

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PIROLİZE ATIK LASTİK YAĞI-MOTORİN KARIŞIMININ
COMMON-RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL
MOTORDA KULLANIMI

EMRE İSMAİLOĞLU

KOCAELİ 2021

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PIROLİZE ATIK LASTİK YAĞI-MOTORİN KARIŞIMININ
COMMON-RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL
MOTORDA KULLANIMI**

EMRE İSMAİLOĞLU

**Doç.Dr. Ertan ALPTEKİN
Danışman, Kocaeli Üniv.**

.....

**Prof.Dr. Mustafa ÇANAKCI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

.....

**Doç.Dr. Hüseyin ŞANLI
Jüri Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniv.**

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.02.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde artan çevre bilinci ile birlikte atıkların geri dönüşümüne verilen önem her geçen gün daha da artmaktadır. Ülkemizde ve dünyada büyük bir atık potansiyeline sahip kullanılmış araç lastiklerinin geri dönüşümü sonucu elde edilen sıvıların, enerji üretiminde ya da doğrudan araçlarda kullanımı da önemli araştırma alanlarından biridir. Bu tez çalışmasında, atık araç lastiklerinden piroliz yöntemiyle üretilen distile edilmemiş lastik yağı, uluslararası standartlara uygun saf motorin ile %10 oranında karıştırılarak bir dizel motorda performans, yanma, enjeksiyon ve emisyon karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir.

Tez çalışmamdaki süreç boyunca her zaman yardımlarını yakından hissettiğim, bugünlere gelmemde yol gösterici olan ve çalışmalarına vermiş olduğu destekten dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Ertan ALPTEKİN'e, çalışmalarımda tecrübelerini benimle paylaşan Doç. Dr. Ali TÜRKCAN hocama teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen eşime ve tüm hayatım boyunca yanımda olan aileme minnet duygularımı sunarım.

Şubat – 2021

Emre İSMAİLOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Dünyadaki Enerji İhtiyacının Karşılanması	3
1.2. Türkiye'deki Enerji Tüketimi.....	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
3. ALTERNATİF YAKIT OLARAK ATIK LASTİK YAĞI.....	12
3.1. Atık Lastikler	12
3.1.1. Lastik atıklarının piroliz ile geri dönüşümü	14
3.2. Piroliz Lastik Yağının Dizel Yakıt ve Yakıt Katkısı Olarak Kullanılması	15
4. MATERYAL VE METOT.....	17
4.1. Testlerin Yapılması	17
4.1.1. Test motoruna ait bilgiler	18
4.1.2. Test motorunda kullanılan yakıtlar	19
4.1.3. Motora ait test düzeneği.....	19
4.2. Test Sonucunda Elde Edilen Verilerle Hesaplanan Değerler	25
4.2.1. Özgül yakıt tüketimi	25
4.2.2. Motor momenti.....	26
4.2.3. Efektif güç	27
4.2.4. Isı dağılımı	27
4.2.5. Enjeksiyon karakteristikleri	28
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	29
5.1. Özgül Yakıt Tüketimi	29
5.2. Enjeksiyon ve Yanma Karakteristikleri.....	30
5.2.1. Enjeksiyon sonuçları.....	30
5.2.2. Silindir içi basınç ve ısı dağılımı	36
5.2.3. Tutuşma gecikmesi	38
5.2.4. Yakıt hattı basınç verileri	39
5.3. Emisyon Sonuçları.....	40
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR.....	45
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	2016 yılı dünya enerji tüketim miktarları	4
Şekil 1.2.	2019 yılı dünya enerji tüketim miktarları	4
Şekil 1.3.	Türkiye'deki ham petrol üretim grafiği, 1965-2016 yılları (milyon ton).....	6
Şekil 3.1.	Atık lastiklere ait geri dönüşüm şeması	14
Şekil 4.1.	Test motoru görseli.....	18
Şekil 4.2.	L10 test yakıtı görseli	19
Şekil 4.3.	Motor test düzeneği şematik görseli.....	20
Şekil 4.4.	Hidrolik dinamometre.....	21
Şekil 4.5.	Dinamometre kontrol ünitesi	21
Şekil 4.6.	Avl Flexifem (Silindir içi Basınç Ölçüm Cihazı)	22
Şekil 4.7.	Kistler marka yakıt hattı basınç sensörü.....	23
Şekil 4.8.	Enjeksiyon sinyali toplamak için kullanılan akım kelepçesi	23
Şekil 4.9.	Hava debisi ölçüm sistemi	24
Şekil 4.10.	Emisyon ölçümü sistemi	25
Şekil 4.11.	Motor momentinin ölçülmesi.....	26
Şekil 4.12.	Örnek silindir içi gaz basınç grafiği	28
Şekil 4.13.	Örnek hat basınç ve enjeksiyon grafiği	28
Şekil 5.1.	Özgül yakıt tüketimi motor devri grafiği.....	30
Şekil 5.2.	Pilot enjeksiyon başlangıcı değerleri.....	31
Şekil 5.3.	Pilot enjeksiyon bitiş değerleri.....	32
Şekil 5.4.	Pilot enjeksiyon süresi değerleri (mikrosaniye).....	32
Şekil 5.5.	Pilot enjeksiyon süresi değerleri (krank açısı)	33
Şekil 5.6.	Ana enjeksiyon başlangıç sonuçları	34
Şekil 5.7.	Ana enjeksiyon bitiş sonuçları	34
Şekil 5.8.	Ana enjeksiyon süresi sonuçları (mikrosaniye)	35
Şekil 5.9.	Ana enjeksiyon süresi sonuçları (krank açısı)	35
Şekil 5.10.	1500 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği	37
Şekil 5.11.	1800 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği	37
Şekil 5.12.	2100 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği	38
Şekil 5.13.	Tutuşma gecikmesi sonuçları.....	39
Şekil 5.14.	Maksimum yakıt hattı basıncı sonuçları.....	40
Şekil 5.15.	L10 yakıtının motorine kıyasla emisyon değişimi	41

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	2018 yılı itibariyle Türkiyedeki ham petrol üretimi.....	6
Tablo 1.2.	Araç cinsine göre motorlu taşıtların sayısı	6
Tablo 3.1.	Lastik atıklarının bileşim oranları	13
Tablo 3.2.	Piroliz prosesinde farklı ısılarda meydana gelen durumlar	15
Tablo 4.1.	PLY'ye ait temel özellikler	17
Tablo 4.2.	Yapılan testlerde kullanılan motora ait özellikler	18
Tablo 4.3.	Hidrolik dinamometreye ait özellikler	20
Tablo 4.4.	Emisyon cihazı ölçüm hassasiyeti.....	24



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: Yakıt sarfiyatı
Be	: Özgül yakıt tüketimi
C	: Karbon
CBp	: Piroliz karbon siyahı
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
NO _x	: Azotoksitler
Pe	: Motor gücü
PM	: Partikül madde
THC	: Toplam hidrokarbon
η	: Efektif verim
ρ	: Yoğunluk

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Standart Test Method (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
AID	: Alt Isıl Değer
API	: Amerikan Petrol Institute (Amerikan Petrol Enstitüsü)
CRDI	: Common Rail Diesel
DPLY	: Distile Edilmiş Pirolize Lastik Yağı
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
MIDO	: Maksimum Isı Dağılım Oranı
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
PLY	: Pirolize Lastik Yağı
ÜİD	: Üst Isıl Değer
KA	: Krank Açısı

PİROLİZE ATIK LASTİK YAĞI-MOTORİN KARIŞIMININ COMMON RAIL DİREKT ENJEKSİYONLU BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMI

ÖZET

Araçlarda kullanılan lastikler, zamanla aşınmakta ve atıl duruma gelmektedir. Bu nedenle, kullanılmış atık araç lastiklerinin bertarafı büyük önem arz etmektedir. Atık araç lastiklerinin geri dönüşümünde en çok kullanılan metotlardan bir tanesi piroliz yöntemidir. Atık araç lastiklerinin pirolizi sonucu, enerji üretimi veya doğrudan içten yanmalı motorlu araçlarda kullanılmak üzere sıvı lastik yağı elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında da, atık lastiklerden üretilen lastik yağı alternatif dizel katkı maddesi olarak değerlendirilmiş ve common-rail direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda performans, enjeksiyon, yanma ve emisyon karakteristikleri araştırılmıştır. Test yakıtı olarak saf motorin ve motorin-pirolize lastik yağı karışımı (%10 pirolize lastik yağı-%90 motorin, L10) seçilmiş ve motor testleri bu yakıtlar kullanılarak 1500, 1800 ve 2100 dev/dk olmak üzere üç farklı motor hızında ve maksimum motor torkunun yaklaşık yarısı olan 125 Nm motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, tüm test şartları için L10 yakıtının özgül yakıt tüketimi değerlerinin saf motorine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Yanma analizi sonuçlarına göre, L10 yakıtının silindir içi basınç değerlerinin ve maksimum ısı dağılım oranlarının ortalama olarak motorine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Enjeksiyon sonuçları incelendiğinde, pilot ve ana ekjeksiyon sürelerinin ortalama olarak motorine kıyasla daha uzun olduğu, pilot ve ana enjeksiyon zamanlarının ise motorine kıyasla daha sonra başladığı anlaşılmaktadır. Atık lastik yağının motorine katkı olarak kullanılması ile birlikte CO, THC ve NO_x emisyonları motorine kıyasla artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Lastik Yağı, Dizel Motor, Emisyon, Enjeksiyon, Yanma.

USE OF PYROLIZED WASTE TIRE OIL-DIESEL FUEL MIXTURE IN A COMMON RAIL DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE

ABSTRACT

Tires used in vehicles wear with use and become wastes in the progress of time. For this reason, the disposal of used waste vehicle tires is of great importance. Pyrolysis is one of the most commonly used methods in the recycling of waste vehicle tires. As a result of the pyrolysis of waste vehicle tires, liquid tire oil can be obtained which can be used in energy production or directly in vehicles with internal combustion engines. Also in this study, tire oil produced from waste tires was assessed as an alternative diesel fuel additive, and its performance, injection, combustion and emission characteristics were investigated in a direct injection common rail diesel engine. Pure diesel fuel and diesel fuel-tire oil mixture (10% pyrolyzed tire oil-90% diesel fuel, L10) were selected as the test fuels and engine tests were performed by using these fuels at three different engine speeds (1500, 1800, and 2100 rpm) and 125 Nm engine load which is about the half value of maximum engine load. When looking at the obtained results, it was seen that the specific fuel consumption values of L10 fuel were higher than those of pure diesel fuel for all test conditions. According to the combustion analysis results, it was determined that in-cylinder pressure values and maximum heat release rates of the L10 fuel were higher compared to diesel fuel on average. When the injection results were examined, it was understood that the pilot and main injection durations were longer on average, and the pilot and main injection times started later compared to the standard diesel fuel. With the use of waste tire oil as an additive into diesel fuel, CO, THC, and NO_x emissions increased compared to pure diesel fuel.

Keywords: Waste Tire Oil, Diesel Engine, Emission, Injection, Combustion.

GİRİŞ

Dünya üzerinde sürekli artmakta olan nüfus ile birlikte ihtiyaç duyulan enerji miktarı da sürekli olarak artmaktadır. Güncel durumda, milletlerin enerji ihtiyacına karşılık verecek ve enerji bağımlılığını yönlendirebilecek alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Enerjiye alternatif bulmanın yanında, çevre bilinci ile bakıldığında atıkların geri dönüşümü ön planda tutulmakta ve atıkların enerji üretiminde kullanılması önemli bir etken olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında, kullanılmış atık araç lastiklerinin belirli alanlarda enerji ihtiyacını karşılamak adına alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Yapılan bu yüksek lisans tezinde, ortak hatlı direkt enjeksiyonlu (CRDI) bir dizel motorda, atık lastik yağı %10 oranında motorin ile karıştırılarak test yakıtı olarak kullanılmış ve ortalama sürüş devirlerini simüle etmek amacıyla 1500, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızlarında ve 125 Nm motor yükünde dinamometre testleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması amacı ile aynı koşul ve şartlarda motorin ile testler tekrar edilmiştir.

Bu yüksek lisans tezi toplamda 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, petrol kökenli konvansiyonel yakıtların ülkemizde ve dünyada oluşan ihtiyaçlara cevap verebilmesi için olması gereken ve mevcuttaki toplam enerji kaynağı rezervleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, alternatif enerji kaynaklarına neden ihtiyaç duyulduğunun gerekçelerine değinilmiştir.

İkinci bölümde, günümüze kadar yapılan çalışmalarda literatürde atık lastik yağı ile ilgili ne gibi parametreler izlendiği ve hangi sonuçlar elde edildiği, bu çalışmaların motor yanma ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerinin neler olduğu hakkındaki bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, atık lastik yağı ile ilgili temel bilgiler ve atık lastik yağının dizel motorlarda kullanılabilmesi için ne gibi süreçlerden geçtiği incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, kullanılacak olan yakıtlar, cihazlar, test şartları ve test sistemleri ile ilgili detaylı bilgilere yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, yapılan çalışmada elde edilen performans, yanma, enjeksiyon ve emisyon sonuçları grafikler halinde verilmiş, sonuçlar detaylı olarak incelenmiş, yorumlanmış ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde, yapılan deneysel çalışmaya ait sonuçlar özetlenmiş olup gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



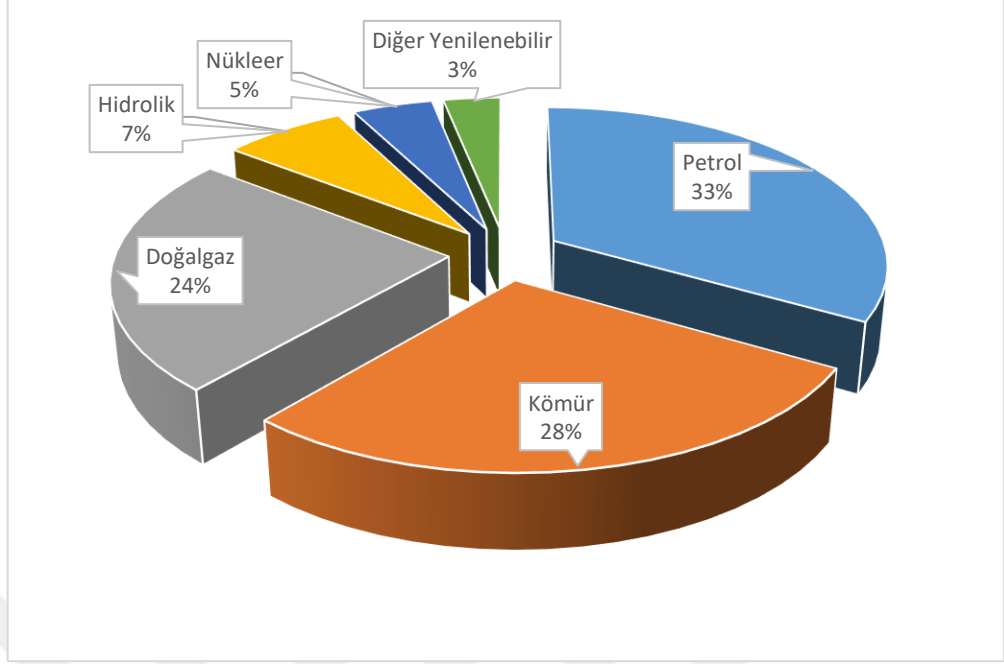
1. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, dünyadaki enerji ihtiyacının karşılanması ile ilgili bilgilere değinilmiş ve aynı zamanda Türkiye'deki enerji kaynaklarının yeterliliği, kullanımı ve ömrü bakımından yapılan araştırmalar incelenmiştir. Pirolize lastik yağı ile ilgili bilgiler de bu bölümde paylaşılmıştır.

1.1. Dünyadaki Enerji İhtiyacının Karşılanması

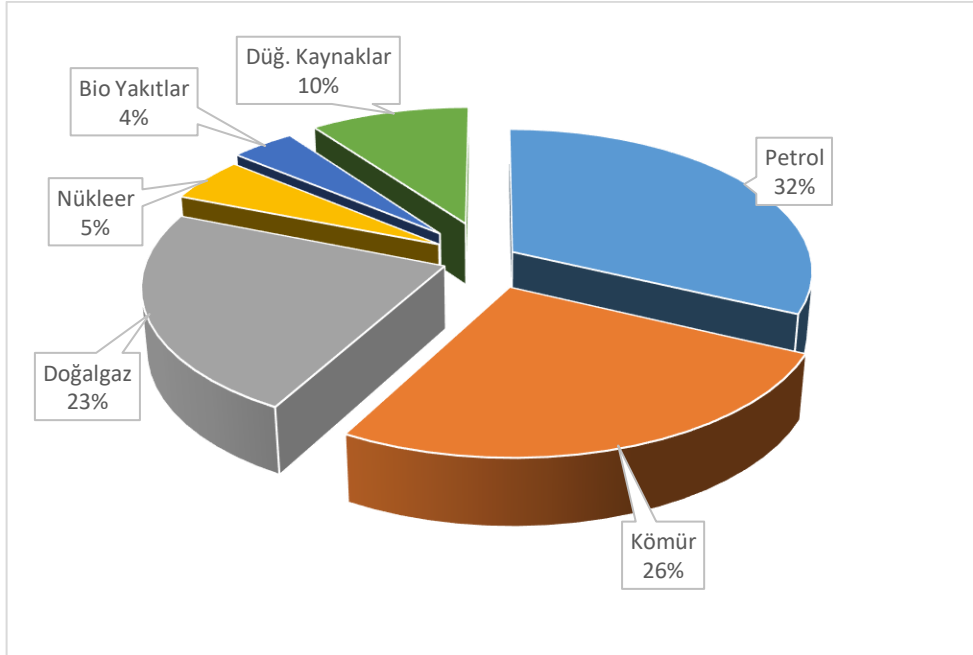
Petrol birçok alanda kullanılmakla birlikte özellikle taşımacılık sektöründeki içten yanmalı motorlara sahip araçların enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere büyük önem arz etmektedir. Dünyada ispatlanmış petrol rezervlerine bakıldığında 1998 yılı için bu değer 6,7 milyar varile kadar artmıştır. Bu rezervin ömrü ise 41 yıl olarak bildirilmiştir. Ancak, dünya petrol rezervlerine bakıldığında global ölçekte yeni bulunan petrol sahaları ile birlikte rezerv miktarı devamlı olarak artış göstermektedir. 2013 yılındaki paylaşılan verilere bakıldığında rezerv miktarı yaklaşık 53 yıl olarak belirlenmiş iken 2014 yılında bu ömür yaklaşık 57 yıl olarak güncellenmiştir [1]. Ülkelerin dış politikalarına bakıldığında petrolün ne kadar etkili olduğu görülmektedir. Bu kapsamda tüm ülkeler kendi rezervlerini bulmak ve kullanmak istemektedir. 2014 yılı sonunda açıklanan dünya petrol rezervleri 1 trilyon 700 milyar varil olarak bildirilmiştir.

