



**ATIK PLASTİK YAĞININ DİZEL MOTORDA
KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE
ETKİSİ VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU**

**2025
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Sedat ŞEN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**ATIK PLASTİK YAĞININ DİZEL MOTORDA KULLANIMININ MOTOR
PARAMETRELERİNE ETKİSİ VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU**

Sedat ŞEN

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
OCAK 2025**

Sedat ŞEN tarafından hazırlanan “ATIK PLASTİK YAĞININ DİZEL MOTORDA KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ŞEN (BAİBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Samet USLU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AYDIN (PAÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Sedat ŞEN

ÖZET

Doktora Tezi

ATIK PLASTİK YAĞININ DİZEL MOTORDA KULLANIMININ MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Sedat ŞEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

Ocak 2025, 165 sayfa

Artan dünya nüfusunun enerji talebini karşılamak için alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alternatiflerden birisi de atık plastiklerin piroliz yöntemi ile akılcı bir şekilde geri kazanımıdır. Atık plastiklerden elde edilen sıvı içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilir değerli bir üründür. Bu çalışmada, atık XLPE kablolardan piroliz yolu ile elde edilen atık plastik yağı (APY) ve dizel yakıtı (D100) karışımlarının (hacimsel olarak %10, %20, %30, %40 ve %50), dört zamanlı, tek silindirli bir dizel motorda performans, yanma ve egzoz emisyonlarına etkilerini belirlemek amacıyla farklı motor yüklerinde (750, 1500, 2250, 3000, 3750, 4500 W) ve dört farklı püskürtme basıncında (210, 220, 230 ve 240 bar) değişimlerinin etkileri deneysel olarak incelenmiş ve yanıt yüzey metodolojisi (RSM) ile en uygun performans ve egzoz emisyonları belirlenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Elde edilen deney sonuçları ile iki faktörlü merkezi kompozit tam tasarım kullanılarak varyans analizi destekli bir cevap yüzey modeli oluşturulmuş ve en iyi fren efektif verimi (FEV), fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), azot oksit (NO_x) ve is emisyonu seviyelerine karşılık gelen optimum APY (atık plastik yağı) oranı ve motor yükü ve püskürtme basıncı değerleri tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda APY ve karışım yakıtlarının dizel yakıtla kıyasla performans, yanma ve egzoz emisyonları analiz edilerek değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmada en yüksek fren efektif verim değerleri dizel yakıtı ile yapılan çalışmalarda elde edilmiştir. Karışım yakıtları içerisinde atık plastik yağı oranının artmasıyla fren efektif verim değerlerinin azaldığı özgül yakıt tüketimlerinin ise arttığı görülmüştür. Karışım içerisindeki atık plastik yağı oranının artmasıyla maksimum silindir basıncı değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde egzoz gaz sıcaklıkları, azot oksit, karbonmonoksit ve is emisyonları da aynı eğilimle atık plastik yağı oranının artmasıyla azalmıştır. Isı açığa çıkışlarının en yüksek değerlerinin dizel yakıtı ile gerçekleştiği tespit edilmiştir. Püskürtme basıncının azaltılması tüm deney yakıtlarının fren efektif verim değerlerinin düşmesine özgül yakıt tüketimlerinde ise artışa sebep olmuştur. Püskürtme basıncının azaltılmasıyla azot oksit emisyonları ve egzoz gaz sıcaklıkları azalırken diğer emisyonlar karbonmonoksit, hidrokarbon ve is emisyonlarında artış belirlenmiştir. Ayrıca püskürtme basıncının azaltılması ile tüm yakıtların maksimum silindir gaz basınç değerleri azalmış ve konumu ÜÖN'den uzaklaşmıştır.

RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasında ise optimum püskürtme basıncının 240 bar olduğu, atık plastik yağ oranının %18,18 ve optimum motor yük değerinin ise 2340,91 W olduğu belirlenmiştir. Optimum püskürtme basıncı, atık plastik yağ oranı ve motor yüküne karşılık gelen yanıtlar için maksimum fren efektif verim değeri %21,53, minimum özgül yakıt tüketimi, egzoz gaz sıcaklığı, azot oksit, hidrokarbon, karbonmonoksit ve is emisyonu değerleri ise sırasıyla 360,2895 g/kWh, 265,44 °C, 360,22 ppm, 16,1 ppm, %0,0318 ve %0,9091 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca aynı şartlarda deney yapılarak optimizasyonun sonuçları doğrulanmış ve yanıtlar ile deney sonuçları arasındaki ortalama hata oranları %0,62 ile %4,64 arasında olduğu belirlenmiştir. Çalışma neticesinde birçok parametre özelinde yakıtların incelenmesi

gerektiğinden dolayı oluşturulan RSM modelinin uygun olduğu yapılan doğrulama deneyi ile tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : XLPE, Atık plastik, Geri dönüşüm, Piroliz, Alternatif yakıt, Dizel motor, Emisyon, Yanıt yüzey yöntemi.

Bilim Kodu : 91413



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE EFFECT OF USING WASTE PLASTIC OIL IN A DIESEL ENGINE ON ENGINE PARAMETERS AND OPTIMIZATION THROUGH THE RESPONSE SURFACE METHOD

Sedat ŞEN

**Karabuk University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK

January 2025, 165 pages

Alternative energy sources are needed to meet the energy demand of the increasing world population. One of these alternatives is the pyrolysis method's rational recovery of waste plastics. The liquid from waste plastics is a valuable product that can be used as an alternative fuel in internal combustion engines. In this study, to determine the effects of waste plastic oil (APY) and diesel fuel (D100) mixtures (10%, 20%, 30%, 40%, and 50% by volume) obtained by pyrolysis from waste XLPE cables on performance, combustion and exhaust emissions in a four-stroke, single cylinder diesel engine at different engine loads (750, 1500, 2250, 3000, 3750, 4500 W) and four different injection pressures (210, 220, 230, and 240 bar) were experimentally investigated, and the optimum performance and exhaust emissions were determined by response surface methodology (RSM).

With the obtained experimental results, a two-factor central composite complete design was used.

A response surface model supported by analysis of variance was created. The optimum APY (waste plastic oil) ratio, engine load, and injection pressure values corresponding to the best brake effective efficiency (FEV), brake specific fuel consumption (BSCF), carbon monoxide (CO), hydrocarbon (HC), nitrogen oxides (NO_x) and soot emission levels were determined. As a result of the experimental studies, the performance, combustion, and exhaust emissions of APY and blended fuels compared to diesel fuel were analyzed and evaluated. The experimental study obtained the highest brake effective efficiency values with diesel fuel. It was observed that the brake effective efficiency values decreased, and the specific fuel consumption increased with the increase in the waste plastic oil ratio in the mixture fuels. It was determined that the maximum cylinder pressure values decreased with the increase in the waste plastic oil ratio in the mixture. Similarly, exhaust gas temperatures, nitrogen oxide, carbon monoxide, and soot emissions decreased, following the same trend as the increase in the waste plastic oil ratio. It was determined that the highest values of heat releases were realized with diesel fuel. Reducing the injection pressure caused a decrease in the brake effective efficiency values of all experimental fuels and increased specific fuel consumption. While nitrogen oxide emissions and exhaust gas temperatures decreased with decreasing injection pressure, other emissions such as carbon monoxide, hydrocarbon and soot increased. In addition, all fuels' maximum cylinder gas pressure values decreased with the reduction of the injection pressure, and the position moved away from the TDC. The optimization study performed with RSM determined that the optimum injection pressure was 240 bar, the waste plastic oil ratio was 18.18%, and the optimum engine load value was 2340.91 W. For the responses corresponding to the optimum injection pressure, waste plastic oil ratio, and engine load, the maximum brake effective efficiency value was determined as 21.53%, and the minimum specific fuel consumption, exhaust gas temperature, nitrogen oxide, hydrocarbon, carbon

monoxide and soot emission values were determined as 360.2895 g/kWh, 265.44 °C, 360.22 ppm, 16.1 ppm, 0.0318%, and 0.9091%, respectively. In addition, the optimization results were verified by performing experiments under the same conditions, and it was determined that the average error rates between the responses and the experimental results were between 0.62% and 4.64%. As a result of the study, it was determined by the verification experiment that the RSM model was appropriate since fuels should be examined in many parameters.

Key Word : XLPE, Waste plastic, Recycling, Pyrolysis, Alternative fuel, Diesel engine, Emission, Response surface method.

Science Code : 91413

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, değerli zamanını ayıran, bilimsel bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, kendimi geliştirmemde önemli bir rol oynayan, yıllardır engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her daim olumlu tutumuyla beni motive eden, öğrencisi olmaktan dolayı her zaman gurur duyacağım çok kıymetli hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimin her aşamasında değerli zamanını ayıran, desteğini esirgemeyen, bilgisi, tecrübesi, yorumları ve tavsiyeleriyle rehberlik eden, Sayın Doç. Dr. Samet USLU'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi. Mustafa AYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmaların ilk aşamasından son anına kadar birlikte yol aldığımız değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Yavuz Selim ARI'ya ve Öğr. Gör. Mehmet Cem MENTEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma KBÜBAP-21-DS-059 ve KBÜBAP-21-DR-060 numaralı projeler ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme, eşime ve hayatıma neşe katan canım kızıma tüm kalbimle sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. ATIK PLASTİKLERDEN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA KULLANIMI.....	4
2.2. YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ.....	14
2.3. ALTERNATİF YAKITLARDA RSM (RESPONSE SURFACE METHODOLOGY) UYGULAMALARI	18
BÖLÜM 3	22
PLASTİKLER VE GERİ KAZANIMI.....	22
3.1. PLASTİKLER	22
3.2. PLASTİK TÜRLERİ.....	23
3.2.1. Polietilen (PE).....	23
3.2.2. Polietilen Tereftalat (PET).....	25
3.2.3. Polipropilen (PP)	26

	<u>Sayfa</u>
3.2.4. Polivinil Klorür (PVC)	26
3.2.5. Polistiren (PS).....	26
3.3. PLASTİKLERİN KULANIM ALANLARI	27
3.4. ATIK PLASTİKLER	28
3.5. ATIK PLASTİKLERİN GERİ KAZANIMI VE ÖNEMİ	30
3.5.1. Birincil ve İkincil Geri Kazanım	31
3.5.2. Üçüncül Geri Kazanım (Kimyasal Geri Kazanım).....	32
 BÖLÜM 4	 39
DİZEL MOTORLARDA ALTERNATİF YAKIT KULLANIMI VE YAKIT ÖZELLİKLERİ	 39
4.1. ALTERNATİF YAKITLAR.....	39
4.1.1. Alkoller	40
4.1.2. Biyoetanol.....	41
4.1.3. Doğalgaz (CNG).....	42
4.1.4. Hidrojen	43
4.1.5. Biyodizel.....	44
4.1.6. Lastik, Plastik, Ambalaj Atıkları ve Atık Madeni Yağlardan Elde Edilen Alternatif Yakıtlar	 45
 BÖLÜM 5	 48
DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİ, YANMA VE EMİSYONLARIN OLUŞUMU	 48
5.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE PERFORMANSA ETKİLERİ	 48
5.1.1. Viskozite	48
5.1.2. Yoğunluk	49
5.1.3. Setan Sayısı.....	50
5.1.4. Isıl Değer	51
5.1.5. Kükürt İçeriği.....	51
5.1.6. Uçuculuk.....	51
5.1.7. Parlama Noktası.....	52
5.2 DİZEL MOTORLARDA YANMA VE SAFHALARI	52

	<u>Sayfa</u>
5.3.DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU	56
5.3.1. CO Emisyonları	56
5.3.2. HC Emisyonları	57
5.3.3. NO _x Emisyonları.....	58
5.3.4. İs (Partikül Madde) Emisyonları	58
BÖLÜM 6	59
MATERYAL YÖNTEM	59
6.1. DENEY DONANIMI.....	60
6.1.1. Deney Motoru.....	60
6.1.2. Yükleme Ünitesi	62
6.1.3. Yakıt Tüketimi Ölçüm Tertibatı	63
6.1.4. Emisyon Ölçüm Cihazı.....	65
6.1.5. Egzoz Gaz Sıcaklığı Ölçümü.....	66
6.1.6. Silindir İçi Basınç Ölçüm Tertibatı	67
6.2. DENEYLERDE KULLANILAN HESAPLAMALAR	71
6.2.1. Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT).....	71
6.2.2. Fren Efektif Verim (FEV)	71
6.2.3. Silindir İçi Basınç	72
6.2.4. Motor Hacminin Anlık Değişimi.....	73
6.2.5. Isı Yayılım Oranı	75
6.3. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN TEST YAKITLARI	77
6.4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ İLE (RSM) OPTİMİZASYON.....	81
6.5. DENEY YÖNTEMİ	84
BÖLÜM 7	86
BULGULAR VE TARTIŞMA	86
7.1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	86
7.1.1. Motor Performans Sonuçlarının Analizi.....	86
7.1.2. Egzoz Emisyon Sonuçlarının Analizi	101
7.1.3. Yanma Karakteristikleri.....	120
7.1.4. İstatistiksel Analiz	126

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8	142
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	142
8.1. SONUÇLAR	142
8.2. ÖNERİLER	145
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ	165



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. 2050 yılına kadar üretilmesi muhtemel termoplastik miktarları.....	23
Şekil 3.2. Dünya genelinde üretilen plastiğin çeşitli sektörlerle göre dağılımı	27
Şekil 3.4. Endüstriyel sektörlerle göre yıllık küresel atık üretimi.....	29
Şekil 3.5. Çeşitli sektörlerde üretilen plastiklerin atık haline gelme süreleri.....	29
Şekil 3.6. Piroliz mekanizması diyagramı	33
Şekil 3.8. Piroliz tesisinin proses akış diyagramı.....	37
Şekil 5.1. Basınç- krank açısı diyagramı (a) ve püskürtme seyri (b)	53
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	59
Şekil 6.2. Deney alanının genel görünümü.	60
Şekil 6.3. Tek silindirli dizel jeneratör	61
Şekil 6.4. Yük dirençleri.	62
Şekil 6.5. Deney seti kontrol panosu.....	63
Şekil 6.6. Çalışma arayüzü.....	63
Şekil 6.7. Elektronik terazi ve dönüştürücü.	64
Şekil 6.8. Yakıt tüketimi ölçümlerine ait ana ve alt program blok diyagramları.....	64
Şekil 6.9. Emisyon ölçüm cihazı.....	65
Şekil 6.10. Üniversal sinyal dönüştürücü ve termokupl	66
Şekil 6.11. Silindir kapağı delme ve basınç sensörü montaj işlemi	67
Şekil 6.12. Optik döner kodlayıcı motor mili bağlantısı.....	68
Şekil 6.13. NI-USB-6341 DAQ kart	69
Şekil 6.14. Silindir içi basınç ölçümlerine ait LabVIEW blok diyagramı.	69
Şekil 6.15. Basınç sensörü ve kodlayıcının genel görünümleri.	70
Şekil 6.16. Ham ve filtrelenmiş silindir içi basınç verileri	73
Şekil 6.17. İçten yanmalı motorlarda krank-biyel mekanizması.	73
Şekil 6.18. Silindir hacminin krank mili açısına bağlı olarak değişimi	775
Şekil 6.19. Orta gerilim kablosu ve kısımları.	77
Şekil 6.20. Piroliz edilen XLPE malzeme.....	78
Şekil 6.21. Atık XLPE kablolarına ait gerçekleşen piroliz prosesi	79
Şekil 6.22. Deney yakıtları.....	81

Şekil 7.1. PB değişiminin 750 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 7.2. PB değişiminin 1500 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 7.3. PB değişiminin 2250 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	90
Şekil 7.4. PB değişiminin 3000 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	90
Şekil 7.5. PB değişiminin 3750 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	91
Şekil 7.6. PB değişiminin 4500 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.....	91
Şekil 7.7. PB değişiminin 750 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi	93
Şekil 7.8. PB değişiminin 1500 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.....	94
Şekil 7.9. PB değişiminin 2250 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.....	94
Şekil 7.10. PB değişiminin 3000 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 7.11. PB değişiminin 3750 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.....	95
Şekil 7.12. PB değişiminin 4500 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.....	96
Şekil 7.13. PB değişiminin 750 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	98
Şekil 7.14. PB değişiminin 1500 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	98
Şekil 7.15. PB değişiminin 2250 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 7.16. PB değişiminin 3000 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 7.17. PB değişiminin 3750 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	100
Şekil 7.18. PB değişiminin 4500 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.....	100
Şekil 7.19. PB değişiminin 750 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	103
Şekil 7.20. PB değişiminin 1500 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	103
Şekil 7.21. PB değişiminin 2250 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	104
Şekil 7.22. PB değişiminin 3000 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	104
Şekil 7.23. PB değişiminin 3750 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	105
Şekil 7.24. PB değişiminin 4500 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.....	105
Şekil 7.25. PB değişiminin 750 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	108
Şekil 7.26. PB değişiminin 1500 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	108
Şekil 7.27. PB değişiminin 2250 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	109
Şekil 7.28. PB değişiminin 3000 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	109
Şekil 7.29. PB değişiminin 3750 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	110
Şekil 7.30. PB değişiminin 4500 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.....	110
Şekil 7.31. PB değişiminin 750 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi	112
Şekil 7.32. PB değişiminin 1500 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi	113
Şekil 7.33. PB değişiminin 2250 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi.....	113

Şekil 7.34. PB değişiminin 3000 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi	114
Şekil 7.35. PB değişiminin 3750 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi	114
Şekil 7.36. PB değişiminin 4500 W motor yükünde NO _x üzerindeki etkisi	115
Şekil 7.37. PB değişiminin 750 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	117
Şekil 7.38. PB değişiminin 1500 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	117
Şekil 7.39. PB değişiminin 2250 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	118
Şekil 7.40. PB değişiminin 3000 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	118
Şekil 7.41. PB değişiminin 3750 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	119
Şekil 7.42. PB değişiminin 4500 W motor yükünde is üzerindeki etkisi	119
Şekil 7.43. Silindir basınçlarının 220 bar PB'deki değişimleri.....	121
Şekil 7.44. Isı yayılım oranlarının 220 bar PB'deki değişimleri.....	122
Şekil 7.45. Silindir basınçlarının 210 bar PB'deki değişimleri.....	123
Şekil 7.46. Isı yayılım oranlarının 210 bar PB'deki değişimleri.....	123
Şekil 7.47. Silindir basınçlarının 230 bar PB'deki değişimleri.....	125
Şekil 7.48. Isı yayılım oranlarının 230 bar PB'deki değişimleri.....	125
Şekil 7.49. Silindir basınçlarının 240 bar PB'deki değişimleri.....	126
Şekil 7.50. Isı yayılım oranlarının 240 bar PB'deki değişimleri.....	126
Şekil 7.51. Giriş parametrelerinin FÖYT yanıtı üzerindeki etkileri	130
Şekil 7.52. Giriş parametrelerinin EGS yanıtı üzerindeki etkileri.	131
Şekil 7.53. Giriş parametrelerinin FEV yanıtı üzerindeki etkileri.	132
Şekil 7.54. Giriş parametrelerinin NO _x yanıtı üzerindeki etkileri.....	133
Şekil 7.55. Giriş parametrelerinin HC yanıtı üzerindeki etkileri	133
Şekil 7.56. Giriş parametrelerinin CO yanıtı üzerindeki etkileri	134
Şekil 7.57. Giriş parametrelerinin İs yanıtı üzerindeki etkileri.....	134
Şekil 7.58. Giriş faktörlerinin FÖYT üzerindeki ortak etkileri.....	135
Şekil 7.59. Giriş faktörlerinin EGS üzerindeki ortak etkileri	136
Şekil 7.60. Giriş faktörlerinin FEV üzerindeki ortak etkileri	136
Şekil 7.61. Giriş faktörlerinin NO _x üzerindeki ortak etkileri	137
Şekil 7.62. Giriş faktörlerinin HC üzerindeki ortak etkileri.....	137
Şekil 7.63. Giriş faktörlerinin CO üzerindeki ortak etkileri.....	138
Şekil 7.64. Giriş faktörlerinin İs üzerindeki ortak etkileri	138
Şekil 7.65. FÖYT, EGS, FEV, NO _x , HC, CO ve is için optimizasyon grafikleri....	140

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Dizel yakıtı ve bazı alkollerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	41
Çizelge 4.2. Dizel yakıtı ve biyoetanolün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri	42
Çizelge 4.3. Dizel yakıtı ve CNG'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.	43
Çizelge 4.4. Dizel yakıtı ve hidrojenin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	44
Çizelge 4.5. Farklı tür hammaddelerden üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	45
Çizelge 4.6. Dizel yakıtı ve atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri	46
Çizelge 4.7. Dizel yakıtı ve atık plastikten elde edilmiş yakıtının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.	47
Çizelge 4.8. Dizel yakıtı ve atık madeni yağlardan elde edilen pirolitik yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri.	47
Çizelge 6.1. Test motoru ve jeneratörün teknik özellikleri.....	61
Çizelge 6.2. Emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri.....	65
Çizelge 6.3. Termokupl ve universal sinyal dönüştürücünün teknik özellikleri.....	66
Çizelge 6.4. Veri toplama kartı özellikleri	68
Çizelge 6.5. Basınç sensörü ve enkoderin teknik özellikleri.	70
Çizelge 6.6. Deney yakıtlarının analizi yapılan bazı yakıt özellikleri.	80
Çizelge 6.7. Yakıtların destilasyon analiz sonuçları.	80
Çizelge 6.8. Giriş faktörleri ve seviyeleri	84
Çizelge 6.9. RSM modelinin ayarları.....	84
Çizelge 7.1. FÖYT, EGS ve FEV yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları	127
Çizelge 7.2. NO _x , HC, CO ve is yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları.....	1288
Çizelge 7.3. Çıktı parametrelerinin regresyon eşitlikleri.	129
Çizelge 7.4. RSM optimizasyonu için seçilen parametreler ve değerleri.	139
Çizelge 7.5. RSM çalışmasının doğrulanması	141

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CH_4	: Metan
C_2H_6	: Etan
C_2H_2	: Asetilen
CO	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
du	: Sistem içerisindeki kütlenin iç enerji değişimi
H/Y	: Hava/Yakıt oranı
H_2	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri
L	: Biyel kol uzunluğu
$\dot{m}$	: Kütlesel yakıt debisi
n	: Motor hızı
η_e	: Fren efektif verim
NO	: Azot monoksit
NO_2	: Azot dioksit
NO_x	: Azot oksitler
P	: Sıkıştırma basıncı
P_e	: Efektif güç
r	: Krank kolu yarı çapı
Q_n	: Yanma odasında ortaya çıkan net ısı
R^2	: Regresyon kat sayısı
R^2_{adj}	: Düzeltilmiş regresyon kat sayısı
S	: Sensör hassasiyeti
V_s	: Kurs hacmi
V_c	: Yanma odası hacmi

$V_{\min}$: Minimum çıkış voltajı
 W : Sistem tarafından yapılan iş
 ω : Açısal hız
 θ : Krank açısı
 Δt : Yakıtın tüketilme süresi
 β_0 : Sabit terim
 β_i : Lineer parametreler katsayısı
 β_{ij} : Etkileşimli katsayılar
 ε : Fazlalıklar



KISALTMALAR

AID	: Alt Isıl Değer
AÖN	: Alt Ölü Nokta
APY10	: %90 Dizel Yakıtı + %10 Atık Plastik Yağı
APY20	: %80 Dizel Yakıtı + %20 Atık Plastik Yağı
APY30	: %70 Dizel Yakıtı + %30 Atık Plastik Yağı
APY40	: %60 Dizel Yakıtı + %40 Atık Plastik Yağı
APY50	: %50 Dizel Yakıtı + %50 Atık Plastik Yağı
AYPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
CNG	: Doğalgaz
EGS	: Egzoz Gaz Sıcaklığı
FEV	: Fren Efektif Verim
FOEB	: Fren Ortalama Efektif Basıncı
FÖYT	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
İYM	: İçten Yanmalı Motor
KA	: Krank Açısı
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
PB	: Püskürtme Basıncı
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen Teraftalat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PUR	: Poliüretan
PVC	: Polivinil Klorür
RSM	: Yanıt Yüzey Metodu
SO	: Sıkıştırma Oranı
TG	: Tutuşma Gecikmesi
UID	: Üst Isıl Değer
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
XLPE	: Çapraz Bağlı Polietilen

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan endüstriyel büyüme ve nüfus artışı, aşırı kullanımı beraberinde getirerek enerji ihtiyacını artırmaktadır. Modern endüstrinin ve toplumun enerji ihtiyacının ise büyük bir bölümünü fosil yakıtlar karşılamakta, özellikle içten yanmalı motorlarda (İYM) hâlen büyük oranda fosil kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Gelecekte, hızla artan nüfus ve sanayi devriminin gereksinimlerini karşılamak amacıyla fosil yakıt kullanımının sürekli olarak artacağı tahmin edilmekte ve araştırmacılar tarafından yakın gelecekte tükeneceği bildirilmektedir. Petrol kaynaklarının sınırlı olması ve dünya genelinde dağınık bir şekilde bulunması ve yanma sonu ürünlerinden olan hidrokarbon (HC), azot oksitler (NO_x) ve karbonmonoksit (CO) gibi emisyonların çevreye zarar vermesi gibi faktörler ise yeni ve temiz enerji kaynaklarının araştırılması, verimli kullanımı ve yakıt özelliklerinin geliştirilmesi çalışmalarını gündeme getirmiş ve araştırmacıları alternatif bir temiz enerji kaynağına odaklanmaya yöneltmiştir. Alternatif yakıtlar arasında alkoller, sıvılaştırılmış petrol gazı, bitkisel ve hayvansal yağlar veya bunlardan üretilen biyodizel, lastik, plastik ve ambalaj atıkları, atık madeni yağlar, tarımsal artıklar, selüloz içerikli atıklar ve sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış doğal gaz bulunmaktadır. Bu alternatifler arasında ise atık plastiklerin akılcı bir şekilde bertaraf edilmesi büyük ilgi görmektedir [1]. Plastik ürünler yenilenemeyen fosil yakıtlardan üretilmekte [2] ve plastik üretimi, dünyanın en hızlı büyüyen ve aralıksız süren akışlarından biri olmakla birlikte küresel petrol tüketiminin %6'sını oluşturmaktadır [3]. Bu tüketimin 2050 yılına kadar dört kat artması beklenmekte [4] ve 2050 yılına kadar petrol üreticilerinin en büyük pazarının plastik üreticilerinden oluşacağı tahmin edilmektedir [5]. Fosil yakıtların küresel arzı kritik hale geldikçe, fosil yakıt kaynaklarından elde edilen plastiğin geri dönüşümü de bu sebeple önem kazanmaktadır.

Yaklaşık 20 farklı plastik grubu bulunmasına rağmen; Polietilen (PE), Polivinilklorür (PVC), Polistiren (PS), poliüretan (PU), Polipropilen (PP) ve Polietilen tereftalat (PET) günümüzde yaygın olarak kullanılan plastiklerdir. Polietilen, %36'lık pay ile çevrede en fazla atık olarak bulunan plastikler arasında yer almaktadır [6]. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (AYPE) en yaygın polietilen çeşitleri olup, doğrusal zincir uzunlukları ve dallanma özellikleri nedeniyle kristallikleri farklıdır. Bir diğer polietilen çeşidi olan çapraz bağlı polietilen (XLPE) ise yalıtım, borular, yapıştırıcılar ve otomotiv parçaları gibi birçok endüstriyel uygulama için özel olarak geliştirilmiştir. Çapraz bağlı polietilen (XLPE), mükemmel yalıtım özelliklerinden dolayı elektrik telleri ve kabloları için bir yalıtım malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak düşük akışkanlığı ve zayıf kalıplanabilirliği nedeniyle XLPE'nin geri dönüştürülmesi zordur [7]. XLPE atıklarının geri dönüşümü sadece çevrenin korunması açısından değil, değerli ürünlerin geri kazanımı açısından da önemli bir konudur [8]. Bu atıkların geri dönüşümü için genellikle arazi doldurma ve yakma gibi iki yöntem tercih edilmektedir.

Plastik atıkların bu yöntemlerle geri dönüştürülmesi çevresel kaygılar nedeniyle kapsamlı bir çözüm değildir. Plastik atıkların enerji elde edilmesi amacıyla yakılması atıkları ortadan kaldırırsa da çevreye önemli zararlar vermektedir. Atıkların düzenli depolama sahalarında bekletilmesinin ise arazi üzerindeki etkileri belirsizliğini korumaktadır. Bu iki yöntemde kesin çözüm olarak görülmemekte, geri dönüşüm verimliliğini artırmak ve ekonomik fayda sağlamak için yeni yöntemler araştırılmaya devam etmektedir [9]. Bu atıkların geri dönüşümü için ise en ideal yöntem piroliz yöntemidir [10]. Bu bağlamda, piroliz, farklı atıkları alternatif yakıtla dönüştürmek için akılcı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Piroliz işlemi, yanma olmadan gerçekleşen termal bozulma sürecidir. Atık plastikler, bu yöntem ile katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı ürüne dönüştürülebilmektedir. Piroliz yöntemi ile atık plastiklerden elde edilen sıvı ürün, petrolden elde edilen yakıtlarla karşılaştırılabilir özelliklere sahiptir ve İYM'de olarak etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu sebeple birçok araştırmacı plastiklerin kimyasal geri dönüşümü üzerine araştırma yapmışlar ve atık plastiklerin yakıt özelliklerinin dizel yakıtı ile benzer özelliklere sahip olduğunu ve İYM'de yakıt olarak kullanılabileceğini yaptığı çalışmalarda bildirmişlerdir [11–17].

Literatürde plastik ailesinden birçok atık çeşitli yöntemler ile piroliz edilerek içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılıp motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ancak mekanik olarak geri dönüşümü mümkün olmayan XLPE kabloların pirolizi üzerine çalışmalar kısıtlı olup ayrıca içten yanmalı motorlarda denenmemiştir. Bu çalışmanın iki amacı bulunmaktadır. Birinci amacı, atık XLPE kablolarından üretilen atık plastik yağı (APY) ve dizel yakıtı (D100) karışımlarının tek silindirli hava soğutmalı dizel motorda yakıt olarak kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Böylelikle çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olan atık plastiklerin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. İkinci amacı, yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile optimizasyon yapılarak en uygun performans ve egzoz emisyonlarının belirlenmesidir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. ATIK PLASTİKLERDEN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA KULLANIMI

Literatürde atık plastiklerin dizel motorlarda kullanımı ile ilgili birçok araştırma olmasına rağmen polietilen gurubunda yer alan çapraz bağlı polietilen (XLPE) malzemeden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorlarda kullanımı ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Bununla birlikte XLPE malzemeden elde edilen APY'nin dizel motorda kullanımının RSM optimizasyonu konusunda henüz bir çalışma yapılmamıştır.

Mani vd. çalışmada tek silindirli dizel bir motorda atık plastiklerden elde ettikleri atık plastik yağı dizel yakıtını motorda herhangi bir modifikasyon yapmadan test etmişlerdir. %100 oranındaki atık plastik yağın dizel yakıtının yerine kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Atık plastik yağın tutuşma gecikmesi dizel yakıtına göre daha uzun olduğundan dolayı ısı yayma oranının atık plastik yağ için daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Atık plastik yağının dizel yakıtı kıyasla yanma odasından ısı emilimi ile silindir içinde buharlaşarak silindir içi basıncının artmasına sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir. Atık plastik yağın fren termal veriminin %75 yük oranlarına kadar dizel yakıtı ile yakın değerlerde olduğunu ancak artan yük ile dizel yakıtına kıyasla düşük olduğunu bildirmişlerdir. NO_x emisyonlarının silindir içi basınçlarının yüksek olması ve artan ısı yayılım oranlarından dolayı yük artışı ile arttığını belirtmişlerdir. Düşük yüklerde HC emisyonları atık plastik yağı için daha az iken yük arttıkça artış eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir. CO emisyonlarının dizel yakıtı kıyasla düşük silindir içi sıcaklıklarından dolayı daha yüksek olduğunu, CO₂ emisyonlarının ise geç yanma kaynaklı daha düşük olduğunu söylemişlerdir. İş miktarlarının ise içeriğindeki oksijen varlığı sebebiyle dizel yakıtı kıyasla tüm yüklerde %40, %50 oranlarında daha düşük olduğunu bildirmişlerdir [13].

Mani vd. yine bir başka bir çalışmada atık olarak bulunan plastiklerden elde ettikleri yağı tek silindirli dizel motorda test etmişlerdir. Atık plastiklerden elde ettikleri yağın özelliklerinin dizel yakıtına benzer özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri atık plastik yağın hacimce %10, %30, %40, %70 oranlarında dizel yakıt ile karıştırarak ve %100 atık plastik yağı olarak, tek silindirli dizel motorda farklı yüklerde %20, %40, %60, %80, %100 performans ve emisyon analizi yapmışlardır. Çalışmalarında tam yük şartlarında atık plastik yağı ve karışımlarının dizel yakıtına kıyasla daha yüksek silindir içi basınca sahip olduğunu, daha iyi yanma ile dizel yakıtı göre daha yüksek ısı yayma oranına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Atık plastik yağı yüzdesindeki artışla birlikte daha yüksek yanma sonu sıcaklığı ile NO_x emisyonlarında artış olduğunu ve HC, CO, CO₂ ve is emisyonlarının da arttığını bildirmişlerdir. Fren termik verimin ise tüm karışım oranlarında dizel yakıtından düşük olduğunu belirtmişlerdir [18].

Kumar vd. (yüksek yoğunluklu polietilen) YYPE'den plastiklerden piroliz ile alternatif yakıt elde etmişlerdir. Elde ettikleri yakıtı farklı oranlarda dizel yakıtı ile karıştırarak değişken yüklere sahip 4 zamanlı direk enjeksiyonlu dizel motorda test etmişlerdir. Deneysel sonuçlarda, tüm yük koşullarında fren termal verimlerinin dizel yakıtla karşılaştırıldığında daha düşük olduğunu, egzoz gazı sıcaklığının motor yükündeki artışla arttığını belirtmişlerdir. Atık plastik yağının karışım oranındaki artışa bağlı olarak özgül yakıt tüketiminde (ÖYT) artış olduğunu, ayrıca tüm yakıt karışımları için artan fren gücü ile mekanik verimliliğin arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında lastik ve plastik atıkların pirolizinden elde edilen alternatif yakıtları dizel motorda test etmişlerdir. 2500 (d/dak) motor devrinde her iki yakıtta da dizel yakıtı göre ÖYT'nin azaldığı, buna rağmen dizel yakıtı göre her iki yakıtında da motor performansında yaklaşık %50 oranlarında kayıp görüldüğü sonuçlarına varmışlardır. Piroliz ürünlerinin alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir [19].

Pratoomyod atık plastiklerden piroliz tekniği ile elde ettiği yakıtı 4 zamanlı, su soğutmalı, 6 silindirli, 5759 cm³ hacmine sahip dizel motorda test etmiştir. Elde ettiği yakıtı dizel yakıtı hacimce %25, %50, %75 oranlarında karıştırmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ise yakıt içerisindeki atık plastik yağı oranı arttıkça tüm motor

yüklerinde motor gücü ve motor torkunda azalma olduğu, CO, CO₂, NO_x ve HC emisyon değerlerinde ve ÖYT değerlerinde artma olduğunu belirtmiştir [20].

Kaimal vd. yaptıkları başka bir çalışmada sabit hızda tek silindirli 4 zamanlı bir dizel motorda atık plastik yağı ve PO25, (%25 atık plastik yağı+ %75dizel yakıtı) PO50, PO75 karışımlarının yanma özellikleri değişken yükleme koşulları altında incelemişlerdir. Sonuçlar, tüm karışımlarda ve katkısız plastik yağın termal verimliliğinin tüm yükleme koşullarında dizelden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca tam yükte, plastik yağın ve karışımlarının ısı açığa çıkış oranı, yanma ve ateşleme gecikmesi ve maksimum silindir basıncının dizelden daha yüksek olduğunu söylemişlerdir [21].

Kaimal vd. tek silindirli 4 zamanlı bir dizel motorda atık plastik yağı ve dizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon parametrelerini çeşitli yüklerde incelemişlerdir. Hacimsel olarak (%25 atık plastik yağı+ dizel yakıtı) PO25, (%50 atık plastik yağı+ dizel yakıtı) PO50, (%75 atık plastik yağı+ dizel yakıtı) PO75 karışımları oluşturmuşlardır. Bütün karışımların fren termal verimliliklerinin dizel yakıtına kıyasla daha düşük olduğunu ancak PO25 yakıtının dizel ile benzer özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Dizel yakıt için tam yükteki termal verim %30,86 ve karışımlarda PO25 için %29,87, PO50 için % 29.17 ve PO75 için % 28.26 olduğunu bildirmişlerdir. CO emisyonlarının karışımdaki artan plastik yağı miktarı ile arttığını, NO_x ve is emisyonlarının karışımlardaki plastik yağ miktarındaki azalma ile azaldığını ve plastik yağ karışımları için katkısız plastik yağa kıyasla HC emisyonunun daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [22].

Kaimal vd. bir diğer çalışmada farklı yükleme koşullarında plastik piroliz yağı ile doldurulmuş 4 silindirli bir dizel motoruna DEE eklemenin etkisini araştırmışlardır. Plastik yağ kullanan motorun performans, yanma ve emisyon özelliklerindeki farklılıklar ve DEE ile %5, %10 ve %15 karışımları incelenmiş ve referans yakıt ile karşılaştırmışlardır. Nominal güçte, belirtilen maksimum fren ısı verimliliği dizel için %30,9 iken plastik yağ için %27,5 olduğunu belirtmiş olup DEE karışımları durumunda, tam yükte verimin PD5, PD10 ve PD15 için sırasıyla %27,9 %29,4 ve %30.03 olduğunu bildirmişlerdir. Maksimum fren gücünde karışımlar için dizel yakıtı

kıyasla karışım oranı arttıkça is ve NO_x seviyelerinde ciddi bir azalma olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca PO-DEE karışımlarıyla çalışırken CO emisyonlarında bir iyileşme olduğunu ancak HC emisyonlarının biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [23].

Panda vd. yaptıkları çalışmada atık plastiklerden elde edilen piroliz yağını dizel motor üzerinde test etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada dizel yakıtı hacimce %10, %20, %30, %40 %50 oranlarında piroliz yağını ilave ederek değişken yüklerde motor deneylerini gerçekleştirmişlerdir. %50'nin üzerindeki pirolitik yağ ilavesinde motorun titreşimli çalıştığını bildirmişlerdir. Alınan sonuçların dizele yakın bir fren termal verim sergilediği ancak tüm emisyonların yük ve karışım oranının artışı ile arttığını bildirmişlerdir. ÖYT'nin ise artan karışım oranı ile artan yük ile azaldığını belirtmişlerdir [24].

Kalargaris vd. çalışmalarında plastik atıklardan piroliz yoluyla pirolitik yağ elde etmişlerdir. Elde ettikleri piroliz yağını direkt enjeksiyonlu dört silindirli dizel bir motorda farklı motor yüklerinde dizel yakıtı ile hacimce %25'ten %100'e kadar karıştırarak test etmişlerdir. Tam yük koşullarında atık plastik yağın fren termal verimliliğinin dizel yakıtı kıyasla daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Piroliz yağı karışımlarının daha düşük setan sayısı sebebiyle daha uzun ateşleme gecikmesine dolayısıyla daha yüksek silindir basıncına ve ısı yayma oranına sahip olduklarını belirtmişlerdir. NO_x, HC, CO ve CO₂ dahil olmak üzere ölçülen tüm emisyonların artan karışım oranıyla artış eğilimi gösterdiğini söylemişlerdir [25].

Kumar vd. çalışmalarında farklı yükler altında 1500 d/dak sabit hızda sabit sıkıştırma oranına sahip üç silindirli bir benzinli motor üzerinde performans ve emisyon özelliklerini test etmişlerdir. %5, %10, %15 ve % 20 atık Plastik Piroliz Yağı (PPO) ile benzin karışımları ile çalışan mevcut motordaki performans ve emisyon özellikleri incelendiğinde benzin içerisine katılan PPO oranı arttıkça ÖYT'nin arttığını tespit etmişlerdir. Fren termik verimin karışım oranına bağlı olarak karışım oranındaki artışla tam yük koşullarında benzine kıyasla %20 PPO karışımında %19,64 azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Tam yük koşullarında artan karışım oranıyla HC emisyonlarının

benzine kıyasla düştüğünü NO_x emisyonlarının artan karışım oranıyla arttığını tespit etmişlerdir [26].

Geo vd. yaptıkları çalışmada atık motor yağı ve atık plastik yağdan elde edilmiş pirolitik yağları dizel yakıtı ile karıştırılarak tek silindirli dizel bir motorda, performansı, yanma ve egzoz emisyonlarını incelemişlerdir. Tam yükte dizele göre karbon monoksit (CO) emisyonunun %50 atık plastik yağı ve %50 dizel yakıtı karışımında dizel yakıtına göre %50 arttığını %50 atık motor yağı ve %50 dizel yakıtı karışımında ise %58 oranında arttığını belirtmişlerdir. Yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonu, tam yükte dizele kıyasla %50 atık plastik yağı ve %50 dizel yakıtı karışımında %16 ve %50 atık motor yağı ve %50 dizel yakıtı karışımında ise %32 arttığını bildirmişlerdir. %50 atık motor yağı ve %50 dizel yakıtı karışımında tüm yükleme koşullarında is emisyonunun azaldığı görülmüştür, ancak %50 atık motor yağı ve %50 dizel yakıtı karışımı için dizel yakıtına kıyasla daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Atık plastik yağı dizel yakıtı karışımının fren termal verimliliğinin dizel yakıtı kıyasla daha yüksek olduğunu ancak atık motor yağı ve dizel yakıtı karışımlarının fren termal verimliliğinin dizel yakıttan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. NO_x emisyonları için atık plastik yağı dizel yakıtı karışımının dizel yakıtına göre daha yüksek olduğu, atık motor yağı ve dizel yakıtı karışımlarının tam yükte dizel yakıtı kıyasla %13 oranında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Silindir içi basınçlar açısından ise atık plastik yağı dizel yakıtı karışımının dizel ve diğer karışıma kıyasla daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Egzoz gaz sıcaklığı açısından ise dizele kıyasla diğer tüm karışımların egzoz gazı sıcaklığın daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir [27].

Venkatesan vd. dizel yakıtı %15 ve %30 oranlarında plastik yağ karıştırarak tek silindirli dizel bir motorda tam yük ve yüksüz durumlarda krank açılarına göre motor performans parametrelerini incelemişlerdir. Dizel, %15 ve %30 karışımları için silindir basıncındaki en yüksek değeri, yüksüz çalışmada sırasıyla 48.08 bar, 52.01 bar ve 56.67 bar olarak bulunurken, tam yükte 68.95 bar, 73.70 bar ve 75.33 bar olarak görülmüştür. Ayrıca değişken yüklerde karışımlar için performans parametrelerini araştırmışlardır. Dizel yakıtı silindir içi basıncının, tüm fren ortalama etkin basınçlarında %15 ve %30 oranlarındaki karışımlarından daha düşük olduğunu

belirtmişlerdir. Fren termal verimliliğinin düşük etkin basınçlarda minimum değişimler sergilediğini ancak artan plastik yağ oranı ve artan etkin basınç ile fren termal verimliliğinde iyileşmeler olduğu belirtilmiştir. Yüksüz durumda tüm yakıt karışımları için ÖYT'nin yüksek olduğu artan yük ile ÖYT'nin arttığını tespit etmişlerdir [28].

Govinda Rao vd. tek silindirli dizel bir motorda atık plastik yağ (APY) karışımları ile doldurulmuş değişken sıkıştırma oranlı bir dizel motorun performansı ve emisyon özellikleri üzerindeki sıkıştırma oranı, enjeksiyon basınçları ve enjeksiyon zamanlaması gibi enjeksiyon parametrelerinin etkisine ilişkin deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında plastik yağı, etanol ve dizel yakıtlarını hacimce P80D10E10, P90D5E5, P100, D100 ve P90D10 karıştırarak deney yakıtlarını oluşturmuşlardır. P90D5E5 karışımının en yüksek fren ısı verimini verdiğini, saf dizel ve saf plastik yağa göre sırasıyla %16 ve %38 artış sağladığını belirtmişlerdir. Isı emisyonlarının P90D5E5 için dizel ve P100'den daha düşük olduğu bildirmişlerdir. Özgül yakıt tüketimi, karbon monoksit ve is değerlerinin, enjeksiyon zamanlaması, basınç ve sıkıştırma oranındaki artışla birlikte tüm karışımlar için azaldığını bildirmişlerdir. P90D5E5 ve P100 yakıtlarının diğer karışımlara oranla daha yüksek silindir basınçları ve ısı yayma oranları olduğunu bildirmişlerdir. Dizel ve etanol ile harmanlanmış plastik yağ, dizele göre düşük CO, HC ve is içerdiğini, NO_x emisyonlarının ise plastik yağ etanol karışımı için daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [29].

Gnanamoorthi ve Murugan yaptıkları çalışmada atık plastik yağı (YYPE, AYPE) kullanarak termal piroliz ve katalitik piroliz işlemleriyle alternatif yakıt üretmişlerdir. Dizel, WPO (Atık Plastik Yağı), DEE (Dietil Eter) ve MEA (Metoksi etil asetat) ile Dizel (%100 dizel), WPO (%100 atık plastik yağ), D50W50 (%50 dizel +%50 WPO), D50W40DEE10 (%50 dizel +%40 WPO +%10 dietil eter) ve D50W40MEA10 (% 50 dizel + 40WPO+ +% 10 Metoksi etil asetat) yakıt karışımlarını oluşturmuşlardır. WPO, D50W50, D50W40DEE10 ve D50W40MEA10'un fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle tek silindirli dört zamanlı CRDI dizel motorda test yakıtları olarak kullanılmasının uygun olacağını bildirmişlerdir. O₂ Yaptıkları araştırmada, 50D40W10MEA test yakıtının diğer tüm test yakıtlarından daha düşük CO emisyonu

ürettiğini bildirmişlerdir. Test yakıtı D50W40DEE10 için NO_x emisyonu, dizele göre % 5,3 daha düşük olduğunu, D50W40MEA10 için NO_x emisyonu, dizele göre %1,5 civarında biraz daha yüksek olduğunu söylemişlerdir. Yanmamış hidrokarbon emisyonları 50D40W10MEA yakıtında dizele göre % 11,3; 50D40W10DEE yakıtında ise % 5,7 daha düşük olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca atık plastik yağın fren termal verimliliği, dizele göre % 7,1; D50W50 test yakıtının fren termal verimliliğinin dizele göre % 4,8 daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Dietil eter ve metoksi etil asetat katkıları is emisyonu açısından karşılaştırıldığında, test yakıtı D50W40MEA10'nun is emisyonu test yakıtı D50W40DEE10'dan % 8,4 daha düşük olduğunu bunun nedeninin metoksi etil asetatın içindeki dietil eterden daha yüksek oksijen içeriği olduğunu belirtmişlerdir [30].

Dobó vd. yaptıkları çalışmada YYPE, AYPE, PP, PS, PET ve PUR plastik atıklarının termal pirolizini gerçekleştirilmiş ve atıkların pirolizi sonucu sıvı yakıtların verimlerini araştırmışlardır. Pet atık için piroliz esnasında sıvı ürün elde edememişlerdir. Diğer atıklar için (YYPE, AYPE, PP, PS, PET ve PUR) elde edilen yağların PUR hariç benzinli motoru rahat çalıştırdıklarını söylemişlerdir [31].

Singh vd. atık plastiklerden dizel ve benzin gibi petrol türevi yakıtlara alternatif olabilecek pirolitik yağ elde etmeye çalışmışlardır. Elde edilen pirolitik yağ çeşitli oranlarda dizel yakıtı ile karıştırarak (%10, %20, %30, %40, %50) motor performansını ve emisyonlarını belirlemek için tek silindirli 4 zamanlı bir dizel motorda test etmişlerdir. Plastik yağın yakıt içerisinde oranı arttıkça fren termik veriminin arttığını ve artan yük ile ÖYT'nin azaldığını bildirmişlerdir. Plastik yağın karışım içerisindeki oranı arttıkça silindir içi basınçlarda artma olduğunu söylemişler ve karışım içerisindeki artan pirolitik yağ ile emisyon değerlerinde ufak bir artış olduğunu bildirmişlerdir [32].

Das vd. çalışmalarında, katalizör olarak Zeolit-A kullanılarak atık plastiklerin pirolizinden elde edilen atık plastik yağı kullanan tek silindirli, dört zamanlı dizel motorun performansını ve emisyonunu araştırmışlardır. Motor yük testlerini, atık plastik yağını dizel ile %10, %20 ve %30 hacim oranlarında karıştırarak gerçekleştirmişlerdir. Tam yük şartlarındaki deneylerde fren termal verimliliği dizel

yakıtı için %25.08 olduğunu yine tam yükte %20 atık plastik yağı ile yapılan deneylerde %25,91 olduğunu bildirmişlerdir. ÖYT değerinin ise atık plastik yağı-dizel karışımındaki atık plastik yağı konsantrasyonunun artmasıyla azaldığını bildirmişlerdir. Emisyonlar incelendiğinde %20 atık plastik yağı dizel karışımının CO emisyonu açısından sadece tam yükte çevre dostu bir yakıt olabileceğini, diğer yüklerde emisyonların artan plastik yağı oranıyla olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. HC emisyonlarının tüm yakıt karışımları için artan yükte arttığını ileri sürmüşlerdir. Atık plastik yağ oranı arttıkça CO₂ emisyonlarının artan yükte birlikte arttığı sonucuna varmışlardır. NO_x emisyonlarının ise atık plastik yağın dizel içerisinde artan oranı ile ve artan yük ile artmış olduğunu ileri sürmüşlerdir [33].

Mangesh vd. yaptıkları çalışmada YYPE, AYPE (Düşük yoğunluklu polietilen), PP (Polipropilen) ve stirenden elde edilen piroliz yağının dizel motor yakıtı olarak uygunluğu açısından özelliklerini karşılaştırmışlardır. Üretilen PP piroliz yağının fizikokimyasal özelliklerinin diğer plastik atıklardan üretilen piroliz yağından daha üstün olduğunu bildirmişlerdir. PP'nin dizel ile karşılaştırılması sonucunda daha düşük karbon sayılı zincir bileşiklerine sahip olduğunu bu sebeple motor performans ve emisyon deneyleri açısından PP'nin seçildiğini belirtmişlerdir. Dizel yakıtı ile hacimce %5, %10, %15 oranında PPO karıştırılarak yakıtları oluşturmuşlardır. %25, %50, %75 ve %100 yükte yaptıkları motor deneylerinde karışım oranı arttıkça fren termal veriminin düştüğünü CO, HC, NO_x emisyonlarında ise artış olduğunu bildirmişlerdir. ÖYT'nin ise tüm yakıtlar için artan yükte beraber düşüş eğiliminde olduğu ancak artan karışım oranları ile arttığını belirtmişlerdir. Silindir içi basınçları ve ısı yayma oranlarının dizel yakıtla kıyasla karışım oranı arttıkça daha yüksek olduğunu söylemişlerdir [14].

Singh vd. yaptıkları çalışmada AYPE'nin İYM'de kullanımını inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Motor performans ve emisyon değerlerini incelemek adına sabit sıkıştırma oranlı farklı karışım oranlarında (D100, D80PO20, PPO), farklı motor hızlarında (1200, 1500, 1800 dev/dak) ve farklı motor yüklerinde (%100, %50, %25) deneyler yapmışlardır. Yanma esnasında oluşan silindir basıncının dizel yakıtı ile benzer olduğu sonucuna vardıklarını belirtmişlerdir. Fren termal verimin artan karışım oranıyla düştüğünü, ÖYT'nin ise arttığını ve artan yük ile bütün devirlerde azaldığını

belirtmişlerdir. Egzoz gaz sıcaklığının ise artan karışım oranı ve yüklerle birlikte azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. CO₂ emisyonlarının karışım yüzdesi arttıkça arttığını artan yük ile azaldığını belirtmişlerdir. İS emisyonlarında yine artan karışım oranıyla birlikte arttığını ancak artan yük miktarıyla birlikte azaldığını belirtmişlerdir. NO_x emisyonları için ise düşen egzoz gazı sıcaklığı sebebiyle artan karışım oranı ve artan yük ile bütün devirlerde arttığını belirtmişlerdir [34]

Mariappan vd. yaptıkları çalışmada AYPE'nin dizel motorda kullanımını inceleyen bir araştırma yapmışlardır. Tek silindirli dizel motorda yaptıkları araştırmalarında %40'ın üzerindeki karışımların performansı olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. %40 oranında plastik yağı eklenmesiyle elde edilen karışıma farklı oranlarda dietil eter (DEE) ve metanol ilave ederek elde ettikleri sonuçların plastik yağı kullanarak elde edilen sonuçları iyileştirdiğini belirtmişler ve plastik yağ kullanımının olumsuz etkilerinin metanol yakıt ve dietil eter katkısı ile ortadan kaldırılabilceğini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca dizel yakıtın maksimum %40'a kadar plastik yağı ile karışımının uygun olduğunu belirtmişlerdir [35].

Behçet ve Eroğlu, atık halde bulunan farklı plastik şişe ve kapakları ile atık enjektörlerden piroliz yolu ile piroliz sıvısı elde etmişlerdir. Elde ettikleri sıvıyı standart dizel yakıtı ile hacimce %20 oranında karıştırarak APY20 yakıtını oluşturmuşlardır. Karışım ve dizel yakıtını su soğutmalı tek silindirli dizel motorda test etmişlerdir. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre standart dizel yakıtına kıyasla APY20 yakıtının özgül yakıt tüketimi değerinde artış olduğunu motor momenti ve motor gücü değerlerinde ise azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, karışım yakıtın CO, HC ve CO₂ emisyon değerlerinde dizel yakıtı göre artış olduğunu NO_x emisyon değerlerinde ise azalma olduğunu belirlemişlerdir [36].

Bhargavi vd. araştırmalarında tek silindirli düşük güçlü bir dizel bir motorda atık plastik yağı ve etanol karışımlarının motor performans ve emisyon parametrelerini araştırmışlardır. Oluşturdukları karışımları (D70W20E10, D65W20E15, D60W20E20) sabit devirde ve çeşitli yüklerde (%100, %75, %50, %25) denemişlerdir. Atık plastik yağına etanol eklenmesinin, yakıtın yanma verimini ve bunun sonucunda plastik karışımlarının termal verimini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. D70W20E10

yakıtı için değişen yük altında dizelden %3,5 ile %7,5 daha az yakıt tükettiğini, dizel ile karşılaştırıldığında, D70W20E10 yakıtının %6,5 daha düşük CO emisyonuna ve ayrıca %6 ila 13,5 daha düşük hidrokarbon emisyonuna sahip olduğunu belirtmişlerdir. Atık plastik yağı içerisinde yüksek karbonlu bileşiklerin varlığı, erişilebilen fazla hava miktarını sınırlayıp sonucunda artan sıcaklıklara ve NO_x emisyonunun artmasına sebep olduğunu söylemişlerdir [37].

Sachuthananthan vd. yaptıkları çalışmada atık plastiklerden elde ettikleri plastik yağına magnezyum oksit nano parçacıkları ilave ederek tek silindirli dizel motorda dizel ve karışımlarını (dizel yakıtı, plastik yağı, PPO+25ppmMgO, PPO+50ppmMgO PPO+75ppmMgO PPO+100ppmMgO) eşitli yüklerde (1,3, 2,6, 3,9, 5,2 kW) ve sabit hızda test etmişlerdir. MgO ilavesiyle kalorifik değerin arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmada, magnezyum oksit nano katkı maddesinin plastik piroliz yağına ilavesiyle fren termal verimliliğinin arttığını, karbon monoksit, hidrokarbon emisyonlarının, is emisyonunun azaldığını ve NO_x emisyonlarının ise arttığını bildirmişlerdir [38]

Adi Sesotyo vd. araştırmalarında tek silindirli dizel bir motorda düşük yoğunluklu polietilenden (AYPE) plastik yağı üretmişler ve saf olarak ve dizel yakıtı %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında karıştırarak motor gücü, torku, zgl yakıt tüketimi ve termal verimlilik açısından analiz etmişlerdir. Dizel yakıtı plastik yağı ilavesinin motor gücü ve torkunu %5 seviyesinde arttırdığını, zgl yakıt tüketimi ve fren termal verimi azalttığını, atık plastik yağın dizel motorda alternatif yakıt olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [39].

Kumar vd. alışmalarında yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) plastiklerden piroliz tekniği ile İYM’de kullanılabilecek alternatif yakıt elde etmişlerdir. Elde ettikleri yakıtı hacimce %10, %20, %30, %40 oranlarında %100 dizel yakıtı ile karıştırarak değişken yüklerde (1-7) kW arasında 4 zamanlı direk enjeksiyonlu dizel motorda test etmişlerdir. DeneySEL sonuçlarda, tüm yük koşullarında fren termal verimlerinin dizel yakıtla karşılaştırıldığında daha düşük olduğunu, egzoz gazı sıcaklığının motor yükündeki artışla arttığını belirtmişlerdir. Atık plastik yağının karışım oranındaki artışa bağlı olarak YT’de artış olduğunu, ayrıca tüm yakıt karışımları için artan fren gücü ile mekanik verimliliğin arttığını tespit etmişlerdir. Atık plastik yağ yüzdesinin

artmasıyla birlikte, atık plastik yağ içeren karışımlardaki NO_x ve CO emisyonlarının da arttığını, motor yükü arttıkça CO emisyonu da artarken, NO_x emisyonunun ise azaldığını bildirmişlerdir. Yanmamış hidrokarbon emisyonu ise, motor yükü arttıkça azalırken, atık plastik yağ yüzdesinin artmasıyla artmakta olduğunu, karbondioksit emisyonu için tüm yükler ve tüm karışımlar için dizelden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir [40].

Das vd. çalışmalarında, katalizör olarak Zeolit-A kullanılarak atık plastiklerin pirolizinden elde edilen atık plastik yağı kullanan tek silindirli, dört zamanlı dizel motorun performansını ve emisyonunu araştırmışlardır. Motor yük testlerini, atık plastik yağını dizel ile %10, %20 ve %30 hacim oranlarında karıştırarak gerçekleştirmişlerdir. Tam yük şartlarındaki deneylerde fren termal verimliliği dizel yakıtı için %25.08 olduğunu yine tam yükte %20 atık plastik yağı ile yapılan deneylerde %25,91 olduğunu bildirmişlerdir. Atık plastik yağı-dizel karışımındaki atık plastik yağı konsantrasyonunun artmasıyla ÖYT'nin azaldığını belirtmişlerdir. Emisyonlar incelendiğinde %20 atık plastik yağı dizel karışımının CO emisyonu açısından sadece tam yükte çevre dostu bir yakıt olabileceğini, diğer yüklerde emisyonların artan plastik yağı oranıyla olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. HC emisyonlarının tüm yakıt karışımları için artan yükte arttığını ileri sürmüşlerdir. Atık plastik yağ oranı arttıkça CO₂ emisyonlarının artan yükte birlikte arttığı sonucuna varmışlardır. NO_x emisyonlarının ise atık plastik yağın dizel içerisinde artan oranı ile ve artan yük ile artmış olduğunu ileri sürmüşlerdir [15].

