

**ATIK TAŞIT LASTİĞİNDEN ÜRETİLEN PİROLİTİK
YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

**2012
DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

OĞuzhan DOĞAN

**ATIK TAŞIT LASTİĞİNDEN ÜRETİLEN PİROLİTİK YAKITIN BİR DİZEL
MOTORDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Oğuzhan DOĞAN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2012**

Oğuzhan DOĞAN tarafından hazırlanan “ATIK TAŞIT LASTİĞİNDEN ÜRETİLEN PİROLİTİK YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK



Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 18/06/2012

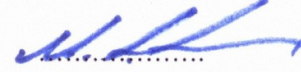
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Veli ÇELİK (KKÜ)



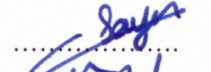
Üye : Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI (KOÜ)



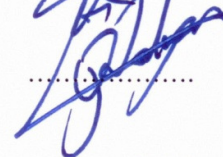
Üye : Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Cenk SAYIN (MÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN (KBÜ)



...../...../2012

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN



Fen Bilimleri 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.”

Oğuzhan DOĞAN

ÖZET

Doktora Tezi

ATIK TAŞIT LASTİĞİNDEN ÜRETİLEN PİROLİTİK YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Oğuzhan DOĞAN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK

Haziran 2012, 177 sayfa

Bu çalışmada, kullanım ömrünü doldurmuş atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorlar için alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bunun için, ülkemiz atık lastik sektöründen rastgele toplanan atık taşıt lastikleri kullanılarak, sanayi ölçekli bir dönüşüm firması bünyesinde vakum pirolizi yardımı ile ham lastik pirolitik yakıtı (HLPY) üretilmiştir. Motor testleri öncesinde, HLPY'nin özellikleri distilasyonlu asit-kil yöntemi ve oksidatif desülfürüzyon yöntemi ile iyileştirilerek lastik pirolitik yakıt (LPY) elde edilmiştir. Testler; tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda standart dizel yakıtı, LPY20 (%20 LPY+%80 dizel yakıt), LPY40, LPY60, LPY80 ve LPY100 yakıtları ile, değişik yük (%25, %50, %75, %100), değişik hız (1400, 2000, 2600, 3200 d/d) ve farklı püskürtme basınçlarında (185, 205, 225, 245 bar) gerçekleştirilmiştir.

Motor hızı, motor yükü, yakıt türü ve püskürtme basıncının tork, güç, fren özgül enerji tüketimi, efektif verim, NO_x, HC, CO, is emisyonlarına etkileri incelenmiş ve yanma karakteristikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Deney sonuçları; motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin standart dizel yakıtta %40'a kadar LPY ilavesinin motor performansı ve yanma karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemeden bazı egzoz emisyonlarında (CO, HC ve is) iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, standart dizel yakıtta %40'tan fazla LPY ilavesi motorun bütün çalışma koşullarında tutuşma gecikmesini önemli ölçüde artırarak motor performansını, emisyonları ve yanma karakteristiklerini olumsuz etkilemiştir. Tutuşma gecikmesinin aşırı artması yüksek oranda LPY içeren yakıt karışımlarının yüksek hızlı dizel motorlar için uygun olmadığını göstermiştir. Ayrıca yakıt püskürtme basıncının artışı motor performansı, emisyonlar ve yanma karakteristikleri açısından olumlu katkı sağlamıştır. Bütün yakıt türleri için performans ve emisyon bakımından optimum püskürtme basıncının motor yüküne bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıntılı yanma analizleri ile test yakıtlarının silindir basıncı, maksimum basınç, basınç artış hızı, ısı açığa çıkış oranı ve yanma periyotları incelenmiştir. Dizel yakıtta ilave edilen pirolitik yakıtın silindir basıncının ve ısı açığa çıkışının oluşumunu geciktirdiği, maksimum silindir basıncı, basınç artış hızını ve ısı açığa çıkış oranını artırdığı, tutuşma gecikmesini ve ani yanma periyodunu uzattığı, difüzyon kontrollü yanma periyodunu ve toplam yanma süresini kısalttığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Atık taşıt lastiği, Pirolitik yakıt, Performans, Emisyon, Yanma analizi.

Bilim Kodu : 914.1.038

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF UTILIZATION OF SCRAP TIRE DERIVED PYROLYTIC FUEL IN A DIESEL ENGINE

Oğuzhan DOĞAN

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Education**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK

June 2012, 177 pages

In this study, tire derived fuel produced from scrap tire was evaluated as an alternative-fuel source for diesel engines. For this purpose, by using the scrap tires collected randomly from Turkey's scrap tire sector, the raw tire derived fuel was obtained at an industrial-scale plant by a vacuum pyrolysis process. The tire derived pyrolytic fuel (TDF) properties were refined by using acid-clay-distillation method with the oxidative desulfurization before engine tests. The engine tests were performed in a single-cylinder DI diesel engine under various engine loads (25%, 50%, 75%, 100% load), various engine speeds (1400, 2000, 2600, 3200 rpm) and different fuel injection pressure conditions by using standard diesel fuel, TDF20 (20%TDF+80% standard diesel), TDF40, TDF60, TDF80 and TDF100 fuel blends.

The effect of engine speed, engine load, fuel type and fuel injection pressure on engine performance (torque, power, specific energy consumption, effective efficiency) and emissions (NO_x, HC, CO, smoke) were investigated and detailed combustion characteristics were analysed.

Without any modification in the engine fuel system, the overall test results showed that tire derived fuel addition into diesel fuel up to 40% improved some engine emissions (CO, HC, smoke) without deteriorating in the engine performance. However, more than 40% TDF addition into diesel fuel effected the engine performance, emissions and combustion characteristics negatively, as the ignition delay was prolonged significantly during all engine test conditions. Excessively increased ignition delay showed that the fuel blends composed of a higher ratio TDF was unsuitable for the high speed diesel engines. Furthermore, increasing fuel injection pressure provided some advantage in the view point of engine performance, emissions and combustion characteristics. It was seen that the optimum injection pressure was varied depending on the engine load for all test fuels in the view point of engine performance and emissions. By using the measured cylinder gas pressure, the maximum cylinder pressure, pressure rise rate, heat release rate and combustion periods of the test fuels were examined with the detailed combustion analysis. It was seen that the addition of TDF into diesel fuel retarded the formation of cylinder gas pressure and heat release rate, increased the maximum cylinder gas pressure, pressure rise rate and maximum heat release rate, extended the ignition delay and premixed combustion period, and shortened the diffusive combustion period and total combustion duration.

Key Words : Scrap tire, Tire derived pyrolytic fuel, Performance, Emission, Combustion analysis.

Science Code : 914.1.038

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam ve Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Bahattin ÇELİK'e, kıymetli görüş ve önerileri ile tezime katkıda bulunan değerli tez izleme komitesi üyelerine ve Karabük Üniversitesi Otomotiv Anabilim Dalı akademik personeline, tez çalışmalarımda yardımlarını gördüğüm Sayın Arş. Gör. Mustafa AYDIN'a ve tüm olanaklarını bizim için seferber eden Sayın En-Tek Geri Dönüşüm Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür ederim.

En sıkıntılı anlarımda desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Marli Hanım'a ve biricik kızımız Tuana Fatma'ya, hayatım boyunca gösterdikleri sevgi, ilgi ve alakaları için kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
ATIK TAŞIT LASTİKLERİ VE PİROLİZİ	4
2.1. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.2. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN PİROLİZİ	8
BÖLÜM 3	12
DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİ, YANMA VE EMİSYONLARIN OLUŞUMU	12
3.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE PERFORMANSA ETKİLERİ	12
3.1.1. Setan Sayısı	13
3.1.2. Yakıtın Kükürt İçeriği	15
3.1.3. Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği	17
3.1.4. Yakıtın Yoğunluğu	19
3.1.5. Yakıtın Viskozitesi	20

Sayfa

3.1.6. Yakıtın Enerji İçeriği.....	21
3.1.7. Yakıtın Kül İçeriği	22
3.1.8. Atık Karbon İçeriği	22
3.1.9. Parlama Noktası.....	22
3.1.10. Soğuk Akış Özellikleri	23
3.1.11. Yağlayıcılık Özelliği ve Oksidasyon Kararlılığı	23
3.2. DİZEL MOTORLARDA KARIŞIM TEŞKİLİ VE YANMA	24
3.3. DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU	33
3.3.1. Partikül Madde ve Is Emisyonları.....	34
3.3.2. Nitrojen Oksit (NO _x) Emisyonları	36
3.3.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları	39
3.3.4. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları.....	43
BÖLÜM 4	44
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	44
4.1. ATIKLARDAN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA KULLANIMI.....	44
4.2. YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ	48
4.3. ATIK KÖKENLİ YAKITLARIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ	50
BÖLÜM 5	53
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
5.1. PİROLİTİK YAKITIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE NİHAİ YAKIT ÖZELLİKLERİ.....	53
5.1.1. Maliyet Analizi	60
5.2. DENEY DONANIMI	61
5.2.1. Motor Test Dinamometresi.....	63
5.2.2. Deney Motorunun Özellikleri.....	63
5.2.3. Emisyon ve Is Ölçüm Ünitesi.....	65
5.2.4. Yakıt Tüketimi Ölçüm Ünitesi	65

5.2.5. Silindir İçi ve Yakıt Hat Basıncının Ölçümü.....	67
5.3. DİZEL MOTORLARDA YANMA ANALİZİ.....	69
5.3.1. Motor Hacminin Anlık Değişimi.....	69
5.3.2. Silindir Basıncının Analizi	71
5.3.3. Isı Açığa Çıkış Oranının (İÇÖ) ve Yanma Safhalarının Analizi.....	73
5.4. DENEY ŞARTLARI VE DENEYLERİN YAPILIŞI.....	78
BÖLÜM 6	80
DENEYSEL BULGULAR	80
6.1. MOTOR HIZININ ETKİSİ	80
6.1.1. Motor Performansı	80
6.1.2. Egzoz Emisyonları	85
6.1.3. Yanma Karakteristikleri	88
6.2. MOTOR YÜKÜNÜN VE YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ ETKİSİ	100
6.2.1. Motor Performansı	101
6.2.2. Egzoz Emisyonları	104
6.2.3. Yanma Karakteristikleri	108
BÖLÜM 7	124
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR.....	128
EK AÇIKLAMALAR A. DENEY SONUÇLARINA AİT ÇİZELGELER.....	141

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Taşıt tekerleği kesiti.....	5
Şekil 2.2. Ham lastik pirolitik yakıt (HLPY) elde etme süreci.....	10
Şekil 2.3. Ham lastik pirolitik yakıtın (HLPY) genel görüntüsü.....	11
Şekil 3.1. Dizel motorlarda yakıt hüzmesinin oluşumu.	25
Şekil 3.2. Püskürtme hüzmesinde karışım teşkili ve karışım oranlarının değişimi.....	26
Şekil 3.3. Dizel motorlarda karışım teşkili ve yanmanın zaman ölçeği.....	29
Şekil 3.4. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma periyotları.....	30
Şekil 3.5. Ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodunda yanmanın ve emisyonların oluşumu.....	33
Şekil 3.6. Partikül kompozisyonu ve is oluşumu.....	35
Şekil 3.7. Tutuşma gecikmesi ve sonrası HC emisyonlarının oluşumu.....	41
Şekil 5.1. Ham pirolitik yakıtın kirletici bileşenlerinin uzaklaştırılması.....	53
Şekil 5.2. Vakumlu distilasyon ünitesi şematik görünümü.....	55
Şekil 5.3. Vakumlu distilasyon ünitesinin genel görünümü.....	55
Şekil 5.4. Yakıtların genel görünümleri.....	56
Şekil 5.5. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	62
Şekil 5.6. Deney düzeneğinin genel görünümü.....	62
Şekil 5.7. Motor testlerinde kullanılan dizel motorun genel görünümü.....	64
Şekil 5.8. Egzoz gaz analiz cihazının ve opasitemetrenin genel görünümü.....	65
Şekil 5.9. Yakıt tüketimi ölçümü için kullanılan hassas terazi.....	66
Şekil 5.10. Sensörlerin genel görünümleri.....	68
Şekil 5.11. TFX yazılımının ekran görüntüsü.....	69
Şekil 5.12. İçten yanmalı motorlarda krank-biyel mekanizması.....	70
Şekil 5.13. Silindir hacminin anlık değişimi.....	71
Şekil 5.14. Çevrimden çevrime oluşan farklılıklarının değişimi.....	71
Şekil 5.15. Basınç artış hızının değişimi.....	72
Şekil 5.16. Hesaplanan yanma parametrelerinin özet grafiği.....	76
Şekil 5.17. Püskürtme başlangıcının belirlenmesi.....	76
Şekil 5.18. Silindir içi ortalama gaz sıcaklıklarının değişimi.....	78

Sayfa

Şekil 6.1. Motor hızının ve LPY içeriğinin motor torkuna etkisi.	81
Şekil 6.2. Motor hızının ve LPY içeriğinin motor gücüne etkisi.....	81
Şekil 6.3. Motor hızının ve LPY içeriğinin FÖET'ye etkisi.	82
Şekil 6.4. Motor hızının ve LPY içeriğinin efektif verime etkisi.	83
Şekil 6.5. Motor hızının ve LPY içeriğinin T_{Egzoz} 'a etkisi.	84
Şekil 6.6. Motor hızının ve LPY içeriğinin NO_x emisyonlarına etkisi.	85
Şekil 6.7. Motor hızının ve LPY içeriğinin HC emisyonlarına etkisi.....	86
Şekil 6.8. Motor hızının ve LPY içeriğinin CO emisyonlarına etkisi.....	87
Şekil 6.9. Motor hızının ve LPY içeriğinin is emisyonlarına etkisi.....	88
Şekil 6.10. Motor hızının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi.....	89
Şekil 6.11. Motor hızının ve LPY içeriğinin P_{maks} 'a etkisi.....	90
Şekil 6.12. Motor hızının ve LPY içeriğinin P_{maks} 'ın yerine etkisi.....	91
Şekil 6.13. Motor hızının ve LPY içeriğinin basınç artış hızına etkisi.	92
Şekil 6.14. Motor hızının ve LPY içeriğinin İÇO'ya etkisi.	93
Şekil 6.15. Motor hızının ve LPY içeriğinin $İÇO_{maks}$ 'a etkisi.	94
Şekil 6.16. Motor hızının ve LPY içeriğinin püskürtme gecikmesine etkisi.	95
Şekil 6.17. Motor hızının ve LPY içeriğinin tutuşma gecikmesine etkisi.....	96
Şekil 6.18. Motor hızının ve LPY içeriğinin ani yanma periyoduna etkisi.....	97
Şekil 6.19. Motor hızının ve LPY içeriğinin difüzyon kontrollü yanma periyoduna etkisi.	98
Şekil 6.20. Motor hızının ve LPY içeriğinin toplam yanma süresine etkisi.	99
Şekil 6.21. Motor hızının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort.gaz}$ 'a etkisi.	100
Şekil 6.22. Motor hızının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın yerine etkisi.	100
Şekil 6.23. Motor yükünün ve püskürtme basıncının FÖET'ye etkisi.....	102
Şekil 6.24. Motor yükünün ve püskürtme basıncının efektif verime etkisi.	103
Şekil 6.25. Motor yükünün ve püskürtme basıncının T_{Egzoz} 'a etkisi.	104
Şekil 6.26. Motor yükünün ve püskürtme basıncının NO_x emisyonlarına etkisi.....	105
Şekil 6.27. Motor yükünün ve püskürtme basıncının HC emisyonlarına etkisi.....	106
Şekil 6.28. Motor yükünün ve püskürtme basıncının CO emisyonlarına etkisi.....	107
Şekil 6.29. Motor yükünün ve püskürtme basıncının is emisyonlarına etkisi.....	108
Şekil 6.30. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi (%25 ve %50 Yük).	109

Şekil 6.31. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi (%75 ve %100 Yük).	110
Şekil 6.32. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin P_{maks} 'a etkisi.	111
Şekil 6.33. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin P_{maks} 'ın yerine etkisi.....	112
Şekil 6.34. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin basınç artışı hızına etkisi.....	113
Şekil 6.35. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin İÇO'ya etkisi (%25 ve %50 Yük).....	115
Şekil 6.36. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin İÇO'ya etkisi (%75 ve %100 Yük).....	116
Şekil 6.37. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $İÇO_{maks}$ 'a etkisi.....	117
Şekil 6.38. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin püskürtme gecikmesine etkisi.	118
Şekil 6.39. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin tutuşma gecikmesine etkisi.	118
Şekil 6.40. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin ani yanma periyoduna etkisi.	119
Şekil 6.41. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin difüzyon kontrollü yanma periyoduna etkisi.	121
Şekil 6.42. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin toplam yanma süresine etkisi.....	122
Şekil 6.43. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort. gaz}$ 'a etkisi.....	123
Şekil 6.44. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın yerine etkisi.....	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Binek ve ağır taşıt lastiğinin kompozisyon açığa çıkış oranı.....	5
Çizelge 2.2. Taşıt tekerleğinin üretiminde kullanılan malzemeler.....	6
Çizelge 2.3. Taşıt sınıflarına göre ortalama tekerlek ağırlıkları.....	6
Çizelge 2.4. Çeşitli yakıtların enerji içerikleri ve CO ₂ emisyonları.....	7
Çizelge 2.5. Dizel ve pirolitik yakıt özelliklerinin karşılaştırılması.....	11
Çizelge 5.1. Pirolitik yakıt ve dizel yakıt özelliklerinin değişimi.....	57
Çizelge 5.2. Kullanılan kimyasallar ve maliyetleri.....	60
Çizelge 5.3. Kullanılan elektrik enerjisi ve maliyeti.....	61
Çizelge 5.4. Motor özellikleri.....	64
Çizelge 5.5. Egzoz gaz analizörü ve opasitemetre özellikleri.....	65
Çizelge 5.6. Sensör özellikleri.....	68
Çizelge EK A.1. Motor hızının ve LPY içeriğinin performansa etkisi deney sonuçları.....	142
Çizelge EK A.2. Motor hızının ve LPY içeriğinin egzoz emisyonlarına etkisi deney sonuçları.....	143
Çizelge EK A.3. Motor hızının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (1400 d/d ve 2000 d/d).....	144
Çizelge EK A.4. Motor hızının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (2600 d/d ve 3200 d/d).....	145
Çizelge EK A.5. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin performansa etkisi deney sonuçları.....	146
Çizelge EK A.6. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin emisyonlara etkisi deney sonuçları.....	147
Çizelge EK A.7. Motor yükünün (%25 Yük (2,7 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).....	148
Çizelge EK A.8. Motor yükünün (%25 Yük (2,7 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).....	149
Çizelge EK A.9. Motor yükünün (%50 Yük (5,4 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).....	150

Çizelge EK A.10. Motor yükünün (%50 Yük (5,4 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).....	151
Çizelge EK A.11. Motor yükünün (%75 Yük (8,1 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).....	152
Çizelge EK A.12. Motor yükünün (%75 Yük (8,1 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).....	153
Çizelge EK A.13. Motor yükünün (%100 Yük (10,8 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).....	154
Çizelge EK A.14. Motor yükünün (%100 Yük (10,8 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).....	155

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

a	: Krank yarıçapı
b_{kol}	: Kuvvet kolu uzunluğu
B_e	: Yakıt tüketimi
CaO	: Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CH ₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
C ₂ H ₂	: Asetilen
C ₂ H ₆	: Etan
$dP/d\theta$: Basınç değişimi
du	: İç enerji değişimi
D	: Piston çapı
F	: Yük hücreğine uygulanan kuvvet
g	: Yerçekim ivmesi
HC	: Hidrokarbon
H ₂ S	: Hidrojen sülfür
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
M_e	: Motor torku
m_y	: t_y süresinde tüketilen yakıt miktarı
n	: Motor devri
NO	: Nitrojen monoksit
NO ₂	: Nitrojen dioksit
NO _x	: Nitrojen oksit
P	: Silindir basıncı
P_e	: Motor gücü

P_{cyl}	: Çevrim basıncı
P_{maks}	: Maksimum silindir basıncı
P_{ref}	: Emme supabının kapandığı noktadaki çevrim basıncı
Q_n	: Isı açığa çıkış oranı (IÇO)
R	: İdeal gaz sabiti
r	: Biyel kolu uzunluğu
S	: Kurs boyu
SO	: Sıkıştırma oranı
SO_2	: Kükürt dioksit
SO_x	: Kükürt oksit
T_{Egzoz}	: Egzoz gaz sıcaklığı
$T_{maks.ort.gaz}$: Maksimum silindir içi ortalama gaz sıcaklığı
$T_{ort.gaz}$: Silindir içi ortalama gaz sıcaklığı
T_{ref}	: Emme supabının kapandığı noktadaki referans sıcaklık
t_y	: Süre
V	: Toplam motor hacmi
V_c	: Yanma odası hacmi
V_{cyl}	: Anlık silindir hacmi
V_{ref}	: Emme supabının kapandığı noktadaki silindir hacmi
W	: Sistem sınırı tarafından yapılan iş
ω	: Açısal hız
ρ_y	: Yakıt yoğunluğu
θ	: Krank mili açısı
η_e	: Efektif verim

KISALTMALAR

AID	: Alt Isıl Değer
API	: Amerikan Petrol Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
AÖN	: Alt Ölü Nokta
BR	: Bütadien kauçuk
cst	: Sentistrok
C/H	: Karbon/Hidrojen Oranı
EGR	: Egzoz Gaz Resirkülasyonu
EN	: Avrupa Normu
FÖET	: Fren Özgöl Enerji Tüketimi
FÖYT	: Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
g	: Gram
GJ	: Giga-joule
HLPY	: Ham Lastik Pirolik Yakıtı
Hz	: Herz
İÇÖ	: Isı Açığa Çıkış Oranı
İÇÖ _{maks}	: Maksimum İÇÖ
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
kHz	: Kiloherz
KMA	: Krank Mili Açısı
kPa	: Kilopascal
kW	: Kilowatt
<i>KMA90</i>	: Toplam ısı açığa çıkış oranının %90'nına karşılık gelen krank mili açışı
L	: Litre
LPY	: Lastik Pirolitik Yakıtı
m	: Metre
ml	: Mililitre
m/m	: Kütleli yüzde
nm	: Nanometre
Nm	: Newtonmetre
MJ	: Mega-joule

ORJ	: Orijinal
ppm	: Milyonda bir parça
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
s	: Saniye
SI	: Setan İndisi
SBR	: Stiren Bütadien Kauçuk
TIÇO	: Toplam Isı Açığa Çıkış Oranı
T10	: Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %10'unun buharlaştığı sıcaklık
T50	: Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %50'sinin buharlaştığı sıcaklık
T85	: Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %85'inin buharlaştığı sıcaklık
T90	: Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %90'ının buharlaştığı sıcaklık
T95	: Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %95'inin buharlaştığı sıcaklık
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
v/v	: Hacimsel yüzde
µm	: Mikronmetre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Temel enerji kaynaklarından birisi olarak petrol insanoğlunun yaşamında çok önemli bir yer tutar. Ekonomide hemen her sektör, doğrudan ya da dolaylı olarak petrole bağımlıdır. Bu nedenle petrol piyasasında ortaya çıkan değişiklikler oluşturdukları zincirleme reaksiyonlar aracılığı ile hem ülke, hem de dünya ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir.

Benzinli ve dizel motorlar, gün geçtikçe kaynakları azalan, fiyatları artan petrol kökenli yakıtları bitkisel esaslı yakıtlara nazaran daha çok kullanırlar. Fosil kökenli yakıtlar çoğunlukla doğal gaz veya petrol ürünlerinden oluşur. Ulaşım sektöründe kullanılan ana yakıtlar, benzin ve dizeldir. Ulaşım sektöründe olduğu kadar sabit tesisler için de birçok alternatif yakıt düşünülmüştür. Alternatif yakıtların bazıları, esas olarak düşük ölçekli veya özel kullanım için düşünülürken, birçoğu da güncel hayattaki genel kullanım için büyük bir potansiyel taşırlar. Bu bağlamda alternatif yakıtlar, günümüzde ticari ölçekte yaygın olarak kullanılmayan ve kullanılabilme potansiyeli taşıyan yakıtlardır.

Dünyanın birçok yerinde, yakıt fiyatlarının artışı ve emisyon standartları, dizel ve benzin yakıtlarının yerini alacak alternatif yakıtlar üzerine çeşitli girişimleri de beraberinde getirmiştir. Alkol ve biyodizelde olduğu gibi, çeşitli atıklardan elde edilen yakıtlar da içten yanmalı motorlar için alternatif bir yakıt kaynağı teşkil ederler. Bunun için, özellikle atık kauçuk ve kullanım ömrü dolmuş atık taşıt lastiklerinin çevreye zarar vermeden, uygun bir geri dönüşüm yöntemi ile tekrar geri kazanımı arzulanan bir yöntem olmuştur. Ayrıca, evsel ve sanayi atıkları, kauçuk ve hurda lastikler, plastikler, bilgisayar monitörleri, kullanım dışı kalmış yağlar gibi çeşitli atıkların alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi, çevre ve insan sağlığının korunması ve doğal kaynakların israfının önüne geçilmesi açısından önemlidir.