Günümüzde petrol ihraç eden ülkelere bakıldığında, genel olarak ekonomik açıdan diğer dünya ülkelerinden daha iyi bir konumdadırlar. Dünya petrol rezervlerinin %71,6'sı Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC) üyesi devletlerin kontrolindedir. Üretimdeki dağılım değerlerine bakıldığında %48,5 ile Ortadoğu bölgesi, %19,8 ile Orta ve Güney Amerika bölgesi, %13,3 ile Kuzey Amerika bölgesi ve diğer ülkeler olarak ayrılmaktadır [2]. 2016 yılı için dünya genelinde petrol, enerji tüketimi açısından bakıldığında %33,3 ile en yüksek orana sahiptir. Bu tüketimi takip eden ve dünya genelinde ikinci sırada olan kömür %28,1 oranında tüketilmektedir. Diğer kaynaklar olan doğalgaz ise %24,1, hidrolik enerji %6,9, nükleer enerji %4,5 ve kalan yenilenebilir enerji kaynakları da %3,2 paya sahiptir. Şekil 1.1'de 2016 yılına ait dünya enerji tüketim miktarları görülebilmektedir [3].



Şekil 1.1. 2016 yılı dünya enerji tüketim miktarları

2019 yılında ise dünya enerji ihtiyacının yüzdesel olarak oranlarına bakıldığında, enerji ihtiyacının %23'ünün doğalgazdan, %32'lik kısmının petrolden ve %26'lık kısmının ise kömürden sağlandığı görülmektedir. Şekil 1.2'de 2019 yılı dünyadaki enerji tüketim sıralamasına ve yüzdelere yer verilmiştir [4].



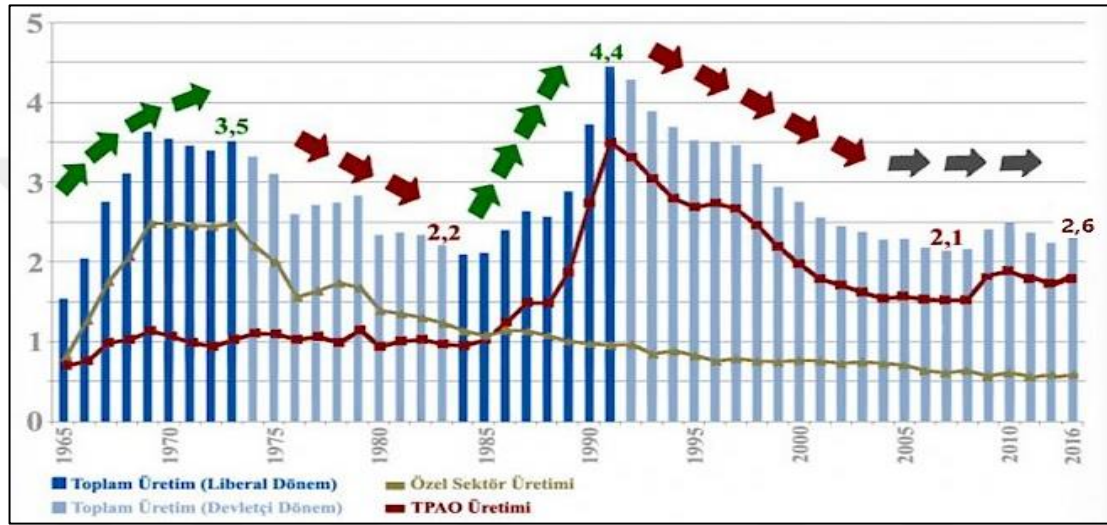
Şekil 1.2. 2019 yılı dünya enerji tüketim miktarları

1.2. Türkiye'deki Enerji Tüketimi

Türkiye için petrol tüketiminin durumu, enerji ürünlerine olan ihtiyaç açısından ve nihai olarak enerjiyi üretmek adına çok önemli bir rol oynamaktadır. Türkiye'deki enerji ürünlerine ait ihtiyaçların %30'u genel kullanımdan kaynaklanmaktadır. Bu ihtiyaca cevap verebilmek için üretilen enerjinin %35'i ise petrol kökenli ürünlerden sağlanmaktadır. Özellikle son yıllarda Türkiye'deki ham petrol üretimi artmış, ancak bu durum ihtiyacın çok altında bir miktar olduğundan dolayı yetersiz kalmıştır. Dış ticaretteki en büyük artışın sebebi olarak bu durum gösterilmektedir. Günümüzde Karadeniz ve Akdeniz'deki arama ve tarama üzerine kurulu projelerde hızlanma olduğu görülmektedir. İlerleyen teknoloji ile birlikte keşif alanında yapılan çalışmalar daha kesin sonuçlar verdiği için, üretim miktarlarında artış görülebileceği tahmin edilmektedir [5]. 2018 yılı itibariyle yurtiçindeki sahalardan çıkarılabilir petrol rezervlerinin 368,77 milyon varil (52,87 milyon ton) olduğu hesaplanmıştır. Yeni keşiflerin olmadığı düşünülürse, bugünkü üretim seviyesiyle birlikte (ortalama 2,85 milyon ton/yıl) ve yurtiçi toplam ham işlenmemiş petrol rezervlerinin yaklaşık olarak 18,5 yıl ömrü kaldığı ifade edilmektedir. Türkiye'de petrol çıkarma sahalarının %7,1'i 25 milyon varil rezerv miktarından daha fazla olmakla birlikte, geri kalan %92,9'unun rezerv miktarı 25 milyon varilden daha düşüktür. Ülkemize ait büyük saha sınıfına girmekte olan 500 milyon varilden fazla üretim yapabilen büyük sahamız henüz olmamıştır. 2019 yılı itibariyle ise ülkemizdeki petrol rezerv miktarı 378,6 milyon varile eşdeğer olan 57 milyon ton olarak ifade edilmektedir. Petrol tüketim durumu incelendiğinde ise 2019 yılının ilk 6 ayında yapılan tüketimin yalnızca %11'i yerli kaynaklardan sağlanabilmiştir [6]. Ülkemizde çıkartılıp işlenen ham petrol miktarları Şekil 1.3 ve Tablo 1.1'de verilmiştir. Gelişmekte olan ekonomiye sahip olan ülkemizin gelişmeye ve büyümeye bağlı olarak her geçen gün enerji ihtiyacı talebi artış göstermektedir. Bu artışa cevap verebilmek için yeni petrol sahalarının bulunması ve işletilmesi, dışa bağımlılık açısından ekonomimize oldukça pozitif yansıyacaktır. Ancak coğrafi olarak bakıldığında ülkemizdeki petrol kaynakları sınırlı olarak gözükmektedir. Bu nedenle, alternatif enerji kaynakları üzerine de yoğunlaşarak enerji talebinin mümkün olduğu kadar yerli kaynaklardan üretilmesi gerekmektedir.

Diğer yandan petrolün türevlerinin en çok kullanıldığı otomotiv sektöründeki araç sayısı önemli bir yer teşkil etmektedir. Global olarak kullanılan araç sayısı, 2020 yılı

Ocak ayı referans alındığında tüm dünyada 1,7 milyardır. Yalnızca ülkemizde 2019 yılında 21 milyon 458 bin adet motorlu araç bulunmaktadır. Bu sayı her geçen gün artmaya devam etmektedir. Yine 2019 yılı referans olarak alındığında bu araçların %38,4'ü dizel, %37,1'i LPG'li ve %24,2'si benzinli yakıt sistemlerine sahip iken geriye kalan %0,4'lük kısım elektrikli veya hibrit araçlardır [7]. Tablo 1.2'de ülkemizdeki araç cinslerine göre kullanılmakta olan motorlu taşıtların sayısı görülebilir.



Şekil 1.3. Türkiye'deki ham petrol üretim grafiği, 1965-2016 yılları (milyon ton) [8]

Tablo 1.1. 2018 yılı itibariyle Türkiyedeki ham petrol üretimi [8]

Şehir	Kuyu Sayısı	Günlük Üretim
Batman	647	16960
Adıyaman	220	7970
Diyarbakır	201	6890
Mardin	113	1770
Şanlıurfa	18	430
Kırklareli	27	200
Toplam	1226	34420

Tablo 1.2. Araç cinsine göre motorlu taşıtların sayısı [9]

Yıl	Otomobil (Milyon)	Kamyon (Milyon)	Kamyonet (Milyon)	Minibüs (Milyon)	Otobüs (Milyon)	Traktör (Milyon)	Toplam (Milyon)
2015	10,58	0,804	3,25	0,449	0,217	1,69	17,01
2016	11,31	0,825	3,44	0,463	0,220	1,76	18,03
2017	12,03	0,838	3,64	0,478	0,221	1,83	19,05
2018	12,39	0,845	3,75	0,487	0,218	1,88	19,59
2019	12,50	0,844	3,79	0,493	0,213	1,90	19,76

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Enerji, günlük yaşamdaki neredeyse tüm aktivitelerin sürdürülebilirliği için en temel dayanaktır. Farklı enerji kaynakları oluşturmak için, bazı atık malzemelerin bir enerji kaynağına geri dönüştürülmesinde sadece birkaç adım vardır. Dolayısıyla atıktan elde edilen enerjinin hem çevresel hem de ekonomik sorunlarla başa çıkmanın en faydalı yolu olduğu kabul görmüştür. Kullanıldıktan sonra atıl duruma gelen araç tekerleri de yüksek miktarları nedeniyle geri dönüşüm açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Nitekim, Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Birliği'ne (ETRMA) göre Avrupa Birliği'nde her yıl yaklaşık 289 milyon adet lastik satılmıştır ve bu sayı dünya pazarının yalnızca %20'sine tekabül etmektedir [10]. Bu potansiyele bakıldığında, atık lastiklerden elde edilen yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı son yıllarda gittikçe önem kazanmış ve bununla ilgili çalışmalar artış göstermiştir.

Dung ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin geri dönüşümü ile yakıt üretmek için katalitik piroliz prosesine ait işlemlerde, katalizör miktarının ürün dağılımını ve ürün içeriğini önemli ölçüde etkileyen bir parametre olduğunu tespit etmişlerdir. Katalizör/lastik oranlarının artırılması ile sıvı ürün veriminde artış sağlanmış ve ulaşılacak olan maksimum verimi %65,1 olarak elde etmişlerdir. Katalizör miktar artışının katı ürün verimindeki etkisi çok fazla değil iken, bu miktar yükseldikçe gaz ürünündeki yüzdesel verim azalmış ve sıvı ürün veriminde artış sağlandığını bildirmişlerdir.

Kumaravel ve diğ., [12] yaptıkları çalışmada, atık lastikleri yakıtla dönüştürmeye yönelik işlemler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, %90 motorine %5 PLY ve %5 oranında seryum oksit karıştırılarak oluşturulan yakıt ile motorin yakıtının kimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. Karışım yakıtına ait ölçülen alt ısı değer yaklaşık 43,3 MJ/kg olarak tespit edilmiştir. Performans özelliklerine bakıldığında ise; motorine göre ısı veriminde %2,94 oranında artış ve is emisyonlarında %7,4 oranında azalma görülmüştür.

Pilusa ve Muzenda [13] yaptıkları çalışmada, endüstriyel bir brülörde atık lastik yağının potansiyel kullanımını araştırmışlar ve kritik yanma parametreleri olan termal güç çıkışı, yakıt tüketimi ve emisyonları incelemişlerdir. Distile edilmemiş atık lastik yağını motorin ile içerisinde %40 (L40) olacak şekilde karıştırmışlar ve ayrıca distile edilmiş atık lastik yağını da motorin ile karıştırmadan test yakıtı olarak kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, stabil bir yanma ve daha düşük emisyonlar için L40 yakıtının saf motorine kıyasla daha yüksek hava/yakıt oranları (AFR) gerektirdiği tespit edilmiştir. Distile edilmiş atık lastik yağının, L40 yakıtına kıyasla düşük kükürt emisyonları ile birlikte daha stabil bir yanma sağladığı belirtilmiştir. Ancak, distile edilmiş atık lastik yağının özgül yakıt tüketimi değerlerinin L40 yakıtına kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Atık lastik yağının viskozitesinin akış karakteristiklerine doğrudan etki ettiği ve buna bağlı olarak düşük basınç ve zayıf atomizasyon karakteristikleri sergilediği ifade edilmiştir. Emisyon sonuçlarına göre, L40 ve distile edilmiş atık lastik yağının daha yüksek CO, NO₂ ve SO₂ emisyonları ürettikleri tespit edilmiştir.

İlkılıç ve Aydın [14] yaptıkları çalışmada, atık taşıt lastiklerinden yakıt üretmiş ve bu yakıtı motorin ile karıştırarak bir dizel motorda motor gücü, motor torku, özgül yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının değişimini araştırmışlardır. Üretilen atık lastik yağının kükürt miktarı kalsiyum hidroksit kullanılarak azaltılmıştır. Atık lastik yağı saf olarak ve motorin içerisinde %5, %10, %15, %25, %35, %50 ve %75 olacak şekilde test yakıtları hazırlanmış ve 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dk olmak üzere dört farklı motor hızı koşulu seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, atık lastik yağı içeren karışımların motorine kıyasla daha düşük motor torku ve dolayısıyla daha düşük motor gücü sağladığı belirlenmiştir. %100 atık lastik yağı kullanıldığında, motor torku ortalama yaklaşık %11,9 azalmıştır. Buna bağlı olarak, atık lastik yağının daha yüksek özgül yakıt tüketimi değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir. Emisyonlar incelendiğinde, atık lastik yağının CO, SO₂, HC ve is emisyonlarında motorine kıyasla artışa neden olduğu ifade edilmiş ancak NO_x emisyonlarının motor çalışma parametresine bağlı olarak farklı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Hossain ve diğ. [15] yaptıkları çalışmada, atık lastik yağını 6 silindirli Euro IIIA bir dizel motorda motorine katkı maddesi olarak değerlendirmişlerdir. Atık lastik yağı motorin ile %10 (L10) ve %20 (L20) olacak şekilde karıştırılarak test yakıtları

oluşturulmuştur. Motor testleri sabit motor hızında (1500 dev/dk) ve 4 farklı motor yükünde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre, L10 ve L20 yakıtlarının kullanılması ile birlikte yakıt yükretiminde bir miktar artış gözlemlenirken, test yakıtlarının maksimum silindir basınçları arasında belirgin bir fark olmadığı belirtilmiştir. L10 ve L20 yakıtının kullanılması ile motorine kıyasla PM ve NOx emisyonlarında azalma, ancak CO emisyonlarında ise belirgin bir artış tespit etmişlerdir.

Bodisco ve diğ. [16] yaptıkları çalışmada, motorin ve atık lastik yağı - motorin (L10) karışımı kullanan hafif ticari dizel motora sahip olan bir araçta yol testi yaparak NOx emisyonlarını incelemişlerdir. Araç ile 4 farklı koşulda sürüş gerçekleştirmişlerdir. Bu seyahatlerde %23,7 rölanti, %44,1 şehir içi, %47,3 şehirlerarası (<90km/h) ve %8,56 (>90km/h) otoban sürüşü sonucunda toplamda her bir seyahat için 46,6 km yol katedilmiştir. Yapılan yol testler sonucunda, L10 ve motorin test yakıtlarının NOx emisyonları arasında belirgin bir farkın olmadığı gözlemlenmiştir.

Hariharan ve diğ., [17] yaptıkları çalışmada, tek silindirli 4 zamanlı bir dizel motorda yakıt olarak atık lastik yağı ve dietil eter kullanmışlardır. Motor testleri, toplamda 6 farklı motor yükünde ve 1500 dev/dk'da yapılmıştır. Dietil eter emme manifolduna 3 farklı miktarda (65, 130 ve 170 g/h, stabil yanma için gerekli olan miktar) gönderilirken, atık lastik yağı doğrudan silindir içerisine enjekte edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar referans yakıt olan motorin ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, motorine kıyasla tutuşma gecikmesi emme manifolduna gönderilen eter miktarının artması ile birlikte azalma göstermiştir. Buna rağmen, eter ve lastik yağı kullanımı tüm test şartlarında motorine kıyasla daha uzun tutuşma gecikmesi sürelerine neden olmuştur. Maksimum silindir basınçları birbirine yakın sonuçlar verirken, eter ve lastik yağı kullanımı motorine kıyasla daha düşük termik verim elde edilmesine neden olmuştur. Egzoz emisyonları incelendiğinde, tam yükte NOx emisyonlarının eter ve lastik yağı kullanıldığında motorine kıyasla ortalama %5 daha düşük, HC, CO ve is emisyonlarının ise sırasıyla ortalama %2, %4,5 ve %38 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Vihar ve diğ., [18] yaptıkları çalışmada, 6 silindirli turboşarjlı bir dizel motorda atık lastik yağının yakıt olarak kullanışlar ve motor performans, yanma ve egzoz emisyon

karakteristiklerini araştırmışlardır. Motor testleri 1500 ve 2400 dev/dk ve sabit enerji girişi şartlarında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1500 dev/dk motor hızında %100 lastik yağının kullanılması ile birlikte motorine kıyasla daha yüksek maksimum silindir basıncı, sıcaklığı, daha kısa yanma süresi, daha erken yakıt enjeksiyonu ve daha yüksek yakıt enjeksiyon basınçlarının elde edildiği tespit edilmiştir. 2400 dev/dk motor hızında yine %100 lastik yağının kullanılması ile birlikte motorine kıyasla maksimum silindir basınçlarının ortalama olarak birbirine yakın olduğu, daha kısa yanma süresi, daha erken yakıt enjeksiyonu ve daha yüksek yakıt enjeksiyon basınçları gözlemlenmiştir. Her iki devir şartında da, CO, HC, NO_x ve SO₂ emisyonları motorine kıyasla artış göstermiştir.