2.2. YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ

Premkumar vd. yaptıkları çalışmada AYPE'den elde ettikleri pirolitik yağı tek silindirli, su soğutmalı, dört zamanlı, dizel Kirloskar TV1 motorunda test etmişlerdir. İki aşamada yapılan çalışmada, farklı yük koşulları için karışımların performans ve emisyon özellikleri analiz edilmiştir. İlk aşamada, farklı yük koşullarında karışımların performans ve emisyon özellikleri test edilmiştir. Sonuçlara göre, B25 karışımının performans ve emisyon özellikleri saf dizel yakıtına çok yakın olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar B25 karışımı kullanılarak farklı püskürtme

basınçlarında çalışmalarını yapmışlardır. Sonuç olarak, 210 bar, 220 bar, 230 bar ve 240 bar enjeksiyon basınçlarında yapılan çalışmalarda B25 karışımı için 240 bar enjeksiyon basıncında en iyi sonuçlar elde edilmiştir. CO, HC ve is emisyonlarının sırasıyla %12, %13.73 ve %6.32 azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, NO_x emisyonu dizel yakıtına kıyasla %6.03 artmıştır. B25 karışımı, saf dizel yakıtına kıyasla benzer performans özellikleri göstermiştir. B25 karışımı kullanılarak yapılan araştırmada, 240 bar enjeksiyon basıncında fren termal verimliliğinde %4.19 artış gözlemlenmiştir. Diğer yandan, ÖYT'nin ise %5.8 oranında azaldığını bildirmişlerdir [41].

Behera ve Murugan 1500 dev/dak sabit hızda ve 200 bar standart püskürtme basıncında (PB) 4,4 kW üreten tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda kullanılmış trafo yağı ve dizel yakıtının motor performans ve emisyonuna etkilerini araştırmışlardır. Farklı enjektör basınçlarında (200, 210, 220, 230, 240 ve 250 bar) ve çeşitli yüklerde (%0, %25, %50, %75 ve %100) yaptıkları çalışmalarında PB'nin 200 bardan 230 bara çıkmasıyla dizel motorun daha düşük emisyonlara sahip olduğunu ve daha iyi bir performans gösterdiği sonucuna varmışlar ve 230 bar PB'nin optimum PB olduğunu bildirmişlerdir. Kullanılmış trafo yağının 230 bar PB'de fren termal verimi tam yükte 200 bar PB'deki trafo yağı ve dizel yakıtı ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %7,89 ve %8,92 daha düşüktür. Aynı şartlardaki NO_x emisyonunun, trafo yağı için %3,4 daha düşük olduğunu dizel yakıtı için ise %26,88 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. CO emisyonunun her iki yakıt içinde daha yüksek olduğunu, aynı şartlardaki HC emisyonu incelendiğinde ise trafo yağı için 230 barda %37,86 daha düşük olduğu dizel yakıtı için ise aynı PB'de %43,3 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. 230 bar PB'de 200 bara kıyasla is emisyonlarında trafo yağı ve dizel yakıtı için düşüş olduğunu belirtmişlerdir [42].

Deokar vd. çalışmalarında tek silindirli direkt enjeksiyonlu 1500 dev/dak sabit hızla dönen dizel motorda thevetia peruviana biyodizeli ile yaptıkları çalışmalarda %80 yükte enjektör geometrisi, PB ve püskürtme avansının performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyleri farklı enjektör basınçları (210, 230 ve 250 bar) ve farklı püskürtme avanslarında (20°, 23° ve 26° KA) gerçekleştirmişlerdir. 230 bar PB ve 26° krank mili açısında (KA) diğer basınçlara nazaran daha yüksek fren

termal verim ve NO_x emisyonu ürettiğini ve daha düşük emisyon (HC, CO ve is) değerlerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

İçingür ve Altıparmak çalışmalarında dizel yakıtı kullanarak dört silindirli dizel motorda yakıt PB'nin ve setan sayısının performans ve emisyonlara etkisini incelemişlerdir. Farklı PB'de (250, 200, 150, 100 bar) gerçekleştirilen çalışmada artan PB ile is emisyonlarında önemli iyileşmeler olduğunu bildirmişlerdir [43].

Kanth vd. direkt enjeksiyonlu tek silindirli dizel motorda hidrojen ilave edilmiş ve pirinç kepeğinden elde edilen biyodizel yakıtının çeşitli püskürtme basınçlarında (220, 240 ve 260 bar) ve avanslarında (20°, 22°, 24° ve 26° KA) motor performans ve emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. İncelemelerinde 240 bar ve 24° KA olan deney şartlarının daha yüksek NO_x emisyonları olduğunu ve motor emisyon ve performansı ile yanmanın iyileştiğini bildirmişlerdir. Ancak NO_x emisyonlarındaki artışın motor performans ve emisyonlarındaki iyileşmeler göz önüne alındığında dikkate değer olmadığını bildirmişlerdir.

Kumar vd. çalışmalarında, atık yemek yağı biyodizelini %20 oranında dizel yakıt ile karıştırarak B20 yakıtı oluşturulmuş ve seryum oksit (CeO₂) nanopartikül ilavesinin tek silindirli 5,2 kW güç üreten 1500 dev/dak sabit hızlı bir dizel motorda farklı yüklerde (%25, %50, %75 ve %100) farklı enjektör basınçlarının (180, 210 ve 240 bar) yanma özellikleri, performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Enjeksiyon basıncının artırılması ile dizel motorun maksimum silindir basıncını, ısı salınım hızını, fren termal verim, ÖYT ve NO_x emisyonlarını artırırken, HC, karbon monoksit (CO) ve is emisyonlarında azalma sağladığı gözlemlenmiştir [44].

Gümüş vd. dizel yakıtı biyodizel karışımlarını (B0, B5, B20, B50, B100) karışımlarını tek silindirli, doğal emişli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu dizel motorda çeşitli yakıt enjeksiyon basınçlarında (18, 20, 22 ve 24 MPa) test etmişlerdir. Araştırmacılar biyodizelin yakıt özellikleri ve yanma karakteristikleri nedeniyle ÖYT, CO₂, ve NO_x emisyonunun arttığını, is emisyonlarının, HC ve CO emisyonlarının azaldığını bildirmiştir. Ayrıca, artan enjeksiyon basıncının, yüksek yüzdeli biyodizel-dizel karışımlarının (B20, B50 ve B100) ÖYT, CO, HC ve is emisyonlarında azalmaya ve

CO₂, ve NO_x emisyonlarında artışa neden olduğunu, artan veya azalan enjeksiyon basıncının, dizel yakıtı ve düşük yüzdeli biyodizel dizel karışımları (B5) için ÖYT değerlerinde orijinal enjeksiyon basıncına kıyasla artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir [45].

Arunprasad ve Balusamy araştırmalarında karışık biyodizel (*Thevetia peruviana*, *Jatropha*, *Pongamia* ve *Azadirachta indica*) ve dizel yakıtının motor performans ve emisyon özelliklerini incelemek adına farklı yüklerde (0,5 kW ile 3,5 kW arasında değişen) çeşitli enjektör basınçları (200, 210, 220 ve 230 bar) ve püskürtme avanslarında (23, 25, 27, 29 KA) yakıtları test etmişlerdir. Farklı enjektör basınçlarındaki çalışmalar değerlendirildiğinde PB'nin 200 bardan 230 bara artırılmasıyla maksimum yükte fren termal verimliliğin karışık biyodizel için dizel yakıtı kıyasla tam yükte iken %25,7'den %28,1'e arttığını ÖYT'nin ise 0,33'ten 0,31 kg/kWh'a düştüğünü bildirmişlerdir. CO, HC ve is emisyonları açısından değerlendirildiğinde karışık biyodizel yakıtının dizel yakıtı kıyasla sırasıyla %53,85, %34,17 ve %29,7 oranlarında azaldığını belirlemişlerdir. PB'nin 230 bara çıkartılmasıyla NO_x emisyonunun dizel yakıtı kıyasla %31,47 daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir [46].

Saravan vd. çam ağacı reçinelerinden elde ettikleri biyodizeli %30 oranlarında dizel yakıtı ile karıştırarak P30 yakıtını elde etmişlerdir. Elde ettikleri P30 yakıtını tek silindirli direkt enjeksiyonlu, doğal emişli Kirloskar AV1 marka dizel motorunda farklı yük koşullarında (%100, %80, %60, %40 ve %20), çeşitli enjektör basınçlarında (200, 250, 300, 350 bar) test ederek P30 yakıtı ve dizel yakıtının motor performans ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. PB'nin 200 bardan 350 bara çıkmasıyla P30 yakıtının ısı açığa çıkış oranı ve silindir içi basınç değerlerinin arttığını, ÖYT'nin yüzde 6,2 azaldığını fren termal verimin ise %7 oranında arttığını bildirmişlerdir. Tam yük koşullarında iken P30 karışımının 300 barda CO ve HC emisyonlarında maksimum azalmayı gösterdiğini, P30 karışımı için PB'nin 200'den 350 bara çıkartılmasıyla CO, HC ve is emisyonlarının sırasıyla yaklaşık olarak %7,5, %21 ve %35,5 oranında azaldığını, P30 yakıtı için 200 bar'da tam yükte NO_x emisyonunun 537 ppm iken 350 bar'da 682 ppm olduğunu bildirmişlerdir.

2.3. ALTERNATİF YAKITLARDA RSM (RESPONSE SURFACE METHODOLOGY) UYGULAMALARI

Uslu ve Şimşek çalışmalarında, kanola, aspir ve atık bitkisel yağ karışımları ile elde edilen biyodizelin (%97, %98, %99 ve %100) ve 2-etilhekzil nitratin (EHN) (%3, %2, %1 ve %0) dizel motorda kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkisini deneysel olarak ve tepki yüzey metodolojisi (RSM) ile incelenmiştir. Motor deneylerini, farklı karışım oranlarıyla elde edilen biyodizel/EHN yakıt karışımlarıyla, dört farklı motor yükünde (500, 1000, 1500 ve 2000W) gerçekleştirilmişlerdir. Deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre RSM modeli oluşturulmuşlardır. Çalışmalarında biyodizel oranı, EHN yüzdesi ve yük miktarlarını giriş faktörleri olarak seçerken, fren termal verimi (FEV), fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve is emisyonlarını yanıt parametreleri olarak belirlemişlerdir. Optimum değerleri %100 biyodizel yüzdesi, %1,1 EHN yüzdesi ve 1515W yük olarak bildirmişlerdir. Elde edilen sonuçların, biyodizel/EHN yakıt karışımı ile çalışan dizel motorda motor performansını ve egzoz emisyonlarını optimize etmek için %5'ten daha az bir hata oranıyla etkili bir şekilde kullanılabileceğini bildirmişlerdir [47].

Krishnamoorthi vd. araştırmalarında dizel yakıtı ve aegle marmelos yağı biyodizeli ve DEE (dietil eter) karışımlarını çeşitli enjektör basınçlarında (210 bar, 230 bar, 250 bar) farklı sıkıştırma oranlarında (16, 17, 18) ve değişken püskürtme zamanlarında (21°, 23°, 25°) %80 yükte tek silindirli, doğal emişli, su soğutmalı dizel motorda test etmişlerdir. RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasında PB, sıkıştırma oranı ve yakıt karışımları giriş parametresi olarak belirlenirken ÖYT, FEV, CO, NO_x , HC ve is emisyonları çıkış parametreleri olarak belirlenmiştir. Optimum koşulların 17,9 sıkıştırma oranı 234.2 bar PB ve 25° püskürtme avansının olduğunu bildirmişlerdir. Oluşturdukları RSM modelinin ÖYT, FEV, CO, NO_x , HC ve is emisyonlarını %5'ten daha küçük hata oranıyla tahmin etmede güvenilir olduğunu bildirmişlerdir [48].

Uslu vd. araştırmalarında tek silindirli dizel motorda kenevir tohumu biyodizeli (%30) ve dizel yakıtından (%70) oluşturdukları karışımlarına 25, 50, 75 ve 100 ppm miktarlarında titanyum oksit (TiO_2) nano parçacık ekleyerek farklı yüklerde (1500,

2000, 2500, 3000 W) motor performans ve emisyon değerlerini araştırmışlar ve optimum nanoparçacık miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen deneysel bulgulara RSM uygulamışlardır. Optimum motor yükü ve TiO_2 miktarının 2000 W ve 75 ppm olduğunu bildirmişlerdir. Bu koşullar altında, FEV, FÖYT, CO, HC, NO_x ve is emisyonları sırasıyla 0,7665 gibi yüksek bir uyumluluk değerine sahip olduğunu belirterek %27,942, 1081,51 g/kWh, %0,057, 40,293 ppm, 257,3742 ppm olarak belirtmişlerdir Oluşturdukları RSM modelinin FEV, FÖYT, CO, HC, NO_x ve is emisyonları %5'ten daha küçük hata oranıyla tahmin etmede güvenilir olduğunu bildirmişlerdir [49].

Kumar vd araştırmalarında YYPE'den elde edilen plastik piroliz yağı (PPY) yüzdesinin, Al_2O_3 nanopartikül (NP) konsantrasyonunun, sıkıştırma oranının (SO) ve enjeksiyon zamanlamasının dizel motor yanması, performansı ve emisyonu üzerindeki etkisini optimize etmek için yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. Deneyler, %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında (PPY), 0, 25, 50, 75 ve 100 ppm Al_2O_3 ilave edilerek, 16, 17, 18, 19 ve 20 SO, 17, 19, 21, 23 ve 25°ateşleme avansları ile %80 yükte gerçekleştirilmiştir. RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasına göre 18,06 SO, %16,56 (PPY), 53,53 ppm Al_2O_3 ve 20,95° ateşleme avansının optimum koşullar olduğunu tespit etmişlerdir. Bu optimum koşullarda fren termal verimliliğini (FEV), ısı açığa çıkış oranını, silindir içi gaz basıncını, özgül yakıt tüketimini (ÖYT), karbon monoksit (CO), azot oksit (NO_x) ve hidrokarbon (HC) emisyonu yanıtlarının R^2 değerleri %95'in üstünde olduğunu bildirmişlerdir. Optimizasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırarak %5'ten daha küçük bir hatayla motor performans ve emisyon değerlerini tahmin etmede etkili bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir [50].

Aytav çalışmasında atık fındık yağından üretilen biyodizelin optimum karışım oranının belirlenmesi amaçlamıştır. Testleri, tek silindirli dizel motorda (ANTOR/6LD400) farklı yüklerde (7,5; 11,25; 15 Nm) ve hacimce %15 ve %30 atık fındık yağı karıştırılan dizel yakıtı ile gerçekleştirmişlerdir. Testlerden elde ettiği sonuçları yanıt yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak analiz etmiştir. Çalışmasında motor yükü ve karışım oranı girdi faktörleri olarak belirlerken, CO, NO_x , is, fren termal verim (FEV), ateşleme gecikmesi ve ÖYT çıkış faktörleri olarak belirlemiştir. Oluşturduğu matematiksel modelde R^2 değerlerini sırasıyla 0,98, 0,95, 0,91, 0,98, 0,99 ve 0,90

olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca optimum noktada validasyon testi ile sonuçlarının %5 hata ile tahmin edilen değerlere oldukça yakın olduğunu belirtmiştir [51].

Şimşek vd. çalışmalarında %30 susam yağı + %70 dizel yakıt karışımı ile çalışan tek silindirli bir dizel motora farklı miktarlarda grafen oksit (GO) eklenmesinin motor karakteristikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla farklı motor yüklerinde deneysel bir çalışma yürütülmüşlerdir. Ayrıca optimum çalışma koşullarını belirlemek için tepki yüzey metodolojisi (RSM) ile bir optimizasyon gerçekleştirilmişlerdir. 100 ppm GO'nun ve 1950 W motor yükünün ve optimum koşullar olduğunu bildirmişlerdir. Optimum koşullar altında ortaya çıkan tepkilerin ÖYT, (egzoz gaz sıcaklığı) EGS, CO, HC ve NO_x için sırasıyla 968,73 g/kWh, 259,8 °C, %0,0603, 23,13 ppm ve 185,61 ppm olduğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları doğrulama çalışmasında optimum ve deneysel sonuçlar arasındaki hatanın maksimum %4,69 olduğunu bildirmişler ve RSM modelinin tek silindirli bir dizel motorunu başarılı bir şekilde modelleyebileceği belirtmişlerdir [52].

Kumar vd. atık yemeklik yağ (WCO) ve atık plastik yağ (WPO) ile oluşturdukları karışımı BD (%50WCO+ %50 WPO) dizel yakıtı ile hacimce %10, %20, %30, %40 oranında karıştırarak yakıtlarını elde etmişlerdir. Common Rail direkt enjeksiyonlu (CRDI) motorda karışım yüzdesi, yakıt enjeksiyon zamanlaması, egzoz gazı devridaiminin (EGR) ve motor yükünün motor performans ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını merkezi birleşik tasarım (CCD) ile RSM kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada karışım yüzdesi, yakıt enjeksiyon zamanlaması, egzoz gazı devridaimi ve motor yükü giriş parametreleri olarak belirlenirken FEV, EGS, ÖYT, HC, CO ve NO_x çıkış parametreleri olarak belirlenmiştir. RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasında karışım oranını %14 biyodizel, yakıt enjeksiyon zamanlamasını 25 KA üst ölü noktadan önce, egzoz gazı devridaimini %6 EGR ve motor yükünü ise %35 olarak tespit etmişlerdir. Varyans (ANOVA) analizinin sonuçlarına ise göre R² değerlerini FEV, EGS, ÖYT, HC, CO ve NO_x için sırasıyla %98,41; %97,02; %99,29; %98,49; %98,71 ve %98,21 olarak belirlemişlerdir. Optimizasyon sonuçlarını deneysel bulgular ile karşılaştırarak %7'den daha az bir hata oranıyla RSM çalışmasının common rail direkt enjeksiyonlu

(CRDI) motorda performans ve emisyon değerlerini tahmin etmede etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu bildirmişlerdir [53].



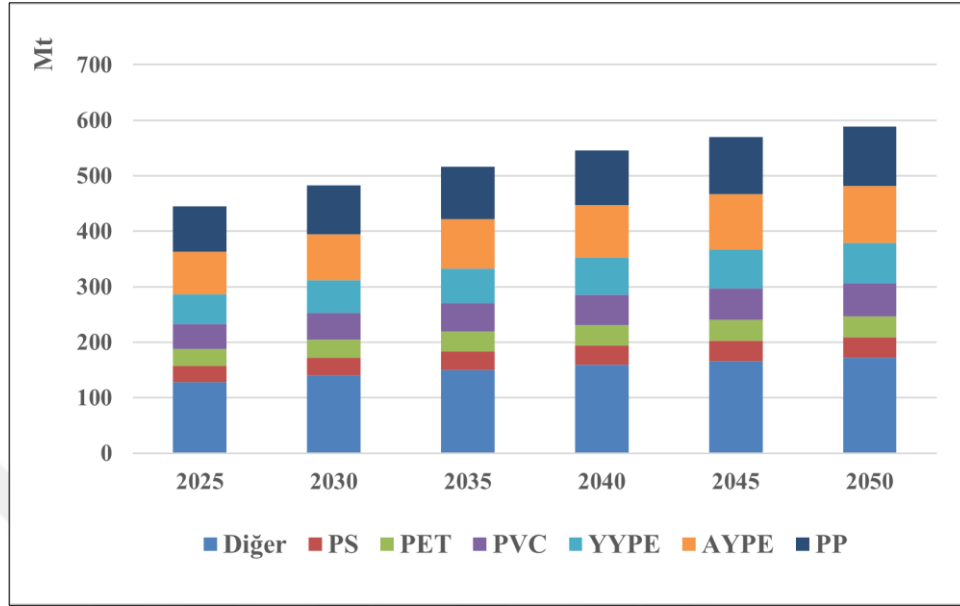
BÖLÜM 3

PLASTİKLER VE GERİ KAZANIMI

3.1. PLASTİKLER

Plastik sözcüğü, biçimlendirme anlamına gelen “Plastikos” sözcüğünden gelmekte ve kalıba dökme ya da herhangi bir başka yöntemle kolayca biçimlendirilebilen çok çeşitli yapay malzemeleri ifade etmektedir [54]. Çeşitli polimerizasyon yöntemleriyle üretilen polimer maddelere çeşitli katkı maddelerinin eklenmesi ile karbon, hidrojen, oksijen, azot atomları ile birlikte başka organik ve inorganik elementlerden oluşmaktadır. 1860 yılında Aleksander PARKES tarafından ilk olarak keşfedilen plastik, hafif, kolay şekil verilebilir, ucuz ve dayanıklı olduğu için günümüzde oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır [55]. Plastikler genel olarak ısıya gösterdikleri davranışlara göre termoplastik ve termoset plastikler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Sıcakta sertleşen polimerler olarak da bilinen termoset polimerler, eritildikten sonra katı kalan ve daha sonra tekrar eritilip değiştirilemeyen bir plastik türüdür. Termoset plastikler geri dönüştürülemez. Termoset plastiklere polibütadien, poltüretan, poltamid ve vulkanize kauçuklar örnek olarak verilebilir. Termoplastikler ise ısıtılarak eritilebilen, kalıplanabilen ve soğutularak sertleştirilebilen plastik sınıfıdır. Termoplastikler tekrar tekrar ısıtılabilir, yeniden şekillendirilebilir ve sertleştirilebilirler. Bu özelliklerinden dolayı mekanik olarak geri dönüştürülebilirler ve hiçbir kimyasal değişime uğramazlar [56]. Termoset malzemeler, yüksek çapraz bağlara sahip polimerlerdir, bu da onları ısıya karşı dirençli hale getirir ve ısıtıldığında bozunma gösterir. Doğrusal veya dallanmış zincirlere sahip olabilirler ve çözücüler içinde çözünme ve erime davranışı sergileyebilirler. 80’li ve 90’lı yıllardaki kısıtlayıcı çevresel kararlar nedeniyle termoset plastiklerle yapılan birçok uygulama termoplastikler kullanılarak geliştirilmeye başlanmıştır [57]. Plastik üretim hacminin %80’lik kısmını termoplastikler oluşturmaktadır [58].

Dünyada 2015 yılında 322 Mt termoplastik üretilmiş ve 2050 yılına kadar üretilmesi muhtemel termoplastik miktarları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. 2050 yılına kadar üretilmesi muhtemel termoplastik miktarları [59].

PE, (YYPE, AYPE, XLPE), PET, PP, PVC ve PS en çok kullanılan plastik çeşitlerindendir [60]. Bu plastiklerin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

3.2. PLASTİK TÜRLERİ

3.2.1. Polietilen (PE)

Tekrar eden yapısal birimler kovalent bağlarla birleştirildiğinde, makromoleküler yapılar olarak görülen polimerler oluşmaktadır [61]. Monomerler, polimeri oluşturan ve birbirlerine kovalent olarak bağlanmış küçük moleküllerdir. Polimerizasyon reaksiyonları, bir monomerden başlayarak bir polimer üretmek için yürütülen bir dizi kimyasal işlemi ifade eder [62]. Polietilen (PE), yüksek darbe direnci, aşınma direnci, esneklik, elektrik yalıtım özellikleri, düşük toksisite, uygun fiyat, hafiflik, solventlere karşı direnç, işleme kolaylığı ve çok sayıda diğer fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle plastik endüstrisinde en çok tercih edilen polimerdir [63]. Polietilen, ambalaj, boru hatları, şişeler ve kablo ve tel uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır [64]. PE termoplastik ailesinin en eski üyesi olmakla

birlikte PE'nin ilk olarak alçak yoğunluklu formu üretilmiş (AYPE) sonrasında geliştirilerek yeni polietilen çeşitleri üretilmeye başlanmıştır. Polimeri meydana getiren zincirler üzerindeki dallanmalar PE türlerinin çeşitliliğini sağlamaktadır.

3.2.1.1. Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE)

AYPE ilk olarak üretilmiş olan PE türü olmakla birlikte yarı sert ve saydam bir malzemedir. Yüksek tokluk, esneklik, düşük su absorpsiyonu, kimyasallara ve hava koşullarına karşı yüksek direnç özellikleri arasındadır. En kolay işlenebilir polietilen türleri içinde yer almaktadır. Düşük üretim maliyeti ve oda sıcaklığında organik çözücülere karşı dayanıklıdır. AYPE, düşük nem geçirgenliği sayesinde kolayca ekstrüde edilebilmektedir.

Düşük sıcaklıklarda kolayca işlenebilirlik özelliği, düşük gerilme mukavemeti ve iyi derecede korozyon direncine sahiptir. Dezavantajları arasında zayıf dayanım, sertlik ve yüksek sıcaklıklarda çalışmaya elverişli olmaması, kolay alevlenebilme, yüksek gaz geçirgenliği ise dezavantajları arasında sayılmaktadır. AYPE, 0,910-0,940 g/cm³ yoğunluk aralığına sahiptir. Yapısındaki daha çok dallanma sebebiyle YYPE'ye göre daha düşük kristalliteye sahiptir. Bunun sonucunda sertliği ve dayanıklılığı daha düşük, kimyasal dayanımı sınırlıdır. Suya karşı dirençli olduğundan dolayı çöp torbaları, plastik torbalar, ambalaj gibi birçok ürünün üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [65, 66].

3.2.1.2. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)

Molar kütlesi en yüksek olan PE çeşidi YYPE'dir. Yüksek molar kütlesi, düşük sürtünme katsayısı ile birleştiğinde aşınma direnci son derece yüksek bir ürün ortaya çıkmaktadır. Ziegler-Natta veya Phillips katalizörleri ile etilen polimerizasyonu ile üretilir. YYPE, bazı AYPE materyallere nazaran daha katı ve serttir. Ayrıca, AYPE'den daha fazla yüksek gerilme mukavemetine ve basınç dayanımına sahiptir. Yoğunluğu ise 0,94 – 0,97 g/cm³ arasındadır. YYPE düşük dallanma ve yüksek derecede kristallik ile yüksek dayanım özelliklerine sahip uzun bir doğrusal polimer zinciri olarak karakterize edilir. YYPE, olağanüstü darbe direnci, az nem emilimi ve

yüksek gerilme mukavemeti nedeniyle PE uygulamalarında kullanılan en yaygın malzemelerdendir. YYPE, AYPE'ye kıyasla daha fazla dayanıklılık ve sertliğe sahipken, düşük sıcaklıklarda darbeye dayanma kabiliyeti AYPE'ye göre daha düşüktür [66]. YYPE'nin fiziksel özellikleri yoğunluk, molar kütle ve molar kütle dağılımlarına bağlıdır. Yoğunluk arttıkça yumuşama sıcaklığı, kimyasal direnç ve rijitlik artarken düşük sıcaklıktaki darbe mukavemeti, çatlak direnci ve uzama miktarı azalmaktadır. Akma ve kopma mukavemeti, tokluk, kimyasallara karşı direnç molar kütle ile ilişkilendirilebilirken arttırıldığında iyileştirilebilir. Geniş bir molar kütle aralığı, enjeksiyon kapasitesinin artmasına, eritildiğinde viskozitenin azalmasına ve deformasyona karşı direncin artmasına yol açar. Tersine, küçük bir molar kütle aralığı çekme mukavemeti, tokluk ve çatlamaya karşı direnç gibi nitelikleri geliştirir [67]. YYPE, içme suyu ve gaz dağıtımına yönelik boru sistemlerinin yanı sıra hem ev hem de endüstriyel kimyasalların ambalajlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [68].

3.2.1.3. Çapraz Bağlı Polietilen (XLPE)

XLPE, polietilen molekül zincirlerinin çapraz bağlanmasıyla üretilen bir polimerdir. Polimer zincirlerinin üç boyutlu ağ yapısını oluşturmak için, çözünmeyen ve eritilemeyen polimerler çapraz bağlama yoluyla bir araya gelmektedir. Çapraz bağlamadaki esas amaç termoplastikleri termoset haline dönüştürmektir. Bu işlemle birlikte termoplastikler yüksek molar kütleli termoset plastikler haline gelmektedir. Olağanüstü elektriksel yalıtım özellikleri, yangına, suya ve kimyasallara karşı dayanıklılığı ve yüksek esnekliği nedeniyle yüksek gerilim güç kablolarında ve transformatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.2.2. Polietilen Tereftalat (PET)

Polietilen tereftalat (PET), amorf ve yarı kristal malzeme olarak bulunabilen tereftalik asit ve etilen glikol arasındaki reaksiyon ile oluşan termoplastik bir polimer çeşididir. PET endüstrisi, toplam polimer üretiminin %18'ine karşılık gelmekte ve PE ve PP'den sonra üçüncü sırada yer almaktadır. Şeffaf, hafif, yüksek mukavemetli, kimyasal olarak oldukça inert, gazlar için seçici geçirgen olduğu için en yaygın olarak ambalaj sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca yandığında CO₂, su ve ısı üreten, herhangi bir

toksik salınımı olmayan çevre dostu, geri dönüştürülebilir bir polimerdir [69]. Bu özelliklerinden dolayı özellikle gıda endüstrisinde, ambalaj üretiminde yaygın bir uygulama alanına sahiptir.

3.2.3. Polipropilen (PP)

PP propilen polimerizasyonu ile elde edilen poliolefin grubuna ait termoplastik polimerlerdendir. Birçok sektör ve endüstrinin çeşitli yerlerinde mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı sıklıkla kullanılmakta ayrıca lif haline getirilebilen plastik çeşitlerindendir. YYPE'ye nazaran daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Polistiren (PS) ya da PE ile karıştırıldığında mekanik özelliklerinde iyileşme görülebilmektedir. Otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır.

3.2.4. Polivinil Klorür (PVC)

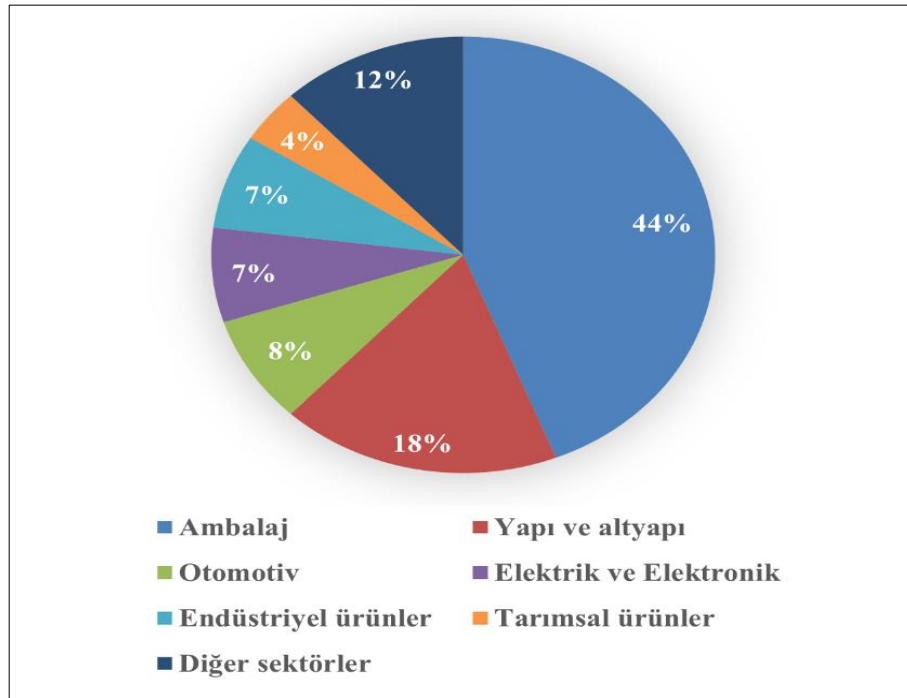
PVC'nin monomeri klor ve etilenden elde edilen vinil klorürdür. Sert ve esnek bir yüzeye sahip olan PVC fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. İçerisindeki klor sayesinde iyi derecede iyi derecede ısı iletkenliği sağlamakta ve elektrik yalıtımı malzemeleri için kullanımda uygun hale gelmektedir. Farklı katkı maddeleri ile karıştırılarak çok yönlü plastikler elde edilebilmektedir. Polivinil klorür (PVC), maliyet etkinliği ve sağlam dayanıklılığı nedeniyle inşaat ve tıbbi cihazlara yönelik PVC borular gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [70].

3.2.5. Polistiren (PS)

PS'nin ortalama yoğunluğu 1,03 ile 1.06 gr/cm³ aralığındadır. 70°C sıcaklığa kadar işlevselliğini koruyabilen, parlak, kırılğan ve oldukça sert bir plastik olup çok amaçlı kullanılabilir. Su ve kimyasal maddelere karşı direnci yüksek olan bir tür termoplastik malzemedir. Polistiren üretim hacmine göre diğer plastikler arasında dördüncü sırada gelmektedir.

3.3. PLASTİKLERİN KULANIM ALANLARI

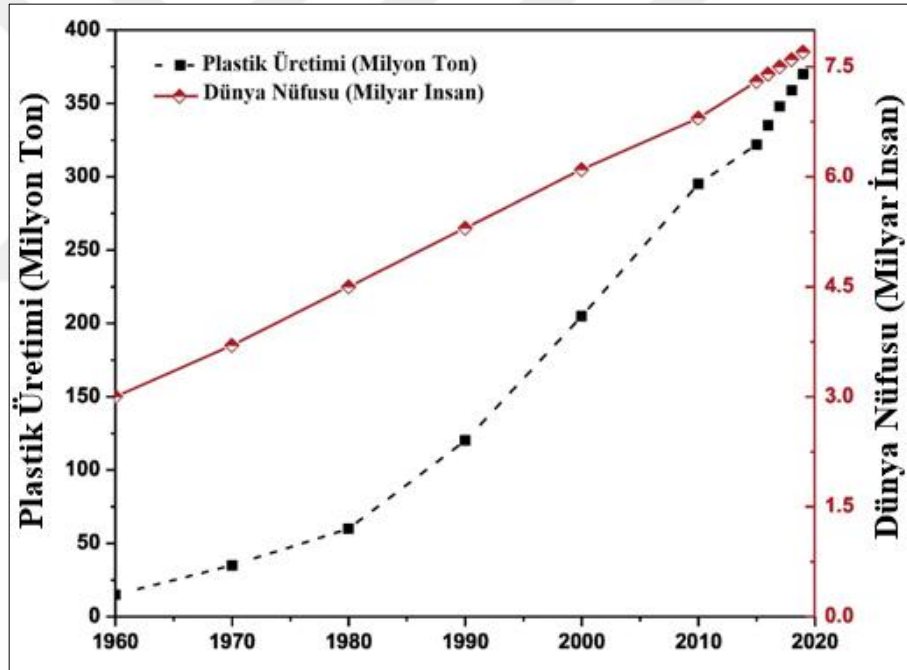
İlk plastik 1860 yılında icat edilmiş ve küresel plastik endüstrisinin başlangıcı 1907 yıllarına dayanmaktadır [71]. Plastikler, çok yönlü kullanımları nedeniyle günlük hayatımızda önemli bir rol oynayan sentetik kaynaklardır. Plastik malzemeler günümüzde kâğıt, cam, ipek, kauçuk, ahşap, metal gibi doğal ürünlerin yerini almış ve hayatın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Plastik malzemeler farklı şekillerde işlenebilme özelliklerine ek olarak ekonomik olarak da avantajlı olmaları sebebiyle dünya üzerinde teknolojik gelişmeler üzerinde etkili olmasını sağlamıştır. Örnek olarak elektrik ve elektronik sektöründe tercih edilmesinin bazı sebepleri, iyi tasarım özellikleri, mükemmel yalıtım özellikleri, montaj kolaylıkları ve hafif oluşlarıdır. Plastik sektörü, özellikle 20. yüzyılın ilk çeyreğinden sonra çok çeşitli amaçlarla, çok farklı alanlarda kullanım alanı bulmuş olan ve bu alanı artarak genişletmeye devam eden bir sektör olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel plastik üretimi ile birlikte 1950'lere kadar plastik üretiminde hızlı bir artış olmamış ancak son 70 yılda birçok farklı sektörde kendine yer edinmiş ve kullanım alanı bularak yaklaşık 230 kat artmıştır. Dünya genelinde 2021 yılında üretilen plastiğin çeşitli sektörlerle göre dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Dünya genelinde üretilen plastiğin çeşitli sektörlerle göre dağılımı [72].

3.4. ATIK PLASTİKLER

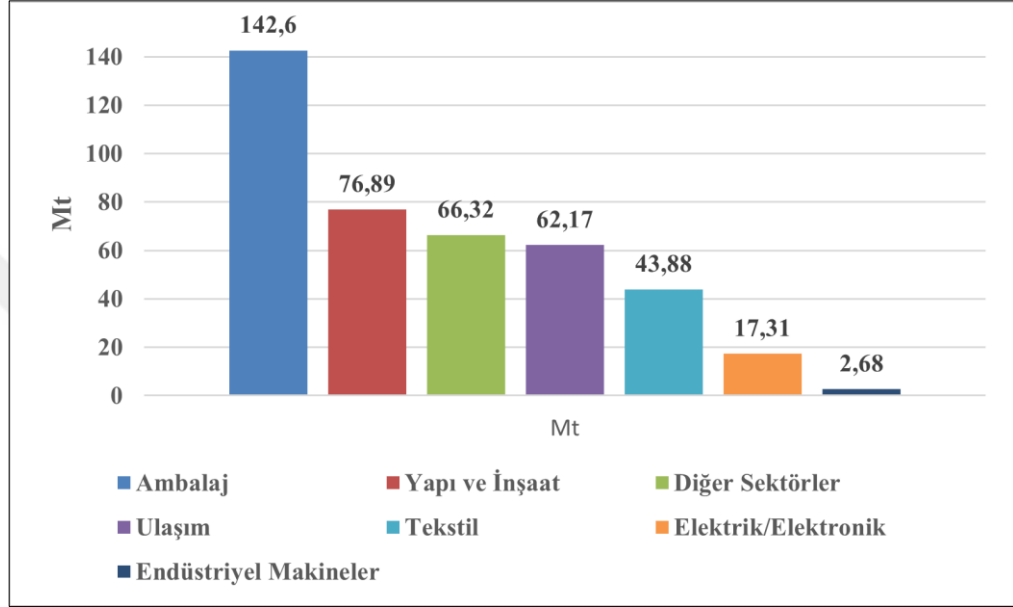
Artan dünya nüfusu ile her yıl dünya çapında yaklaşık 400 milyon tondan fazla plastik üretilmekte, [73] %50'si bir yıl geçmeden atık haline gelmekte, [74, 75] ayrıca üretilen plastiğin miktarının aksine, dünya çapındaki toplam plastik atığının sadece %10'u geri dönüştürülmekte, %14'ü yakılmakta ve geri kalanı çöplüklere boşaltılmakta veya çevreye bırakılmaktadır [76]. 2000 yılından günümüze kadar dünya genelinde şimdiye kadar üretilmiş olan plastiğin %50'sinden daha fazlası üretilmiştir [77]. Buda giderek artan plastik atığının olumsuz yönde çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini arttırmaktadır. 1960 ile 2020 yılları arasında plastik üretimi ve dünya nüfusu Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



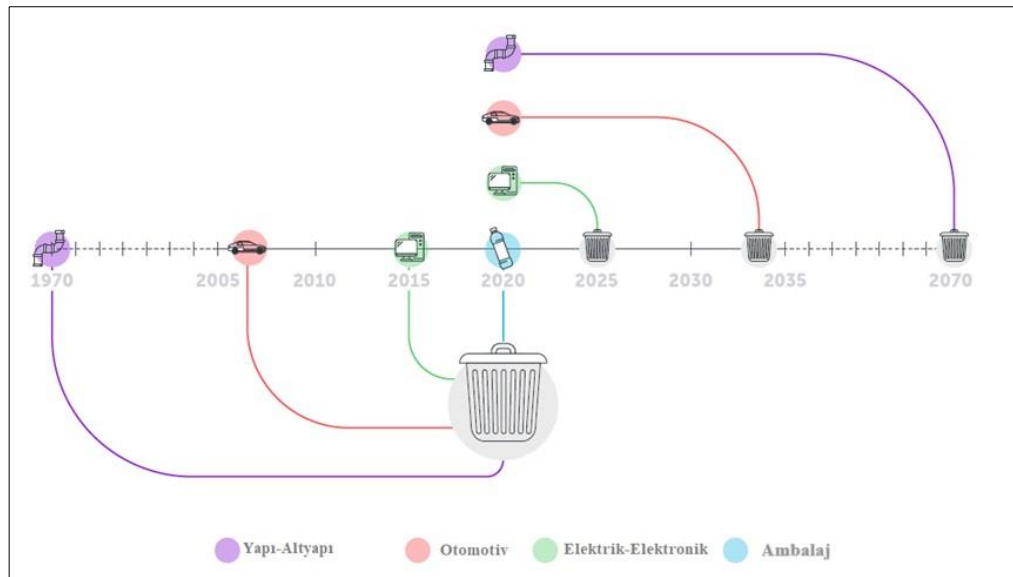
Şekil 3.3. 1960 ile 2020 yılları arasında plastik üretimi ve dünya nüfusu [78].

Plastikler yaygın olarak her sektörün ihtiyacı olan malzemelerdir. Şekil 3.4'te OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) verilerine göre 2019 yılı sektörlerine göre atık plastik miktarları gösterilmiştir. Plastik materyalin geniş bir kullanım yelpazesi ile yaşamın tüm alanında kullanılan birer materyal haline gelmiştir. Şekil 3.5'te ise çeşitli sektörlerde üretilen plastiklerin atık haline gelme süreleri gösterilmiştir. PE, PP, PS ve PVC gibi plastiklerden üretilen malzemelerin yarısının

atık hale gelme süresi 1-2 yıl iken, ambalaj plastiklerinin atık hale gelme süresi ise genellikle bir aydan azdır [79]. Özellikle gıda, içecek gibi ürünle için kullanılan plastik ambalajlar genellikle sadece bir kez kullanılmaktadır. Bu plastiklerin yüksek verimi, kısa hizmet ömrü ve düşük doğal bozunma oranı bir araya geldiğinde ise kaçınılmaz olarak atık plastik üretiminin artmasına yol açmaktadır.



Şekil 3.4. Endüstriyel sektörlere göre yıllık küresel atık üretimi [80].



Şekil 3.5. Çeşitli sektörlerde üretilen plastiklerin atık haline gelme süreleri [81].

3.5. ATIK PLASTİKLERİN GERİ KAZANIMI VE ÖNEMİ

Geri kazanım, kaynakların azalmasını ve atık miktarını azaltmayı amaçlamaktadır. Kullanılabilirliğini yitirmiş atık malzemelerin yeniden kullanılması ve tekrar üretim sürecine dahil edilmesi anlamına gelmektedir. Geri dönüşüm, hem hammadde kaynağının tekrar üretime dahil edilmeleri açısından hem de atıkların bertarafı açısından dünyada çevredeki kirliliği açısından önem arz etmektedir. Plastiklerin imha edilmesi için temel çözüm, atık plastiklerin yönetimi ve geri kazanımıdır. Ayrıca plastik ürünler yenilenemeyen fosil yakıtlardan üretilmekte [2] ve plastik üretimi, dünyanın en hızlı büyüyen ve aralıksız süren akışlarından biri olmakla birlikte küresel petrol tüketiminin %6'sını oluşturmaktadır [3]. Bu tüketimin 2050 yılına kadar dört kat artması beklenmekte [4] ve 2050 yılına kadar petrol üreticilerinin en büyük pazarının plastik üreticilerinden oluşacağı tahmin edilmektedir [5]. Fosil yakıtların küresel arzı kritik hale geldikçe, fosil yakıt kaynaklarından elde edilen plastiğin geri kazanımı önem kazanmaktadır. Bunun yanında fosil yakıtlardan üretilen plastikler atık olarak doğaya terk edildiklerinde, uzun süre parçalanamadığından çevre kirliliğine neden olmaktadır. Atık haline gelen plastiklerin yeniden değerlendirilmesinin bir başka sebebi de ekonomi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple fosil yakıt kaynaklarından üretilen plastiklerin yeniden değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması sağlanmalıdır.

Tüketim ve üretim atıkları, atık plastiklerin iki kategorisini oluşturmaktadır. Plastiğin üretim aşamasında ortaya çıkan atıklar (hatalı ürünler, kalıntılar, fireler), cinsinin ve renginin bilindiği üretim atıkları olarak bilinir. Bu atıkların içinde hiçbir ek madde olmadığı için doğrudan plastik kırma makinesinde parçalanır, eritilir ve granüler hale gelir. Kullanılmış plastiklerin dönüştürülebilir atıkların bir parçası olarak toplanması tüketim sonrası atık olarak bilinmektedir. Toplanan atık plastikler, içindeki zararlı maddeleri temizlemek için su havuzlarında depolanmakta ve plastik atıklar daha sonra etüvlerde kimyasal yapısını koruyacak sıcaklıklarda kurutulmaktadır. Kurutulan plastikler kırma makinasında parçalandıktan sonra eritilmekte ve granül haline getirilmektedir. Bu da ıslak kırma olarak bilinmektedir. Elde edilen granüllerin eşit yoğunluğa sahip olması gerekmektedir [82].

Atık plastiklerin depolanması, yakılması ve tekrar işlenerek değerlendirilmesi sırasında ortaya çıkan sorunlar nedeniyle, plastiklerin kimyasal yöntemlerle yakıt, enerji ve polimer ve monomer gibi kimyasal hammaddelere dönüştürülmesi akılcı bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Plastik atıkların toplanması, temizlenmesi ve ayrılması hem mekanik hem de kimyasal geri kazanımda geri kazanım oranını artırmaktadır [83]. Kimyasal geri kazanım işlemi polimerizasyon (hidroliz, metanoliz, glikoliz), gazlaştırma (sentez gazı) ve ısı bozunma (piroliz, eş-piroliz, hidrojenasyon) gibi proseslerden oluşmaktadır. Atık plastiklerin kimyasal olarak geri kazanımı, atıkların değerli ürünlere dönüştürülmesi işlemidir. Plastik atıklar hidrojen ile sıcaklık etkisiyle motorin ve benzin gibi petrokimya endüstrisinde değerlendirilebilecek kıymetli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Kullanım sonrası ile proses sonrası oluşan atık plastiklerin geri kazanımında birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül geri kazanım yöntemleri uygulanmaktadır.

3.5.1. Birincil ve İkincil Geri Kazanım

Orijinal polimerlerden üretilen ürünlere eş değerde ürünler elde etme işlemi olarak tanımlanan birincil geri kazanımda temiz olarak toplanabilen ve mekanik olarak kırıcılarda küçültülen atık plastikler orijinal polimerler ile karıştırılarak yeniden işlenmektedir. Bu metotla orijinal polimerden elde edilen ürün ile aynı özelliklere sahip yeni ürünler elde edilebilmektedir. İkincil geri kazanımda ise orijinal polimerle aynı özelliklere sahip olmayan ikincil kalite mamul üretimi söz konusudur [84]. Bu metotla kullanım sonrası kirlenmiş plastikler eritilerek bir dizi işlemlerin ardından kırıcı vasıtasıyla küçük boyutlara ayrılarak yeniden işleme alınmaktadır. Bu işlemler, genellikle üretim sürecinde polimerin içine aşırı katkı maddesi eklenmesi ve kullanım sonrasında oluşan kirlenmeler nedeniyle kalitesi düşen plastik atıklar için uygulanmaktadır. Bu metot ile geri kazanılan plastikler ikinci sınıf malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Birincil ve ikincil geri kazanım yöntemleri, mekanik geri kazanım olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak geri dönüştürülen plastikler, orijinal ürünle aynı özelliklere sahip olabileceği gibi farklı niteliklerde de üretilebilmektedir. [60]

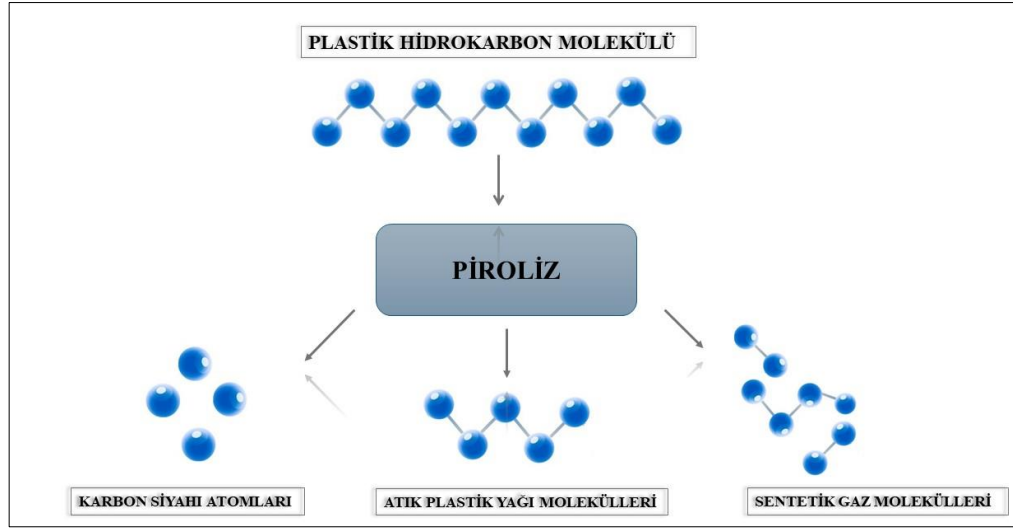
3.5.2. Üçüncül Geri Kazanım (Kimyasal Geri Kazanım)

Üçüncül geri kazanım atık plastiklerin, petrokimyasal ürünlere ve plastik üretiminde hammadde olarak kullanılmak üzere sıvı ve gaz olarak daha küçük moleküllere dönüşmesi işlemidir [58]. Üçüncül geri kazanım kimyasal geri kazanım olarak da adlandırılmaktadır. Bu geri kazanımın ana amacı atık halde bulunan plastiklerden plastiğin üretildiği polimer monomerinin bir başka deyişle orijinal polimerinin farklı amaçlar için kullanılmak üzere çeşitli ürünlere dönüştürülmesidir. “Kimyasal” kelimesi polimerin moleküler bileşimindeki bir değişikliği tanımlamak için kullanılmaktadır. Kimyasal geri kazanım ürünleri yakıt olarak kullanım için çok uygundur. Kimyasal geri kazanımına katkıda bulunan kilit faktör, üretim çıktısını en üst düzeye çıkaran ve atık oluşumunu en aza indiren etkili ve çevre dostu bir endüstriyel süreci garanti eden depolimerizasyon teknolojisidir. Kimyasal geri kazanım sürecinde piroliz, gazlaştırma, sıvı-gaz hidrojenasyonu, viskozite azaltma, buhar veya katalitik parçalama ve plastik atıkların yüksek fırınlarda indirgeyici madde olarak kullanılması gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu teknolojiler genellikle petrokimya sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır [58].

Termoliz, katalitik kreaking ve buhar kreaking, katı plastik atıklardan çeşitli yakıtlar elde etmek için kullanılan ve tercih edilen başlıca teknolojilerdir. Termal prosesler, katı atıkların ısı deşarjı yoluyla dönüşüm ürünlerine dönüştürülmesini içeren teknikleri ifade eder. Termal proseslerin birincil hedefleri atığı azaltmak ve ondan enerji elde etmektir. Uygulanabilir teknolojiler genellikle hava tüketim seviyelerine göre sınıflandırılmaktadır.

3.5.2.1. Piroliz

Piroliz işlemi plastik atıkların oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda (600-900°C) moleküllerin kimyasal yapısının bozularak ısı olarak parçalanıp katı, sıvı ve gaz gibi ürünlere dönüşmesidir. Şekil 3.6’da piroliz mekanizması diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Piroliz mekanizması diyagramı.

Pirolizin en ağır ürünü katı olarak elde edilen üründür. Reaktörün alt kısmında kül ve organik maddelerden oluşur. Kok kömürünü üretmek için yüzyıllardır piroliz kullanılmaktadır. Katı ürünün verimini yükseltmek için daha düşük sıcaklıklarda yavaş reaksiyon gerekmektedir [85]. Piroliz yoluyla elde edilen katı ürünlerin birçok kullanımı bulunmaktadır. Katı ürün doğrudan paketlenip gübre olarak kullanılabilir ayrıca, metalürjik amaçlarla dökme demir, elektro-manganez dökme plaka, zırhlı plaka ve aktif karbon, karbon disülfür ve karbon siyahı gibi kimyasalların üretiminde kullanılabilir. Su saflaştırma işlemlerinde de çoğunlukla kullanılmaktadır [86].

Piroliz prosesi sonrası elde edilen sıvı açık ve koyu kahve rengi arasında bir görünüme sahiptir. Piroliz ile üretilen sıvı ürünler ya yüksek moleküler ağırlığa sahip suda çözünmeyen organik moleküllerden ya da düşük moleküler ağırlığa sahip suda çözünen organik bileşiklerden oluşmaktadır. Elde edilen ürünün kimyasal özellikleri hidrojen, oksijen ve karbon atomlarının oranlarına ve piroliz ile meydana gelen moleküllerin hidrojen ile birleşimlerine bağlıdır [87]. Pirolizden elde edilen sıvı ürün ya doğrudan yakıt olarak kullanılabilir ya da daha değerli sentetik yakıtlara dönüştürülebilmektedir. Ayrıca çeşitli kimyasallar için direk olarak ham madde olarak da kullanılabilir. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen sentez gazı ürününde CH_4 , H_2 ve CO_2 gibi bileşikler bulunmaktadır [86].

3.5.2.1.1. Pirolizi Etkileyen Parametreler

Pirolizi etkileyen parametreler olarak basınç, tepkime koşulları, parçacık boyutu, piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı, parçacık boyutu, piroliz süresi, katalizör sayılabilmektedir. Bu parametreler piroliz sürecinde ürün verimini doğrudan etkilemektedir. Piroliz sürecinin en önemli parametreleri ise sıcaklık, ısıtma hızı ve piroliz süresidir.

Ürünün verimi piroliz sıcaklığından önemli ölçüde etkilenir ve bu da onu çok önemli bir parametre haline getirmektedir. Yüksek piroliz sıcaklıklarında sıvı ve gaz ürün miktarları artarken daha düşük sıcaklıklarda ise katı ürün üretimi artmaktadır. Sıcaklık parametresi sadece ürünlerin kimyasal yapısını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda ürün miktarlarındaki değişimi de etkiler.

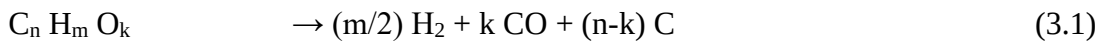
Piroliz süreci ısıtma hızına bağlı olarak yavaş piroliz, hızlı piroliz, basınç veya vakum altında ise yükseltgen, indirgen ve inert piroliz olarak sınıflandırılmaktadır. Yavaş piroliz sürecinde ısıtma hızı 1-10 °C/dak iken hızlı piroliz sürecinde ise 102 °C/dak'dan daha fazladır. Yavaş piroliz, kuru biyokütle ağırlığından %35'lik tipik bir biyokömür verimi ile biyokömür üretimi için en etkili yöntemken, hızlı piroliz, biyoyakıt üretmek için en verimli yöntemdir ve gazlaştırma, sentez gazı üretmek için idealdir. Bu nedenle genellikle ısı ve enerji üretiminde kullanılmaktadır [83]. Yüksek ısıtma oranları ve kısa kalma süreleri sonucunda, hızlı piroliz daha yüksek oranda pirolitik yağ üretme eğilimindedir. Buna karşılık, yavaş piroliz, yavaş ısıtma oranları ve daha uzun kalma süreleri nedeniyle daha yüksek oranda biyokömür üretme eğilimindedir [88]. Yavaş pirolizi hızlı pirolizden ayıran temel fark, ısıtma hızı ve piroliz ortamında ürünlerin kalma süresidir. Hızlı pirolize etki eden başlıca faktörler; maddelerin türü, prosesin sıcaklığı, ısıtma hızının şiddeti, uygulanan basınç, partikül boyutu ve işlemin gerçekleştirildiği ortamdır. Uçucu ürün veriminden kaynaklanan yavaş piroliz, hızlı pirolizden farklıdır. Hızlı piroliz, uçucu ürünlerin verimini önemli ölçüde artırmaktadır. Birincil uçucu ürünler, düşük ısıtma hızı ve uzun kalma süresi nedeniyle reaksiyon ortamını terk etmeye vakit bulamadan ikincil ve üçüncül parçalanma ürünleri üretir ve tekrar katıya dönüşme tepkimeleri oluşur. Bu değişiklikler ise uçucu verimini düşürmektedir [89]. Maddenin cinsi, ısıtma hızı, basınç, sıcaklık ve tane boyutu, hızlı piroliz işlemlerini etkileyen faktörlerdir. Tane küçükse reaksiyon daha uzun sürmektedir. Hızlı piroliz süresi ne kadar kısa tutulursa, sıvı ürünün verimi de o kadar yüksek olmaktadır.

Pirolizde ısıtma hızı, reaktör tipi ve parçacık boyutu tarafından etkilenmektedir. Pirolizde parçacık boyutu piroliz verimini etkilemekte ayrıca parçacık boyutu arttıkça parçacık içinde ısıtma hızı düşmektedir. Yüksek uçucu madde verimi, parçacık boyutları küçük olan parçacıklara çok hızlı bir şekilde ısıtıldığında ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık değerlerinde ısıtma hızı ürünün dağılımı ve bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir, ancak düşük sıcaklık değerlerinde önemli ölçüde etkilidir. Yüksek ısıtma hızlarında gerçekleştirilen piroliz, yüksek verimle gaz ve sıvı ürün üretebilmektedir.

Uçucu madde verimini etkileyen diğer faktörlerden biri de basınçtır. Düşük basınç katran ve hafif yağ üretimini arttırırken, yüksek basınç parçalanma reaksiyonlarını hızlandırmakta ayrıca yüksek basınçlı piroliz işlemlerinde uçucu maddelerin alıkonma süresi arttığı için sıvı ürünlerin miktarı azalmaktadır [90].

Katı atıkların pirolizi sırasında çok sayıda karmaşık paralel ve seri reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bu karmaşık tepkimeler, biyokütlenin rafinasyonu veya ara ürünlere bölünmesi olarak da tanımlanabilmektedir [91]. Kısmi reaksiyonlar ve temel piroliz reaksiyonları aşağıda gösterilmektedir [92].