Endüstrileşen dünyanın hızlı bir şekilde gelişmesine bağlı olarak, birçok alanda çevre için zararlı atıklar ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, trafikteki araç sayısının artışına paralel olarak üretilen atık taşıt lastik miktarı da artmaktadır. Bu yüzden atık taşıt lastiği sadece ülkemizde değil, dünya genelinde de bir problemdir. Atık taşıt lastikleri, uygun bir şekilde değerlendirilmediği takdirde hem çevresel hem de görüntü kirliliğine sebep olurlar. Çünkü atık taşıt lastikleri yapıları itibarı ile çok zor bozunup parçalanabildiklerinden, atıldıkları çevrede meydana getirdikleri olumsuzlukları uzun süre sürdürürler. Özellikle kontrolsüz bir biçimde yakıldığında hava kirliliği açısından ciddi bir tehlike oluşturabilirler. Atık taşıt tekerlek lastiklerinin çevreye zarar vermeden kontrol altında tutulması en büyük zorluklardan birisini teşkil eder.

Herhangi bir yasal düzenek olmaksızın istiflenen atık lastikler, insan ve çevre sağlığını tehdit eder. Bundan dolayı endüstrileşmiş ülkeler tarafından gerekli yasal düzenlemeler başlatılmıştır. Bu yasal düzenlemeler ülkeden ülkeye değişiklik göstermesine rağmen, çevrenin güvenli kullanımını sağlamakta, herhangi bir yerde depolanan atık taşıt lastik miktarını kısıtlamakta ve atık taşıt lastiğinin dönüşümünden elde edilen ürünlerin kullanımını teşvik etmektedir.

Dünyanın birçok yerinde, atık taşıt lastiklerinin oluşturduğu çevre tehdidi ortadan kaldırılmaya çalışılırken diğer yandan ele geçen atıkların değerlendirilerek ekonomiye katkı sağlanması hedeflenmektedir. Yeraltında depolama, yakma ve tekrar işleyerek değerlendirmedeki problemler, atık taşıt lastiklerinin kimyasal yöntemlerle enerji kaynağına dönüştürülmesini zorunlu kılmaya başlamıştır. Son zamanlarda ise atık taşıt lastiklerinin alternatif bir enerji kaynağına dönüştürülmesi ve tekrar kullanıma sunulması önemli ve dikkat çekici bir araştırma konusu olmuştur.

Çevre ve Orman Bakanlığının verilerine göre, geri dönüşümle tekrar ekonomiye kazandırılabilir olan atık taşıt lastiklerinin Türkiye’de yıllık olarak ortaya çıkan miktarı 200 bin ton civarındadır. Ancak Türkiye’deki atık taşıt lastiklerinin geri dönüşüm oranı ile ilgili bir bilgi bulunmamaktadır. Lastik sektörü ile Çevre ve Orman Bakanlığı arasında bir süredir yürütülen çalışmalar 2006 yılı sonlarında tamamlanmış ve 25 Kasım 2006 tarihinde 26357 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan

“Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” ile atık lastiklerin kontrolünü sağlayacak sistemin kurulması çalışmalarına başlanmıştır.

Atık taşıt lastikleri, geri dönüşüm işleminin uygun yöntemler ile yapılması halinde petrol kökenli bir enerji kaynağına dönüştürülerek iyi bir alternatif yakıt olma potansiyeli taşırlar. Çünkü kömür, petrol, doğal gaz gibi atık taşıt lastikleri de hidrokarbonlardan oluşur. %90'dan fazlası organik olan ve ısı değeri 32,6-42,8 MJ/kg aralığında değişebilen atık taşıt lastiği, ısı değeri 18,6-27,9 MJ/kg aralığında değişen kömürden daha fazla ısı değere sahiptir. Bundan başka çeşitli işlemler sonucunda ısı değeri yaklaşık 40-45 MJ/kg olan dizel yakıtının ısı değerine de yaklaşabilirler. Buna rağmen, bir yıl içerisinde dünyada üretilen toplam taşıt lastiğinin ancak %7'si kadar ömrünü tamamlamış lastik geri dönüştürülebilmektedir.

Bu çalışmada atık taşıt lastiklerinden vakum piroliz yöntemi ile Ham Lastik Pirolitik Yakıtın (HLPY) yakıt özellikleri iyileştirilerek, dizel motorlarda kullanımının performans, emisyon ve yanma karakteristiklerine etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde atık taşıt lastiklerinin genel özellikleri ve atık taşıt lastiklerinin pirolizi, üçüncü bölümünde dizel motorlarda yakıt özellikleri, karışım teşkili, yanma ve emisyonların oluşumu, dördüncü bölümünde literatür araştırılması, beşinci bölümünde yapılan deneysel çalışmalar, altıncı bölümünde deneysel bulgular ve son bölümünde ise sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

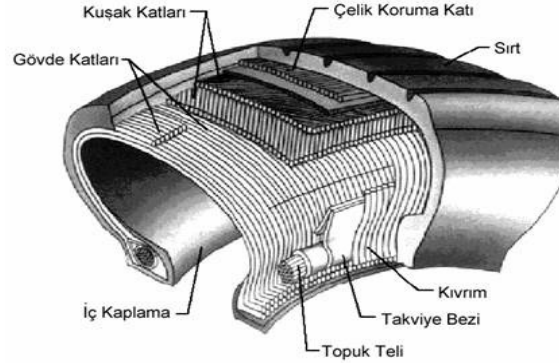
ATIK TAŞIT LASTİKLERİ VE PİROLİZİ

2.1. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Taşıt lastiklerinin yapılarında yüksek mukavemeti karşılamak üzere naylon, polyester gibi elyaf esaslı kordonlar ile çelik kordonlar bulunur. Topuk dayanımları ise çelik teller yardımıyla sağlanır. Birbirinden farklı karakterdeki bu elemanların bir arada tutulması ve sürüş esnasında zeminle temasın güvenle sağlanmasıyla, yanaklardaki esneme kabiliyetinin verilmesi görevini lastik karışımı üstlenir. Lastik karışımını doğal ve sentetik kauçuklarla birlikte ana dolgu olarak karbon siyahı oluşturur. Bunlara ilave olarak lastik yapısında kükürt gibi vulkanizasyon elemanları bulunur. Karışımın işlenmesi ve homojenliği için kimyasal yağlar kullanılır.

Taşıt tekerlek lastikleri çeşitli kısımlardan oluşur ve her bir kısmın özel işlevleri vardır. Ayrıca bu kısımları oluşturan malzemeler, taşıt lastiklerinin geri dönüşümünü de etkiler. Şekil 2.1’de taşıt tekerleklerinin genel yapısı verilmiştir. Lastik sırtı, taşıt hareket halinde veya park halinde iken, lastiğin yol yüzeyi ile sürekli olarak temas ettiği kısımdır. Lastik sırtı, yüksek oranda kauçuk veya dolgu malzemesi içerir. Kuşaklar ve gövde katları, lastik sırtına destek oluşturur ve tekerlek şeklinin korunmasına yardımcı olur. Kuşaklar, yüksek karbonlu çelik tellerden oluşan kauçuk tabakalardan yapılır. Lastik sırtının altında bulunan kuşaklardaki çelik teller, çapraz dokulu olarak yerleştirilir. Bu durum taşıtın sürüş kalitesini iyileştirirken, istenmeyen tekerlek aşınmalarını da engeller. Bazı lastik üreticileri, lastik ağırlığını hafifletmek için çelik kuşak yerine bir elyaf türü olan aramid bandaj kullanmaktadırlar. Yanaklar, iki taraftan dış lastiğe tutturulur. Bu durum, jant ile lastik arasındaki ara yüzü güçlendirerek lastiğin yapısal bütünlüğüne katkı sağlar. Yanaklar, taşıtın yol yüzeyinden kaynaklanan yukarı ve aşağı hareketlerine göre esneklik sağlayacak

şekilde tasarlanırlar. Bu kısmı oluşturan parçalar, tekerlek yanak aşınmasını önlemek için bazı antioksidanlar ve antiozonantlar da içerir. İç kaplama, lastiğin iç yapısını teşkil eder, çekme dayanımı sağlar ve lastiğin şeklini korumasına yardımcı olur. Lastiğin iç yapısı, doğal kauçukla kaplanmış polyester veya naylonla birlikte bükülmüş çelik tellerden oluşur.



Şekil 2.1. Taşıt tekerleği kesiti [1].

Binek ve ağır taşıt lastiğine ait bileşimler Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bunun yanında taşıt lastiğinin üretiminde kullanılan malzemeler ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Binek ve ağır taşıt lastiğinin kompozisyon dağılımı [2].

Malzeme	Otomobil (% Ağırlık)	Ağır Vasıta (% Ağırlık)
Kauçuk/Elastomerler	48	45
Karbon siyahı ve silis	22	22
Metal	15	25
Tekstil	5	-
Çinko oksit	1	2
Kükürt	1	1
Çeşitli katkılar	8	-

Taşıt tekerlek lastiğinin üretiminde çoğunlukla doğal kauçuk, stiren bütadien kauçuk (styrene-butadiene rubber (SBR)) ve bütadien kauçuk (butadiene rubber (BR)) kullanılır [3]. Ağır vasıta tekerlekleri oransal olarak daha fazla doğal kauçuk içerirler (ağır vasıtalar: %65 doğal, %35 sentetik, otomobiller: %25 doğal, %75 sentetik) [4]. Kauçuk kompozisyonu rekabetçi ekonomideki yüksek kalite standartlarını karşılamaya yönelik olarak değişebilir.

Çizelge 2.2. Taşıt tekerleğinin üretiminde kullanılan malzemeler [5].

Malzeme	Kaynak	Uygulama Alanı
Doğal Kauçuk	Doğal kauçuk, çoğunlukla kauçuk ağacı olarak bilinen <i>Hevea Brasiliensis</i> ağacının özsuyundan elde edilir.	Otomobil tekerleğinin %30-%40'sini ve ağır vasıta tekerleğinin %60-%70'si doğal kauçuktan oluşur.
Sentetik Kauçuk	Bütün sentetik kauçuklar petrokimyasallardan elde edilir.	Otomobil tekerleğinin %30-%40'si ve ağır vasıta tekerleğinin %60-%70'si sentetik kauçuktan oluşur.
Çelik tel	Yüksek kalite gereksinimleri için çelik tel üreten tesisler.	Tekerlekler sağlamlık ve dayanıklılık kazandırmak için kullanılır. Ağırlık olarak bir otomobil lastiğinin %15'ini çelik teller oluşturur.
Diğer sağlamlaştırmacılar	Çoğunlukla petrokimyadan elde edilir.	Tekerleğin yapısal dayanıklılığını artırmak için kullanılırlar. Radyal bir otomobil lastiğinin %5'ini oluştururlar.
Karbon siyahı, silis	Karbon siyahı petrolden, silis ise genelde kumdan elde edilir.	Karbon siyahı ve silis, aşınma ve yırtılmalara karşı dayanıklılık ve direnç sağlar. Bir otomobil lastiğinin %28'ini oluştururlar.
Çinko Oksit	Bir mineral.	Ultraviyole bozulmalara karşı direnç sağlamak için ve kükürtle sertleştirmenin kontrolü için kullanılır. Bir otomobil lastiğinin %1,2'si Çinko Oksitten oluşur.
Kükürt	Kauçuğu setleştirmek için kullanılır.	Bir otomobil lastiğinin %1'i Kükürt'ten oluşur.
Diğer katkılar, solventler, yumuşatıcılar ve filtreler	Diğer katkılar, esas ürünün ve üretim yaparken açığa çıkan ürünlerin özelliklerini ve değişik kauçuk bileşimlerini değiştirmek için kullanılır.	Bir otomobil lastiğinin ağırlık olarak %8'i çeşitli katkılarından oluşur.

Taşıt tekerleklerinin ağırlıkları, ebatlarına, tekerleklerin bileşimine ve kullanım amacına göre değişim gösterir. Ortalama olarak, yeni bir otomobil lastiğinin ağırlığı 8 kg'dır ve kullanım ömrü boyunca yaklaşık 1,5 kg civarında ağırlık kaybı olur. Çizelge 2.3'de taşıt sınıfına bağlı olarak tekerlek ağırlıkları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Çizelge 2.3. Taşıt sınıflarına göre ortalama tekerlek ağırlıkları [2].

Taşıt sınıfı	Ortalama ağırlık (kg)
Otomobil	6,5-10
Orta ölçekli taşıtlar (4x4 sınıfı dâhil)	11,0
Ağır vasıta	52,5

Taşıt tekerlek lastiği, içeriğindeki yüksek karbon miktarının bir fonksiyonu olarak çok iyi yanma özelliklerine sahiptir. Net ısıl değerleri ise 32-34 MJ/kg arasında

değişir. Çizelge 2.4’de çeşitli yakıtların enerji içerikleri ve CO₂ emisyonları verilmiştir.

Çizelge 2.4. Çeşitli yakıtların enerji içerikleri ve CO₂ emisyonları [6].

Yakıt	Enerji (GJ/ton)	Emisyonlar	
		kg CO ₂ /ton	kg CO ₂ /GJ
Taşıt lastiği	32,0	2,720	85
Karbon	27,0	2,430	90
Pet şişe	32,4	3,240	100
Dizel	46,0	3,220	70
Doğal gaz	39,0	1,989	51
Odun	10,2	1,122	110

Bütün haldeki atık taşıt lastikleri genellikle arazi dolgusu olarak, oyun parklarında, gemilerde ve limanlarda, araç park alanlarında, karayollarındaki güvenlik bariyerlerinde vb. kullanılırlar. Büyük parçalar halinde ise, özellikle çimento fabrikalarında ve çeşitli termik santrallerde veya endüstriyel sektörlerin kazanlarının yakılmasında kullanılır. Ayrıca kırıntı ve toz haline getirilmiş atık taşıt lastikleri, otomotiv sektöründe (fren pedalları, kayışlar vb.), spor sahalarının yüzey kaplamasında (yapay çim ve atletizm sahaları vb.), inşaat sektöründe (kiremit ve çatı altı kaplama vb.), karayolları asfaltlandırma çalışmalarında ve çeşitli plastik ürünlerin üretiminde kullanılabilir. Bununla birlikte, atık taşıt lastiğinin piroliz edilmesi ile karbon siyahı ve dizel benzeri pirolitik yakıt/yağ elde edilebilir.

Ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri, çok fazla fiziksel yer kaplayan atıklardır. Bunun yanında toplamak, hacimlerini azaltmak ve yok etmek zordur. Biyolojik olarak parçalanmazlar ve belli bir zaman diliminde ayrışmaları şüphelidir. Ayrıca yapılarında, kurşun, krom, kadmiyum ve çeşitli ağır metal grupları gibi zararlı olabilecek elementler içerirler. Uygunsuz bir şekilde bertaraf edildiğinde, çevre ve insan sağlığı için tehdit oluştururlar. Atık taşıt lastikleri, kemirgenler için ideal bir yaşam alanı oluşturur. Ayrıca, sarıhumma ve dang hastalığı taşıyabilen sivrisinekler için uygun üreme alanlarını teşkil ederler. Lastiklerin iç kısmının yuvarlak şekilli olması, özellikle yağmur yağdığında, uzun süre suyu tutmasını sağlar. Bu durum, çoğunlukla sivrisinek lavralarının gelişimi için ideal bir ortam sağlar. Ayrıca, atık taşıt lastiklerinin bir yerden başka bir yere taşınması ile sivri sineklerin de nakil

edilen taşıt lastiklerini takip ederek taşındığı bilinmektedir. Özellikle tropikal kuşakta yaşayan insanlar için bu durum büyük bir risk oluşturur. Birçok ülkede büyük miktarlardaki atık taşıt lastikleri uzun yıllar boyunca açık alanlarda yığınla gelişmiş güzel bir şekilde istiflenmiş veya çevreye atılmış veya arazi dolgusu olarak kullanılmıştır. Görsel etkilere ek olarak, uygunsuz bir şekilde çevreye atılan atık taşıt lastikleri, su yollarını ve çayları tıkarlar. Suyun akış seyrini değiştirmesiyle sonuçlanan bu durum erozyona ve su kaynaklarının çamurla dolmasına neden olur.

Atık taşıt lastikleri, bertaraf edilme şekline bakılmaksızın, devamlı olarak riskler taşımaktadır. Tekerlek yapısı, sağlamlığı ve yüksek ısı tutma kapasitesi çevre için her zaman bir tehdit unsurudur. Atık taşıt tekerleklerinin uygunsuz bertarafı, hem açık havada hem de su sahalarında çevresel riskleri artırır. Atık taşıt tekerleğinin yapısı ve ısı tutma eğiliminden dolayı kümelenmiş atık taşıt lastikleri yangınları da kolaylaştırır. Kazara ve kundakçılık sonucu çıkan bu yangınlar aylar boyu sürebilmektedir ve kontrol altına alınması çok zordur. Bu tür yangınlar, toprağı, havayı ve su kaynaklarını etkileyen zehirli yağ kirleticilerini ve büyük miktarda is oluşumunu da beraberinde getirir. Atık taşıt lastiklerine ait yangınlarda çevreye yayılan ürünler, kül (içeriğı karbon, çinko oksit, titanium dioksit, silikon dioksit, kadmiyum, kurşun ve diğer ağır metaller), kükürt bileşenleri, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), aromatik yağlar, karbon ve nitojenoksitler, partikül madde ve hafif aromatik hidrokarbonlar (toluene, xylene, benzene gibi) oluşur. Bu ürünler insan sağlığını tehdit etmekle birlikte, hayvan ve bitki sağlığı için de büyük tehlike oluşturur. Sonuç olarak; hava, su ve toprak kirliliğine sebep olurlar.

2.2. ATIK TAŞIT LASTİKLERİNİN PİROLİZİ

1970'li yılların başında, atıkların bertaraf problemlerinin çözümü açısından organik atıkların pirolizi ilgi çekici hale gelmiştir. Özellikle atık taşıt lastiğı ve kauçuk malzemeler için, piroliz yöntemi atıklardan enerji elde etmek için uygun ve elverişli bir yöntem olmuştur.

Piroliz sözcüğü Yunanca'da ortamda gaz olmaksızın gerçekleştirilen ısıl bozundurma anlamına gelmektedir. Modern tanımı ile piroliz, organik maddelerin oksijensiz

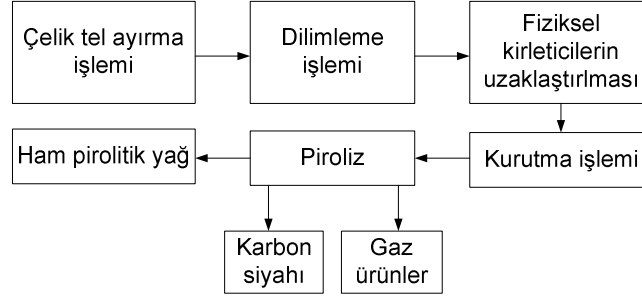
ortamda veya inert ortamda ısıtılarak gaz, katı veya sıvı ürünlere ayrılması (bozundurulması) işlemidir. Pirolizde teorik olarak gerekli ısı miktarı, organik maddenin kimyasal yapısını bozacak ve yeni kimyasal maddelerin oluşumunu sağlayacak düzeyde olmalıdır. Isıl bozundurma işlemi katı yakıt açısından değerlendirildiğinde “karbonizasyon”, gaz ve sıvı yakıt açısından değerlendirildiğinde ise “piroliz” olarak bilinir. Piroliz işlemi atık taşıt lastiklerine uygulandığında, oksijensiz ortamda ısıtma işlemi yapılarak atık taşıt lastiği içeriğindeki kauçuk malzemenin bozunması gerçekleşir.

Piroliz işlemi, kullanılan reaktörün tipine ve çalışma moduna (çalışma sıcaklığı, ısıtma yöntemi, basınç gibi) göre sınıflandırılabilir [7]. Günümüze kadar, atık taşıt lastiklerinden sıvı ürün elde etmek için çok farklı deneysel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler; sabit yataklı reaktörler [8-16], akışkan yataklı piroliz üniteleri [17, 18] ve vakum piroliz üniteleri [19-24] ile gerçekleştirilmektedir. Piroliz sonrası ürün içeriği, atık taşıt lastiğinin kimyası ile birlikte piroliz şartlarına bağlıdır. Reaksiyon süresinin uzun olduğu yavaş ısıtma hızlarında uygulanan pirolizde, katı ürün verimi artarken, yüksek ısıtma hızı ve kısa reaksiyon süreli hızlı pirolizde ise sıvı ürün verimi artmaktadır.

Piroliz işlemi genellikle oksijensiz veya soy gaz ortamında, 300 °C-1000 °C aralığında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Piroliz öncesi atık taşıt lastikleri öğütülerek küçük parçalara ayrıştırılabilir veya bütün halde olabilir. Piroliz işlemi, enerji tüketimi 4,0-5,7 MJ/kg-kauçuk arasında değişen yüksek derecede endotermik (ısı alan) bir işlemdir [25]. Piroliz işleminde üç temel ürün oluşur. Bunlar pirolitik yağ, gaz ve karbon siyahıdır. Pirolitik yağ ise Ham Pirolitik Yağ/Yakıt veya Ham Lastik Pirolitik Yakıtı (HLPY) olarak adlandırılır.

Piroliz yöntemi ile HLPY elde etme süreci Şekil 2.2’de şematik olarak verilmiştir. Piroliz işlemi parçalanmamış bütün lastiklerden yapılacaksa, çelik tel ayırma işlemi piroliz işleminden sonra yapılır. Bütün lastiklerin piroliz işlemi sonucunda karbon siyahı ile birlikte çelik teller katı ürün olarak oluşur. Oluşan katı ürün öğütülür ve çelik parçaları mıknatıslar ile ayrılır. Atık taşıt lastiklerinin dilimlenerek veya parçalanarak piroliz işlemine dahil edilmesi durumunda ise çelik tel ayırma işlemi ilk

önce yapılır. Çelik tellerden ayrıştırılan atık taşıt lastiği dilimlenir, yıkanır, toz ve çamur gibi fiziksel kirleticilerden uzaklaştırılır. Fiziksel kirleticilerinden temizlenen piroliz hammaddesi kurutma işleminden sonra piroliz işlemine tabi tutulur.



Şekil 2.2. Ham lastik piroliz yakıtı (HLPY) elde etme süreci.

Piroliz hammaddesi piroliz reaktörüne yerleştirildikten sonra istenen piroliz sıcaklığı ayarlanır. Sıcaklığı zamanla artan piroliz reaktörü içerisindeki piroliz hammaddesi bozunmaya başlar. Bozunan hammadde genellikle gaz buharı halindedir. Gaz buharından oluşan piroliz ürünleri, piroliz işlemi sürerken piroliz reaktöründen yoğuşma ünitesine alınır ve yoğuşturularak sıvı halde depolanır ve ham pirolitik yağ/yakıt elde edilir. Piroliz ürünleri arasında yer alan yoğuşturulamayan gaz bileşenler ise gaz tankında depolanır. Piroliz reaktöründe buharlaşamayan katı bileşenler (karbon siyahı) piroliz işlemi bitiminde reaktörden alınarak özellikle karbon filtre yapımında kullanılmak üzere değerlendirilir.

300 °C-400 °C aralığında değişen sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilen piroliz işlemi katı ürün (karbon siyahı) bakiyesini artırır. Şayet piroliz 400 °C-550 °C'de gerçekleştirilir ise piroliz hammaddesinin bileşimine bağlı olarak çeşitli hidrokarbon karışımlarından oluşan sıvı ürün bakiyesi artar. Piroliz sıcaklığının 700 °C'nin üzerinde olduğu sıcaklıklarda ise sıvı ürünlerin daha fazla parçalanmasından dolayı esas ürün gaz haline gelir. Gaz ürünlerin içeriği, büyük oranda CH₄ (Metan), C₂H₆ (Etan), C₂H₂ (Asetilen) ve az da olsa diğer gazlaşmış hidrokarbonlardan ibarettir. Tüm bu ürünlerin miktarı ve kalitesi yine piroliz reaktör sıcaklığına ve tasarımına bağlıdır [25]. Atık taşıt lastiği içerisindeki organik uçucu maddeler (çoğunlukla kauçuk) daha düşük molekül ağırlıktaki ürünlere (pirolitik yağ ve gaz) ayrışırlar. İnorganik maddeler ise (çoğunlukla çelik ve karbon siyahı) piroliz sonrası katı kalıntı

şeklinde arta kalırlar ve tekrar geri dönüşüm uygulanarak kazanılabilirler [14]. Atık taşı lastiğinden piroliz sonucu elde edilen HLPY'nin genel görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir. HLPY keskin kokulu, koyu kahverengi renkli ve akışkan görünümündedir.



Şekil 2.3. Ham lastik pirolitik yakıtın (HLPY) genel görüntüsü.