Murugan ve diğ. [19] tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda %10, %30 ve %50 lastik yağı içeren motorin/lastik yağı karışımlarını test etmişler ve bu motorun yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. 1500 dev/dk ve 5 farklı motor yükünde yapılan testler sonucu elde edilen performans ve yanma sonuçlarına bakıldığında, lastik yağı kullanımı ile motorine kıyasla fren termik veriminin azaldığı, karışım içindeki lastik yağı miktarı arttıca maksimum yanma basıncının ve tutuşma gecikmesi süresinin arttığı ve lastik yağı karışımları için maksimum basınç artış oranının tüm test şartları için 5 barın altında olduğu belirlenmiştir. Emisyon sonuçları incelendiğinde, tüm test şartlarında lastik yağı karışımlarının motorine kıyasla ortalama olarak daha yüksek NO_x, HC ve CO emisyonu değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Hürdoğan ve diğ. [20], dört zamanlı, dört silindirli, doğal emişli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda atık lastik yağı ve motorin karışımlarını yakıt olarak kullanmışlardır. Atık lastik yağını motorin içerisinde %10 ve %20 (L10 ve L20) olacak şekilde karıştırmışlar ve 2 farklı test yakıtı hazırlamışlardır. Motor testleri 1000-2200 dev/dk aralığında 200 dev/dk artışlarla maksimum gaz pedalı açıklığında yapılmıştır. Yapılan testler sonucu, L10 ve L20 yakıtı için elde edilen maksimum motor momenti tüm test koşullarında motorine kıyasla daha düşük ve özgül yakıt tüketimi ise daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde L20 yakıtının maksimum motor momenti de L10 yakıtına kıyasla daha düşük tespit edilmiş ve karışım içerisindeki lastik yağı miktarı arttığında özgül yakıt tüketimi de artış göstermiştir. Egzoz emisyon sonuçları incelendiğinde,

motorine kıyasla lastik yağının kullanılması ile CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarında ortalama olarak azalma tespit edilmiştir.

Murugan ve diğ. [21], düşük (%20, L20) ve yüksek miktarda (%90, L90) atık lastik yağı içeren test yakıtlarını kullanarak, sabit motor hızında (1500 dev/dk) ve 4 farklı motor yükünde bir dizel motorda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, L20 ve L90 yakıtları motorine kıyasla daha yüksek özgül enerji tüketimine sahipken, buna bağlı olarak daha düşük termik verime neden olmuşlardır. L20 ve L90 yakıtı kendi aralarında karşılaştırıldığında, L90 yakıtının daha yüksek özgül enerji tüketimi ve daha düşük termik verime sahip olduğu tespit edilmiştir. Maksimum silindir gaz basıncı sonuçlarına göre, L90 yakıtı hem L20 hem de motorine kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir. Tutuşma gecikmesi sonuçları incelendiğinde ise en uzun tutuşma gecikmesi sürelerinin L90 yakıtına ait olduğu, daha sonra ise L20 yakıtına ait olduğu görülmektedir. L90 yakıtının kullanılması ile NO_x emisyonlarında motorine kıyasla bir azalma gözlenirken, L20 yakıtına kıyasla bir artış söz konusudur. CO ve HC emisyonları değerlerine bakıldığında L20 ve L90 yakıtlarının motorine kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Literatürdeki yapılan çalışmalara bakıldığında, atık lastiklerden piroliz yöntemiyle üretilen lastik yağının dizel motorlarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar kısıtlı da olsa görülmektedir. Ancak özellikle atık lastik yağının yeni nesil dizel motorlarda yanma ve enjeksiyon karakteristikleri ile ilgili çalışmalar oldukça az miktardadır. Literatürdeki bu eksiklikten yola çıkılarak yapılan bu tez çalışmasında, atık lastiklerden üretilen pirolize lastik yağı motorin ile karıştırılarak ortak hatlı direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda (CRDI) yakıt olarak kullanılmış ve bu yakıtın motor performans, yanma, enjeksiyon ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenmiştir.

3. ALTERNATİF YAKIT OLARAK ATIK LASTİK YAĞI

Yüksek yakıt fiyatları, küresel ısınma, çevresel bozulma, fosil yakıtların sağlık üzerindeki olumsuz etkileri ve özellikle dizel emisyonlarının yüksek olmasından kaynaklı yeni bir motor yakıtı ve yakıt katkılarının araştırılması güncel bir konu olmuştur [22]. Bu bölümde öncelikli olarak pirolize lastik yağı özellikleri, piroliz yöntemi ile üretim işlemleri, motorine katkı olarak kullanılabilmesi için yapılması gerekenler ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

3.1. Atık Lastikler

Taşıtlarda kullanılan lastiklerin belirli bir ömrü ve kullanım kapasiteleri mevcuttur. Ülkemizde binek bir araç için araç tekerlerleğinin dış derinliği minimum 1,6 mm olmalıdır. Bu değerden daha düşük dış derinliğinde araç lastiklerinin kullanılması yasaklanmıştır. Nitekim, bu değerlerin altında lastiğin yol tutuşu azalmakta, frenleme kabiliyeti zayıflamakta ve güvenlik sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle araç lastikleri, dış kalınlıkları belirli bir değer altına düştükten sonra ya da araç lastiği raf ömrünü tamamladıktan sonra yenisi ile değiştirilmelidir. Daha önceki ve sonraki kısımlarda görülebileceği üzere, her yıl trafiğe çıkan araç sayısı artmaktadır. Bu durumda, artan taşıt sayısı ile birlikte, atık lastik sayısı da artmakta ve tüm dünya genelinde hızla artış gösteren atık lastiklerin bertarafı sorununu ortaya çıkarmaktadır. Yılda ortalama bir milyardan fazla lastiğin üretildiği tahmin edilmektedir, bu da atık bertarafı açısından ciddi bir kirlilik sorunu olarak kabul görmektedir. Atık bir lastiğin enerjiye çevrilebilmesi, ham petrole oranla daha temiz bir enerji üretim yöntemidir ve daha düşük karbon ayak izi oluşturmaktadır [18, 23]. Global düzeyde bakıldığında 2008 yılı içerisinde 70,7 milyon araba üretilmişken yıl 2017 olduğunda bu sayı 97,3 milyon adet olmuştur [24]. Üretimdeki bu ivmelenme aynı şekilde lastik üretiminde de kaçınılmaz olarak beklenmektedir. Atık hale gelen lastikler için geri dönüşüm yollarından en çok tercih edileni belirleyebilmek adına, hammaddeye ait fiziksel özelliklerinin yanı sıra bileşimin de çok iyi bir şekilde bilinmesi gerekmektedir [25]. Lastik atıklarına ait genel bileşim, Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Lastik atıklarının bileşim oranları [26]

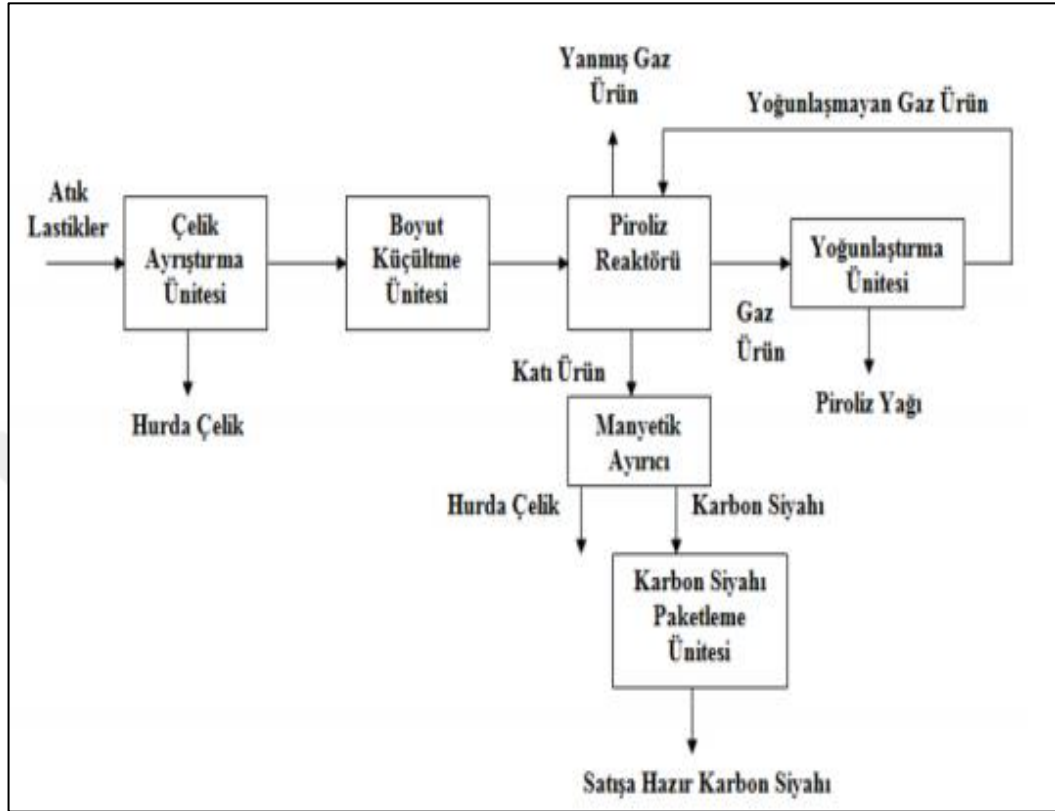
İçerik	Yüzde (%)
Kauçuk	35
Tekstil Elyafı	24
Kurum	24
Yağ/Reçine	10
Kimyasal	5
Kükürt	2

Yangın riskleri nedeniyle mevcut durumdaki atık lastik stokları büyük bir tehlike olarak görülmektedir. Atık lastikler, yeniden kullanım veya geri dönüşüm gibi nedenlerden dolayı lastik işleme tesislerinde depolanabilir. Ancak, uygun yönetim maliyetlerinden kaçınmanın bir yolu olarak bazen büyük miktarlarda toplanmakta ve süresiz olarak depolanmaktadır. Dünyanın dört bir yanında meydana gelen bir dizi lastik yangını, lastik stoklarının oluşturduğu riski ortaya koymuştur. Lastik yangınlarının kontrol edilmesi çok zordur ve tehlikeli duman oluştururlar, bu da partiküllerin ve kimyasalların solunması yoluyla sağlık riskine neden olabilir [25]

Dizel motorlu araçlar taşımacılık sektöründe gerek düşük yakıt tüketimi gerekse yüksek tork talebine karşılık verebilmesinden dolayı oldukça tercih edilmektedir. Enerji talebindeki yükseliş ve petrol rezervlerinin tükenmesi nedeniyle, araştırmacılar dizel motor için alternatif yakıtlar üzerine çalışmaktadırlar [27]. Atık lastiklerin dizel motorlarda kullanılacak yakıt olarak geri dönüştürülmesi ve buna bağlı olarak enerji elde edilmesi, atık lastik imha sorununun çözülebilmesi için olası yollarından biri olarak görülmektedir.

Atık lastikler, biyolojik olarak parçalanamayan malzemeleri içermektedir ve termomekanik özellikleri nedeniyle mekanik veya termal bir ön işlem olmadan doğrudan yeniden kullanılmaları veya geri dönüştürülmeleri oldukça zordur. Atıl araç lastiklerinin geri dönüştürülmesi, literatürde görüleceği üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Son süreçte en son bahsi geçen durum, atıl araç lastiklerinden yakıt elde etme olasılığıdır. Bu durum, piroliz yöntemi ile birlikte daha da çekici bir hale gelmiştir [28]. Şekil 3.1’te görüldüğü üzere atık lastikler piroliz prosesine girdikten sonra farklı bir kaç adımdan geçmekte ve hurda çelik, yanmış gaz, katı ürün,

karbon siyahı ve satışa hazır karbon siyahı olarak adlandırılan ürünlere ayrıştırılmaktadır.



Şekil 3.1. Atık lastiklere ait geri dönüşüm şeması [29]

3.1.1. Lastik atıklarının piroliz ile geri dönüşümü

Çataklı ve diğ. [30] yaptıkları çalışmada, 21. yüzyıldaki en büyük problemlerden birinin de otomotiv alanındaki hızlı sanayileşmeyle lastik ve kauçuk malzemelerdeki artış miktarı ile birlikte, atık kauçuk malzemelerin de dolaylı olarak artacağını bildirmişlerdir. Atık olacak olan araç lastiklerinin herhangi bir işleme tabi tutulmadan geri dönüştürülmesinin veya hammadde olarak kullanılmasının da bir yolu olmadığını belirtmişlerdir. Kauçuk tüketiminin önemli bir miktarı, lastik hammaddesinin %70'ini oluşturduğundan dolayı bu alanda görülmektedir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında atık lastiklerin geri dönüşümü konusunun çevre ve insan sağlığı ve ayrıca hammadde açısından umut verici olduğunu bildirmişlerdir. Atık olan lastiklere ait piroliz prosesinde değişik sıcaklıklarda ortaya çıkan reaksiyonlar Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Piroliz prosesinde farklı ısılarda meydana gelen durumlar [31]

Sıcaklık (°C)	Oluşan Durum
120/150	Bünye ayrışması, desülfürleşme, deoksidasyon
250	Hidrojen ve sülfürün parçalanması
340	Alifatiklerin bozunması, hidrokarbon ve metan oluşması
400	C-N / C-O bileşik bağlarının parçalanması
400/420	Bütün hammaddelerin piroliz yağına ve katrana dönüşmesi
600	Tüm maddelerin ısıya dayanaklı malzemeye kranklaşması

Yapılan piroliz işlemi sonucunda elde edilen ürünün reaktör içinden alınması için sürükleyici bir gaz kullanılmaktadır. Kullanılan bu gaz inert ve ucuz olması nedeniyle genellikle azot olarak tercih edilmiştir. Sürükleyici gaz olarak helyum, argon ve ortam atmosfer gazının da (hava) kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır [31].

Lastik atıklarının değerlendirilebilmesi adına kullanılmakta olan piroliz yöntemi, ısı altında organik kimyasal bağların kırılabilmesi için gerçekleştirilen bir metottur. Kısmi yanma veya ısıtma olarak tanımlayabileceğimiz piroliz, atık lastiklerin geri dönüşüm aşamasında kullanılır. Depolanması ve taşınması zor olan atıkların sıvı hale dönüştürülebilmeleri piroliz yoluyla mümkün olabilmektedir. Atık olan lastiklerin pirolizi ile karbonca zengin olan katı ürün (çar), katran veya pirolitik yağ olarak da isimlendirilen sıvı ürünler ve yüksek ısı değerine sahip gaz halinde olan ürünler elde edilmektedir. Atık lastiklerin pirolizi sonucu oluşan gaz, ısı değeri sayesinde piroliz işlemleri için gerekli olan ısıyı sağlamakta kullanılabilmektedir. Piroliz sürecine ait prosten kazanılan pirolitik yağ (pirolize lastik yağı, PLY) verimi, çalışma koşullarına ve hammaddeye bağlı olarak kütleye bakıldığında %58'e kadar arttırılabilmektedir. Elde edilen pirolitik yağ analiz edildiğinde ısı değerinin ortalama 42 MJ/kg olduğu belirlenmiştir [19].

3.2. Piroliz Lastik Yağının Dizel Yakıt ve Yakıt Katkısı Olarak Kullanılması

Atık olan lastiklerin bertarafı için, mekanik taşlama, kauçuk ıslahı, yanma, piroliz ve benzeri gibi kullanılan birkaç yöntem vardır. Son on yılda piroliz prosesleri yüksek kaliteli yakıtlar üretmek için optimize edilebildiğinden dolayı, atık lastiklerin pirolizi yeniden ilgi görmüştür. Atık lastiklerden elde edilen ürünler, yağ, gaz, kömür, çelik ve

artık ürünler olarak ortaya çıkmaktadır. Tüm bu ürünler yeniden kullanım potansiyeline sahiptir. Açığa çıkan gaz, proseste ısıtma enerjisi olarak kullanılması için yeterli kalori değerine sahiptir. Atık lastik yağı, lastiklerin pirolize dayalı işlemlerinden sonra alternatif yakıt veya yakıt katkısı halinde kullanılabilen önemli bir enerji kaynağıdır. Dizel motor için alternatif bir yakıt olarak lastik piroliz yağının kullanılması doğal kaynakların kullanımını en aza indirme olasılığını da sağlamaktadır. Atık lastikler için piroliz işlemi kullanılarak, yakıt elde edilmesi ve yakıt ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için birçok çalışma yapılmıştır [32-34].



4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, pirolize lastik yağının (PLY) katkı olarak kullanılacağı referans yakıt olan motorin bir yakıt istasyonundan satın alınmıştır. Testlerde kullanılacak PLY ise özel bir işletmeden distile edilmemiş halde tedarik edilmiştir. Pirolize lastik yağına ve motorine ait özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. Test edilen L10 yakıtına ait özellikler ise aritmetik olarak hesaplanarak tabloda paylaşılmıştır. Motor testleri için lastik yağı, motorine %10 (L10) oranında eklenmiş ve sonuçlar motorin ile karşılaştırılmıştır. Tüm testler en az 3 kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

Tablo 4.1. PLY'ye ait temel özellikler [35-37]

Özellikler	ASTM	Motorin	Lastik Yağı	L10
Yoğunluk (kg/m ³ @20°C)	D1298	830	970	844
Kinematik viskozite (mm ² /s, @40°C)	D445	2 - 4	4,85 - 5	2,28 – 4,1
Isıl değer (MJ/kg)	D4809	43,8	42,28	43,64
Setan numarası	D613	55	40	53.5
Parlama noktası (°C)	D93	50	33	48,3
Oksijen (%)	-	0	3,29	0,32
Karbon / Hidrojen Oranı	D5291	6,69	9,11	6,93

4.1. Testlerin Yapılması

Bu tez çalışması için motor testleri Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, testler esnasında kullanılan ekipmanlardan ve kullanılan yakıtlardan bahsedilmiştir.