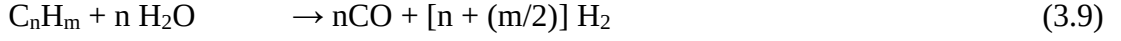
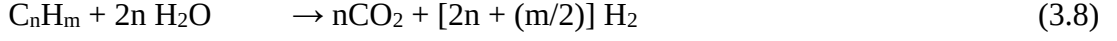
Ana piroliz reaksiyonu,



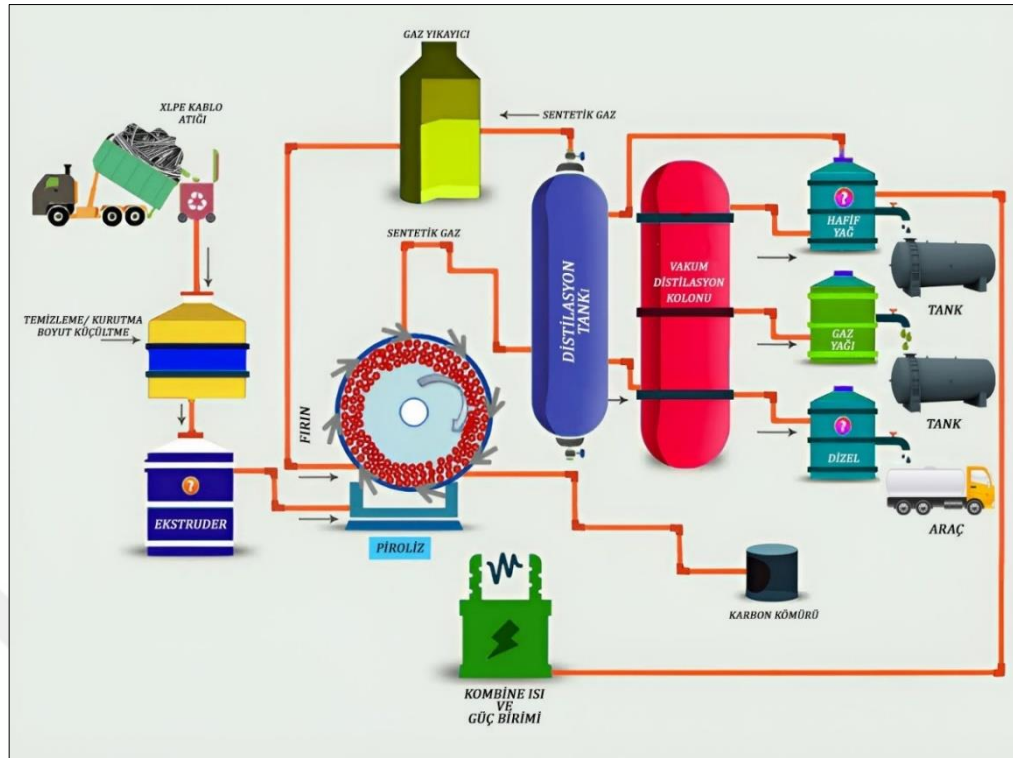
Kısmi reaksiyonlar,



Biyokütleden piroliz reaksiyonu ile hidrojen üretimi süreci denklem (3.8) nolu eşitlik ile belirtilmiştir. Ancak bazı kısmi reaksiyonlar aynı anda gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir [93].



Piroliz esnasında prosese tabi tutulacak maddeler reaktöre atılmaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu reaktör tabanına çöken maddeler biyokimyasal yöntemlerle gaz fazına geçmektedir. Gaz halindeki maddeler ise ısının etkisiyle reaktörde üst kısma çıkarak piroliz prosesinin tamamlanmasıyla son ürünler elde edilmektedir. Piroliz prosesinin atıkların çevreye bıraktıkları zararları gidererek daha ekonomik son ürünler elde etmesi, hava kirliliği açısından yakma işlemlerine göre daha avantajlı olması ve enerji açısından kendini desteklemesi avantajları arasında sayılmaktadır [86]. Piroliz çalışmalarında reaktör, sürecin merkezinde yer almaktadır. Literatüre bakıldığında, çeşitli reaktörlerin laboratuvar ölçeklerinde kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [94–98]. Şekil 3.7’de örnek olarak vorteks reaktör teknolojisine sahip klasik bir piroliz tesisinin proses akış diyagramı gösterilmiştir.



3.5.2.2. Hidrojenerasyon

Yüksek oranda karbonmonoksit ya da hidrojen ortamında gerçekleşen bir piroliz türüdür.

3.5.2.3. Gazlaştırma

Gazlaştırma, yakıcı bir gaz üretmek için karbon içeren biyokütle gibi malzemelerin termal bozulmasıdır. Bu prosedür boyunca, yakıt hücresinde dikkatle düzenlenmiş hava kaynağı ile biyokütle yakılmaktadır. Emisyonlar hidrojen ve metan gibi alevli gazlardan, CO₂, CO ve N₂ gazlar bulunmaktadır. Gaz gerekli temizleme sürecinden geçtikten sonra hem ısı hem de elektrik üretmek için motorlar ve türbinlerde kullanılabilir. Gazlaştırma teknolojisi, biyokütlenin verimli bir şekilde buhar kazanları, ya da Stirling motorlarında %30 verimlilikle elektrik üretimi için kullanılmasına olanak sağlamaktadır [91].

3.5.3. Dördüncül Geri Kazanım (Yakma ile Enerji Kazanımı)

Dördüncül geri kazanım, plastik atıkların yakılarak enerji üretimi için kullanıldığı bir ısı geri kazanım işlemidir [60]. Atık yakma tesisleri, uygulanan işleme göre dört kategoriye ayrılmaktadır. İlk kısım, atığın tesise gönderildiği yerdir. Atık dağıtım alanı, atık boşaltma alanı, atık bölmesi, atık vinci ve atık besleme kanalından oluşmaktadır. İkinci bölümün olan yakma bölümünde, katı atık ram besleyicileri ile yakma ızgarasına iletilir ve burada yanma gerçekleşir. Yanmanın ürettiği ısı enerji, buhar kazanında suyun buharlaştırıldığı yerdir. Üçüncü bölüm, yanma nedeniyle oluşan baca gazını temizlemek için tasarlanmıştır. Bu süreçte genel olarak baca gazlarının sulu kireç, aktif karbon ve torba filtre gibi yardımcı malzeme ve ekipman kullanılarak hava kalitesi standartlarını karşılamak için temizlenmesini içerir. Son bölümde, buhar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü buhar türbini ve jeneratör yer almaktadır [99]. Ancak birçok atık yakma tesisinde yanma sonrası ürünlerin kontrol altına alınmadığı bildirilmektedir [100]. Bu sebeple plastik atıkların yakılması sonucu oluşan zararlı emisyonlar sebebiyle çevre ve insan sağlığı açısından sakıncalı bir yöntem olduğu bildirilmektedir [101].

BÖLÜM 4

DİZEL MOTORLARDA ALTERNATİF YAKIT KULLANIMI VE YAKIT ÖZELLİKLERİ

Petrol kaynaklarının sınırlı olması ve dünya genelinde dağınık bir şekilde bulunması, yanma sonu ürünlerinin çevreye zarar vermesi gibi faktörler, yeni ve temiz enerji kaynaklarının araştırılması, verimli kullanımı ve yakıt özelliklerinin geliştirilmesi çalışmalarını gündeme getirmiş ve araştırmacıları alternatif bir temiz enerji kaynağına odaklanmaya yöneltmiştir. Alternatif yakıtta aranan özellikler incelendiğinde motorda performans düşüklüğü oluşturmaması, büyük motor modifikasyonlarına ihtiyaç duyulmadan kullanılabilir olması, düşük maliyetli ve yanma sonunda düşük emisyon üretebilir olmasıdır. Aşağıda dizel motorlarda araştırmacılar tarafından denenmiş alternatif yakıtlar ve bu yakıtların özellikleri belirtilmiştir.

Dizel motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar;

- ✓ Alkoller
- ✓ Biyoetanol
- ✓ Doğalgaz
- ✓ Hidrojen
- ✓ Biyodizel
- ✓ Lastik, plastik, ambalaj atıkları ve atık madeni yağlardan elde edilen alternatif yakıtlardır.

4.1. ALTERNATİF YAKITLAR

Enerji kaynaklarının birçoğu şu anda sınırlı kullanılabilirliğe sahip fosil yakıtlara dayanmakla birlikte geleneksel dizel yakıtın önümüzdeki 50 yıl boyunca özellikle ulaşım amaçlı kullanımının devam edeceği öngörüsü hakimdir [102].

Dizel motorlar, gelişmiş dayanıklılıkları ve verimlilikleri dünya ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, dünyadaki sera gazı emisyonlarının yaklaşık %30'u ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır ve bu da küresel ısınmaya yol açmaktadır [103]. Bu sebeple enerji sürdürülebilirliği ve sera gazı emisyonlarını azaltma amacıyla alternatif yakıtların kullanımına olan ilgiyi günden güne arttırmaktadır.

4.1.1. Alkoller

Sıvı fazda olmaları ve yüksek oksijen içermeleri nedeniyle, alkoller genellikle dizel yakıt katkı maddesi olarak tercih edilmektedir [104]. Alkoller yine birçok araştırmacı tarafından test edilmişlerdir [104–107]. 3 ya da daha az karbon atomu içeren alkoller kısa zincirli olarak adlandırılmaktadır. Bu tip alkoller motorlarda emisyon seviyelerini azaltarak yanma özelliklerini iyileştirmektedirler [108]. Yüksek gizli buharlaşma ısıları, motorda düzensiz çalışma sorunları ve düşük setan sayıları ise hafif alkollerin dizel motorlarda kullanımını zorlaştırmaktadır [109]. 4 ya da daha fazla karbon atomu içeren uzun zincirli ağır alkoller ise dizel motorlar için alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Uzun zincirli alkoller tek başına kullanılabildikleri gibi dizel yakıtı ile yüksek karışım oranlarında harmanlanarak yakıt katkısı olarak da kullanılabilmektedir [110]. Yüksek karbon içeriğine sahip alkollerden bazıları fitol, dekanol, oktanol, heptanol, hekzanol, pentanol ve bütanoldür. Uzun zincirli alkollerin avantajları arasında daha yüksek setan sayıları ve daha yüksek enerji içeriklerine sahip olmaları yer almaktadır [111]. Uzun zincirli alkollerin zayıf higroskopik özellikleri nedeniyle depolama ve taşıma sırasında herhangi bir problem oluşmamaktadır. Ayrıca düşük korozyon etkisi sebebiyle enjeksiyon sisteminde olumsuz bir problem oluşturmamaktadır [112]. Yüksek parlama noktaları, mevcut yakıt dağıtım altyapısı içinde daha güvenli hale getirmektedir. Daha düşük miktardaki oksijen içeriklerine karşın daha uzun tutuşma gecikmesi (TG) sayesinde hem daha iyi bir hava/yakıt (H/Y) oranı hem de ani yanma ve bununla birlikte difüzyon yanma fazı iyileşmektedir [111].

Çizelge 4.1'de dizel yakıtı ve bazı alkollerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Karbon zincirleri arttıkça yoğunluk, setan sayısı, alt ısı değeri (AID), kinematik viskozite gibi değerlerde artış görülmektedir.

Çizelge 4.1. Dizel yakıtı ve bazı alkollerin fiziksel ve kimyasal özellikleri [111].

Özellikler	Dizel	Metanol	Etanol	Propanol	Bütanol	Pentanol
Moleküler formülü	$C_{13}H_{28}$	CH_3-OH	C_2H_5-OH	C_3H_7-OH	C_4H_9-OH	$C_5H_{11}-OH$
Kinematik viskozite (mm/s²)	2,72	0,58	1,13	1,74	2,22	2,89
Yoğunluk (kg/m³) 15 °C’de	835	791,3	789,4	803,7	809,7	814,8
Parlama noktası (°C)	>55	11–12	17	11,7	35–37	49
Alt ısı değeri (MJ/Kg)	42,49	19,58	26,83	30,63	33,09	34,65
O (%ağırlık)	0	49,93	34,73	26,62	21,59	18,15
Setan sayısı	45-55	5	8	12	17	18,2–20
Buharlaşma gizli ısı (kJ/kg)	270–375	1162,64	918,42	727,88	581,4	308,05
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	254–300	463	420	350	345	300

4.1.2. Biyoetanol

Biyoetanol, dizel yakıtlara alternatif olarak son zamanlarda ilgi gören alternatif yakıtlardan olmuştur. Sentetik etanol ile biyoetanol kimyasal olarak aynı yapıda olmasına rağmen hammadde kaynaklarının anlaşılabilmesi açısından farklı isimler ile adlandırılmaktadır. Sentetik etanol fosil kaynaklardan elde edilen etilenden üretilmektedir. Biyoetanol ise içinde etil alkol bulunan bitkisel kaynaklardan (şeker kamışı, şeker pancarı, tatlı sorgum) ya da nişasta içeren (mısır, arpa, buğday, darı) gibi hammaddelerin mayalanması (fermantasyonu) sonucunda edilen bir alkol türüdür. Biyoetanoldeki yüksek oksijen içeriği sıkıştırma oranını arttırırken İYM’de yanmayı iyileştirerek emisyonların azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Biyoetanol, benzinden daha yüksek oktan sayısına ve alev hızına sahip olduğu için benzin yerine kullanılabilmekte [113] ancak dizel motorlarda ise yakıt katkısı olarak kullanımı önerilmektedir. Dizel motorlarda dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında düşük buharlaşma basıncı, düşük enerji yoğunluğu ve yüksek korozyon yapısı sebebiyle direk olarak kullanımının biyoetanol tüketimini arttıracak, motor parçalarının dayanımında azalma olacağı ve düşük buharlaşma basıncından dolayı soğuk havalarda çalışma koşullarına olumsuz etki yaratacağı öngörülmektedir. Birçok araştırmacı tarafından dizel yakıtı biyoetanol karışımlarında ise yakıtın fizikokimyasal özelliklerinin iyileşeceği bu sebeple motor performansında artış olacağı ve egzoz emisyonlarının azalacağı

bildirilmektedir [114, 115]. Çizelge 4.2’de dizel yakıtı ve biyoetanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dizel yakıtı ve biyoetanolün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [116].

Özellikler	Dizel	Biyoetanol
Kimyasal Formül	$C_{13}H_{28}$	C_2H_5-OH
Kinematik Viskozite (mm²/s)	2,72	1,4
Yoğunluk (kg/m³)	820-840	790
Parlama Noktası (°C)	75	13
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42,8	26,95
Setan Sayısı	45-55	8
Oksijen İçeriği (% Ağırlık)	0	34,8
Stokiyometrik Hava-Yakıt Oranı	14,8	9,06

4.1.3. Doğalgaz (CNG)

CNG hem dizel motorlarda hem de buji ile ateşlemeli motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir [117]. Ancak yüksek oktan sayısı sebebiyle CNG kendi kendine tutuşması zor olan bir yakıt türüdür. Bu sebeple dizel motorlarda yapılan çalışmalarda büyük oranda çift yakıtlı olarak kullanım sağlanmaktadır [118]. Dizel motorlarda tek yakıtlı sistemlerde ise motorun çalışma prensibi dizel çevriminden Otto çevrimine dönüştürülmektedir. Bu işlemde enjektörlerin buji ile değiştirilmesi ve silindir kapağında değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bu durum yakıt sarfiyatını ve emisyonları azaltmasına karşılık maliyet açısından son derece yüksektir. Bu noktada ise dizel motorlarda CNG’nin çift yakıtlı olarak kullanımı makul olarak karışıma çıkmaktadır. Çift yakıtlı dizel motorlarda CNG-hava karışımının tutuşması için öncelikle dizel yakıtı silindir içerisine püskürtülmektedir. Silindirlerdeki toplam enerjinin %5 ile %10 kadarına karşılık gelen dizel yakıt sıkıştırma zamanı sonunda ayrı bir enjektör ile silindirlere püskürtülür. Silindir kapağı üzerinde biri CNG bir diğeri ise dizel yakıt için iki enjektöre ihtiyaç duyulmaktadır. Sıkıştırma zamanı sonunda silindirlere püskürtülecek olan dizel yakıtın tutuşmasıyla karışım tutuşmaktadır. Değişen motor yüküyle birlikte dizel yakıt sabit kalarak CNG miktarı değişmektedir. Böylece rölanti durumunda hiç doğalgaz kullanılmaz iken kısmi yüklerde ise CNG miktarı düşmektedir. Dizel motorun aynı güçlere erişebilmesi için ya motor konstrüksiyonunda değişimler yapılarak yüksek basınçlı gaz enjeksiyonu ya

da CNG ile muhakkak dizel yakıtının birlikte kullanılması gerekmektedir. [119]. Çizelge 4.3'te dizel yakıtı ve CNG'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dizel yakıtı ve CNG'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellikler	Dizel	CNG
Moleküler Formül	$C_{13}H_{28}$	CH_4
Kinematik Viskozite (mm^2/s)	2,72	1,8
Yoğunluk (kg/m^3)	820-840	710
Parlama Noktası ($^{\circ}C$)	75	95
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42,8	47,17
Setan Sayısı	45-55	-
Oksijen İçeriği (% Ağırlık)	0	0
Stokiyometrik Hava-Yakıt Oranı	14,8	16,79

4.1.4. Hidrojen

Hidrojen, evrendeki 92 elementin en basit, en hafif ve en bol olmakla birlikte evrenin %90'ını ve insan vücudunun %60'ını oluşturmaktadır [120]. Hidrojen tükenmez durumda olduğundan, hidrojen enerjisinden elde edilen enerji yenilenebilir olarak kabul edilmektedir. Her yerde bol miktarda bulunmasına rağmen, doğal olarak oluşan saf hidrojen dünyada çok nadirdir [121]. Ancak, hidrojenin üretilbileceği birçok kaynak bulunmaktadır. Hidrojen, çeşitli kaynaklardan (doğal gaz, kömür, petrol, su ve biyokütle) çeşitli prosesler (elektrokimyasal, fotokimyasal, fotokatalitik, foto elektrokimyasal, termokimyasal ve biyokimyasal) yoluyla elde edilebilmektedir. İçten yanmalı (İYM) motorlarda yakıt olarak değerlendirildiğinde hidrojenin kalorifik değeri 122 MJ/kg olup tüm yakıtlar arasında en yükseğidir [122] ve yanma sonu ürünü olarak sadece su buharı ortaya çıkmaktadır. Düşük tutuşma sıcaklığı ve hızlı yanma kapasitesi ve içerisinde karbon bulundurmaması gibi özellikleri nedeniyle İYM'da alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Hidrojen hem birincil (yakıt hücreleri ve İYM) hem de enerji taşıyıcısı olarak (metanol, etanole dönüştürülmüş) olarak kullanılabilir. Ancak alt ısıl değerinin yüksek olmasına karşın yoğunluğunun düşüklüğü sebebiyle İYM'da depolama sebebiyle tek başına yakıt olarak kullanılamamaktadır.

Son yıllarda, alt ısı değerin yüksek olması, yüksek yanma hızına sahip olması ve içerisinde karbon bulundurmaması gibi sebeplerden dolayı ise İYM’de alternatif yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır [60]. Hidrojen yakıtının alt ısı değerin yüksek olmasına rağmen yoğunluğunun düşük olmasından dolayı İYM’de yeterli menzilin oluşabilmesi adına büyük bir depolama alanına ihtiyaç duyulacağından tek başına dizel yakıtı alternatif olarak kullanılamamıştır. CNG’de olduğu gibi dizel motor için gerekli modifikasyonlar yapıp hidrojen emme kanalından hava ile birlikte silindir içerisine gönderilmekte ve dizel yakıtı ile yanması sağlanmaktadır. Çizelge 4.4’te dizel yakıtı ve hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Dizel yakıtı ve hidrojenin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellikler	Dizel	Hidrojen
Moleküler Formül	$C_{13}H_{28}$	H_2
Kinematik Viskozite (mm^2/s)	2,72	0,76
Yoğunluk (kg/m^3)	820-840	0,084
Parlama Noktası ($^{\circ}C$)	75	-
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42,8	122
Setan Sayısı	45-55	-
Oksijen İçeriği (% Ağırlık)	0	0
Stokiyometrik Hava-Yakıt Oranı	14,8	29,53

4.1.5. Biyodizel

Biyodizel; soya, aspir, kolza, yer fıstığı, keten, kanola, ayçiçeği gibi çeşitli türlerdeki yağlı tohumlardan üretilen bitkisel yağlar ile atık durumundaki hayvansal yağlardan çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucunda elde edilen ve dizel yakıt ile karşılaştırıldığında kimyasal ve fiziksel özelliklerinin büyük oranda benzer olduğu önemli bir alternatif dizel yakıtıdır. Özellikle atık bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilmesi biyodizeli çevresel olarak da önemli bir yere konumlandırmaktadır. Bunun dışında motor üzerinde herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilirliği dizel yakıtına önemli bir alternatif olma özelliği kazandırmaktadır. Hayvansal ve bitkisel yağlardan elde edilen biyoyağ genellikle transterifikasyon reaksiyonuna tabi tutularak yakıt haline getirilmektedir. Kimyasal reaksiyonlar

sonucunda içeriğinde kütleli olarak %10-12 kadar oksijen içermektedir. İçeriğindeki oksijen miktarıyla yanma verimi artmakta bununla birlikte emisyonlarda azalma ve motor performansında artış gözlenmektedir. Biyodizelin meydana geldiği hammadde çeşidine göre yoğunluğu, ısı değeri, oksidasyon kararlılığı, setan sayısı gibi çeşitli özellikleri farklılıklar göstermektedir. Çizelge 4.5'te farklı tür hammaddelerden üretilen biyodizelin yakıt özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı tür hammaddelerden üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [123].

Biyodizel hammaddesi	Isıl Değer (MJ/kg)	Kinematik Viskozite (cSt, 40 °C)	Yoğunluk (kg/m³)	Setan Sayısı	Parlama Noktası (°C)
Kanola yağı	39,000	4,40	884,40	54,30	177,6
Atık balık yağı	41	4,142	870	51,50	164
Pamuk çekirdeği yağı	41,680	6	850	50	-
Ayçiçeği	39,83	4,47	884	-	-
Fındık Yağı	40	4,54	861,9	52,2	168
Mısır	39,97	4,30	867,4	47,4	170

4.1.6. Lastik, Plastik, Ambalaj Atıkları ve Atık Madeni Yağlardan Elde Edilen Alternatif Yakıtlar

Lastik, plastik, ambalaj ve atık madeni yağlardan oluşan atıkların dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı için sıvı ya da gaz fazına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu da piroliz işlemi ile yapılmakta ve piroliz işlemi sonucunda pirolitik yağ adı verilen sıvı ürüne dönüştürülmektedir. Sonrasında ise pirolitik yağ direk olarak kullanıldığı gibi [124] bir takım kimyasal işlemlerden geçirilerek [125] dizel yakıtına benzer özelliklere sahip alternatif bir yakıt haline dönüştürülebilmektedir. Çizelge 4.6'da atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın bazı yakıt özellikleri ham hali, ile distilasyon sonrası hali dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.6. Dizel yakıtı ve atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri özellikleri [125].

	EN 590	Dizel Yakıt	Ham Pirolitik Yakıt	Distilasyon Sonrası	Oksidatif Desülfürizasyon Sonrası (LPY)
Yoğunluk (kg/m³, 15 °C)	820-845	829	944,4	889,4	904
Parlama Noktası (°C)	55>	67	42,5	50,5	60,5
Kinematik Viskozite (cst, 40 °C)	2-4,5	2,96	5,06	1,659	2,164
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	—	42,9	39,98	41,18	40,94
Setan Sayısı	51	>50	—	—	<40
Karbon Kalıntısı (% m/m)	0,3	0,3	21,51	0,196	1
Su (mg/kg)	<200	200	2645	749	140
Kül (% m/m)	0,01	0,01	0,006	0,001	0,0005
Kükürt (mg/kg)	0-10	≈0	11385	4530	4327

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıtın yüksek kükürt içeriği, hem dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımını sınırlandırmakta hem de çevresel açıdan olumsuz etkiler yaratmaktadır. Araştırmalar, bu tür yakıtların özelliklerinin iyileştirilmesinin motor performansı ve emisyonların azaltılması üzerinde önemli bir etki sağladığını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, pirolitik yağların yakıt özelliklerini geliştirmek ve kükürt bileşenlerini minimize etmek amacıyla distilasyonlu asit-kil yöntemi ve oksidatif desülfürizasyon gibi teknikler kullanılmaktadır.

Günümüze kadar dizel motorlarda birçok alternatif yakıt denenmiştir. Ancak bu alternatifler arasında nüfus artışı ve endüstrileşme ile birlikte artan plastik üretimi beraberinde büyük miktarda atık plastik yığınları meydana getirmiştir. Bu atıkların bertarafı ile ilgili birçok yöntem olmasına karşın piroliz yöntemi ile pirolitik yağa dönüştürülmesi özellikle petrol bağımlılığı olan ülkelerde büyük önem arz etmektedir. Literatürde birçok çalışmada plastik atıktan elde edilen pirolitik yağın dizel motorlarda kullanımı ve motor performans ve emisyonlarına etkileri incelenmiştir [124,126–130].

Çizelge 4.7’de Atık plastik yağdan elde edilmiş pirolitik yakıtın bazı yakıt özellikleri verilmiştir [124].

Çizelge 4.7. Dizel yakıtı ve atık plastikten elde edilmiş yakıtının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellikler	Dizel Yakıtı	Atık Plastik Yağı
Kinematik Viskozite (40°C mm²/s)	2.743	0.9538
Üst Isıl Değer (kJ/kg)	46356	45209
Alt Isıl Değer (kJ/kg)	43379	42554
Setan Sayısı	52.6	48.3
Yoğunluk (15°C, kg/m³)	831	777.9
Parlama Noktası (°C)	59.5	Oda Sıcaklığı

Çizelge 4.8. Dizel yakıtı ve atık madeni yağlardan elde edilen pirolitik yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Yakıt Özellikleri	Dizel yakıt -EN 590	Atık Madeni Yağ
Yoğunluk (kg/m³)	820–845	818
40 C’de viskozite (mm²/s)	2–4,5	3.49
Parlama noktası (°C)	>55	57
Kükürt (ppm)	50	3500
Su (mg/kg)	<200	130
Alt ısıtma değeri (kJ/kg)	42.700	42.500

Atık madeni yağlar genellikle petrol türevli olmaları dolayısıyla alternatif bir yakıt olma potansiyeline sahiptir. Bu tür yağlar, çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilerek İYM’de alternatif yakıt olarak değerlendirilebilmektedir. Madeni yağ atıkları, kaba süzme işlemi sonrasında sodyum karbonat, kireç ve zeolit gibi katkı maddeleri kullanılarak belirli kirleticilerden arındırılmakta ve bu doğrultuda saflaştırılmaktadır. En son aşamada ise distilasyon işlemi ile yakıtı dönüştürülebilmektedir. Atık madeni yağlardan elde edilmiş pirolitik yakıtların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir [131].

BÖLÜM 5

DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİ, YANMA VE EMİSYONLARIN OLUŞUMU

5.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE PERFORMANSA ETKİLERİ

Dizel yakıt; parafin, nafta ve aromatik gibi karmaşık hidrokarbon karışımlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte, dizel yakıt içeriğinde doğal olarak bulunan organik kükürt içermektedir. Ticari olarak satışı yapılan dizel yakıtın nihai özellikleri, ham petrolün yapısına ve nasıl rafine edileceğine bağlı olarak değişmektedir. Yakıtın özellikleri, motorun yapısı, kalitesi ve çalışma koşulları, dizel motorların performansını, yanma verimini ve emisyonlarını etkilemektedir. Ham petrolün distilasyonu ile kaynama noktası 180 °C ile 370 °C aralığında değişen hidrokarbonlardan oluşan yakıt dizel yakıt olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen yakıtın kimyası ve özellikleri, motorun emisyon ve performansını etkileyen en önemli unsurlardandır [125].

5.1.1. Viskozite

Akışkanların akmaya karşı gösterdiği direnç viskozite olarak tanımlanmaktadır. Yakıtın yoğunluğu, soğuk akış özellikleri ve distile özellikleri yakıtın viskozitesini belirlemede belirleyici özelliklerdir. Viskozite ise yakıtın atomizasyonunu, yakıt taneciklerinin çaplarını ve yakıtın silindir içerisindeki ilerleme hızını etkilemektedir. Yakıtın atomizasyon kalitesini etkileyen en önemli parametreler yakıtın viskozitesiyle birlikte yoğunluğu ve yüzey gerilimidir. Yakıtın viskozitesi arttıkça yakıt hava karışımı, püskürtme ve atomizasyon gibi parametreler olumsuz yönde etkilenmektedir.

Artan viskozite yakıtın püskürtme açısını, akış hızını ve hüzme derinliğini azaltarak yetersiz yakıt akışına sebep olarak yakıt pompasının işlevini yerine getirmesini zorlaştırmaktadır [132]. Viskozitenin artmasıyla yakıtın atomizasyon kalitesi azaldığından tutuşma gecikmesi uzamaktadır [133]. Yine viskozitenin artmasıyla yakıt taneciklerinin artmasıyla motor performansı düşmektedir. Viskozitenin azalmasıyla birlikte azalan akış direnci sonrası yanma iyileşmekte buna bağlı olarak is emisyonları da azalmaktadır. Yine viskozite düşük olduğunda pompa ve enjektör kaçakları artarak püskürtülen yakıt miktarında düşüş gözlenmekte püskürtülen yakıtın damlacık çaplarını küçültmekte ve tutuşma gecikmesini azaltmaktadır. Bu sebeple yanma odasına homojen şekilde dağılmayan yakıt enjeksiyonu emisyonlar üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

5.1.2. Yoğunluk

Yakıtın birim hacminin kütlesi yoğunluk ile ifade edilmektedir. Yakıtların yoğunluk değerleri verilirken referans sıcaklığı olarak 15 °C alınmaktadır. Yakıtın yoğunluğu aynı zamanda enerji içeriğinin belirtisidir. Yüksek enerji içeriğine sahip yakıtlar aynı zamanda yüksek yoğunluklu yakıtlardır. Çeşitli yoğunlukta ve moleküler ağırlıktaki hidrokarbonlardan meydana gelen dizel yakıtın toplam yoğunluğu yakıt bileşiminin bir fonksiyonudur. Setan sayısı, viskozite ve aromatik içerik ve distilasyon özellikleri de doğrudan yoğunluk ile ilişkili parametrelerdir. Distilasyon sıcaklığının en üst noktasındaki düşüş yakıt bileşeni içerisindeki ağır hidrokarbon içeriklerini azaltarak yoğunluğunda düşüş meydana getirmektedir. Silindir içerisine alınan yakıt miktarı yakıt pompası tarafından hacimsel olarak ölçülmektedir. Özellikle silindir içerisine alınan yakıtın yoğunluğunun hacimsel olarak ölçüldüğü sistemlerde yakıt yoğunluğundaki değişim yanma odasına gönderilen yakıtın enerji içeriğinde değişime neden olmaktadır. Yakıtın enerji içeriği doğrudan kütlesi ile ilişkilidir. Bu sebeple yakıtın yoğunluğunun artması ortalama indike basıncı arttırmaktadır. Ayrıca yakıtın yoğunluğu arttıkça püskürtülen yakıtın hüzme uzunluğuna karşı daha fazla direnç geliştirmekte ve bu da püskürtülen yakıtın silindir içinde hava ile karışmasını ve buharlaşmasını daha da zorlaştırmaktadır. Yoğunluk artışıyla birlikte silindire yanma odasına püskürtülen yakıtın kütlesinin artmasıyla yakıt/hava oranı da artmakta yakıt ve hava tam olarak karışmamakta ve is emisyonları artmaktadır. Is emisyonları

özellikle tam yük koşullarında oluşmakta ve dizel motorlarda is sınırı yakıt pompası tarafından sınırlandırıldığından motor gücünü de sınırlandırmaktadır. Motor performansı da yakıt yoğunluğunun artışı ile artış göstermektedir. Ancak silindir içerisine gönderilen yakıt miktarı sabit olarak ayarlandığında yakıt yoğunluğunun azalması hacimsel olarak harcanan yakıt miktarını arttırmaktadır. Buna ek olarak düşük yoğunluklu yakıtlarda motor gücünde düşüş meydana gelmektedir.

5.1.3. Setan Sayısı

Yakıtın tutuşmaya karşı meylini gösteren setan sayısı, dizel motorlarda özellikle TG üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Setan sayısının artmasıyla birlikte yakıtın kendiliğinden tutuşması kolaylaşmaktadır. Setan sayısı TG süresi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yüksek setan sayısı TG'yi düşürmekte, düşük setan sayısı ise TG'yi arttırmaktadır. Setan sayısının düşüklüğü kontrolsüz yanma fazına kadar yanmamış yakıt miktarında artışa sebep olmaktadır. Bu sebeple oluşan zengin karışım egzoz emisyonlarında artışa sebep olmaktadır. Yüksek setan sayısı ile birlikte TG kısaltmakta ve homojen karışım için yeterli süre sağlanamamaktadır. Bununla birlikte yakıtın taneciklere ayrışıp buharlaşması için yeterli süre sağlanamadığından yanma performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. TG'nin uzaması ise yakıt hava karışımının silindir içerisinde daha iyi bir karışım oluşturmaya imkân tanır. Ancak aşırı uzaması karışımın bölgesel olarak fakirleşmesine ve tutuşmada problemler oluşmasına sebep olmaktadır. Özellikle daha düşük yüklerde, düşük setan sayısı ile birlikte yanma tam olarak gerçekleştirilemez ve özellikle HC emisyonlarında artış gözlenmektedir [125]. TG'nin azalması kontrolsüz yanma safhasındaki basınç artış hızı ve ısı yayılım oranının azalmasına ve yanma sonu sıcaklıklarının düşmesine sebep olarak özellikle NO_x emisyonlarının üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Ayrıca TG'nin azalmasıyla birlikte silindir içerisindeki maksimum basınçta azalmaktadır [134]. Setan sayısı yakıtın aromatik içeriği ve kaynama noktası ile de doğrudan ilişkilidir. Düşük setan sayısına sahip yakıtların daha fazla ağır hidrokarbon içerdiği bildirilmektedir [125].

5.1.4. Isıl Değer

Isıl değer, yakıtın birim kütlesinin enerjisi olarak ifade edilir. Yakıtın yanmasıyla açığa çıkan ısı enerjisidir. Birimi kJ/kg olarak ifade edilmektedir. Diğer bir ifadeyle yanma sonu ürünlerinin belirlenen bir referans sıcaklık değerinde entalpilerinin toplamının yakıtın toplam kütlesine oranı olarak ifade edilmektedir. Yakıtın enerji içeriğini ifade eden ısı değerinin yüksek olması motor performansı açısından önem arz etmektedir. Genel olarak yakıtların enerji içeriğini göstermek için alt ısı değer (AID) kullanılmaktadır. Yakıtın yanması sonucu su, CO₂ gibi ürünler meydana gelmektedir. AID ve üst ısı değer (ÜİD) arasındaki fark yanma sonu ürünü olan suyun buharlaştırılması için gereken enerjiyi belirtmektedir. Dizel motorlarda yakıt ekonomisi doğrudan yakıtın enerji içeriği ile ilgilidir Enerji içeriği açısından yüksek olan yakıt daha iyi yakıt ekonomisi göstermekte ve yanma sırasında motor performansı artmaktadır. Ayrıca daha yüksek ısı ve daha yüksek verim için yakıtın yüksek ısı değerine sahip olması istenmektedir [135].

5.1.5. Kükürt İçeriği

Yakıtın kükürt içeriği özellikle emisyonlar üzerinde önemli rol oynayan dizel yakıt özellikleri arasında yer almaktadır. Dizel yakıt içeriğinde bulunan kükürt is emisyonlarının oluşmasında önemli derecede etkilidir. Yakıt içeriğindeki kükürtün belli bir kısmı oksitlenerek sülfat oluşmasına sebep olmaktadır. Sülfatlar ise is emisyonlarının oluşumlarında etkilidir. Yanma odasındaki SO₂, yanmamış hidrokarbon molekülleriyle birleşerek is partiküllerinin boyutlarını artırmaktadır. Yakıt içerisindeki kükürt içeriğinin azaltılması ise is emisyonlarını azaltmaktadır. Yakıt içerisindeki kükürt is emisyonlarını doğrudan etkilerken CO, HC ve NO_x emisyonları açısından incelendiğinde direk bir etkisi bulunmamaktadır [136].

5.1.6. Uçuculuk

Dizel motorlarda kullanılan yakıtlar farklı hidrokarbon karışımlarından oluşmaktadır. Hidrokarbonların ise hidrojen ve karbon sayısına bağlı olarak çeşitli kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Bunlardan bir tanesi de kaynama noktasıdır. Kaynama

noktası sıcaklığı düşük olan yakıtın uçuculuğu o kadar yüksektir. Uçuculuk yakıtların buharlaşabilme yeteneğinin ifadesidir. Uçuculuğu düşük olan yakıtlar yüksek olanlara kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşmaktadır. Uçuculuğu yüksek olan yakıtlar hava ile daha homojen bir karışım oluşturabilmekte yanma sürecini iyileştirmektedir. Yüksek uçuculuğa sahip yakıtlar is ve diğer egzoz emisyonlarını, yakıt tüketimini ve egzoz gaz sıcaklığını azaltabilmektedir [137].

5.1.7. Parlama Noktası

Direk motor performansıyla ilişkili olan bir yakıt özelliği olan parlama noktası yakıt buharının tutuşabileceği en düşük sıcaklığı ifade etmektedir. Yakıtın hem alevlenme kabiliyeti hem de uçuculuk özelliğinin göstergesi olarak belirtilmektedir. Uçuculuğun yüksek olması homojen karışım oluşmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yakıtın yanması ve buharlaşma özelliği ile ilgili olduğu kadar güvenli bir şekilde depolanması ve taşınması da yakıtın parlama noktası ile doğrudan ilgilidir. Yakıtların parlama noktası silindir içerisindeki sıcaklığa eşit olduğunda veya düşük olması durumunda tutuşma gerçekleşmektedir. Alevlenebilme ve uçuculuk özelliğinin göstergesidir. Düşük parlama noktasına sahip yakıtlar çok uçucu bilinirken yüksek parlama noktasına sahip yakıtlar az uçucu olarak bilinmektedir [138].

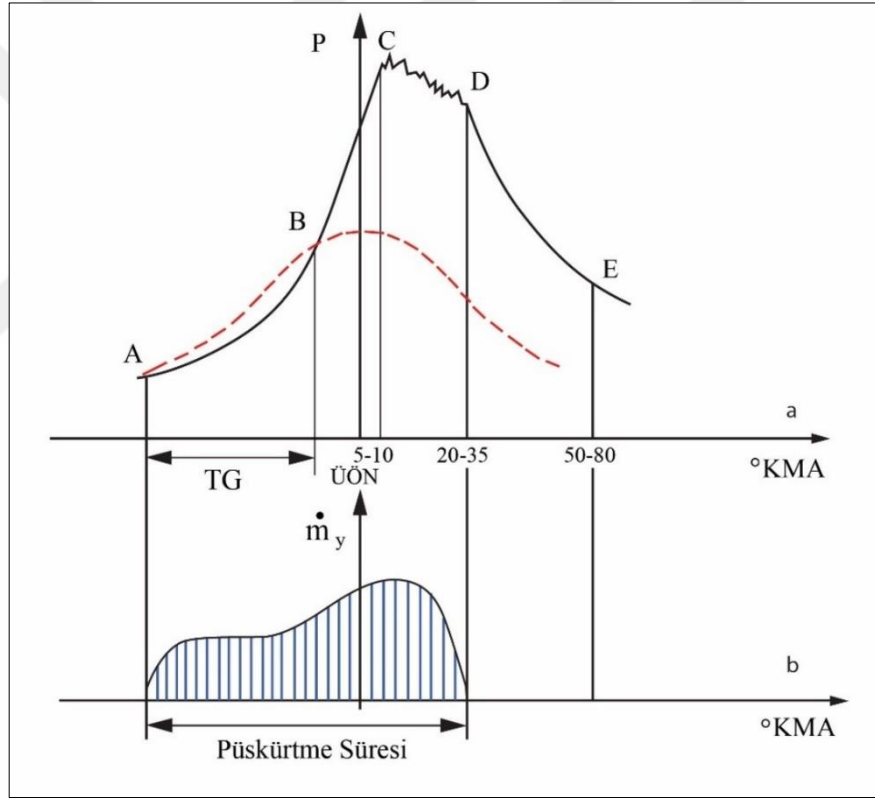
5.1.8. Tutuşma noktası

Yanma olayının sürdüğü minimum sıcaklık tutuşma noktası olarak adlandırılmaktadır. Tutuşma noktası sıcaklığı parlama noktasına nazaran daha yüksek olduğundan dizel motorlarda yakıtın tutuşmasını sağlayabilmek adına daha yüksek sıkıştırma oranlarına (SO) ihtiyaç vardır. SO'nun yüksek olması ile silindir içerisine alınan havanın sıcaklığı yükselmekte ve yakıtın buharlaşması sağlanarak tutuşma gerçekleştirilmektedir [123].

5.2 DİZEL MOTORLARDA YANMA VE SAFHALARI

Dizel motorlarda yakıt sıkıştırma strokunun sonuna yakın bir yerde, üst ölü noktadan (ÜÖN) hemen önce silindire püskürtülür [134]. Yakıt enjektör vasıtasıyla yüksek hızda silindire püskürtülürken atomize olarak küçük damlacıklar halinde yanma

odasına nüfus etmektedir. Atomize olan yakıt sıkıştırılarak (12:1-22:1) sıcaklığı ve basıncı yükselmiş olan havadan ısıyı çekerek buharlaşır ve yüksek sıcaklıktaki ve basınçtaki hava ile karışır. Piston ÜÖN'ya yaklaştıkça karışımın sıcaklığı yakıtın tutuşma sıcaklığına ulaşır ve yanma süreci başlar. Yanma süreci boyunca, krank açılarının belirli aralıklarında farklı yanma aşamaları meydana gelir. Yakıtın püskürtülmesiyle alevin ilk belirdiği nokta arasında bir süreç bulunmaktadır. Daha sonrasında yakıtın ateşlenmesiyle silindir içerisindeki basıncın hızla arttığı safha vardır. Bu süreç sonrasında ise kontrollü yanma süreci ve akabinde bu safhayı takip eden art yanma süreci ile süreç son bulmaktadır [139]. Şekil 5.1'de (a) Dizel motoruna ait basınç- krank açısı diyagramı ve (b) püskürtme seyri gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Basınç- krank açısı diyagramı (a) ve püskürtme seyri (b) [140].

- A-B arası Tutuşma gecikmesi
- B-C arası Kontrolsüz (Ani) yanma safhası
- C-D arası Kontrollü yanma
- D-E arası Art yanma

Şekil 5.1.(a)'da dizel motoru için basınç- krank açısı diyagramı verilmiştir. Püskürtme başlangıcından püskürtme sonuna kadar olan kütleli yakıt püskürtme miktarı ise şekil (b)'de gösterilmektedir. A noktasındaki püskürtme başlangıcından B noktasında bulunan tutuşma noktasına kadar geçen safha TG olarak adlandırılmaktadır. Şekilde belirtilen kesik ve tam çizgiler ile gösterilmiş eğriler yakıt-hava karışımı ve sadece havadan elde edilmiş basınç-krank açısı kayıtlarını göstermektedir. İki eğri birbirinden sadece ilk durumda ateşleme olacağından B noktasında birbirinden ayrılmaktadır. TG, fiziksel tutuşma gecikmesi ve tutuşmanın olduğu ana kadar ön reaksiyonlarının meydana geldiği kimyasal tutuşma gecikmesi safhalarından ibarettir. Belli bir süre sonunda yakıt damlacıklarının buharlaştığı kabul edilmektedir. Fakat damlacıkların çevresinde bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu tabakada başlamaktadır. Tutuşma sonrası buharlaşma hızı reaksiyon hızı ile doğru orantılıdır. Buhar fazındaki yanma hızı buhar tabakası etrafındaki havanın oksijen içeriği ile orantılıdır ve dizel motorlar için yanma buharlaşma tamamlanmadan önce başlamaktadır.

Dizel motorlar için yakıt/hava oranı yanmanın başlaması için önemli bir parametre değildir. Silindir içerisinde yakıt/hava oranı her noktada değişmektedir. Yanma ise tutuşma için en uygun noktada başlamaktadır. Atomizasyon ve püskürtme karakteristiğinin yakıt/hava oranının üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeple tutuşma gecikmesini etkilememektedir. Ayrıca TG süresi boyunca püskürtülen yakıt miktarının etkisi bulunmamaktadır. Verimli bir yanma için mümkün olduğunca kısa bir TG süresi gereklidir. TG üzerinde etkiye sahip en önemli faktörler buhar fazındaki yakıt tabakasını çevreleyen hava içerisindeki oksijen konsantrasyonu, sıcaklık, basınç ve yakıt kalitesi bulunmaktadır. Yakıtın içeriğinde bulunan HC'lerin yanma süresi üzerinde etkisi bulunmaktadır. HC miktarındaki artış yakıtın setan sayısını yükseltmekte ve bu durum TG'yi azaltarak motorun daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. TG süresince yakıt silindire girerek buharlaşmaktadır. Yanma başlangıcında ise yakıtın oksijenle temasıyla yakıt büyük bir hızla yanmaktadır. Meydana gelen yanma hızı dp/dt basınç yükselme hızını da belirlemektedir.

TG safhasından sonra kontrolsüz (ani) yanma safhası başlamaktadır. Bu safhada basınç artışının etkilenmesi yakıtın atomizasyon derecesi, gecikme süresinde püskürtülen yakıt miktarı, yani tutuşma gecikmesinin uzunluğu, püskürtme

karakteristiği ve silindir içi hava hareketlerine bağlıdır. TG süresi ve basınç artış hızı birbiri ile doğrudan ilişkilidir. Bu aşamada, silindir içi basınç artış hızı çok yüksek değerlere ulaştığından vuruntu meydana gelmekte ve günümüzde dizel vuruntusunu en aza indirmek için başlangıçta pşkrtlen yakıt miktarı düşürmek amacıyla kademe kademe pşkrtme yöntemleri tercih edilmektedir. Bu safhadaki basınç yükselme hızı çevrimin maksimum basıncını tayin etmektedir. Basınç yükselme hızı esas olarak yakıt miktarına bağlıdır. Bu safha TG'ye göre daha kısa olduğundan yakıtın büyük çoğunluğu TG süresince pşkrtlmektedir. Bu sebeple maksimum basıncın tayin edilmesinde de TG'nin etkisi büyüktür ve kontrolsüz (ani) yanma safhasında dp/dt artışı ile birlikte maksimum basınç TG şartlarına bağlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer safhalarda bu değerlerden etkilendiği için TG'nin yanma üzerindeki etkisi son derece önemlidir.

Kontrollü yanma safhası, maksimum basınçla birlikte yanmanın hemen hemen tamamlandığı safhadır. Kontrollü yanma, yanma sonu sıcaklığının zirveye ulaştığı zamana kadar devam eden hızlı yanma sonrası safhayı içerir. Bu safhada sıcaklık ve basınçtaki artış hızı kontrolsüz yanmadan daha düşüktür. Kontrollü yanma safhası olan bu aşamada bir önceki safhada yanmamış yakıtlar ve pşkrtlen diğer yakıtlar yanmaktadır. Basınç eğrisinin durumu yanma odasının şekline, yakıt pşkrtme hızına ve motor hızına bağlıdır. Bu safhanın başlangıcı pistonun N'den uzaklaştığı bir durumda gerçekleşiyorsa hacim değişimi basınç değişimini doğrudan etkilemektedir. Yüksek verim yanma olayının N'ye ne kadar yakın olduğu ile ilişkilidir. Bu sebeple bu safhada karışımın hızlı ve O_2 /yanmamış yakıt oranının yüksek olması beklenmektedir. Art yanma, kontrollü yanma sona erdiğinde egzoz supabı açık konumda olduğunda meydana gelen reaksiyonlara denir. Bu evrede, pşkrtme bittikten sonra silindir içinde yakıt artıkları ve henüz tamamen yanmamış yanma ürünleri, türbülans ve oksijen miktarının etkisiyle yanmaya devam eder. Pistonun alt ölü noktaya doğru hareketi, önündeki hacmin genişlemesiyle birlikte basınç ve sıcaklığın azalmasına neden olur. Art yanmanın motor verimini artırmak için en kısa sürede olması istenmektedir. Kontrollü yanma sürecinde silindir içindeki yakıtın tamamı yanmaz, ancak genişleme süresi boyunca yanmaya devam eden bir kısmı vardır. Motor veriminin düşmemesi için bu kısa art yanma süresi önemlidir. Art yanma süresinin uzun olması, silindir kapağının, silindir yüzeylerinin ve piston kafasının aşırı

ısınmasına neden olabilir. Ayrıca bu durumda segman yuvalarında karbon atıkları da birikebilmektedir. Art yanma safhasının bittiği noktaya yanma sonu denilmektedir. Egzoz zamanından önce yanma işleminin tamamlanması önemlidir. Zira tamamlanmamış yanma ürünleri, kalan yakıt motor performansını ve emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple yanma sonu ve art yanma safhası dizel motorda verimliliği ve emisyonların kontrol altında tutulması açısından önemli parametrelerdir [140–142].

5.3.DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU

Tam yanma ürünleri olan H_2O , CO_2 , SO_2 , NO_x ayrıca eksik yanma ürünleri olan is, HC ve CO dizel motorlarda egzoz emisyonları arasında bulunmaktadır. Bu emisyonlar arasında kontrol altında tutulması gereken en önemli emisyonlar ise, NO_x ve is emisyonlarıdır.

Yanma odasında emisyonların oluşumunu etkileyen faktörler arasında yanma sıcaklığı ve gazların yanma odasında kalış süreleri, hava-yakıt oranı, hava-yakıt karışımının oluşma hızı yer almaktadır. Dizel motorlarda karışımın teşkili ve yanma şekli buji ateşlemeli motorlardan farklı olarak gerçekleşmektedir. Heterojen haldeki hava-yakıt karışımının yanması sonucunda meydana gelen emisyonlar, yanma periyodunun ve genişleme stroğunun yanı sıra yanma odasının genel koşullarına da bağlıdır. Dizel motor emisyonlarının oluşumu, yanma odasında farklı sıcaklıklarda bekleme süresi, yakıtın tutuşma kabiliyeti, genişleme periyodu, karışım teşkili ve motorun genel özellikleri tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Yanmanın erken safhalarında oluşan eksik yanma ürünleri genişleme stroğu sonlarına doğru oksidasyona uğrayabilmektedir. Tam yanmaya için yanmamış hidrokarbonların oksitleyici gazlarla karıştırılması, oksidasyon süreci ve yüksek yanma odası sıcaklığı için yeterli zamanın olması gerekmektedir [134, 143].

5.3.1. CO Emisyonları

CO emisyonu, motorda kullanılamayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade etmesi nedeniyle önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir [134]. Başka bir deyişle yakıtın eksik

yanması sonucu oluşan bir üründür. İçten yanmalı motorlarda yakıtın oksijen ve karbon içeriği CO emisyonu üzerinde belirleyici rol oynamaktadır [144]. Silindir içerisindeki karışımın yakıtça zengin olduğu hızlanma veya ilk çalışma gibi durumlarda CO emisyonları en üst seviyelerde seyretmektedir. CO emisyonları hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak değişim göstermektedir. Yanma sonu ürünleri arasında CO bulunmasının ana sebebi düşük hava yakıt oranıdır [145]. Sonuç olarak yakıtça zengin karışımlar daha yüksek CO emisyonlarının oluşmasına sebep olurlar. Ancak dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştıklarından dolayı CO emisyonları oldukça düşüktür. Dizel motorlar için yanmanın her aşamasında karışım teşkil hızının yüksek oluşu, yüksek yanma sıcaklıkları, oksijen miktarının fazlalığı gibi faktörler sebebiyle CO emisyonlarının oksidasyonları kolaylaşmaktadır [125].

5.3.2. HC Emisyonları

HC emisyonları özellikle yanma odasındaki koşullara ve motor yüküne, yakıt sistemine, yakıtın özelliklerine, motorun tasarımı ve motor işletme parametrelerine bağlı olmakla birlikte hava emişi (aşırı doldurma ve doğal emiş) ile doğrudan ilgilidir. Yakıtın yetersiz oksidasyonu, yanma odasından silindir cidarlarına doğru ilerleyen alevin soğuk cidarlarda ani olarak sönmesi, egzoz supaplarından kaynaklanan kaçaklar, yanma odasından silindir cidarlarına doğru ilerleyen yakıtın soğumadan kaynaklanan yetersiz buharlaşması ve segman çevresinde birikmesi, silindir içi yanma sonrası oluşan HC emisyonlarının temel nedenleridir. TG süresince zengin hava/yakıt oranı ya da karışımın teşkili esnasında tutuşmayan yakıt molekülleri de HC emisyonlarının oluşmasına katkı sağlamaktadır. TG'den sonra püskürtülen yakıt, yakıtın hava ile karışmasını yavaşlatmaktadır. Bu durumda eksik yanma ile birlikte karışım aşırı zenginleşmekte ve HC emisyonları artmaktadır [125]. Dizel motorlar, hava/yakıt oranının yüksek olması, silindir içi yanma sıcaklığının yüksek olması, yakıtın direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi ve yüksek sıkıştırma oranları sebebiyle düşük HC emisyonlarına sahiptir ve emisyon standartlarını genel olarak karşılamaktadır [146]. Yanmanın bölgesel olarak gerçekleştiği fakir karışım ile çalışma şartlarında alevin oluşması ve yayılımı son bulabilmekte ve HC emisyonlarının artışına sebep olabilmektedir.

5.3.3. NO_x Emisyonları

NO_x emisyonları nitrojen monoksit (NO) ve nitrojen dioksitten (NO₂) bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. NO_x emisyonlarının büyük bir kısmını NO emisyonları meydana getirmektedir. NO_x oluşumunu etkileyen en önemli parametre sıcaklıktır. Yüksek sıcaklıklarda yanmış gaz bölgelerinde NO_x oluşum hızı artmaktadır. Fakat yanmış gaz bölgelerindeki sıcaklıklar ve hava/yakıt oranları düzensiz olduğundan NO_x oluşum hızları ideal H/Y oranlarına yaklaştıkça artar. Yükün artmasıyla sıcaklıkların artması ve hava/yakıt oranının stokiometrik orana yaklaşması sebebiyle NO_x emisyonları artmaktadır [147]. Bununla birlikte yanma süresine ve lokal oksijen içeriğine bağlıdır. NO_x emisyonlarını etkileyen diğer faktörler ise, türbülans, püskürtme zamanı, yakıt özellikleri ve oluşan ürünlerin yanma odasında kalış süresi gibi parametrelerdir. Diğer yandan yanma odasında ısı açığa çıkışının başlamasından sonra NO_x oluşumu hızlanmakta ve süreç sonunda NO_x oluşumu yavaşlamaktadır. Zira silindir içerisinde bulunan yanmamış yakıt tanecikleri yanmış gazlar ile karışarak sıcaklıkları düşürmektedir. NO_x emisyonlarının azaltılmasında püskürtme zamanının geciktirilmesi ve egzoz gazlarının soğutulup CO₂ gazı ile birlikte sisteme tekrar dahil edilmesi sıklıkla kullanılan iki yöntemdir. Ancak her ikisinde de ısı miktarında önemli derecede artış olduğu bildirilmektedir [142].

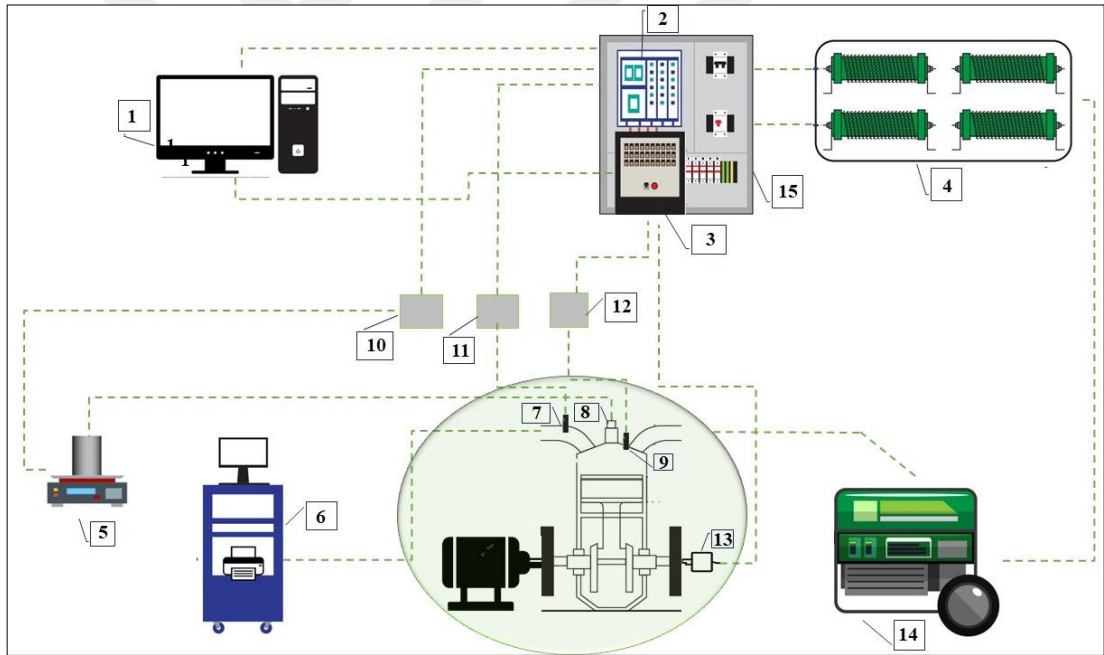
5.3.4. İs (Partikül Madde) Emisyonları

İs emisyonları, yetersiz O₂ bulunan yakıtça zengin yanma bölgelerinde, yakıtın yanma esnasında CO₂'e yeteri kadar dönüştürülememesi ile uzun zincirli HC moleküllerinin termal olarak kırılması sonucu oluşmaktadır. Partikül madde yoğunluğu ekseriyetle tam yük altında zengin karışımın elde edildiği durumda oluşmakta ve partikül madde emisyonlarının büyük bir kısmını ısı emisyonları meydana getirmektedir. Motor kararlı hale geldikten sonra yükün artışı ile birlikte silindirlere püskürtülen yakıt miktarı artmaktadır. İs emisyonları oluşumu büyük ölçüde motor yüküne bağlıdır. Motor yükündeki artış ile birlikte yanma odasında difüzyonlu yanma periyodu süresince reaksiyona gidecek O₂ miktarı azalarak difüzyonlu yanma periyodunun uzamasına ve sıcaklıkların artmasına sebep olur. Uzayan difüzyonlu yanma periyodu ise ısı emisyonlarının oluşumuna yardımcı olmaktadır.

BÖLÜM 6

MATERYAL YÖNTEM

Bu bölümde, kullanılan materyal ve yöntem, detaylı olarak irdelenmiş, deney donanımının şematik görünümü ile çalışmada kullanılan ekipmanların teknik özellikleri ve hassasiyetleri belirtilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmada kullanılan yakıt özellikleri paylaşılmıştır. Son olarak da deneyin yapılışı hakkında bilgi verilmiştir. Şekil 6.1’de deney düzeneğinin şematik görünümü belirtilmiştir.



Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

1-Bilgisayar, 2- Programlanabilir lojik kontrolör (PLC) 3- NI-USB-6341 DAQ kart,
4- Yük dirençleri, 5-Hassas terazi, 6- Emisyon cihazı, 7- Termokupl, 8- Enjektör,
9- Basınç sensörü, 10- 4-20mA dönüştürücü, 11- 0-10V dönüştürücü 12- 0,5-4,5V
dönüştürücü 13- Enkoder 14- Jeneratör motor grubu

6.1. DENEY DONANIMI

Deney düzeneği; jeneratör ve motor grubu, bilgisayar, deney seti kontrol panosu, PLC, DAQ kart, silindir gaz basıncı ölçüm sistemi, dönüştürücüler, elektronik terazi, yakıt tankı, termokupl ve egzoz gaz analizöründen oluşmaktadır. Deney alanının genel görünümü Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Deney alanının genel görünümü.

6.1.1. Deney Motoru

Deneysel çalışmalar sırasında 3000 d/d sabit devirli bir dizel jeneratör kullanılmıştır. Jeneratör üzerinde Şekil 6.3’te görülen 456 cm³ silindir hacmine sahip, tek silindirli ve hava soğutmalı Antrac ANT GEN 6000 CE marka bir dizel motor bulunmaktadır. Deney motorunun genel görünümü ve test motoru ve jeneratöre ait teknik özellikler Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Tek silindirli dizel jeneratör

Çizelge 6.1. Test motoru ve jeneratörün teknik özellikleri.

