technology for large agro-energy project, E. Mattuci, G. Grassi and W. Palz (eds.), *Published by Commision of the E.C.*, Luxembourg, 216-220.
- [37] **Bridgwater, A.V. and Bridge, S.A.**, 1991. A.V. Bridgwater (ed.), Pyrolysis liquids upgrading and utilization, *Elsevier Applied Science*, **12**, 145-165.
- [38] **Esnouf, C., François, O. And Churn, E.**, 1990. A review of pyrolysis product characteristics and upgrading technologies to liquid fuels, Biomass for energy

and industry, V. E.C Conference, *Elsevier Applied Science*, London and NewYork, **2**, 482-489.

[39] **MEB**, 2011, Dizel Motorları, Raylı Sistemler Teknolojisi, *MEGEP Yayınları*, Ankara, 57s.

[40] **Bosch**, Egzoz Emisyon Cihazları ürün kataloğu



ÖZGEÇMİŞ

Mesut UÇAR 01.06.1992 tarihinde Erzurum'un Çat ilçesinde dünyaya geldi. İlk ve orta öğretimimi Erzurum'un farklı okullarında tamamladı. Lise öğrenimimi Erzurum Atatürk Anadolu Meslek Lisesinde Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri alanında bölüm ve okul birinciliğiyle 2010 yılında tamamladı. Yine aynı yıl Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünü kazandı ve bir yıl hazırlık eğitimi aldıktan sonra 2015 yılında bölümümü başarıyla tamamladı. 2015 eylül ayında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim dalında taşıt tasarımı programında Yüksek Lisans eğitimine başladı.

İletişim:

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119
ELAĞIĞ
mesutucar1476@gmail.com