Atık taşı lastiğinin pirolizinden elde edilen pirolitik yakıt özellikleri, yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ile dizel yakıt özelliklerine yaklaştırılabilir. Dizel yakıt ve yakıt özellikleri iyileştirilmiş ham pirolitik yakıtın özellikleri Çizelge 2.5'de verilmiştir. HLPY'nin özellikleri kükürt içeriğinin ve viskozitesinin azaltılması ile dizel yakıtının özelliklerine yaklaştırılarak dizel yakıt ile beraber belli oranlarda kullanılabilir.

Çizelge 2.5. Dizel ve pirolitik yakıt özelliklerinin karşılaştırılması [26].

	Dizel	Pirolitik Yakıt	
		Distilasyon Öncesi (HLPY)	Distilasyon Sonrası (PLY)
Kaynama Noktası (°C)	210	150	160
Özgül Ağırlık	0,8-0,84	0,95	0,90
Parlama Noktası (°C)	80	55	60
Kinematik Viskozite (cst, 40 °C)	5	4,1	3,2
Isıl Değer (kJ/kg)	44546	39793,6	40838,6
Atık Karbon (% , kütlesele)	0,20	0,99	0,11
Kül (% , kütlesele)	0,01	0,51	0,14
Kükürt (% , ağırlık)	0,30	0,92	0,06

BÖLÜM 3

DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİ, YANMA VE EMİSYONLARIN OLUŞUMU

3.1. DİZEL MOTORLARDA YAKIT ÖZELLİKLERİNİN EMİSYON VE PERFORMANSA ETKİLERİ

Dizel yakıt; parafin, nafta ve aromatik gibi hidrokarbonlardan oluşan karmaşık bir hidrokarbon karışımıdır. Bunun yanında dizel yakıtın yapısında doğal halde organik kükürt mevcuttur. Ticari olarak satışı yapılan dizel yakıtın nihai özellikleri, rafine işlemlerine ve ham petrolün yapısına bağlı olarak değişiklikler gösterir. Dizel motorların performansı, yanma verimi ve emisyonları yakıt özelliklerine, kompozisyonuna, kalitesine ve motorun çalışma parametrelerine bağlı olarak değişir. Dizel motorlar, önemli ölçüde is ve Nitrojen Oksit (NO_x) emisyonu üretir. Özellikle is emisyonlarının azaltılması birincil derecede önem taşır.

Dizel yakıt, ham petrolün distilasyonundan elde edilir ve kaynama noktası $180\text{ }^\circ\text{C}$ - $370\text{ }^\circ\text{C}$ arasında değişen hidrokarbonlardan oluşur [27]. Yakıt kimyası ve özellikleri, motorun emisyon ve performansını etkileyen en önemli unsurdur. Örneğin, yüksek C/H oranına sahip yakıt düşük C/H oranına sahip yakıtla göre, çift bağlı karbon içeren yakıtlar tek bağlı karbon içeren yakıtlara göre daha fazla is emisyonu üretmeye meyillidirler [28]. Ayrıca is emisyonlarını etkileyen en önemli değişkenler yakıtın karbon ve oksijen içeriği, yoğunluğu ve viskozitesidir [29]. Hiç karbon içermeyen H_2 yakıt olarak kullanıldığında ürettiği is emisyonları neredeyse sıfırdır. Alkol gibi oksijence zengin yakıtlar ise is ve CO emisyonlarını önemli ölçüde azaltırlar.

3.1.1. Setan Sayısı

Setan sayısı, yakıtın tutuşmaya karşı meylini ifade eder. Setan sayısı, dizel motorlarda özellikle tutuşma gecikmesi üzerine önemli bir etkiye sahiptir. En iyi tutuşma meyli gösteren setanın (n-hexadecane) setan sayısı 100'dür. Bunun yanında, heptametilnona'nın setan sayısı 15'tir [30].

Yakıtın setan sayısı, yakıtın aromatik içeriği ve yoğunluğu ile de ilişkilidir. Yakıtın aromatik içeriği düşerken yoğunluğu da düşer ve genellikle setan sayısı artar. Setan indisi ise yakıtın distilasyon (uçuculuk) ve yoğunluk özelliklerinden yararlanılan bir setan sayısı tahminidir. ASTM D976 testlerine göre aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$SI = \left(\begin{array}{l} 454,74 - (1641,416 * \rho_y) + (774,74 * \rho_y^2) \\ -(0,554 * T50) + 97,803 * (\log T50)^2 \end{array} \right) \quad (3.1)$$

SI Setan indisi

ρ_y Yakıt yoğunluğu (g/L, 15 °C)

T50 Distilasyonu yapılan yakıt numunesinin %50'sinin buharlaştığı sıcaklık (°C)

Setan sayısı ve setan indisi arasındaki ilişki rafinasyon yöntemlerine ve yakıt bileşimlerine göre değişir. Yakıtın kendi kendine tutuşmasını kolaylaştıran setan artırıcı katkıları setan sayısını artırmak için kullanılabilir. Ancak setan artırıcı katkıları, setan indisini değiştirmezler.

Yüksek setanlı dizel yakıt genellikle, yakıtın parafin içeriğinin artırılması ile üretilir [31, 32]. Ancak, yakıtın yüksek parafin içeriği akma ve bulutlanma noktasını olumsuz etkileyerek yakıtın jelleşmesine sebep olabilir. Yakıt jelleşmesini engellemek için, oksijence zengin katkıları yakıtı katılabilir.

Yüksek setanlı yakıt tutuşma gecikmesi periyodunu kısaltır, yakıtın daha kolay tutuşmasını ve daha temiz yanmasını sağlar, yanma gürültüsünü azaltır ve emisyonları etkiler. Aynı zamanda, dizel motorun soğuk havada ilk çalışmasını kolaylaştırır [32-35].

Tutuşma gecikmesinin kısılması, yakıt ve havanın silindir içerisinde tam olarak karışması için ihtiyaç duyulan zamanı kısaltır. Tutuşma gecikmesinin uzaması ise yakıt ve havanın silindir içerisinde daha iyi karışmasına imkân tanır. Ancak, tutuşma gecikmesinin aşırı uzaması, silindir içerisindeki dolgunun aşırı karışmasına ve bölgesel düzeyde fakirleşmesine yol açarak yakıtın tutuşma güçlüğü çekmesine neden olur. Özellikle düşük motor yüklerinde, düşük setan sayısı ile birlikte daha da uzayan tutuşma gecikmesi, silindir içerisindeki dolgunun aşırı fakirleşmesinden dolayı yanmayı tam olarak gerçekleştiremez. Bu durum özellikle HC emisyonlarının artışına sebep olur [36]. Tutuşma gecikmesinin kısılması ile birlikte kontrolsüz yanma periyodundaki basınç artış hızı ve silindir içindeki ısı açığa çıkış oranı (IO) azalır ve yanma sonu sıcaklıkları düşer. Bu durum özellikle NO_x emisyonlarının oluşumu açısından önem teşkil eder. Bunun yanında tutuşma gecikmesinin azalması ile birlikte, silindir içerisinde oluşan Pmaks da azalır [37].

Yakıtın setan sayısı, yakıtın fiziksel özelliklerinin yanında, yakıtın aromatik içeriği ve kaynama noktası ile doğrudan ilişkilidir [38]. Düşük setan sayılı yakıt, daha fazla aromatik ve ağır hidrokarbon içerir ve yakıt yoğunlukları yüksektir [39]. Yüksek yakıt yoğunluğu, aynı motor çıkış gücü için hacimsel yakıt tüketiminin azalması anlamına gelir. Dolayısı ile setan sayısının artışı, hacimsel yakıt tüketimini de artırır. Çok düşük setan sayısına sahip yakıtla çalışan motorda, tutuşma gecikmesi uzar ve bu durum yanma süresince oluşan basının artış hızının yüksek olmasına neden olur. Bu nedenle, düşük setan sayılı yakıtlarla çalışan motorlarda soğuk havada ilk çalıştırmada zorlanma, yanma gürültüsünde artış ve emisyonlarda olumsuzluklar meydana gelir [40]. Ayrıca, düşük setan sayılı yakıt, tutuşma gecikmesini artıracığından motorun püskürtme zamanlaması da etkilenir. Bu yüzden, çok yüksek veya çok düşük setan sayısı içeren dizel yakıtlar motorun çalışmasını etkilediğinden, setan sayısının belli aralıklarda olması istenir.

Setan sayısının motor performansı ve emisyonlara etkisini incelemek için yapılan çalışmalarda, yüksek setan sayılı yakıtların HC, NO_x ve motor çalışma gürültüsünü azaltmasının yanında is emisyonlarını da bir miktar artırdığı ifade edilmiştir [32, 41-43]. Setan sayısının artışı, yanma sonu sıcaklığını azalttığından NO_x emisyonlarını azaltır [44, 45]. Bunun yanında setan sayısının artışı ile CO emisyonların da da bir

miktar azalmalar tespit edilmiştir [32, 46]. Ancak setan sayısının daha fazla artışı, yakıtın silindir içerisinde daha ilerlemeden tutuşmasını sağlayacağından (tutuşma gecikmesi aşırı kısaldığından), motor performansını düşürürken, is emisyonlarını da artırır [32, 47].

Motorun tam yük koşullarında yüksek setan sayısının HC emisyonlarına etkisi hemen hemen yoktur. Ancak orta ve düşük yük koşullarında yüksek setan sayılı yakıt HC emisyonlarını azaltır [41]. Diğer bir çalışmada ise yüksek setan sayılı yakıt CO ve NO_x emisyonlarını azaltırken, is ve HC emisyonlarını artırmıştır [48]. Motor gücü, motor momenti ve yakıt ekonomisi setan sayısının artışı ile çok az miktarda iyileşmektedir [32, 41]. Setan sayısının performans ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemek için yapılan çalışmalarda, sonuçlar arasında deney motorlarından kaynaklandığı düşünülen bazı farklılıklar olsa da ortak sonuçlar göstermiştir ki setan sayısının artışı tutuşma gecikmesini, HC ve NO_x emisyonlarını azaltır.

3.1.2. Yakıtın Kükürt İçeriği

Kükürt, ham petrolün içerisinde doğal halde bulunur ve rafineri işlemleri süresince kabul edilebilir seviyelere çekilir. Dizel yakıt içerisindeki kükürt, is emisyonlarının oluşumunu kolaylaştırır ve taşıt emisyon kontrol ekipmanlarının performansını etkiler. Bu yüzden yakıtın kükürt içeriği CO, HC ve NO_x emisyonlarını da dolaylı olarak etkiler. Kükürt içeriği 500 ppm'e kadar olan dizel yakıtlar genellikle kükürtlü yakıt olarak tanımlanır. 50 ppm ve daha az kükürt içeriğine sahip dizel yakıtlar düşük kükürtlü yakıt olarak adlandırılırlar. Kükürtsüz yakıt ise 10 ppm'den daha az kükürt içeriğine sahip yakıtları ifade eder.

Dizel yakıt içerisindeki kükürt, doğal bir yağlayıcı olarak hareket eder ve yakıtın kükürt içeriğinin aşırı ölçüde azaltılması, yakıtın yağlayıcılık özelliğini artırıcı katkıları kullanılmadığı durumlarda, motorlarda çeşitli problemleri de ortaya çıkarır [40]. Yakıtın kükürt içeriğinin, yakıtın bulutlanma ve akma noktası üzerine bilinen bir etkisi yoktur. Bununla birlikte, yakıtın kükürt içeriğinin azaltılması motora bazı katkıları da sağlar. Yakıt içerisindeki kükürt, yanma odasında oksitlenerek sülfürik asit oluşumuna sebep olur ve çeşitli motor parçalarında ve egzoz sisteminde

korozyona sebep olur. Yani, düşük kükürtlü yakıtlar daha az korozyona sebep olurlar. Ayrıca, yakıtın yüksek kükürt içeriği motorun ürettiği SO_x emisyonlarını artırır ve atmosferde uygun koşulların oluşması halinde asit yağmurlarına sebep olabilir [40, 49].

Düşük kükürtlü yakıtlar genellikle rafinerilerde, yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren hidrosülfürizasyon yöntemi ile üretilir. Hidrosülfürizasyon yönteminde, petrol çok yüksek basınçlarda hidrojenli ortamda ısıtılır ve kükürt kimyasal olarak hidrojenle birleşir. Yakıttaki kükürt H_2S şeklinde uzaklaştırılır [40]. Hidrosülfürizasyon yöntemi, yakıt içerisindeki olefinik bileşenleri azaltarak parafinik içeriği artırır. Yakıtın parafinik içeriğinin artışı, yakıtın setan sayısını çok az da olsa artırır. Yakıtın kükürt uzaklaştırma işlemi sırasında, yakıtın aromatik içeriği ve yakıtın kaynama noktası yüksek olan bileşenleri azaltılarak yakıtın setan sayısı, aromatik içeriği, T90 sıcaklığı, akma noktası, viskozitesi ve parlama noktası gibi yakıt özellikleri de değişir [40]. Yakıtın T90 noktasının artışına paralel olarak yakıtın kükürt ve aromatik içeriği de artar. Bunun yanında, yüksek sıcaklıkta kaynayan bileşenler, is emisyonlarının oluşumuna sebep olur [50].

Dizel yakıt içerisindeki kükürt miktarı, egzoz emisyonlarından özellikle is oluşumunda etkilidir. Yakıt içerisindeki kükürtün bir kısmı oksitlenerek sülfatları meydana getirir ve sülfatlar is emisyonlarının oluşumunda etkilidir. Yakıt içerisindeki kükürt, yanma odasında oksitlenerek SO_2 halini alır. Yanma odasındaki SO_2 yanmamış hidrokarbonlarla birleşir ve is partiküllerinin ebatlarını artırır. Yakıtın kükürt içeriğinin düşürülmesi, is emisyonlarını azaltır. Kükürt miktarını daha da azaltmak is emisyonları üzerinde çok az bir etki yapar, ancak is emisyonlarını tamamen ortadan kaldırmaz. Çünkü is emisyonları, yakıtın diğer özellikleri ve bileşimleri ile de ilgilidir. Yakıtın kükürt içeriğinin azaltılması, motorlarda sülfirik asit oluşumunu azaltacağından motor yağı değişim periyodunu uzatır.

Yakıtın kükürt içeriği, is emisyonlarını doğrudan etkilerken CO, HC ve NO emisyonları üzerine bir etkisinin olmadığı ifade edilmiştir [51]. Bir başka çalışmada ise yakıtın kükürt içeriğinin azaltılması is, CO, HC ve azda olsa NO_x emisyonlarını azaltmıştır [40]. Düşük kükürtlü dizel yakıt ile yapılan motor deneylerinde is, CO ve

NO_x emisyonları iyileşme gösterirken, HC emisyonlarının bir miktar arttığı ifade edilmiştir [52]. Bundan başka, yakıtın kükürt içeriğinin artışının SO₂ ve CO emisyonlarını artırdığı ifade edilmiştir [53].

3.1.3. Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği

Distilasyon, yakıtın kaynama noktası ile ilgilidir ve yakıtın kaynama sıcaklıklarının aralıklarını ifade eder. Distilasyon eğrisi, yakıtın uçuculuğunu gösterir. T90, distilasyonu yapılan yakıt örneğinin hacimsel olarak %90'ının buharlaştığı sıcaklıktır. Dizel yakıtlar için en önemli distilasyon özelliği, distilasyon aralığının en üst ucundaki sıcaklıktır (T85, T90, T95 gibi). Distilasyon sıcaklığının en üst ucu, ağır hidrokarbonların ve aromatiklerin bir göstergesidir. Distilasyon karakteristikleri, yakıt bileşenlerini etkilediği gibi, yakıtın yoğunluğu, viskozitesi ve setan indisi gibi parametreleri de etkiler. Yakıt kalitesinin kontrolü için distilasyon karakteristiği önemlidir.

Yakıt içerisindeki ağır hidrokarbonlar, yakıtın yanma odasında buharlaşmasını ve tutuşmasını zorlaştırır. Bu durum özellikle is emisyonlarının oluşumunda etkilidir. En yüksek distilasyon sıcaklığının azaltılması, yakıt içeriğindeki ağır hidrokarbonları azaltırken yakıtın motorda daha temiz yanmasına yardım eder. Bunun yanında yakıtın viskozitesi ve yoğunluğu da azalır. Ayrıca, T10 sıcaklığı da motorun soğuk havalarda ilk çalıştırılması üzerine etkilidir.

Yakıtın distilasyon sıcaklığının en üst noktası motor performansı ve emisyonlar açısından büyük önem taşır. Yakıtın distilasyon başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının yüksek olması, NO, CO, HC ve is emisyonlarını artırırken, yakıt tüketimini de artırdığı ifade edilmiştir [50, 51, 54]. Bir başka çalışmada ise distilasyon bitiş sıcaklıklarının yüksek olması, yakıt içerisindeki kaynama noktası yüksek olan ağır hidrokarbonları da artırır ve ağır hidrokarbonların ısı açığa çıkış oranlarının veya ısı dağılımlarının yüksek olmasından dolayı motor gücünü de artırdığı ifade edilmiştir [40].

T90 sıcaklığı yüksek yakıtlar, silindir içerisinde buharlaşmak için daha fazla enerjiye gereksinim duyarlar. Silindir içerisine püskürtülen yakıt, buharlaşmak için gerekli enerjiyi sağlarken geçen sürede püskürtme hızının da yardımı ile silindir iç yüzeylerine ulaşır ve silindir yüzeylerini ıslatır [28]. Bu durum, yakıt ve havanın silindir içerisinde karışmasını olumsuz etkilerken özellikle is ve HC emisyonlarını artırır.

Çoklu benzen halkası içeren hidrokarbonlar Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH) olarak adlandırılırlar. Genellikle, tek halkalı aromatikler benzinle, çok halkalı aromatikler ise dizel yakıt ile ilgilidir. PAH'lar petrolün rafinasyonu süresince distilasyon sıcaklığının en üst noktası düşürülerek azaltılır. PAH'ların azaltılması, HC ve NO_x emisyonlarını azaltır, ancak CO emisyonları üzerine bir etkisi yoktur. PAH'lar dizel motorlarda özellikle is emisyonlarının oluşumunda etkilidir. Yakıt içerisindeki aromatiklerin artışı, yakıt içerisindeki karbon ve hidrojen sayısını artırır. Aromatiklerin yüksek C/H oranı ve yüksek alev sıcaklıkları emisyonlar üzerine etkili olmaktadır [40].

Yakıtın kükürt içeriğinin ve distilasyon sıcaklığının en üst noktasının azaltılması toplam aromatik içeriği de azaltır [50]. Yakıtın aromatik içeriğinin değişimi, yakıtın setan sayısı, yoğunluğunu, viskozitesini ve distilasyon karakteristiklerini etkiler. Aromatik içeriği yüksek olan yakıtların, yoğunluk ve T90 sıcaklığı yüksek ve setan sayısı düşüktür [28]. Aynı zamanda PAH emisyonlarını etkileyen en önemli üç parametrenin yoğunluk, viskozite ve yakıtın karbon içeriği olduğu ifade edilmiştir [29].

Yakıtın aromatik içeriğinin artışı tutuşma gecikmesini artırır [55]. Dolayısı ile tutuşma gecikmesine bağlı olarak oluşan egzoz emisyonlarının tamamını da etkiler. Yakıtın aromatik içeriğinin azaltılması, tutuşma gecikmesini kısaltmasının bir neticesi olarak silindir içerisinde alev sıcaklığını azalttığından [42], NO_x emisyonları üzerine olumlu etkide bulunur. Yakıtın aromatik içeriğinin azalması NO_x ve is emisyonlarını azaltırken, yakıt tüketimini de bir miktar iyileştirdiği ifade edilmiştir [41].

Yakıtın toplam aromatik içeriği artırıldığında, is emisyonları, CO, NO_x emisyonlarının arttığı, ancak HC emisyonlarının ise azaldığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, yakıtın toplam aromatik içeriği daha fazla artırıldığında is emisyonlarının etkilenmediği bildirilmiştir [56].

3.1.4. Yakıtın Yoğunluğu

Yoğunluk, yakıtın birim hacminin kütlesini ifade eder. Yoğunluk değeri sıcaklığa bağlıdır ve 15 °C referans sıcaklıkta verilir. Yakıt yoğunluğu, yakıtın enerji içeriğinin bir göstergesi olarak da sayılabilir. Genellikle yüksek yoğunluklu yakıt, yüksek enerji içeriğine sahiptir. Yakıtın özgül ağırlığı ise yakıtın yoğunluğu ile ilişkilidir ve aynı hacimdeki yakıt ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı şeklinde ifade edilir. API gravitesi ise Amerikan Petrol Enstitüsü'nün geliştirdiği bir ölçüdür ve özgül ağırlıkla ters orantılıdır. Dizel yakıt, çeşitli yoğunlukta ve moleküler ağırlıktaki birçok hidrokarbon bileşimlerinin karışımlarından oluşur ve yakıtın toplam yoğunluğu yakıt bileşiminin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, yoğunluk özellikle setan sayısı, aromatik içerik, viskozite ve distilasyon karakteristikleri gibi değişkenlerle ilişkilidir. Örneğin distilasyon sıcaklığının en üst noktasının düşürülmesi, yakıt içerisindeki ağır hidrokarbonların içeriğini azaltır ve yakıtın genel yoğunluk değeri de azalır.

Genellikle yakıt yoğunluğu, püskürtme zamanını, motor gücünü, yakıt tüketimini, yakıt/hava oranını ve is emisyonlarını etkiler. Ancak is emisyonları üzerine etkisi daha fazladır [40, 42, 57].

Dizel motorlarda silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarı yakıt pompası tarafından hacimsel olarak ölçülür. Bu yüzden, silindire gönderilen yakıt miktarını hacimsel olarak ölçen yakıt sistemleri için, yakıt yoğunluğundaki değişim yanma odasına püskürtülen yakıtın enerji içeriğinde değişime sebep olur. Çünkü silindire gönderilen yakıtın enerji içeriği, püskürtülen yakıtın kütlesi ile orantılıdır. Bu yüzden yüksek yoğunluklu yakıtlar ortalama indike basıncı artırır [42]. Bunun yanında, yakıtın yoğunluğu artırıldığında, püskürtülen yakıtın hüzmeye uzunluğuna karşı bir direnç oluşur, yakıt tanecikleri silindir içerisinde yavaş ilerler ve yakıtın silindir içerisindeki

hüzme uzunluğu kısalmır [58]. Bu durum püskürtülen yakıtın silindir içerisinde hava ile karışmasını ve buharlaşmasını zorlaştırır [59].

Dizel yakıtın yoğunluğunun artışı silindire püskürtülen yakıtın kütlesini artıracığından yakıt/hava oranını zenginleştirir ve is emisyonlarının artmasına sebep olur. Ayrıca, yakıt/hava oranının etkilediği bazı emisyonlar da (is, CO, CO₂ gibi) yakıt yoğunluğundan etkilenir. Bunun yanında, motor çıkış gücü de yakıt yoğunluğunun artışı ile birlikte artış gösterir. Ancak, sabit bir motor çıkış gücü için (silindire püskürtülen yakıt miktarı sabit ayarlandığında), yakıt yoğunluğunun azalması hacimsel olarak tüketilen yakıt miktarını artırır. Ayrıca, düşük yoğunluklu yakıt motor gücünde düşüğe sebep olur. Dizel motorlarda, özellikle tam yük koşullarında is emisyonları oluşur. İs oluşumu genellikle aşırı zengin yakıt karışımlarından veya yakıt ve havanın tam olarak karışmamasından kaynaklanır. Dizel motorlardaki is sınırının yakıt pompası üzerinden sınırlandırılması maksimum motor gücünü de sınırlar [30, 41-43, 49, 60].

3.1.5. Yakıtın Viskozitesi

Viskozite, yakıtın akmaya karşı gösterdiği direncin ve iç sürtünmelerinin bir ölçüsüdür ve dizel yakıt pompası ile enjeksiyon sisteminin performansını etkiler. Dolayısı ile yakıt viskozitesi motor performansını ve emisyonları da etkiler [58]. Viskozite, dinamik ve kinematik olmak üzere ikiye ayrılır. Dinamik viskozite birbirinden birim uzaklıktaki (m) iki düzlem arasında bulunan birim alandaki (m²) sıvı tabakasının birim m/s² ivme ile hareket etmesi için gerekli olan Newton kuvvetidir. Kinematik viskozite ise dinamik viskozitenin yoğunluğa oranıdır ve yakıtların viskozitelerini ifade etmek için kullanılır. Kinematik viskozitenin birimi Santistok (cSt) olup, 1 cSt= 1 mm/saniye'dir ve ASTM D-88'e göre 40 °C'de ölçülür [61].

Yakıtın viskozitesini, yakıtın distilasyon özellikleri, yoğunluğu, sıcaklığı ve soğuk akış özellikleri gibi değişkenler belirler. Sıvı yakıtların viskozitesi, yakıtın atomizasyon kalitesini, yakıt taneciklerinin çaplarını ve yakıt taneciklerinin silindir içerisinde ilerleme hızını etkiler ve yüksek viskoziteli yakıtlar yakıt pompasının da

zorlanmasına sebep olurlar [31]. Dizel motorda yakıtın atomizasyon kalitesi yakıtın viskozitesine, yoğunluğuna ve yüzey gerilmesine bağlıdır. Bununla birlikte yüksek yakıt viskozitesi, püskürtme, atomizasyon ve yakıtın hava ile karışmasını olumsuz yönde etkiler [62].