4.1.1. Test motoruna ait bilgiler

Yapılan testlerde, 4 silindirli ve 1,9 litre hacime sahip olan ortak hat dizel yakıt enjeksiyon (CRDI) sistemine sahip bir dizel motor kullanılmıştır. Bu motor, turbo beslemeli ve su soğutmalıdır. Test motorunun teknik özellikleri Tablo 4.2’de ve görseli de Şekil 4.1’de verilmiştir. Günümüzde kullanılan dizel araçların ortalama sürüş devirlerinin 1000 ile 3000 dev/dk aralığında ve genellikle kısmi yük şartları altında olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, motor testleri için motor devirleri 1500, 1800 ve 2100 dev/dk motor yükü ise maksimum motor yükünün yaklaşık yarısı olan 125 Nm olarak seçilmiştir. Motor testleri için motor üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmamış ve orijinal kalibrasyon haritası kullanılmıştır.

Tablo 4.2. Yapılan testlerde kullanılan motora ait özellikler

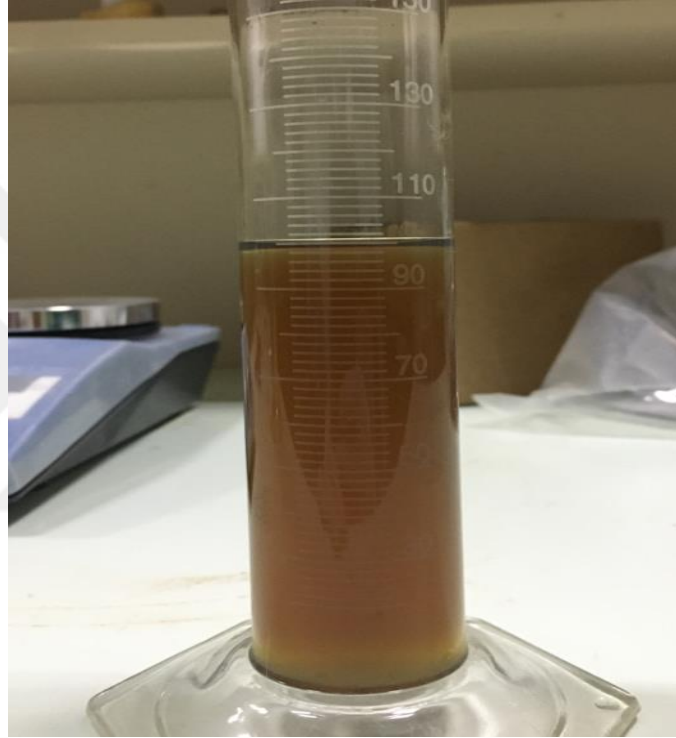
Motor	1,9 litre, Fiat JTD
Model	Direkt enjeksiyonlu, turbo beslemeli, ara soğutmalı, dört zamanlı, su soğutmalı, common-rail
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı - Strok	82 mm - 90,4 mm
Sıkıştırma Oranı	18,45:1
Maksimum Güç	77 kW, 4000 dev/dk
Maksimum Tork	205 Nm, 1750 dev/dk



Şekil 4.1. Test motoru görseli

4.1.2. Test motorunda kullanılan yakıtlar

Pirolize lastik yağı motorin ile karıştırıldığında herhangi bir ayrışmanın olup olmadığını gözlemlemek için, karışım oluşturulduktan sonra 48 saat beklenmiş ve bu süre sonunda karışımında herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiştir. Bu nedenle yakıt tankında harici bir karıştırıcı kullanılmamıştır. Ancak karışım yakıt tankına doldurulmadan önce iyice karıştırılmış ve homojen olması sağlanmıştır. %10 pirolize lastik yağı ve %90 motorin içeren karışımın (L10) görseli Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

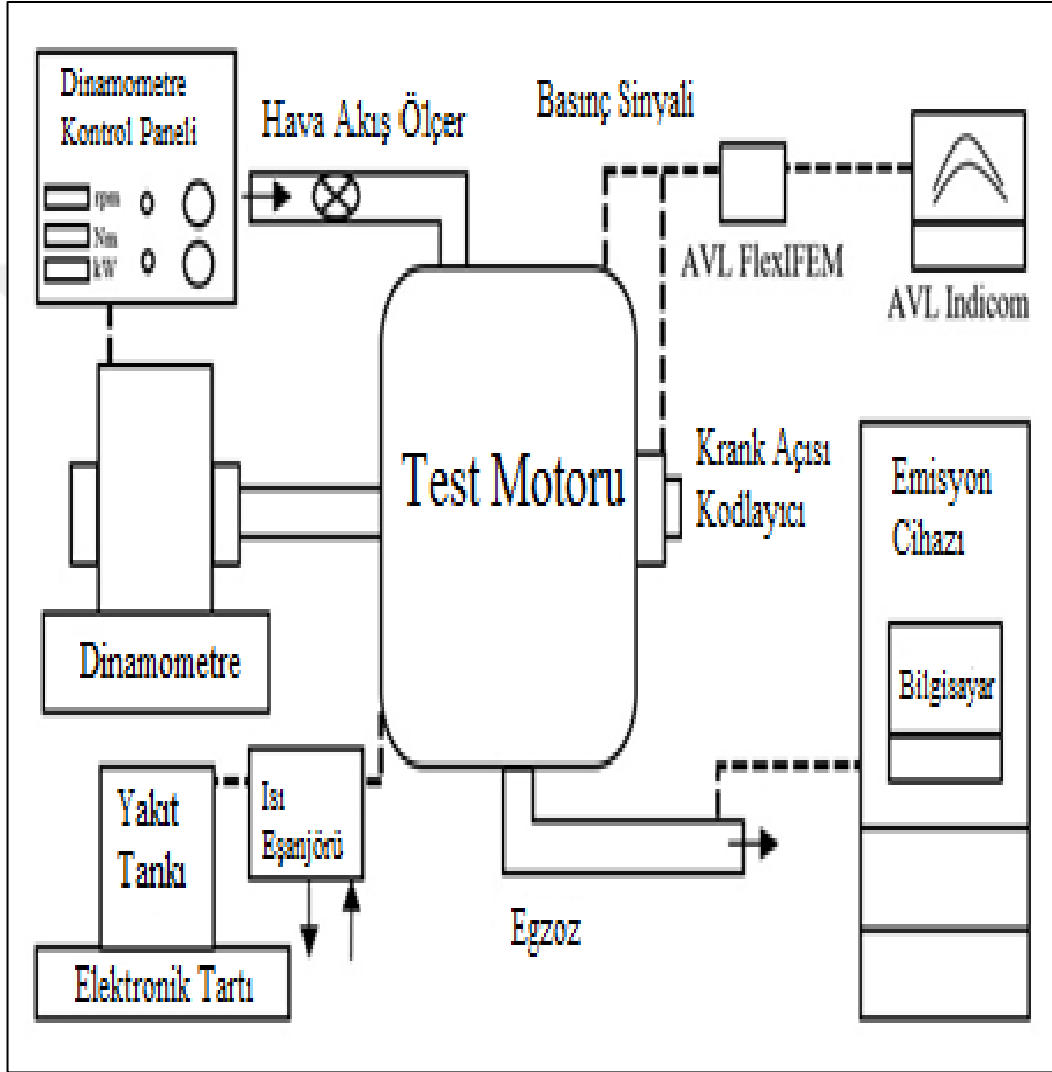


Şekil 4.2. L10 test yakıtı görseli

4.1.3. Motora ait test düzeneği

Motora ait test düzeneği Şekil 4.3’te verilmiştir. Motor testlerinde, istenilen motor yükünü ayarlayabilmek için bir hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Bu dinamometreye ait bilgiler Tablo 4.4’te verilmektedir. Kullanılan dinamometrenin çalışma prensibi ise şöyledir; dinamometrenin girişinden su verilir ve bu su dinamometre kanatçıklarının etrafında dolaşmaya başlar. Dolaşan su dinamometrenin shaft girişi kısmında bir frenleme kuvveti oluşturur. Bu frenleme kuvveti, dinamometreye verilen suyun debisi veya kanatçık açılarının değiştirilmesiyle ayarlanabilir. Testler esnasında kullanılan hidrolik dinamometreye ait görsel Şekil 4.4’te verilmiştir.

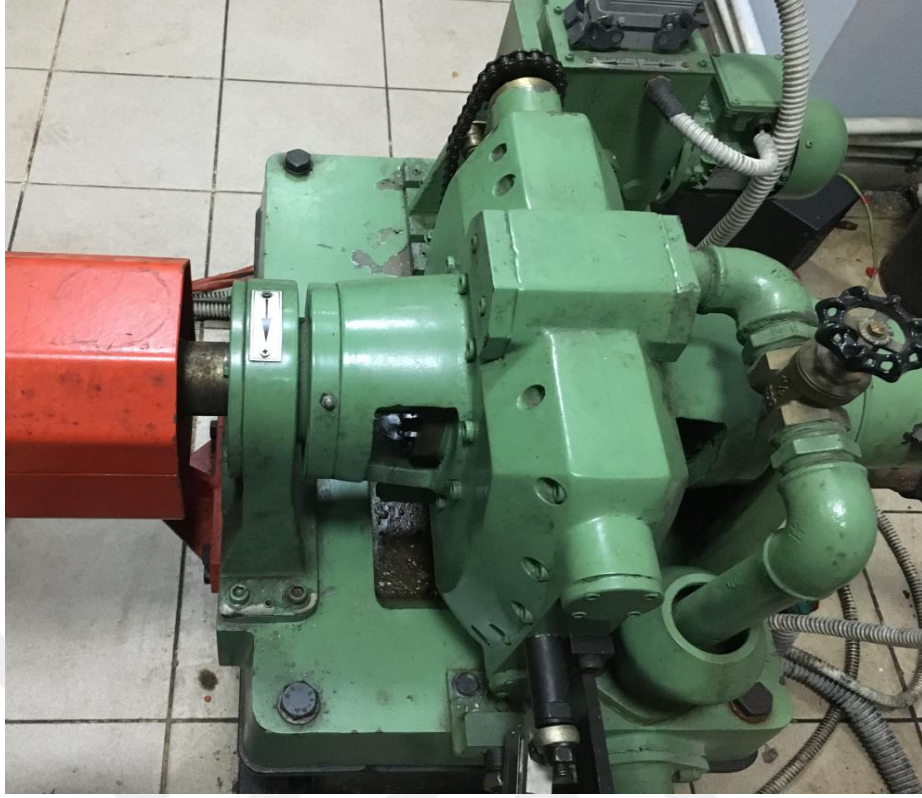
Motor yükünün ayarlanabilmesi ve motor yükünün takip edilebilmesi için kullanılan dinamometre kontrol ünitesi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu üniteden, motor yağ sıcaklığı, su sıcaklığı, motor devri, motor yükü ve dinamometre su basıncı gibi bilgiler alınabilmektedir. Aynı zamanda motorun devir ve yük ayarlamaları da bu ünite üzerinden yapılmaktadır.



Şekil 4.3. Motor test düzeneği şematik görseli

Tablo 4.3. Hidrolik dinamometreye ait özellikler

Model	BT-190 FR
Maksimum Güç	100 kW
Maksimum Yük	750 Nm
Maksimum Hız	6000 dev/dk
Yük Ölçümü	Yük Hücresi



Şekil 4.4. Hidrolik dinamometre



Şekil 4.5. Dinamometre kontrol ünitesi

Motor yanma parametrelerini krank açısına bağı olarak belirlemek ve üst ölü nokta kalibrasyonu yapmak için krank mili kasnağına bir enkoder bağlanmıştır. Motorun kızdırma bujisi yuvasına, kızdırma bujisi yerine AVL marka bir basınç sensörü yerleştirilmiş ve AVL Flexifem veri toplama cihazı ile silindir içi basınç değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.6). Yakıt hattı basıncının ölçülebilmesi adına ray ile enjektör arasındaki kalan yakıt borusuna Kistler marka bir basınç sensörü yerleştirilmiştir (Şekil 4.7). Enjektöre ait elektrik sinyallerini okuyabilmek için Fluke marka bir akım kelepçesi kullanılmıştır (Şekil 4.8). Yakıt enjeksiyon süresi, yakıt enjeksiyon zamanlaması, yakıt hat basıncı ve silindir içi basınç değerlerini almak için AVL Indicom yanma analiz programı kullanılmıştır. Silindir içi basınç verileri, 0,1 krank açısına ($^{\circ}$ KA) karşılık gelecek şekilde toplanmış ve ard arda 50 çevrimin ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.6. Avl Flexifem (Silindir içi Basınç Ölçüm Cihazı)



Şekil 4.7. Kistler marka yakıt hattı basınç sensörü



Şekil 4.8. Enjeksiyon sinyali toplamak için kullanılan akım kelepçesi

Giriş havası, yakıt, motor yağı ve motor soğutma suyu sıcaklıklarını ölçmek için dijital indikatör ile birlikte K tipi ısı çift kullanılmıştır. Motora giren hava miktarı AVL Flowsonix-Air modeli ile kütleli olarak ölçülmüştür (Şekil 4.9). Yakıt sıcaklığı, bir ısı değiştirici kullanılarak 35-40°C arasında sabit tutulmuştur. Yakıt tüketimi ise dijital terazi yardımıyla kütleli olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Hava debisi ölçüm sistemi

Motor testlerinde egzozdan salınan emisyonları ölçmek için AVL SESAME FTIR marka emisyon ölçüm cihazı (Şekil 4.10) kullanılmış ve OMNIC programı yardımı ile emisyon verileri bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Testlerde, motor yükü stabil hale geldiğinde emisyon ölçümleri 1 saniye de bir olacak şekilde anlık olarak alınmış ve bu verilerin ortalaması kullanılmıştır. Kullanılan emisyon cihazına ait ölçüm hassasiyeti Tablo 4.4'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.4. Emisyon cihazı ölçüm hassasiyeti

Parametreler	Birim	Ölçüm Hassasiyeti
THC	ppm	$< \pm \%2$ ölçülen değer veya $< \pm \%1$ tüm değer
CO	ppm	ölçülen değer $\pm \%2$ 'sinden daha iyi
NO _x	ppm	ölçülen değer $\pm \%2$ 'sinden daha iyi



Şekil 4.10. Emisyon ölçümü sistemi

4.2. Test Sonucunda Elde Edilen Verilerle Hesaplanan Değerler

Motor testlerinde elde edilen verilerin ortalaması alındıktan sonra, yakıtlar arasında karşılaştırma yapabilmek için ilgili hesaplamalar da yapılmıştır. Bu kısımda, bununla ilgili detaylar verilmiştir.

4.2.1. Özgül yakıt tüketimi

Deney düzeneğinde, hassas bir terazi ile motorun birim zamanda tükettiği yakıt miktarı g/s cinsinden ölçülebilmektedir. Ölçülen bu değer ve ölçülen motor gücü ile özgül yakıt tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$be = \frac{m}{Pe} \quad (4.1)$$

Bu formülde,

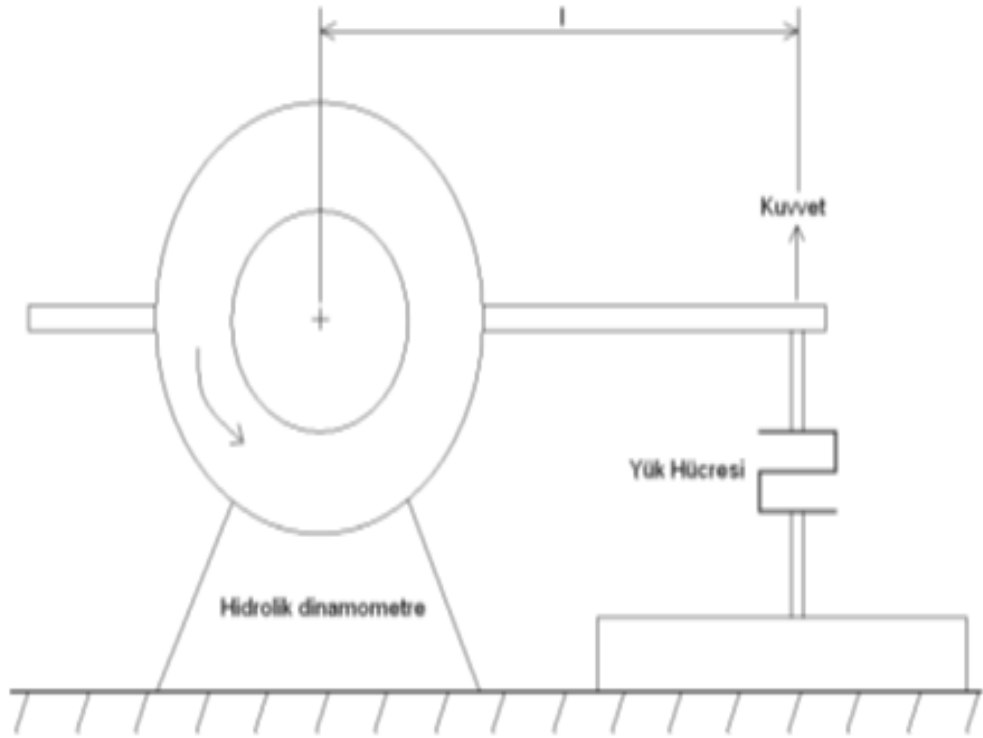
b_e = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

m = Yakıt tüketimi (g/h)

P_e = Efektif güç (kW) olarak ifade edilmektedir.

4.2.2. Motor momenti

Motor momenti, yanma esnasında oluşan basıncın piston ve biyel kolu vasıtasıyla krank miline aktarılması sonucuyla oluşmaktadır. Motorun ürettiği momenti ölçebilmek için, mekanik sürtünmeli (prony freni), hidrolik, elektrikli, elektromanyetik vb. dinamometreler kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, motorun yükünü sağlayabilmek için hidrolik bir dinamometre kullanılmıştır. Motorun torkunu belirlemede kullanılan sistemin şematik resmi Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Motor momentinin ölçülmesi

$$M_d = F \times l$$

(4.2)

Bu formülde, M_d motor momentini (Nm), l kuvvet noktası ile dinamometre arası mesafeyi (m) ve F ise yük hücresinde uygulanan kuvveti (N) göstermektedir.

4.2.3. Efektif güç

Efektif güç, motorun volan çıkışından faydalı güç olarak ifade edilmektedir. Efektif güç, motor torkuna ve hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Efektif güç aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$P_e = \omega \times M_d \quad (4.3)$$

Açısal hız denklemde yerine koyulursa ve birim kW olarak hesaplanırsa;

Burada;

$$P_e = \frac{\pi \times n}{30} \times M_d \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

$$P_e = \frac{M_d \times n}{9545,58} \quad (4.5)$$

P_e : Efektif güç (kW)

ω : Açısal hız (rad.s⁻¹)

n : Motor devri (dev/dk) olarak ifade edilmiştir.