MOTOR	
Model	188FB
Tip	Hava Soğutmalı, 4 Zamanlı, Tek Silindir
Çap*Kurs (mm)	88*75
Silindir Hacmi (cm³)	456
Devir hızı (d/d)	3000
Çalıştırma Şekli	Marşlı
Enjektör Püskürtme Basıncı (bar)	220
JENERATÖR	
Maksimum Çıkış gücü (kW)	5,5
Sürekli Çalışma Gücü (kW)	5

Deney motorunun yakıt püskürtme sistemi, statik avanslı tek elemanlı bir yakıt pompası ve enjektörden oluşmaktadır. Enjektör yayının altındaki basınç ayar pulları yardımı ile enjektör Püskürtme Basıncı (PB) değiştirilebilmektedir. Dizel motor üzerindeki orijinal PB enjektör basınç ölçüm düzeneğinde 220 bar olarak

belirlenmiştir. Enjektör basınç ayar pulları ile basınç 210, 230 ve 240 bar olarak ayarlanmıştır.

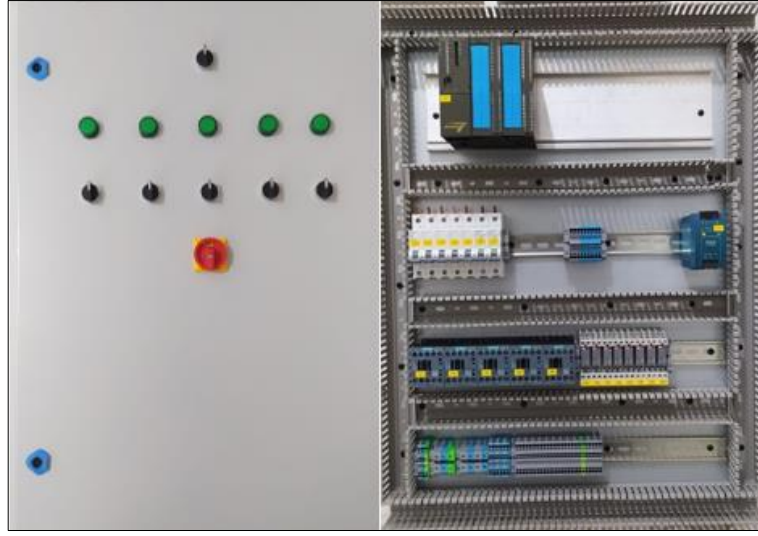
6.1.2. Yükleme Ünitesi

Deneyler sırasında motoru yüklemek için jeneratörden yararlanılmıştır. Jeneratörü yükleyebilmek için alternatör kapasitesine uygun ayarlanabilir (0-6kW) yük ünitesi tasarlanmıştır. Dizel motorunun yüklenmesi işlemi, dizel motorun miline bağlı jeneratörün çıkışına direnç grupları bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 6000 W'a kadar yüklenebilecek şekilde dirençlerden meydana gelen yük ünitesi kullanılmış ve jeneratörden çekilen güç kontrol edilerek dizel motorunun yüklenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4'te yük ünitesi gösterilmiştir. Deney sırasında yüklerin devreye alınıp çıkartılması, jeneratör ve motor düzeneğinden gelen verilerin izlenmesi ve kayıt altına alınması için bir kontrol panosu tasarlanmış ve bu işlemler Vipa CPU 313SC PLC (Programlanabilir Logic Control) aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5' te Deney seti kontrol panosu gösterilmiştir.

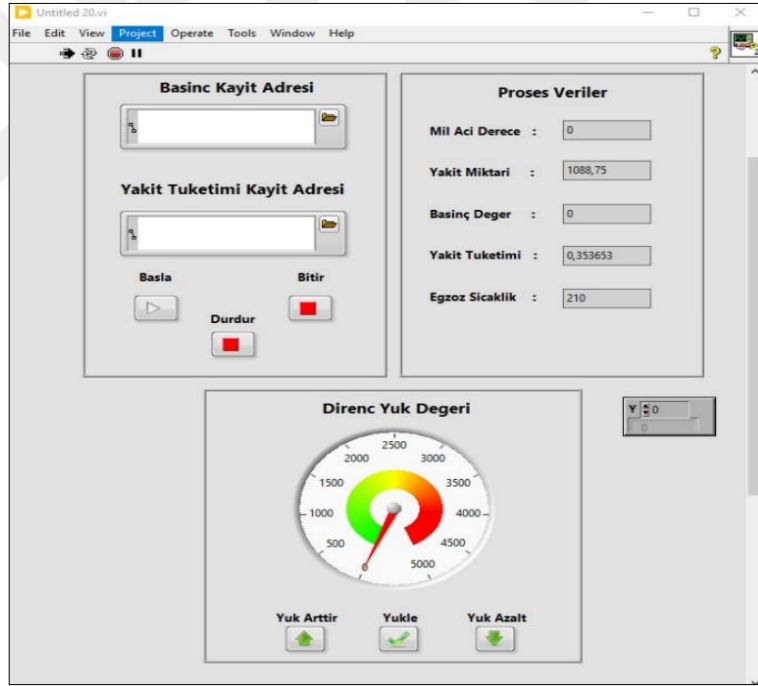


Şekil 6.4. Yük dirençleri.

Deney sırasındaki değişkenleri kontrol etmek ve izlemek için LabVIEW yazılımı kullanılarak bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan çalışma arayüzü Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Bu ara yüz ile PLC arasındaki haberleşme, TCP/IP haberleşme protokolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeneratörün yükleme değeri Watt cinsinden arayüz programı üzerinden PLC'ye gönderilmekte PLC ise gelen yük değerine göre direnç kademelerini belirleyerek dirençleri süren kontaktörleri dijital çıkışları üzerinden devreye almaktadır.



Şekil 6.5. Deney seti kontrol panosu.



Şekil 6.6. Çalışma arayüzü.

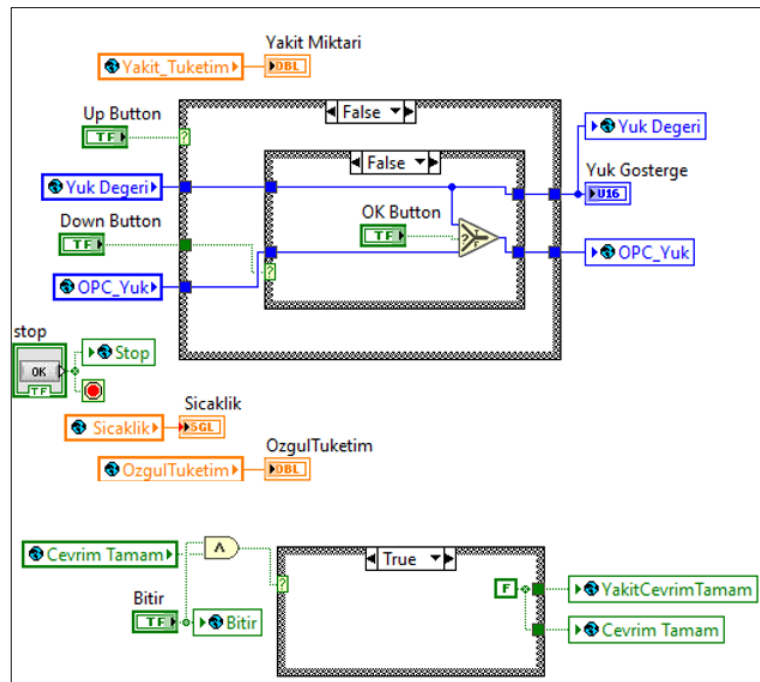
6.1.3. Yakıt Tüketimi Ölçüm Tertibatı

Deneyisel çalışmada yakıt tüketimini ölçmek için Radwag WLC X2 0,1 g hassasiyetli elektronik terazi kullanılmıştır. Terazinin çıkışına yine Radwag marka 4-20mA dönüştürücü bağlanarak veriler mA cinsinden PLC tarafından okunup her deney için

başlangıç ve bitişteki yakıt değerlerinin gram cinsinden karşılığı ile deney sırasında geçen süre saniye cinsinden LabVIEW yazılımı ile yine excel formatında kayıt altına alınmıştır. Şekil 6.7’de elektronik terazi ve 4-20mA dönüştürücü, Şekil 6.8’de yakıt tüketimi ve ölçümlerine ait ana program ve alt program blok diyagram görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.7. Elektronik terazi ve dönüştürücü.



Şekil 6.8. Yakıt tüketimi ölçümlerine ait ana ve alt program blok diyagramları

6.1.4. Emisyon Ölçüm Cihazı

Deney motorunun egzoz emisyonlarının ölçümü için Bilsa marka MOD 2210 WINXP-K egzoz gaz analiz ölçüm cihazı kullanılmıştır. Egzoz gaz analiz ölçüm cihazı Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Egzoz gaz analizörü ile NO_x, HC, CO, CO₂, ve O₂ emisyonlarını ölçebilmek mümkündür. Bununla birlikte dizel motorları için de aynı değişkenler ve is emisyonları belirlenebilmektedir. Kullanılan emisyon ölçüm cihazının bazı teknik özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri.

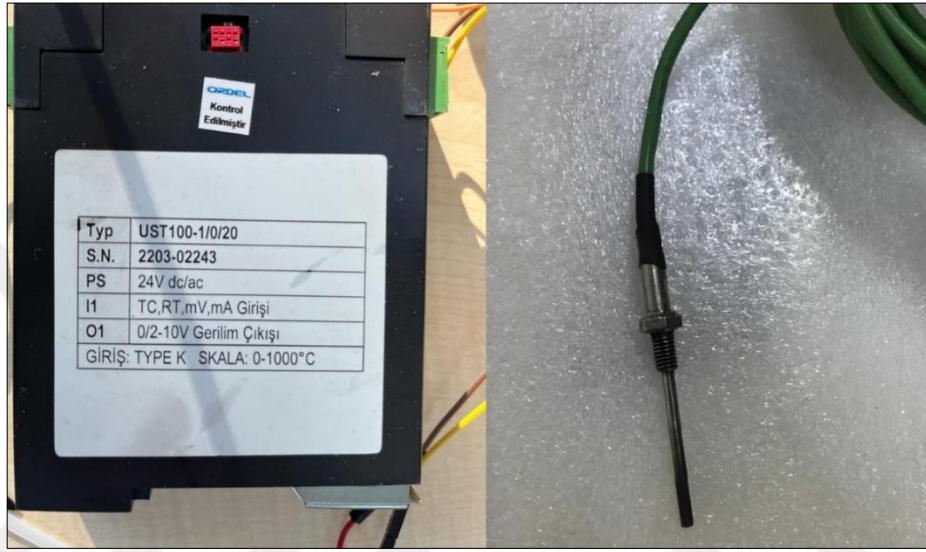
Parametreler	Ölçüm Aralıkları	Hassasiyet
Oksijen (%)	0-25	0,01
Karbon monoksit (%)	0-10	0,001
Karbon dioksit (%)	0-20	0,01
Hidrokarbon (ppm)	0-10000	1
Azot oksit (ppm)	0-5000	1
Lambda	0,5- 2,00	0,001
Opasite (%)	0-100	0,1



Şekil 6.9. Emisyon ölçüm cihazı

6.1.5. Egzoz Gaz Sıcaklığı Ölçümü

Egzoz gaz sıcaklığı ölçümü için bir termokupl ve universal sinyal dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 6.10'da kullanılan universal sinyal dönüştürücü ve termokupl gösterilmiştir. Kullanılan termokupl ve universal sinyal dönüştürücün teknik özellikleri Çizelge 6.3'te belirtilmiştir.



Şekil 6.10. Universal sinyal dönüştürücü ve termokupl.

Çizelge 6.3. Termokupl ve universal sinyal dönüştürücünün teknik özellikleri.

Termokupl		Universal Sinyal Dönüştürücü	
Marka	Ordell	Marka	Ordell
Tip	OM06-K1N45-5 3K-SS M6	Tip	UST100-1/0/20
Eleman	K Tipi	Ebat (mm)	25 x 91 x 113
Koruyucu	INCONEL-600 DIN Paslanmaz	Giriş	K Tipi
Çap (mm)	4,5		
Boy (mm)	50		
Bağlantı	M6		

Egzoz gaz sıcaklığını ölçmek için K Tipi termokupl kullanılmıştır. K Tipi termokupldan gelen veriler universal sinyal dönüştürücü kullanılarak 0-10V analog sinyale dönüştürülüp PLC'nin 0-10V analog giriş kanalına bağlanmıştır. PLC'den okunan analog veri 0-1000°C derece arasında skala edilerek egzoz sıcaklığının °C derece cinsinden karşılığı LabVIEW yazılımında hazırlanan arayüzde görselleştirilmiş ve excel formatında kayıt altına alınmıştır.

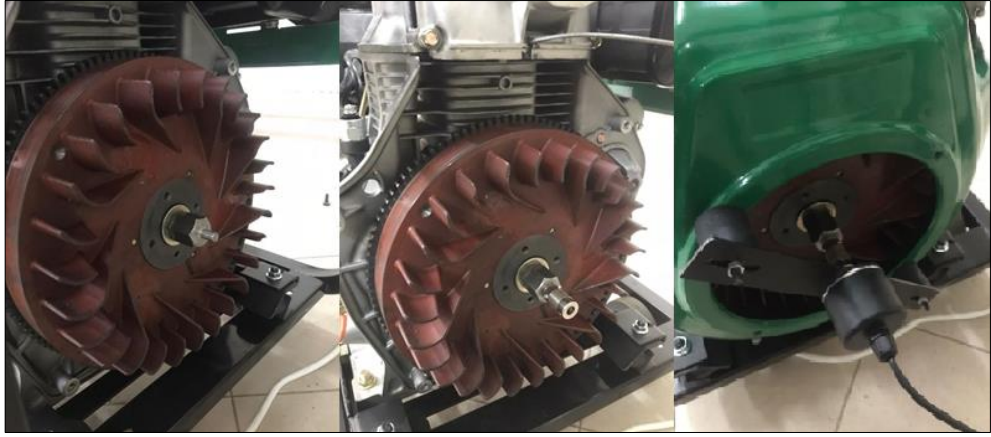
6.1.6. Silindir İçi Basınç Ölçüm Tertibatı

Silindir içerisinde meydana gelen basıncının ölçümü için silindir kapağına yanma odasına denk gelecek şekilde basınç sensörüne uygun 4,5 mm HSS matkap ile delme işlemi gerçekleştirilmiş olup M5X0,5 ince diş ile kılavuzlanmıştır. Basınç sensörü silindir kapağı üzerine montajlanmıştır. Şekil 6.11'de silindir kapağı delme ve basınç sensörü montaj işlemi gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Silindir kapağı delme ve basınç sensörü montaj işlemi.

Silindir içi basıncın anlık ölçülmesi amacıyla test motorunun krank miline bağlanan artımlı optik döner kodlayıcı (ATEK ARC S 50) sayesinde KMA kaydedilmiştir. Optik döner kodlayıcının motor mili ile bağlantısı için üretilen aparat bir kaplin vasıtasıyla optik döner kodlayıcı mili ile çakıştırılmıştır. Şekil 6.12'de optik döner kodlayıcının motor mili ile olan bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Optik döner kodlayıcı motor mili bağlantısı.

Kodlayıcıdan gelen A sinyalinin her bir darbesi krank mili açı değeri okumak için, Z sinyali ise ÜÖN tayini için kullanılmıştır. Silindir içi basınçları, 0 ile 3000 psi arasında ölçüm aralığına sahip fiber optik 1.80 mV/psi çözünürlüğünde (Optrand marka H32294-Q modeli) basınç sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Silindir içi basınç verileri her çevrim için 1°'lik krank mili açısından 720° krank mili açısına kadar 10 çevrim boyunca kaydedilmiştir. 3000 d/d ile dönen mil üzerinde her bir derecelik açı değişimine denk gelen silindir içi basınç verilerin okunup işlenebilmesi için National Instruments şirketi tarafından geliştirilen, yüksek hızlı, yüksek hızda giriş sinyallerini okuyabilen USB-6341 veri toplama kartı (DAQ) kullanılmıştır. Çizelge 6.4'te ise kullanılan veri toplama kartının özellikleri, Şekil 6.13'te ise NI-USB-6341 DAQ kart gösterilmiştir verilmiştir.

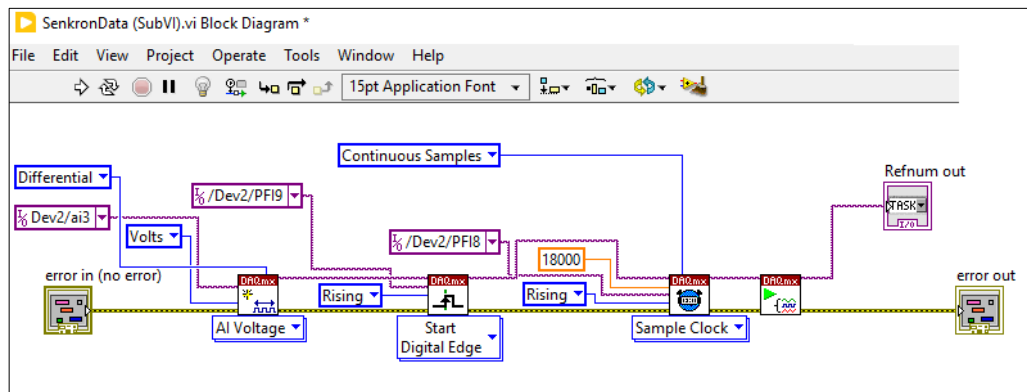
Çizelge 6.4. Veri toplama kartı özellikleri.

Özellikler	
Model	NI/USB-6341
Kanal sayısı	16
Veri toplama hızı	500kS/s
Çözünürlük	16 bit



Şekil 6.13. NI-USB-6341 DAQ kart

Kart üzerinde bulunan 16 bit çözünürlük ve 500 kS/s analog veri toplama hızı olan giriş kullanılmıştır. Bu karttan gelen veriler LabVIEW yazılımı aracılığı ile excel formatında kayıt altına alınmıştır. Her bir dereceye karşılık gelen basınç değerleri için 10 çevrimin ortalaması alınmıştır. Şekil 6.14'te silindir içi basınç ölçümlerine ait LabVIEW blok diyagram görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.14. Silindir içi basınç ölçümlerine ait LabVIEW blok diyagramı.

Oprand marka 0-3000 psi ölçüm aralığı ve 1,80 mV-psi çözünürlüğe sahip fiber optik basınç sensörü, konum sensörü ve LabVIEW yazılımı kullanılarak silindir içi basınç ölçümleri yapılmıştır. Kullanılan basınç sensörüne ve kullanılan enkodere ait teknik

özellikler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**5'te, kullanılan sensörlere ait bilgiler verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.15'te sensörlerin genel görünüşleri verilmiştir.

Çizelge 6.5. Basınç sensörü ve enkoderin teknik özellikleri.

Basınç Sensörü		Enkoder	
Marka	Optrand	Marka	ATEK
Modeli	H32294-Q	Modeli	ARC S 50
Tip	OtoPSI-A	Gövde çapı (mm)	50
Basınç aralığı (psi)	0–3000	Mil çapı (mm)	8
Giriş gerilimi (V DC)	5	Besleme gerilimi (VDC)	5
Çıkış voltajı (VDC)	0,5–4,5	Dönüş başına darbe sayısı	360
Hassasiyet (mV/psi)	1,80	Çıkış tipi	Hat sürücüsü
Bant Genişliği (Hz)	0,1–20000	Ölçüm aralığı (rpm)	3000- 6000
Çalışma sıcaklığı (°C)	(–40)- (+350)	Çalışma sıcaklığı (°C)	(–25) -(+80)
		Saklama sıcaklığı (°C)	(–40) -(+100)
		Çıkış sinyalleri	A, /A, B, /B, Z, /Z



Şekil 6.15. Basınç sensörü ve kodlayıcının genel görünüşleri.

6.2. DENEYLERDE KULLANILAN HESAPLAMALAR

Deneylelerden elde edilen veriler yardımıyla birlikte aşağıdaki formüller kullanılarak motor performans parametreleri belirlenmiştir.

6.2.1. Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (FÖYT)

Deneyleler esnasında birim zamanda harcanan yakıt miktarı PLC tarafından okunan deneyin başlangıç ve bitiş zamanları ile yakıt miktarları değerleri ile birim zamanda tüketilen yakıt miktarı Eş. 6.1 ve Eş. 6.2 kullanılarak LabVIEW yazılımı aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_y = \frac{m_{yakıt} \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{\Delta t} \quad (kg/h) \quad (6.1)$$

Burada;

$\dot{m}_y$: kütlelel yakıt debisi (kg/h)

Δt : yakıtı tüketme süresini (s) göstermektedir.

Bulunan değerler aşağıdaki formülde yerine yazılarak FÖYT hesaplanmaktadır;

$$FÖYT = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \times 10^3 \quad (g/kWh) \quad (6.2)$$

6.2.2. Fren Efektif Verim (FEV)

Fren efektif verimin hesaplanması için Eş. 6.3 ile aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\eta_e = \left(\frac{1}{FÖYT \times H_u} \times 1000 \times 3600 \right) \times 100 \quad (\%) \quad (6.3)$$

Burada;

H_u : yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg).

6.2.3. Silindir İçi Basınç

Silindir içi basıncı ölçümü için, silindir kapağına yanma odası hizasında bir basınç sensörü montajı için gerekli delik açılmış ve sensör tarafından sağlanan veriler LabVIEW yazılımı kullanılarak mV cinsinden Excel formatında kaydedilmiş ve basınç sensörünün çıkış gerilim değeri, sensörün teknik dokümanında bulunan Eş. 6.4 kullanılarak silindir içi basınç verisine dönüştürülmüştür. Veriler analiz edilerek silindir içi basınç değerleri ve eğrileri oluşturulmuştur.

$$\text{Silindir içi basınç} = \frac{V - V_{min}}{S} \quad (6.4)$$

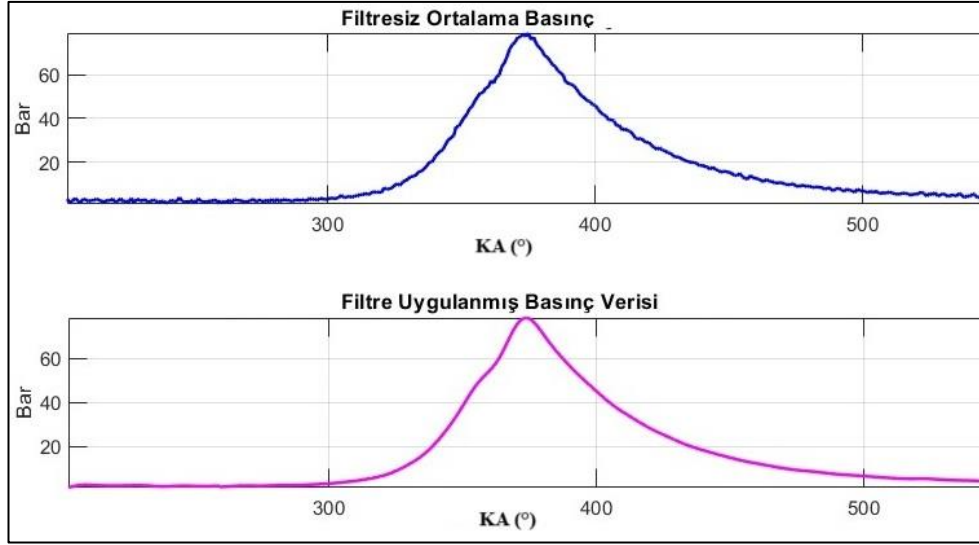
Burada;

V : Çıkış voltajı

V_{min} : Minimum çıkış voltajı

S : Sensör hassasiyeti

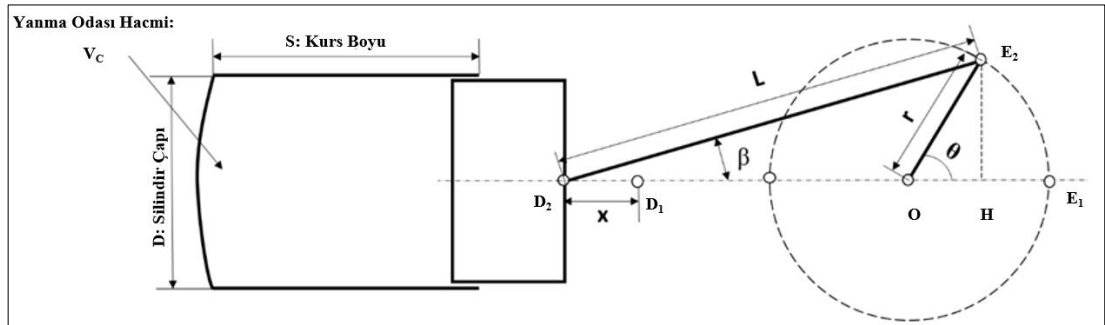
Silindir basıncının ölçümü esnasında, silindir basınç sensörü tarafından sürekli olarak analog sinyaller toplanmakta ve bu sinyaller dijital formata dönüştürülmektedir. Sinyaller, belirli krank açısı derecelerine karşılık gelen aralıklarda kaydedildiğinden, silindir basıncının sayısal türevinin hesaplanması sonucunda ortaya çıkan veriler gürültülü bir yapıya sahip olabilmektedir. Bu sebeple krank açısı cinsinden basınç verilerinde gözlenen farklılıkları en düşük seviyeye indirmek amacıyla MATLAB programı kullanılarak dikdörtgen filtreleme, lanczos ve dijital low-pass filtre kullanılmıştır [148]. Bilgisayar ortamına aktarılan filtrelenmemiş ve filtre uygulanmış silindir içi basınç verileri Şekil 6.16'da görülmektedir.



Şekil 6.16. Ham ve filtrelenmiş silindir içi basınç verileri.

6.2.4. Motor Hacminin Anlık Değişimi

Motor hacminin anlık değişimi direkt olarak ölçülmemektedir. Ancak deney motoruna ait geometrik özelliklerin bilinmesi ile hesaplanabilmektedir [125]. İçten yanmalı bir motora ait şematik bir krank-biyel mekanizması ve çeşitli geometrik ölçülerin şematik gösterimi Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.17. İçten yanmalı motorlarda krank-biyel mekanizması.

$\overline{D_2^*E_2} = \overline{D_1E_1} = L$: biyel kol uzunluğunu (m) ve $\overline{O^*E_2} = \overline{OE_1} = r$: krank kolu yarıçapını (m) belirtmektedir. Yanma odası hacmi “ V_c ” ise Eş. (6.6) ile hesaplanabilmektedir.

$$SO = \frac{V_c + V_s}{V_c} \rightarrow SO = 1 - \frac{V_s}{V_c} \rightarrow V_c = \frac{V_s}{SO - 1} \quad (6.5)$$

$$x = \overline{D_2^* E_1} - \overline{D_1 E_1} \quad (6.6)$$

$$\overline{D_2^* E_1} = \overline{D_2^* H} - \overline{H E_1} \quad (6.7)$$

$$\overline{D_2^* H} = L \cdot \cos \beta \quad (6.8)$$

$$\overline{H E_1} = \overline{O E_1} - \overline{O H} \rightarrow \overline{H E_1} = r - r \cdot \cos \theta \quad (6.9)$$

Eş. 6.7, Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 Eş. 6.6'da yerine yazılırsa;

$$x = L \cdot \cos \beta + r - r \cdot \cos \theta - L \quad (6.10)$$

elde edilir. Düzenleme sonrası;

$$x = L \cdot (\cos \beta - 1) + r \cdot (1 - \cos \theta) \quad (6.11)$$

Elde edilen Eş. 6.11'i KA cinsinden yazabilmek için gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$L \cdot \sin \beta = + r \cdot \sin \theta \rightarrow \sin \beta = \frac{r}{L} \cdot \sin \theta \quad (6.12)$$

$$\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1 \quad (6.13)$$

Eş. 6.12 Eş. 6.13'e yazılırsa;

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L} \cdot \sin \theta\right)^2} \quad (6.14)$$

Eş. 6.14 Eş. 6.11'de yerine yazılır ve düzenlenirse;

$$x(\theta) = (L - r) + r \cdot \cos \theta - \sqrt{L^2 - r^2 \cdot \sin^2 \theta} \quad (6.15)$$

$$V_T(\theta) = V_c + V_s \quad (6.16)$$

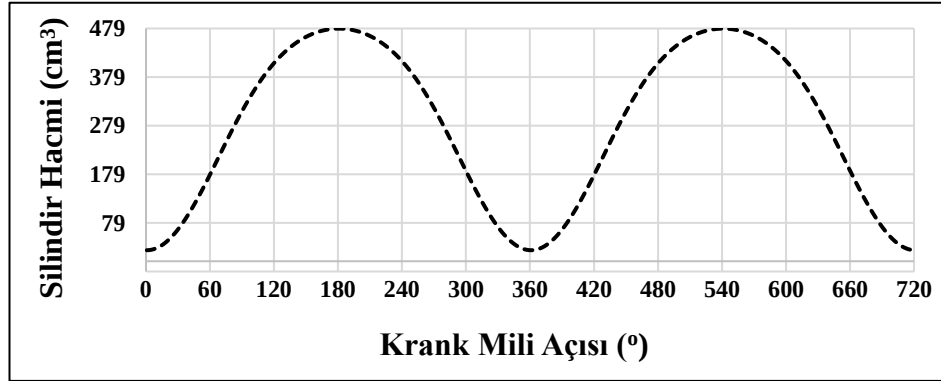
Burada Anlık silindir toplam hacmi $V_T(\theta)$ (m³) ise, yanma odası hacmi (V_c) ile anlık kurs hacminin “ $V_s(\theta)$ ” toplamına eşittir.

$$V_s(\theta) = x \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6.17)$$

Eş. 6.17 ve Eş. 6.5, Eş. 6.16’da yerine yazılırsa;

$$V_T(\theta) = \left(\frac{1}{SO - 1} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot x \quad (6.18)$$

ifadesi ile pistonun silindir içerisinde katettiği anlık hacim hesaplanabilmektedir [140]. Hesaplanan silindir hacminin krank mili açısına bağlı olarak anlık değişimi Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.18. Silindir hacminin krank mili açısına bağlı olarak değişimi.

6.2.5. Isı Yayılm Oranı

Isı yayılım oranı, İYM’de kullanılan, termodinamiğin birinci kuralını ve yanma sürecini içeren, yakıttaki kimyasal enerjinin ürettiği çıktı miktarlarını gösteren bir yanma analiz yöntemidir. Altı farklı yakıtın kullanıldığı bu çalışmada motordaki

yanmanın karmaşıklığını ortadan kaldırmak ve kullanılan yakıtların yanma niteliklerini ele almak için tek boyutlu basitleştirilmiş bir yanma modeli ile hesaplamalar yapılmıştır. Silindir içerisindeki yakıt-hava karışımı dolgusu ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Yine bu çalışmada silindire giren enerji ile yanma sonrasında açığa çıkan enerjinin eşit olduğu varsayılmıştır. Yanma İYM’de termodinamiğin I. Kanunu ile tanımlanmaktadır. Enerji dönüşüm eşitliği Eş. 6.19 gibi yazıldığına [134];

$$\frac{du}{d\theta} = Qn - W \quad (6.19)$$

$$mC_v \frac{dT}{d\theta} = Qn - P \frac{dV}{d\theta} \quad (6.20)$$

Burada;

du : Sistem içerisindeki kütlenin iç enerji değişimi

Qn : Yanma odasında açığa çıkan net ısı

W : Sistem sınırı tarafından yapılan işi belirtmektedir.

İdeal gaz kabulü ile;

$$PV = mRT \quad (6.21)$$

Kütlenin sabit kaldığının kabulü ile anlık sıcaklık değişimi için Eş. 6.21’nin türevi alındığında;

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{1}{mR} \left[P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (6.22)$$

eşitliği elde edilir. Eş. 6.20 ve Eş. 6.22 beraber düzenlenirse;

$$Qn = \left[\frac{C_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{d\theta} + \frac{C_v}{R} V \quad (6.23)$$

eşitliği elde edilir. Burada $\frac{C_v}{R}$, özgül ısı (k) cinsinden yazılır ise;

$$Qn = \left[\frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (6.24)$$

eşitliği elde edilir ve bu eşitlik silindir içiresindeki anlık ısı yayılım oranının anlık değişiminin bulunmasında kullanılabilir. Burada

Qn : Isı yayılım oranı (J/KA°)

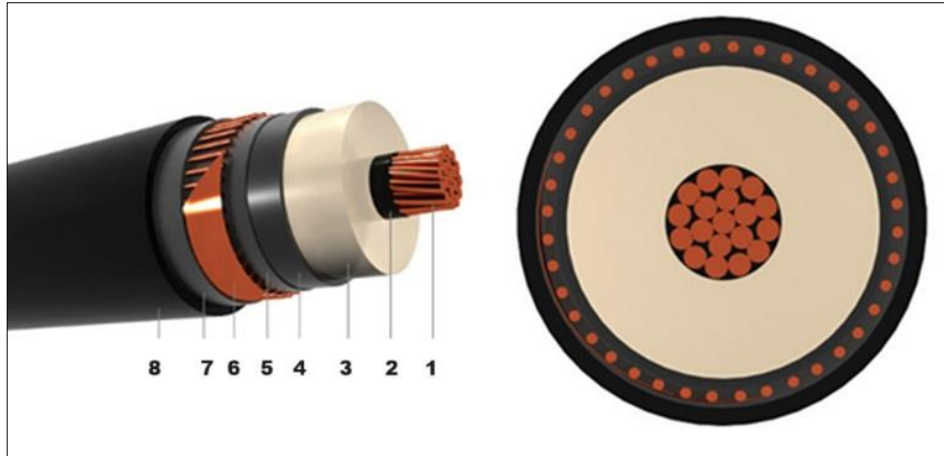
P : Silindir basıncı (Pa)

V : Silindir hacmi (m³)

θ : Krank açısı (°)

6.3. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN TEST YAKITLARI

Deneysel çalışmalarda BAKKA (Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı) tarafından TR81/20/SANAYİ/0016 numaralı sözleşme ile “Plastik Atıkların Piroлиз Yöntemi ile Bertaraf Edilmesi ve Geri Kazanımı” projesiyle desteklenen Karabük Üniversitesi ve Karabük Belediyesi ortaklığı ile kurulan tesiste enerji iletiminde kullanılan (orta gerilim) kablo atıklarından elde edilen atık plastik yağı (APY) kullanılmıştır. Şekil 6.19’da orta gerilim kablosu ve kısımları gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Orta gerilim kablosu ve kısımları.

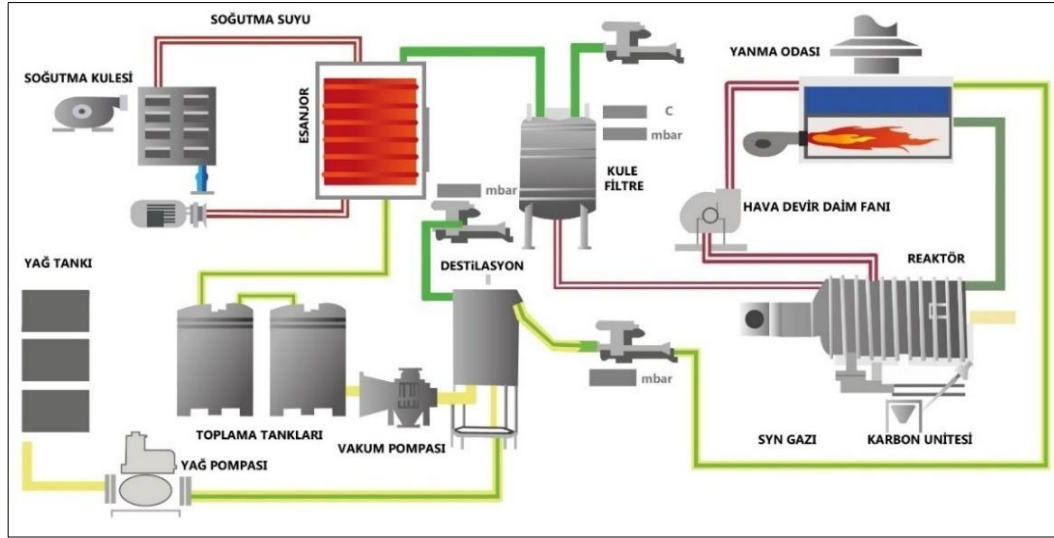
- 1.Çok telli bakır iletken 2.İç yarı iletken 3.XLPE izole 4.Dış yarı iletken 5.Yarı iletken
- 6.Şişen bant 7.Bakır ekran 8. Polietilen (PE) dış kılıf

Orta Gerilim kablo izolasyonunda 3 numaralı kısım XLPE ve 4 numaralı siyah kısımlar da XLPE ve karbon içermektedir. Elde edilen APY; 3 ve 4 numaralı kısımlardan oluşan XLPE malzemenin elde edilmiştir. XLPE elektrik telleri ve kabloları için yalıtım malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. XLPE atıklar düşük akışkanlığı ve zayıf kalıplanabilirliği sebebiyle nadiren geri dönüştürülebilmekte ve geri dönüşüm oranının düşük seviyelerdedir. XLPE geri dönüşümü mekanik ya da kimyasal yollar ile yapılabilmektedir. Mekanik geri dönüşüm, sınıflandırma, ayırma, yıkama ve granül haline getirme ve son ürünü elde etme süreçlerini içerirken zahmetli ve maliyetlidir. Kimyasal geri dönüşüm içerisinde yer alan ve son dönemde araştırmacıların ilgisini çeken piroliz işlemi ise sınıflandırma ve ayırma işlemlerini ortadan kaldırarak atık plastikleri çevreye zarar vermeden değerli hidrokarbonlara, yakıt ve monomerlere dönüştürebilmektir. Piroliz sürecinde XLPE malzeme içeriğinde bulunan diğer polimer ve bakır iletkenlerden ayrılarak başlangıçta küçük parçalara ayrılmaktadır. Şekil 6.20’de piroliz edilen XLPE malzeme gösterilmiştir.



Şekil 6.20. Piroliz edilen XLPE malzeme.

Bu parçalara dönüştürülen plastikler, bir taşıma bandı aracılığıyla ana reaktöre yüklenmekte ve ardından yakma işlemine tabi tutularak gaz, sıvı yağ ve katı karbon siyahı elde edilmektedir. Elde edilen pirolitik gaz, sistem içerisinde tekrar yakılarak daha fazla enerji elde edilirken, pirolitik yağ distilasyon işlemine tabi tutularak atık plastik yağı (APY) elde edilmektedir. Atık XLPE kablolarına ait gerçekleşen piroliz prosesi Şekil 6. 21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Atık XLPE kablolarına ait gerçekleşen piroliz prosesi.

Piroliz prosesi sonucu elde edilen deney yakıtı APY ve dizel yakıtı TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi enerji ve kimya laboratuvarında analiz edilmiş, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 6.6’da yakıtların destilasyon analiz sonuçları ise Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

Deneyel çalışmada, yakıt olarak aşağıda verilen yakıtlar ve yakıt karışımları kullanılmıştır. Karışım yakıtların oranları, beher kullanılarak hacimsel olarak ölçülmüştür. Deney yakıtları Şekil 6.22’de gösterilmiştir

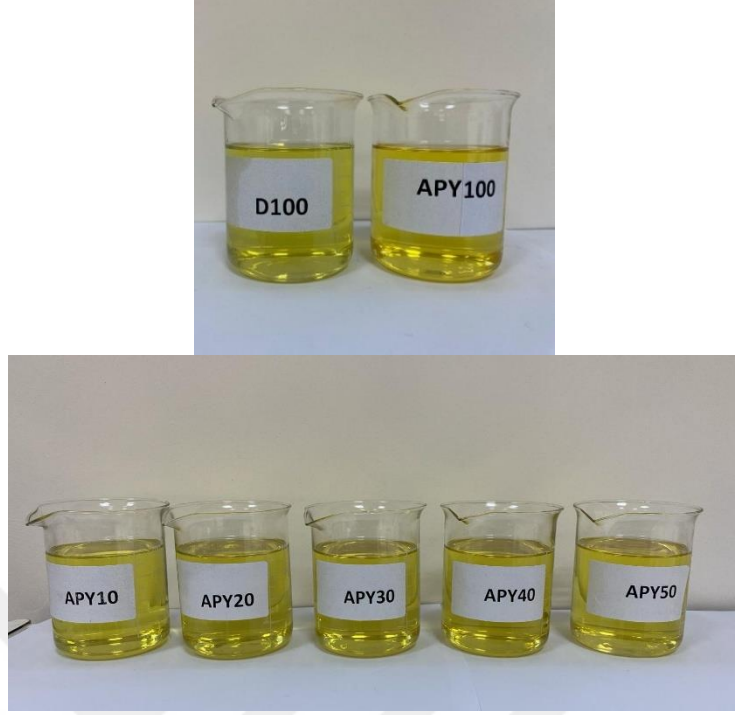
D100	: Dizel yakıtı (%100)
APY10	: %10 Atık Plastik Yağı + %90 Dizel
APY20	: %20 Atık Plastik Yağı + %80 Dizel
APY30	: %30 Atık Plastik Yağı + %70 Dizel
APY40	: %40 Atık Plastik Yağı + %60 Dizel
APY50	: %50 Atık Plastik Yağı + %50 Dizel

Çizelge 6.6. Deney yakıtlarının analizi yapılan bazı yakıt özellikleri.

Özellikler	D100	APY	Analiz Metodu
Kinematik Viskozite 40°C	2.743	0.9538	TS 1451 ISO 3104
mm ² /s			
Üst Isıl Değer kJ/kg	46356	45209	ASTM D 240
Alt Isıl Değer kJ/kg	43379	42554	Hesap ile
Setan Sayısı	52.6	48.3	TS 10317 EN ISO 5165
Yoğunluk 15°C kg/m ³	831	777.9	TS EN ISO 12185
Parlama Noktası°C	59.5	Oda	TS EN ISO 2719
		Sıcaklığı	
Bakır Şerit Korozyon Derece		1b	TS 2741 EN 2160
Toplam Kirlilik mg/kg		<12	TS 12662
Kükürt mg/kg		78	TS EN ISO 20846
Kül Tayini % (m/m)		<0,001	TS EN ISO 6245
Su Tayini % (m/m)		0,076	TS 6147 EN ISO 12937
Yağlama Özelliği µm		380	TS EN ISO 12156-1

Çizelge 6.7. Yakıtların destilasyon analiz sonuçları.

ANALİZ (Destilasyon)	APY Analiz Sonucu	D100 Analiz Sonucu
İlk Kaynama Noktası	105,7	160,5
%v/v 5' teki sıcaklık	127,5	190,2
%v/v 10' daki sıcaklık	137,8	205,6
%v/v 20' deki sıcaklık	149,5	231,4
%v/v 30' daki sıcaklık	158,5	251
%v/v 50' deki sıcaklık	178,3	268,5
%v/v 60' taki sıcaklık	187,8	282,4
%v/v 70' teki sıcaklık	197,5	295,7
%v/v 80' deki sıcaklık	208,6	308,6
%v/v 90' daki sıcaklık	223,2	322,6
%v/v 95' teki sıcaklık	236	340,2
Son Kaynama Noktası	265,6	365,4



Şekil 6.22. Deney yakıtları.

6.4. YANIT YÜZEY METODOLOJİSİ İLE (RSM) OPTİMİZASYON

RSM, Box and Wilson tarafından geliştirilmiş ve ilk olarak kimya uygulamalarında “Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması” ismi ile 1951 yılında ortaya çıkmıştır. Yine Myers ve Montgomery tarafından ise proseslerin geliştirilmesinde ve optimizasyonunda istatistiksel ve matematiksel yöntemlerin birlikte uygulandığı bir yöntem olarak belirtilmiştir. Son zamanlarda ise mühendislik alanında karmaşık sistemleri optimize etmek ve anlamak için uygulanan güçlü bir istatistiksel model olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirme yeteneği, çok sayıda faktör ve yanıt parametresi dikkate alındığında RSM, İYM deneylerinde kullanışlı bir tekniktir. Hem benzinli hem de dizel motorları için en uygun çalışma koşullarını belirlemek amacıyla birçok araştırmada kullanılmıştır [53, 149–152].

Sadece bir parametrenin değiştirilip diğer parametrelerin sabit tutulduğu optimizasyon çalışmaları tek değişkenli optimizasyon çalışmaları olarak isimlendirilmektedir. Ancak tek değişkenli optimizasyon çalışmaları değişkenlerin birbiri ile olan etkileşimi

tasvir etmekte eksik kalmaktadır. Ayrıca deney sayılarının fazlalıkları ile yaşanan zaman kaybı uygulanan teknikteki dezavantajlardır. Bu sebeple çok değişkenli istatistik modelleri kullanılmıştır. Bu teknikler arasında en yaygın olanı RSM'dir. RSM matematiksel ve istatistiksel yöntemlerin bir arada kullanılmasını temel almaktadır.

RSM metodu işlem basamakları aşağıda belirtilmiştir [153].

- ✓ Deneysel bölgenin sınırlandırılması ve sistem üzerine etki eden bağımsız değişkenlerin belirlenmesi.
- ✓ Deney tasarımının seçimi ve seçilen matrise göre deneylerin yapılması.
- ✓ Elde edilen deneysel verilerin matematiksel-istatistiksel olarak değerlendirilmesi.
- ✓ Modelin uygunluğunun belirlenmesi.
- ✓ Bağımsız değişkenlerin sistemin yanıtında oluşturdukları değerlerin, optimum noktaya yakın sonuçlar verip vermediğinin belirlenmesi.
- ✓ Çalışılan her bir değişken için optimum değerlerin eldesi

Üzerinde çalışılan sistemin tepkisini birçok değişken parametresi etkileyebilmektedir. Fakat küçük etkileri olanları tanımlamak ve kontrol edebilmek hemen hemen imkansızdır. Bu sebeple yüksek etkili değişkenlerin seçilmesi önem arz etmektedir. RSM'de kullanılan en temel model Eş. 6.25'te verilen lineer bir fonksiyondan meydana gelmektedir [154]. Yanıtların bu eşitlikle uyumlu olması gerekmektedir.

$$y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (6.25)$$

Burada, y bağımlı değişkeni, β_0 sabit terimi, β_i lineer parametrelerin katsayısını, x_i bağımsız değişkenleri ve ε denemeler ile ilişkilendirilebilen fazlalığı ifade etmektedir.

Yanıtların eğri oluşturduğu durumlar için Eş. 6.26'da verilen ikinci dereceden denklemler kullanılmaktadır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6.26)$$

Burada i lineer katsayıları, j ikinci dereceden katsayıları, x_i ve x_j bağımsız değişkenleri, β_{ij} etkileşimli katsayıları belirtmektedir.

Kritik bir noktanın (minimum, maksimum,) belirlenmesi için ise Eş. 6.27’de yer alan kuadratik terimlerin olduğu polinomiyal fonksiyonlar kullanılmaktadır [153].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6.27)$$

Tahminlenen regresyon modelinden sonra elde edilen denklemin ilişki üzerindeki işlevselliğini ayrıca denklemi kullanarak yapılacak olan tahminlerin hassasiyetinin araştırılması gerekmektedir. Bu sebeple kalıntı analizi, model uygunsuzluğunun test edilmesi, yeterli tahminleme değerinin hesaplanması, tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamının (**PRESS**) hesaplanması, regresyon katsayısının (R^2) ve düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması (R^2_{adj}), hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması ve varyasyon katsayısının hesaplanması gibi farklı test metotları uygulanmaktadır [155].

RSM uygulamasının yanında regresyon analizi ile birlikte etkenlerin ortalamaları arasında anlamlı bir değişiklik olup olmadığını değerlendirmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Regresyon analizi bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerle ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Denklem sonucunda belirlenen determinasyon katsayısı (R^2), bağımlı değişkenin değişimini açıklama yeteneği olarak yorumlanmakta, daha yüksek değerler, regresyon modelinin daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. ANOVA ise, çalışmadaki farklı faktörlerin birbirleriyle etkileşime girip girmediğini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir istatistiksel uygulamadır. ANOVA testleri % 95 güven düzeyi kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada uygulanan optimizasyon çalışmasındaki temel amaç, FEV’i maksimuma çıkararak ve EGS, FÖYT, CO, HC, NO_x ve is emisyonlarını minimuma indirmek ve bir dizel motorun optimum çalışma faktörlerini tespit etmektir. Bu amaçla optimum APY oranı motor yükü ve PB seviyelerini belirlemek ve bunlara karşılık gelen optimum FÖYT, EGS, FEV, CO, HC, NO_x ve is emisyonu cevaplarının belirlenmesi

amacıyla RSM uygulanmıştır. Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) tercih edilmiştir [156]. Giriş faktörleri ve seviyeleri Çizelge 6.8’de, RSM modelinin ayarları ise Çizelge 6.9’da gösterilmiştir.

RSM modeli oluşturmak için MINITAB ve Design-Expert programından faydalanılmıştır. Çeşitli giriş faktörü kombinasyonları için uygulanan 144 deney arasından toplam 20 deney belirlenmiştir. RSM modeli için FEV (%), EGS (°C), FÖYT (g/kWh), NO_x (ppm), HC (ppm) CO (%) ve is (%) çıkış parametreleri olarak seçilirken, PB, APY karışım oranı ve motor yükü giriş parametreleri olarak seçilmiştir.

Çizelge 6.8. Giriş faktörleri ve seviyeleri.

Faktörler	Seviyeler					
APY Oranı (%)	10	20	30	40	50	-
Motor Yükü (Watt)	750	1500	2250	3000	3750	4500
PB (bar)	210	220	230	240	-	-

Çizelge 6. 9. RSM modelinin ayarları.

Model Topolojisi	Üç faktör ve altı yanıt
Tasarım türü	Merkezi kompozit tasarım (CCD)
Sürekli faktörlerin sayısı	3
Sürekli faktörler	APY yüzdesi, motor yükü ve PB
Tepkiler	FÖYT, EGS (°C), FEV, NO _x , HC, CO ve is
Şartlar	Tam ikinci dereceden
Tüm aralıklar için güven seviyeleri	95%

6.5. DENEY YÖNTEMİ

Deneylere başlamadan önce motorun yağ kontrolü ve bağlantılarının kontrolü yapılmıştır. Yakıt enjeksiyon sisteminin PB değerleri katalog değerleri ile karşılaştırılarak kontrol edilmiştir Ayrıca deneyler sırasında kullanılacak ölçüm aletlerinin çalışır

vaziyette olup olmadığı kontrol edilmiştir. Egzoz emisyon ölçüm cihazının her deney sonrası filtreleri yenilenmiştir. Kullanılan yakıt deposu yine her deney öncesi temizlenmiştir.

Bu çalışmada dört farklı PB (210, 230 ve 240 bar)'da ve altı farklı motor yükünde (750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500 W) saf dizel yakıtı (D100) ve atık plastik yağı (APY)-D100 yakıt karışımları (APY10, APY20, APY30, APY40, APY50) kullanılarak motor testleri gerçekleştirilmiştir. %50'den daha fazla APY ilavesi ile FÖYT değerleri artmış ve FEV değerlerinde azalma meydana gelmiş ve motorda oluşan kararsız çalışmadan dolayı daha yüksek oranda pirolitik yakıt ilave edilmemiştir. Ayrıca APY'nin parlama noktasının düşük olması nedeniyle %50 den fazla APY ilavesi uygun görülmemiştir.

Deney motoru sabit ateşleme avansı (21°) ile çalışmaktadır. Deneyler sırasında püskürtme avansı değiştirilmemiştir. Enjektör PB, enjektör yayının altındaki basınç ayar pulları yardımı ile değiştirilmiştir. Deneyi yapılacak olan PB ayarlandıktan sonra deney motoru deney yakıtı ile çalıştırılarak kararlı hale gelmesi beklenmiş ve deney kontrol panosu içerisinde bulunan PLC vasıtasıyla LabVIEW yazılımı ile oluşturulan ara yüz üzerinden yükleme yapılarak ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmanın iki amacı bulunmaktadır. Deneysel çalışmada, ilk olarak orijinal PB 220 bar olan deney motoruna ait PB enjektör ayar pulları vasıtasıyla değiştirilerek, her bir yakıt karışımı için 210, 230 ve 240 bar püskürtme basınçlarında ve farklı motor yüklerinde (750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500W) sabit motor hızında (3000 d/d) dizel motor performansı ve emisyonlarındaki değişimler ile yanma karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş, APY ve (D100) karışımlarının tek silindirli hava soğutmalı dizel motorda yakıt olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. İkinci olarak yanıt yüzey metodu (RSM) ile en uygun performans ve egzoz emisyonları belirlenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır.

BÖLÜM 7

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda APY ve dizel yakıtı karışımları ile oluşturulmuş deney yakıtları (APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50) ve saf dizel yakıtı (D100) ile farklı motor yüklerinde (750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500 W) ve farklı PB’lerde (210, 220, 230 ve 240 bar) çalıştırılan tek silindirli dizel motordan elde edilen verilerle oluşturulan sonuçlar grafiğe dökülmüş ve incelenmiştir. Motor yüküne ve PB’ye bağlı değişimler başlıklar halinde ayrı olarak incelenmiş ve tüm yakıtlar için ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Bununla birlikte deney sonuçları RSM ile optimize edilerek optimum yakıt karışım oranı, PB ve motor yükü tespit edilerek elde edilen optimum yanıtlarla doğrulama çalışması yapılmış ve motor performans ve egzoz emisyonları açısından elde edilen grafikler bu bölümde ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

7.1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyler sırasında ölçümlerden elde edilen veriler ve hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar bu kısımda grafiksel olarak gösterilmiş bulgular literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmalı olarak tartışılmıştır.

7.1.1. Motor Performans Sonuçlarının Analizi

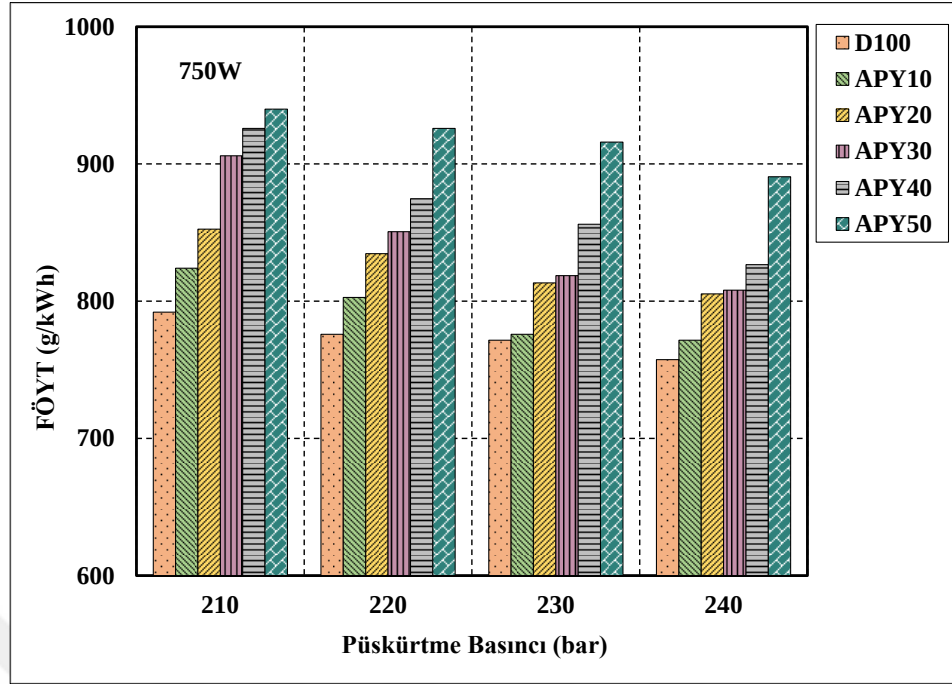
7.1.1.1. Fren Özgöl Yakıt Tüketiminin (FÖYT) Motor Yüğü ve Püskürtme Basıncına (PB) Bağlı Olarak Değişimi

FÖYT, birim güç başına tüketilen yakıt miktarını ifade etmektedir. FÖYT’ün farklı PB’lerde ve farklı motor yüklerinde değişimi her bir yakıt için Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 Şekil 7.6’da ayrı ayrı gösterilmiştir.

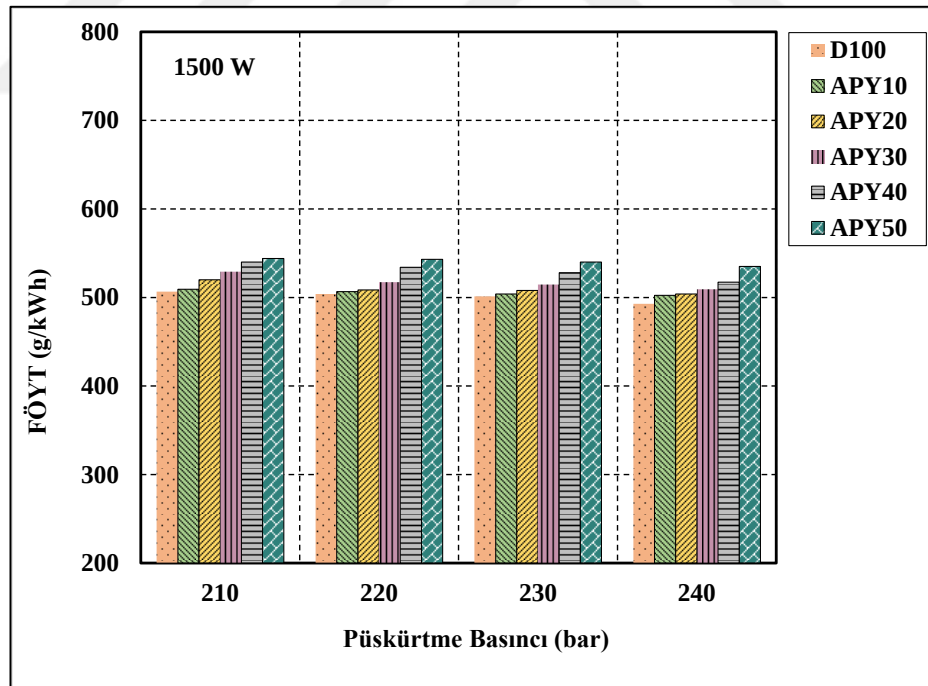
Motor yükünün artmasıyla birlikte bütün püskürtme basınçları için FÖYT değerlerinde 3750 W'a kadar azalma görülmüştür. Motor yükünün artmasıyla tam yanma şartlarına yaklaşılarak FÖYT azalmaktadır. Ancak, 4500 W motor yükünde silindire sürülen yakıt miktarının artmasıyla karışım zenginleşmekte ve yanma verimi azalmaktadır. Yanma veriminin azalmasıyla birlikte özgül yakıt tüketimi tekrar artışa geçmektedir. Örneğin 220 bar standart PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500 W yükteki FÖYT değerleri sırasıyla 775,91; 504; 395,55; 349,33; 330,67; 334,93 g/kWh bulunmuştur. Bu sonuç, düşük motor yüklerinde yanma odasının duvarlarına yüksek ısı transferi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, motor yükü arttıkça yanma odasına enjekte edilen yakıt miktarı da artar, çünkü daha yüksek yüklere ulaşmak için daha fazla yakıt gerekmektedir [157]. Yakıt miktarındaki bu artış, daha fazla yakıtın yanmasına ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklığa yol açmakta ve daha yüksek yüklerdeki yüksek sıcaklık, test yakıtlarının nispeten hızlı bir şekilde tutuşmasına neden olmaktadır [158]. Yanma verimliliğindeki artış ve yüksek silindir içi basınç ile tüm yakıt karışımları daha düşük özgül yakıt tüketimi sergilemektedir. Bu durumdan dolayı özgül yakıt tüketiminin düşük motor yüklerinde daha yüksek olmasının ve motor yükü arttıkça azalmaya başlamasının nedeni olduğu düşünülmektedir.