Yüksek viskozite yakıtın akış hızını, huzme derinliğini ve püskürtme açısını azaltır, ve yetersiz yakıt akışına neden olmakla birlikte yakıt pompasının düzgün çalışmasına engel olabilir [30, 63]. Yüksek viskoziteli yakıtların püskürtülmesi zorlaşır. Yüksek viskoziteli yakıtlar, yakıtın atomizasyon kalitesini düşürdüğünden dolayı tutuşma gecikmesini uzatırlar [64]. Bunun yanında, yakıt viskozitesi daha da artırıldığında silindire püskürtülen yakıtın tanecik çapları büyür ve büyük yakıt taneciklerinin yavaş yanmasından dolayı motor performansı olumsuz etkilenir [65]. Düşük viskozite ise, yakıt pompası içerisindeki elemanlarda yakıt kaçaklarını artırır ve silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarında azalmaya sebep olur. Bu durum emisyonları ve motor performansını etkiler. Ayrıca düşük viskozite tutuşma gecikmesinin kısılmasına yardım eder ancak yakıtın yağlama özelliğini de azaltacağından yakıt sisteminde aşınmalara sebep olabilir [40].

3.1.6. Yakıtın Enerji İçeriği

Yakıtın enerji içeriği, yakıttan ne kadar enerji elde edilebileceğinin bir ölçüsüdür. Yakıtın enerji içeriği, yakıtın kalorifik değeri veya yakıtın alt ısı değeri veya yakıtın üst ısı değeri olarak adlandırılır. Genellikle yakıtların enerji içeriğini göstermek için kullanılan yaygın ifade alt ısı değeridir. Yakıtın yanması ile CO₂, su gibi ürünler oluşur. Alt ve üst ısı değer arasındaki fark, yanma sonu ürünleri arasında yer alan suyun buharlaştırılması için gerekli enerjiyi yansıtır. Dizel motorlar için uygun görülen birçok alternatif yakıtın enerji içeriği farklıdır. Bunun da ötesinde, farklı firmaların ticari olarak ürettiği yakıtlar arasında bile çeşitli yakıt katkılarının ve rafine işlem farklılıklarının bir sonucu olarak enerji içerikleri farklı olabilir. Örneğin kükürtsüz yakıtın enerji içeriği düşük kükürtlü yakıtın enerjine göre çok az da olsa fazladır. Bu durum, kükürt uzaklaştırmanın bir sonucudur. Çünkü yakıt içerisindeki kükürdü oksitlemek için gereken yanma enerjisi azaltılmış olur. Enerji içeriği yüksek yakıtlar genellikle daha iyi yakıt ekonomisi gösterirler [41, 43, 66].

3.1.7. Yakıtın Kül İçeriği

Kül, ham petrolde ve petrol ürünlerinde oluşan çözünmüş organometalik ve asılı haldeki katı parçacıklara benzer yanma özelliği olmayan çok küçük miktardaki bileşenlerle ilgilidir. Yakıt yandığında, yakıtın organik olmayan bileşenleri (metaller) ürün olarak kül oluşturur. Bu durum motor aşınımlarını ve bir miktar da is emisyonlarını etkiler. Kül taneciklerinin boyutlarına bağlı olarak, yakıt sisteminde aşınımlara, filtre ve enjektörlerde tıkanmalara sebep olabilir. Bunun yanında, kül içeriği yüksek yakıtlarda egzoz supabı gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan motor parçalarında korozyon ve tortu oluşumu gözlenir. Özellikle uzun süreli motor çalışmalarında, hem motor performansı hem de motor mekanik aksamı olumsuz yönde etkilenir [67].

3.1.8. Atık Karbon İçeriği

Atık karbon içeriği, dizel yakıtın motorda karbon birikintilerini oluşturma meylini ifade eder. Motordaki karbon birikintileri yanma odasında sıcak noktalar oluşturarak, motor parçalarının genleşmemesi, motor parçalarının ısı iletiminin değişmesi sonucunda motor parçalarında aşırı ısınma ve çatlama, korozyon gibi problemleri ortaya çıkarabilir. Bunun yanında, karbon birikintilerinin sebep olduğu sıcak noktalar, motor çalışmasını etkileyerek performans ve emisyonları etkiler. Yakıtın yüksek atık karbon içeriği, özellikle motorun yakıt sistemindeki parçalarda (yakıt pompası, enjektörler, yakıt deposu) kalıntı oluşturur. Yüksek oranda atık karbon içeren yakıtların yanması zordur ve yanma odasında karbon kalıntılarının oluşumuna, is ve HC emisyonlarının artmasına yardım eder. Motor hızı arttıkça yanma odasında oluşan karbon kalıntıları da artış gösterir [67].

3.1.9. Parlama Noktası

Yakıtın parlama noktası, yakıtın yanması ve buharlaşma özelliği ile ilgili olduğu kadar güvenli bir şekilde depolanması ve taşınması ile de ilgilidir. Parlama noktası, yakıt bir kap içerisinde alttan ısıtılırken üstündeki yakıt buharına bir alev kaynağı maruz bırakıldığında tutuşabileceği en düşük sıcaklıktır. Yakıtın hem alevlenme hem

de uçuculuk özelliğinin bir göstergesidir [30]. Yüksek parlama noktasına sahip yakıtlar daha az uçucu iken, düşük parlama noktasına sahip yakıtlar daha çok uçucu olarak bilinir [66]. Birçok dizel motorda yakıtın bir kısmı, yakıt basınç regülâtöründen dolayı yakıt deposuna tekrar döner. Bu durum, özellikle soğuk havalarda motordan dönen yakıtın sıcaklığını artırarak yakıtın jelleşmesini engeller. Fakat sıcak havalarda, yakıt tankının sıcaklığı motordan geri dönen yakıt tarafından bir miktar artırılır. Böyle bir durumda yakıt deposu içerisindeki yakıt hacmi az ise yakıtın parlama noktası baskın hale gelir [67].

3.1.10. Soğuk Akış Özellikleri

Dizel yakıt yüksek oranda parafin içerir. Yakıt soğutulduğunda, yakıt içerisindeki parafinler wax kristalleri şeklinde görünmeye başlarlar. Yakıtın bulutlanma noktası, ilk wax kristallerinin yakıt içerisinde gözlemlenmeye başladığı en düşük sıcaklığı ifade eder. Yakıt soğutulmaya devam edildiğinde, yakıtın hala akmaya devam edebildiği en düşük sıcaklığa akma noktası denir. Bu durum yakıtın pompalanmasını zorlaştırır ve filtrelerin tıkanmasına sebep olabilir. Özellikle düşük kükürtlü dizel yakıtların bulutlanma ve akma noktası daha yüksektir [67].

3.1.11. Yağlayıcılık Özelliği ve Oksidasyon Kararlılığı

Dizel motorlar, özellikle yakıt sistemi elemanlarının yağlanmasında yakıtın yağlayıcılık özelliğini kullanırlar. Yakıt yağlayıcılık özelliği, yakıtın yağlayıcı olarak ne ölçüde yağlama yaptığının bir göstergesidir. Dizel yakıt içerisindeki en önemli yağlayıcı bileşen kükürttür. Düşük kükürtlü veya kükürtsüz yakıtlarda olduğu gibi yakıtın kükürt içeriği azaltıldığında yakıtın yağlayıcılık özelliği de azalır. Yakıtın yağlayıcılık özelliğini devam ettirmek için, değişik organik bileşenlerden oluşan çeşitli katkıları kullanılır. Oksijen kararlılığı, yakıtın oksijenle bozulmasına veya indirgenmesine karşı yakıtın gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Dizel yakıtın oksidasyonu, tortu ve sakızlaşma olarak görülür. Tortu ve sakızlaşmalar yakıt filtrelerini tıkayabilir ve yakıtın rengini koyulaştırır [59, 67].

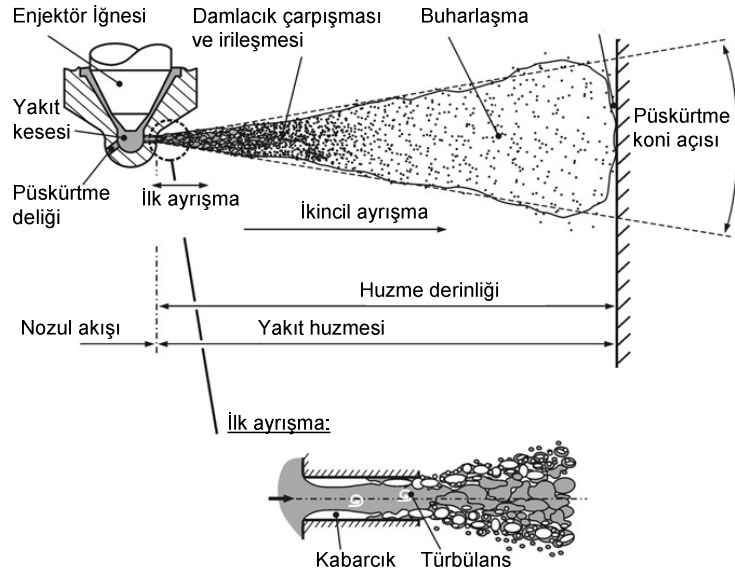
3.2. DİZEL MOTORLARDA KARIŞIM TEŞKİLİ VE YANMA

İçten yanmalı motorlarda yanma olayı üç aşamada incelenebilir. Bunlar; uygun hava-yakıt karışımının oluşumu, tutuşma ve yanmadır. Dizel motorlarda yakıt, yanma odasında sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılmış havanın üzerine püskürtülür. Yanma odasına püskürtülen yakıtın bir kısmı buharlaşır ve tutuşma öncesi hava ile karışır ve tutuşarak ön karışimli yanma (ani yanma) kısmını oluşturur. Yakıt hüzmesinden arta kalan yakıtın yanması ile difüzyon yanma kısmı oluşur. İçten yanmalı motorlardaki yanma çok karışık bir reaksiyon dizisi ve ısı transfer sürecidir. O yüzden, nihai emisyonların oluşumunun anlaşılması için daha fazla analize ihtiyaç vardır.

Yakıt püskürtme sistemlerinin ana görevi, çok kısa bir zaman diliminde yeterli buharlaşmayı ve hüzme derinliğini sağlamak için yüksek derecede atomizasyonu gerçekleştirmektir. Yakıt püskürtme sistemi motor yüküne ve hızına bağlı olarak, motorun ihtiyaç duyduğu yakıt miktarını ölçmeli, doğru zamanda ve istenilen hızda püskürtmelidir. Bununla birlikte, yanma odasına bağlı olarak uygun hüzme şeklini ve yapısını sağlamalıdır. Genellikle yakıt besleme pompası, yakıt deposundan yakıtı alarak yüksek basınçlı yakıt pompasına taşır. Yakıt pompası, yakıt hat basıncını yükselterek yakıtı püskürtülmesi için enjektörlere gönderir. Enjektörlerdeki fazla yakıt, tekrar yakıt deposuna gönderilir. Geleneksel yakıt püskürtme sistemindeki yüksek basınçlı yakıt pompası, motorun ihtiyaç duyduğu yakıtı hacimsel olarak ölçerek enjektörlere gönderir.

Genellikle enjektör nozulu üzerindeki püskürtme deliği tekli veya çoklu olabilir ve çapları 0,1–1 mm arasında değişir. Sıvı yakıtın enjektörü terk etme hızı yaklaşık 100-200 m/s arasındadır. Enjektörü terk eden sıvı yakıtın tanecik çapı yaklaşık 0,01 mm veya daha küçüktür. Tanecik çapını etkileyen en önemli parametreler, enjektör nozulunun her iki tarafındaki basınç farkı, nozul çapı ve geometrisi, yakıt özellikleri, yanma odasındaki hava sıcaklığı ve türbülansdır. Enjektör nozulunun her iki tarafındaki yüksek basınç farkı, yakıt tanecik çapını önemli ölçüde azaltır. Püskürtülen yakıtın hızı, yanma odasındaki basınca, buharlaşmaya ve türbülansa bağlı olarak değişir. Yakıt hüzmesi ilerlerken, yakıt hüzmesinin etrafında buharlaşma

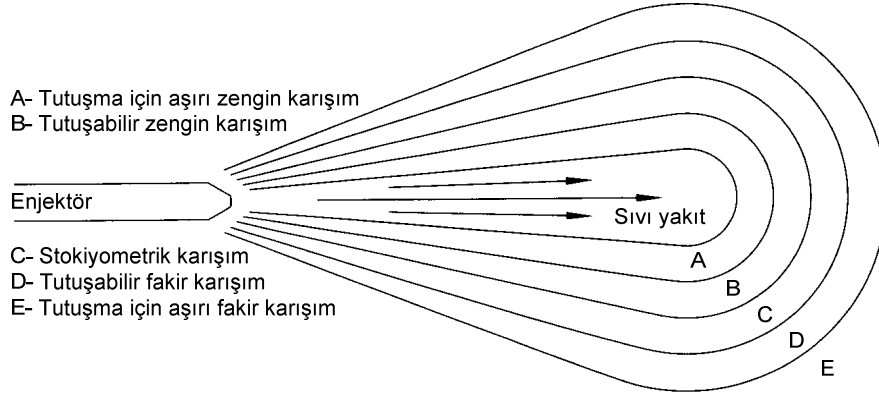
oluşur. Bununla birlikte yakıt hüzmesinin çekirdeği çoğunlukla sıvı yakıttan oluşur [68, 69]. Yakıtın enjektör nozulunu terk etmesinin hemen ardından, püskürtülen yakıt parçalanarak koni şeklini almaya başlar. Sıvı yakıtın parçalanmaya başladığı ilk kısım ilk ayrışma bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölge genelde iri yakıt taneciklerinden oluşur. Yüksek basınçlı püskürtmede ana parçalanma mekanizmasını oluşturan etkenler, enjektör püskürtme deliklerinin içerisinde oluşan hava kabarcıkları ve türbülansdır. Mevcut iri yakıt taneciklerinin ayrışmasını takip eden parçalanma süreci ikincil ayrışma bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgedeki yakıt tanecikleri daha küçüktür ve yanma odasındaki aerodinamik kuvvetler ve gazlardan dolayı hızı gittikçe azalır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Dizel motorlarda yakıt hüzmesinin oluşumu [68].

Yakıt hüzmesinin merkezindeki sıvı yakıt, hava-yakıt karışımından oluşan buhar tabakası tarafından çevrelenir. Sıvı yakıtın büyük bir kısmı yakıt hüzmesinin merkezinde yoğunlaşır. Hava/yakıt karışım oranları yakıt merkezinden uzaklaştıkça ve hava ile karıştıkça artar (Şekil 3.2). Yakıt taneciklerinin hızları hüzme ekseninde en yüksek seviyededir. Aynı zamanda, hüzme merkezinde yakıt taneciklerinin birbirleri ile çarpışması olasılığı daha yüksektir. Hüzme merkezindeki tanecik çarpışmaları tanecik hızını yavaşlatırken, yakıtın kütlesini de artırır. Bu bölgede,

yakıt tanecikleri daha küçük parçalara ayırırken, daha sonra tekrar birleşerek daha iri yakıt tanecikleri de oluşturabilirler [69].



Şekil 3.2. Püskürtme hüzmesinde karışım teşkili ve karışım oranlarının değişimi [69].

Yakıt hüzmesinin derinliği, enjektör nozulu ile yanma odası yüzeyleri ile sınırlıdır. Tam yük (uzun püskürtme periyodu) ve yüksek püskürtme basıncı veya erken püskürtme (yanma odasında püskürtme öncesi düşük gaz yoğunluğu) durumlarında, yakıt hüzmesi silindir yüzeylerine çarpar ve silindir yüzeylerinde sıvı yakıt filmi oluşur. Silindir yüzeylerinde oluşan yakıt filmi, karışım teşkilini kötüleştirirken, yanma odası cidarlarındaki yanmanın sıcaklığını düşürür ve hidrokarbon (HC) ve is emisyonlarının oluşumuna sebep olur. Çünkü silindir yüzeylerindeki sıvı yakıt filminin buharlaşması zordur ve eksik yanmaya sebep olur. Yakıt hüzme derinliğinin çok kısa olması ise aşırı zengin karışım teşkiline ve dolayısı ile is ve HC emisyonlarının oluşumuna sebep olur [68, 69].

Yakıtın fiziksel özelliklerinin (viskozite, yoğunluk, yüzey gerilmesi gibi) püskürtme karakteristikleri üzerine etkisi büyüktür. Yüksek yakıt viskozitesi, enjektördeki yakıtın hava ile karışma hızını azaltır ve atomizasyonu güçleştirir. Geleneksel dizel püskürtme sistemleri, silindirlere gönderilecek yakıtı hacimsel olarak ölçerler. Kütle, hacim ve yoğunluk arasındaki ilişkiden dolayı, değişen yakıt yoğunluğu püskürtülen yakıt miktarını etkiler. Yakıtın yüzey gerilimi ise, püskürtülen yakıt taneciklerinin birbirleri ile yapışma meylini ifade eder. Özellikle yakıt hüzmesinin merkezindeki yüksek hızlı yakıt taneciklerinin birbiri ile çarpışarak daha büyük yakıt tanecikleri oluşturmasına ve atomizasyonun kötüleşmesine sebep olurlar [42, 43, 58, 68, 69].

Püskürtmenin sonunda, enjektör iğnesi püskürtme deliklerini kapatırken püskürtme hızı yavaşlar [68]. Bu durum hüzme ekseninde bozulmaya sebep olur. Püskürtme hızının azalması ve yakıt taneciklerinin ebatlarının büyümesi yakıtın atomizasyonunu kötüleştirir. İri yakıt taneciklerinin is ve HC emisyonları üzerindeki negatif etkisini azaltmak için enjektör iğnesinin püskürtme deliklerini hızlı bir şekilde kapatması gerekir. Yakıtın yanma odasına püskürtülmesinden sonra uygun bir yanma süreci sağlamak için çeşitli olaylar serisi başlar. Bunlar:

Atomizasyon: Enjektörden püskürtülen iri yakıt taneciklerinin küçük yakıt taneciklerine ayrışması atomizasyon sürecini oluşturur. Atomizasyon süreci, enjektörden püskürtülen yakıt taneciklerinin boyutlarının daha küçük olması ile daha hızlı ve etkili gerçekleşir.

Buharlaştırma: Küçük ebatlı sıvı yakıt taneciklerinin yanma odasında buharlaştırma sürecidir. Buharlaştırma süreci, yüksek sıkıştırma oranından dolayı aşırı ısınan hava yardımı ile kısa sürer. Püskürtülen yakıtın %90'ı püskürtmeden hemen sonra 0,001 saniyede buharlaşır. Buharlaştırma süreci için gereken yüksek hava sıcaklığının oluşması için ihtiyaç duyulan minimum sıkıştırma oranı 12:1 civarındadır. Yakıt hüzmesinde ilk buharlaştırma başlarken, buharlaşmanın soğutma etkisinden dolayı, hüzme etrafındaki atmosfer hızlı bir şekilde soğur. Bu durum müteakip buharlaşmaları da etkiler. Hüzme çekirdeğinin yakınındaki yüksek yakıt konsantrasyonu ve soğutma etkisi yakıt yoğunlaşmasının oluşumuna sebep olur. Bu durumda bu bölgedeki buharlaştırma durur ve sadece ilave karışım ve ısı buharlaşmayı tekrar başlatabilir [69].

Karışımın oluşumu: Buharlaştırma sürecinden sonra yakıt buharı, tutuşabilir aralıklarda hava/yakıt oranına sahip bir karışım oluşturmak için hava ile karışır. Yanma odasındaki türbülans ve yakıt püskürtme hızı karışım oluşturma sürecine yardım eder. Püskürtülen yakıt hüzmesi etrafında oluşan hava/yakıt oranı dağılımı heterojendir (Şekil 3.2). Eşdeğerlik oranının 1,8 (zengin) ile 0,8 (fakir) olduğu aralıklarda yakıtın tutuşması başlar [68, 69].

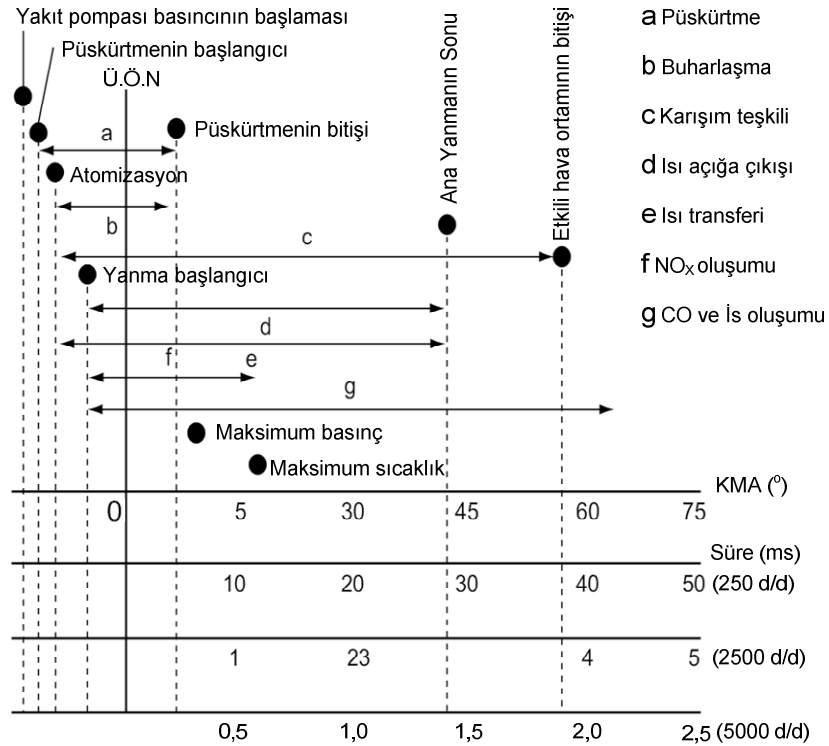
Dizel motordaki güç artışı, motora emilen hava kısılmaksızın yanma odasına püskürtülen yakıt miktarı ile kontrol edilir. Dizel motorlarda, sıkıştırma ile sıcaklığı artan havanın ardından yakıt yüksek basınçta yanma odasına püskürtülür. Yanma odasına yüksek basınçta püskürtülmüş yakıt, küçük yakıt tanecikleri veya yakıt buharı şeklinde hava ile karışır. Sıkıştırılmış hava, yanma odasındaki püskürtülmüş yakıt taneciklerini ısıtır ve buharlaşma gerçekleşir. Buharlaşan yakıt yanma odasındaki mevcut oksijenle karışarak karışımı oluşturur. Tutuşabilir özellikte uygun hava/yakıt oranı oluşturan karışım belli bir tutuşma gecikmesinden sonra birkaç yerden aniden tutuşur ve alevler yanma odasında ilerler. Oluşan alev cephesi ilerlerken, yanmamış yakıt tanecikleri de buharlaşır ve reaksiyona dâhil edilir. İfade edilen bu yanma olayları, karışım teşkilinden sonra kendi kendine tutuşma ile başlar ve genişleme zamanının sonuna kadar devam eder.

Kendi kendine tutuşma: Püskürtmenin başlamasından 6–8 derece sonra buharlaşmış yakıt, karışım teşkili sağlanarak kendine tutuşmaya başlar. Püskürtülen yakıt hüzmeleri etrafındaki eşdeğerlik oranının 1,8 (zengin) ile 0,8 (fakir) olduğu aralıklarda yanma gerçekleşir [68, 69]. İS oksidasyonundan ve büyük hidrokarbon moleküllerinin ayrışmasından oluşan ikincil reaksiyonlar yardımı ile yanma devam eder. Yanma odasındaki yüksek hava sıcaklığından kaynaklanan bu reaksiyonlar ekzotermiktir (ısı veren) ve yanma odasındaki hava sıcaklığını daha fazla artırır. Bu durum kararlı yanma sürecine öncülük eder.