4.2.4. Isı dağılımı

Motorlarda ısı dağılımı analizleri, motordan toplanan silindir içi basınç verileri ışığında yapılabilmektedir. Örnek olarak verilmiş bir silindir içi basınç ve ısı dağılımı grafiği Şekil 4.12'de görülebilir. Isı dağılımı ve silindir içi basınç analizleri AVL-Indicom yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Test motoruna ait silindir hacmi bilindiğinden dolayı silindir içerisinde elde edilen basınç verileri ile Termodinamiğin 1. Kanunu kullanılarak ısı dağılımı analizi yapılabilir. Termodinamiğin birinci kanunu kullanıldığında;

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_{wall}}{dt} = P \frac{dV}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (4.6)$$

Deklemi yazılır. Bu denklemde;

U : İç enerji (J)

V : Hacim (cm³)

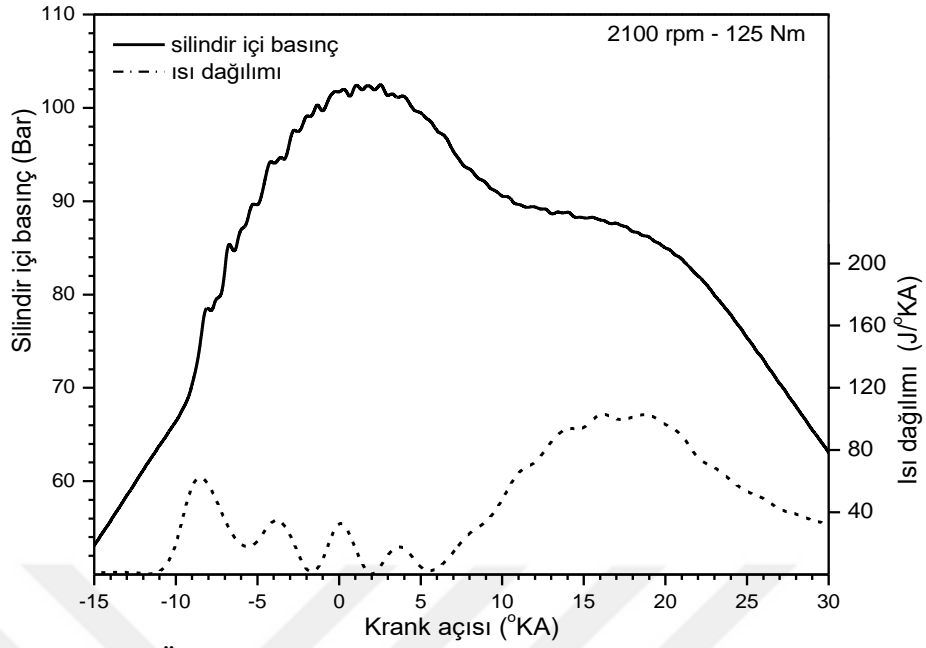
P : Basınç (Mpa)

Q_n :Net ısı dağılımı (J)

Q_t : Toplam ısı dağılımı (J)

Q_{wall} : Silindir duvarları arası ısı transferi dağılımı (J)

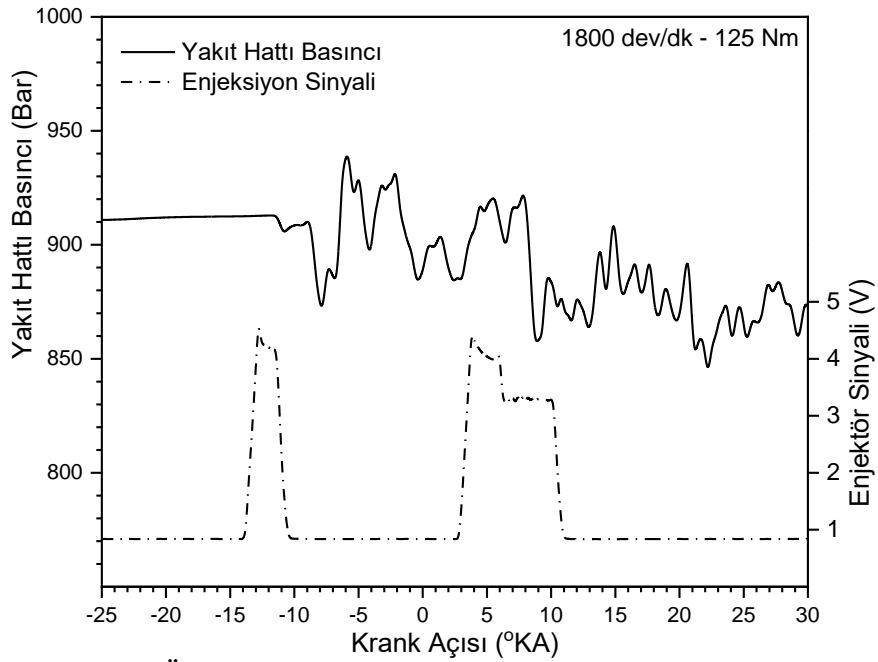
olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.12. Örnek silindir içi gaz basınç grafiği

4.2.5. Enjeksiyon karakteristikleri

Motor testleri esnasında yakıt hattı basıncı ve enjektör açılma/kapanma zamanları belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, bu veriler ve ısı dağılımı grafikleri kullanılarak tutuşma gecikmesi değerleri hesaplanmıştır. Örnek bir yakıt hattı basınç grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Örnek hat basınç ve enjeksiyon grafiği

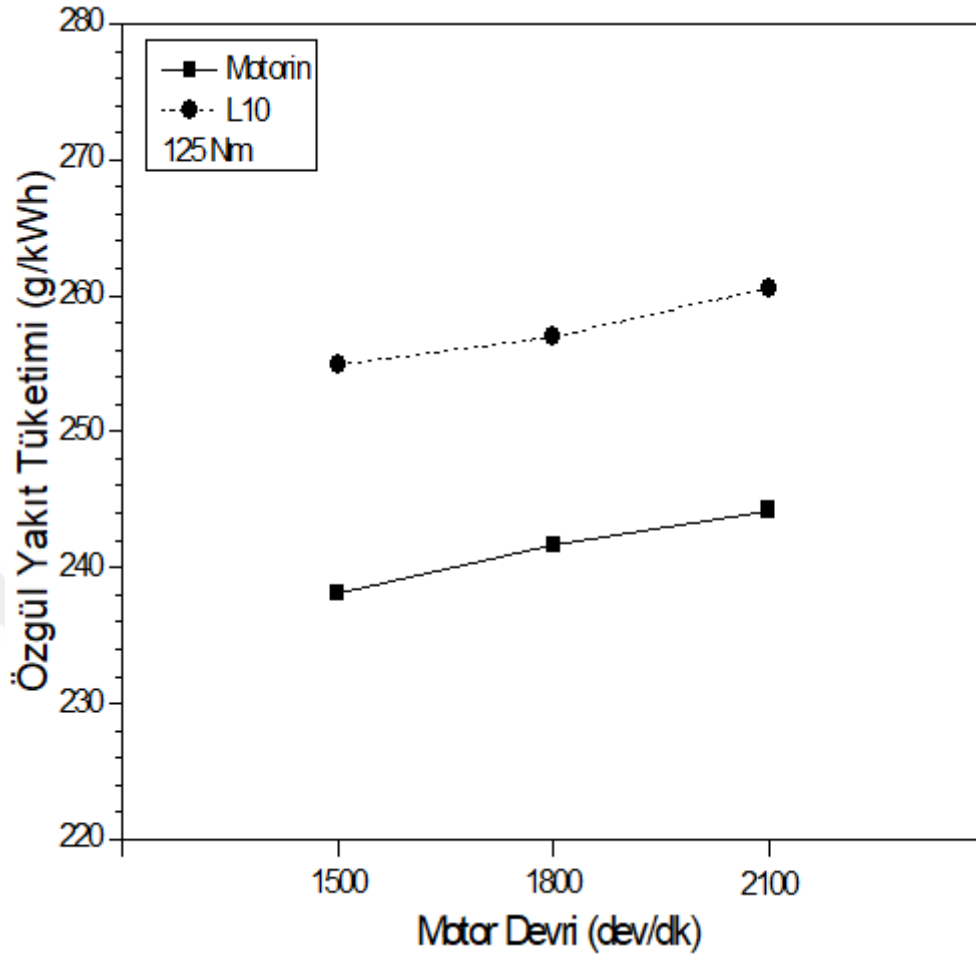
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, iki farklı yakıt için yapılan testlerden elde edilmiş olan sonuçlar incelenerek grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur. Test yakıtlarının motor performans ve karakteristiğine olan etkileri karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

5.1. Özgül Yakıt Tüketimi

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT), içten yanmalı bir motorun birim güç başına karşılık tükettiği yakıt olarak ifade edilmektedir. Motor performansının belirlenmesinde özül yakıt tüketim değeri en önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu deneysel tez çalışması kapsamında sabit yük ve farklı motor devirlerinde yapılan testler sonucu elde edilen özgül yakıt tüketimi değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, motor devrinin artması ile birlikte özgül yakıt tüketimi değerleri her iki yakıt için de bir miktar artış göstermiştir. Yakıtlar kendi arasında %10 pirolize lastik yağı %90 motorin olarak karıştırıldığında test yakıtının özgül yakıt tüketimi değerleri, her test koşulunda motorine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Buna göre, %10 pirolize lastik yağı %90 motorin yakıtının özgül yakıt tüketimi değerlerinin motorine kıyasla 1500 dev/dk motor devrinde yaklaşık %8, 1800 dev/dk motor devrinde yaklaşık %7,8 ve 2100 dev/dk motor devrinde ise yaklaşık %8,1 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen tüketim değerleri aşağıda gösterilmiştir.

Pirolize lastik yağının motorin yakıtına kıyasla daha düşük ısı değere sahip olmasından dolayı aynı şartlar altında motorin yakıtına pirolize lastik yağı ilavesi, yakıt tüketimini arttırmıştır. Benzer çalışmalara bakıldığında, Ağbulut ve diğ. [38] yaptıkları çalışmada da tek silindirli dizel bir motorda pirolize lastik yağını motorine farklı oranlarda (%10, %30 ve %50) ilave ederek karışımlar hazırlamış ve bu yakıtlar ile birbirleri ile aynı motor yüklerinde, yapılan test sonuçlarına göre lastik yağının motorine kıyasla ortalama %10 daha fazla yakıt tüketimine neden olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 5.1. Özgül yakıt tüketimi motor devri grafiği

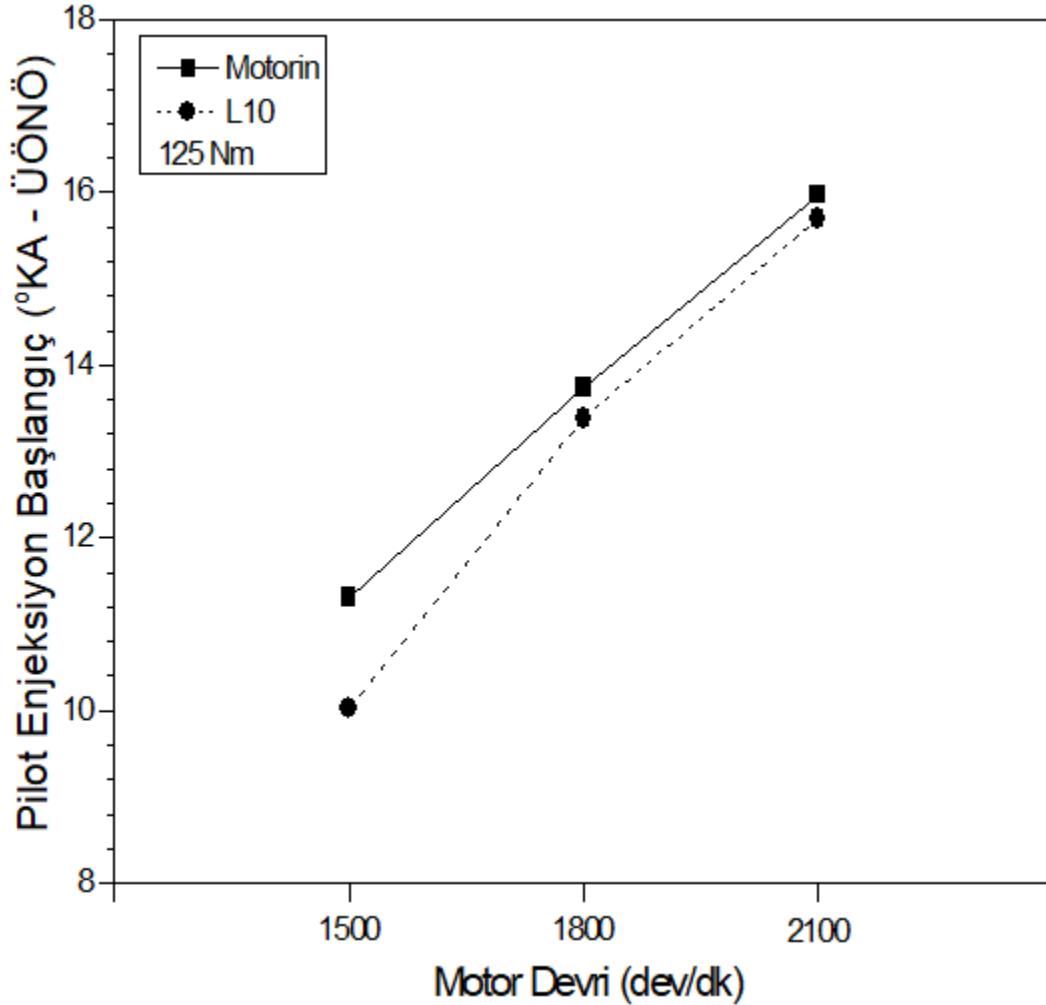
5.2. Enjeksiyon ve Yanma Karakteristikleri

Yapılan çalışmada elde edilen enjeksiyon karakteristiklerine bakıldığında, dizel motorun bir çevrimde iki farklı yakıt enjeksiyonu yaptığı görülmektedir. Birincisi ön enjeksiyon, ikincisi ise ana enjeksiyondur. Testlerde kullanılan yakıtlara göre, motor kontrol ünitesi enjeksiyon zamanlarını krank açısı cinsinden değiştirilerek yakıt püskürtmesi gerçekleştirmektedir.

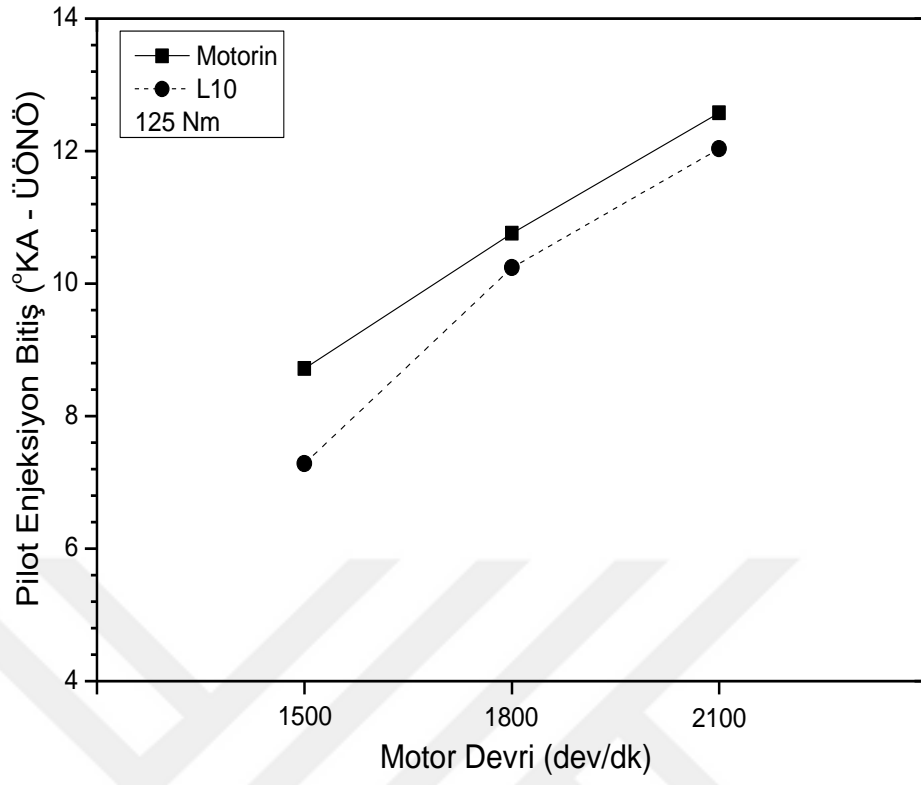
5.2.1. Enjeksiyon sonuçları

Testlerde kullanılan motorun enjeksiyon haritaları üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Motor kontrol ünitesinde (EKÜ) yüklü, üst ölü nokta öncesi (ÜÖNÖ) ve üst ölü nokta sonrası (ÜÖNS) olmak üzere 2 tip enjeksiyon stratejisi vardır. Testler sırasında elde edilen tüm enjeksiyon değerleri krank açısı ($^{\circ}$ KA) cinsinden grafikler halinde Şekil 5.2'den Şekil 5.9'a kadar gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kullanılan yakıtta göre enjeksiyon stratejilerinin farklı olduğu, L10

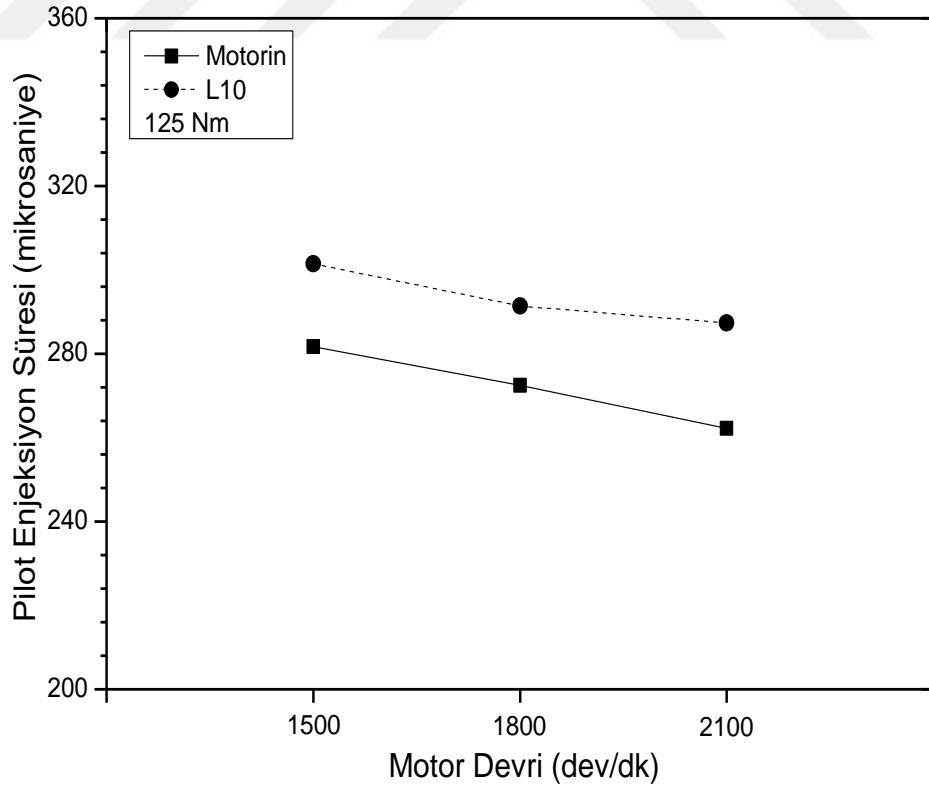
yakıtındaki pilot enjeksiyon başlangıçlarının (PEB) ve pilot enjeksiyon sonu (PES) değerlerinin devir artışıyla birlikte ÜÖNÖ'den uzaklaştığı ve avans konumuna geldiği görülmektedir. Alptekin [39] yapmış olduğu çalışmada, alternatif yakıt kullanılan dizel motorda pilot enjeksiyon başlangıç ve pilot enjeksiyon sonu (PES) değerleri için benzer karakteristiklerdeki sonuçlara ulaşmıştır. Motorin ve L10 yakıtı kendi aralarında karşılaştırıldığında, tüm test şartlarında L10 yakıtının PEB ve PES değerlerinin motorine kıyasla daha erken krank açılarında gerçekleştiği görülmektedir. Pilot enjeksiyon karakteristikleri, süre ve krank açısı cinsinden karşılaştırıldığında ise her test koşulunda L10 yakıtının pilot enjeksiyon sürelerinin motorine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Pilot enjeksiyon süresinin motorine kıyasla ortalama yaklaşık %10 daha fazla olduğu belirlenmiştir.