APY ilavesi bütün püskürtme basınçlarında FÖYT için artışa sebep olmuştur. Bu artışın dizel yakıtının içerisine APY ilavesiyle orantılı olduğu görülmektedir. En düşük FÖYT değeri maksimum verim değerinin elde edildiği 3750 W motor yükünde elde edilmiştir. Örneğin, 220 bar standart püskürtme basıncında 3750 W motor yükündeyken sırasıyla referans dizel yakıtı 330,67 g/kWh iken APY10 karışımı için 333,86 g/kWh, APY20 karışımı için 337,06 g/kWh, APY30 karışımı için 340,5 g/kWh, APY40 karışımı için 342,5 g/kWh, APY50 karışımı için ise 360,26 g/kWh olup referans dizel yakıtından yaklaşık %8,94 daha fazladır. Bu duruma, yakıt karışımlarının daha düşük ısı değerlerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Daha düşük ısı değere sahip olan test yakıtları ile yapılan çalışmalarda aynı efektif güce ulaşmak için yanma odasına daha fazla yakıt enjekte edilmek zorundadır [159]. Bu durum, özgül yakıt tüketiminde bir artışa yol açmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki birçok çalışma ile benzerlik göstermektedir [160–163].

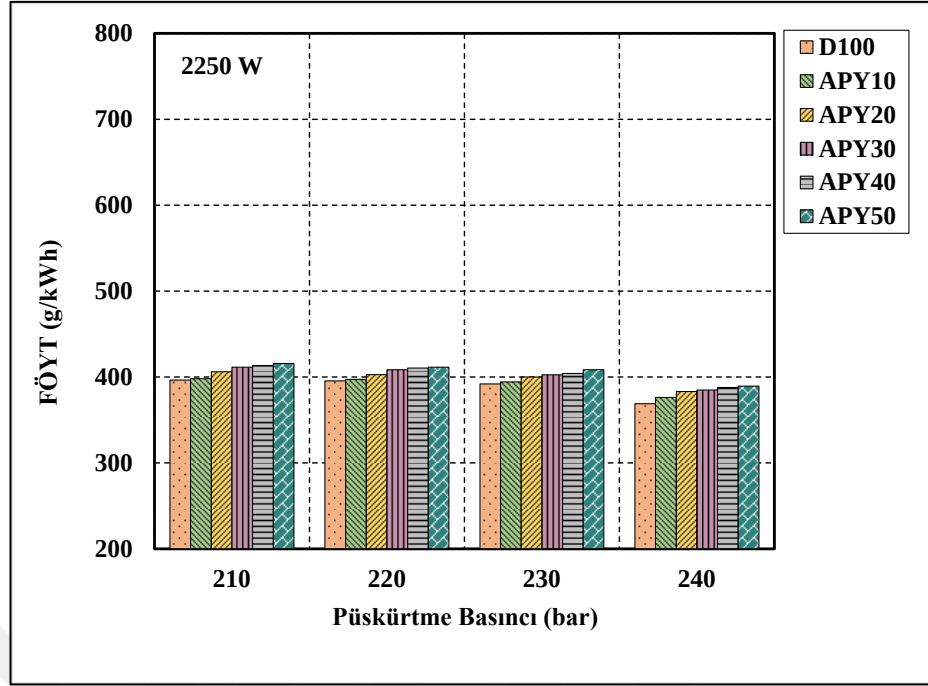
PB, yakıt atomizasyonunu etkileyen temel parametredir. Atomizasyon biçimi yakıtın yanma niteliği hakkında bilgi vermekte ve atomizasyonun kötüleşmesi durumunda TG süresini arttırmakta bu da silindirlere alınan yakıt miktarının artmasına sebep olmaktadır. Deney sonuçlarına göre, 3750 W motor yükünde PB'nin 240 bar'a çıkarılmasıyla FÖYT değerleri sırasıyla 324,4 g/kWh (D100), 328,3 g/kWh (APY10), 329,7 g/kWh (APY20), 337 g/kWh (APY30), 339,5 g/kWh (APY40) ve 349,1 g/kWh (APY50) seviyelerine düşmüştür. PB'nin artması yakıt damlacık çapının küçülmesine sebep olarak yakıtın daha kolay buharlaşmasını sağlamaktadır. Yüksek PB ile iyileşen atomizasyon kalitesi yanma odasında yakıt hava karışımlarının daha etkili kullanımını arttırırken yanma verimini arttırmaktadır. Bu sebepten dolayı püskürtme basıncının artırılması ile FÖYT değerleri azalmıştır. PB'nin 210 bar seviyesine düşürülmesiyle ise elde edilen FÖYT değerleri sırasıyla 333,8 g/kWh (D100), 336,5 g/kWh (APY10), 338,2 g/kWh (APY20), 341,4 g/kWh (APY30), 346,4 g/kWh (APY40) ve 364,4 g/kWh (APY50) seviyelerine yükselmiştir. PB'nin azaltılmasıyla damlacık çapı büyümüş ve yakıtların buharlaşma sürelerinin arttığı düşünülmektedir. Bu durum sebebiyle yanma verimi düşmektedir. Ayrıca bu durumun kütle bazda daha fazla yakıtın enjekte edilmesine yol açtığından FÖYT değerlerinin artmış olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak PB'nin azalması FÖYT değerlerinde artışa sebep olmuştur. Literatür incelendiğinde elde edilen bulgular ile paralel birçok çalışma olduğu görülmektedir [164, 165].



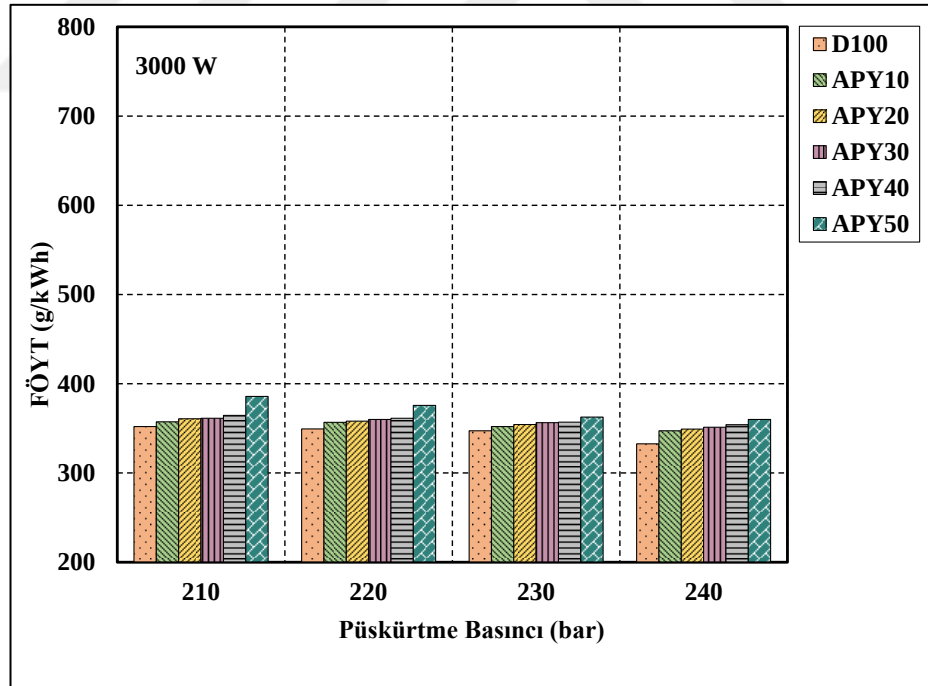
Şekil 7.1. PB değişiminin 750 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.



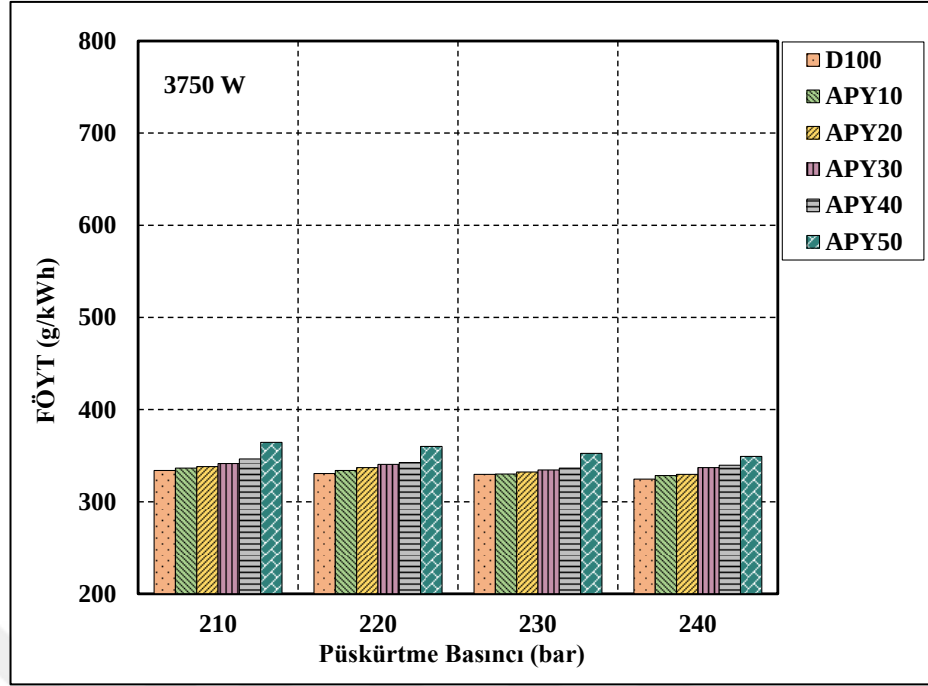
Şekil 7.2. PB değişiminin 1500 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.



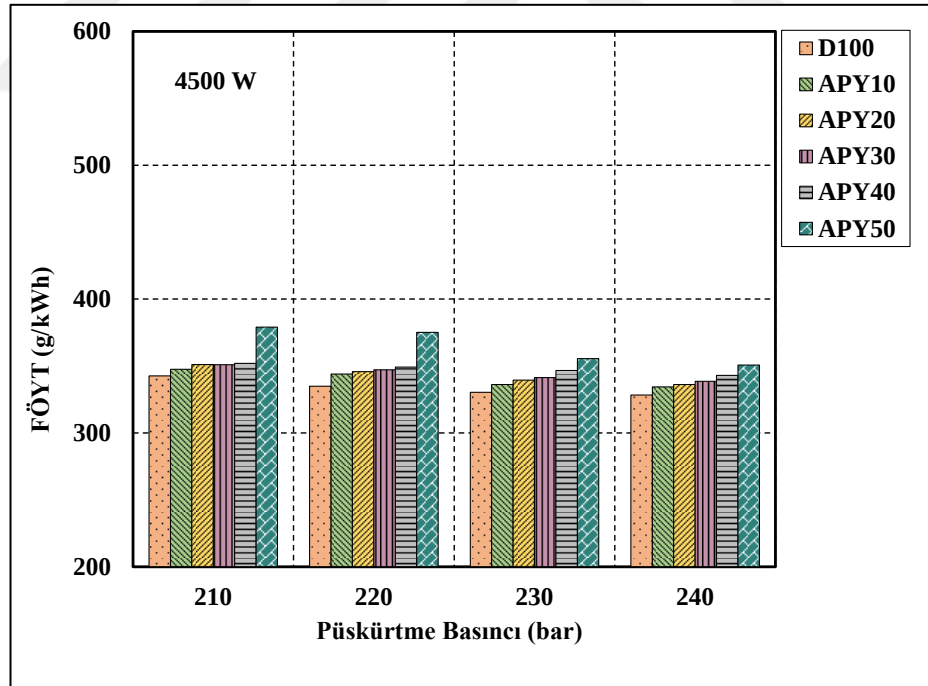
Şekil 7.3. PB değişiminin 2250 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.



Şekil 7.4. PB değişiminin 3000 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.



Şekil 7.5. PB değişiminin 3750 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.



Şekil 7.6. PB değişiminin 4500 W motor yükünde FÖYT üzerindeki etkisi.

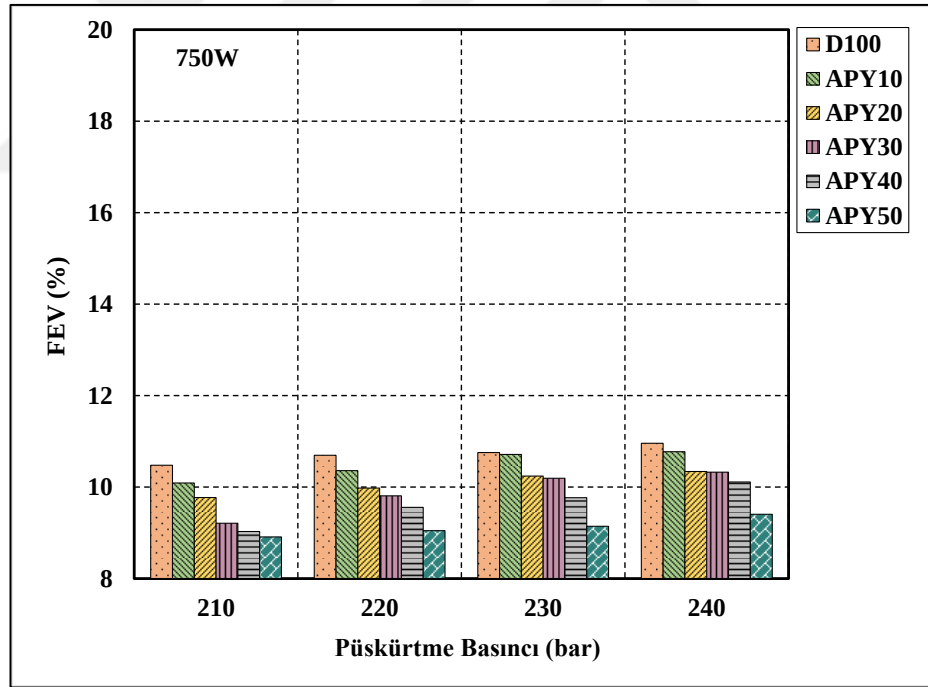
7.1.1.2. Fren Efektif Verimin (FEV) Motor Yüğü ve Püskürtme Basıncına (PB) Bağlı Olarak Değışimi

Motor milinden alınan enerjinin motora verilmesi gereken toplam enerjiye oranı FEV olarak ifade edilmektedir. Sabit devir, altı farklı yük ve altı farklı yakıt ile gerçekleştirilen deneylerde FEV'in motor yüğü ve PB'ye bağlı olarak değışimleri Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10, Şekil 7.11 Şekil 7.12'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Motor yükünün FEV üzerine etkisi incelendiğinde, 4500 W motor yüküne kadar artan yükün FEV değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Yük arttıkça kullanılan yakıt miktarı artmakta bu da silindir basınç ve sıcaklığını artırmaktadır. Artan sıcaklık ve basınç yanma hızını artırdığından ısı kayıpları azalmakta ve verim artmaktadır. 4500 W motor yükünde ise FEV değerinde bir miktar azalma görölmektedir. Yakıt miktarının daha da artırılmasıyla H/Y oranı azalmakta bu da yanma verimini azaltmaktadır. Yanma veriminin azalması ve fren özgül yakıt tüketiminin artmasıyla FEV de düşmektedir. Örnek olarak standart PB olan 220 bar'da D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500 W yükteki FEV değerleri sırasıyla %10,69; %16,46; %20,98; %23,75, %25,09; %24,77'dir.

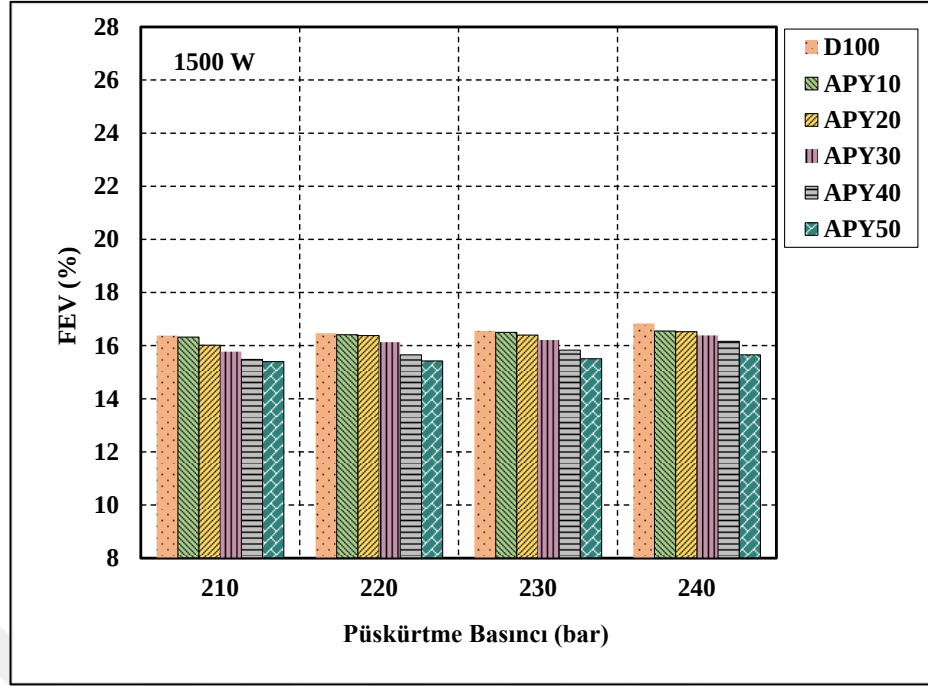
Yakıt karışımları içerisindeki APY oranının artmasıyla efektif verimde azalma görölmüştür. Örnek olarak standart PB 220 bar ve 3750 W motor yükünde APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının FEV değerleri D100 ile karşılaştırıldığında sırasıyla %0,77; %1,54; %2,35; %2,74; %7,29 oranlarında azalmıştır. Bu azalma APY'nin setan sayısının dizel yakıtından düşük olmasına bağlanabilir. Yakıtlarda setan sayısının düşüklüğü TG süresini artırmakta kontrolsüz yanma fazına kadar yanmamış yakıt miktarında artışa sebep olmaktadır. Yakıt miktarındaki artış H/Y oranının azalmasına ve yanma veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca bir diğer sebebinin art yanma periyodu boyunca açığa çıkan enerjinin işe dönüştürülememesi olduğı düşünölmektedir. Benzer sonuçlar atık plastik yağ karışımları ile yapılmış literatürdeki diğer çalışmalarda da mevcuttur [126, 160, 166, 167].

Tüm yük ve yakıt türleri için PB'nin artmasıyla birlikte FEV'de artış elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 3750 W motor yükünde standart 220 bar PB'de iken FEV

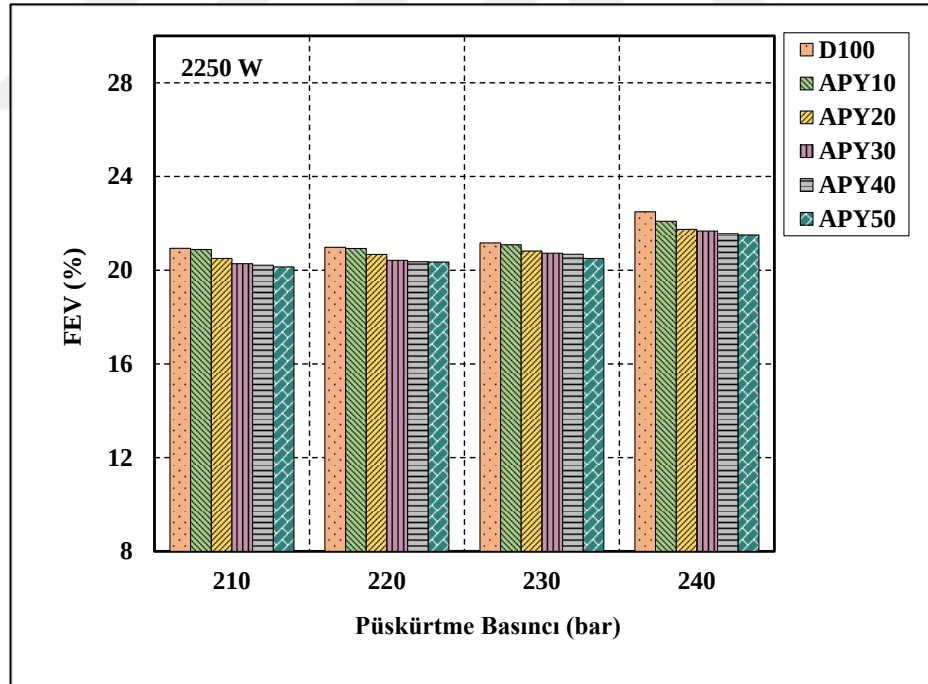
değerleri sırasıyla %25,1 (D100), %24,9 (APY10), %24,7 (APY20), %24,5 (APY30), %24,41 (APY40) ve %23,27 (APY50) iken; PB'nin 240 bar'a çıkarılmasıyla FEV değerleri sırasıyla %25,5 (D100), %25,3 (APY10), %25,2 (APY20), %24,7 (APY30), %24,6 (APY40) ve %24 (APY50) seviyelerine çıkmıştır. Basıncın 230 ve 240 bar değerlerine çıkarılması yakıtın daha iyi atomize olmasına ve buharlaşmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede, daha homojen bir karışım oluşmakta, yanma iyileşmekte ve FÖYT düşmektedir. Sonuç olarak, PB'nin arttırılması FEV'i olumlu yönde etkilemiş ve FEV'in artışına yol açmıştır. Diğer taraftan PB'nin 210 bar değerine azaltılması ile elde edilen FEV değerleri sırasıyla %24,8 (D100), %24,7 (APY10), %24,6 (APY20), %24,4 (APY30), %24,1 (APY40) ve %22,9 (APY50) seviyelerine düşmüştür. Bu duruma TG süresinin artmasının sebep olduğu ve yanmayı olumsuz yönde etkileyerek FEV değerlerini düşürdüğü düşünülmektedir. Literatürde PB'nin FEV değerleri üzerine etkileri incelendiğinde benzer çalışmalara rastlanmaktadır [164, 165, 168].



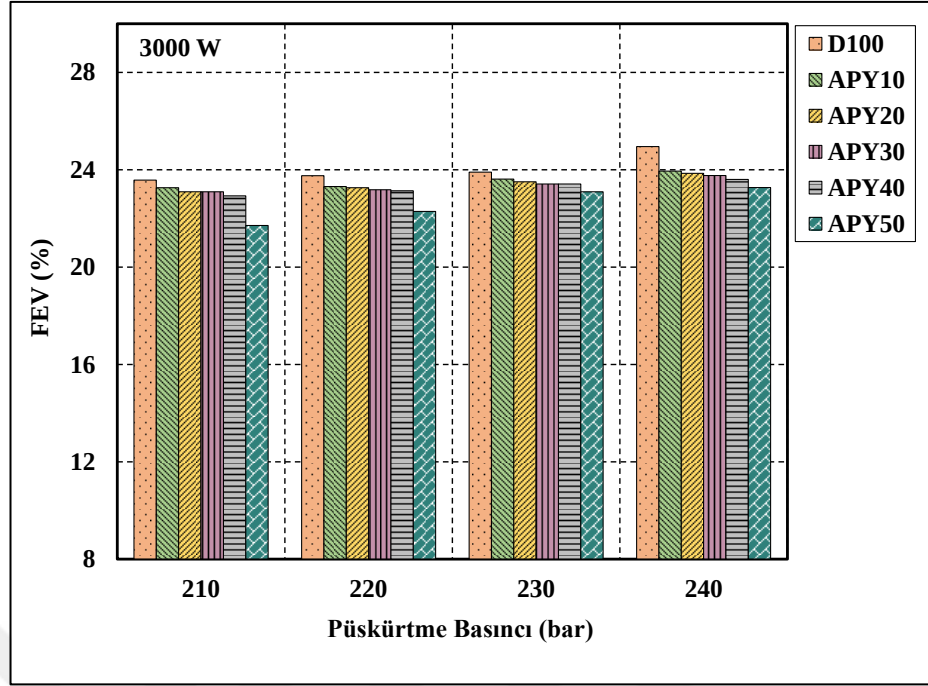
Şekil 7.7. PB değişiminin 750 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.



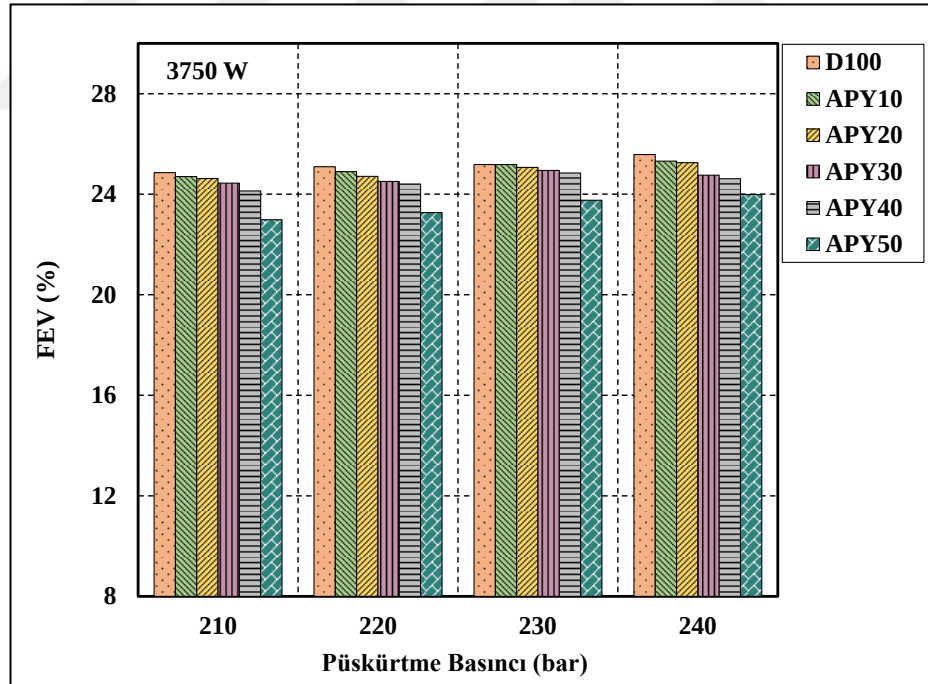
Şekil 7.8. PB değişiminin 1500 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.



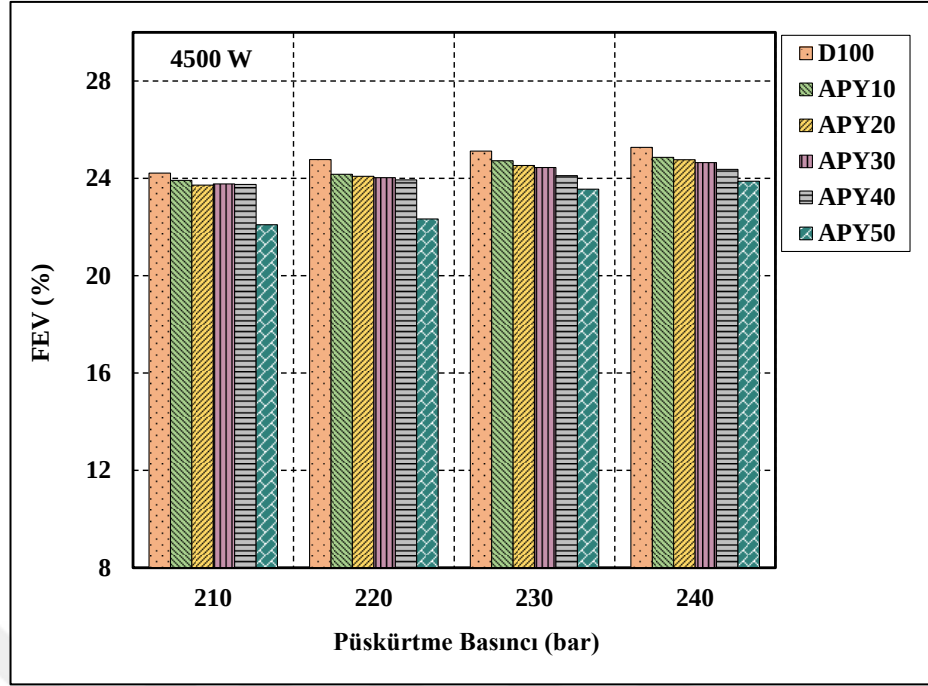
Şekil 7.9. PB değişiminin 2250 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.



Şekil 7.10. PB değişiminin 3000 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.



Şekil 7.11. PB değişiminin 3750 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.



Şekil 7.12. PB değişiminin 4500 W motor yükünde FEV üzerindeki etkisi.

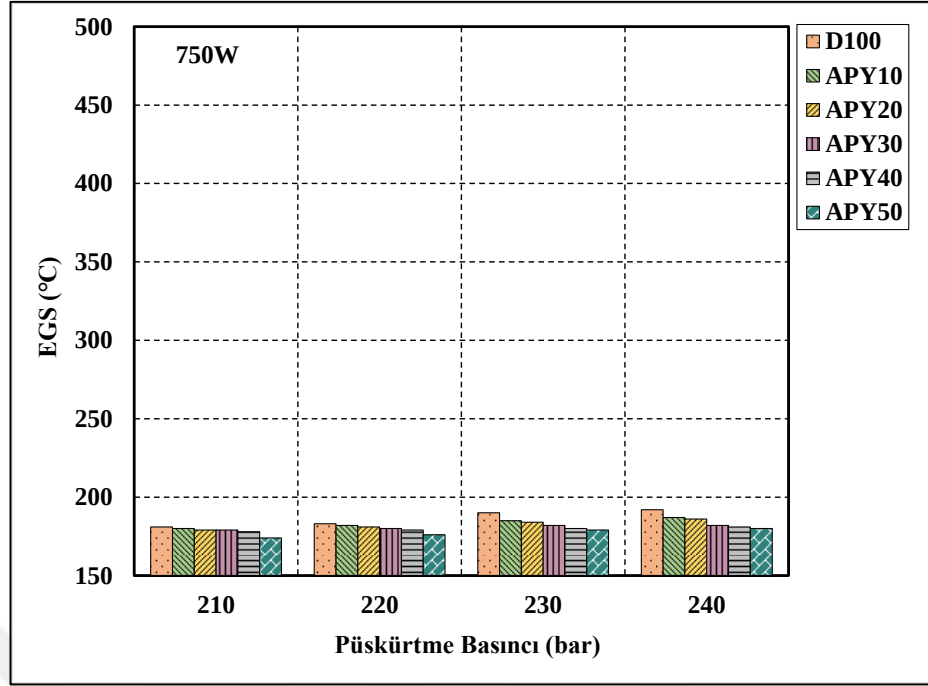
7.1.1.3. Egzoz Gaz Sıcaklığının (EGS) Motor Yükü ve Püskürtme Basıncına (PB) Bağlı Olarak Değişimi

EGS'nin her bir yakıt için motor yükü ve PB'ye bağlı olarak değişimleri Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Motor yükünün artmasıyla beraber EGS değerlerinin de arttığı görülmüştür. Örneğin, 220 bar PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 ve 4500 W yüklerdeki EGS değerleri sırasıyla; 190 °C, 225 °C, 258 °C, 305 °C, 359 °C ve 435 °C iken; aynı PB ve motor yüklerinde APY50 yakıtı için ise değerler sırasıyla 179 °C, 217 °C, 250 °C, 298 °C, 343 °C ve 425 °C olarak belirlenmiştir. Motor yükünün artmasıyla EGS'deki bu artışın nedeni silindire püskürtülen yakıt miktarının artmasıdır. Dizel motorlarda motor yükünün artması H/Y oranının azalmasına sebep olmaktadır. Böylelikle havanın soğutma etkisi azalmaktadır. Bu durum, EGS'nin artmasına neden olmaktadır.

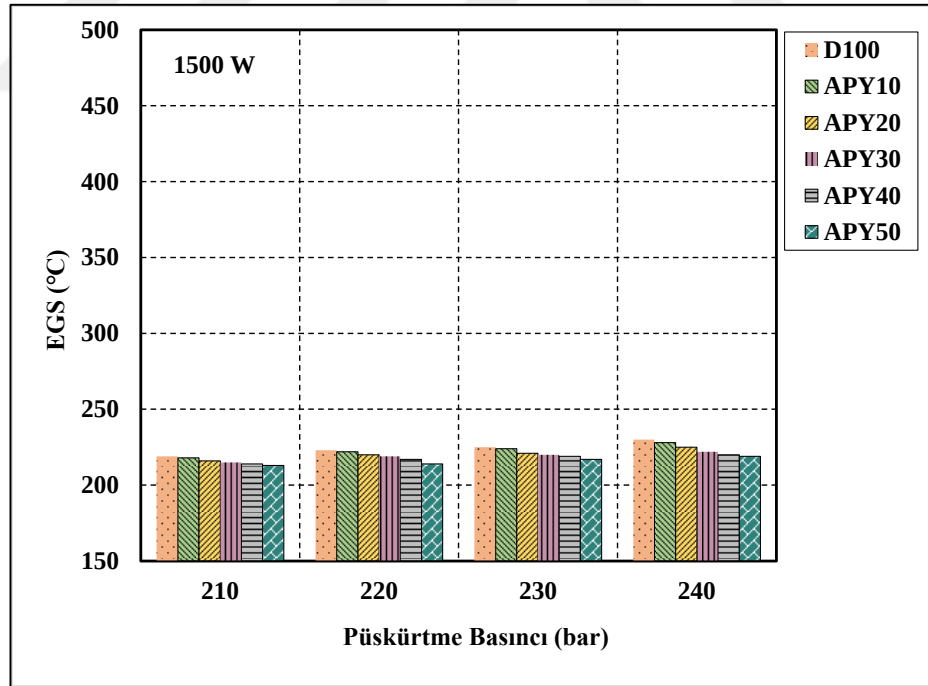
Yakıt içeriğindeki APY oranı arttıkça EGS değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Örneğin, 220 bar standart püskürtme basıncında 4500 W motor yükündeyken sırasıyla referans dizel yakıtı EGS değeri 435 °C iken APY10 karışımı için 434 °C, APY20 karışımı için

431 °C, APY30 karışımı için 429 °C, APY40 karışımı için 427 °C, APY50 karışımı için ise 425 °C olup referans dizel yakıtından yaklaşık %2,3 daha azdır. Bu durum APY'nin D100 yakıtına kıyasla daha düşük alt ısı değere sahip olması, daha uçucu olması ve düşük viskozitesinden kaynaklanmaktadır [169, 170]. Düşük viskozite yakıtın yanma odasına daha az nüfuz etmesine sebep olmakta ve daha az miktarda ısı oluşmasına sebep olmaktadır [171]. Literatür incelendiğinde yüksek uçuculuğa sahip APY buharlaşırken çevresinden ısı çekmekte ve soğutma etkisi yaparak EGS'nin düşmesine sebep olmaktadır [172]. Ayrıca APY karışım yakıtlarının alt ısı değerlerinin düşük olması ise silindir içi sıcaklık ve basınçlarda azalmaya neden olmakta ve APY'nin yanmanın genişleme periyoduna sarkmadan önemli bir bölümünün tamamlanması ile yanma sonu sıcaklıklarının D100 yakıtına göre daha düşük çıkmasına sebep olmaktadır. Elde edilen bulgular yapılan diğer çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [125, 139, 173].

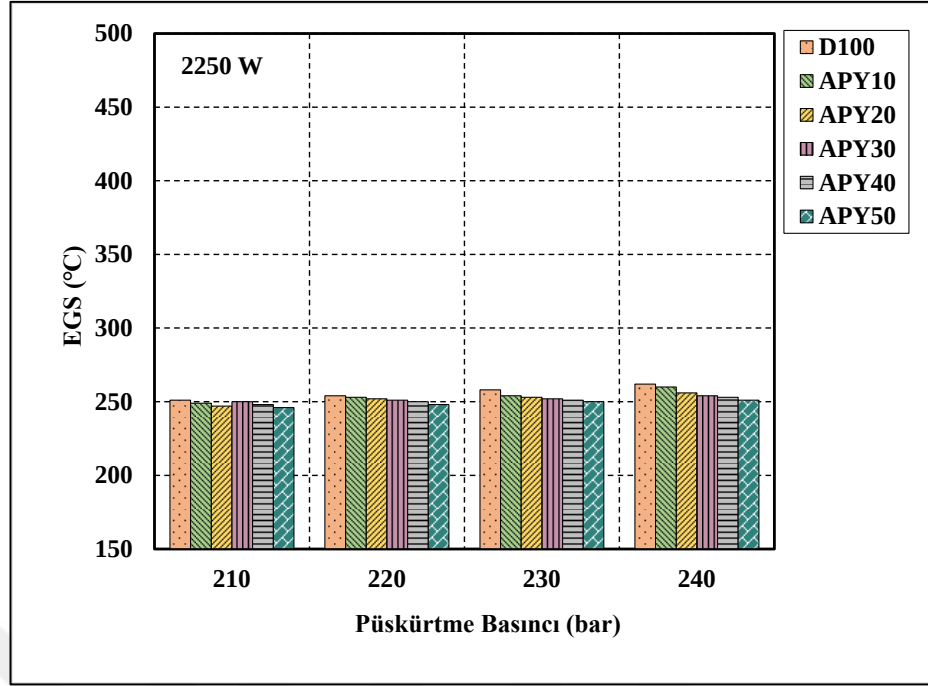
Şekiller incelendiğinde; motorun bütün yük koşullarında, PB'nin artmasıyla birlikte EGS değerleri de artmıştır. Deney sonuçlarına göre, 4500 W motor yükünde PB'nin standart 220 bar'da D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için EGS değerleri 434 °C, 431 °C, 428 °C, 426 °C, 425 °C ve 421 °C iken değerin 240 bara değiştirilmesiyle EGS değerleri sırasıyla 439 °C, 438 °C, 431 °C, 430 °C ve 428 °C seviyelerine çıkmıştır. Bu duruma PB'nin artırılması ile yakıtların buharlaşmasının ve atomizasyonunun kolaylaşmasıyla yanmanın iyileşmesinin ve dolaylı olarak yanma sonu sıcaklıklarının yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir. PB'nin azaltılması ile EGS değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, 4500 W motor yükünde PB'nin standart 220 bar'dan 210 bar'a değiştirilmesiyle ise D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için EGS değerleri 430 °C, 429 °C, 421 °C, 420 °C, 418 °C, 416 °C olarak ölçülmüştür. PB'nin azaltılması ile yakıt tanecik boyutları büyümekte, buharlaşma ve atomizasyonun kötüleştiği düşünülmektedir. Bununla birlikte ideal hava yakıt karışımı oluşumu zorlaşmakta ve yanma sonu sıcaklıkları düşmektedir. Literatürde EGS'nin PB'ye bağlı olarak değişimleri ile ilgili bulunan sonuçlar bazı çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [164, 165].



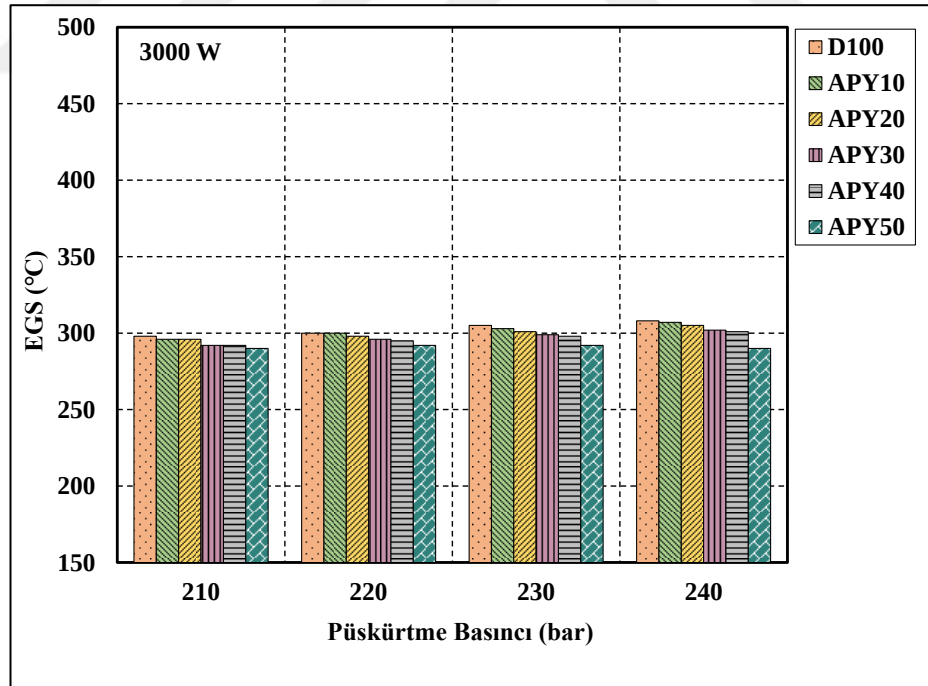
Şekil 7.13. PB değişiminin 750 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.



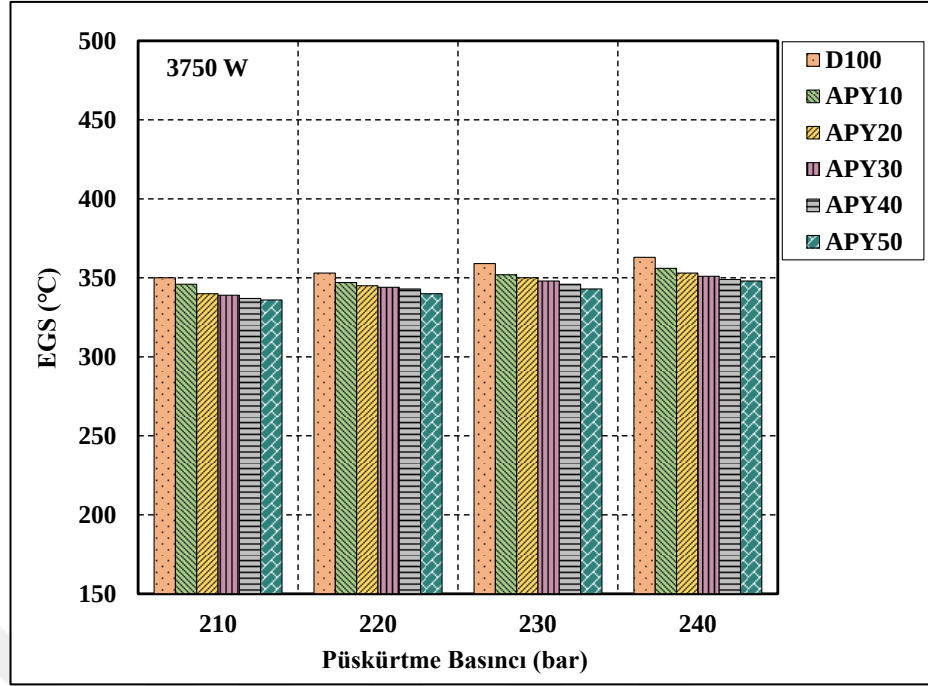
Şekil 7.14. PB değişiminin 1500 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.



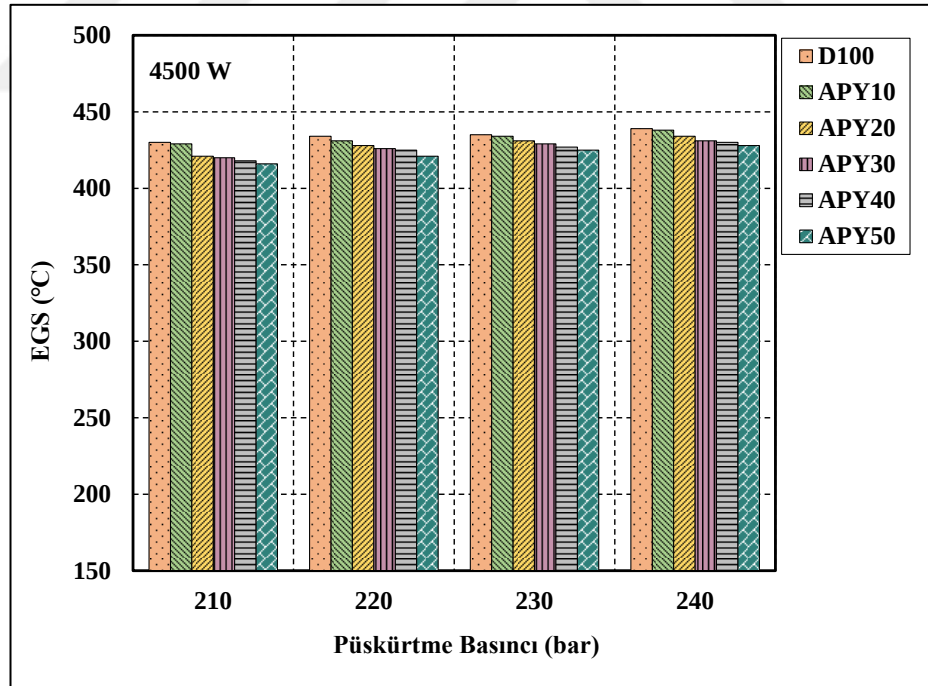
Şekil 7.15. PB değişiminin 2250 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.



Şekil 7.16. PB değişiminin 3000 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.



Şekil 7.17. PB değişiminin 3750 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi.



Şekil 7.18. PB değişiminin 4500 W motor yükünde EGS üzerindeki etkisi

7.1.2. Egzoz Emisyon Sonuçlarının Analizi

7.1.2.1. CO emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

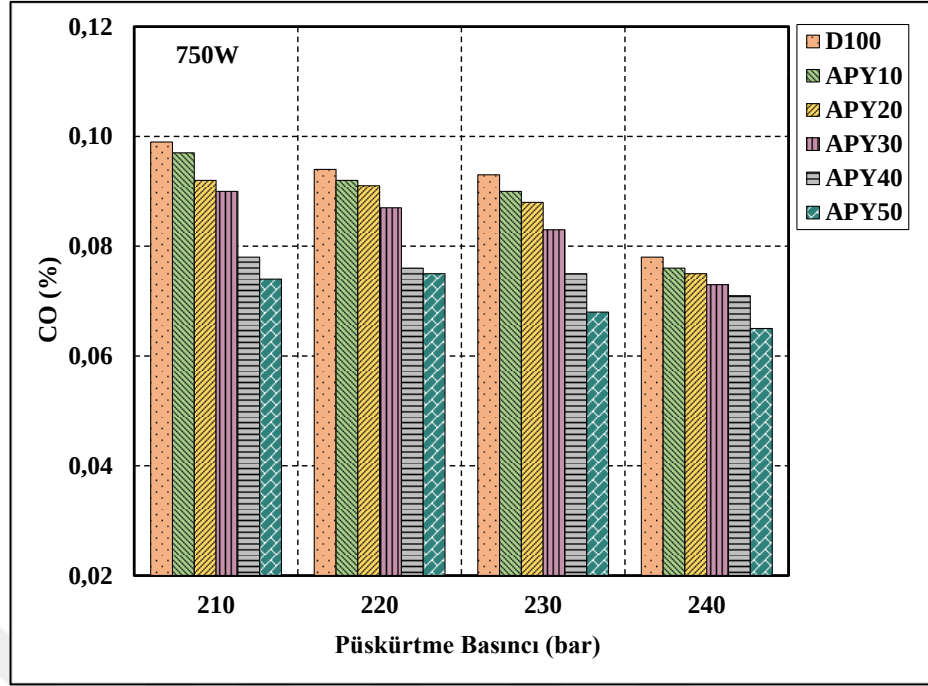
Dizel motorlarda yanma sonu ürünlerinin arasında CO bulunmasının ana sebebi oksijenin yetersiz olmasıdır. Hava fazlalık katsayısı (HFK), yanma odası içerisindeki türbülans ve yakıtın moleküler yapısı CO emisyonlarını etkileyen başlıca faktörlerdir. HFK'nın 1'den küçük olduğu havanın yetersiz olduğu durumlarda yanma, yetersiz oksijen içeriği sebebiyle tam olmayacak ve yakıt içerisindeki karbonun tümü CO₂'ye dönüşmeden CO olarak kalmaktadır. Eğer yanma tam ve etkili bir şekilde gerçekleşirse, CO ox'ye dönüşmektedir. Farklı motor yük durumlarında, PB'nin ve APY içeriğinin CO emisyonlarına etkileri Şekil 7.19, Şekil 7.20, Şekil 7.21, Şekil 7.22, Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'te gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde artan yüklerle birlikte CO emisyonlarının bütün yakıt karışımları için azaldığı, 4500 W yükte ise bir miktar arttığı görülmektedir. Örneğin, 220 bar PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 ve 4500 W yüklerdeki CO emisyonu değerleri sırasıyla %0,094, %0,066, %0,046, %0,026, %0,022 ve %0,032 olarak bulunmuştur. Düşük yüklerde H/Y oranı yüksek olmasına rağmen CO emisyonunun yüksek değerde olduğu görülmektedir. Fakir karışım bölgelerinde yanma odası civarında sönme bölgelerinin oluşması ve yanmamış HC'nin kısmi oksidasyonlarının gerçekleşmesi nedeniyle daha yüksek CO konsantrasyonları oluşmaktadır [176]. 4500 W yükte CO emisyonlarının artmasının nedeni bu yükte motora sürülen yakıt miktarının artmasıdır.

Dizel yakıtı içerisindeki APY oranı arttıkça dizel yakıtı kıyasla CO emisyonlarında azalma belirlenmiştir. 3000W'tan 3750W'a motor yükü arttırıldığında en düşük CO emisyon seviyesine ulaşılmıştır. Standart PB olan 220 bar PB ve 3750W yükte CO emisyonları sırasıyla, dizel yakıtı için %0.022, APY10 karışımı için %0.020 APY20 karışımı için %0.019, APY30 karışımı için %0.018, APY40 karışımı için %0.016, APY50 karışımı için ise %0.014 olarak ölçülmüştür. En düşük CO emisyonunun elde edildiği 3750 W motor yükünde APY oranının %0'dan %50'ye çıkarılmasıyla yaklaşık olarak %36'lık bir azalma meydana gelmiştir. Yakıt atomizasyonunu etkileyen en önemli parametrelerden biri de viskozitedir. Yüksek viskozitenin yakıt atomizasyonunu olumsuz etkilediği belirtilmektedir [174]. Dizel yakıtın viskozitesi

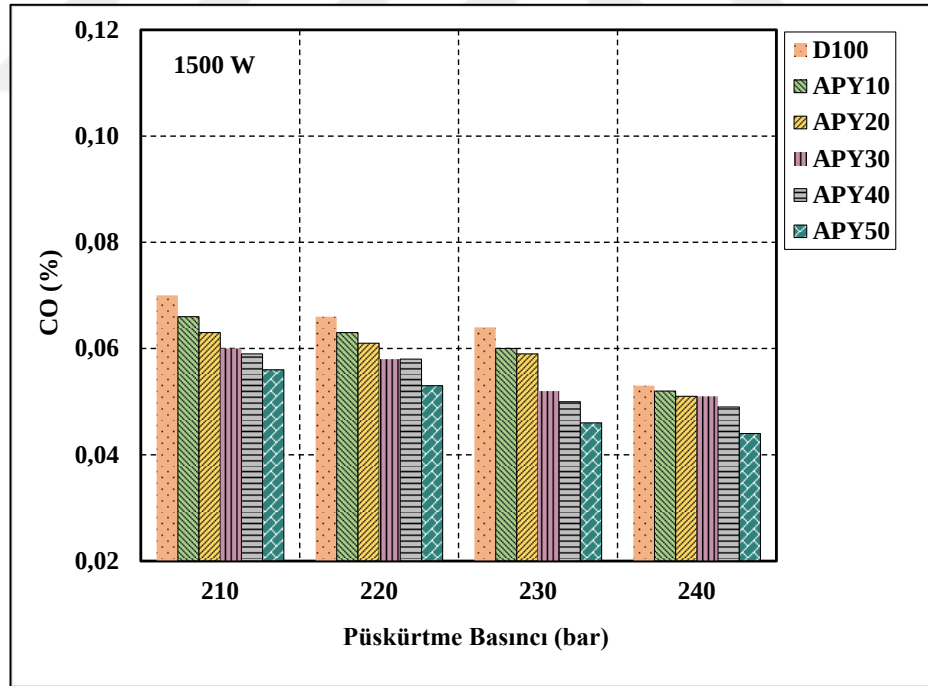
APY yakıtının viskozitesinden yüksektir. APY ve dizel karışımındaki APY miktarı arttıkça, daha yüksek uçuculuk ve daha düşük viskozite nedeniyle ve de yakıt atomizasyonu ve buharlaşmasının artması CO emisyonunun azalmasının nedeni olarak açıklanabilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, APY ile yapılan çalışmalarda CO emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik [127, 175–177] gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir [22, 27, 178].

PB'nin artmasıyla birlikte tüm yüklerde CO emisyon değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, 3750 W motor yükünde PB'nin standart 220 bar'da D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için CO emisyonu değerleri %0,022, %0,02, %0,019, %0,018, %0,016 ve %0,014 iken değerin 240 bara değiştirilmesiyle CO emisyonu değerleri sırasıyla %0,018, %0,016, %0,014, %0,012, %0,011 ve %0,1 olarak ölçülmüştür. Basıncın 210 bar değerine değiştirilmesiyle ise 220 bar PB'ye göre ortalama %11,9 oranında artış belirlenmiştir.

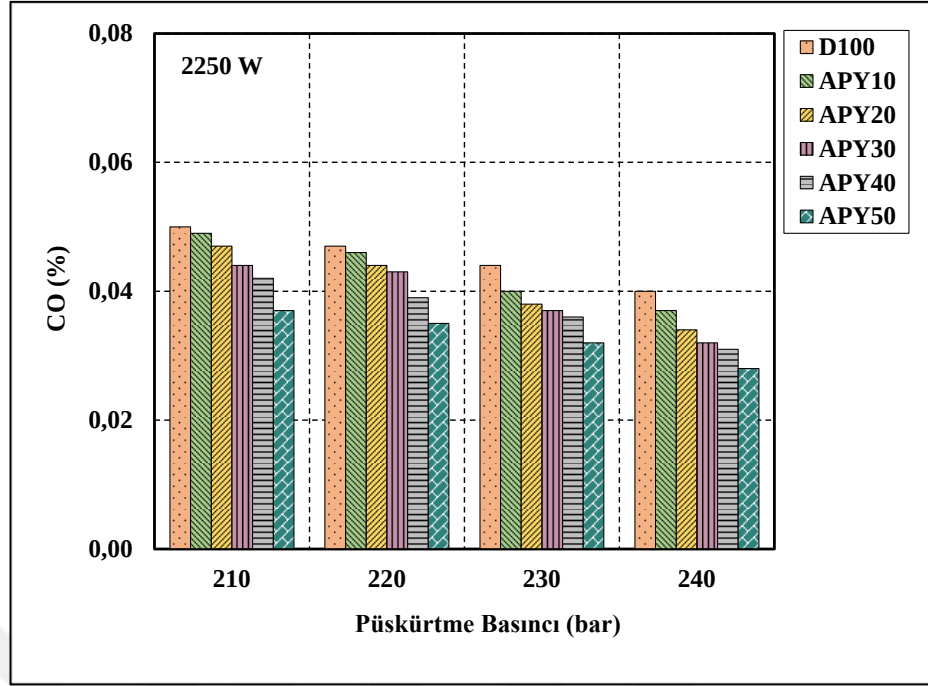
PB'nin standart değerin (220 bar) altına düşürülmesi ile tanecik çapının büyümesi sonucu TG periyodu uzamakta ve yanma kötüleşmektedir. PB'nin artmasıyla ise karışım teşkili iyileşmekte silindir içi sıcaklıkların artmasıyla birlikte CO emisyonları oksidasyonları gelişmektedir. Çalışmada elde edilen bulgular literatürdeki birçok çalışmayla benzer sonuçlar vermiştir [41, 125, 177].



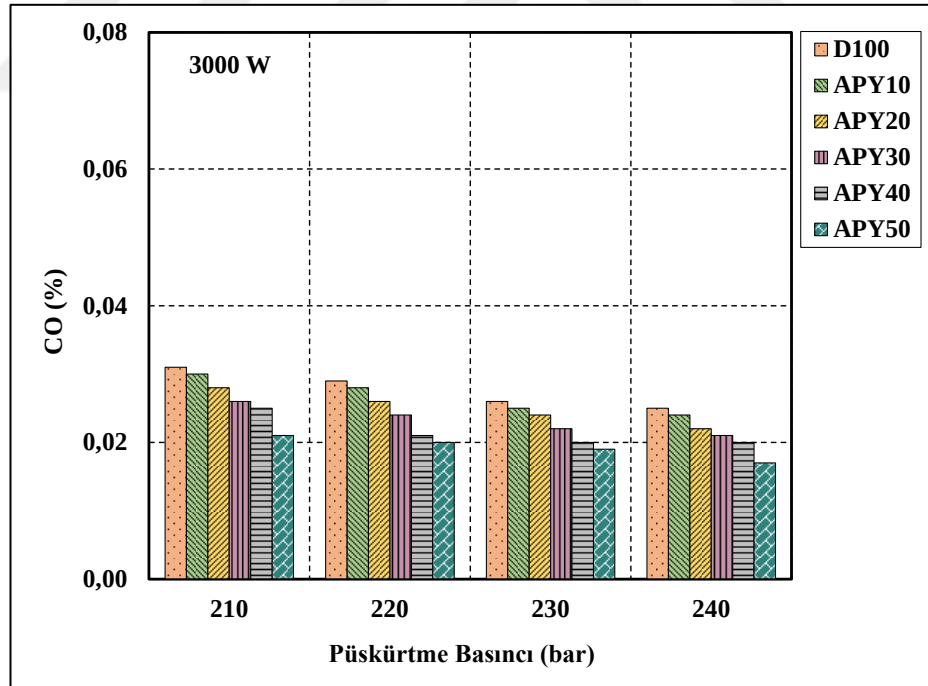
Şekil 7.19. PB değişiminin 750 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.



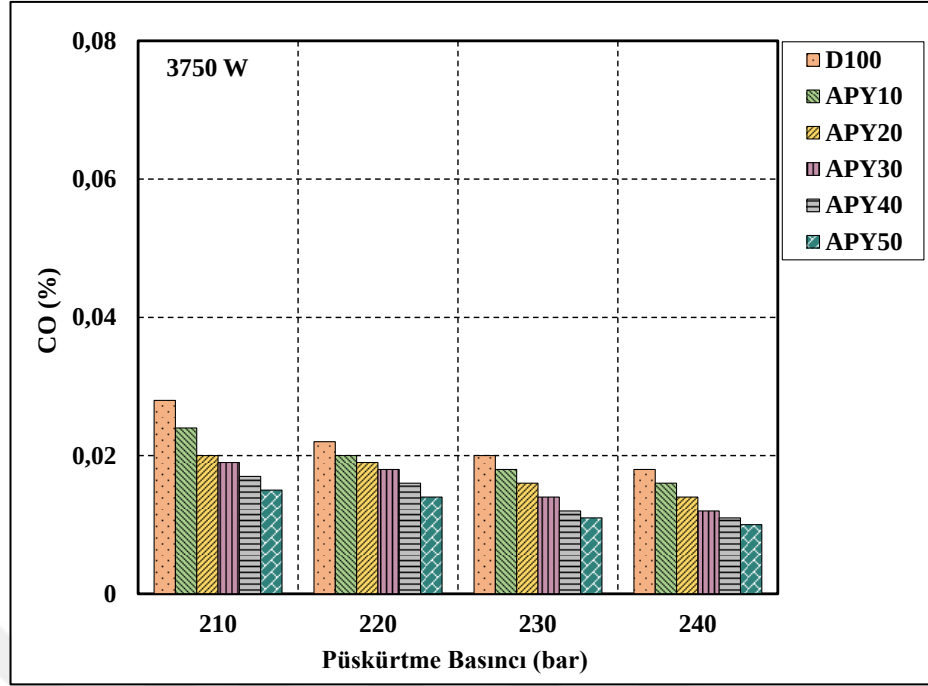
Şekil 7.20. PB değişiminin 1500 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.