Yanma: Püskürtülen yakıtın kendi kendine tutuşmasından sonra, eşdeğerlik oranının 1-1,5 arasında olduğu püskürtme hüzmelerinin yakıtça zengin bölgelerindeki birkaç noktada yanma ani olarak başlar. Yanmanın başladığı anda, yanma odasında püskürtülen yakıtın %70-%95'i buhar halindedir. Yanma odasında yanma başladığında, birçok tutuşma noktasından dolayı oluşan çoklu alev bölgeleri yanma odasında yayılırken, tutuşmanın başlamadığı bölgelerdeki gaz karışımlarını tüketir. Bu durumda, yanma odasındaki sıcaklık ve basınçlarda ani artışlar gözlenir. Yanma odası sıcaklığının ve basıncının artışı, yanma odasındaki yanmamış bölgelerde bulunan yakıt parçacıklarının sıcaklığını ve basıncını da artırarak buharlaşma ve tutuşma süresini kısaltır ve yanmayı daha da geliştirir. İlk tutuşmanın başlamasından sonra, silindire yakıt püskürtülmesine devam edilir. Yanma sürecinin geri kalan

kısmı püskürtülen yakıtın hızı, atomizasyonu, buharlaşması ve uygun özellikte hava/yakıt oranı oluşturulması ile kontrol edilir. Yakıtın püskürtülmesi ile kontrol edilen bu yanma sürecinde, silindir basıncı artış hızı ani yanma periyoduna göre daha yavaştır. Toplam yanma süreci yaklaşık 40–50 derece sürer ve bu sürecin 20 dereceden daha fazlalık kısmı yakıtın püskürtülmesini kapsar [69]. Çünkü bazı yakıt partiküllerinin hava ile karışarak uygun özellikte tutuşabilir bir hava-yakıt karışımı oluşturması biraz zaman alır. Bu yüzden yanma genişleme zamanında sona erer.

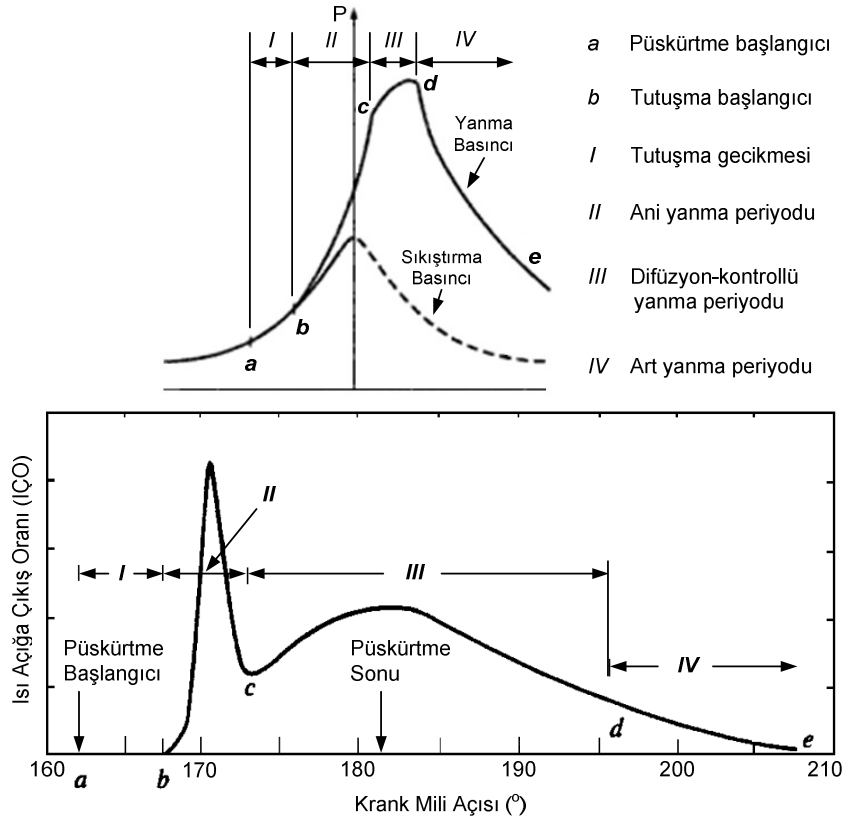
Yanma odasında karışım teşkili, maksimum sıcaklık-basıncın oluşumu ve yanmanın zaman ölçeği Şekil 3.3'te verilmiştir. Yanma olaylarının periyotları, silindir içi sıcaklık ve basınçların etkisi ihmal edildiğinde, krank mili açısı cinsinden bütün motor hızları için yaklaşık aynıdır. Zaman ölçeğinde değerlendirildiğinde ise motor hızının artışı ile birlikte yanma olaylarının periyotlarının değiştiği görülür. Bu durum, motor hızına bağlı olarak optimum performans ve emisyon parametrelerini yakalamak için önemlidir.



Şekil 3.3. Dizel motorlarda karışım teşkili ve yanmanın zaman ölçeği [70].

IÇO'ya ve silindir basıncına bağlı olarak yanma periyotları Şekil 3.4'te verilmiştir. Dizel motorlarda yanma dört aşamadan oluşur. Bunlar:

Tutuşma gecikmesi periyodu: Yakıtın silindirlere püskürtülme zamanı yakıt hat basıncından veya enjektör iğnesinin kalkma miktarından tespit edilir. Tutuşmanın başlaması ise IÇO'dan veya silindir içi basınç eğrisinin ikinci türeviden tespit edilebilir.



Yakıtın yanma odasına püskürtülmesi ile tutuşmanın başlaması arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır (Şekil 3.4, a-b arası). Motorun emiş hattındaki koşullar (basınç, sıcaklık, ve hız) ve yakıt hüzmelerinin oluşumunu etkileyen fiziksel faktörler tutuşma gecikmesini de etkiler. Bu değişkenler özellikle yanma odası ile yakıt püskürtme sisteminin tasarımına ve motorun çalışma koşullarına bağlıdır. Yakıt hüzmelerinin oluşumunu büyük ölçüde etkileyen yakıt sistemi parametreleri; püskürtmenin zamanlaması (avansı), püskürtmenin basıncı, miktarı, hızı, hüzmeye şekli

ve damlacık çapıdır. Motorun emiş veya dolgu koşulları ise yanma odası tasarımına, emme basıncına ve sıcaklığına, sıkıştırma oranına, püskürtme avansına, soğutma suyu ve yağlama sıcaklığına, motor hızına ve silindir içindeki atık gaz koşullarına bağlıdır. Tutuşma gecikmesi, fiziksel ve kimyasal tutuşma gecikmesi olarak ikiye ayrılabilir. Fiziksel tutuşma gecikmesi, yakıtın püskürtülmesi ile yakıtın kimyasal reaksiyonlara başladığı koşullara ulaştığı zaman aralığıdır. Fiziksel tutuşma gecikmesi bölümünde püskürtülen yakıt atomize olur, buharlaşır, hava ile karışır ve kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşır.

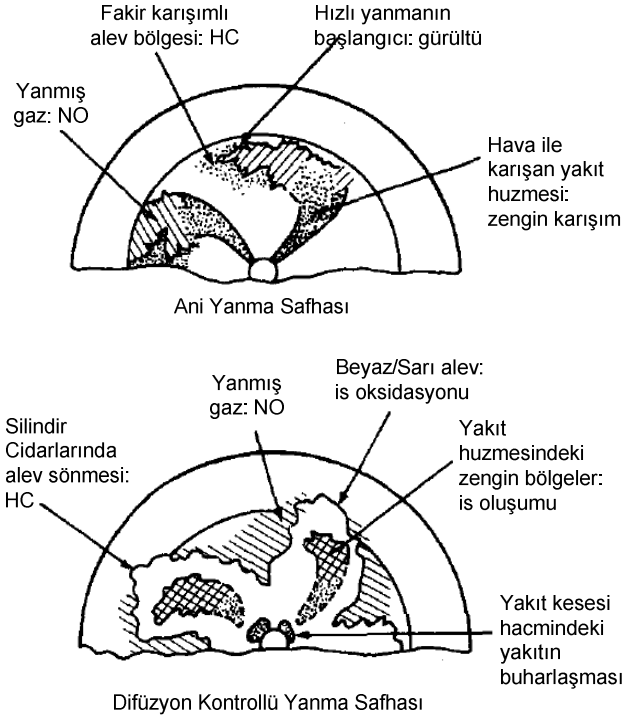
Fiziksel tutuşma gecikmesi, yakıtın türüne ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Hafif yakıtlarda fiziksel tutuşma gecikmesi az, ağır yakıtlarda ise fazladır. Fiziksel tutuşma gecikmesi, püskürtme basıncının artırılması, yüksek yanma sonu sıcaklıkları, yüksek türbülans ve atomizasyon ile azaltılabilir. Kimyasal tutuşma gecikmesi boyunca, reaksiyonlar yavaş başlar ve alevlenme veya tutuşma görülene kadar hızlanır. Genellikle, kimyasal tutuşma gecikmesi fiziksel tutuşma gecikmesinden daha büyüktür. Bununla birlikte, kimyasal tutuşma gecikmesi büyük oranda silindir içi sıcaklıklara bağlıdır. Yüksek silindir içi sıcaklıklarda, kimyasal tutuşma gecikmesi kısalmış ve fiziksel tutuşma gecikmesinden daha küçük olabilir. Buji ile ateşlemeli motorların tutuşma gecikmesi, sıkıştırma ile ateşlemeli motorların kimyasal tutuşma gecikmesine yaklaşık eşittir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların çoğunda, tutuşma gecikmesi püskürtme periyodundan daha kısadır [71].

Ani yanma periyodu: Yanma odasında tutuşmanın başlaması ile İÇO'nun maksimum değerine ulaştıktan sonraki ilk çukur arasındaki süre ani yanma periyodu olarak adlandırılır. Ani yanma periyodunda, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca tutuşabilir aralıkta karışım teşkili oluşturan yakıt-hava karışımının yanması hızlı bir şekilde gerçekleşir (Şekil 3.4, b-c arası). İÇO'nun maksimum olduğu yanma periyodu ani yanma periyodudur. Ani yanma periyodunda, silindir içi basıncın ve İÇO'nun maksimum değeri büyük oranda tutuşma gecikmesine bağlıdır. Uzun tutuşma gecikmesi periyodunda, ani yanma periyodundan önce silindire püskürtülen yakıt miktarı birikir ve ani yanma periyodunda hızlı bir şekilde yanarak silindir basıncını ve İÇO'yu artırır. Bu durum yanma sonu sıcaklık ve basınçları ile birlikte basınç artış hızlarını da artırır.

Difüzyon kontrollü yanma periyodu: Ani yanma periyodunda, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca tutuşabilir aralıkta karışım teşkili oluşturan yakıt-hava karışımının yanması hızlı bir şekilde gerçekleşir. Difüzyon kontrollü yanma periyodu, ani yanma periyodundan arta kalan yanmamış yakıt-hava karışımı tarafından veya püskürtülmeye devam edilen yakıt tarafından kontrol edilir. Difüzyon kontrollü yanma periyodundaki İÇO bazen, İÇO grafiğinde ikinci pik noktasına ulaşarak kendini gösterebilir ancak ani yanma periyodundaki maksimum İÇO'dan (İÇOmaks) daha düşüktür. Difüzyon kontrollü yanma periyodu, ani yanma periyodunun bitimi ile başlar ve toplam ısı açığa çıkış oranının (TIÇO) %90–%95 olduğu zamana kadar veya genel bir yaklaşımla yanma sonu sıcaklıklarının maksimum olduğu zamana kadar sürer [72].

Art yanma periyodu: Püskürtme periyodunun bitmesi ile yanma hemen bitmez. Yanma odasında arta kalan yanmamış veya eksik yanmış yakıt tanecikleri yanma odasında oksijenle temas ederek yanmaya başlar. Art yanma periyodu, difüzyon kontrollü yanma periyodunun bittiği ve maksimum yanma sonu sıcaklığının olduğu nokta civarında başlar ve genişleme zamanının bir kısmına kadar devam eder. Art yanma periyodundaki İÇO, genişleme zamanına doğru azalarak gerçekleşir. Çünkü çok az miktardaki yanmamış yakıt ve is partikülleri veya zengin yanma ürünleri art yanma periyodunda ısı açığa çıkışı sağlar. Bu periyotta silindir içerisindeki ortalama gaz sıcaklıkları azalır [72].

Şekil 3.5'te ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodunda karışım teşkili, alevin oluşması ve ilerlemesi, yanmanın çeşitli emisyonlar üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Genellikle, NO_x emisyonları ani yanma safhasında oluşurken, is emisyonları daha çok difüzyon kontrollü yanma periyodunda oluşur [73-75]. Motor egzozunda görülen kirletici emisyonların oluşumu yanma periyotları ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3.5. Ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodunda yanmanın ve emisyonların oluşumu [37].

3.3. DİZEL MOTORLARDA EMİSYONLARIN OLUŞUMU

Dizel emisyonları çoğunlukla çeşitli gaz karışımlarından, su buharından, sıvı aerosollerden ve partikül maddelerden oluşur. Dizel egzoz emisyonları arasında tam yanma ürünleri (CO_2 , H_2O , NO_x , SO_2) ve eksik yanma ürünleri (CO , HC , is) bulunur. Bununla birlikte, dizel motorlarda kontrol altında tutulması gereken en önemli emisyonlar is ve NO_x emisyonlarıdır.

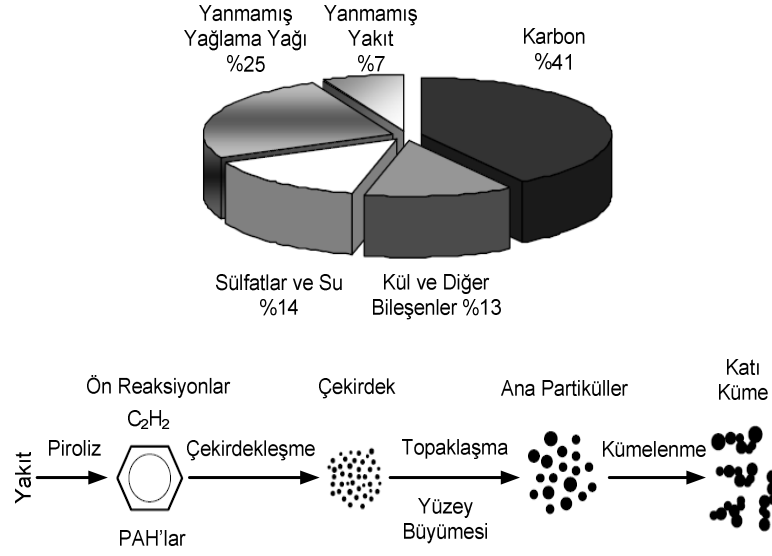
Yanma odasında hava-yakıt karışımının oluşma hızı, hava/yakıt oranı, yanma sıcaklığı ve gazların yanma odasında kalış süreleri gibi parametreler emisyonların oluşumunu değişik ölçülerde etkilerler. Buji ile ateşlemeli motorların aksine dizel motorlarda karışımın teşkili ve yanma heterojen olarak gerçekleşir. Heterojen haldeki hava-yakıt karışımının yanması sonucu oluşan emisyonlar sadece yanma periyoduna ve genişleme stroğuna değil aynı zamanda yanma odasında baskın olan genel şartlara da bağlıdır. Tutuşma periyodu boyunca karışım teşkili, yakıtın tutuşma kabiliyeti, yanma odasında farklı sıcaklıklarda bekleme süresi, genişleme periyodu ve genel

motor özellikleri emisyonların oluşumunda önemli rol oynarlar. Esas itibarıyla, farklı türdeki emisyonların egzozdaki konsantrasyonları emisyonların oluşumlarının bir sonucudur. Yanmanın erken safhalarında oluşan eksik yanma ürünleri genişleme stroğu sonuna kadar oksidasyona uğrayabilir. Yanmamış hidrokarbonların oksitleyici gazlar ile karışımı, yüksek yanma odası sıcaklığı, oksidasyon süreci için yeterli zamanın olması tam yanmaya yardımcı olur [37, 76].

3.3.1. Partikül Madde ve İS Emisyonları

Çoğunlukla yanmamış yakıt ve yağlama yağından kaynaklanan bazı organik bileşenlerin yanma sonucu ortaya çıkan karbon içerikli materyaller (is) tarafından absorbe edilmesi ile dizel partikül madde emisyonları oluşur. Partikül maddenin boyutları 20 nm ila 10 µm arasında olduğundan aynı zamanda solunabilir özelliktedir. Partikül maddenin bir kısmı çözünebilir kısım diğer kısmı ise çözünmez veya kuru kısım olarak bilinir. Kuru kısım genellikle is emisyonlarının tahmin edilmesinde kullanılır. Dizel egzozundan kaynaklanan partikül madde içerisindeki is miktarı değişkenlik göstermesine rağmen genellikle %40-%50'den daha fazla orana sahiptir. Partikül maddenin diğer bileşenleri ise kısmi yanmış yakıt veya yağlama yağı, su, aşınmış metal parçacıkları ve sülfatlardan oluşur (Şekil 3.6). Sülfürik asit/sülfat yüzdesi kabaca yakıt içerisindeki kükürt miktarına bağlı olarak değişir. Yanmamış yakıt ve yağlama yağı (yani çözünebilir organik kısım) yüzdesi ise motorun tasarımına ve işletme koşullarına göre değişiklik gösterir ve kütleli olarak %10-%90 arasında olabilir [77].

Dizel motorlarda is, eksik yanmanın bir göstergesidir ve aşırı zengin hava/yakıt oranının veya kısmen buharlaşabilmiş yakıt taneciklerinin bir sonucudur. İS emisyonu, yüksek sıcaklıktaki yakıtça zengin bölgelerde buhar fazından katı faza geçiş sırasında çekirdekleşen yanmamış yakıtlardan oluşur. İS emisyonlarının olduğu bölgesel koşullara bağlı olarak, hidrokarbonlar veya diğer mevcut moleküller is taneciklerinin üzerine yoğunlaşır veya is tanecikleri tarafından absorbe edilir. Sıvı veya gaz fazındaki hidrokarbonların katı is partiküllerine dönüşümü altı bölümde tanımlanır [77, 78]. Bu bölümler;



Şekil 3.6. Partikül kompozisyonu ve is oluşumu [77].

Pirroliz: Yüksek sıcaklıkta yakıtın molekül yapısını değiştiren endotermik (çevresinden ısı alan) reaksiyon sonucu ortaya çıkan PAH'ların oluştuğu süreç is partiküllerinin oluşumunun başlangıcı olarak düşünülür.

Çekirdekleşme: Hidrokarbon gibi uçucu bileşenlerden oluşan nanopartiküllerin veya çekirdeğin eş zamanlı olarak ortaya çıkmasıdır.

Yüzey büyümesi: Çekirdekleşmiş is partikülünün yüzeyine madde ilavesi sürecidir.

Topaklaşma: Daha büyük küresel partiküllerin oluşumu için küçük küresel partiküllerin bir araya gelerek çarpışmasıdır.

Kümelenme: Zincir yapı benzeri büyük ana partikülleri oluşturmak için partiküllerin birbirleri ile yapışmasıdır.

Oksidasyon: İs partiküllerinin oluşum sürecindeki her bir bölüm, genellikle 1300 K'in üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşir. Oksitleyici bileşenlerin olduğu ortamdaki is partikülleri yanarak CO, CO₂ ve H₂O gibi gazlaşmış ürünleri oluşturur.

Nihai is emisyonlarının oluşumu, oksidasyon ve oluşum süreci arasındaki balansa bağlıdır. Motorun kararlı durum çalışmasında, yük artışı ile birlikte silindirlere püskürtülen yakıt miktarı artar ve bu durum özellikle yakıtça zengin bölgelerdeki sıcaklıkları artırır. Motordaki is oluşumu önemli ölçüde motor yüküne bağlıdır. Artan motor yükü ile birlikte yanma odasında difizyonlu yanma periyodu boyunca tepkimeye girecek oksijen miktarı azalır, sıcaklıklar artar ve difizyonlu yanma periyodu uzar. Artan difizyonlu yanma periyodu ise is emisyonunun oluşumuna yardım eder [79].

Yakıt püskürtme basıncının artışı, püskürtülen yakıtın hüzme uzunluğunu artırır. Ancak, püskürtme basıncındaki gereğinden fazla artış püskürtülen yakıtın yanma odası cidarlarına temas etmesini sağlayarak karışımın oluşum hızını yavaşlatır ve karışımın heterojenliğini artırır. Karışım teşkilindeki gecikme, tutuşma gecikmesinin ve yanma süresinin uzamasına sebep olur. Karışım teşkilindeki gecikmeden dolayı is partiküllerinin oksidasyonu zorlaşır.

Soğuk çalışma koşullarında, bazen çevrimlerin gerçekleşmemesinden dolayı beyaz is oluşabilir. Bu durum, buharlaşmaya çalışan yakıtın hava ile kısmen karışabildiğinin bir belirtisidir. Soğuk çalışma koşullarında, silindir içi sıcaklıklarının düşük oluşu püskürtülen yakıtın buharlaşmasını güçleştirir. Oluşan beyaz duman, çoğunlukla yanmamış hidrokarbonlardan oluşur ve motor ısındıkça azalır. Bununla birlikte, püskürtme zamanının çok fazla geciktirilmesi, yanma odasındaki yakıtın tutuşma gecikmesinin çok uzun olması ve sıkıştırma oranının çok düşük olması da beyaz dumanın egzoz sisteminde görülmesinin nedenleridir [37, 80].

3.3.2. Nitrojen Oksit (NO_x) Emisyonları

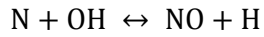
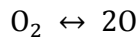
NO_x emisyonları çoğunlukla nitrojen monoksit (NO) ve nitrojen dioksitten (NO₂) oluşur. Bu iki bileşenin toplamı ise NO_x emisyonları olarak adlandırılır. Genellikle, NO_x emisyonlarının %70-%90'lık kısmını NO emisyonları oluşturur. NO_x emisyonları büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Bunun yanında oksijenin lokal konsantrasyonuna ve yanma süresine bağlıdır. Diğer önemli faktörler ise, püskürtme zamanı, yanma odasına alınan dolgunun sıcaklığı, türbülans, yakıt özellikleri vb. gibi

parametrelerdir. Yapılan araştırmalara göre, NO_x emisyonların oluşumu büyük oranda ani yanma fazında gerçekleşmektedir. NO emisyonları, yanma periyodu boyunca yanmanın bir ürünü olarak oluşur ve daha sonra NO emisyonlarının bir kısmı NO₂ emisyonlarına dönüşür [76, 77].

Silindir içerisindeki yakıt-hava karışımının yanması ile nitrojen (N₂) ve oksijen (O₂) molekülleri N ve O şeklinde atomlarına ayrılır. N ve O atomları yanma odasında ve egzoz zamanında reaksiyona girerek NO_x emisyonlarını oluştururlar. Dizel motorlarda NO_x emisyonlarını oluşturan iki oluşum mekanizması mevcuttur. Bunlar [77]:

- Yanma odasındaki atmosferik nitrojenin oksidasyonu (termal NO_x-Zel'dovich mekanizması),
- Yakıt içeriğinde bulunan nitrojenin dönüşümü (yakıt NO_x veya organik NO_x).

Stokiyometrik yakıt-hava karışımlarına yakın fakir yanma boyunca NO oluşum reaksiyonları Zel'dovich mekanizması ile tanımlanmıştır. N₂ ve O₂ molekülleri, yanma odasındaki belli sıcaklık ve basınçta N ve O şeklinde serbest atomlarına ayrırır ve tekrar NO oluşturmak için birleşirler. Basitleştirilmif reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



Bu dört ifade tersinirdir ve sadece stokiyometriğe yakın fakir yakıt-hava karışımlarında önemlidir. NO_x emisyonlarının oluşum hızı yüksek sıcaklığa ve nitrojenin yüksek sıcaklıkta kalma süresine bağlıdır. Genellikle 1800 K den daha yüksek sıcaklıklarda, yanma odasındaki moleküler nitrojen (N₂) ve oksijen (O₂) atomik olarak N ve O şeklinde ayrırır ve reaksiyon serilerine katılırlar. NO oluşumu sıcaklıkla üssel olarak orantılıdır. NO emisyonlarının daha fazla oksitlenmesi ile NO₂ emisyonları oluşur. Yakıt içeriğindeki nitrojen tepkimeye dahil olduğunda organik

NO_x oluşur. Nitrojen içerikli yakıt yandığında, nitrojenli bileşikler parçalanır ve serbest nitrojenoksitler ortaya çıkar. Hava fazlalığı ile birlikte, NO_x emisyonlarının oluşum derecesi yakıtın nitrojen içeriğinin ana fonksiyonudur [76].

NO_x emisyonlarının oluşumu genellikle, yanma odasındaki sıcaklık, basınç, alev koşulları, oluşan ürünlerin yanma odasında kalış sürelerine bağlıdır. Yanma odasında ısı açığa çıkışının başlamasından hemen sonra hızlı bir şekilde NO_x emisyonları oluşmaya başlar ve İÇÖ'nun sonunda NO_x oluşumu yavaşlar. Çünkü silindir içerisinde bulunan yanmış gazlar yanmamış yakıt tanecikleri ile karışarak sıcaklıklar düşer.

NO_x emisyonlarını azaltmanın en etkili yolu Egzoz Gaz Resirkülasyonu (EGR) veya püskürtmenin geciktirilmesi yardımı ile silindir basınçlarını azaltmaktır. Ayrıca değişken supap zamanlaması ve harici sistemler (katalitik konvertör gibi) NO_x emisyonlarının azaltılmasında etkili olarak kullanılır [49, 77].