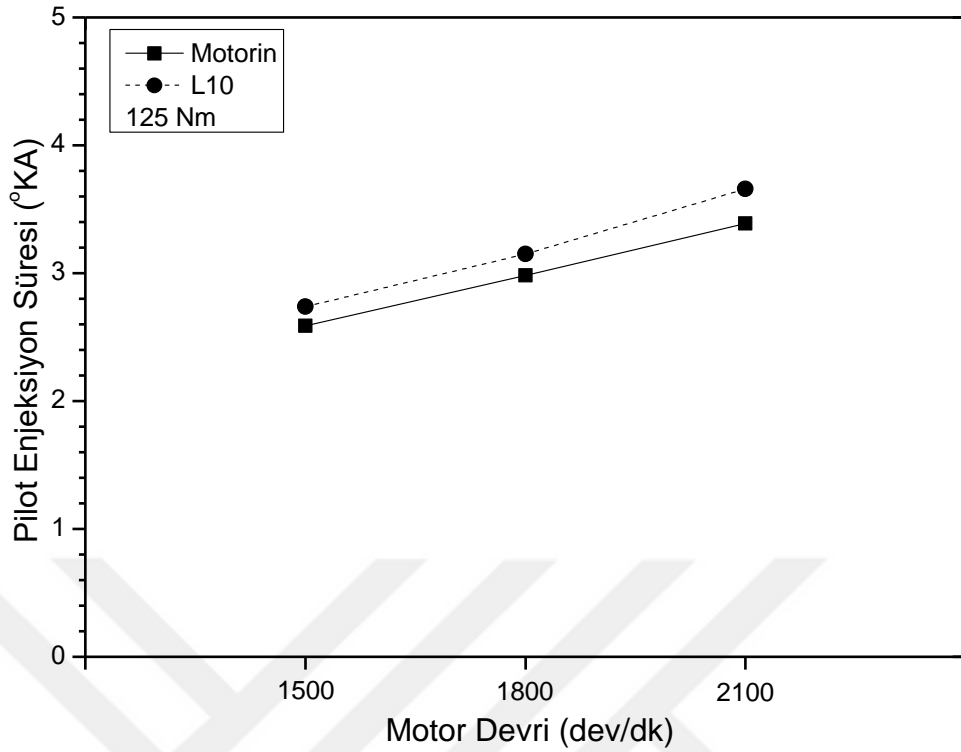
Şekil 5.2 Pilot enjeksiyon başlangıcı değerleri



Şekil 5.3 Pilot enjeksiyon bitiş değerleri



Şekil 5.4. Pilot enjeksiyon süresi değerleri (mikrosaniye)

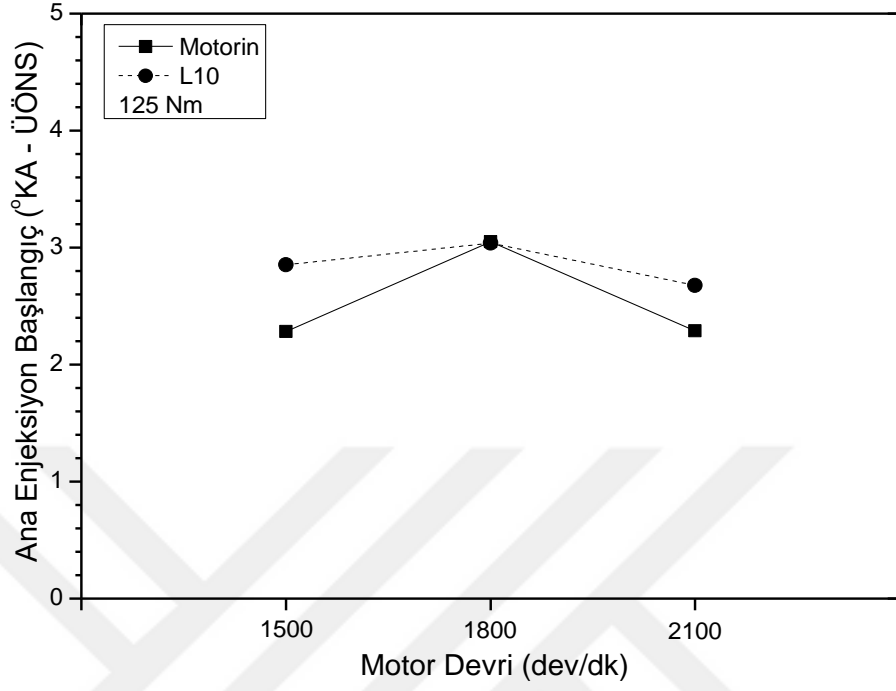


Şekil 5.5. Pilot enjeksiyon süresi değerleri (krank açısı)

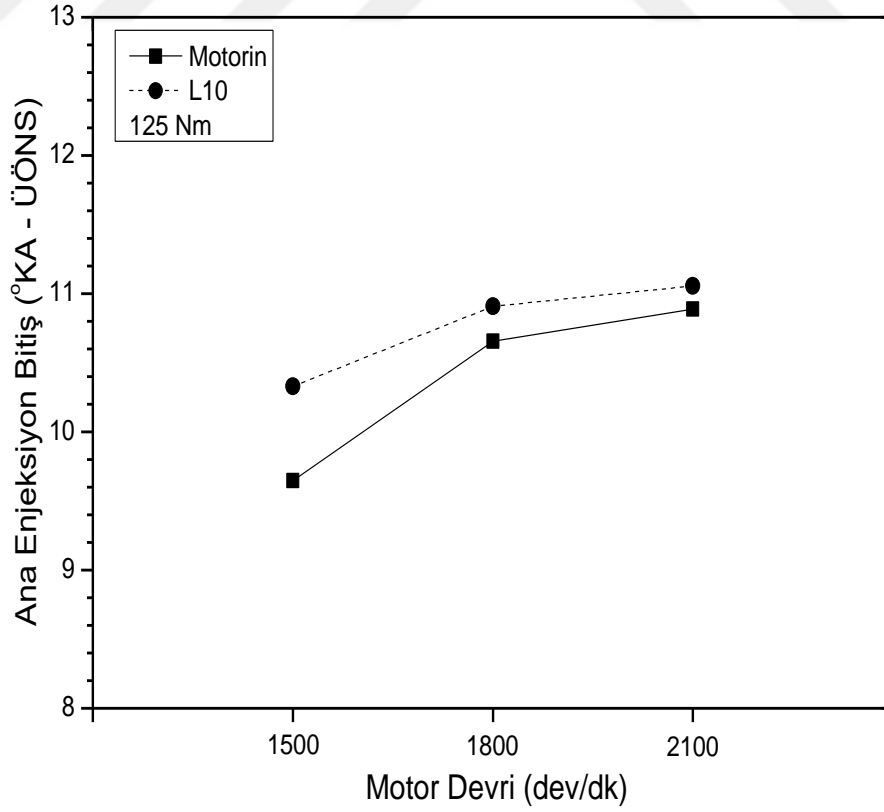
Motor testlerinde elde edilen ana enjeksiyon grafikleri Şekil 5.6'dan Şekil 5.9'a kadar gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında pilot enjeksiyon sonuçlarına benzemeksizin, motorin için ana enjeksiyon başlangıç (AEB) ve ana enjeksiyon bitiş (AEBİ) değerlerinin L10 yakıtına kıyasla daha erken krank açılarındaki gerçekleştiği yani üst ölü noktaya daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Tüm şartlarında, AEB ve AEBİ değerleri için iki test yakıtı arasındaki krank açısı cinsinden fark 1 °KA değerinden daha azdır.

Şekil 5.8 ve 5.9'da görüldüğü gibi, ana enjeksiyon süreleri her iki yakıt için motor devrine bağlı olarak farklı karakteristikler göstermiştir. 1500 ve 1800 dev/dk motor devirlerinde, L10 yakıtının ana enjeksiyon süreleri motorine kıyasla daha uzun iken, 2100 dev/dk motor devrinde motorine kıyasla daha kısa olarak ölçülmüştür. 1500 ve 1800 dev/dk test şartlarında, L10 yakıtının ana enjeksiyon süresi motorine kıyasla yaklaşık %2,5 daha fazla iken, 2100 dev/dk test şartında aralarındaki fark %1'den daha azdır. Farklı test yakıtlarının ana enjeksiyon zamanlamaları ve süreleri motor yükü ve devrine göre birbirinden farklı sonuçlar gösterebilmektedir [40]. Farklı yakıtların aynı devir ve yük koşulları altında test edilmesi esnasında farklı gaz pedalı oranları

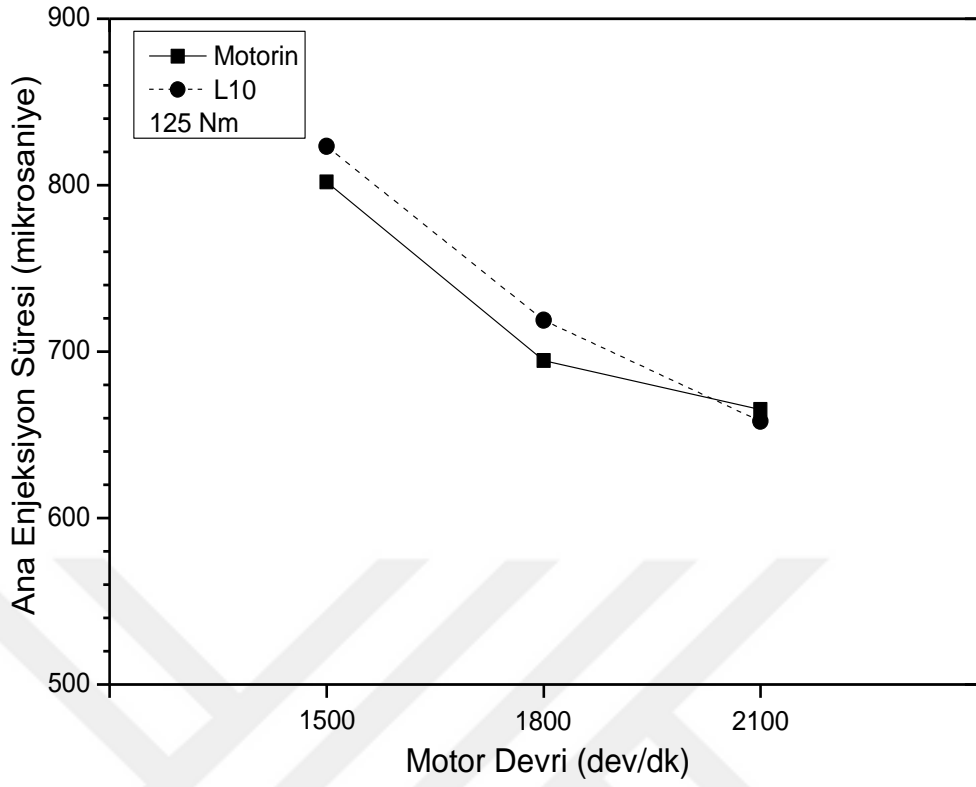
görülürken, pedal pozisyonunun enjeksiyon ve yanma parametreleri üzerinde de önemli bir etkisi olduğu belirtilmektedir [41].



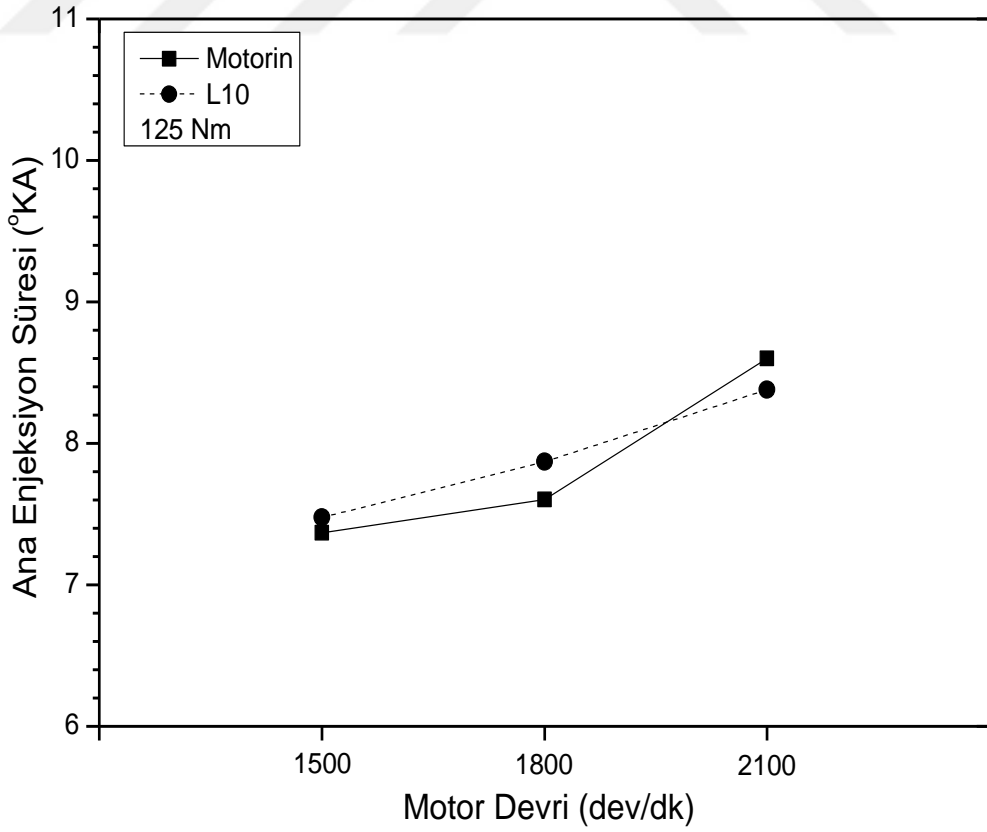
Şekil 5.6. Ana enjeksiyon başlangıç sonuçları



Şekil 5.7. Ana enjeksiyon bitiş sonuçları



Şekil 5.8. Ana enjeksiyon süresi sonuçları (mikrosaniye)



Şekil 5.9. Ana enjeksiyon süresi sonuçları (krank açısı)

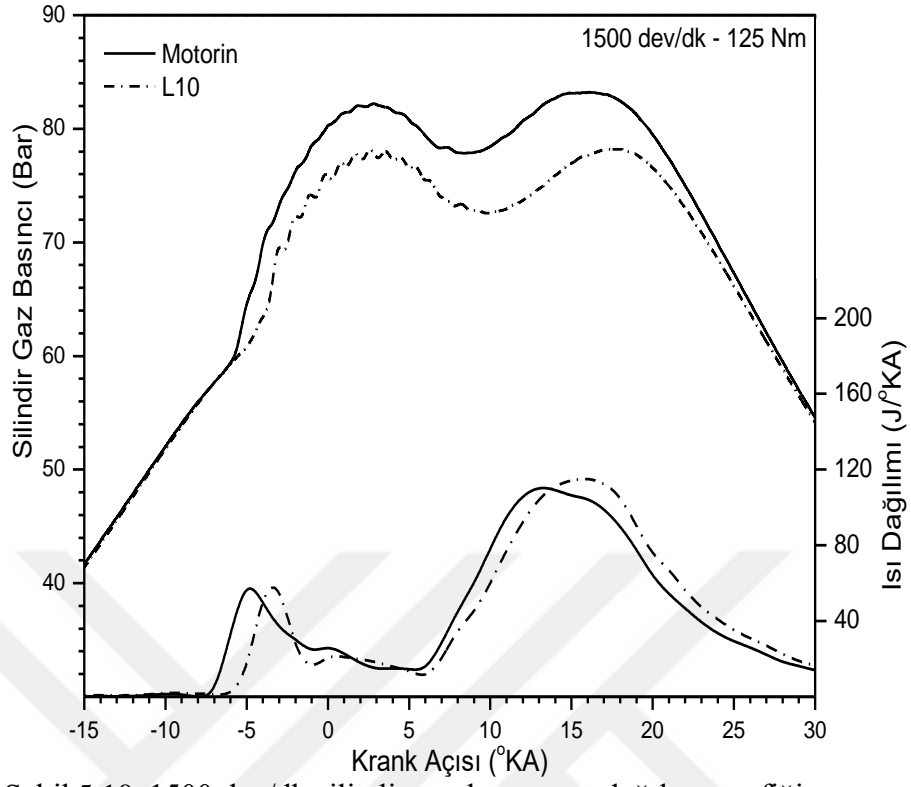
5.2.2. Silindir içi basınç ve ısı dağılımı

Testler sırasında elde edilen silindir içi basınç ve ısı dağılımı grafikleri 1500 dev/dk için Şekil 5.10'da, 1800 dev/dk için Şekil 5.11'de ve 2100 dev/dk için Şekil 5.12'de paylaşılmıştır.