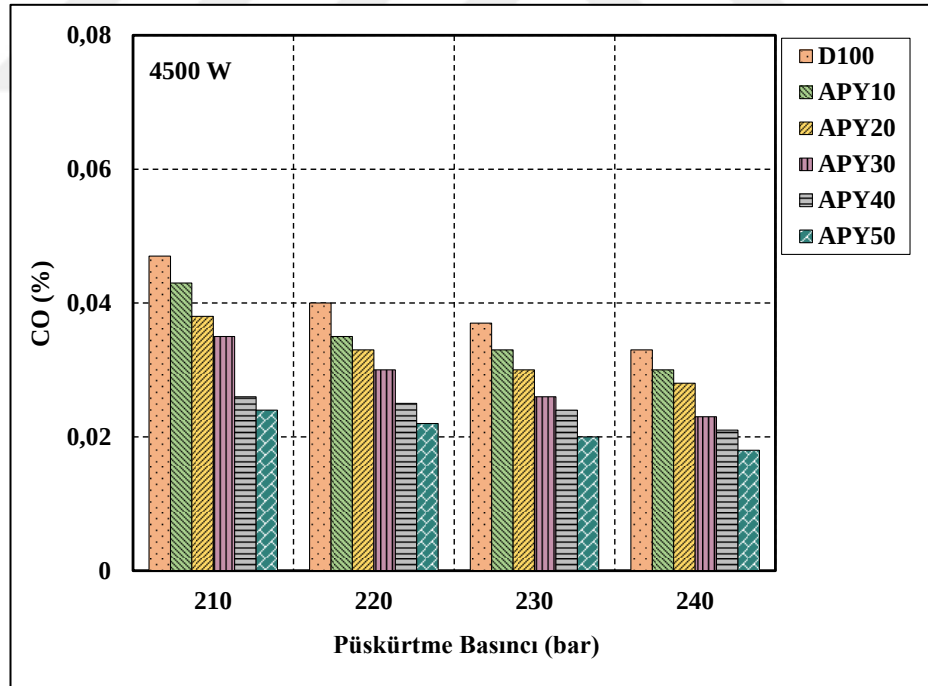
Şekil 7.21. PB değişiminin 2250 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.



Şekil 7.22. PB değişiminin 3000 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.



Şekil 7.23. PB değişiminin 3750 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.



Şekil 7.24. PB değişiminin 4500 W motor yükünde CO üzerindeki etkisi.

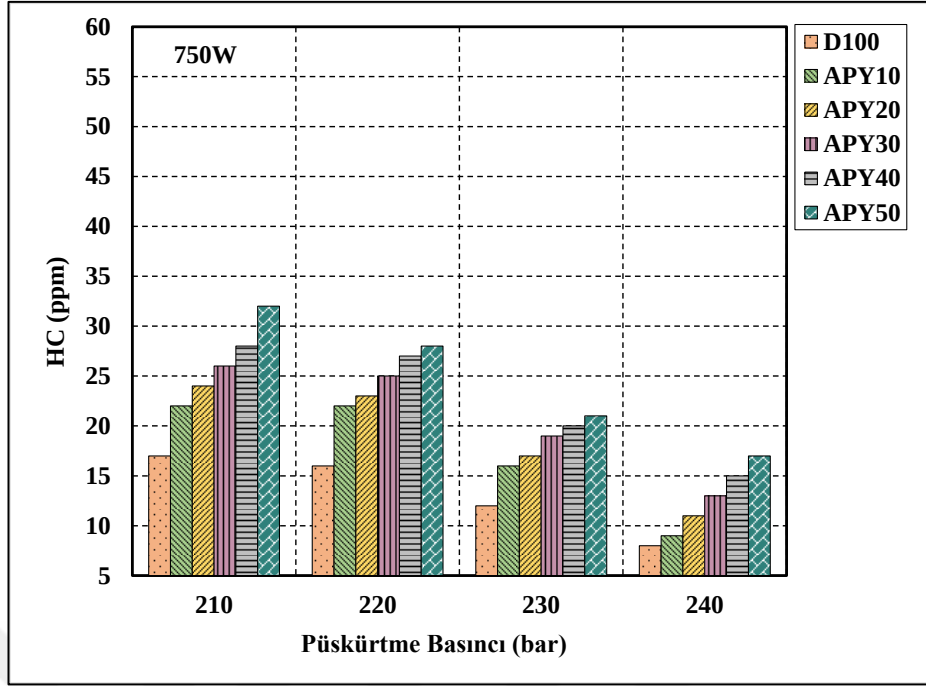
7.1.2.2. HC emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

Dizel motorlarda HC emisyonlarının en temel sebebi yakıtın tutuşma sıcaklığına ulaşamaması ve yetersiz oksijen sebebiyle yanmanın tamamlanamamasıdır. Yanma sırasında silindir cidarlarına yakın bölgelerde yanmanın gerçekleşmediği, alev sönme bölgesi olarak isimlendirilen bu bölgelerde HC'lerin yanma gerçekleşmeden egzoz kanalına girmesi HC emisyonlarının en temel sebeplerindendir. Farklı motor yük durumlarında, PB'nin ve APY içeriğinin HC emisyonlarına etkileri Şekil 7.25, Şekil 7.26, Şekil 7.27, Şekil 7.28, Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'te gösterilmiştir. Motor yükünün artmasıyla birlikte tüm test yakıtları için HC emisyonları artmıştır. Örneğin, 220 bar PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 ve 4500 W yüklerdeki HC emisyonu değerleri sırasıyla 16 ppm, 17 ppm, 19 ppm, 20 ppm, 21 ppm ve 29 ppm bulunmuştur. Motor yükünün artmasıyla HC emisyonlarının artması silindir içerisine gönderilen yakıtın artmasıyla ilgilidir [33,179]. Bu sebeple yakıt/hava oranı artarak zengin karışım bölgelerini oluşturmuş, püskürtülen yakıtın silindir cidarlarına kadar ilerlemesine sebep olarak yakıt hüzmesi çekirdeğindeki yakıt konsantrasyonunu daha da arttırmıştır. Dizel yakıtı kıyasla HC emisyonlarının motor yükü arttıkça artmasının bir diğer sebebi de silindir cidarlarında yakıtın birikmesi olduğu düşünülmektedir [180]. Deneysel çalışma neticesinde elde edilen bu durum literatürdeki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [181, 182].

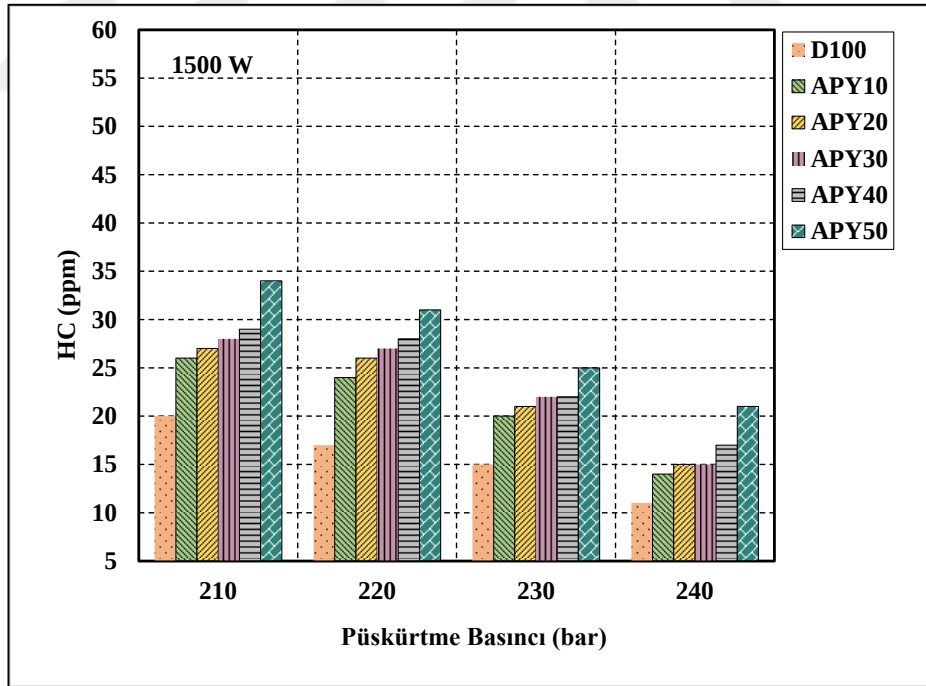
Karışımındaki APY oranının artmasının HC emisyonları üzerinde olumsuz etkileri görülmüştür. Standart PB olan 220 bar PB'de en yüksek HC emisyonu değerleri, 4500W motor yükünde elde edilmiştir. Aynı PB ve motor yükünde HC emisyonları sırasıyla, dizel yakıtı için 29 ppm, APY10 karışımı için 32 ppm, APY20 karışımı için 39 ppm, APY30 karışımı için 41 ppm, APY40 karışımı için 46 ppm, APY50 karışımı için ise 54 ppm olarak belirlenmiştir. APY ve dizel yakıtı karışımları için hidrokarbon konsantrasyonunun saf dizel yakıttan daha yüksek olmasının nedeni, APY'de yanma sırasında kırılmayan doymamış hidrokarbonlardır [183]. Ayrıca APY ve dizel karışımlarının dizel yakıtı kıyasla daha düşük viskozitesi nedeniyle enjektör memesinden yakıt sızıntısı [184] ve yanma odasına homojen şekilde dağılmayan yakıt enjeksiyonunun [24] HC emisyonlarının artmasının sebebi olduğu düşünülmektedir. Yine daha uçucu olan APY yakıt karışımlarının TG periyodu süresince yanma

odasından daha fazla ısı çekmelerinden dolayı yanma odasında soğuma etkisi oluşturarak HC emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Elde edilen bulgular literatürdeki bazı çalışmalar ile paralel sonuçlar vermiştir [166,185].

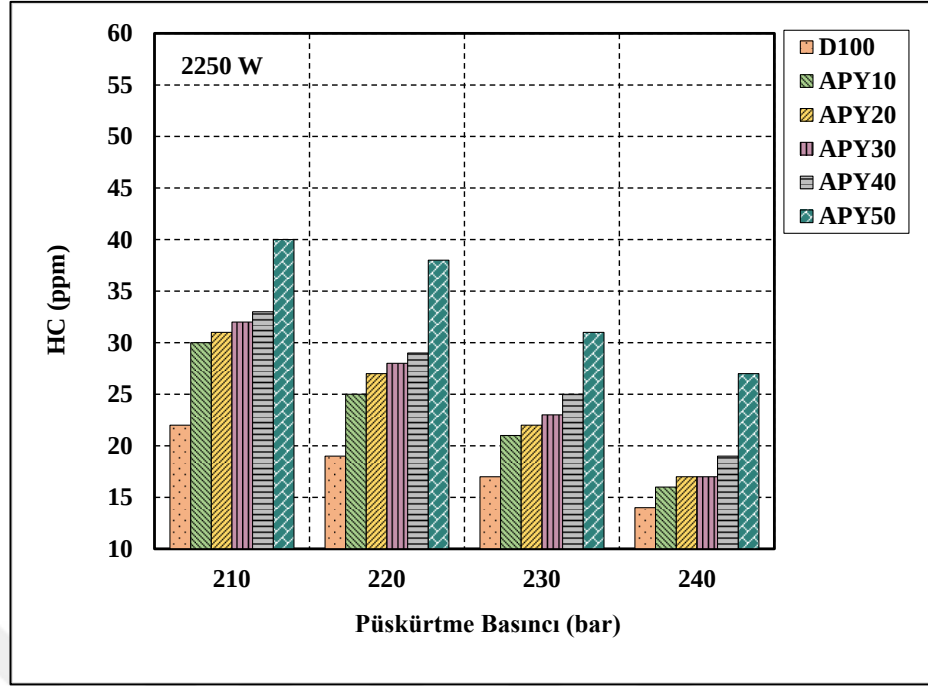
Deney sonuçlarına göre PB'nin artırılmasının HC emisyonunu düşürdüğü tespit edilmiştir. 4500 W motor yükünde PB'nin standart 220 bar'da D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için HC emisyonu değerleri sırasıyla 29 ppm, 32 ppm, 39 ppm, 41 ppm, 46 ppm ve 54 ppm iken; değerin 240 bara değiştirilmesiyle HC emisyonu değerleri sırasıyla 19 ppm, 24 ppm, 27 ppm, 31 ppm, 36 ppm ve 41 ppm olarak ölçülmüştür. Basıncın 210 bar değerine değiştirilmesiyle ise 220 bar PB'ye göre ortalama %5,2 oranında artış belirlenmiştir. CO emisyonlarına benzer olarak PB arttıkça, daha üniform tanecikler oluşmakta, ortalama damlacık çapı küçülmekte ve enjektör çıkış hızı artmaktadır. Bu durumdan dolayı yakıt daha kolay buharlaşmakta ve HC emisyonlarında azalma olmaktadır. PB'nin azaltılması, tanecik çapının artmasına sebep olarak atalet kuvvetlerini arttırmaktadır. Ataletlerinin artmasıyla yakıt tanecikleri silindir cidarlarına ve segman boşluklarına daha rahat ulaşabilmektedir. Alev sönme bölgelerinin bu kısımlarda olmasından dolayı bu bölgelerde HC konsantrasyonu artmaktadır. Sonuç olarak PB'nin azalması ile HC emisyonları artmakta ve yanma verimini düşürmektedir. Elde edilen bulgular literatür incelendiğinde bazı çalışmalarla benzer sonuçlar vermektedir [186].



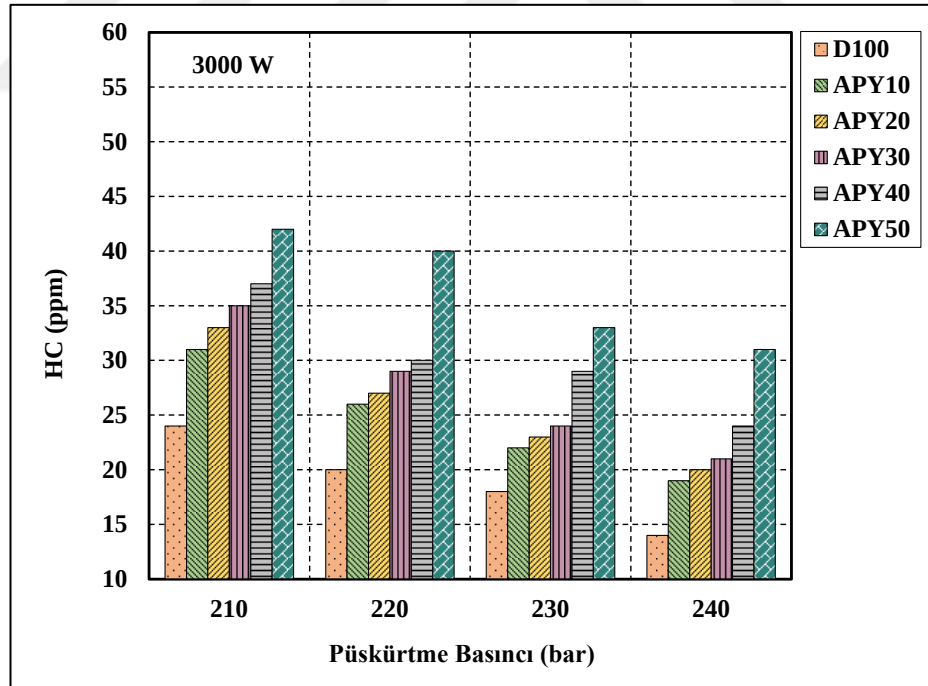
Şekil 7.25. PB değişiminin 750 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.



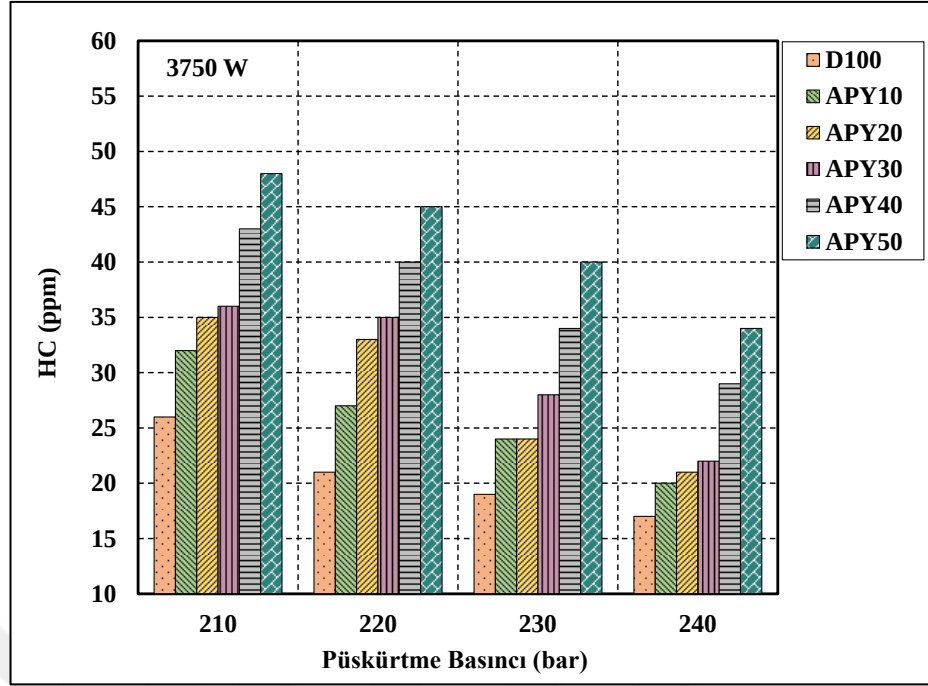
Şekil 7.26. PB değişiminin 1500 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.



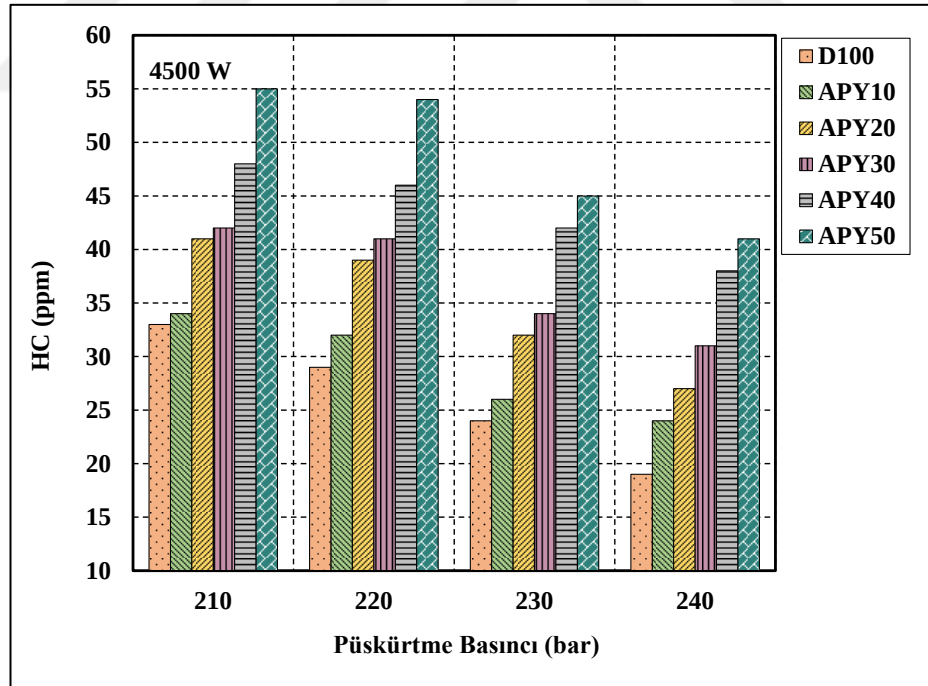
Şekil 7.27. PB değişiminin 2250 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.



Şekil 7.28. PB değişiminin 3000 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.



Şekil 7.29. PB değişiminin 3750 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.



Şekil 7.30. PB değişiminin 4500 W motor yükünde HC üzerindeki etkisi.

7.1.2.3. NO_x emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

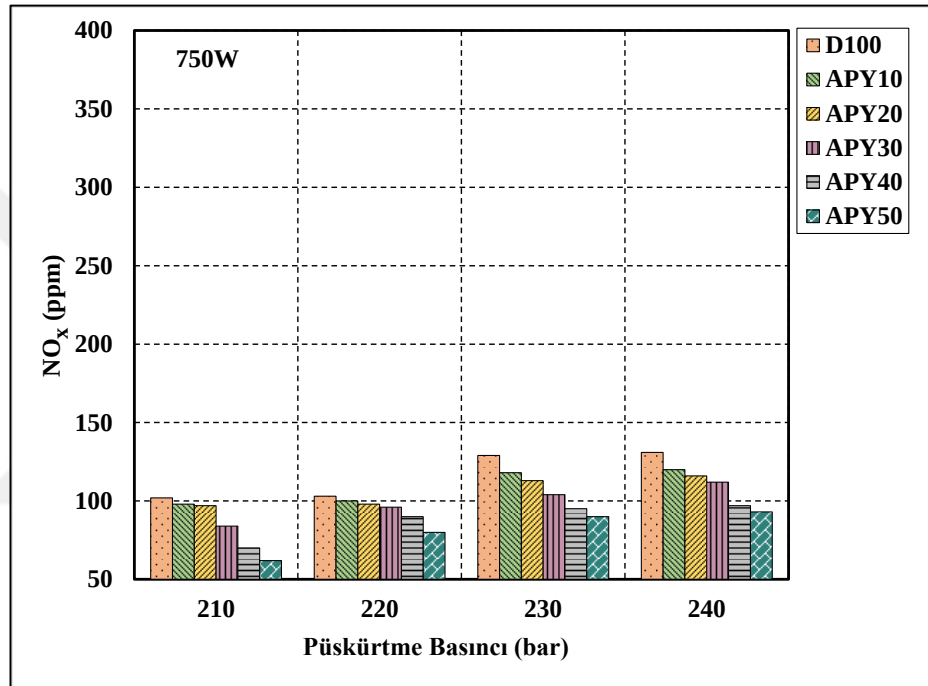
NO_x emisyonu havadaki azotun yüksek sıcaklıklarda oksijen molekülleriyle reaksiyona girmesiyle oluşmaktadır. Bu emisyonların azaltılabilmesi için öncelikle silindir içi sıcaklıklarının azaltılması gereklidir. Farklı motor yük durumlarında, PB'nin ve APY içeriğinin NO_x emisyonlarına etkileri Şekil 7.31, Şekil 7.32, Şekil 7.33, Şekil 7.34, Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'da gösterilmiştir.

Motor yükündeki artış ile bütün test yakıtları için NO_x emisyonunda artış belirlenmiştir. Örneğin, 220 bar PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 ve 4500 W yüklerdeki NO_x emisyonu değerleri sırasıyla 103 ppm, 195 ppm, 330 ppm, 513 ppm, 645 ppm ve 833 ppm bulunmuştur. Motor yükü arttığında, silindirlere gönderilen yakıt miktarı ve buna bağlı olarak yakıt/hava oranı da artmaktadır. Bu artan yakıt/hava oranı, yanma odasında daha fazla ısı üretimine yol açmakta ve bunun sonucunda silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri artarak NO_x emisyonlarını artırmaktadır.

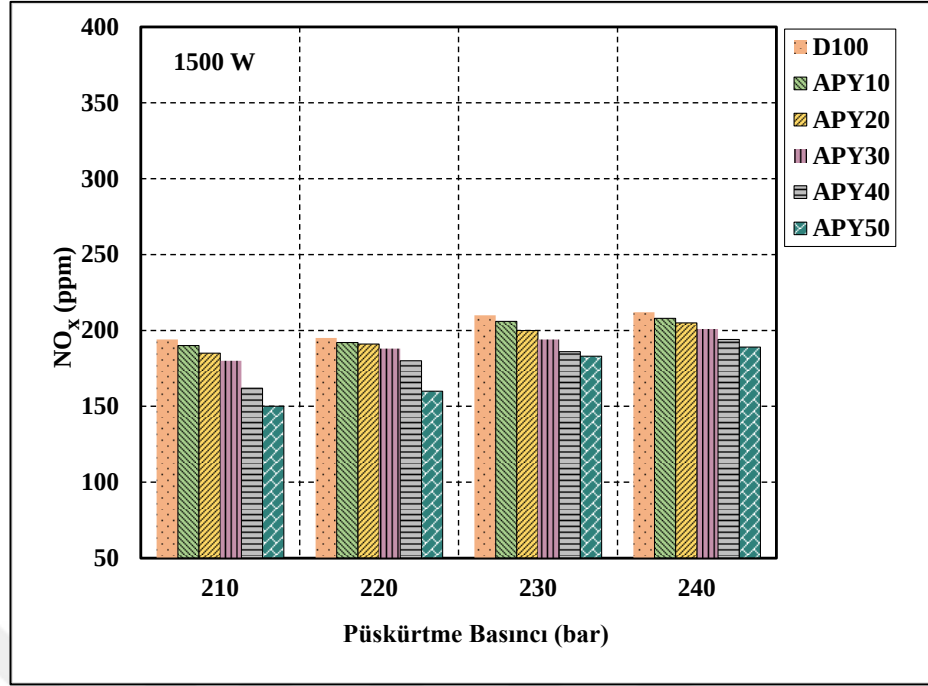
Dizel yakıtına eklenen APY oranı arttıkça NO_x emisyonunun da azaldığı görülmüştür. Standart PB olan 220 bar basınçta en yüksek NO_x emisyonu değerleri, 4500W motor yükünde elde edilmiştir. 4500W motor yükünde NO_x emisyonları sırasıyla, D100 için 833 ppm, APY10 karışımı için 817 ppm, APY20 karışımı için 809 ppm, APY30 karışımı için 808 ppm, APY40 karışımı için 716 ppm, APY50 karışımı için ise 703 ppm olarak belirlenmiştir. 4500 W motor yükünde APY oranının %0'dan %50'ye çıkarılmasıyla %15,6'lık bir azalma meydana gelmiştir. APY'nin ısıl değerinin düşük olması silindir içi sıcaklık ve basıncın düşmesine yol açmakta ve bu durumun APY ve karışımlarının daha az NO_x emisyonu oluşturmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar APY ile yapılan farklı çalışmalarda da belirtilmiştir [126, 166, 187, 188].

Deney sonuçlarına göre PB artışının NO_x emisyonunu artırdığı gözlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 4500 W motor yükünde PB'nin standart 220 bar'da D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için NO_x emisyonu değerleri sırasıyla 833 ppm, 817 ppm, 809 ppm, 808 ppm, 716 ppm ve 703 ppm iken değerin

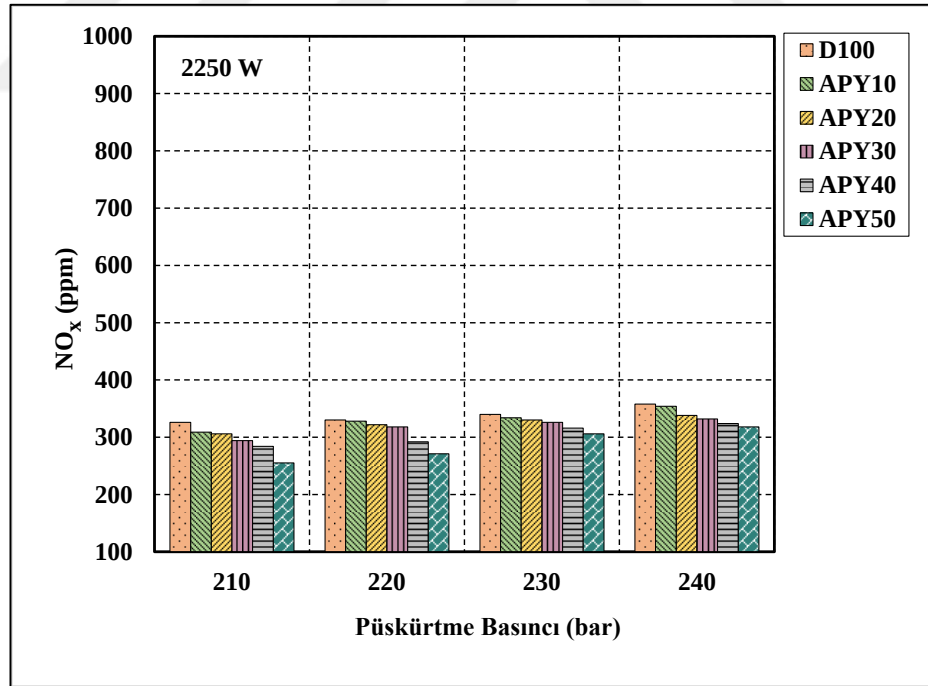
240 bara değiştirilmesiyle NO_x emisyonu değerleri sırasıyla 849 ppm, 842 ppm, 828 ppm, 815 ppm, 811 ppm ve 794 ppm olarak ölçölmüştür. Basıncın 210 bar değerine değiştirilmesiyle 220 bar PB'ye göre ortalama %4,1 oranında düşüş meydana gelmiştir. Sonuç olarak PB'nin artmasıyla karışım oluşumu ve yanma reaksiyonları iyileşerek silindir içi sıcaklıklarının yükselmesine sebep olmakta ve NO_x emisyonlarını arttırmaktadır. Literatürde farklı APY karışımları ile yapılan çalışmalarda benzer sonuçlara rastlanmaktadır [41, 187].



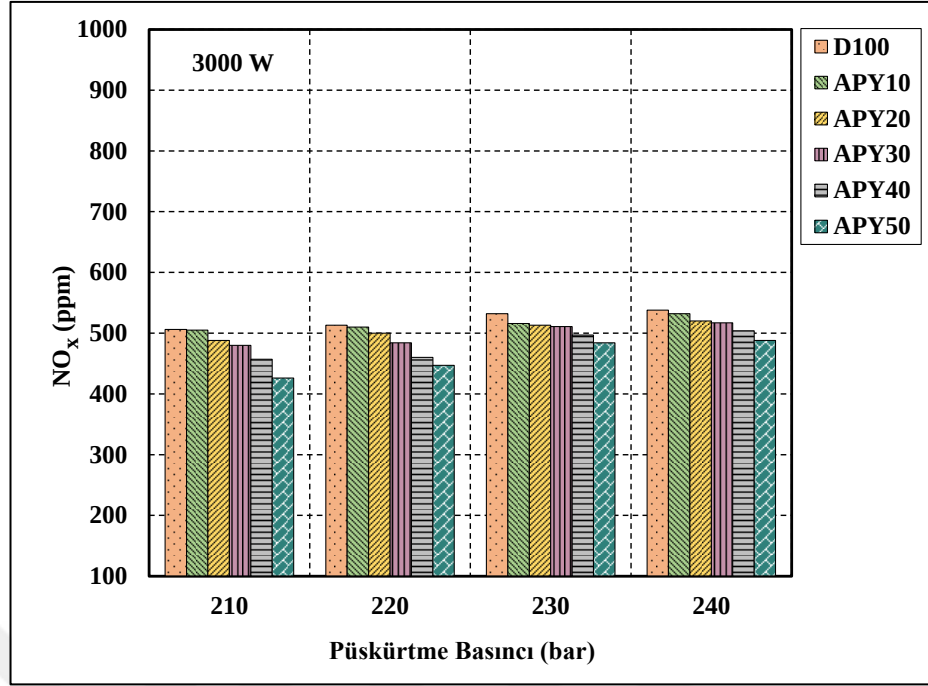
Şekil 7.31. PB değişiminin 750 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi.



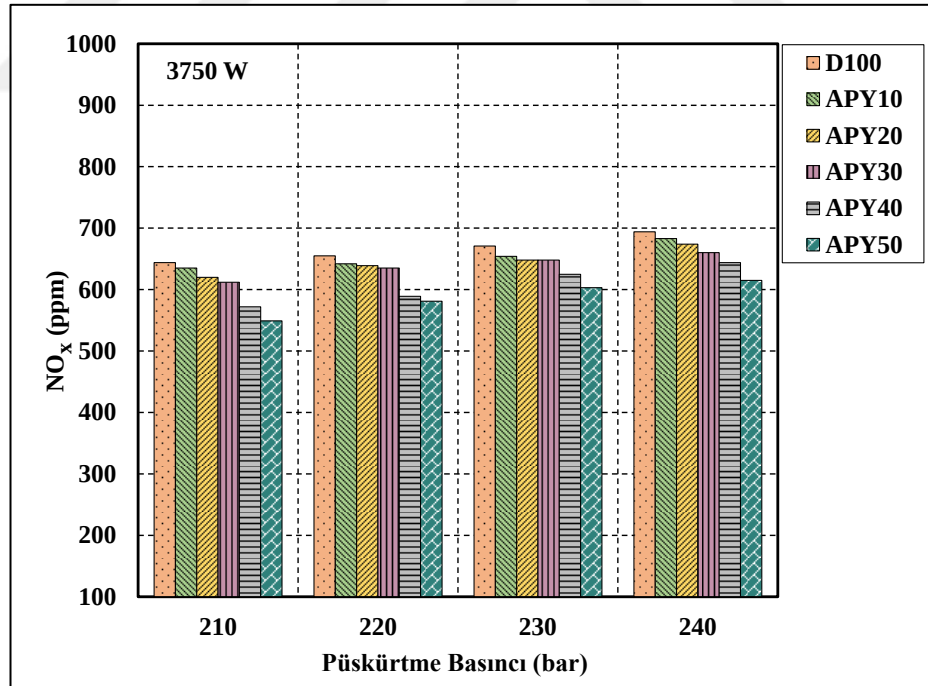
Şekil 7.32. PB değişiminin 1500 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi.



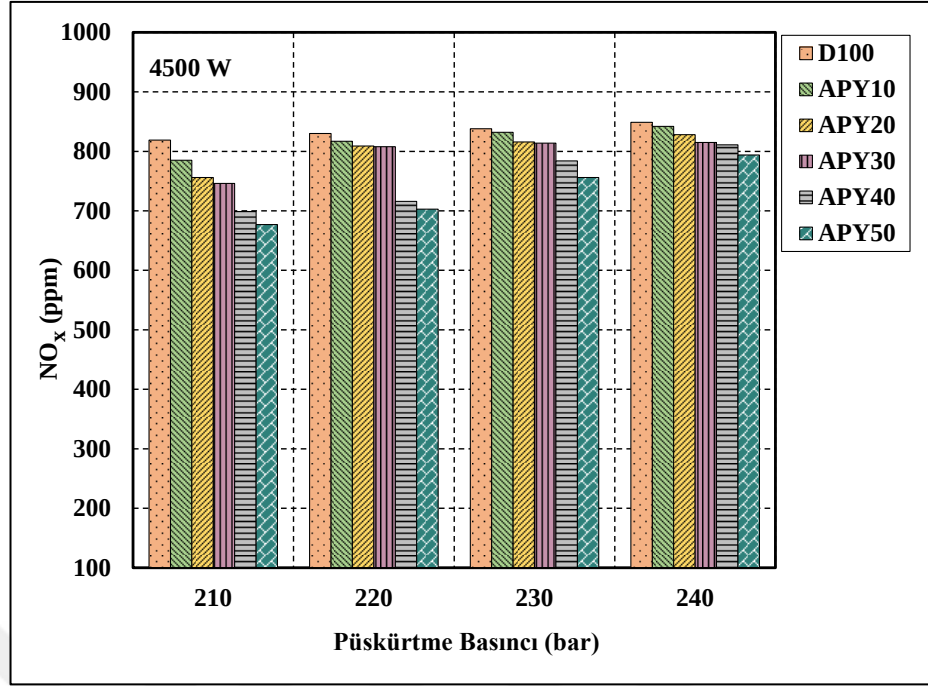
Şekil 7.33. PB değişiminin 2250 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi.



Şekil 7.34. PB değişiminin 3000 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi.



Şekil 7.35. PB değişiminin 3750 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi.



Şekil 7.36. PB değişiminin 4500 W motor yükünde NO_x üzerindeki etkisi

7.1.2.3. İS emisyonlarının püskürtme basıncına göre değişimi

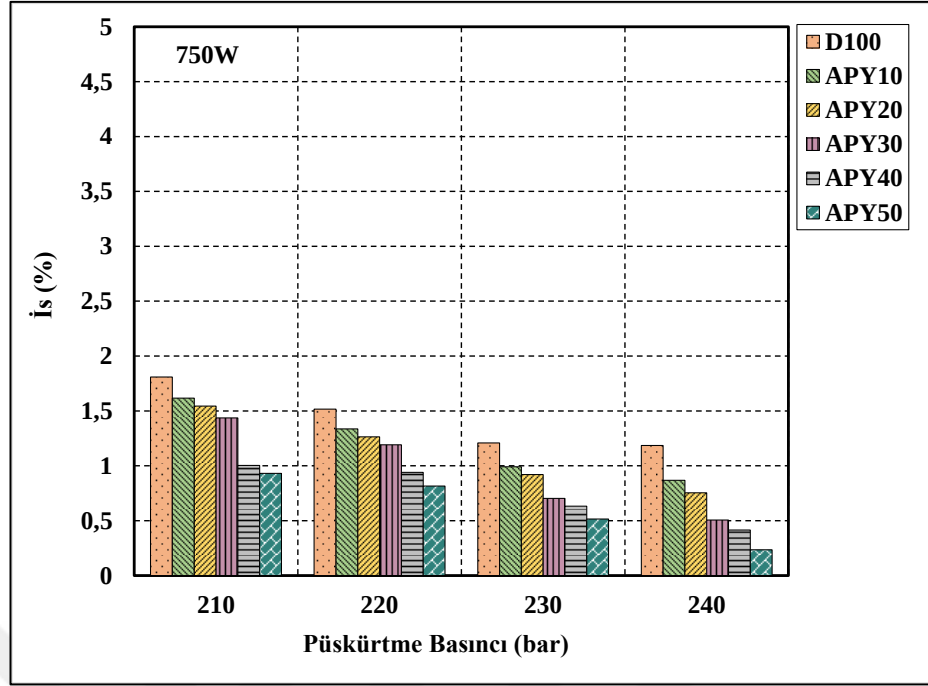
Dizel motorlarda is, eksik yanmanın bir göstergesidir ve aşırı zengin hava/yakıt oranının veya kısmen buharlaşabilmiş yakıt taneciklerinin bir sonucudur [189]. İS oluşumu özellikle yanma odası içerisindeki oksijen miktarına, zamana ve sıcaklıklara bağlıdır. İS partikülleri yanma odasında yeterli zaman, oksijen ve sıcaklık bulamadıklarında artmaktadır. Farklı motor yük durumlarında, PB'nin ve APY içeriğinin is emisyonlarına etkileri Şekil 7.37, Şekil 7.38, Şekil 7.39, Şekil 7.40, Şekil 7.41 ve Şekil 7.42'de gösterilmiştir.

Motor yükündeki artış ile bütün test yakıtları için is emisyonunda artış belirlenmiştir. Örneğin, 220 bar PB'de D100 yakıtının 750, 1500, 2250, 3000, 3750 ve 4500 W yüklerdeki is emisyonu değerleri sırasıyla %1,51, %1,66, %2,02, %2,12, %2,56 ve %6,73 bulunmuştur. Yük artışı ile silindirlere püskürtülen yakıt miktarı artmakta ve yakıtça zengin bölgelerdeki sıcaklıklar artmakta ve yanma odasında difüzyonlu yanma periyodu boyunca tepkimeye girecek oksijen miktarı azalmaktadır. Bu durum difüzyonlu yanma periyodunu uzatır ve artan difüzyonlu yanma periyodu ise is

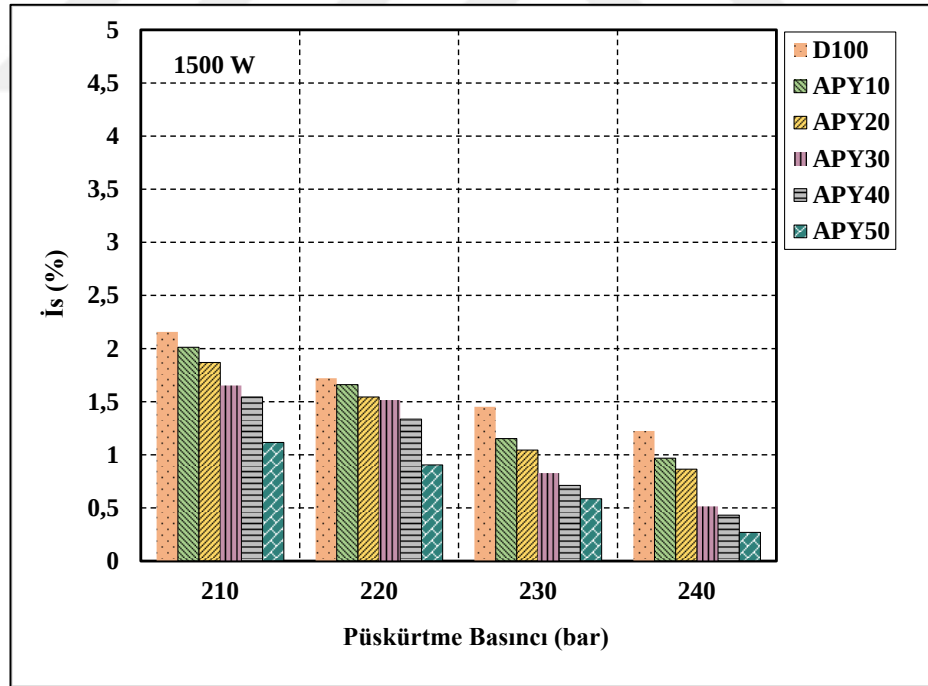
oluşumunu arttırmaktadır [190]. Ayrıca silindire püskürtülen yakıt miktarının artmasıyla, yakıt hava ile karışacak vakit bulamamakta ve is emisyonları artmaktadır.

Test yakıtları içerisindeki APY içeriğinin artırılması bütün motor yüklerinde is emisyonlarını azaltmıştır. Bu durum yakıt karışımlarının düşük viskozitesi ve yüksek uçuculuğu ile açıklanabilir [191]. Bununla birlikte, is emisyonlarının azalmasındaki diğer bir etken APY yakıtlarının setan sayısının düşük olmasıdır. Düşük setan sayılı yakıtlar genellikle difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısaltırlar ve daha düşük miktarda is emisyonu üretirler [192,193]. Ayrıca düşük ve orta motor yüklerinin is emisyonuna etkisi göz ardı edilebilir seviyedeysen yüksek motor yüklerinde is emisyonlarının arttığı tespit edilmiştir. Standart PB olan 220 bar PB’de en yüksek is emisyonu değerleri, 4500W motor yükünde elde edilmiştir. 4500W motor yükünde is emisyonları sırasıyla, dizel yakıtı için % 6.73 APY10 karışımı için %6.44, APY20 karışımı için %6.16, APY30 karışımı için % 5.87, APY40 karışımı için %5.19, APY50 karışımı için ise % 4.8 olarak belirlenmiştir. Benzer sonuçlar APY ile yapılan farklı çalışmalarda da belirtilmiştir [194].

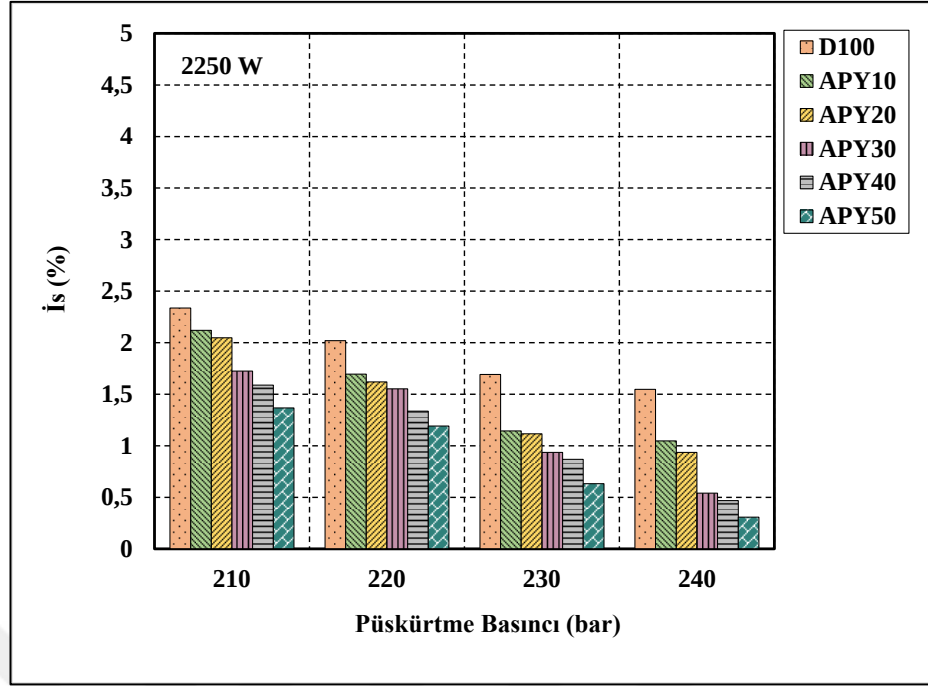
Elde edilen bulgulara göre, PB’nin artmasıyla birlikte is emisyonlarının da azaldığı gözlenmiştir. 4500 W motor yükünde PB’nin standart 220 bar’da D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtları için is emisyonu değerleri sırasıyla %6.73, %6.44, %6.16, %5.87, %5.19, %4.8 iken değerin 240 bara değiştirilmesiyle is emisyonu değerleri sırasıyla %5,9, %5,22, %4,39, %3,16, %2,98 ve %2,66 olarak ölçülmüştür. Basıncın 210 bar değerine değiştirilmesiyle ise 220 bar PB’ye göre ortalama %8,7 oranında artış meydana gelmiştir. Sonuç olarak test yakıtlarının PB’sinin artırılması, is emisyonlarının azaltılmasında olumlu bir etki göstermiştir. PB’deki artış iyileşen atomizasyon ve karışım oluşumu sayesinde yanmayı geliştirerek is emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır. PB’nin azalmasıyla ise damlacık çapı artmakta ve yakıtın buharlaşma süresi uzamaktadır. Karbon tanecikleri yanmayı tamamlayabilmek için yeterli süreyi bulamadığından, is oluşumu hızlanmaktadır. Benzer sonuçlar APY ile yapılan farklı çalışmalarda da belirtilmiştir. Literatürde farklı APY karışımları ile yapılan çalışmalarda benzer sonuçlara rastlanmaktadır [41].



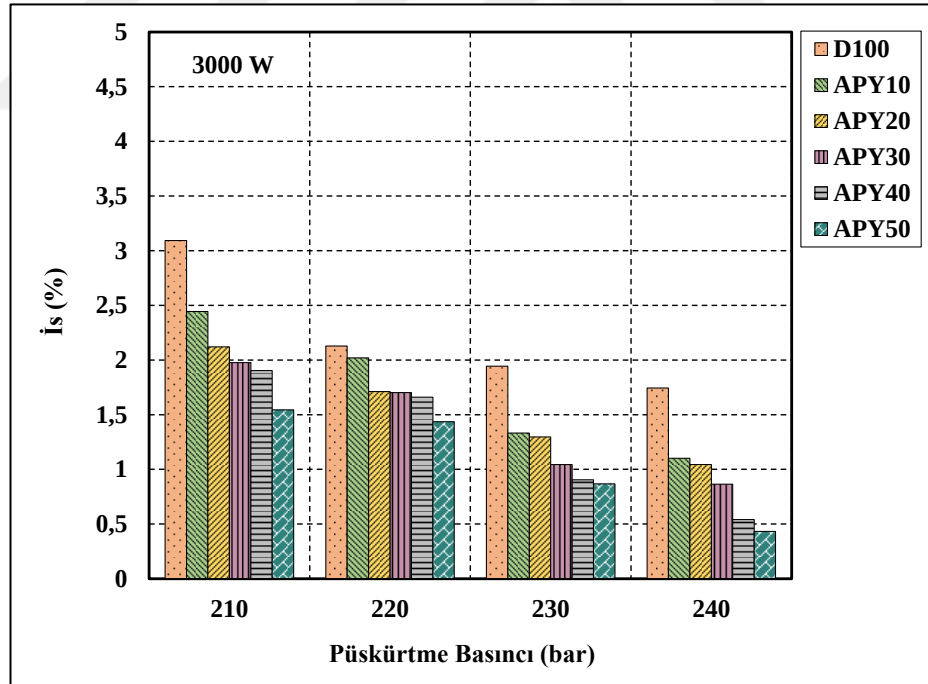
Şekil 7.37. PB değişiminin 750 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.



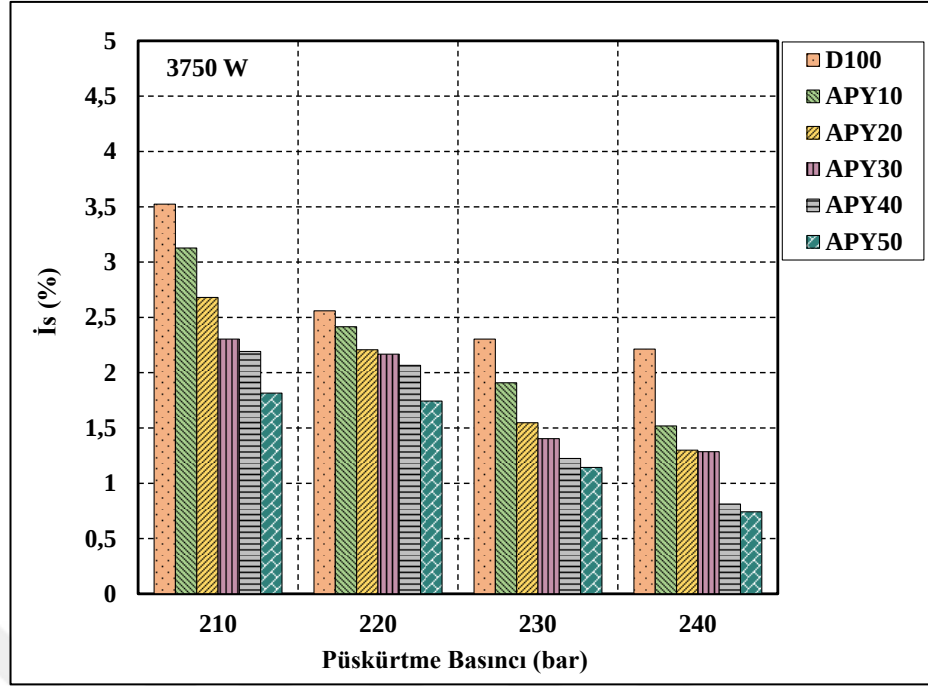
Şekil 7.38. PB değişiminin 1500 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.



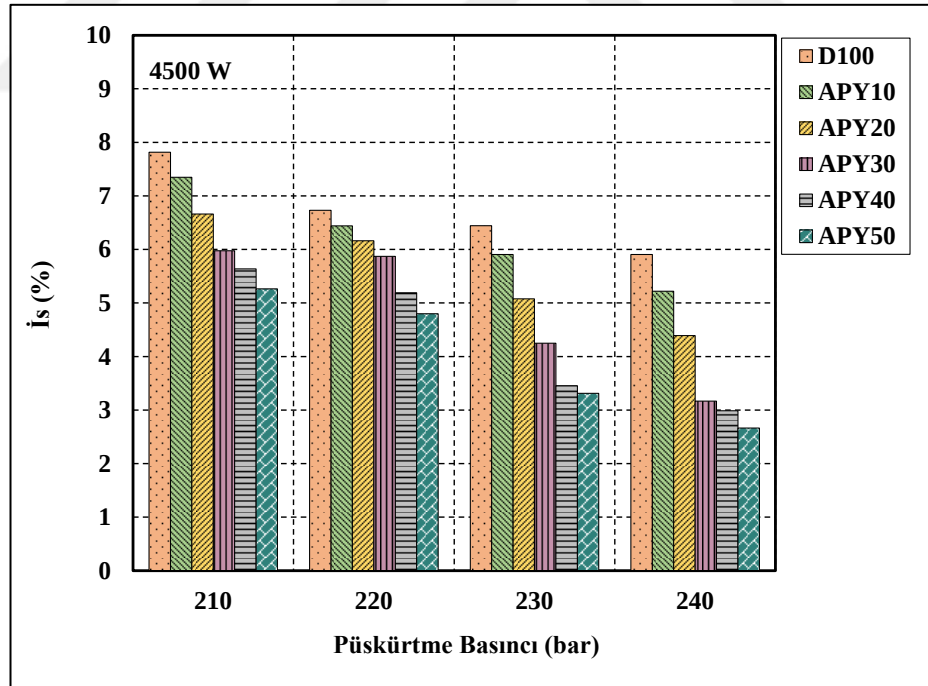
Şekil 7.39. PB değişiminin 2250 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.



Şekil 7.40. PB değişiminin 3000 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.



Şekil 7.41. PB değişiminin 3750 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.



Şekil 7.42. PB değişiminin 4500 W motor yükünde is üzerindeki etkisi.

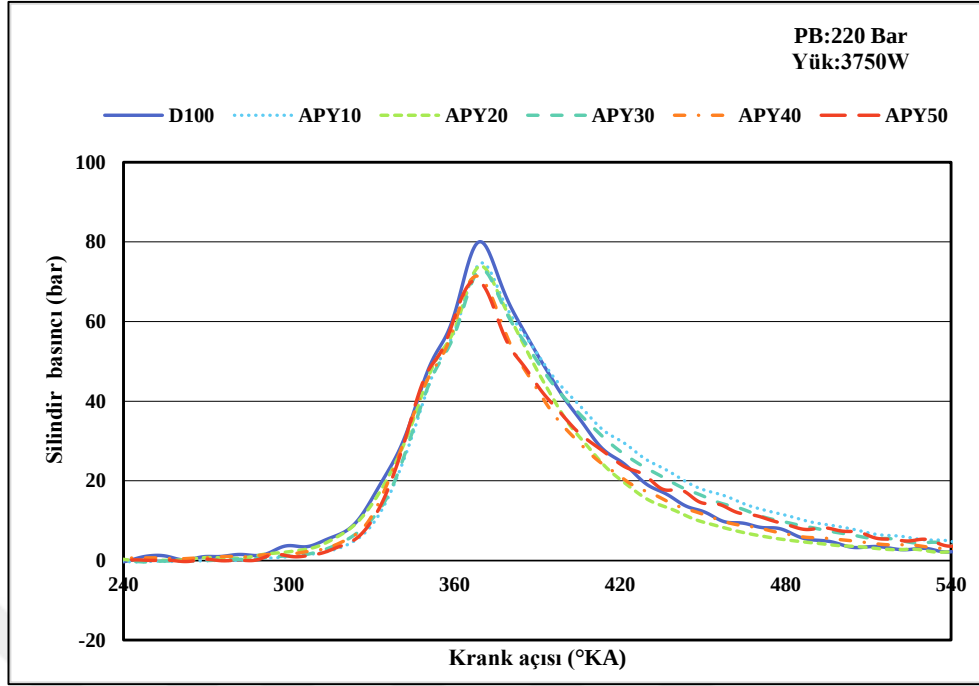
7.1.3. Yanma Karakteristikleri

7.1.3.1. Silindir İçi Gaz Basınçları ve Isı Yayılım Oranlarının Püskürtme Basıncına Bağlı Değişimi

Yanmayı etkileyen faktörlerin başında silindir içi gaz basıncı gelmektedir. Silindir içi gaz basıncı yakıtın miktarına, setan sayısına, ısıl değerine, viskozitesine, yoğunluğuna, motor yüküne ve devrine, TG süresine ve yakıtın atomizasyonuna bağlıdır. Ayrıca dizel motorlarda maksimum silindir içi gaz basıncı, ani yanma periyodu, yanmış yakıt miktarı ve yanma hızından da etkilenmektedir. TG periyodu karışım oluşumunu etkileyen yakıt kaynaklı çeşitli özelliklerden etkilenmektedir. Yakıtların setan sayısı, viskozitesi ve yoğunluğu TG süresi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Ayrıca yakıtın uçuculuğu ve viskozitesi ön karışımı arttırmada etkili bir role sahiptir.

Silindir basınçları ve ısı yayılım oranlarının incelenmesinde FEV değerlerinin en yüksek olduğu 3750 W motor yükü seçilmiştir.

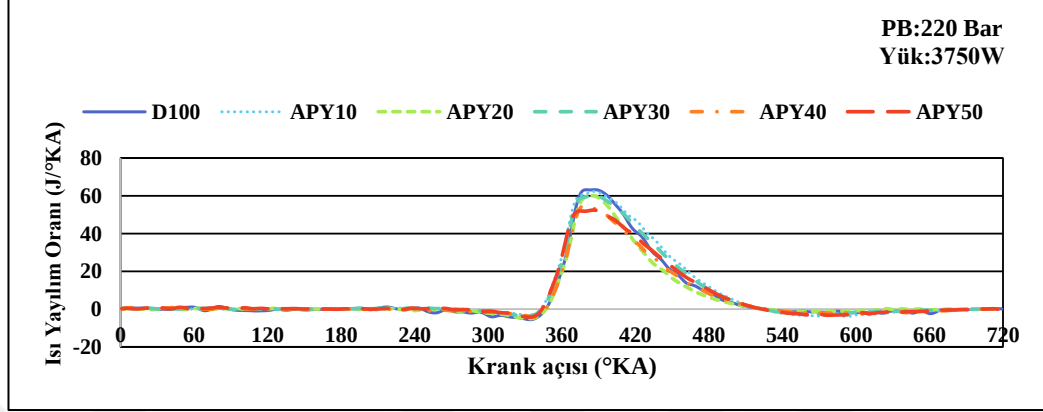
Şekil 7.43 'te tüm test yakıtlarının 3750 W motor yükünde 220 bar PB'de KA'ya bağlı olarak silindir basınçlarının değişimleri görülmektedir. D100'ün maksimum silindir basıncı 80 bar ölçülürken APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının maksimum silindir basınçları 74,72; 73,85; 73,05; 71,42 ve 70,32 bar olarak ölçülmüştür. D100 için maksimum basınç ÜÖN'den sonra 9°KA iken diğer test yakıtları sırasıyla ÜÖN'den sonra 9, 10, 10, 8, 8°KA olarak ölçülmüştür. APY ve karışımlarının maksimum silindir basıncı D100 yakıtına göre daha düşüktür. Bunun sebebi APY ve karışımlarının daha düşük ısıl değeri olduğu düşünülmektedir. APY ve karışımlarının yoğunluğunun ve viskozitesinin ve parlama noktasının D100 yakıtına kıyasla düşük olması ve uçuculuğunun yüksek olması birlikte değerlendirildiğinde yakıt atomizasyonu üzerinde olumlu etkiye sahiptir. Bu yüzden yakıtın buharlaşma kabiliyeti artmakta ve TG'nin D100'den daha kısa olmasına sebep olmaktadır. Bu durumun da yanmanın daha erken başlamasına ve maksimum basıncın ÜÖN'ye daha yakın bir noktada oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.43. Silindir basınçlarının 220 bar PB'deki değişimleri.