Püskürtme zamanının optimum bir noktadan sonra öne alınması veya geciktirilmesi tutuşma gecikmesini artırır. Yakıt püskürtme zamanının öne alınması (avansın artırılması) genellikle tutuşma gecikmesini artırır. Yakıtın daha önce püskürtüldüğü durumda, sıkıştırma basıncı ve sıcaklığı düşüktür. Bu durum tutuşma gecikmesini artırır. Artan tutuşma gecikmesi, silindire püskürtülen yakıtın hava ile karışması için daha uzun bir zaman dilimi sağlar. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin uzaması, püskürtülen yakıtın büyük bir kısmının ani yanma periyodunda birikmesine ve yanmasına, dolayısı ile ani yanma periyodunun uzamasına sebep olur. NO_x emisyonlarının oluşumu büyük oranda ani yanma periyodu ile ilişkilidir. Diğer taraftan, püskürtme zamanının geciktirilmesi ile tutuşma gecikmesi azalma yönünde eğilim gösterir. Azalan tutuşma gecikmesi ani yanma periyodunu azaltır ve NO_x emisyonlarının oluşumu da azalır [77].

Artan püskürtme basıncı, yanma odasına püskürtülen yakıtın atomizasyonunu iyileştirir. İyileşen atomizasyon, yakıt taneciklerinin daha küçük parçalara ayrışmasına ve yanma veriminin artmasına, daha yüksek İÇÖ'ya ve yüksek yanma sonu sıcaklıklarına sebep olur. Bu durum NO_x emisyonları artırır.

Yakıtın setan sayısındaki artış, püskürtülen yakıtın tutuşmasını ve buharlaşmasını kolaylaştırır. Sonuç olarak, yüksek setanlı yakıtlar daha kısa ani yanma periyoduna sebep olurlar ve NO_x emisyonlarını azaltırlar. Düşük setanlı yakıtlarda, tutuşma gecikmesi genellikle uzundur ve yanma başladığında fakir alev bölgesinde daha fazla yakıtın birikmesine sebep olurlar. Ani yanma safhasında biriken yakıt, yüksek hızla aniden yanar ve yanma sonu sıcaklıklarını artırır. Bu durumda ani yanma safhasındaki fakir alev bölgesinde NO_x oluşumu artar.

Doğal emişli motorlarda, motor yükünün artırılması ile birlikte silindirlere gönderilen yakıt miktarı ve dolayısı ile yakıt/hava oranı da artar. Artan yakıt/hava oranı, yanma odasında daha fazla İÇÖ sağlarken sıcaklıkları da artırır. Yakıt/hava oranındaki artış, NO_x emisyonlarının artışında etkilidir.

3.3.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonları

Dizel motorlardaki HC emisyonları, parçalanmış yakıt moleküllerinden veya yağlama yağından oluşur. HC emisyonları, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca, zengin yakıt/hava oranlarının bir sonucu olarak veya karışım teşkili sırasında tutuşmayan yakıt moleküllerinden oluşur. Tutuşma gecikmesinden sonra püskürtülen yakıt, yakıtın ve piroliz ürünlerinin hava ile karışmasını yavaşlatır. Bu durum, eksik yanma ve HC emisyonlarının oluşumuna sebep olan karışımın aşırı zenginleşmesine ve yanma ürünlerinin soğumasına yol açar. Düşük yükte ve yakıtça zengin karışımlı motor çalışması boyunca HC emisyonları oldukça önemlidir. HC oluşumunun esas kaynağı, yanma odasındaki karışımın tutuşamayacak kadar fakir olduğu reaksiyon bölgesi çevresindedir [77].

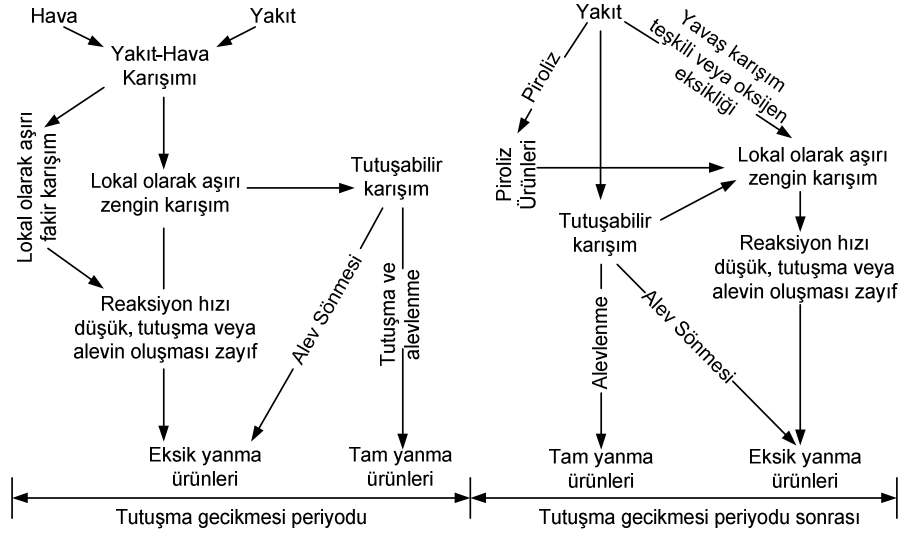
HC emisyonlarının oluşumu, özellikle motor yüküne, yanma odasındaki koşullara, hava emiş (doğal emişli veya aşırı doldurmalı) ve yakıt sistemine bağlıdır. Yanmamış hidrokarbon oluşumunun mekanizması, yavaş buharlaşma hızının ve yanma için aşırı zengin olan karışımın kombinasyonunun bir sonucudur. Yakıtın buharlaşma hızı ve yanma odasındaki yakıt/hava oranının durumu karışım teşkilinin hızını önemli ölçüde etkiler.

HC emisyonlar genel olarak, karışımın teşkili sırasındaki veya karışım teşkilinin sonundaki (püskürtmenin sonu) iri yakıt taneciklerinin hava ile karışamamasından kaynaklanır. Genellikle HC emisyonları, soğuk alev bölgesi, püskürtülen yakıtın çekirdeği, silindir cidarları ile temas eden bir kısım yakıt, püskürtme hüzmesi uzunluğu ve art püskürtme ile ilgilidir. Ayrıca, yakıt özellikleri, motor tasarımı ve motora ait işletme parametreleri HC emisyonlarının oluşumunda etkilidir [77].

Doğal emişli dizel motorlarda, hacimsel verimdeki küçük değişimler ihmal edildiğinde, her çevrimde silindirlere alınan hava kütlesi yaklaşık sabittir. Sabit bir motor hızında güç artışı sağlamak için püskürtülen yakıt miktarının artırılması gerekir. Çok silindirli motorlarda enjektörler arasındaki püskürtme ile ilgili farklılıklar, silindirler arasında gaz basıncı ve sıcaklık değişimlerine, silindirlere gönderilen yakıt miktarı değişimlerine ve püskürtme süresi değişimlerine sebep olabilir. Ayrıca, tutuşma gecikmesi boyunca silindirlere püskürtülen yakıt hava ile karışır ve hava/yakıt oranlarının çok geniş bir aralıkta değişimine sebep olur. Bu karışım oranlarının bir kısmı tutuşmak ve kararlı bir yanmaya dönüşmek için çok fakir, bir kısmı stokiyometrik orana yakın ve tutuşmaya hazır, diğer bir kısmı ise çok zengin ve buharlaşması ve karışım teşkil hızı çok düşük olabilir.

Tutuşma başlangıcında, büyük olasılıkla stokiyometrik karışıma yakın karışımlar yanar. Şayet silindir cidarlarına yakın bölgelerde alev sönmesi olmaz veya etraftaki hava ile aşırı karışımından dolayı lokal hava/yakıt oranı hızlı bir şekilde düşmez ise yanma sürer. Aşırı fakir karışımlarda ise yanma odasında ilave buharlaşmış yakıt ve karışımla karşılaşan yanma prosesi devam eder. Bu durum, püskürtme periyodunun sonuna doğru oluşan iri tanecikli yakıt molekülleri için de geçerlidir. İri yakıt taneciklerinin buharlaşması, karışım oluşturması ve yanma sürecine katılması için yanma odasında ilave havaya ve yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyacaktır. Yanma odasına püskürtülen yakıtın çoğunun yanması için buharlaşma, karışım oluşma ve yanma hızının yeterli düzeyde olması gerekir. Aksi durumda, egzozda aşırı derecede yanmamış hidrokarbon görülür. Yanmanın başlaması ile püskürtülen yakıt piroliz olur ve hava ile karışarak oksitlenme hızı artar. Sonuç olarak tam yanma sağlanır. Ancak, piroliz ve oksidasyon hızını yavaşlatan şartlar lokal olarak zengin karışımlara ve eksik yanmaya sebep olacağından HC emisyonlarının oluşumunu artırır [77].

Şekil 3.7’de tutuşma gecikmesi öncesi ve sonrası HC emisyonlarının oluşum mekanizması özetlenmiştir. Tutuşma gecikmesi öncesi ve sonrası şartlar, HC emisyonlarının oluşumu yanmanın kararlı hale gelmesi ve özellikle emisyonların oluşumu açısından önem teşkil eder.



Şekil 3.7. Tutuşma gecikmesi ve sonrası HC emisyonlarının oluşumu [37].

Relanti ve düşük yük koşullarında, püskürtülen yakıt yanma odası cidarlarına ulaşamaz ve enjektör ile piston yüzeyi arasındaki boşlukta yanar. Ayrıca, püskürtülen yakıtın çekirdeğindeki yakıt konsantrasyonu oldukça düşüktür. Bu durumda, yanmamış hidrokarbonlarının oluşumu yanma alevi ile yanma odası cidarı arasında kalan soğuk alev bölgesinden kaynaklanır. Yanmanın devam ettiği veya alevin ilerlediği sırada bu bölgedeki sıcaklık artışı oldukça düşüktür ve bu yüzden oksidasyon hızı da düşük seviyededir. Alev ile yanma odası cidarı arasında ilerleyen alevin önündeki yakıt molekülleri konsantrasyonunun düşük olmasından dolayı reaksiyon hızları daha da düşer. Bu bölgede oluşan hidrokarbonların toplam püskürtülen yakıtı oranı özellikle relanti koşullarında çok yüksektir. Motor yükü artırıldığında, azalan hava/yakıt oranı püskürtülen yakıtın silindir cidarlarına kadar ilerlemesine sebep olur ve yakıt hüzmesinin çekirdeğindeki yakıt konsantrasyonu daha yüksektir. Bu durumda HC emisyonlarının oluşumu artar. Ancak, yanma odasındaki yeterli oksijen, artan sıcaklıklarla beraber oksidasyon hızlarını artırır ve HC emisyonları azalır [77].

Tam yük veya aşırı yük koşullarında daha fazla azalan hava/yakıt oranı, yanma odası cidar çevresinde ve yakıt hüzmesinin merkezinde oluşan HC emisyonlarını artırır. Bu durumda yanma odasındaki yetersiz oksijen, oluşan yüksek sıcaklıklara rağmen, lokal olarak yüksek yakıt/hava oranı bölgesinde oksidasyon reaksiyonlarını kısıtlar. Ayrıca hidrokarbon emisyonlarının moleküler yapısı, hava/yakıt oranının değişmesi ile de değişebilir. Relanti ve düşük motor yüklerinde, dizel motorların ürettiği HC emisyonları alevin dış yüzeyi ile yanma odası cidarı arasındaki soğuk alev bölgesi ile ilişkilidir ve çoğunlukla orijinal yakıt moleküllerinden oluşur. Yüksek motor yüklerinde ise, HC emisyonlarının çoğu yakıt hüzme çekirdeğindeki ve yanma odası cidarlarına yakın sınırlardaki yakıt moleküllerinden oluşur. Yanma odası cidarlarında sıcaklık kısmen yüksektir ve orijinal yakıt moleküllerinin ayrışmasına sebep olur. Çünkü, yakıt hüzme çekirdeğinde ve yanma odası cidarlarına yakın sınırlarda hava/yakıt oranı genellikle zengindir ve hidrokarbon radikalleri ile ara bileşikler arasında bazı birleşme reaksiyonlarının oluşması olasılığı yüksektir. Bu durum yüksek konsantrasyonda ağır hidrokarbonların oluşumuna sebep olabilir. Aynı zamanda, radikallerin ve hidrokarbon bileşiklerinin birleşme reaksiyonları süreci, orijinal yakıt moleküllerinden farklı yapıya sahip çeşitli bileşikler de oluşturabilir.

Aşırı doldurmalı sistemlerde, silindirlere alınan artmış hava kütlesi ile orantılı olarak püskürtülen yakıt miktarı ve dolayısı ile motor çıkış gücü de artar. Aşırı doldurmalı motorlarda emme manifoldundaki hava hızı doğal emişli motorlara göre daha yüksektir. Bu durum silindirlerdeki karışım oluşumunu ve hızını artırır. Karışım hızındaki artış ise reaksiyon ve oksidasyon hızını artırarak, yanma sıcaklıklarının artışı sağlar ve HC emisyonlarının konsantrasyonlarını azaltır [77].

Yakıt püskürtme basıncının artırılması yakıtın atomizasyonunu artırır. Bu durum karışım teşkil hızını ve karışımın oluşmasını iyileştirerek tam yanmaya yardımcı olur ve HC emisyonlarını azaltır. Ancak, yakıt püskürtme basıncının gereğinden fazla artışı HC emisyonlarının oluşumuna büyük katkı sağlayan alev sönme bölgelerini de aşırı derecede genişletir. Optimum püskürtme zamanının öncesinde veya sonrasında yakıtı püskürtmek HC emisyonlarını artırır. Bu durum tutuşma gecikmesi periyodu ile ilgilidir. Püskürtme zamanını çok öne almak veya çok geciktirmek tutuşma gecikmesini artırır. Artan tutuşma gecikmesi ile birlikte daha fazla yakıt buharlaşır

ve küçük yakıt tanecikleri yanma odasındaki sirkülasyon yardımı ile uzaklara taşınır. Bu sebeple daha geniş soğuk alev bölgesi oluşur ve HC emisyonları artar. HC emisyonlarını artıran diğer bir sebep de yanma odası yüzeylerine çarpan yakıt tanecikleridir [77].

3.3.4. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

CO emisyonları, hidrokarbon yakıtlarının eksik yanması sonucu oluşan bir üründür. Yanma odasında yetersiz oksidantın ve düşük sıcaklığın sebep olduğu eksik yanma dolayısı ile CO emisyonları oluşur. Yanmanın sonuna doğru oluşan CO emisyonları, değişik oksidantlarla birleşme tepkimesine girerek CO₂ emisyonlarına dönüşürler. Düşük yanma odası sıcaklığı ve yetersiz oksidant seviyesinden dolayı gerçekleşemeyen birleşme tepkimeleri, CO emisyonlarının artmasına neden olur.

Yakıtça zengin karışımlar daha çok CO emisyonu üretirler. Ancak, dizel motorlar hava fazlalığı ile çalıştığından CO emisyonları oldukça düşüktür. Dizel motorlardaki yanmanın her safhasında, yüksek yanma sıcaklığı, oksijen miktarının fazlalığı, karışım teşkil hızının yüksek oluşu CO emisyonlarının oksidasyonuna yardım eder [77].

BÖLÜM 4

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

4.1. ATIKLARDAN ELDE EDİLEN YAKITLARIN DİZEL MOTORLARDA KULLANIMI

Dünya genelinde kirletici gazların azaltılması ihtiyacı, hızlı endüstrileşme ile artan enerji talebi, enerji kaynaklarının yetersizliği gibi sebepler araştırmacıları günümüz enerji kaynaklarının özelliklerine yakın ve daha temiz enerji kaynakları araştırmaya yöneltmiştir. Trafikte her geçen gün artan taşıt sayısı ile birlikte, içten yanmalı motorlar dünya enerji talebini ve kirletici emisyonları artıran önemli bir unsur haline gelmiştir. Bu yüzden içten yanmalı motorların fosil kökenli yakıtlara bağımlılığının ve kirletici emisyonlarının azaltılması gerekir. İçten yanmalı motorlarda fosil kökenli yakıtların kullanımının azaltılması yönünde yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak alkol ve biyodizel çalışmalarından oluşmaktadır. Ancak, bitkisel kökenli alkol ve biyodizel yakıtlarının enerji kaynağı olarak kullanımının artışı, insanoğlu için bir başka tehlike olan temel besin kaynaklarının fiyatlarının artışına ve dolayısı ile dünya üzerindeki açlığın artmasına sebep olabileceği senaryoları düşünülmektedir. Bitkisel kökenli yakıtların üretimi için, atıklardan veya besin olarak kullanılmayan bitkilerden faydalanılması daha uygun bir yöntem olabilir. Doğal kaynakların kullanımının azaltılması açısından evsel, bitkisel, endüstriyel ve katı atıklardan alternatif yakıt üretimi önem taşımaktadır. Bu yüzden, doğal kaynakların kullanımının azaltılması için atıklardan enerji elde edilmesi cazip hale gelmiştir.

Dizel motorlar için atıklardan alternatif yakıt geliştirilmesi son yıllarda artış göstermektedir. Atık kızartma yağlarından veya yemek yağlarından biyodizel üretimi, özellikle üretilen biyodizelin maliyetini düşürmek açısından önemlidir.

Motor performansı ve emisyonlar açısından önemli bir negatif etki olmaksızın atık yemek yağlarından elde edilen biyodizelin dizel motorlarda kullanımı deneysel çalışmalar ile literatürde gösterilmiştir. Motor performansı ve emisyonlar açısından önemli bir negatif etki olmaksızın atık yemek yağlarından elde edilen biyodizelin dizel motorlarda kullanımı deneysel çalışmalar ile literatürde gösterilmiştir [81-86].

Odun-talaş atıkları [87-89], kullanılmış motor yağları [90-92], kullanılmış plastik ve pet şişeler [93-96] ile birlikte ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri [26, 64, 97-103] kullanılarak dizel motorlar için yakıtlar üretilmiş ve testleri yapılmıştır.

Genellikle atık odun talaşlarından elde edilen yakıtlar yüksek viskoziteli ve oksijen içerikli, asidik ve ısıl değerleri düşüktür. Ayrıca, dizel yakıtlarla faz ayrışması problemi olduğu literatürden anlaşılmaktadır. Prakash vd. tarafından yapılan bir çalışmada, atık odun talaşlarının vakum piroliz yöntemi kullanılarak piroliz edilmesi ile elde edilen pirolitik yakıt ile dizel yakıt %10 hacimsel oranda karıştırılmış ve oluşturulan yakıt harmanına %2 ve %4 dietileter ilave edilmiştir. Oluşturulan yakıt harmanlarına dietileter ilavesi motor performansı açısından olumlu etki yapmasına karşın CO, HC ve NO_x emisyonlarını artırmıştır [87]. Diğer bir çalışmada ise odun kökenli yakıtın %30'a kadar dizel yakıtı ilavesi ile NO ve HC emisyonlarında iyileşmeler sağlanırken, CO emisyonlarında artışın olduğu ifade edilmiştir [89]. Atık motor yağlarının pirolitik distilasyonu ile elde edilen dizel benzeri yakıt, motor performansı açısından tatminkar sonuçlar vermesine karşın, emisyonlar açısından negatif etkiler göstermiştir. Özellikle SO₂, CO ve NO_x emisyonlarında artış olduğu ifade edilmiştir [90-92].

Açık literatürde, atık plastiklerden türetilen yakıtın dizel yakıt ile benzer özellikler taşıdığı görülmüştür. Mani vd. tarafından yapılan bir çalışmada, atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıt ve standart dizel yakıt tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda test edilerek motor performansı ve emisyonlarla birlikte yanma karakteristikleri incelenmiştir. NO_x, CO, HC ve is emisyonları, tutuşma gecikmesi ve Pmaks, efektif verim ve T_{Egzo} artış göstermiştir [93]. Aynı yazarlar tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise [94], EGR'nin atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtla çalışan dizel motora olan etkisi incelenmiş ve EGR uygulamasının NO_x, HC

ve is emisyonlarını önemli ölçüde iyileştirdiği ve CO emisyonlarını bir miktar artırdığı ifade edilmiştir. Atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorda kullanımı ile yapılan diğer bir çalışmada ise is emisyonları önemli ölçüde iyileşme göstermiştir. NO_x, HC ve CO emisyonları ise artmıştır [95]. Yakıt püskürtme avansının etkisini incelemek için yapılan bir çalışmada ise atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıtın püskürtme başlangıcının geciktirilmesi ile NO_x, HC ve CO emisyonları iyileşirken is emisyonlarının ve efektif verimin de arttığı ifade edilmiştir [95]. Genel olarak, atık plastiklerden elde edilen yakıtın bir miktar EGR ile ve püskürtme avansının geciktirilmesi ile dizel motorlarda kullanılması hem emisyonlar açısından hem de performans açısından olumlu bir etki yapmaktadır.

Kullanım ömrünü doldurmuş atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıt özellikleri ve atık plastiklerden elde edilen pirolitik yakıt özellikleri birbirleri ile benzer özellikler gösterirler. İki yakıt türü arasındaki farklılıklar genellikle hammaddenin kimyasının farklılığından ve piroliz yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Yakıt özellikleri iyileştirilmiş her iki yakıt türünün nihai özellikleri birbirlerine çok benzerdir. Ancak, her iki yakıt türü de yakıt özellikleri iyileştirmeden kullanıldığında içten yanmalı motorların çalışması açısından çeşitli problemleri de beraberinde getirebilir.

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtların dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi literatürdeki çalışmalarla gösterilmiştir. Bununla birlikte, kullanılan test motorlarının ve test edilen pirolitik yakıtların farklı özelliklerinden dolayı literatürdeki sonuçlar birbirleri ile farklılıklar göstermektedir.

Atık taşıt lastiklerinin, nitrojen atmosferi altında, katalizör olarak Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) kullanılması ile yapılan piroliz işlemi sonucu elde edilen pirolitik yakıt, kükürt uzaklaştırma işleminin ardından değişik oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak dizel motorda test edilmiştir. Dizel motorlarda, motorun yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeden kullanılacak optimum pirolitik yakıt/dizel yakıt oranının hacimsel olarak %35 olduğu ifade edilmiştir. Daha yüksek oranda pirolitik yakıt içeren dizel yakıtlı motor çalışmasında CO, HC, SO₂ ve is emisyonları artış gösterirken NO_x emisyonlarının azaldığı vurgulanmıştır. Motor performansı

açısından ise motor torkunda ve gücünde bir miktar azalma, yakıt tüketiminde ise artış tespit edilmiştir [97].

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıt, kükürt uzaklaştırma işleminin ardından soya biyodizeli ve dizel yakıt ile düşük oranlarda karıştırılarak dört silindirli bir dizel motorda test edilmiştir [98]. Deneylerde %97 dizel+%3 biyodizel, %97 dizel+%3 pirolitik yakıt, %94 dizel+%3 biyodizel+%3 pirolitik yakıt olmak üzere üç farklı yakıt karışımı kullanılmıştır. En yüksek NO_x emisyonlarının, dizel+biyodizel karışımlarından oluşan motor çalışmasında ortaya çıktığı, dizel+biyodizel+pirolitik yakıt karışımlarından oluşan yakıtların daha az NO_x emisyonu ürettiği ifade edilmiştir. Ayrıca, dizel+biyodizel karışımlarına pirolitik yakıt ilavesi motor performansında iyileşmeler sağlamıştır.

Taşıtların atık lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıt ile dizel yakıt hacimsel olarak %50 oranda karıştırılmış ve dört zamanlı-tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda test edilmiştir. Motorun yakıt sistemi ile ilgili değişiklik yapılmaksızın gerçekleştirilen deneyler, ham pirolitik yakıt+dizel yakıt karışımlarından oluşan yakıtın standart dizel yakıtlı motor çalışmasına göre motor performansını bir miktar artırdığı ve emisyonları önemli ölçüde etkilemediği gösterilmiştir [99]. Ham pirolitik yakıtın değişik oranlarda kullanıldığı diğer çalışmalarda [64, 100] ise CO, HC, NO_x ve is emisyonlarının artış gösterdiği ifade edilmiştir. Her iki çalışmada motor performansı açısından farklı sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte her iki çalışmada, ham pirolitik yakıtın tutuşma gecikmesini önemli ölçüde artırdığı vurgulanmıştır. Yakıt özellikleri iyileştirilmiş pirolitik yakıtın motor performansına, emisyonlarına ve yanma karakteristiklerine etkisini incelemek için aynı yazarlar tarafından yapılan benzer çalışmalarda [101-103], pirolitik yakıt özellikleri önemli ölçüde iyileştirilerek efektif verimde, CO ve NO_x emisyonlarında iyileşme, is ve HC emisyonlarında ise artış sağlanmıştır.

Yapılan diğer bir çalışmada [26] ise atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıt, yakıt özellikleri iyileştirilerek tek silindirli bir dizel motorda test edilmiştir. %20, %40, %60 ve %75 oranında pirolitik yakıt içeren test yakıtları, hem performans hem de emisyonlar açısından benzer sonuçlar göstermiştir. Aynı çalışmada, is ve

NO_x emisyonlarında önemli bir değişiklik olmaksızın, HC ve CO emisyonlarında kayda değer iyileşmelerin olduğu ifade edilmiştir.