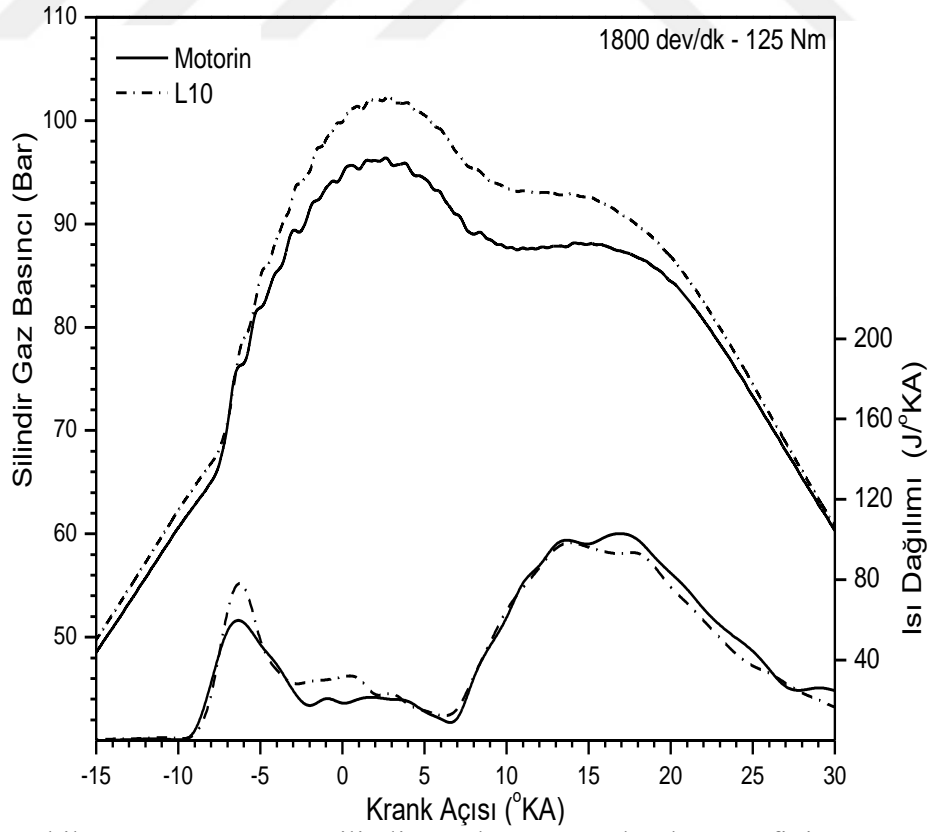
Silindir iç basınç grafikleri incelendiğinde, %10 pirolize lastik yağı %90 motorin yakıtının silindir basıncı değerlerinin 1500 dev/dk motor hızında motorine kıyasla daha düşük olduğu, ancak 1800 ve 2100 dev/dk motor hızlarında ise daha yüksek olduğu görülmektedir. 1500 dev/dk test şartında, L10 yakıtı yaklaşık %6 daha düşük bir maksimum basınç değerine sahipken, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızlarında motorin yakıtının %10 pirolize lastik yağı %90 motorin yakıtına kıyasla yaklaşık %6 ve %4 daha düşük maksimum silindir basınç değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Isı dağılımı sonuçlarına bakıldığında, motorin yakıtının maksimum ısı dağılımı değerleri 1500, 1800 ve 2100 dev/dk için sırasıyla yaklaşık 111,2 J/°KA, 103,7 J/°KA ve 106,8 J/°KA iken bu değerler %10 pirolize lastik yağı %90 motorin yakıtı için sırasıyla 115,6 J/°KA, 99,6 J/°KA ve 99,5 J/°KA olmuştur. Buna göre, %10 pirolize lastik yağı %90 motorin ve motorin yakıtları karşılaştırıldığında, %10 pirolize lastik yağı %90 motorin yakıtının maksimum ısı dağılımının 1500 dev/dk için yaklaşık %3,9 yüksek olduğu, 1800 ve 2100 dev/dk test şartları için ise sırasıyla yaklaşık %4,1 ve %7,3 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

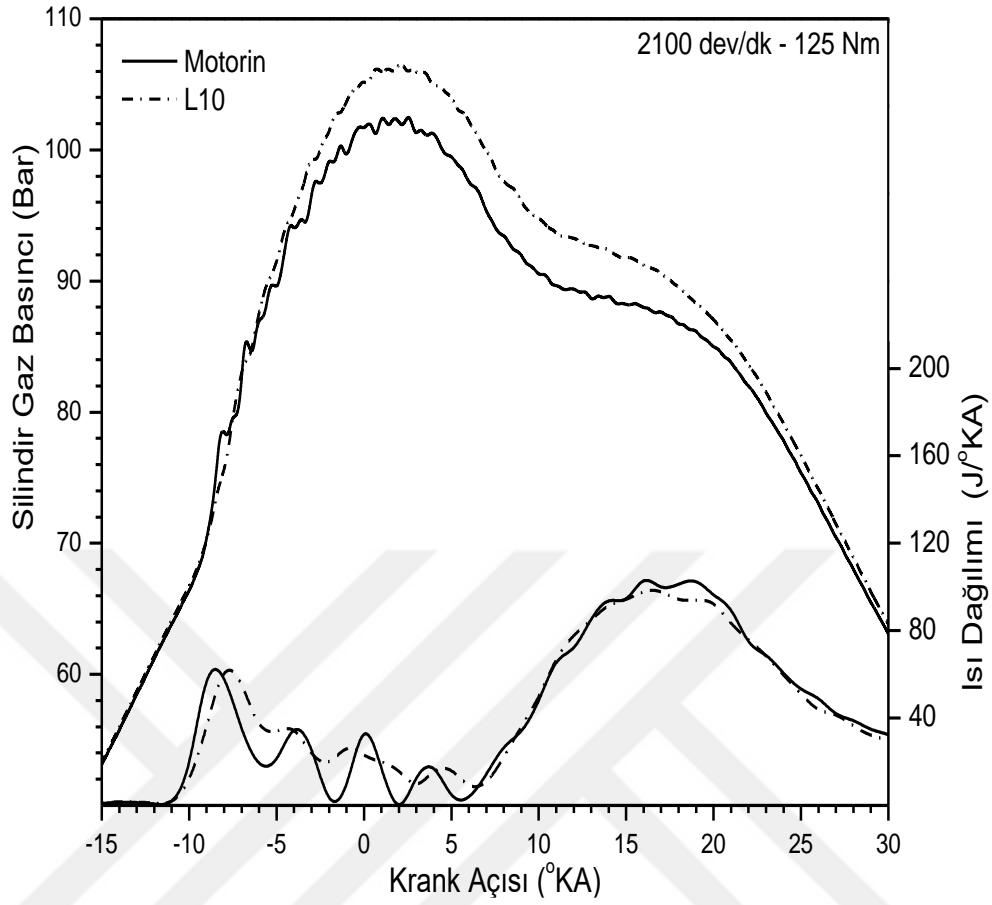
Maksimum ısı dağılımı ve maksimum silindir içi basınç değerlerinin elde edildiği krank açısına bakıldığında, her iki yakıt için de birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Hossain ve diğ. [15] yaptıkları çalışmada da bu tezde elde edilen sonuçlara benzer olarak, motorine pirolize lastik yağı katılması ile maksimum silindir basınçlarının %3 ile %5 arasında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Murugan ve diğ. [21] yaptıkları çalışmada ise, motorine pirolize lastik yağı ilavesi ile birlikte maksimum ısı dağılımı değerlerinde artış olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 5.10. 1500 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği



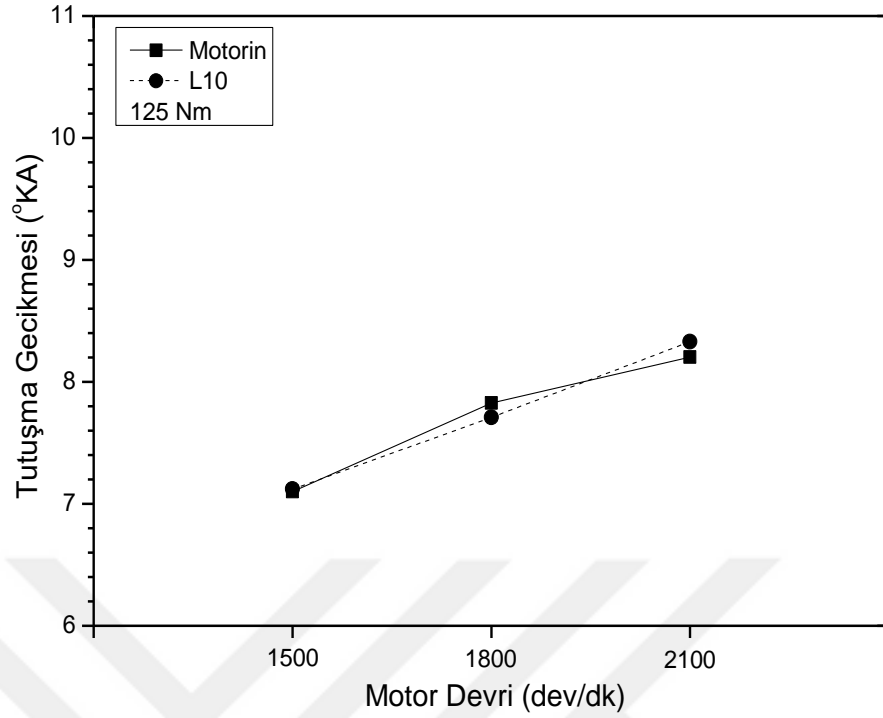
Şekil 5.11. 1800 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği



Şekil 5.12. 2100 dev/dk silindir gaz basıncı ısı dağılımı grafiği

5.2.3. Tutuşma gecikmesi

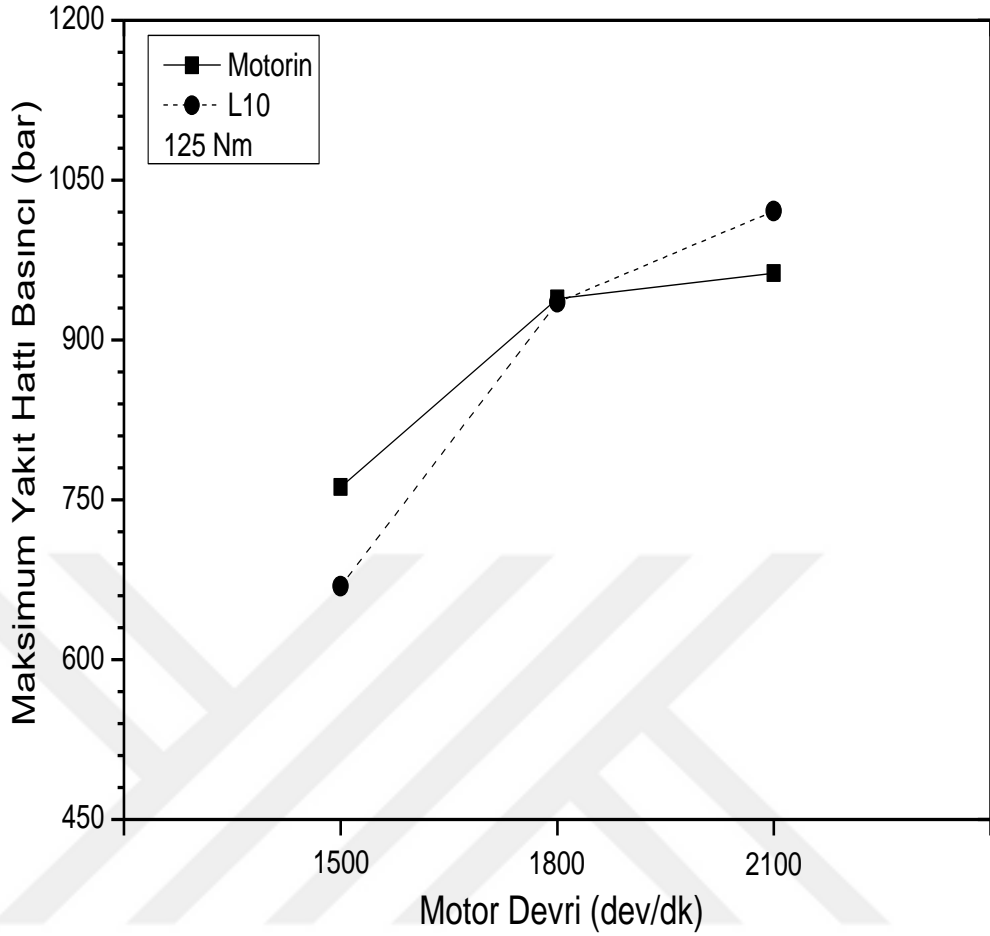
Dizel motorlarda tutuşma gecikmesi, yakıtın silindir içine enjekte edilmesinin başlangıcından yanma başlangıcına kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında tutuşma gecikmesi, pilot enjeksiyon başlangıcı ile %5 yanmış yakıt kesri (CA5) arasındaki süre olarak kabul edilmiştir. Tüm test şartları için elde edilen tutuşma gecikmesi değerleri Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, motor devrinin artması ile birlikte tutuşma gecikmesinin arttığı görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi motor devrinin artması ile birlikte maksimum yanma basınçları artış göstermiştir. Buna rağmen, tutuşma gecikmesi değerlerinin yüksek olmasının nedeni ise enjeksiyon başlangıçlarının motor devrinin artması ile birlikte daha erken krank açılarında gerçekleşmesi olarak gösterilebilir. İki test yakıtı kendi aralarında karşılaştırıldığında ise tutuşma gecikmesi değerlerinde belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.13. Tutuşma gecikmesi sonuçları

5.2.4. Yakıt hattı basınç verileri

Motor kontrol ünitesi, motor üzerinde bulunan sensörlerden gelen geri bildirimine göre yakıt püskürtecek olan enjektöre sinyal göndererek ilgili enjektörü açmaktadır. Bu esnada yakıt kütüğündeki (common-rail) bulunan yakıtın basıncında anlık olarak düşüş görülmektedir. Yakıt hattı üzerinde anlık bir basınç düşüşü görüldüğü bu nokta fiziki enjeksiyon başlangıcı olarak tanımlanmaktadır. Yakıt hattı basıncı, motor devrine, motor yüküne ve özellikle mekanik sistemlerde yakıtın sıkıştırılabilirliğine bağlıdır. Motor testlerinde elde edilen maksimum yakıt hat basınç verileri Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, motor devrinin artması ile birlikte maksimum yakıt hattı basıncı da artış göstermiştir. İki test yakıtı birbiri ile kıyaslandığında, alt devirlerden üst devirlere çıkıldıkça L10 yakıtı için yakıt hattı basıncındaki artışın da daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. L10 yakıtının maksimum yakıt hattı basıncı 1500 ve 1800 dev/dk'da motorinden sırasıyla yaklaşık %13,8 ve %0,3 düşüktür. 2100 dev/dk'da ise L10 yakıtı maksimum yakıt hattı basıncı motorinden yaklaşık %6 fazladır. Kullanılan yakıtların kimyasal özelliklerine göre enjeksiyon sürelerindeki değişim, hat basıncında farklılıklara yol açmıştır. Yakıt hattı basıncı değişimleri motor devri ve motor torkuna bağlı olarak farklılıklar göstermiştir [42, 43].



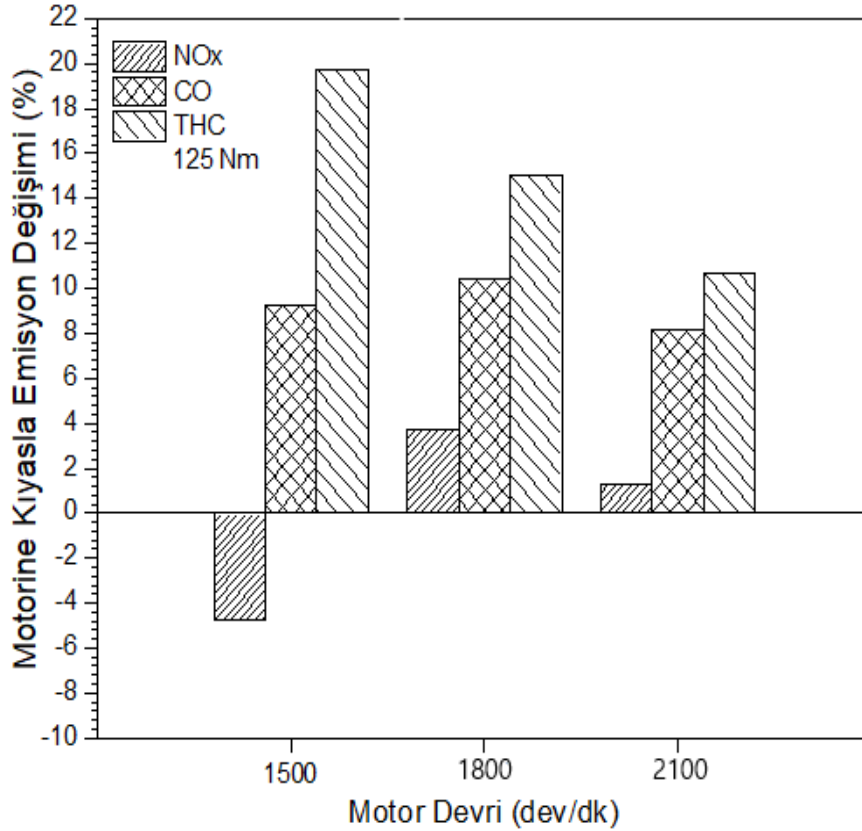
Şekil 5.14. Maksimum yakıt hattı basıncı sonuçları

5.3. Emisyon Sonuçları

Egzoz emisyonları içten yanmalı motorlarda yakıtların yanmaya etkisinin karşılaştırılmasında ve kullanılan içten yanmalı motorun çevreye etkisini belirlemede kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen testler sırasında kullanılan pirolize lastik yağı-motorin karışım yakıtının (L10) motorin yakıtına göre NO_x, CO ve THC emisyonları incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17’de paylaşılmıştır.