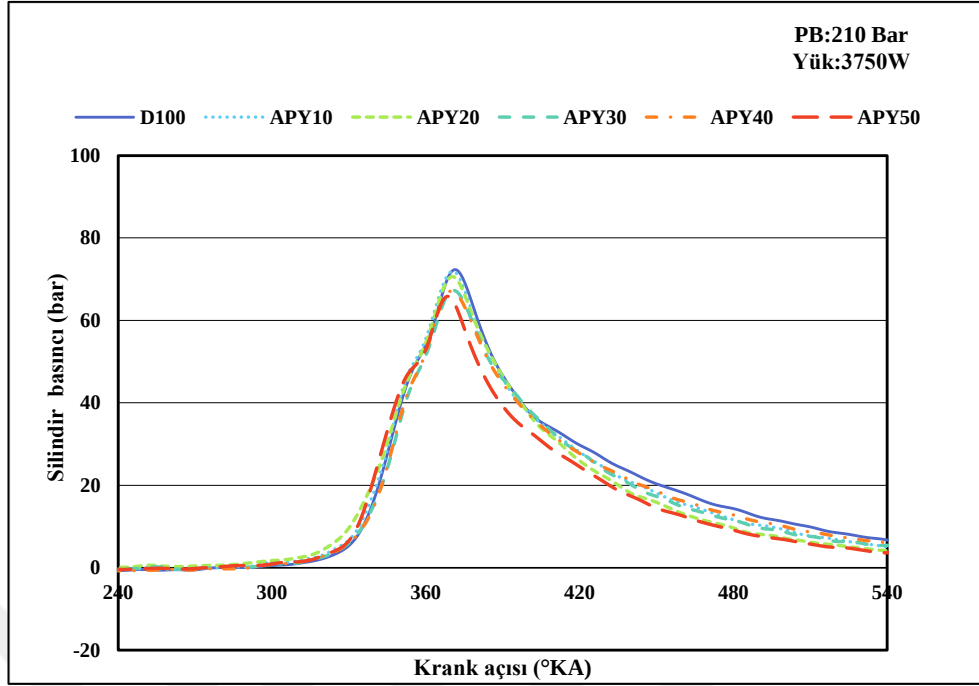
Isı yayılım oranlarının 3750 W motor yükünde 220 bar PB'de KA'ya bağlı olarak değişimleri Şekil 7.44'te görülmektedir. APY ve karışım yakıtlarının ısı yayılım oranlarının eğrileri incelendiğinde maksimum ısı yayılımının D100 yakıtına kıyasla daha erken bir noktada oluştuğu ve değerlerinin D100 yakıtından daha düşük olduğu gözlenmiştir. 220 bar PB ve 3750 W motor yükünde D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının açığa çıkan ısı yayılım oranları sırasıyla 63,2 J/oKA 62,34 J/°KA, 60,02 J/°KA, 60,317 J/°KA, 55,06 J/°KA, 52,37 J/°KA olarak hesaplanmıştır. APY karışımlarının alt ısı değerlerinin ve maksimum silindir basıncının D100 yakıtından düşük olması dolayısıyla ısı yayılımlarını da negatif yönde etkilemiştir. Ayrıca APY karışımları ile çalışmada daha erken bir KA'da ısı çıkışı yaşanırken, D100 yakıtı için daha geç bir KA'da ısı çıkışı gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin D100 yakıtının APY karışım yakıtlarına kıyasla daha yüksek viskozitesi, yüksek yoğunluğu ve düşük uçuculuğunun buharlaşma kabiliyetini kötüleştirmesidir. Bu nedenle, D100 yakıtının TG süresi APY karışımlarına göre daha uzundur. D100 yakıtının setan sayısının diğer yakıtlardan yüksek olması nedeniyle ısı yayılımının diğer yakıtlardan daha erken başlaması gerekirken geç başladığı tespit edilmiştir. Bu

durum yakıtın fiziksel özelliklerinin kimyasal özelliklerinden daha baskın çıkmasından kaynaklanabilir.

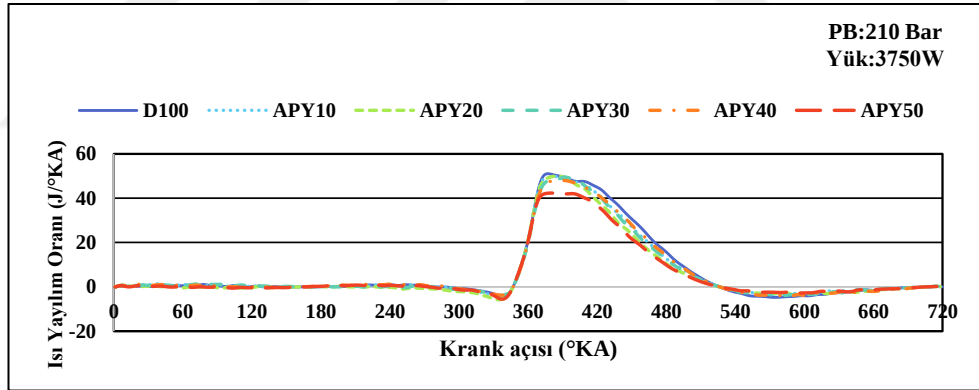


Şekil 7.44. Isı yayılım oranlarının 220 bar PB'deki değişimleri.

Silindir basıncının ve ısı yayılım oranlarının 3750 W motor yükünde ve 210 bar için değişimleri Şekil 7.45 ve Şekil 7.46'da belirtilmiştir. Püskürtme basıncının azaltılması ile tüm test yakıtların maksimum silindir gaz basınç değerlerinde azalma gözlenmiş ve konumlarının ÜÖN'den uzaklaştığı görülmüştür. D100'ün maksimum silindir basıncı 72,25 bar ölçülürken APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının maksimum silindir basınçları, 71,84; 70,60; 67,28; 67,12 ve 65,76 bar olarak ölçülmüştür. D100 için maksimum silindir basıncı ÜÖN'den 11 °KA sonra elde edilirken, diğer test yakıtları sırasıyla ÜÖN'den sonra 11 °KA, 10 °KA, 11 °KA, 10 °KA, 9 °KA olarak ölçülmüştür. PB'nin azaltılmasıyla yakıt damlacık çapı artmakta ve atomizasyon kötüleşmektedir. Bu durum, ideal bir hava/yakıt karışımının oluşumunu geciktirerek azalan püskürtme basıncıyla birlikte TG süresini arttırmaktadır. PB basıncı aynı motor yükünde 220 bardan 210 bar'a değiştirildiğinde ısı yayılım oranları D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının açığa çıkan ısı yayılım oranları sırasıyla 51 J/°KA, 49,77 J/°KA, 49,93 J/°KA, 49,52 J/°KA, 47,94 J/°KA, 42,25 J/°KA olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.45. Silindir basınçlarının 210 bar PB'deki değişimleri.

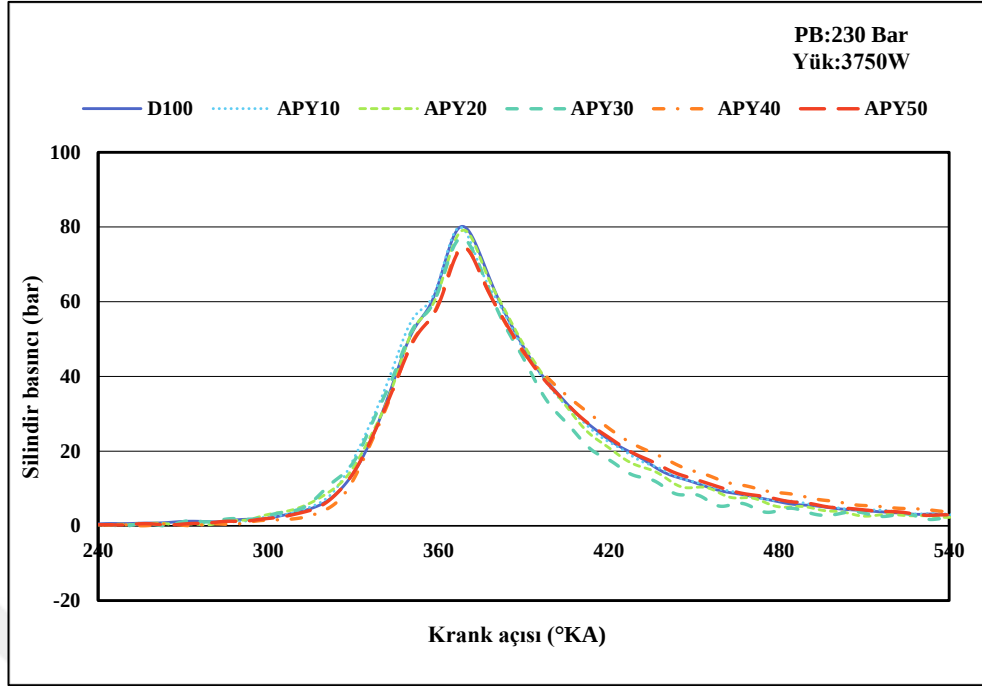


Şekil 7.46. Isı yayılım oranlarının 210 bar PB'deki değişimleri.

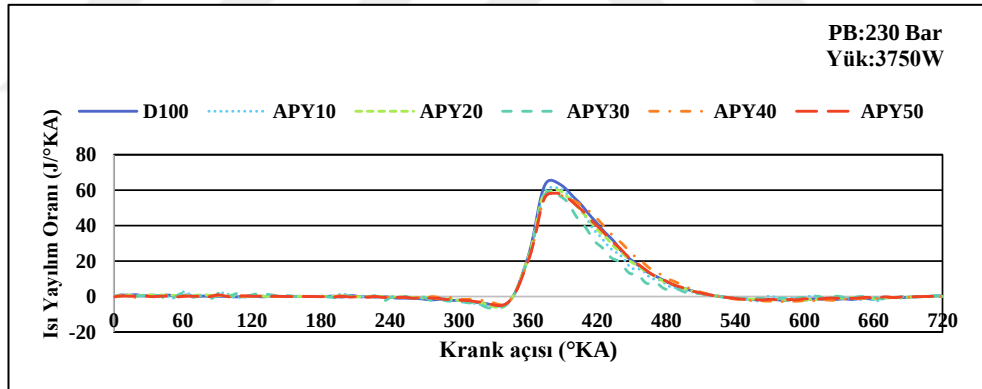
Silindir gaz basınçları ve ısı yayılım oranlarının 3750 motor yükünde ve 230 bar'daki değişimleri Şekil 7.47 ve Şekil 7.48'de 240 bar'daki değişimleri ise Şekil 7.49 ve Şekil 7.50'de gösterilmiştir. Püskürtme basıncının artırılması ile maksimum silindir basınçları artmış ve konumları ÜÖN'ye yaklaşmıştır. 230 PB'de silindir basınçları değerlendirildiğinde; D100'ün maksimum silindir basıncı 80,13 bar ölçülürken APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının maksimum silindir basınçları, 79,83; 79,14; 76,98; 74,55 ve 74,49 bar olarak ölçülmüştür. D100 için maksimum silindir basıncı ÜÖN'den sonra 8°KA iken diğer test yakıtları için sırasıyla ÜÖN'den sonra 8°KA, 9°KA, 8°KA, 9°KA, 7°KA olarak ölçülmüştür. 240 PB'de ise

test yakıtlarının silindir basıncı değerleri D100'ün maksimum silindir basıncı 84,35 bar ölçülürken APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının maksimum silindir basınçları sırayla, 83,08; 78,23; 77,203; 76,23 ve 74,77 bar olarak ölçülmüştür. D100 için maksimum basıncın elde edildiği aç ı ÜÖN'den sonra 8°KA iken diğer test yakıtları sırasıyla ÜÖN'den sonra 7°KA, 8°KA, 7°KA, 7°KA, 6°KA olarak ölçülmüştür.

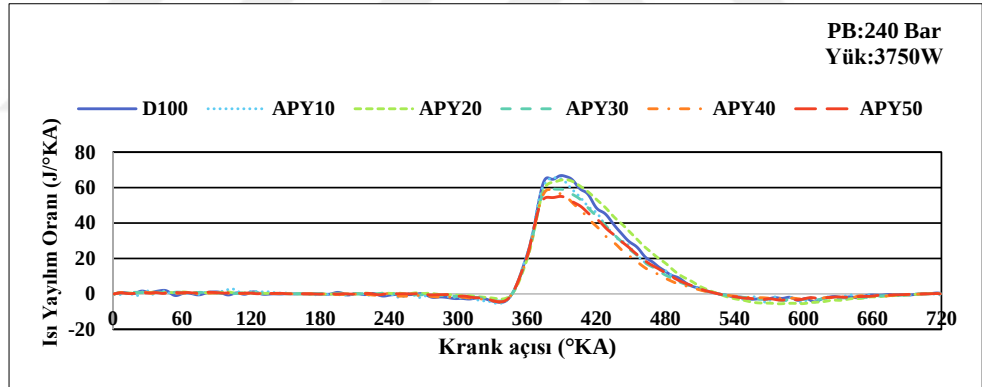
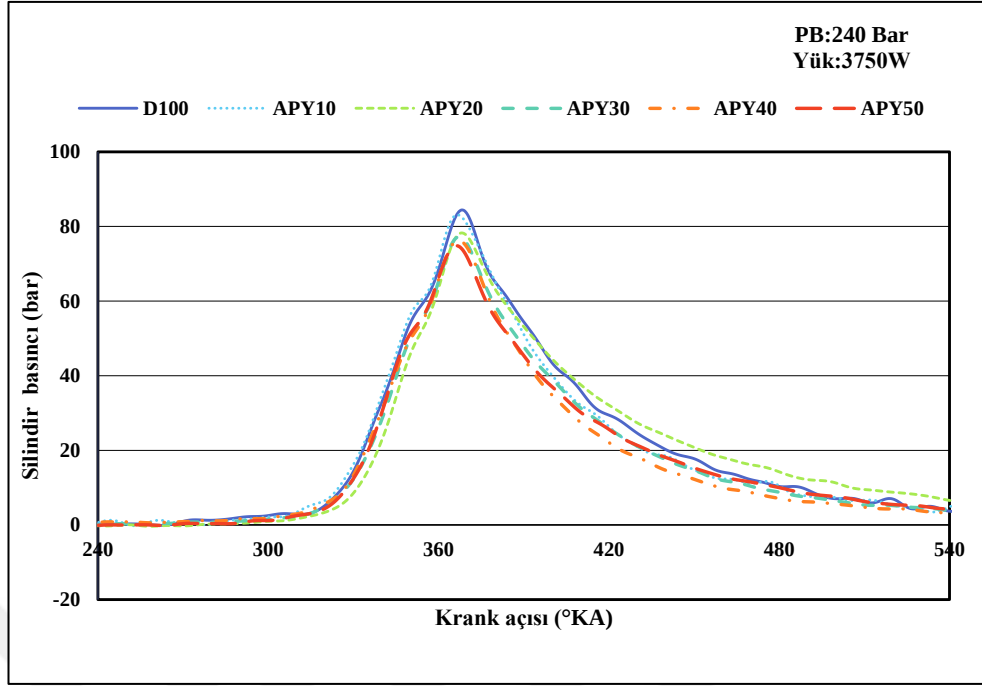
230 ve 240 bar PB'de ısı yayılım oranları incelendiğinde ise 230 bar için D100, APY10, APY20, APY30, APY40 ve APY50 yakıtlarının açığa çıkan ısı yayılım oranları sırasıyla 65,51 J/°KA, 61,56 J/°KA, 60,09 J/°KA, 59,36 J/°KA, 58,315 J/°KA, 58,23 J/°KA olarak hesaplanırken 240 bar PB'ye değiştirilmesiyle 66,73 J/°KA, 65,85 J/°KA, 64,48 J/°KA, 59,44 J/°KA, 58,77 J/°KA, 58,6 J/°KA olarak hesaplanmıştır. PB'nin 240 bar değerine değiştirilmesiyle maksimum ısı yayılımları dizel yakıtından önce olmuştur. Artan PB ile APY karışım yakıtlarının pulverizasyonu artmış ve maksimum ısı açığa çıkışları daha erken KA değerlerinde elde edilmiştir.



Şekil 7.47. Silindir basınçlarının 230 bar PB'deki değişimleri.



Şekil 7.48. Isı yayılım oranlarının 230 bar PB'deki değişimleri.



7.1.4. İstatistiksel Analiz

RSM uygulamasının yanında etkenlerin ortalamaları arasında anlamlı bir değişiklik olup olmadığını değerlendirmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA, çalışmadaki farklı faktörlerin birbirleriyle etkileşime girip girmediğini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir istatistiksel uygulamadır. ANOVA tablosunda temelde önem taşıyan unsurlar F-değeri ve p- değerleridir. Daha yüksek bir F-değeri daha güçlü bir model güvenilirliğine işaret ederken, daha düşük bir p-değeri modelin anlamlılığını göstermektedir [195]. Bir faktörün cevap üzerinde etkisinin

olabilmesi için p-değerinin 0,05'ten düşük olması gerekmektedir [34, 35]. Bu çalışmada ANOVA testleri % 95 güven düzeyi kullanılarak yapılmıştır. Faktörlerin katkı yüzdesi ise yanıt üzerinde oransal olarak ne kadar etkili olduğunu gösteren bir kriter olup elde edilen pareto grafikleri ile doğrusal sonuçlar vereceğinden dolayı birlikte yorumlanması daha uygundur [196]. Pareto grafiği, bir faktörün yanıt üzerindeki etkisini ve bu etkinin önemini belirlemeye yönelik bir grafik türüdür. Bu grafik üzerinde bulunan dikey çizgi giriş faktörlerinin anlamlı olup olmadığını belirten sınır çizgisidir. Bu sınır çizgisinin sağında kalan faktörlerin seçilen yanıt üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmaktadır [47]. Diğer yandan deneysel verilerinin oluşturulan modelle ne kadar uyum içerisinde olduğunu belirlemek amacıyla R^2 değerlerinden faydalanılmaktadır [156,195–197]. Bu değer 0 ile 1 arasında olup 1'e eşit olması deneysel verilerin model ile mükemmel derece uyum içerisinde olduğunun kanıtıdır. Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de motor performansı ve emisyon yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 7.1. FÖYT, EGS ve FEV yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları.

	FÖYT		EGS		FEV	
Source	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri
Model	138,51	0	2008,57	0	1169,33	0
A-PB	16,4	0,002	35,09	0	40,51	0
B-APY	32,43	0	33,46	0	92,8	0
C-Yük	581,62	0	8081,89	0	5617,32	0
A ²	0,8	0,393	0,23	0,64	0,69	0,425
B ²	2,51	0,144	3,04	0,112	6,31	0,031
C ²	74,21	0	185,89	0	554,75	0
A*B	0,24	0,636	1,1	0,318	3,89	0,077
A*C	6,24	0,032	2,29	0,161	4,02	0,073
B*C	14,06	0,004	0,87	0,374	0,65	0,44
R ² (%)	99,2		99,94		99,91	
Düz. R ² (%)	98,49		99,89		99,82	
Tah. R ² (%)	96,51		99,45		99,51	

Ayrıca faktörlerin yanıtlar üzerindeki etkisinin p-değerine bağlı olarak anlamlı olup olmadığını ve R^2 değerlerini göstermektedir. Burada A PB'yi, B APY oranını C ise motor yükünü ifade etmektedir. Deneysel çalışma %95 güven seviyesinde

yapıldığından p değerinin 0,05'ten büyük olması faktörün yanıt üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Çizelge 7.1'de FÖYT, EGS ve FEV yanıtları, Çizelge 7.2'de ise NO_x, HC, CO ve is yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de PB'nin, APY oranının ve motor yükünün bireysel olarak bütün çıktılarda etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.2. NO_x, HC, CO ve is yanıtlarına ilişkin ANOVA sonuçları.

	NO _x		HC		CO		İs	
Source	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri	F değeri	p değeri
Model	347,42	0	48,07	0	123,55	0	216,81	0
A-PB	9,48	0,012	71,52	0	24,44	0,001	57	0
B-APY	7,04	0,024	65,79	0	61,07	0	132,78	0
C-Yük	1463,9	0	64,39	0	376,84	0	507,88	0
A²	1,53	0,245	0,36	0,559	0,78	0,397	5,99	0,034
B²	0,17	0,686	0,69	0,426	1,41	0,263	4,71	0,055
C²	2,86	0,122	0,06	0,818	111	0	158,07	0
A*B	4,76	0,054	0,42	0,53	4,9	0,051	1,87	0,201
A*C	2,82	0,124	1,06	0,328	0,11	0,742	34,31	0
B*C	7,99	0,018	4,24	0,067	0,21	0,658	11,5	0,007
R² (%)	99,68		97,74		99,11		99,49	
Düz. R² (%)	99,39		95,71		98,31		99,03	
Tah. R² (%)	98,76		85,55		97,54		98	

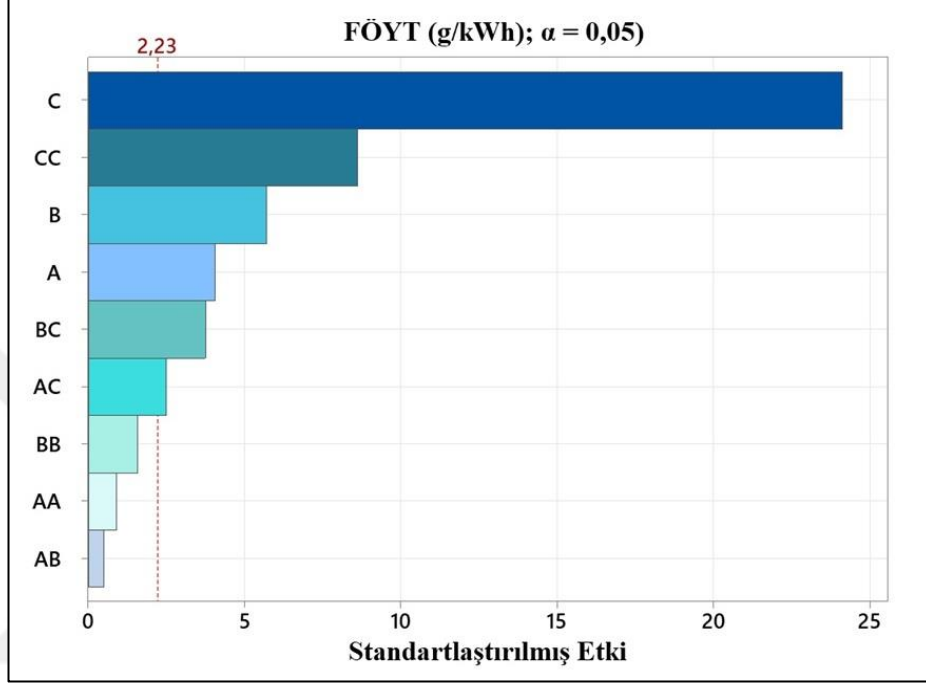
Elde edilen regresyon eşitlikleriyle girdi parametrelerinin seçilen seviyeleri arasında kalmak şartı ile yapılan tüm deneylerin tahmini yapılabilmektedir. Bütün çıktılar için oluşturulan regresyon eşitliklerinin gerçek deney sonuçları ile yakınlığı Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilen R² değerleriyle (korelasyon katsayısı) ile detaylı olarak incelenmiştir. Oluşturulan modelden elde edilen sonuçlara göre tüm çıktı parametrelerinin R² değerleri, iyi bir uyumun göstergesi olan %90 değerinden büyük bir değere sahiptir. Benzer şekilde, oluşturulan modelin doğruluğunu belirten düzeltilmiş R² ve tahmin R² değerleri de kabul edilebilir düzeyde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çıkış parametreleri olan FÖYT, EGS, FEV, NO_x, HC, CO ve is emisyonlarının giriş faktörlerine göre regresyon eşitlikleri belirlenmiş ve Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Çıktı parametrelerinin regresyon eşitlikleri.

FÖYT	=	$-817,06199+20,17909*A+3,98346*B+-0,56907*C-0,01186*A*B$ $+0,000894*A*C+-0,000854*B*C -0,054094*A^2+0,0634619*B^2$ $+0,000050*C^2$
EGS	=	$226,819615-1,105654*A+0,884047529338927*B+0,0233747*C$ $-0,003526*A*B-0,000074*A*C+0,000029*B*C+0,004036*A^2$ $-0,009635*B^2+0,000010*C^2$
FEV	=	$-21,762235+0,222474*A-0,097237*B+0,009161*C+0,000464*A*B$ $+6,952812*10^{-6}*A*C+0,000001*B*C-0,000489*A^2-0,000975*B^2$ $-1,3289184*10^{-6} * C^2$
NO_x	=	$-3245,925+29,871153*A-11,176884*B+0,02683*C+0,0489*A*B$ $+0,000553*A*C-0,000593*B*C-0,069036*A^2+0,015347*B^2$ $+9,069394*10^{-6}*C^2$
HC	=	$-107,871347+1,394213*A+0,401368*B+0,010987*C-0,001643*A*B$ $-0,000038*A*C+0,000048*B*C-0,003802*A^2+0,00345*B^2$ $+1,423907*10^{-7} * C^2$
CO	=	$=0,60328-0,00369*A-0,00170*B-0,0000589*C+7,002545*10^{-6}*A*B$ $+1,574644*10^{-8}*A*C+1,349858*10^{-8}*B*C+6,978414*10^{-6}*A^2$ $-6,178288*10^{-6}*B^2+7,975986*10^{-9} * C^2$
İs	=	$70,174762-0,619985*A+0,089759*B+0,002162*C-0,000320*A*B$ $-0,000020*A*C-7,439940*10^{-6}*B*C+0,001429*A^2-0,000837*B^2$ $+7,0506*10^{-7}*C^2$

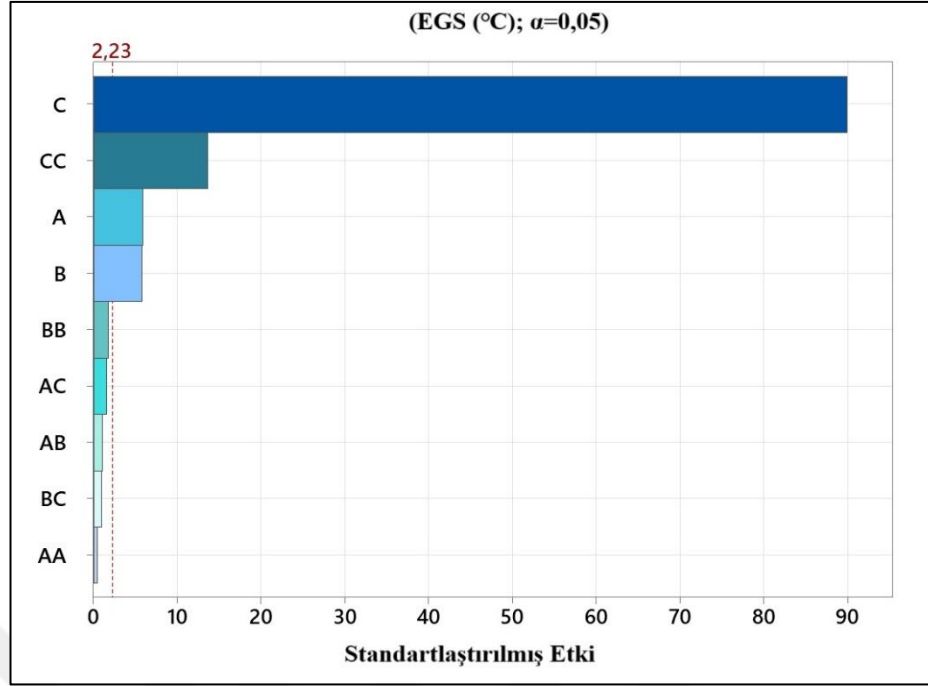
Hangi faktörün yanıt üzerinde daha etkili rol oynadığı ise Pareto grafikleri ile belirlenmiştir. Pareto grafiklerinin oluşturulmasında Minitab programından faydalanılmıştır. Şekil 7.51’de tüm girdi değişkenlerinin FÖYT üzerindeki etkileri Pareto grafiği ile gösterilmiştir. FÖYT için standartlaştırılmış etki alt limiti 2,23 olarak belirlenmiştir. Girdi parametrelerinden, bireysel (A, B, C), kare (CC) ve etkileşim (AC, BC) alt limit değerinin üzerinde olduğundan FÖYT çıktısına anlamlı bir şekilde etki etmektedir. Limit değerinin altında kalan parametrelerin ise FÖYT değeri üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 7. 51’de görüldüğü üzere FÖYT çıktısına en çok etki eden parametre motor yükü (C) olduğu görülmüş olup etki eden

parametrelerin sırası ile motor yükünün karesi (CC), APY oranı (B), PB (A), APY oranı ve motor yükü etkileşiminin (BC) ve PB ve motor yükü etkileşiminin (AC) etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmiş olan p değerleri ile uyum göstermektedir.



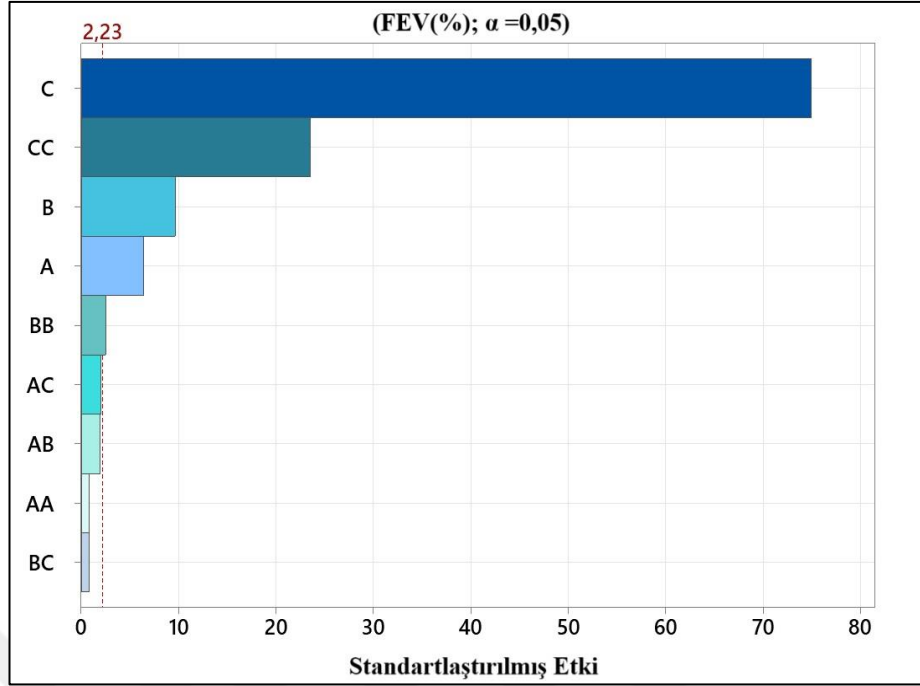
Şekil 7.51. Giriş parametrelerinin FÖYT yanıtı üzerindeki etkileri.

Şekil 7.52’de faktörlerin EGS üzerindeki etkileri Pareto grafiği ile gösterilmiştir. FÖYT için standartlaştırılmış etki alt limiti 2,23 olarak belirlenmiştir. Girdi parametrelerinden, bireysel (A, B, C), EGS çıktısına anlamlı bir şekilde etki etmektedir. Limit değerinin altında kalan parametrelerin ise EGS değeri üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 7. 52’de görüldüğü üzere FÖYT çıktısına en çok etki eden parametre motor yükü (C) olduğu görülmüş olup sırası ile motor yükünün karesi (CC), PB (A) ve APY oranının (B), parametrelerinin EGS çıktısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 7.1’de verilen ANOVA sonuçları pareto grafiği ile birbirini doğrulamaktadır.



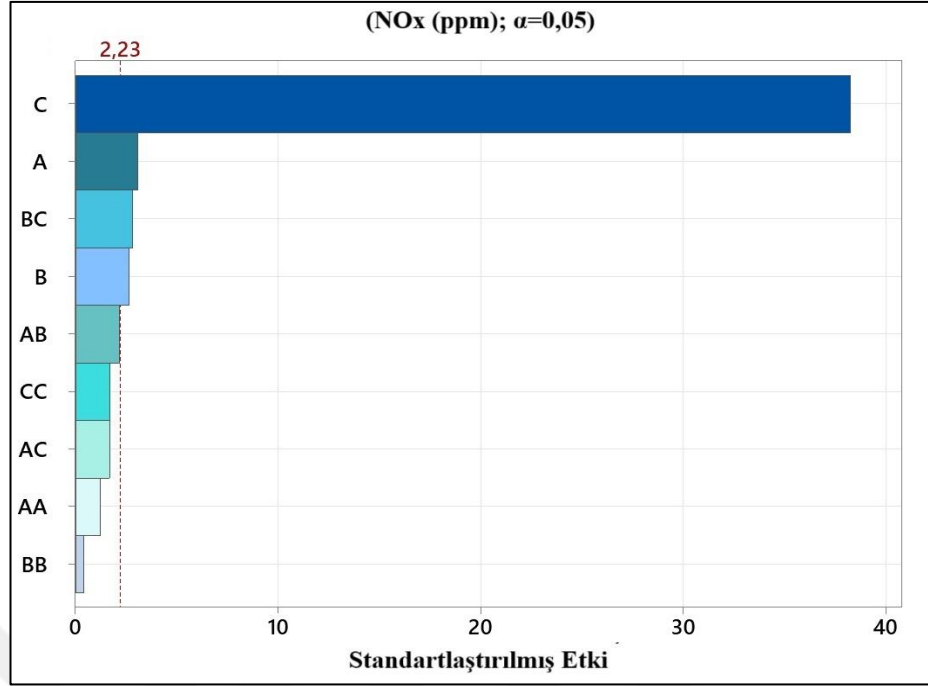
Şekil 7.52. Giriş parametrelerinin EGS yanıtı üzerindeki etkileri.

Şekil 7.53'te faktörlerin FEV üzerindeki etkileri Pareto grafiği ile gösterilmiştir. FÖYT için standartlaştırılmış etki alt limiti 2,23 olarak belirlenmiştir. Girdi parametrelerinden, bireysel (A, B, C), FEV çıktısına anlamlı bir şekilde etki etmektedir. Limit değerinin altında kalan parametrelerin ise FEV değeri üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 7. 53'te de görüldüğü üzere FEV çıktısına en çok etki eden parametre motor yükü (C) olduğu görülmüş olup sırası ile motor yükünün karesi (CC), APY oranı (B), PB (A) ve APY oranının karesi (BB), parametrelerinin FEV çıktısı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 7.1'de verilen ANOVA sonuçları Pareto grafiği ile birbirini doğrulamaktadır.

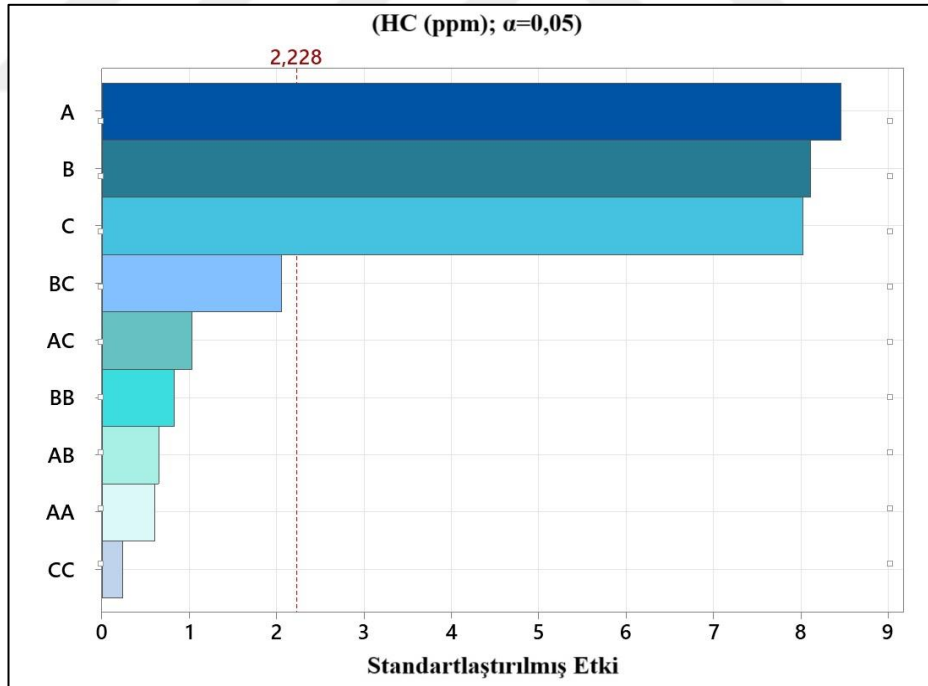


Şekil 7.53. Giriş parametrelerinin FEV yanıtı üzerindeki etkileri.

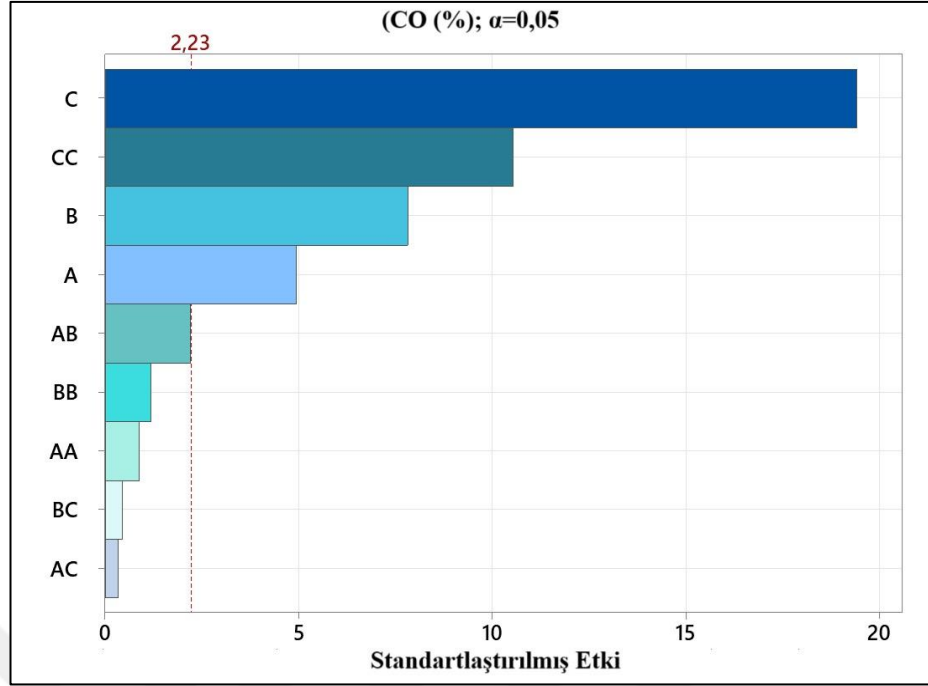
Şekil 7.54'te giriş parametrelerinin NO_x üzerindeki etkileri, Şekil 7.55'te giriş parametrelerinin HC üzerindeki etkileri, Şekil 7.56'da giriş parametrelerinin CO üzerindeki etkileri, Şekil 7.57'de ise giriş parametrelerinin Is yanıtları üzerindeki etkileri gösterilmiştir. A, B ve C'nin bireysel olarak bütün çıktılarda (NO_x , HC, CO ve is) etkili olduğu görülmektedir. Motor yükünün karesi (CC) CO ve is yanıtları üzerinde etkili olurken püskürtme basıncının karesinin sadece is yanıtı üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca APY Oranı ve yükün etkileşim etkisi (BC) hem NO_x hem de is yanıtı üzerinde anlamlı etkiye sahiptir. Püskürtme basıncı ve yükün etkileşim etkisi (AC) ise sadece is yanıtı üzerinde etkilidir. Sonuçlar Çizelge 7.2'de verilen ANOVA sonuçları ile uyum göstermektedir.



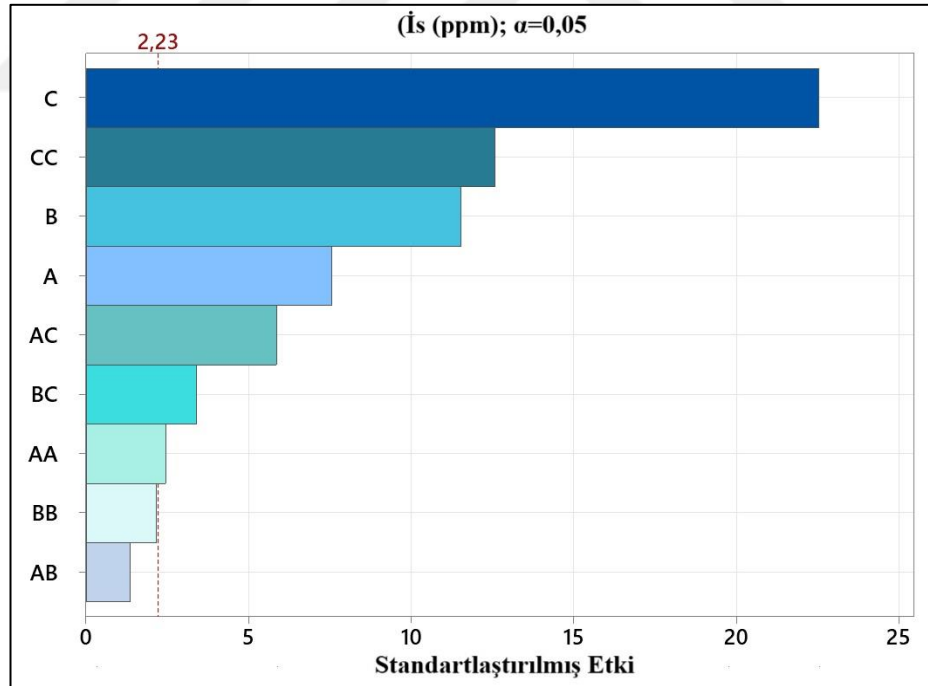
Şekil 7.54. Giriş parametrelerinin NO_x yanıtı üzerindeki etkileri.



Şekil 7.55. Giriş parametrelerinin HC yanıtı üzerindeki etkileri.



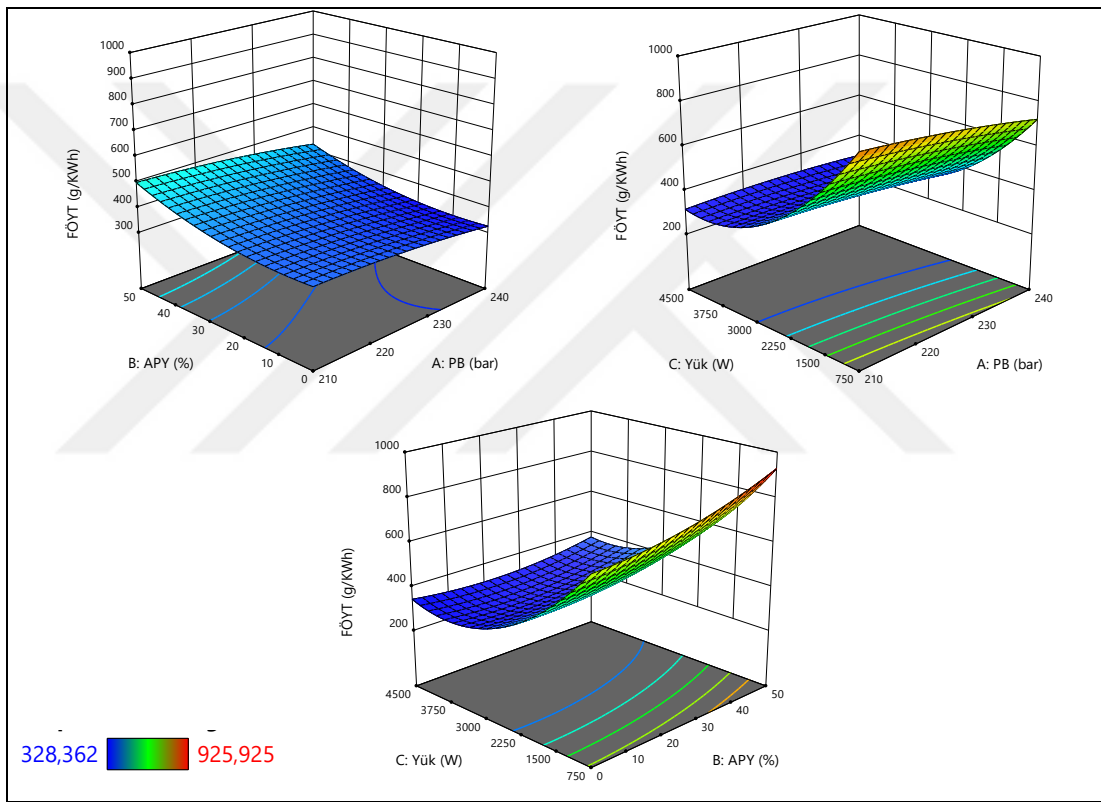
Şekil 7.56. Giriş parametrelerinin CO yanıtı üzerindeki etkileri.



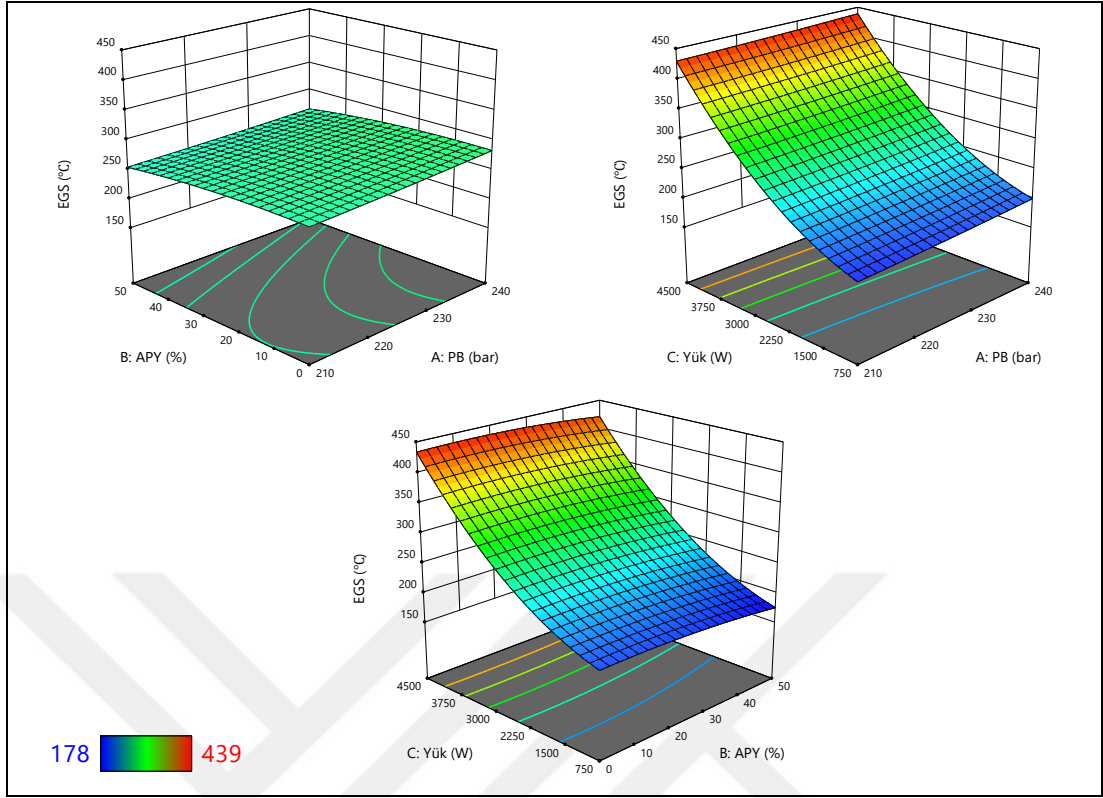
Şekil 7.57. Giriş parametrelerinin İs yanıtı üzerindeki etkileri.

Pareto grafiklerinin yanında program tarafından otomatik olarak belirlenen orta noktalardaki (225 bar PB, %25 APY oranı ve 2625 W motor yükü), yüzey grafikleri

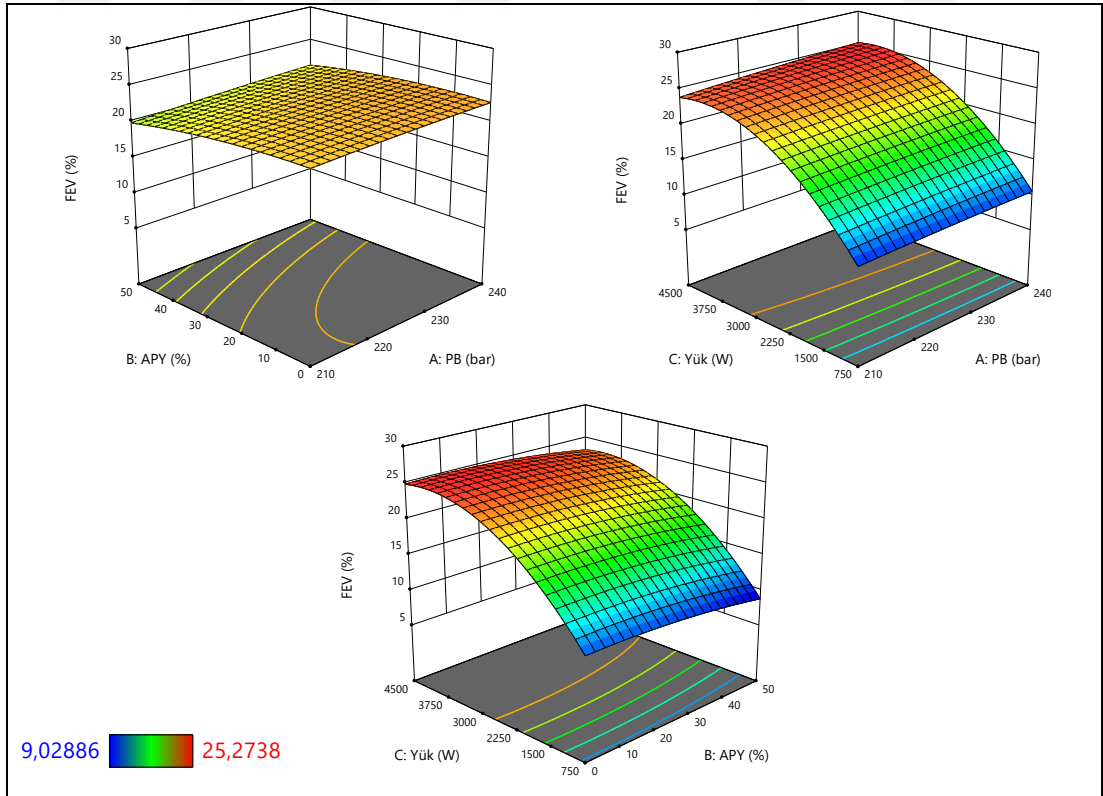
Design-Expert (deneme sürümü) programı ile oluşturulmuştur. Her grafikte gösterilmeyen değişkenin değeri sabit olarak orta noktasında tutulmaktadır. Örnek olarak PB ve APY oranı ortak etkileşim grafiğinde motor yükü 2625 W olarak sabit tutulmuştur. Püskürtme basıncı, kullanılan yakıtın içerisindeki APY oranının ve motor yükünün FÖYT üzerindeki ortak etkisi Şekil 7.58’de, EGS üzerindeki etkisi Şekil 7.59’da FEV üzerindeki etkisi Şekil 7.60’ta, NO_x üzerindeki etkisi Şekil 7.61’de, HC üzerindeki etkisi Şekil 7.62’de, CO üzerindeki etkisi Şekil 7.63’te is üzerindeki etkisi ise Şekil 7.64’te gösterilmektedir.



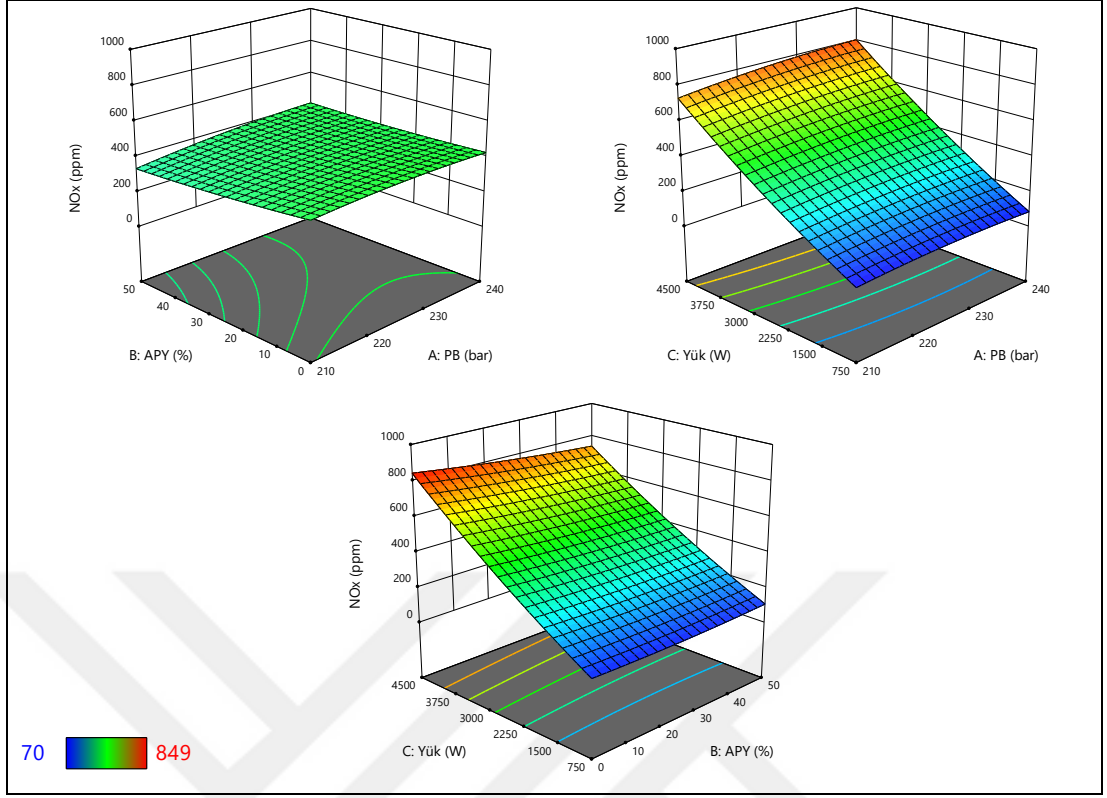
Şekil 7.58. Giriş faktörlerinin FÖYT üzerindeki ortak etkileri.



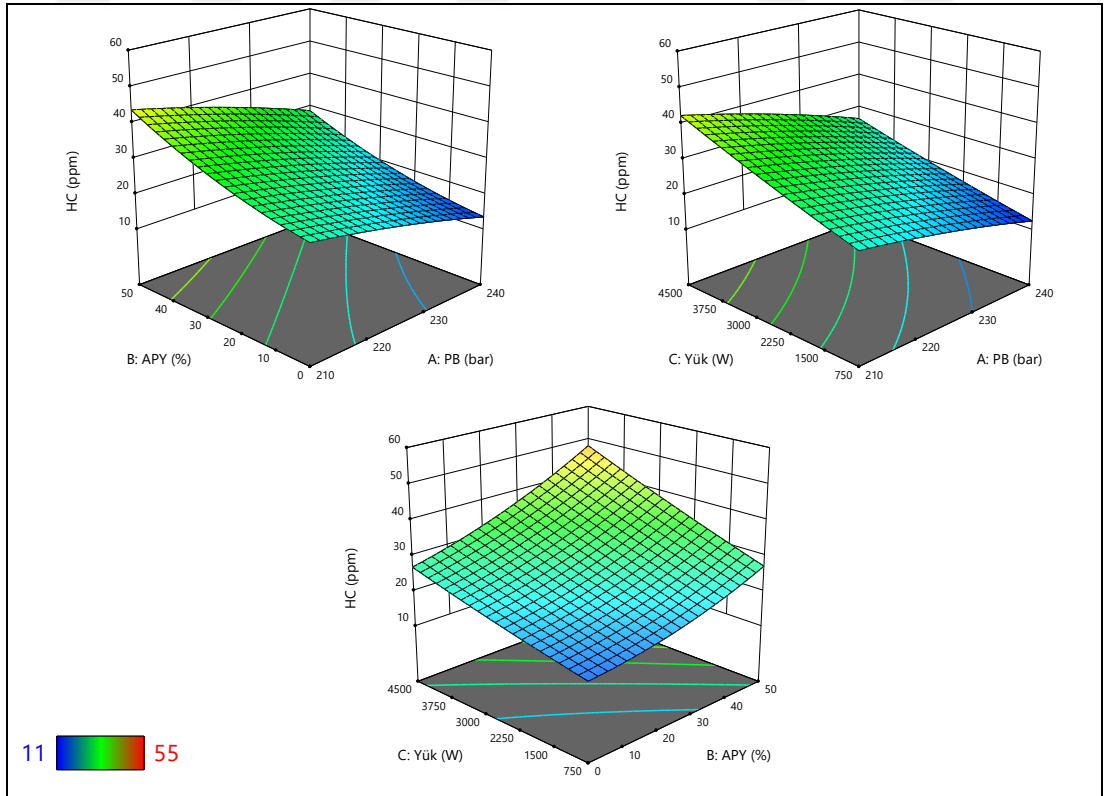
Şekil 7.59. Giriş faktörlerinin EGS üzerindeki ortak etkileri.



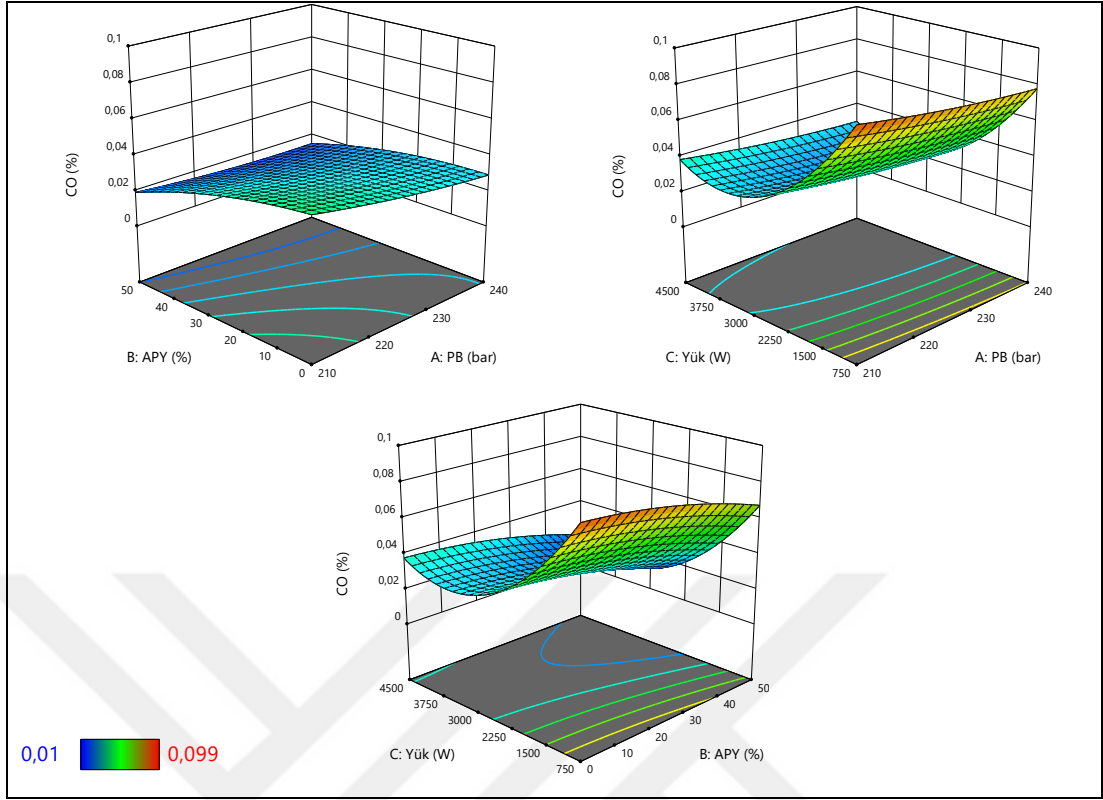
Şekil 7.60. Giriş faktörlerinin FEV üzerindeki ortak etkileri.