4.2. YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ PERFORMANS VE EMİSYONLARA ETKİSİ

Günümüz motorlarında kullanılan geleneksel yakıt püskürtme sistemleri yüksek basınçlı püskürtme sağlamak için tasarlanmıştır. Yakıt püskürtme basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla motor performansına ve egzoz emisyonlarının oluşumuna etki eden faktörlerden birisidir [80]. Enjeksiyon basıncı arttıkça yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülür ve yanma odasında daha iyi buharlaşır [104]. Yakıt püskürtme basıncı düşük olduğunda, yakıt tanecik çapları büyüktür ve yanma sürecindeki tutuşma gecikmesi periyodu artar. Yakıt püskürtme basıncı artırıldığında, yakıt taneciklerinin çapları küçülür, tutuşma gecikmesi periyodundaki karışım teşkili iyileşir, is ve CO emisyonları azalır [105]. Yakıt püskürtme basıncının daha fazla artışı ise tutuşma gecikmesini daha da azaltır. Aşırı kısalan tutuşma gecikmesi boyunca yanma odasındaki yakıt ve hava karışmak için yeterli zaman bulamaz ve karışımın homojenliği azalır. Bu yüzden yanmanın verimi düşer ve is emisyonlarının oluşumu artar [106, 107].

Yakıt püskürtme basıncının performans ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemeye yönelik deneysel devam etmektedir. Standart dizel yakıt ile çalışan dört silindri ve dört zamanlı direkt püskürtmeli bir dizel motorda, yakıt püskürtme basıncının ve setan sayısının motor performansı ve emisyonlar üzerine etkisini incelemek için gerçekleştirilen çalışmada 100 bar, 150 bar, 200 bar ve 250 bar püskürtme basıncı koşullarında testler yapılmış ve artan püskürtme basıncı ile is emisyonlarının önemli ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir [32]. Altı silindri bir motorda yapılan benzer bir çalışmada da püskürtme basıncının artışı ile is emisyonları azalırken NO_x emisyonlarının artış gösterdiği ifade edilmiştir [108].

Tek silindri direkt püskürtmeli bir dizel motorda, yakıt püskürtme basıncının yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmada 200-350 bar arasında değişen dokuz farklı enjeksiyon basıncı kullanılmış ve motor

performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Tam yük koşullarında yapılan testlerde, püskürtme basıncının 280 bar'a kadar artışı ile motor performansının iyileştiği, ancak püskürtme basıncının daha fazla artışı ile motor performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte püskürtme basıncının artırıldığı bütün deney koşullarında NO_x emisyonları artarken is emisyonları azalmıştır [104].

Turboşarjlı bir dizel motorda, yakıt püskürtme basıncının yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmada 200 bar, 225 bar, 250 bar ve 300 bar püskürtme basıncı koşullarında testler yapılmış ve artan püskürtme basıncı ile HC emisyonlarının ve özgül yakıt tüketiminin iyileştiği ancak NO_x emisyonlarının önemli ölçüde etkilenmediği ifade edilmiştir. İS emisyonları ise püskürtme basıncının 250 bar'a kadar artışı ile azalmış ancak püskürtme basıncının daha fazla artışı is emisyonlarını artırmıştır. Aynı çalışmada, motorun bütün çalışma koşullarında değişken püskürtme basıncı stratejisi uygulamasının motor performansı ve emisyonlar açısından daha uygun olabileceği vurgulanmıştır [109].

Standart dizel yakıt ile çalışan dört silindirli ve dört zamanlı direkt püskürtmeli bir dizel motorda, yakıt püskürtme basıncının motor performansı ve emisyonlar üzerine etkisini incelemek için yapılan bir çalışmada 150 bar, 200 bar ve 250 bar püskürtme basınçlarında ve tam yük koşullarında testler yapılmıştır. Püskürtme basıncının artışı ile CO emisyonları ve T_{Egzoz} azalırken NO_x emisyonlarının arttığı ifade edilmiştir [110].

Doğal emişli iki zamanlı dört silindirli bir dizel motorda, yakıt püskürtme basıncının motor performansına etkisini incelemek için yapılan deneysel bir çalışmada 180 bar, 190 bar, 200 bar, 220 bar ve 240 bar püskürtme basıncı kullanılarak farklı motor hızlarında ve yüklerinde testler yapılmış ve artan püskürtme basıncının motor gücünü ve özgül yakıt tüketimini artırdığı ifade edilmiştir [107].

Tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorda, yakıt hat basıncının optimum çalışma basıncının tespiti için yapılan deneysel bir çalışmada 160 bar, 200 bar ve 250 bar püskürtme basıncı kullanılarak farklı motor yüklerinde testler yapılmış ve motor

performansı açısından optimum püskürtme basıncının 200 bar olduğu sonucuna varılmıştır [111].

Kannan'ın 2010 yılında yaptığı çalışmada ise 150 bar, 200 bar ve 250 bar püskürtme basıncı koşullarında yapılan kısmi yük testleri, motor performansı açısından optimum püskürtme basıncının 150 bar, HC ve is emisyonları açısından 150 bar, NO_x emisyonları açısından ise 200 bar olduğunu göstermiştir [112].

4.3. ATIK KÖKENLİ YAKITLARIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıt, piroliz yönteminin tasarımına bağlı olarak karbon siyahı, küçük kum taneleri ve alkali metaller içerir. Bu yüzden, supaplar, supap oturma yüzeyleri, segmanlar ve yuvaları gibi bazı motor parçalarında ve yakıt püskürtme sisteminde aşınma problemleri oluşturabilir. Ayrıca, bu katı partiküller egzoz emisyonlarını da etkiler. Bundan başka, ham pirolitik yakıtın yüksek kükürt içeriği, ham pirolitik yakıtın dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımını kısıtlar. Yakıt içerisinde bulunan kükürt egzozdan çevreye kükürt dioksit (SO₂) olarak atılır. Atmosfere salınan SO₂, atmosferde bulunan su buharı ile birleşerek sülfürik asit oluşumuna yardımcı olur ve yeryüzüne asit yağmuru olarak dönerek çevre ve insan sağlığını tehdit eder. Ayrıca, taşıta ait katalitik dönüştürücünün zehirlenmesine de sebep olabilir. Bu yüzden kükürt yakıtlarda istenmeyen bir bileşen olup yakıtın içerisinde uzaklaştırılması gerekir. Aynı zamanda ham pirolitik yakıt, sakızlaşmış şekilde katı polimerler ve zift (katran) de içerebilir. Ham pirolitik yakıt içerisinde polimerlerin, ziftin (katran) ve partiküllerin varlığı enjeksiyon sistemi içerisinde tortu oluşumuna sebep olabilir. Ham pirolitik yakıtın dizel motorlarda direkt kullanımının bazı zorlukları olduğu ve yukarıda ifade edilen olumsuzluklarla karşılaşılabilceği açıktır.

Atık taşıt lastiğinden elde edilen pirolitik yakıtın ham hali ile yakıt olarak içten yanmalı motorlarda kullanılması hem motor hem de çevre açısından sakıncalıdır. Atık taşıt lastiklerinin pirolizi ile elde edilen pirolitik yakıtların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi, motor performansı ve emisyonlar açısından önemli bir katkı sağladığı

daha önceki çalışmalarda ifade edilmiştir. Pirolitik yakıtlara özgü bir iyileştirme yöntemi henüz oluşmadığı için, literatürde kullanılan pirolitik yakıtların yakıt özelliklerini iyileştirme metotları birbirinden farklı olsa da, ağırlıklı olarak asit-kil işlemi ve distilasyon yönteminin beraberce gerçekleştirildiği süreç kullanılmıştır. Bu bölümde atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtta bulunan kükürt miktarının minimize edilmesi ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Genellikle, atık motor yağları vb. atıkların rejenerasyonunda kullanılan yöntemler literatür çalışmalarında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Ancak, pirolitik yakıtların yakıt özelliklerini iyileştirmek için pirolitik yakıtlara has ayrı bir yöntem göze çarpmamaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalarda, atık motor yağlarının rejenerasyonunda kullanılan yöntemler, pirolitik yakıtın yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır.

Asit-kil işlemi, yakıt içerisinde bulunan aromatikler, metaller (kül içeriği), kükürt gibi kirletici bileşenleri uzaklaştırmak için kullanılan bir yöntemdir. Asit-kil yöntemi, sıvı yakıtta %8 H₂SO₄ (Sülfürik Asit) ilavesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemle yakıtın viskozitesi de azaltılabilir. Atık sıvı yakıtların yakıt özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bu yöntem, literatürde atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtlar için [26, 101-103] ve diğer sıvı atık yakıtlar için [113-115] başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bununla birlikte, asit-kil yönteminin uygulandığı kükürt uzaklaştırma işlemi yakıtın kükürt içeriğini önemli ölçüde azaltırken tamamen ortadan kaldıramaz. Bu yüzden daha etkili kükürt uzaklaştırma yöntemleri uygulanmalıdır. Motor yakıtlarında kükürt uzaklaştırma yöntemleri birbiri arasında çok çeşitli farklar gösterir. Motor yakıtlarında kükürt giderme yöntemlerinden biri olan hidrosülfürizasyon işleminde yüksek basınç (15 bar-90 bar) ve sıcaklığa (300 °C-380 °C) ihtiyaç duyulduğu için pahalı bir yöntemdir [116, 117]. Bu nedenle son yıllarda daha ekonomik ve daha etkin olan oksidatif desülfürizasyon yöntemi üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu yöntemde yakıtta bulunan kükürt oksijen ile reaksiyona girerek SO₂ ve sülfatlar oluşmakta ve distilasyon veya ekstraksiyon işlemiyle yakıttan ayrıştırılabilmektedir [118]. Yakıtta bulunan kükürt miktarını çok düşük seviyelere indirmek için organik hidroperoksitler [118], nitrik asit [119], O₂

[120, 121], hidrojen peroksit [122-124] gibi değişik tipte oksidantlarla katalitik oksidasyon işlemleri yapılmıştır. Formik asit ve hidrojen peroksit ile 50 °C sıcaklıkta yapılan oksidasyon işlemi sonrasında yakıt numunesi asetonitril ve distile edilmiş suyla yıkanarak kükürt miktarı 1050 ppm'den 10 ppm'e kadar düşürülmüştür [117].

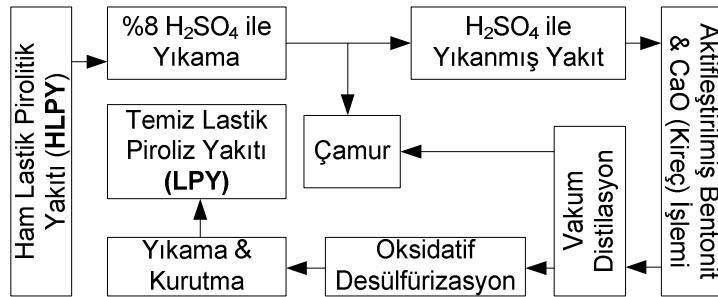
BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. PİROLİTİK YAKITIN YAKIT ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE NİHAİ YAKIT ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, piroliz hammaddesi olarak Türkiye'nin değişik bölgelerinden rastgele toplanan otomobil, otobüs, kamyon, iş makinası ve motosikletlere ait kullanım ömrünü doldurmuş atık taşıt lastikleri kullanılmıştır. Sanayi ölçekli lastik geri kazanım merkezi olan bir işletmede (EN-TEK Geri Dönüşüm Ltd. Şti.), vakum piroliz yöntemi kullanılarak atık taşıt lastik kökenli pirolitik yakıt/yağ elde edilmiştir. Piroliz işlemi öncesinde, atık taşıt lastikleri çelik tellerden arındırılarak parçalanmıştır. Atmosfer basıncında ve düşük sıcaklıklarda, laboratuvar ortamında kullanılabilecek kükürt uzaklaştırma yöntemi için literatür araştırması yapılarak, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ve kükürt uzaklaştırma işlemi için distilasyonlu asit-kil yöntemi ve oksidatif desülfürizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada, atık taşıt lastiğinin piroliz edilmesi ile elde edilen ham lastik pirolitik yakıtın kirletici bileşenlerinin azaltılması için Şekil 5.1'de gösterilen işlemler uygulanmıştır.



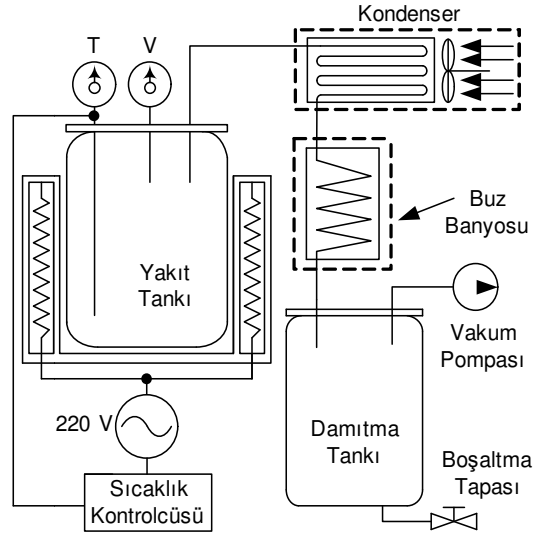
Şekil 5.1. Ham lastik pirolitik yakıtın kirletici bileşenlerinin uzaklaştırılması.

Bu çalışmada, atık taşıt lastiğinin piroliz edilmesi ile elde edilen HLPY'nin kirletici bileşenlerinin azaltılması için sırası ile şu işlemler gerçekleştirilmiştir;

Asit Yıkama işlemi: Asit yıkama işleminde, pirolitik yakıt numunesine ağırlıkça %8 H₂SO₄ (Sülfürik Asit) ilave edilerek 50 °C sabit sıcaklıkta 4 saat boyunca bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Asit ile yıkama işleminin ardından, yakıt numunesi 40 saat boyunca dinlenmeye bırakılmıştır. Bu süre sonunda, pirolitik yakıtın bekletildiği kabın altında asidik çamur ve üst kısmında temiz pirolitik yakıt elde edilmiştir.

Aktifleştirilmiş Kil-Kalsiyum Oksit (CaO) işlemi: Asit ile yıkanmış yakıtın her 100 cc numunesine kil olarak 10 gr aktifleştirilmiş bentonit ve 5 gr CaO (sönmemiş kireç) ilave edilerek 70 °C sabit sıcaklıkta 4 saat boyunca bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Kil işleminin ardından yakıt numunesi 24 saat boyunca dinlenmeye bırakılmış ve oluşan çökelti bez filtre ile süzümüştür.

Vakum Distilasyon İşlemi: Bir önceki aşamadan geçen pirolitik yakıt vakumlu distilasyon ünitesinde distilasyon işlemine tabi tutulmuştur. Pirolitik yakıtın distilasyonu için vakum distilasyon cihazı tasarlanıp imal edilmiştir. Vakum distilasyon cihazının şematik görünümü Şekil 5.2'de ve genel görünümü ise Şekil 5.3'te verilmiştir. 30 kPa basınç altında distilasyonu yapılan pirolitik yakıt, yakıt tankından vakum altında buharlaşarak kondensere ve buz banyosuna geçer. Kondenserde ve buz banyosunda yoğunlaşan yakıt buharı damıtma tankında toplanır. Vakum distilasyonu ile elde edilen temiz yakıt, dizel motorlarında kullanılan ticari dizel yakıtının özelliklerine benzer. Distilasyonu tamamlanan pirolitik yakıtın kükürt içeriği dizel motorlar için hala yüksektir.



Şekil 5.2. Vakumlu distilasyon ünitesi şematik görünümü.



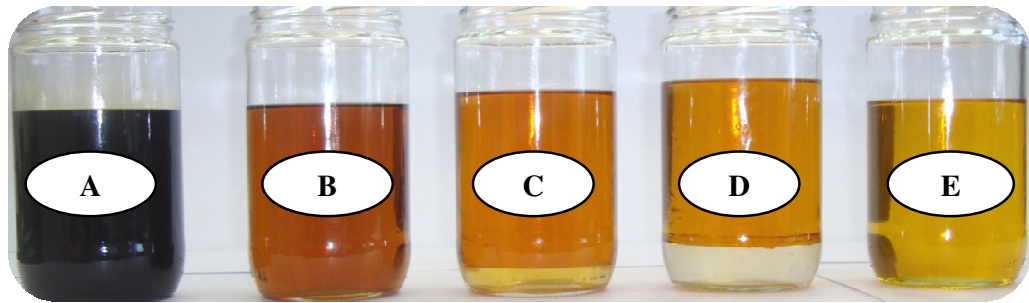
Şekil 5.3. Vakumlu distilasyon ünitesinin genel görünümü.

Oksidatif Desülfürizasyon İşlemi: Yakıt numunesinin kükürt içeriğini daha çok azaltmak için yapılan literatür taramasında, sıvı yakıtların çeşitli kükürt giderme işlemlerinin bulunduğu ancak en etkin yöntemin formik asit ve hidrojen peroksitin kullanıldığı oksidasyon işleminin olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada atık

taşı lastiğinden elde edilen pirolitik yakıtın kükürt bileşenlerini uzaklaştırmak için formik asit-hidrojen peroksit kimyasallarının kullanıldığı oksidatif desülfürizasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem temel olarak iki aşamadan meydana gelmektedir. Oksidasyon aşaması; kükürt oranı düşürülecek olan yakıtta formik asit-hidrojen peroksit ilave edilerek karışım ısıtılmakta ve bu şekilde yakıt içindeki kükürt oksidasyona uğratılmaktadır. Ayrıştırma aşaması; oksidasyona uğratılmış yakıt 24 saat dinlendirildikten sonra ayrıştırılmaktadır. Yapılan oksidatif kükürt giderme işleminde %30 saflıkta hidrojen peroksit ve %98 saflıkta formik asit kullanılmıştır. Ağırlıkça 2/1 oranında Hidrojen peroksit-Formik asit karışımından 10 g. alınarak 100 cc'lik yakıt numunesine katılmış 60 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra pirolitik yakıt numuneleri 24 saat boyunca dinlenmeye bırakılmıştır. Dinlenmiş yakıt numunesi içerisinde, üst (temiz yakıt) ve alt tabakası arasında beyaz renkli bir çökelti oluşmuştur. Temiz yakıt ayırma hunisi yardımı ile ayrıştırılmıştır.

Yıkama ve Kurutma İşlemi: Oksidatif desülfürizasyon işleminin ardından, 100 cc'lik yakıt numunesi 20 cc'lik saf su kullanılarak yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yıkama işleminin ardından bir gece boyunca dinlenmeye bırakılan yakıt numunesi saf sudan ayrıştırılmıştır. Daha sonra 110 °C sıcaklıkta ısıtılan yakıt numunesi 30 dakika boyunca bekletilmiş ve kurutma işlemi tamamlanmıştır.

Pirolitik yakıtın yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi sürecindeki görünüşleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Ham pirolitik yakıt (Şekil 5.4-A) yüksek yoğunluk ve viskoziteli, görünüş itibarıyla siyaha yakın koyu kahve renkli olup keskin bir kokuya sahiptir.



Şekil 5.4. Yakıtların genel görünüşleri.

Asit-kil ve distilasyon işlemi sonrası (Şekil 5.4–B), yakıt renginde açılma, yoğunluk ve viskozitelerinde ise azalma görülmüştür. Asit-kil ve distilasyon işleminin ardından oksidatif desülfürizasyon işlemine tabii tutulduğu aşamadaki yakıt görüntüsü Şekil 5.4–C’de görülmektedir. C kabının altındaki kısım oksidatif sıvı ve üst kısım yakıt kısmıdır. Oksidatif kısmın üstü ile yakıt kısmının altında yer alan ince bir tabakada beyaz renkli kirletici bileşenlerin oluştuğu görülmüştür. C kavanozunun üst kısmı alınarak su ile yıkanmıştır (Şekil 5.4–D). Yıkama işleminin ardından kurutma işlemi gerçekleştirilerek yakıtın son hali elde edilmiştir (Şekil 5.4–E). Pirolitik yakıtın yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi sürecinde yakıt özelliklerinin değişimi ve nihai yakıt özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Pirolitik yakıt analizleri TÜBİTAK-MAM tarafından yapılmıştır.

Motor testlerinde deney yakıtı olarak, oksidatif desülfürizasyon sonrası elde edilen ve bu çalışmada LPY olarak adlandırılan pirolitik yakıt ve dizel yakıt kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Pirolitik yakıt ve dizel yakıt özelliklerinin değişimi.

	EN 590	Dizel Yakıt	Pirolitik Yakıt		
			Ham Pirolitik Yakıt	Distilasyon Sonrası	Oksidatif Desülfürizasyon Sonrası (LPY)
Yoğunluk (kg/m ³ , 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
Polisiklik Aromatik	0-11	8	>12	8,7	9,5
Hidrokarbonlar (% m/m)					
HC Tipleri (% v/v)					
Aromatikler	–	20-30	–*	65,6	69,7
Olefinler	–	–*	–*	20,7	15,3
Distilasyon					
250 °C’de elde edilen (% v/v)	<65	36,5	39,5	66,4	56,2
350 °C’de elde edilen (% v/v)	Min. 85	95,4	–*	–*	–*
%95’in elde edildiği sıcaklık (°C)	Maks. 360	348,1	–*	316,3	–*

–* İlgili parametreler ölçülememiş veya ölçüm alınmamıştır.

Ham pirolitik yakıtın yoğunluğu dizel yakıtı göre yüksektir. Distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil yöntemi, pirolitik yakıtın yoğunluğunu dizel yakıtın yoğunluğuna yaklaştırmıştır. Oksidatif desülfürizasyon yöntemi ile pirolitik yakıt yoğunluğu artış göstermiştir. Pirolitik yakıtın yakıt özellikleri iyileştirildikten sonraki nihai yoğunluk değeri dizel yakıtın yoğunluğundan daha yüksektir.

Yakıtın parlama noktası, yakıtın güvenli bir şekilde depolanması ve taşınması ile ilgili olduğu kadar uçuculuğu ile de ilgilidir. Ham pirolitik yakıtın parlama noktası dizel yakıtın parlama noktasından daha düşüktür. Distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil işlemi ve oksidatif desülfürizasyon işlemi ile pirolitik yakıtın parlama noktası dizel yakıtın parlama noktasına yaklaşmıştır. Ancak pirolitik yakıtın nihai parlama noktası değeri dizel yakıtın parlama noktasından hala düşüktür. Düşük parlama noktasına sahip yakıtlar genellikle daha uçucudurlar.

Yakıtların viskoziteleri, özellikle yakıtların püskürtme karakteristiklerini etkiler. Ham pirolitik yakıtın viskozitesi dizel yakıtı göre yüksektir. Distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil işlemi sonrası pirolitik yakıtın viskozitesi düşüş göstermiştir. Bununla birlikte, oksidatif desülfürizasyon işlemi pirolitik yakıtın viskozitesini artırmıştır. Pirolitik yakıtın nihai viskozite değeri ise dizel yakıtın viskozitesinden daha düşüktür.

Yakıtların enerji içerikleri özellikle özgül enerji tüketimi açısından önemlidir. Yakıtların enerji içerikleri karşılaştırıldığında en düşük enerji içeriğine sahip yakıtın ham pirolitik yakıt olduğu görülmektedir. Buna rağmen, ham pirolitik yakıtın ısı değeri dizel yakıtın ısı değerine yakındır. Pirolitik yakıtın enerji içeriği, distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil işlemi sonrası artmış ancak oksidatif desülfürizasyon işlemi sonrası azalmıştır. Yine de yakıt özellikleri iyileştirilmiş yakıtın nihai ısı değeri dizel yakıt ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

Setan sayısı dizel motorlarda özellikle tutuşma gecikmesi açısından önemlidir. Yakıt özellikleri iyileştirilmiş pirolitik yakıtın nihai setan sayısı dizel yakıttan oldukça düşüktür. Pirolitik yakıtın yüksek aromatik ve olefinik hidrokarbon içeriği setan sayısını azaltmaktadır.

Yüksek atık karbon içeriğine sahip yakıtların yanması zordur ve is ve HC emisyonlarının oluşumuna sebep olduğu bilinir. Ham pirolitik yakıtın atık karbon içeriği dizel yakıtı göre oldukça yüksektir. Özellikle distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil işleminin sonrası pirolitik yakıtın karbon içeriği oldukça iyileşmiştir. Ancak, oksidatif desülfürizasyon işlemi sonrasında pirolitik yakıtın atık karbon içeriği bir miktar artmıştır. Yine de pirolitik yakıtın nihai atık karbon içeriği dizel yakıt ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

Son yıllarda dizel motorlarda kükürtsüz yakıtların kullanımı yaygınlaşmıştır. Ham pirolitik yakıtın kükürt içeriği ise dizel motorlarda kullanım için oldukça yüksektir. Bu çalışmada yapılan yakıt özelliklerini iyileştirme çalışmaları ile birlikte ham pirolitik yakıtın kükürt içeriği %65 kadar azaltılmıştır. Ancak tamamen yok edilememiştir. Pirolitik yakıtın nihai kükürt içeriği önemli ölçüde azaltılmasına rağmen, dizel yakıt ile kıyaslandığında oldukça yüksektir. Pirolitik yakıtlardan kükürtün tamamen uzaklaştırılması için daha fazla araştırma yapılmasına gerek vardır.