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi, 1500 dev/dk motor devrinde L10 yakıtının NO_x miktarı motorine kıyasla daha düşük iken, 1800 ve 2100 dev/dk motor devrinde daha yüksek olarak elde edilmiştir. Silindir içi basınç grafiklerine bakıldığında, NO_x emisyonu değişimine benzer bir eğilim görülmektedir. 1500 dev/dk motor devrinde L10 yakıtı için düşük silindir basıncı nedeniyle NO_x emisyonları motorine kıyasla daha düşük iken 1800 ve 2100 dev/dk motor devirlerinde ise L10 yakıtının silindir içi basınç

değerlerinin motorine kıyasla artması nedeniyle NOx emisyonlarının da arttığı tahmin edilmektedir [44]. L10 yakıtının NOx emisyonu 1500 dev/dk motor devrinde motorine kıyasla yaklaşık %4,8 daha düşük iken, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızında ise sırasıyla yaklaşık %3,7 ve %1,3 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da lastik yağının motorine katılması ile birlikte yapılan motor testleri sonucu; saf motorin ile lastik yağı/motorin karışımlarının NOx emisyonlarının motor devri ve motor yüküne bağlı olarak farklı eğilimler sergilediği ifade edilmiştir [45-47]. Asadi ve diğ. [48] yaptıkları çalışmada, pilot enjeksiyon zamanlamasını ÜÖN'ya yaklaştırmış ve denemeler gerçekleştirmişlerdir. Bu denemeler sonucunda pilot enjeksiyon zamanlamasının ÜÖN'ya yaklaştırılması sonucunda ısı dağılımını etkilediğini, bunula birlikte NOx oranlarında düşüşler görüldüğünü ifade etmişlerdir.



Şekil 5.15. L10 yakıtının motorine kıyasla emisyon değişimi

CO emisyonu renksiz, kokusuz ve zehirleyici bir gazdır. Karbonun CO₂ emisyonuna dönüşmesi için oksijenin yetersiz olduğu durumlarda CO emisyonu ortaya çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, tüm test koşullarında L10 yakıtının CO emisyonu değerlerinin motorine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna

göre, L10 yakıtının CO emisyonları miktarı 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %9,4, %10,2 ve %8,3 daha fazladır.

THC emisyonu silindir içerisindeki yakıtın tam yanmaması sonucunda ortaya çıkan bir emisyondur. Yakıtın setan sayısı ve buna bağlı olarak tutuşma gecikmesi THC emisyonlarını doğrudan etkilemektedir [49, 50]. CO emisyonuna benzer olarak L10 yakıtının THC emisyonları 3 farklı devir için de motorine kıyasla daha yüksektir. Buna göre, L10 yakıtının THC emisyonları miktarı 1500, 1800 ve 2100 dev/dk'da sırasıyla %19,7, %14,9 ve %11,6'daha fazladır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüz şartlarında bir çok noktada enerji ihtiyacı fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Bu tip yakıtların doğaya zarar vermesi ve tükenecek olduğunun bilinmesi üzerine alternatif enerji kaynaklarının araştırılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bunun yanında atıkların bertarafı çevre açısından büyük önem arz etmektedir. Büyük atık potansiyeline sahip atık lastiklerin geri dönüşümü günümüzde ve gelecekte üstünde durulması gereken önemli bir araştırma alanıdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında, atık lastiklerden üretilen pirolize yağın dizel motorlarda kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, pirolize lastik yağı saf motorine %10 katkı olarak bir dizel motorda kullanılmış ve 125 Nm motor yükünde 1500, 1800 ve 2100 dev/dk olmak üzere 3 farklı devirde hidrolik dinamometre yardımı ile testler gerçekleştirilmiştir.

Motor testleri sonucu elde edilen sonuçlara göre, tüm test şartlarında L10 yakıtının motorin yakıtına oranla ortalama %8 daha yüksek bir özgül yakıt tüketimi değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Pirolize lastik yağının düşük ısı değeri nedeniyle L10 yakıtı için daha yüksek yakıt tüketimi değerleri elde edilmiştir.

Yakıt enjeksiyon parametreleri sonuçlarına bakıldığında, L10 yakıtının pilot enjeksiyon başlangıç ve pilot enjeksiyon bitiş zamanlarının motorine kıyasla daha erken krank açılarında gerçekleştiği ve pilot enjeksiyon sürelerinin ise motorine kıyasla ortalama %10 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ana enjeksiyon sonuçlarına göre ise, pilot enjeksiyon sonuçlarında olduğu gibi ana enjeksiyon başlangıcı ve ana enjeksiyon bitiş değerleri motorine göre üst ölü noktaya daha yakın krank açılarında gerçekleşmiştir. L10 yakıtının ana enjeksiyon süresi 2100 dev/dk motor hızında bir miktar daha düşük iken, diğer motor devirlerinde ise daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Yakıt hattı basınçları incelendiğinde, L10 yakıtının maksimum yakıt hattı basıncı 1500 dev/dk motor hızında yaklaşık 92 bar daha düşük iken, motor hızı arttıkça

artmış ve 2100 dev/dk motor hızında motorine kıyasla yaklaşık 58 bar daha yüksek bir değere sahip olmuştur.

Silindir içi gaz basıncı sonuçlarına göre, L10 yakıtının maksimum silindir basıncı değeri motorine kıyasla 1500 dev/dk motor hızında daha düşük, 1800 ve 2100 dev/dk motor hızında ise ortalama %5 daha fazla olarak tespit edilmiştir. Isı dağılımı sonuçları değerlendirildiğinde, tüm test şartları için maksimum ısı dağılımı oranlarının her iki test yakıtı için de birbirine yakın olduğu görülmüştür. Isı dağılımı ve enjeksiyon parametrelerine göre hesaplanan tutuşma gecikmesi değerleri ise her iki yakıt için de birbirine oldukça yakın değerler göstermiştir.

Emisyonlar açısından bakıldığında ve tüm test şartlarının ortalaması alındığında L10 yakıtının çevre açısından motorine kıyasla daha kötü bir karakteristiğe sahip olduğu belirlenmiştir. 1500 dev/dk motor hızında NOx emisyonu hariç, diğer tüm test şartlarında L10 yakıtının NOx, CO ve THC emisyonlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. L10 yakıtının CO ve THC emisyonları ise motorine kıyasla tüm test şartlarında ortalama olarak yaklaşık %9,3 ve %15,4 daha fazladır.

Tüm sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, atık lastik yağının motorine katkı olarak kullanılması ile birlikte egzoz emisyonlarının artış gösterdiği ve yakıt tüketiminin de bir miktar fazla olduğu görülmüştür. Yanma ve enjeksiyon parametreleri ise birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak şu unutulmamalıdır ki; tüm testler motor kontrol ünitesinin orijinal yazılımı kullanılarak yapılmış ve motor enjeksiyon parametrelerine herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. Bunun yanında, motorine katkı olarak kullanılan atık lastik yağı piroliz prosesi sonucu distile edilmemiş halde kullanılmıştır. Tüm bunlar dikkate alındığında, distile edilmiş atık lastik yağı kullanımı ve motor enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte daha olumlu sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. İleride yapılacak olan çalışmalar da bu hususlar dikkate alınabilir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.tpao.gov.tr/file/2003/sektor-raporlari-2018-2735e5d18395d1ba.-pdf/>, (Ziyaret Tarihi: 04 Ocak 2021).
- [2] https://insamer.com/tr/dunyanin-enerji-gorunumu_388.html/, (Ziyaret Tarihi: 23 Aralık 2020).
- [3] https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6_dunyadaveturkiyede.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 04 Ocak 2021).
- [4] <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019/>, Ziyaret Tarihi: (04 Ocak 2021).
- [5] <https://www.tech-worm.com/turkiyede-petrol-cikarilan-yerler-rafineriler/>, (Ziyaret Tarihi: 11 Eylül 2020).
- [6] Hürdoğan E., Thermodynamic Analysis of a Diesel Engine Fuelled With Diesel and Peanut Biodiesel, *Environ Prog Sustain Energy*, 2016, **35**(3), 891-897.
- [7] <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Ulastirma-ve-Haberlesme-112/>, (Ziyaret Tarihi: 23 Aralık 2020).
- [8] <https://www.petform.org.tr/arama-uretim-sektoru/turkiyede-petrol-uretimi/>, (Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2020).
- [9] http://www.osd.org.tr/sites/1/upload/files/YILLIK_2020-5479.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 23 Aralık 2020).
- [10] <https://www.etrma.org/tyres/>, (Ziyaret Tarihi: 25 Aralık 2020).
- [11] Dung N.A., Mhodmonthin A., Wongkasemjit S., Jitkarna S., Effects of ITQ-21 and ITQ-24 as Zeolite Additives on the Oil Products Obtained from the Catalytic Pyrolysis of Waste Tire, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2009, **85**(1), 338–344.
- [12] Kumaravel S.T., Murugesan A., Vijayakumar C., Thenmozhi, M., Enhancing the Fuel Properties of Tyre Oil Diesel Blends by Doping Nano Additives for Green Environments, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **240**(1), 118-128.
- [13] Pilusa J., Muzenda E., Combustion Characteristics of Waste Tyre Pyrolysis Fuel as Industrial Burner Fuel, *Developments in Combustion Technology*, 2016, **5772**(1), 97-112.
- [14] İlkılıç C., Aydın H., Fuel Production from Waste Vehicle Tires by Catalytic Pyrolysis and its Application in a Diesel Engine, *Fuel Processing Technology* 2011, **92**(1), 1129–1135.

- [15] Hossain F. M., Nabi M. N., Rainey T. J., Bodisco T., Bayle, T., Randall D., Brown R. J., Novel Biofuels Derived from Waste Tyres and Their Effects on Reducing Oxides of Nitrogen and Particulate Matter Emissions, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **242**(1), 2-9.
- [16] Bodisco T. A., Rahman S. M. A., Hossain F. M., Brown R. J., On-Road Nox Emissions of a Modern Commercial Light-Duty Diesel Vehicle Using a Blend of Tyre Oil and Diesel, *Energy Reports*, 2019, **5**(1), 349–356.
- [17] Hariharan, S., Murugan, S., Nagarajan, G., Effect of Diethyl Ether on Tyre Pyrolysis Oil Fueled Diesel Engine, *Fuel*, 2013, **104**(1), 109–115.
- [18] Vihar R Seljak T, Opresnik SR, Katrasnik T., Combustion Characteristics of Tire Pyrolysis Oil in Turbo Charged Compression Ignition Engine, *Fuel*, 2015, **150**(1), 226–235.
- [19] Murugan S., Ramaswamy M. C., Nagarajan G., The use of Tyre Pyrolysis Oil in Diesel Engines, *Waste Management*, 2008, **28**(12), 2743–2749.
- [20] Hürdoğan, E., Ozalp C., Kara O., Ozcanli M. (2017). Experimental Investigation on Performance and Emission Characteristics of Waste Tire Pyrolysis Oil–Diesel Blends in a Diesel Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(36), 23373–23378.
- [21] Murugan, S., Ramaswamy, M. C., & Nagarajan, G., A Comparative Study on The Performance, Emission and Combustion Studies of a DI Diesel Engine Using Distilled Tyre Pyrolysis Oil–Diesel Blends, *Fuel*, 2008, **87**(1), 10-11.
- [22] Giakoumis E. G., Rakopoulos C. D., Dimaratos A. M., Rakopoulos D. C., Exhaust Emissions of Diesel Engines Operating Under Transient Onditions with Biodiesel Fuel Blends, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, **38**(5), 691–715.
- [23] Martinez JD, Puy N, Murillo R, Garcí'a T, Navarro MV, Mastral AM., Waste Tyre Pyrolysis a Review, *Renew Sustain Energy*, 2013, **23**(1), 179-213.
- [24] www.osd.org.tr/sites/1/upload/files/2017_Kuresel_Degerlendirme_Raporu-4349.pdf/, (Ziyaret Tarihi: 04 Ocak 2021).
- [25] <http://www.plastik-ambalaj.com/tr/plastik-ambalaj-makale/2452-arac-lastiklerinin-geri-doenuesuemue-uezerine-bir-derleme/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2020).
- [26] Kumaravel S. T., Murugesan A., Kumaravel A., Tyre Pyrolysis Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engines a Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **60**(1), 1678–1685.
- [27] Demirbas A, Demirbas MF., Importance of Algae Oil as a Source of Biodiesel, *Energy Convers Manag*, 2011, **52**(1), 163-170.

- [28] Karagöz M., Ağbulut Ü., Sarıdemir S., Waste to Energy Production of Waste Tire Pyrolysis Oil and Comprehensive Analysis of Its Usability in Diesel Engines, *Fuel*, 2020, **275**(1), 1-8.
- [29] Demirci Y., Dere T., Gönüllü MT., Piroлиз Teknolojisini Kullanarak Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden Aktif Karbon Üretimi ve Fizibilite Çalışması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2014, **1**(4) 31-41
- [30] Çataklı T., Ergüder T. H., Atık Lastik Yönetiminde Çevre Dostu Bir Yaklaşım, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2019 **2**(1) , 20-34.
- [31] Cui H., Yang J., Liu Z., Thermogravimetric Analysis of Two Chinese Used Tires, *Thermochimica Acta*, 1999, **333**(1), 173-175.
- [32] Cunliffe A.M., Williams P.T., Composition of Oils Derived from the Batch Pyrolysis of Tyres, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1998, **44**(1), 131-152.
- [33] Seidelt S., Muller-Hagedorn M., Bockhorn H., Description of Tire Pyrolysis by Thermal Degradation Behaviour of Main Components, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006 **75**(1), 11-18.
- [34] Huang H., Tang L., Pyrolysis Treatment of Waste Tire Powder in a Capacityely Coupled RF Plasma Reactor, *Energy Conversion and Management*, 2009 **50**(1), 611-617.
- [35] <http://erpekmuhendislik.com/lastik.php/>. (Ziyaret Tarihi: 04 Ocak 2021).
- [36] Yakaboylu O., Atık Lastik Yönetimi ve Atık Lastik Piroлиз Model Tesisi İçin Yapılabilirlik Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 506081014.
- [37] Doğan O., Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2018, **7**(4), 134-141.
- [38] Ağbulut Ü., Karagöz M., Sarıdemir S., Production of Waste Tire Pyrolysis Oil and Comprehensive Analysis of its Usability in Diesel Engines, *Fuel*, 2020, **275**(1), 117-244.
- [39] Alptekin E, Emission, İnjeksiyon and Combustion Characteristics Of Biodiesel and Oxygenated Fuel Blends İn A Common Rail Diesel Engin, *Energy*, 2017, **119**(1), 44-52.
- [40] Alptekin E, Şanlı H., Çanakcı M., Combustion and Performance Evaluation Of A Common Rail DI Diesel Engine Fueled With Ethyl and Methyl Esters, *Applied Thermal Engineering*, 2019, **149**(1), 180-191.
- [41] Türkcan A., Effects Of High Bioethanol Proportion İn The Biodiesel-Diesel Blends İn A CRDI Engine, *Fuel*, 2017, **223**(2), 53-62.

- [42] Tziourtzioumis D., Stamatelos A., Effects of a 70% Biodiesel Blend on the Fuel Injection System Operation During Steady-State and Transient Performance of a Common Rail Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 2012, **60**(1), 56-67.
- [43] Dzida M., Prusakiewicz P., The Effect of Temperature and Pressure on The Physicochemical Properties of Petroleum Diesel Oil and Biodiesel Fuel, *Fuel*, 2008, **87**(10-11), 1941–1948.
- [44] Cybulski A., Moulijn J.A., *Structured Catalysts and Reactors*, e-book, CRC Press, Florida, 2005.
- [45] Shahir V. K., Jawahar C. P., Vinod V., Suresh P. R., Experimental Investigations on The Performance and Emission Characteristics of a Common Rail Direct Injection Engine Using Tyre Pyrolytic Biofuel, *Engineering Sciences*, 2020, **32**(1), 78-84.
- [46] Frigo S., Seggiani M., Puccin, M., Vitolo S., Liquid Fuel Production from Waste Tyre Pyrolysis and its Utilisation in a Diesel Engine, *Fuel*, 2014, **116**(1), 399–408.
- [47] Vihar R., Zvar Baskovic U., Seljak T., Katrasnik T., Combustion and Emission Formation Phenomena of Tire Pyrolysis Oil in a Common Rail Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 2017, **149**(1), 706–721.
- [48] Asadi, A., Kadijani O. N., Doranehgard M. H., Bozorg M. V., Xiong Q., Shadloo M. S., Li L. K. B., Numerical Study on The Application of Biodiesel and Bioethanol in a Multiple Injection Diesel Engine, *Renewable Energy*, 2019, **150**(1), 1019-1029.
- [49] Zvar Baskovic U., Vihar R., Seljak T., & Katrasnik T., Feasibility Analysis of 100% Tire Pyrolysis Oil in a Common Rail Diesel Engine, *Energy*, 2017, **137**(1), 980–990.
- [50] Islam M. N., Nahian M. R., Improvement of Waste Tire Pyrolysis Oil and Performance Test with Diesel in CI Engine, *Journal of Renewable Energy*, 2016, **1155**(1), 1-8.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **İsmailoğlu E.**, Alptekin E., CRDI Bir Dizel Motorda Farklı Tipteki Biyodizellerin Yanma ve Enjeksiyon Karakteristikleri, *Uluslararası Fen Bilimleri Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa ilinde tamamladıktan sonra 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümünde öğrenim görmeye başladı. Üniversite yılları boyunca bölümün yakıt ve motor test laboratuvarlarında çalıştı ve 2017 yılında mezun oldu. Mezuniyet sonrası HexagonStudio adlı bir firmada Test Validasyon Mühendisi olarak görev alırken aynı zamanda yüksek lisans eğitimine başladı. Şu an Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi şirketinde Test Validasyon Mühendisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.