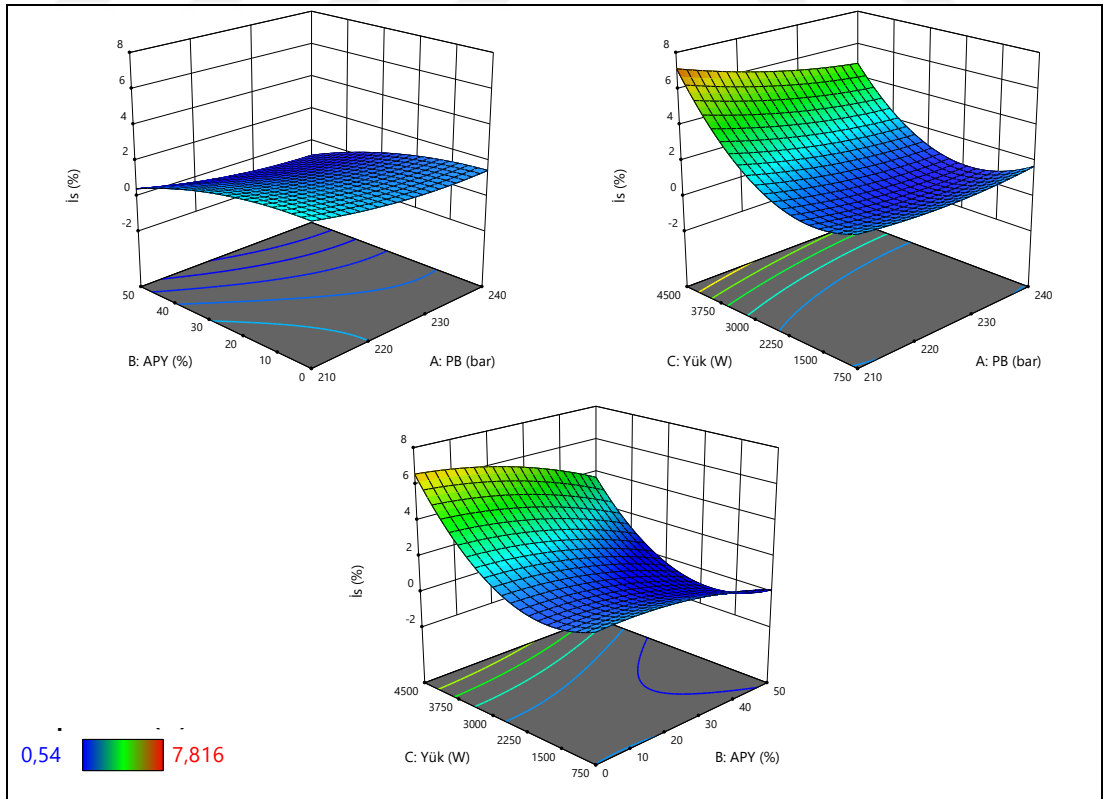
Şekil 7.61. Giriş faktörlerinin NO_x üzerindeki ortak etkileri.



Şekil 7.62. Giriş faktörlerinin HC üzerindeki ortak etkileri.



Şekil 7.63. Giriş faktörlerinin CO üzerindeki ortak etkileri.



Şekil 7.64. Giriş faktörlerinin Is üzerindeki ortak etkileri.

Ayrıca ANOVA kullanılarak, regresyon modeli giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimizasyon çalışması için tüm hesaplamalar yapılmıştır. Sonrasında ise Design-Expert (Deneme Sürümü) programında seçilen 20 adet deney verisi ve regresyon modeli ile birlikte optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

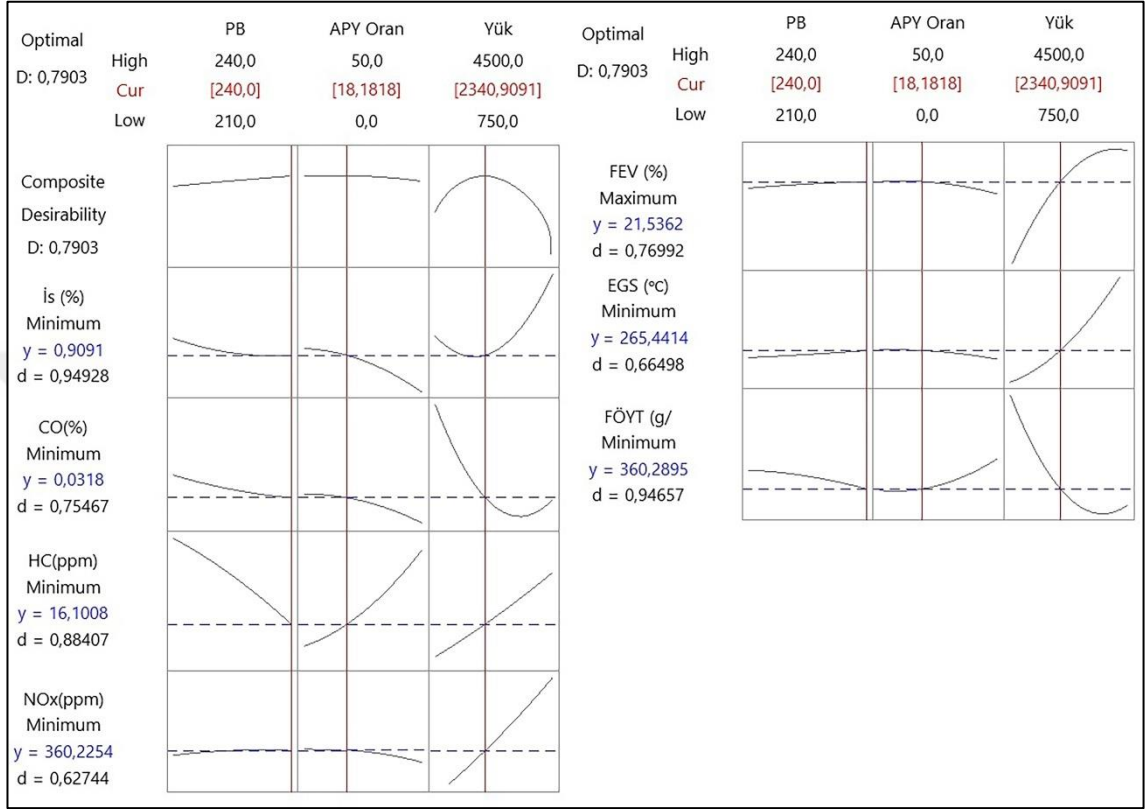
Materyal ve yöntem kısmında da belirtildiği gibi RSM modeli için FEV (%), EGS (°C), FÖYT (g/kWh), NO_x (ppm), HC (ppm) CO (%) ve is (%) çıkış parametreleri olarak seçilirken, PB, APY karışım oranı ve motor yükü giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Seçilen giriş ve çıkış parametreleri için en düşük ve en yüksek değerler Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. RSM optimizasyonu için seçilen parametreler ve değerleri.

Giriş ve Çıkış Parametreleri	Amaç	En Düşük	En Yüksek
A:PB (bar)	Aralık	210,0	240,0
B:APY (%)	Aralık	0,0	50,0
C:Yük (W)	Aralık	750,0	4500,0
FÖYT (g/kWh)	Minimum	328,362	925,925
EGS (°C)	Minimum	178,0	439,0
FEV (%)	Maksimum	9,0	25,274
NO _x (ppm)	Minimum	70,0	849,0
HC (ppm)	Minimum	11,0	55,0
CO (%)	Minimum	0,01	0,099
İs (%)	Minimum	0,54	7,816

Çalışmada başlıca hedef, RSM optimizasyonu ile PB, APY oranı ve motor yükünü optimize etmek suretiyle FÖYT ve EGS değerlerini en aza indirmek ve aynı zamanda tüm emisyonları minimize ederken FEV değerini maksimize etmektir. RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasında optimum PB'nin 240 bar olduğu, APY oranının %18,18 ve optimum motor yük değerinin ise 2340,91 W olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.65'te gösterildiği gibi optimum PB, APY oranı ve motor yüküne karşılık gelen maksimum

FEV değeri %21,53; minimum FÖYT, EGS, NO_x, HC, CO ve is emisyonu değerleri ise sırasıyla 360,2895 g/kWh, 265,44 °C, 360,22 ppm, 16,1 ppm, %0,0318 ve %0,9091 olarak bulunmuştur.



Şekil 7.65. FÖYT, EGS, FEV, NO_x, HC, CO ve is için optimizasyon grafikleri.

Deneysel çalışmada, optimum PB, APY oranı ve motor yükü temel alınarak yapılan validasyon çalışmasında elde edilen sonuçlar optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak hata oranları ile Çizelge 7.5'te sunulmuştur. Optimizasyon ve doğrulama çalışmaları ile elde sonuçlar, APY-dizel yakıt karışımlarının kullanıldığı tek silindirli düşük güçlü bir dizel motorda motor performansı ve emisyon parametrelerini optimize etmek ve optimum motor çalışma faktörlerini belirlemek için RSM modellerinin %5'in altında bir hata oranıyla kabul edilebilir düzeyde olduğu ve başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak kurulan modelinin güçlü tahmin yeteneği ve güvenilirliği deneysel veriler ile uyumlulukları ile kanıtlanmıştır.

Çizelge 7.5. RSM çalışmasının doğrulanması.

PB (bar)	APY Oranı (%)	Motor Yükü (W)		FÖYT (g/kWh)	EGS (°C)	FEV (%)	NO_x (ppm)
240	18,1	2340	RSM	360,2895	265,44	21,53	360,22
			Test	377,8470	262	21,3316	363
			% Hata	4,64	1,31	0,93	0,76
				HC (ppm)	CO (%)	İs (%)	
			RSM	16,1	0,0318	0,9091	
			Test	16	0,033	0,95	
			% Hata	0,62	3,63	4,3	

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Bu çalışma; motor testleri ve optimizasyon çalışması olmak üzere iki farklı aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmada, her bir yakıt karışımı için 210, 220, 230 ve 240 bar püskürtme basınçlarında ve farklı motor yüklerinde (750, 1500, 2250, 3000, 3750 4500W) sabit motor hızında (3000 d/d) dizel motor performansı ve emisyonlarındaki değişimler ile yanma karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş, D100 ve APY karışımlarının tek silindirli hava soğutmalı dizel motorda yakıt olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. İkinci olarak yanıt yüzey metodu (RSM) ile en uygun performans ve egzoz emisyonları belirlenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneyler sonucunda APY ve karışımlarının performans, yanma ve egzoz emisyonu sonuçları dizel yakıtı ile kıyaslanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Motor performansı ile ilgili çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Tüm yakıtlarda motor yükünün artırılmasıyla doğru orantılı olarak 3000 W motor yüküne kadar FÖYT değerleri azalmış 4500 W motor yükünde ise nispeten artış görülmüştür.
- Karışım içerisindeki APY oranının artması FÖYT değerlerinde artışa sebep olmuştur. Gerçekleştirilen tüm deneylerde en düşük FÖYT değerinin D100 yakıtı ile elde edildiği görülmüştür.
- PB'nin artırılması ile FÖYT değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. PB'nin azaltılması ise deney yakıtlarının FÖYT değerlerinde artışa sebep olmuştur.
- Bütün deney yakıtları için motor yükünün artması ile EGS değerlerinde artış gözlenmiştir

- Karışım içerisindeki APY oranının artmasıyla birlikte EGS değerlerinin düştüğü gözlenmiştir.
- PB'nin artırılması EGS değerlerinin artışına yol açmıştır. PB'nin azaltılması ile ise EGS değerlerinde nispeten düşüş gözlenmiştir.
- Motor yükünün artmasıyla bütün yakıtların FEV değerleri 3750 W değerine kadar artmış 4500 W motor yükünde ise nispeten azalma meydana gelmiştir.
- Karışım içerisinde APY oranının artmasıyla FEV değerleri yakıt karışım oranıyla doğru orantılı olarak azalmıştır.
- PB'nin artırılmasıyla FEV değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak PB'nin azaltılması tüm yakıtlarda FEV değerinin düşmesine sebep olmuştur.

Egzoz emisyonları ile ilgili çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Motor yükündeki artışla birlikte bütün test yakıtları için NO_x emisyonlarında artış belirlenmiştir.
- Karışım içerisindeki APY oranının artışı ile NO_x emisyonlarında azalma olduğu belirlenmiştir.
- PB'nin arttırılmasıyla NO_x oluşumunda artış gözlemlenmiştir. PB'nin azaltılması ile NO_x emisyonlarında azalma sağlanmıştır.
- Deneysel çalışma sırasında en yüksek CO emisyonu oluşumu 750 W motor yükünde elde edilmiştir. CO emisyonu 3750 W değerine kadar azalmış 4500 W motor yükünde ise artış meydana gelmiştir.
- Tüm deneylerde en yüksek CO emisyonu miktarı D100 yakıtında meydana gelmiştir. APY karışımlarının CO emisyonu seviyeleri D100 yakıtından düşüktür.
- PB'nin arttırılmasıyla CO emisyonlarında azalma sağlanmıştır. PB'nin azaltılmasıyla ise CO emisyonlarında artış gözlenmiştir.
- Bütün deneyler içerisinde en yüksek HC oluşumu 4500 W motor yükünde elde edilmiştir.
- Karışım içerisindeki APY oranının artışı ile HC emisyonları paralel olarak artmıştır. Deneylerde en düşük HC oluşumları D100 yakıtı ile gerçekleşmiştir

- Püskürtme basıncının artmasıyla HC emisyonlarında azalma meydana gelmiş ve en düşük HC oluşumu 240 bar PB’de gerçekleşmiştir.
- Deneysel çalışma sırasında en yüksek is emisyonu oluşumu 4500 W motor yükünde elde edilmiştir. Is emisyonu 3750 W değerine kadar artmış 4500 W motor yükünde ise bütün yakıtlarda belirgin bir is emisyonu artışı meydana gelmiştir.
- Tüm deneylerde en yüksek is emisyonu miktarı D100 yakıtında meydana gelmiştir. APY karışımlarının is emisyonu seviyeleri D100 yakıtından düşüktür.
- PB’nin arttırılmasıyla is emisyonlarında azalma meydana gelmiştir. PB’nin azaltılmasıyla ise is emisyonlarında artış gözlenmiştir.

Yanma karakteristikleri ile ilgili başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- En yüksek silindir basıncı FEV değerinin en yüksek olduğu 3750 W motor yükünde D100 yakıtı ile elde edilmiştir. APY oranı arttıkça silindir basıncında düşme meydana gelmiştir. APY kullanımıyla maksimum silindir basınçlarında görece azalma meydana gelmiş ve ÜÖN’ye yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca 3750 W motor yükünde maksimum ısı yayılım oranı D100 yakıtı ile elde edilmiştir. APY-D100 karışımlarının silindir basıncı eğrileri D100 yakıtı ile benzer olması ve aralarındaki farkın çok az olması APY karışımlarının dizel motorda yapısal bir değişikliğe uğramadan kullanılabileceğini göstermektedir. PB’nin artışı ile en yüksek silindir basıncı ve ısı yayılım oranları tüm yakıtlar için 240 bar PB’de elde edilmiştir. Ayrıca PB’nin artışı ile tüm yakıtların maksimum silindir içi gaz basıncının konumu ÜÖN’ye yaklaşmıştır.

Yanıt yüzey metodu (RSM) ile yapılan optimizasyon çalışmasının sonuçları aşağıda belirtilmiştir:

- RSM ile yapılan optimizasyon çalışmasında optimum PB’nin 240 bar olduğu, APY oranının %18,18 ve optimum motor yük değerinin ise 2340,91 W olduğu belirlenmiştir.

- Elde edilen R^2 değerleri FÖYT, EGS, FEV, NO_x , HC, CO ve is için sırasıyla %99,2; %99,94; %99,91; %99,68; %97,74; %99,11 ve %99,49 olarak bulunmuştur ve bu değerler oluşturulan RSM modelinin, farklı motor yüklerinde düşük güçlü tek silindirli dizel motor cevapları üzerindeki APY oranının etkisini doğru bir şekilde verme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.
- Optimum PB, APY oranı ve motor yüküne karşılık gelen maksimum FEV değeri %21,53 minimum FÖYT, EGS, NO_x , HC, CO ve is emisyonu değerleri ise sırasıyla 360,2895 g/kWh, 265,44 °C, 360,22 ppm, 16,1 ppm, %0,0318 ve %0,9091 olarak bulunmuştur.
- Optimizasyon ve doğrulama çalışmaları ile elde sonuçlar, APY-dizel yakıt karışımlarının kullanıldığı tek silindirli bir dizel motorda motor performansı ve emisyon parametrelerini optimize etmek ve optimum motor çalışma faktörlerini belirlemek için RSM modellerinin %5'in altında bir hata oranıyla başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın araştırmacılara, gelişmiş motor performansı ve emisyonlar için daha az sayıda testle en iyi çalışma faktörlerini tahmin etme ve optimize etme konusunda yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

Deney sonuçları; dizel yakıtı APY karışımlarının klasik yakıt sistemine sahip motorlarda yakıt sisteminde önemli bir değişiklik yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan deneysel çalışma ile optimum karışım oranı ve püskürtme basıncının belirlenmesiyle fren efektif veriminde, HC, CO, is ve NO_x emisyonlarında önemli iyileşmeler elde edilebileceği tespit edilmiştir.

8.2. ÖNERİLER

- Elde edilen sonuçlar, dizel yakıtı APY karışımlarının klasik dizel motorlarda motor yakıtı olarak kullanılabileceği göstermektedir. Ancak common rail yakıt sistemine sahip dizel motorlarda yakıt testlerinin yapılması önerilmektedir.

- APY'nin viskozitesinin dizel yakıtı göre düşük olması nedeniyle yakıt pompası ve enjektör kaçaklarına karşı dikkatli olunmalı yakıt sistemi belirli aralıklarla kontrol edilmelidir.
- Dizel motorlarda pompa ve enjektörler yakıtla yağlanmaktadır. APY'nin yağlayıcılık özelliği dizel yakıtı göre düşük olduğu için yakıt sistemi elemanlarının belirli zaman aralıklarında kontrolü yapılmalıdır.
- Alternatif yakıtlar motorlarda kullanıldığında motor üzerinde oluşturduğu yan etkiler uzun süreli yapılan ömür testleri ile ortaya çıkmaktadır. Alternatif yakıtın; yakıt sistemi elemanları ve motor parçaları üzerinde yapması muhtemel arızalar uzun süreli testlerle kontrol edilmelidir.
- Biyodizel gibi yüksek viskoziteli yakıtlar düşük viskoziteli APY yakıtları ile belirli oranlarda karıştırılarak APY'nin düşük viskozitesinden kaynaklanan olumsuz etkileri azaltılabilir.
- Püskürtme avansı belirli derecelerde değiştirilerek performans, yanma ve emisyon analizleri yapılabilir.
- Emisyon değerlerinin düşürülmesi amacıyla dizel APY yakıt karışımına alkol ve nanoparçacık ilave edilerek motor testleri yapılabilir.
- APY yakıtının özelliklerini dizel yakıtı özelliklerine daha da yaklaştırılabilmek için tekrar distilasyon işleminden geçirilebilir. Bu sayede performans ve emisyon sonuçları iyileştirilebilir.

Plastik atıkların piroliz yöntemiyle alternatif bir enerji kaynağına dönüştürülmesi prosesinin yaygınlaşması, çevre kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunurken aynı zamanda doğal kaynakların daha ekonomik bir şekilde kullanılmasını da mümkün hale getirecektir. Bununla birlikte, bu yakıt türlerinin geniş ölçekte üretimi ve kullanımı, ilgili sektörün çeşitli kurum ve kuruluşlarından gelecek destekle doğrudan ilişkilidir. APY'nin yakıt olarak kullanımı ile ilgili gerekli yasal düzenlemeler yapılmalı ve APY kullanımı teşvik edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Fan, S., Zhang, Y., Cui, L., Maqsood, T., and Nižetić, S., "Cleaner production of aviation oil from microwave-assisted pyrolysis of plastic wastes", **Journal Of Cleaner Production**, 390: 136102 (2023).
2. Huang, J., Veksha, A., Chan, W. P., Giannis, A., and Lisak, G., "Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes", **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 154: 111866 (2022).
3. Walker, T. R., "Policies to Mitigate Climate Change by Addressing Single-Use Plastic Production and Waste Disposal", **Available At SSRN 3857828**, (2021).
4. Sharma, V., Kalam Hossain, A., Griffiths, G., Duraisamy, G., Krishnasamy, A., Ravikrishnan, V., and Ricardo Sodr , J., "Plastic waste to liquid fuel: A review of technologies, applications, and challenges", **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, 53: 102651 (2022).
5. Keskin, B. and Ko o lu,  ., "Ambalaj Sekt r n n S rd r lebilirli i ve Petrol Bazlı Plastik: Plastik Ambalaj Sekt r n n Petrole Olan Ba ımlılı ının Analizi", **European Journal Of Science And Technology**, (35): 252–258 (2022).
6. Yao, Z., Seong, H. J., and Jang, Y. S., "Environmental toxicity and decomposition of polyethylene", **Ecotoxicology And Environmental Safety**, 242: 113933 (2022).
7. Goto, T., Yamazaki, T., Sugeta, T., Okajima, I., and Sako, T., "Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol", **Wiley Online Library**, 109 (1): 144–151 (2008).
8. Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., and Zhang, Y., "Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt", **Construction And Building Materials**, 25 (2): 886–891 (2011).
9. Alan Korun, S., "Plastik Atıkların Kimyasal Bozundurma ile Faydalı  r nlere D n  m  i in Kataliz r Geli tirilmesi", Y ksek Lisans Tezi, **Malatya  niversitesi Fen Bilimleri Enstit  **, Malatya, (2019).
10. Kumar, S. and Singh, R. K., "Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis", **Brazilian Journal Of Chemical Engineering**, 28 (4): 659–667 (2011).

11. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine", ***Energy***, 36 (1): 212–219 (2011).
12. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "An experimental investigation on a di diesel engine using waste plastic oil with exhaust gas recirculation", ***Fuel***, 89 (8): 1826–1832 (2010).
13. Mani, M., Subash, C., and Nagarajan, G., "Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil", ***Applied Thermal Engineering***, 29 (13): 2738–2744 (2009).
14. Mangesh, V. L., Padmanabhan, S., Tamizhdurai, P., and Ramesh, A., "Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel", ***Journal Of Cleaner Production***, 246: 119066 (2020).
15. Das, A. K., Hansdah, D., Mohapatra, A. K., and Panda, A. K., "Energy, exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend", ***Journal Of The Energy Institute***, 93 (4): 1624–1633 (2020).
16. Singh, T. S., Rajak, U., Dasore, A., Muthukumar, M., and Verma, T. N., "Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters", ***Environmental Technology & Innovation***, 22: 101491 (2021).
17. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., and Singh, R. K., "Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine", ***Energy Conversion And Management***, 74: 323–331 (2013).
18. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine", ***Energy***, 36 (1): 212–219 (2011).
19. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., and Singh, R. K., "Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine", ***Energy Conversion And Management***, 74: 323–331 (2013).
20. Pratoomyod, J. and Laohalidanond, K., "Performance and Emission Evaluation of Blends of Diesel fuel with Waste Plastic Oil in a Diesel Engine", ***Nternational Journal Of Engineering Science And Technology***, (2): 57–63 (2013).
21. Kaimal, V. K. and Vijayabalan, P., "A detailed study of combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil and its blends", ***Energy Conversion And Management***, 105: 951–956 (2015).

22. Kaimal, V. K. and Vijayabalan, P., "A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines", **Waste Management**, 51: 91–96 (2016).
23. Kaimal, V. K. and Vijayabalan, P., "An investigation on the effects of using DEE additive in a di diesel engine fuelled with waste plastic oil", **Fuel**, 180: 90–96 (2016).
24. Panda, A. K., Murugan, S., and Singh, R. K., "Performance and emission characteristics of diesel fuel produced from waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste polypropylene", **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization And Environmental Effects**, 38 (4): 568–576 (2016).
25. Kalargaris, I., Tian, G., and Gu, S., "Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil", **Fuel Processing Technology**, 157: 108–115 (2017).
26. Kumar, K. V. and Puli, R. K., "Effects of Waste Plastic Oil Blends on a Multi Cylinder Spark Ignition Engine", **MATEC Web Of Conferences**, 108: 08005 (2017).
27. Geo, V. E., Sonthalia, A., Aloui, F., and Femilda Josephin, J. S., "Study of engine performance, emission and combustion characteristics fueled with diesel-like fuel produced from waste engine oil and waste plastics", **Frontiers Of Environmental Science And Engineering**, 12 (4): 1–9 (2018).
28. Venkatesan, H., Sivamani, S., Bhutoria, K., and Vora, H. H., "Experimental study on combustion and performance characteristics in a DI CI engine fuelled with blends of waste plastic oil", **Alexandria Engineering Journal**, 57 (4): 2257–2263 (2018).
29. Govinda Rao, B., Datta Bharadwaz, Y., Virajitha, C., and Dharma Rao, V., "Effect of injection parameters on the performance and emission characteristics of a variable compression ratio diesel engine with plastic oil blends – An experimental study", **Energy & Environment**, 29 (4): 492–510 (2018).
30. Gnanamoorthi, V. and Murugan, M., "Effect of DEE and MEA as additives on a CRDI diesel engine fueled with waste plastic oil blend", **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects**, 1–16 (2019).
31. Dobó, Z., Jakab, Z., Nagy, G., Koós, T., Szemmelveisz, K., and Muránszky, G., "Transportation fuel from plastic wastes: Production, purification and SI engine tests", **Energy**, 189: 116353 (2019).
32. Singh, R. K., Ruj, B., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., and Tigga, V. P., "Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics", **Fuel**, 262: 116539 (2020).

33. Das, A. K., Hansdah, D., Mohapatra, A. K., and Panda, A. K., "Energy, exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend", *Journal Of The Energy Institute*, 93 (4): 1624–1633 (2020).
34. Singh, T. S., Rajak, U., Dasore, A., Muthukumar, M., and Verma, T. N., "Performance and ecological parameters of a diesel engine fueled with diesel and plastic pyrolyzed oil (PPO) at variable working parameters", *Environmental Technology & Innovation*, 22: 101491 (2021).
35. Mariappan, M., Panithasan, M. S., and Venkadesan, G., "Pyrolysis plastic oil production and optimisation followed by maximum possible replacement of diesel with bio-oil/methanol blends in a CRDI engine", *Journal Of Cleaner Production*, 312: (2021).
36. Behçet, R. ve Eroğlu, A., "Malatya İlindeki Atık Plastiklerin Dizel Motor Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (1): 563–574 (2021).
37. Bhargavi, M., Vinod Kumar, T., Ali Azmath Shaik, R., Kishore Kanna, S., and Padmanabhan, S., "Effective utilization and optimization of waste plastic oil with ethanol additive in diesel engine using full factorial design", *Materials Today: Proceedings*, 52: 930–936 (2021).
38. Sachuthananthan, B., Krupakaran, R. L., and Balaji, G., "Exploration on the behaviour pattern of a DI diesel engine using magnesium oxide nano additive with plastic pyrolysis oil as alternate fuel", *International Journal Of Ambient Energy*, 1–12 (2018).
39. Sunaryo, Sesotyo, P. A., Saputra, E., and Sasmito, A. P., "Performance and Fuel Consumption of Diesel Engine Fueled by Diesel Fuel and Waste Plastic Oil Blends: An Experimental Investigation", *Automotive Experiences*, 4 (1): 20–26 (2021).
40. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., and Singh, R. K., "Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine", *Energy Conversion And Management*, 74: 323–331 (2013).
41. Premkumar, P., Nalluri, P., and Munaf, A. A., "Effect of waste plastic oil diesel blend on variant injection pressure of a diesel engine", *AIP Conference Proceedings*, 2316 (February): 030020 (2021).
42. Behera, P. and Murugan, S., "Studies on a diesel engine fuelled with used transformer oil at different fuel injection nozzle opening pressures", *International Journal Of Ambient Energy*, 34 (1): 53–59 (2013).

43. İçingür, Y. and Altiparmak, D., "Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions", ***Energy Conversion And Management***, 44 (3): 389–397 (2003).
44. Kumar, S., Dinesha, P., and Rosen, M. A., "Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive", ***Energy***, 185: 1163–1173 (2019).
45. Gumus, M., Sayin, C., and Canakci, M., "The impact of fuel injection pressure on the exhaust emissions of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel–diesel fuel blends", ***Fuel***, 95: 486–494 (2012).
46. Arunprasad, S. and Balusamy, T., "Experimental investigation on the performance and emission characteristics of a diesel engine by varying the injection pressure and injection timing using mixed biodiesel", ***International Journal Of Green Energy***, 15 (6): 376–384 (2018).
47. Simsek, S. and Uslu, S., "Investigation of the effects of biodiesel/2-ethylhexyl nitrate (EHN) fuel blends on diesel engine performance and emissions by response surface methodology (RSM)", ***Fuel***, 275: 118005 (2020).
48. Krishnamoorthi, M., Malayalamurthi, R., and Mohamed Shameer, P., "RSM based optimization of performance and emission characteristics of DI compression ignition engine fuelled with diesel/aegle marmelos oil/diethyl ether blends at varying compression ratio, injection pressure and injection timing", ***Fuel***, 221: 283–297 (2018).
49. Uslu, S., Simsek, S., and Simsek, H., "RSM modeling of different amounts of nano-TiO₂ supplementation to a diesel engine running with hemp seed oil biodiesel/diesel fuel blends", ***Energy***, 266: 126439 (2023).
50. Kumar, A., Pali, H. S., and Kumar, M., "Effective utilization of waste plastic derived fuel in CI engine using multi objective optimization through RSM", ***Fuel***, 355: 129448 (2024).
51. Aytav, E., "Utilization of RSM to optimize the performance and emissions of a single cylinder diesel engine using waste hazelnut biodiesel", ***Case Studies In Thermal Engineering***, 58: 104385 (2024).
52. Simsek, S., Uslu, S., and Simsek, H., "Response surface methodology-based parameter optimization of single-cylinder diesel engine fueled with graphene oxide dosed sesame oil/diesel fuel blend", ***Energy And AI***, 10: 100200 (2022).
53. Kumar, M., Gautam, R., and Ansari, N. A., "Optimisation of an experimental and feasibility research on a CRDI diesel engine based on a blend of waste cooking oil and waste plastic oil using RSM: A value addition for disposed waste oil", ***Journal Of The Energy Institute***, 101564 (2024).

54. Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z., "Plastikler", **Sağlık Projesi Genel Koordinatörlüğü**, Ankara, (1997).
55. Wong, S. L., Ngadi, N., Abdullah, T. A. T., and Inuwa, I. M., "Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review", **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 50: 1167–1180 (2015).
56. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., and Baeyens, J., "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review", **Waste Management (New York, N.Y.)**, 29 (10): 2625–2643 (2009).
57. Bekci, K., "Atık Biyokütle ve Plastik Karışımlarının Torrefaksiyon İle Yakıt Özelliklerinin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (2023).
58. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., and Baeyens, J., "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review", **Waste Management (New York, N.Y.)**, 29 (10): 2625–2643 (2009).
59. Internet: IEA, "Production of Key Thermoplastics, 1980-2050", <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/production-of-key-thermoplastics-1980-2050> (2024).
60. Goodship, V., "Introduction to Plastics Recycling", **Smithers Rapra Technology Limited**, United Kingdom, 174 (2007).
61. Gürses, A., "Introduction to polymer–clay nanocomposites", **Introduction To Polymer-Clay Nanocomposites**, 1–339 (2016).
62. Saçak, M., "Polimer Kimyası", 3. Baskı., **Gazi Kitabevi**, Ankara, (2006).
63. Ortega García, F. de J. and Mar Juárez, E., "Polyethylene waste co-processing in fluid catalytic cracking plants", **Cleaner Engineering And Technology**, 19: 100734 (2024).
64. Zhang, Y., "Polyolefin Formulations for Improved Foaming: Effects of Molecular Structure and Material Properties", (2013).
65. Liu, S. P. and Tu, L. C., "Studies on mechanical properties of dispersing intercalated silane montmorillonite in low density polyethylene matrix", **International Communications In Heat And Mass Transfer**, 38 (7): 879–886 (2011).
66. Vasile, C. and Pascu, M., "Practical Guide to Polyethylene", **Rapra Technology Limited**, 77, 114 (2005).
67. Moad, G., "The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion", **Progress In Polymer Science**, 24 (1): 81–142 (1999).

68. Cicogna, F., Coiai, S., Moliterni, D., Ruggeri, G., Coltelli, M. B., Lazzeri, A., and Passaglia, E., "Co-agent mediated functionalization of LDPE/iPP mixtures for compatibilization of WEEE-recovered polyvinylchloride", ***Polymer International***, 65 (6): 621–630 (2016).
69. Pimpan, V., Sirisook, R., and Chuayjuljit, S., "Synthesis of unsaturated polyester resin from postconsumer PET bottles: Effect of type of glycol on characteristics of unsaturated polyester resin", ***Journal Of Applied Polymer Science***, 88 (3): 788–792 (2003).
70. Hu, E., Zhang, Y., Liu, Z., Yu, J., Li, M., Xiong, Q., and Zeng, Y., "Insight into dechlorination of pyrolysis oil during fast co-pyrolysis of high-alkali coal and polyvinyl chloride (PVC)", ***Chemical Engineering Journal***, 494: 153016 (2024).
71. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya, P. G. C. and Ratnayake, A. S., "The world of plastic waste: A review", ***Cleaner Materials***, 11: 100220 (2024).
72. International Energy Agency, "The Future of Petrochemicals" *Future Petrochemicals*, (2018).
73. Singh, P. and Sharma, V. P., "Integrated Plastic Waste Management: Environmental and Improved Health Approaches", ***Procedia Environmental Sciences***, 35: 692–700 (2016).
74. Hossain, R., Islam, M. T., Ghose, A., and Sahajwalla, V., "Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy", ***Journal Of Cleaner Production***, 368: 133127 (2022).
75. Jambeck, J., Hardesty, B. D., Brooks, A. L., Friend, T., Teleki, K., Fabres, J., Beaudoin, Y., Bamba, A., Francis, J., Ribbink, A. J., Baleta, T., Bouwman, H., Knox, J., and Wilcox, C., "Challenges and emerging solutions to the land-based plastic waste issue in Africa", ***Marine Policy***, 96: 256–263 (2018).
76. Geyer, R., "Production, use, and fate of synthetic polymers", *Plastic Waste and Recycling*, ***Elsevier***, 13–32 (2020).
77. Edward Alegado, J., Miguel Aliño, J., Cheuk Fai Chow, S., Brida Lea Diola, M., Gurrero, L., and Kato, M., "Plastic Atlas Asia Edition: Facts and Figures about the World of Synthetic Polymers", ***Heinrich Boell Stiftung Hong Kong Office, Break Free From Pacific Asia Pacific, Institute For Global Environmental Strategies***, 54 pages (2021).
78. Geyer, R., Jambeck, J. R., and Law, K. L., "Production, use, and fate of all plastics ever made", ***Science Advances***, 3 (7): (2017).
79. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., and Baeyens, J., "The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and

chemicals", *Progress In Energy And Combustion Science*, 36 (1): 103–129 (2010).

80. "Global Plastics Outlook", *OECD*, Paris, (2022).
81. Internet: Plastics Europe, "Plastics - the Facts 2022", <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (2024).
82. İnkaya, N., "Atık Plastiklerin Karayolunda Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, ISPARTA, (2016).
83. Gökkaya, M., "Plastik Atıkların Petrokimyasal Atıklarla Katalitik Eş-Pirolizi", Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2013).
84. Andary, A. L., "Plastics and the Environment", *John Wiley & Sons*, (2003).
85. McKendry, P., "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass", *Bioresource Technology*, 83 (1): 37–46 (2002).
86. Doğan, S., "Kamışın (*phragmites australis*) pirolizi ve piroliz ürünlerinin değerlendirilebilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon , (2017).
87. Bozkurt, P. A., "Atık Lastik-Kömür Karışımlarının Piroliz ve Kritik Üstü Ekstraksiyonla Değerli Ürünlere Dönüştürülmesi", Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2011).
88. Daful, A. G. and R Chandraratne, M., "Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material", *Encyclopedia Of Renewable And Sustainable Materials: Volume 1-5*, 1–5: 370–378 (2020).
89. Yaman, S., "Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks", *Energy Conversion And Management*, 45 (5): 651–671 (2004).
90. Tosun, O., "Kütahya Seyitömer bitümlü şistin düşük yoğunluklu polietilenle (DYPE) karışımının, farklı sıcaklıklarda pirolizinden elde edilen sıvı fazların karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
91. Tiftik, B. E., "Çay Fabrikası Atığının Pirolizi ve Piroliz Ürünlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).
92. Iwasaki, W., "A consideration of the economic efficiency of hydrogen production from biomass", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 28 (9): 939–944 (2003).

93. Demirbaş, A., "Yields of hydrogen-rich gaseous products via pyrolysis from selected biomass samples", *Fuel*, 80 (13): 1885–1891 (2001).
94. Hooshmand Ahoor, A. and Zandi-Atashbar, N., "Fuel production based on catalytic pyrolysis of waste tires as an optimized model", *Energy Conversion And Management*, 87: 653–669 (2014).
95. Alexandre-Franco, M., Fernández-González, C., Alfaro-Domínguez, M., and Gómez-Serrano, V., "Adsorption of cadmium on carbonaceous adsorbents developed from used tire rubber", *Journal Of Environmental Management*, 92 (9): 2193–2200 (2011).
96. Alexandre-Franco, M., Fernández-González, C., Alfaro-Domínguez, M., and Gómez-Serrano, V., "Adsorption of cadmium on carbonaceous adsorbents developed from used tire rubber", *Journal Of Environmental Management*, 92 (9): 2193–2200 (2011).
97. Kar, Y., "Catalytic pyrolysis of car tire waste using expanded perlite", *Waste Management*, 31 (8): 1772–1782 (2011).
98. Dũng, N. A., Mhodmonthin, A., Wongkasemjit, S., and Jitkarnka, S., "Effects of ITQ-21 and ITQ-24 as zeolite additives on the oil products obtained from the catalytic pyrolysis of waste tire", *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, 85 (1–2): 338–344 (2009).
99. Öztürk, S., Seymenler, H., Akgül, A., and Uca, Y., "Evsel katı atıklardan elektrik üretimi: Bursa örneği", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26 (1): 215–225 (2024).
100. Adekomaya, O. and Majazi, T., "Incineration and energy recovery from waste materials: Assessment of environmental impact of emitted gases", *Engineering And Applied Science Research*, 47 (4): 458–464 (2020).
101. Tan, E., A. R. Tarakçılar, and R. Yurtseven. "Plastik geri kazanımları ve plastik atıklardan plastik üretim teknolojileri." *Metal Dünyası Dergisi* (2007)
102. "International Energy Outlook 2013", Washington, DC 20585, (2013).
103. Pan, H., Pournazeri, S., Princevac, M., Miller, J. W., Mahalingam, S., Khan, M. Y., Jayaram, V., and Welch, W. A., "Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 39 (21): 11336–11345 (2014).
104. Kumar, S., Cho, J. H., Park, J., and Moon, I., "Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 22: 46–72 (2013).
105. Uslu, S. and Celik, M. B., "Combustion and emission characteristics of isoamyl alcohol-gasoline blends in spark ignition engine", *Fuel*, 262: 116496 (2020).

106. Kaewbuddee, C., Maithomklang, S., Aengchuan, P., Wiangkham, A., Klinkaew, N., Ariyarat, A., and Sukjit, E., "Effects of Alcohol-Blended Waste Plastic Oil on Engine Performance Characteristics and Emissions of a Diesel Engine", *Energies* **2023**, Vol. 16, Page 1281, 16 (3): 1281 (2023).
107. Yeşilyurt, M. K., "Dizel Yakıtına Farklı Ağır Alkoller (1-Bütanol, 1-Pentanol ve 1-Hekzanol) İlave Edilmesinin Tek Silindirli Bir Dizel Motorunun Performans, Yanma ve Egzoz Emisyon Karakteristiklerine Etkileri", *Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi*, 12 (2): 397–426 (2020).
108. Xingcai, L., Zhen, H., Wugao, Z., and Degang, L., "The influence of ethanol additives on the performance and combustion characteristics of diesel engines", *Combustion Science And Technology*, 176 (8): 1309–1329 (2004).
109. Li, F., Yi, B., Fu, W., Song, L., Liu, T., Hu, H., and Lin, Q., "Experimental study on spray characteristics of long-chain alcohol-diesel fuels in a constant volume chamber", *Journal Of The Energy Institute*, 92 (1): 94–107 (2019).
110. Zhang, Y., Gao, S., Zhang, Z., Li, W., Yuan, T., Tan, D., Duan, L., and Yang, G., "A comprehensive review on combustion, performance and emission aspects of higher alcohols and its additive effect on the diesel engine", *Fuel*, 335: 127011 (2023).
111. Rajesh Kumar, B. and Saravanan, S., "Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 60: 84–115 (2016).
112. Rasskazchikova, T. V., Kapustin, V. M., and Karpov, S. A., "Ethanol as high-octane additive to automotive gasolines. Production and use in russia and abroad", *Chemistry And Technology Of Fuels And Oils*, 40 (4): 203–210 (2004).
113. Manzetti, S. and Andersen, O., "A review of emission products from bioethanol and its blends with gasoline. Background for new guidelines for emission control", *Fuel*, 140: 293–301 (2015).
114. Zhu, L., Cheung, C. S., Zhang, W. G., and Huang, Z., "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends", *Fuel*, 90 (5): 1743–1750 (2011).
115. Yilmaz, N., Vigil, F. M., Donaldson, A. B., and Darabseh, T., "Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration", *Fuel*, 115: 790–793 (2014).
116. Labeckas, G., Slavinskas, S., and Mažeika, M., "The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine", *Energy Conversion And Management*, 79: 698–720 (2014).

117. Carlucci, A. P., de Risi, A., Laforgia, D., and Naccarato, F., "Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine", *Energy*, 33 (2): 256–263 (2008).
118. Wang, Z., Du, G., Wang, D., Xu, Y., and Shao, M., "Combustion process decoupling of a diesel/natural gas dual-fuel engine at low loads", *Fuel*, 232: 550–561 (2018).
119. Sezgin, B., Bilen, K., Çelik, V., "Bir Dizel Motorun Doğal Gazla Çalışır Hale Getirilmesi Ve Dönüştürülmüş Motorun Performans ve Egzoz Emisyonunun deneysel analizi", *Mühendis Ve Makina*, 54 (642): 343–354 (2013).
120. Hordeski, M. F., "Alternative Fuels—The Future of Hydrogen", *Alternative Fuels—The Future Of Hydrogen*, (2020).
121. Kalinci, Y., Hepbasli, A., and Dincer, I., "Biomass-based hydrogen production: A review and analysis", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 34 (21): 8799–8817 (2009).
122. Balat, H. and Kirtay, E., "Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 35 (14): 7416–7426 (2010).
123. Demirtaş, G., "Biyodizel N-Oktanöl Yakıt Karışımına Nanopartikül İlavesinin Motor Performansı ve Yanma Üzerine Etkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2023).
124. Sen, S. and Çelik, M. B., "Modeling the effect of plastic oil obtained from XLPE cable waste on diesel engine performance and emission parameters with the response surface method", *Science And Technology For Energy Transition*, 79: 58 (2024).
125. Doğan, O., "Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
126. Damodharan, D., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Rajesh Kumar, B., and Saravanan, S., "Extraction and characterization of waste plastic oil (WPO) with the effect of n-butanol addition on the performance and emissions of a DI diesel engine fueled with WPO/diesel blends", *Energy Conversion And Management*, 131: 117–126 (2017).
127. Janyalertadun, A., Santaweek, C., and Sanongraj, S., "Fuel production, performance, and emission of a CI engine using waste plastics oil", *World Journal Of Engineering*, 14 (2): 114–120 (2017).
128. Khatha, W., Ekarong, S., Somkiat, M., and Jiraphon, S., "Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste

Plastics", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 717 (1): 012001 (2020).

129. Erdogan, S., "Recycling of Waste Plastics into Pyrolytic Fuels and Their Use in IC Engines", *Sustainable Mobility, IntechOpen*, (2020).
130. Geo, V. E., Sonthalia, A., Aloui, F., and Femilda Josephin, J. S., "Study of engine performance, emission and combustion characteristics fueled with diesel-like fuel produced from waste engine oil and waste plastics", *Frontiers Of Environmental Science And Engineering*, 12 (4): 1–9 (2018).
131. Arpa, O., Yumrutas, R., and Demirbas, A., "Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation", *Applied Energy*, 87 (1): 122–127 (2010).
132. Boulanger, J., Neill, W. S., Liu, F., and Smallwood, G. J., "Investigating renewable fuel combustion I: Comparative simulations of a diesel engine fuelled with n-c12 alkane and n-c18 fatty acid-derived liquid-property fuel", *International Journal Of Environmental Studies*, 64 (4): 401–418 (2007).
133. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines", *Waste Management*, 28 (12): 2743–2749 (2008).
134. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", Internal Combustion Engine Fundamentals Second Edition, *McGraw-Hill Education*, 64–65 (2018).
135. Ashraful, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Rizwanul Fattah, I. M., Imtenan, S., Shahir, S. A., and Mobarak, H. M., "Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review", *Energy Conversion And Management*, 80: 202–228 (2014).
136. Weidmann, K., Menrad, H., Reders, K., and Hutcheson, R., "Diesel fuel quality effects on exhaust emissions", *SAE Transactions*, 863–873 (1988).
137. Ejder, S. B., "Etanol-Dizel, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Kullanımının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2007).
138. Li, D. G., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-Gao, Z., and Jian-Guang, Y., "Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines", *Renewable Energy*, 30 (6): 967–976 (2005).
139. Erdoğan, S., "Bitkisel ve Hayvansal Biyodizel Kullanılan Bir Dizel Motorun Performans, Emisyon ve Yanma Karakteristiklerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile İncelenmesi.", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2019).

140. Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., "İçten Yanmalı Motorlar Cilt-I", **Teknik Eğitim Vakfı**, ANKARA, (1995).
141. Çelik, M., "Biyodizel Yakıt Özelliklerinin Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2015).
142. Aktaş, F., "Bir Dizel Motorda Çift Yakıt Olarak Propan-Dizel Kullanımının Yanma Rejimine, Motor Performansına ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2021).
143. Merker, G., Schwarz, C., Stiesch, G., and Otto, F., "Simulating Combustion: Simulation of Combustion and Pollutant Formation for Engine-Development", **Springer Science & Business Media**, (2005).
144. Sakthivel, G., Ilangkumaran, M., and Gaikwad, A., "A hybrid multi-criteria decision modeling approach for the best biodiesel blend selection based on ANP-TOPSIS analysis", **Ain Shams Engineering Journal**, 6 (1): 239–256 (2015).
145. Behçet, R., Oktay, H., Çakmak, A., and Aydın, H., "Comparison of exhaust emissions of biodiesel-diesel fuel blends produced from animal fats", **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 46: 157–165 (2015).
146. Pulkrabek, W. W., "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", **Pearson Prentice Hall**, 478 (2004).
147. ŞEN, S., "Hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2012).
148. Brown, B. R., "Combustion Data Acquisition and Analysis", Leicester, (2001).
149. Rufina R, D. J., Uthayakumar, H., and Thangavelu, P., "Prediction of the size of green synthesized silver nanoparticles using RSM-ANN-LM hybrid modeling approach", **Chemical Physics Impact**, 6: 100231 (2023).
150. Simsek, S., Uslu, S., and Simsek, H., "Proportional impact prediction model of animal waste fat-derived biodiesel by ANN and RSM technique for diesel engine", **Energy**, 239: 122389 (2022).
151. Aydın, M., Uslu, S., and Bahattin Çelik, M., "Performance and emission prediction of a compression ignition engine fueled with biodiesel-diesel blends: A combined application of ANN and RSM based optimization", **Fuel**, 269: 117472 (2020).
152. Dey, S., Reang, N. M., Das, P. K., and Deb, M., "Comparative study using RSM and ANN modelling for performance-emission prediction of CI engine fuelled

- with bio-diesohol blends: A fuzzy optimization approach", *Fuel*, 292: 120356 (2021).
153. Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., and Escaleira, L. A., "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry", *Talanta*, 76 (5): 965–977 (2008).
 154. Uslu, S., "Optimization of diesel engine operating parameters fueled with palm oil-diesel blend: Comparative evaluation between response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN)", *Fuel*, 276: 117990 (2020).
 155. Koç, B. ve Ertekin, F. K., "Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları", *Gıda*, 35 (1): 1–8 (2010).
 156. Uslu, S., "Atık Lastik Piroлиз Yağı-Dizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorda Emisyon ve Performansın Eşzamanlı Tahminine Yönelik Bir Yanıt Yüzey Metodolojisinin Geliştirilmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3): 1261–1278 (2019).
 157. Karagöz, M., Ağbulut, Ü., and Sarıdemir, S., "Waste to energy: Production of waste tire pyrolysis oil and comprehensive analysis of its usability in diesel engines", *Fuel*, 275: 117844 (2020).
 158. Simsek, S. and Uslu, S., "Comparative evaluation of the influence of waste vegetable oil and waste animal oil-based biodiesel on diesel engine performance and emissions", *Fuel*, 280: 118613 (2020).
 159. Simsek, S., Uslu, S., and Coştu, R., "A novel approach to study the effect of motor silk-added pyrolysis tire oil on performance and emission characteristics of a diesel engine", *Fuel*, 288: 119668 (2020).
 160. Kalargaris, I., Tian, G., and Gu, S., "Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil", *Fuel Processing Technology*, 157: 108–115 (2017).
 161. Wong, S. L., Ngadi, N., Abdullah, T. A. T., and Inuwa, I. M., "Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 50: 1167–1180 (2015).
 162. Senthilkumar, P. and Sankaranarayanan, G., "Effect of Jatropha methyl ester on waste plastic oil fueled DI diesel engine", *Journal Of The Energy Institute*, 89 (4): 504–512 (2016).
 163. Khatha, W., Ekarong, S., Somkiat, M., and Jiraphon, S., "Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 717 (1): 012001 (2020).

164. Çat, S., Aydın, M., Uslu, S., Çelik, M. B., and Sağiroğlu, S., "Atık Biyodizel Kullanılan Bir Dizel Motorda Püskürtme Basıncının Değiştirilmesinin Performans ve Emisyonlara Etkisi", *14th International Combustion Symposium*, Karabük, 108–112 (2018).
165. Galande, S. D., Pangavhane, D. R., and Deshmukh, K. B., "The influence of injection pressure and exhaust gas recirculation on a VCR engine fueled by microalgae biodiesel", *Heat Transfer*, (2024).
166. Kumar, P. S. and Sankaranarayanan, G., "Investigation on environmental factors of waste plastics into oil and its emulsion to control the emission in DI diesel engine", *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 134: 440–444 (2016).
167. Mani, M., Nagarajan, G., and Sampath, S., "Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine", *Energy*, 36 (1): 212–219 (2011).
168. Meenakshi, V., Booma Devi, P., and Al Obaid, S., "Exploring the relationship between fuel injection pressure and nanoparticle additives on the combustion, performance and emission characteristics of diesel engine fueled with animal waste-based blends", *Fuel*, 372: 132065 (2024).
169. Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J., and Tazerout, M., "Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel – Part 2: Engine test analysis", *Fuel*, 85 (17–18): 2646–2652 (2006).
170. Gopinath, S., Devan, P. K., Mohan, C., Krishna Rao, L. R., Lokesh Kumar, P., and Vara Prasad, S., "A review on influence of injection timing and injection pressure on DI diesel engine fuelled with low viscous fuel", *Materials Today: Proceedings*, 33: 280–286 (2020).
171. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends", *Fuel Processing Technology*, 89 (2): 152–159 (2008).
172. Aydın, M., "Tek Silindirli Bir Dizel Motor İçin Elektronik Kontrollü Yakıt Püskürtme Sisteminin Geliştirilmesi ve Performansının Ölçülmesi", Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
173. Ertürk, T., Arslan, A., Tunçer, E., Doğan, B., and Yeşilyurt, M. K., "The assessment of performance and emissions characteristics of a CI engine running on waste tyre pyrolysis oil as an alternative fuel and its blends with diesel fuel", *International Journal Of Energy Studies*, 8 (4): 831–847 (2023).
174. Dafsari, R. A., Lee, H. J., Han, J., Park, D. C., and Lee, J., "Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel", *Fuel*, 240: 179–191 (2019).

175. Güngör, C., Serin, H., Özcanlı, M., Özcanlı, M., Serin, S., and Aydın, K., "Engine Performance and Emission Characteristics of Plastic Oil Produced from Waste Polyethylene and Its Blends with Diesel Fuel", *International Journal Of Green Energy*, 12 (1): 98–105 (2015).
176. Dixit, S., Verma, V., and Dixit, G., "Performance and emission analysis of OilJFWPB recovered by the oxidative thermal degradation of the mixture of waste polyethylene and Jute", *Alexandria Engineering Journal*, 57 (4): 3265–3272 (2018).
177. Govinda Rao, B., Datta Bharadwaz, Y., Virajitha, C., and Dharma Rao, V., "Effect of injection parameters on the performance and emission characteristics of a variable compression ratio diesel engine with plastic oil blends – An experimental study", *Energy And Environment*, 29 (4): 492–510 (2018).
178. Tomar, M., Jain, A., Pujari, P. C., Dewal, H., and Kumar, N., "Potentials of waste plastic pyrolysis oil as an extender fuel for diesel engine", *Arabian Journal Of Geosciences*, 13 (13): (2020).
179. Kumar, S., Prakash, R., Murugan, S., and Singh, R. K., "Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine", *Energy Conversion And Management*, 74: 323–331 (2013).
180. Demirtaş, G., Balki, M. K., and Sayin, C., "Effects of a CRDI Engine Running on Biodiesel, n-Octanol and Nanoparticle Blended Nanofuel on Performance, Emissions and Combustion", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 1–16 (2023).
181. Geo, V. E., Sonthalia, A., Aloui, F., and Femilda Josephin, J. S., "Study of engine performance, emission and combustion characteristics fueled with diesel-like fuel produced from waste engine oil and waste plastics", *Frontiers Of Environmental Science And Engineering*, 12 (4): 1–9 (2018).
182. Kaewbuddee, C., Sukjit, E., Srisertpol, J., Maithomklang, S., Wathakit, K., Klinkaew, N., Liplap, P., and Arjarn, W., "Evaluation of Waste Plastic Oil-Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engines", *Energies 2020, Vol. 13, Page 2823*, 13 (11): 2823 (2020).
183. Kidoguchi, Y., Yang, C., Kato, R., and Miwa, K., "Effects of fuel cetane number and aromatics on combustion process and emissions of a direct-injection diesel engine", *JSAE Review*, 21 (4): 469–475 (2000).
184. Qi, D. H., Chen, H., Geng, L. M., and Bian, Y. Z., "Effect of diethyl ether and ethanol additives on the combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel blended fuel engine", *Renewable Energy*, 36 (4): 1252–1258 (2011).
185. Devaraj, J., Robinson, Y., and Ganapathi, P., "Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis

oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine", *Energy*, 85 (C): 304–309 (2015).

186. Thiruvengkatachari, S., Saravanan, C. G., Raman, V., Vikneswaran, M., Josephin, J. S. F., and Varuvel, E. G., "An experimental study of the effects of fuel injection pressure on the characteristics of a diesel engine fueled by the third generation Azolla biodiesel", *Chemosphere*, 308: 136049 (2022).
187. Sundar, S. P., Vijayabalan, P., Sathyamurthy, R., Said, Z., and Thakur, A. K., "Experimental and feasibility study on nano blended waste plastic oil based diesel engine at various injection pressure: A value addition for disposed plastic food containers", *Fuel Processing Technology*, 242: 107627 (2023).
188. Padmanaba Sundar, S. S. and Vijayabalan, P., "Pyrolysis of disposed plastic food containers and its potential in diesel engine by doping with nano particle at optimum injection timing", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 47: 101537 (2021).
189. Rakopoulos, C. D. and Giakoumis, E. G., "Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis", Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis, *Springer London*, 1–390 (2009).
190. Ma, Z., Huang, Z., Li, C., Wang, X., and Miao, H., "Effects of Fuel Injection Timing on Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel–Propane Blends", *Energy And Fuels*, 21 (3): 1504–1510 (2007).
191. Donghui, Q., Longbao, Z., and Shenghua, L., "Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a naturally aspirated, direct injection engine fuelled with a liquid petroleum gas/diesel blend", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 219 (2): 253–261 (2005).
192. İçingür, Y. and Altıparmak, D., "Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions", *Energy Conversion And Management*, 44 (3): 389–397 (2003).
193. Ren, Y., Huang, Z., Miao, H., Jiang, D., Zeng, K., Liu, B., and Wang, X., "Combustion and emission characteristics of a direct-injection diesel engine fueled with diesel-diethyl adipate blends", *Energy And Fuels*, 21 (3): 1474–1482 (2007).
194. Mani, M., Subash, C., and Nagarajan, G., "Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using waste plastic oil", *Applied Thermal Engineering*, 29 (13): 2738–2744 (2009).
195. Kumar, M., Gautam, R., and Ansari, N. A., "Optimisation of an experimental and feasibility research on a CRDI diesel engine based on a blend of waste

cooking oil and waste plastic oil using RSM: A value addition for disposed waste oil", *Journal Of The Energy Institute*, 101564 (2024).

196. Simsek, S., Uslu, S., Simsek, H., and Uslu, G., "Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition (SI) engine running on gasoline-LPG blends", *Fuel Processing Technology*, 221: 106947 (2021).
197. Uslu, S. and Celik, M., "Response surface methodology-based optimization of the amount of cerium dioxide (CeO₂) to increase the performance and reduce emissions of a diesel engine fueled by cerium dioxide/diesel blends", *Energy*, 266: 126403 (2023).



ÖZGEÇMİŞ

Sedat ŞEN ilk ve orta öğrenimini Bursa’da tamamladı. Bursa Atatürk Lisesinden 2004 yılında mezun oldu. 2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Öğretmenliği Programına yerleşti. 2010 yılında mezun oldu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2012 yılı Eylül ayında Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tokat Meslek Yüksekokulu Makine programında öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı kurumda çalışmalarına devam etmektedir.