Son yıllarda, içten yanmalı motorlardan kaynaklanan PAH emisyonlarının azaltılması yönünde adımlar atılmaktadır. Ham pirolitik yakıtın PAH içeriği yüksektir. Distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil yöntemi, pirolitik yakıtın PAH içeriğini azaltmıştır. Oksidatif desülfürizasyon yöntemi ile pirolitik yakıtın PAH içeriği bir miktar artış göstermiştir. Pirolitik yakıtın yakıt özellikleri iyileştirildikten sonraki nihai PAH içeriği dizel yakıtın PAH içeriğinden daha yüksektir.

Pirolitik yakıtın içerdiği hidrokarbon tipleri incelendiğinde, çoğunluğunun aromatiklerden oluştuğu görülmektedir. Distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil yöntemi, pirolitik yakıtın aromatik içeriğini azaltmıştır. Ancak, oksidatif desülfürizasyon yöntemi ile pirolitik yakıtın aromatik içeriği bir miktar artış göstermiştir. Aynı şekilde, yakıt özelliklerini iyileştirmek için yapılan çalışmalarda, pirolitik yakıtın olefin içeriği aromatik içeriği ile ters orantılı bir davranış göstermiştir.

Yakıtların distilasyon özellikleri, yakıtların uçuculukları ile ilgili bilgiler içerir. 250 °C’de dizel yakıtın %36,5’i buharlaşırken, ham pirolitik yakıtın %39,5’i buharlaşmıştır. Pirolitik yakıtın uçuculuğu, distilasyonla birlikte kullanılan asit-kil işlemi sonrası önemli ölçüde artmış (250 °C’de %66,4), ancak oksidatif desülfürizasyon işlemi sonrası azalmıştır (250 °C’de %56,2). Yakıtların nihai uçuculuk özellikleri karşılaştırıldığında, pirolitik yakıtın yakıt özellikleri iyileştirilmesi ile önemli ölçüde uçuculuğunun arttığı görülmüştür. Genellikle daha uçucu yakıtlar, yanma odasına püskürtüldüğünde yanma odasından daha çok ısı çekerler ve tutuşma gecikmesini artırırlar.

Bu çalışmada oksidatif desülfürizasyon sonrası elde edilen nihai yakıt (LPY), motor testlerinde dizel yakıt ile çeşitli oranlarda hacimsel olarak karıştırılarak kullanılmıştır.

5.1.1. Maliyet Analizi

Atık taşıt lastiğinden HLPY elde edilmesi sürecinde EN-TEK Geri Dönüşüm Ltd. Şti. bünyesinde enerjisini HLPY’den elde edebilen bir reaktör kullanılmıştır. HLPY’nin satış fiyatı 50 Kuruş/Litre’dir. HLPY’nin yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ve LPY’nin elde edilmesi sürecinde kullanılan kimyasallar için maliyet analizi Çizelge 5.2’de ve kullanılan enerji için maliyet analizi Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Kullanılan kimyasallar ve maliyetleri.

Kullanılan Kimyasallar	Birim	Kullanılan Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
HLPY	L	1 L	0,5	0,50
Sülfürik Asit	1 kg	80 g	1,5	0,12
Aktifleştirilmiş Bentonit	1 kg	100 g	0,362	0,03
Sönmemiş Kireç	1 kg	50 g	0,25	0,01
%30 Hidrojen Peroksit	1 L	100*(2g Hidr. Per.+1g Formik Asit)	3,5	0,89
%98 Formik Asit	1 L		2,9	
Saf Su	1 L	0,2 L	0,4706	0,09
Toplam Kimyasal Maliyeti (TL/Litre LPY)				1,65

Çizelge 5.3. Kullanılan elektrik enerjisi ve maliyeti.

Elektrikli Cihazlar	Güç (kW)	Çalışma Süresi (saat)	Harcanan Güç (kWh)	Enerji Maliyeti (TL)= Harcanan Güç*Birim Ener. Fiy.
Distilasyon Cihazı	3,4	15,5	52,7	10,75
Karıştırıcı	0,85	10	8,5	1,73
Isıtıcı	1,5	10	15	3,06
Toplam Enerji Maliyeti (TL)				15,55

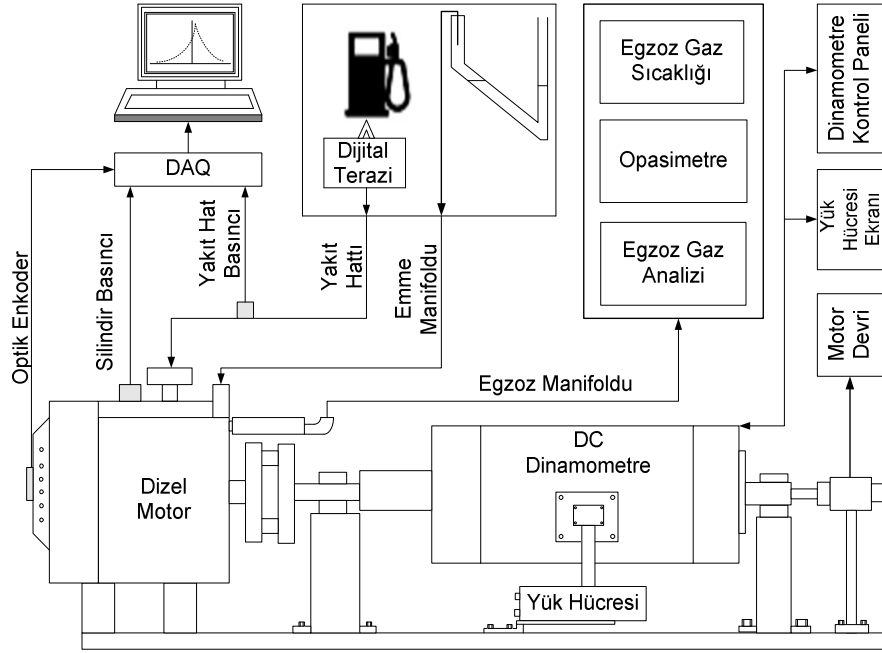
Hesaplamalarda elektrik enerjisinin birim fiyatı 0,204 TL/kWh olarak alınmıştır. 30 litre LPY üretebilmek için toplam enerji maliyeti 15,55 TL olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında, 1 litre LPY için harcanan enerji = (Toplam enerji maliyeti/Üretilen LPY miktarı) = (15,55 TL)/(30 Litre LPY)= 0,51 TL/L.

1 litre LPY elde etmek için gereken toplam maliyet ise Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3 kullanılarak; Toplam Maliyet = (Toplam Kimyasal Maliyeti+Toplam Enerji Maliyeti) = (1,65 TL+0,51 TL) şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda 1 litre LPY elde etmek için gerekli toplam maliyet 2,16 TL'dir.

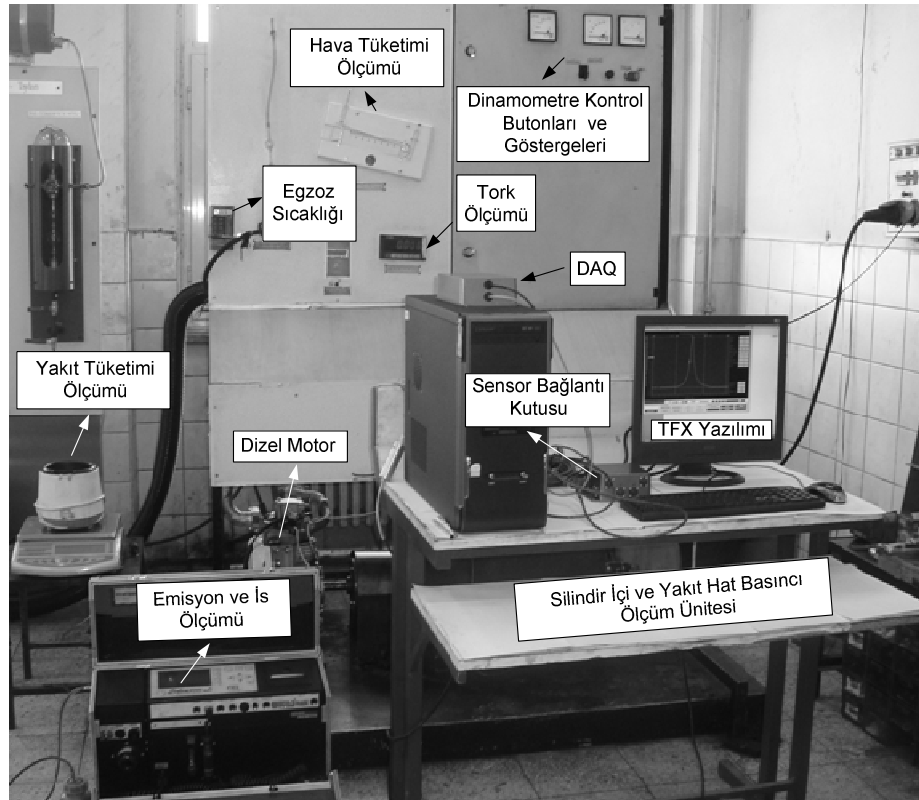
Bu çalışmada kullanılan ekipmanlar laboratuvar ölçekli değil de sanayi ölçekli olarak imal edildiğinde, 1 litre LPY elde etmek için gerekli maliyet daha da düşebilir.

5.2. DENEY DONANIMI

Deneyler için, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı'na ait motor test laboratuvarları kullanılmıştır. DC dinamometre, dizel motor, yakıt tüketimi ölçüm ünitesi, hava tüketimi ölçüm ünitesi, egzoz gaz ölçüm ve is (opasite) ünitesi, silindir basıncı ve yakıt hat basıncı ölçüm ünitesinden oluşan test düzeneğinin şematik ve genel görünümü sırası ile Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. Denei düzeneğinin şematik görünümü.



Şekil 5.6. Denei düzeneğinin genel görünümü.

5.2.1. Motor Test Dinamometresi

Deneyler, KEMSAN marka bir motor test dinamometresinde yapılmıştır. Motor test dinamometresi, test motoruna ilk hareket vermek için, test motorunu boşa çevirebilmek ve yüklemek için kullanılabilir. Motor test dinamometresinin maksimum hızı 4000 d/d olup 10 kW'a kadar güç yutabilmektedir. Motor devrinin ölçümünde dinamometre üzerindeki takojenaratör kullanılmıştır. Deney sırasında, motor yükte çalışırken baskı kuvveti değeri dinamometreye 0,25 m uzaklıktaki yük hücresinden okunmuştur. Yük hücresinden okunan baskı kuvveti değeri motor momentinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Motor momenti ve gücü 5.1 ve 5.2 nolu eşitlikler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$M_e = F * b_{kol} * g \quad (5.1)$$

Motor gücü ise;

$$P_e = M_e * \omega = \frac{2 * \pi * M_e * n}{60 * 1000} \quad (5.2)$$

F Yük hücresine uygulanan baskı kuvveti (kg)

g Yerçekim ivmesi (m/s^2)

M_e Motor torku (Nm)

b_{kol} Kuvvet kolu uzunluğu (0,25 m)

P_e Motor gücü (kW)

ω Açısal motor hızı (rad/s)

n Motor devri (d/d)

5.2.2. Deney Motorunun Özellikleri

Deney motoru olarak tek silindirli hava ile soğutmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Motor testlerinde kullanılan dizel motora ait teknik özellikler Çizelge 5.4'de ve genel görünümü Şekil 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Motor özellikleri.

Model	Katana KM 178 F
Genel	Tek Silindirli, direkt püskürtmeli, hava ile soğutmalı, doğal emişli, ve dört zamanlı
Güç (kW, 3000 d/d-3600 d/d)	4-4,4
Çap(mm) x Kurs (mm)	78x62
Biyel Boyu (mm)	101,5
Silindir Hacmi (cm ³)	296
Sıkıştırma Oranı	18/1
Yakıt Pompası Avansı (KMA)	31°
Püskürtme Açısı (KMA)	17° ±1
Enjektör Açılma Basıncı (bar)	205 ±5
Emme Supabı Zamanlaması (KMA)	Açılma 18 ° ÜÖN'dan önce, Kapanma 45 ° AÖN'dan sonra
Egzoz Supabı Zamanlaması (KMA)	Açılma 52 ° AÖN'dan önce, Kapanma 12 ° ÜÖN'dan sonra



Şekil 5.7. Motor testlerinde kullanılan dizel motorun genel görünümü.

Deney motoruna ait yakıt püskürtme sistemi, statik avanslı tek elemanlı bir yakıt pompası ve enjektörden oluşmaktadır. Enjektör üzerinde dört adet püskürtme deliği mevcut olup enjektör püskürtme delik çapı 0,1 mm'dir. Enjektör yayının altındaki basınç ayar pulları yardımı ile enjektör püskürtme basıncı değiştirilebilmektedir. Dizel motorun yanma odası piston tepesinde ve oyuk şeklinde olup hacmi 10 cc'dir. Silindir kapak contasının kalınlığı ve silindir basıncı ölçümünde kullanılan aparatın da dahil edildiği yanma odası hacmi yaklaşık 17 cc'dir.

5.2.3. Emisyon ve İis Ölçüm Ünitesi

Emisyonlar (HC ve NO_x (ppm), CO (%)) MRU Delta 1600L egzoz emisyon ölçme cihazı ile ve is (opasite) MRU Optrans 1600 ile ölçülmüştür (Şekil 5.8). Egzoz gaz analiz cihazının ve opasitemetrenin özellikleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. MRU Delta 1600L egzoz emisyon ölçme cihazı CO ve HC emisyonlarını non-dispersive infrared prensiple çalışan sensörlerle, ve NO_x emisyonlarını elektrokimyasal sensörlerle ölçmektedir. Egzoz gaz sıcaklığının (T_{Egzoz}) ölçümü için K-tipi termokopul kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Egzoz gaz analiz cihazının ve opasitemetrenin genel görünümü.

Çizelge 5.5. Egzoz gaz analizörü ve opasitemetre özellikleri.

		Ölçüm Aralığı	Doğruluk
Egzoz Gaz Analizörü	CO (%v/v)	0~15	0,01
	HC (ppm)	0~20000	1
	NO _x (ppm)	0~4000	1
Opasimetre	İis (Opasite) (%)	0~100	± 2

5.2.4. Yakıt Tüketimi Ölçüm Ünitesi

Bu çalışmada, motorun tükettiği yakıt miktarı kütleli olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir zaman diliminde yakıt deposundaki yakıtın ağırlığı hassas terazi ile ve bir kronometre yardımı ile ölçülmüştür. Kütleli yakıt tüketimini ölçmek için Şekil

5.9'da görülen Dikomsan marka 0,1 g hassasiyetli elektronik bir terazi kullanılmıştır. Yakıt tüketim süresinin ölçülmesinde Charles Sernard marka bir kronometre kullanılmıştır. Kronometre 1 salise hassasiyetinde dijital ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 5.9. Yakıt tüketimi ölçümü için kullanılan hassas terazi.

Kronometre yardımı ile, belirli bir zaman aralığında hassas terazide ölçülen yakıt miktarı kaydedilmiş ve birim zamanda tüketilen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan kütleli yakıt debisi motor gücüne oranlanarak fren özgül yakıt tüketimi bulunmuştur. Fren özgül yakıt tüketiminin yakıtın alt ısı değeri ile çarpılması ile özgül enerji tüketimi hesaplanmıştır.

Yakıtın kütleli debisi;

$$B_e = 3600 \frac{m_y}{t_y} \quad (5.3)$$

Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT);

$$FÖYT = \frac{B_e}{P_e} \quad (5.4)$$

Fren özgül enerji tüketimi (FÖET);

$$FÖET = \frac{(AID)(FÖYT)}{1000} \quad (5.5)$$

Efektif verim (η_e) ise FÖYT ve yakıtın alt ısı değeri kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\eta_e = \frac{3600}{(AID)(FÖYT)} 100\% \quad (5.6)$$

B_e	Yakıt tüketimi (g/h)
t_y	Süre (s)
m_y	t_y süresinde tüketilen yakıt miktarı (g)
P_e	Motor Gücü (kW)
η_e	Efektif Verim (%)
$FÖYT$	Fren özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
$FÖET$	Fren özgül enerji tüketimi (MJ/kWh)
AID	Yakıtın alt ısı değeri (MJ/kg)

5.2.5. Silindir İçi ve Yakıt Hat Basıncının Ölçümü

Silindir içi ve yakıt hat basınçlarının ölçümünde ve kaydedilmesinde TFX marka silindir basıncı ölçüm yazılımı kullanılmıştır. TFX basınç ölçüm sistemi, her bir sensörün üzerinde amplifikatörün de bulunduğu OPTRAND fiber-optik basınç sensörleri ve krank mili pozisyonunun ölçümünde kullanılan optik enkoderden oluşmaktadır.

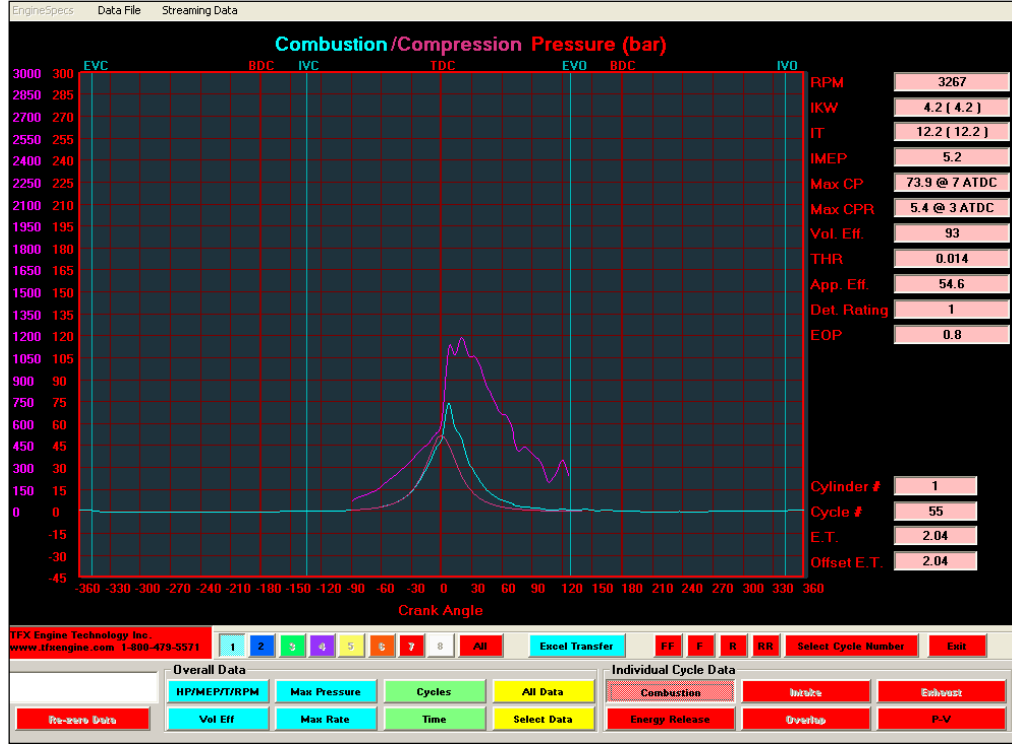
Kullanılan basınç sensörlerinin özellikleri Çizelge 5.6'da ve genel görünümleri ise Şekil 5.10'da verilmiştir. TFX basınç ölçüm sistemine ait yazılımın ekran görüntüsü ise Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Sensör özellikleri.

	Silindir İçi Basınç Sensörü	Yakıt Hat Basınç Sensörü
Basınç Aralığı (bar)	0–250 (~3500 PSI)	0–2000 (~30000 PSI)
Aşırı Basınç (bar)	1,5x Basınç Aralığı	1,5x Basınç Aralığı
Doğal Frekans (kHz)	>120	>150
Frekans Aralığı (Hz)	0,1 Hz-15 kHz	0,1 Hz-15 kHz
Çalışma Sıcaklıkları		
Sensor Montaj (°C)	-40 ile 350	-40 ile 300
Kablo (°C)	-40 ile 200	-40 ile 200
Sinyal Şartlandırıcı (°C)	-20 ile 65	-20 ile 65
Nonlinearity ve Histeris (% FSO–Tam Scala Çıkış)	± 1 0,5	± 1
Çıkış Sinyali (beyaz kablo)	0,5-5 V Analog	0,5-5 V Analog
Diagnostik Çıkış Sinyali (mavi kablo)	0-3,6 V Analog	0-3,6 V Analog
Çıkış Empedansı	250 Ohm	250 Ohm
Güç Kaynağı(kırmızı kablo)	9–18 V DC, 85 mA	9–18 V DC, 85 mA
Kullanım	Gaz ve Sıvı	Gaz ve Sıvı
Fiber Optik Kablo Uzunluğu	2 m	2 m
Amplifier	Sensör ile beraber	Sensör ile beraber
Sensör Vida Ölçüleri	M5x0,5	M5x0,5



Şekil 5.10. Sensörlerin genel görünüşleri.



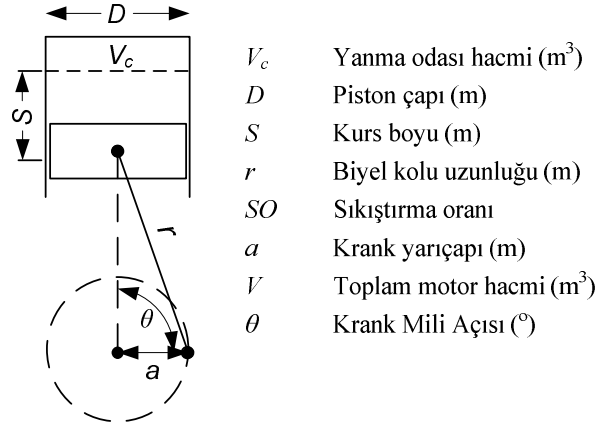
Şekil 5.11. TFX yazılımının ekran görüntüsü.

5.3. DİZEL MOTORLARDA YANMA ANALİZİ

Bu kısımda, yanma odasına püskürtülen yakıtın püskürtme başlangıcı, silindir basınçlarının filtrelenmesi ve değerlendirilmesi, basınç artış hızı, ısı açığa çıkış oranı (İÇÖ), toplam ısı açığa çıkış oranı (TIÇÖ), tutuşma gecikmesi, yanmanın başlangıcı ve bitişi, yanma süresi, ani ve difüzyon kontrollü yanma periyotlarının belirlenmesi detaylı olarak açıklanmıştır. Yukarıda ifade edilen parametreler MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

5.3.1. Motor Hacminin Anlık Değişimi

Motor hacminin anlık değişimi direkt olarak ölçülemez ancak deney motoruna ait geometrik özelliklerin bilinmesi ile hesaplanabilir [125]. İçten yanmalı bir motora ait şematik bir krank-biyel mekanizması ve çeşitli geometrik ölçülerin gösterimi Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12. İçten yanmalı motorlarda krank-biyel mekanizması.

Yanma odası hacmi;

$$V_c = \pi \frac{D^2}{4} \frac{2a}{SO} \quad (5.7)$$

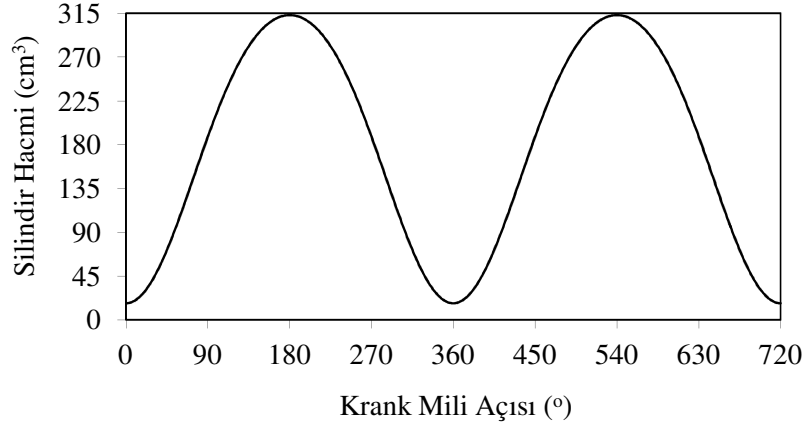
Kurs boyunun değişimi;

$$L(\theta) = a \cos\left(\theta \frac{\pi}{180}\right) + \sqrt{r^2 - a^2 \left(\sin\left(\theta \frac{\pi}{180}\right)\right)^2} \quad (5.8)$$

Toplam silindir hacminin anlık değişimi ise eşitlik (5.7) ve (5.8) yardımı ile hesaplanabilir;

$$V(\theta) = V_c + \pi \frac{D^2}{4} (a + r - L(\theta)) \quad (5.9)$$

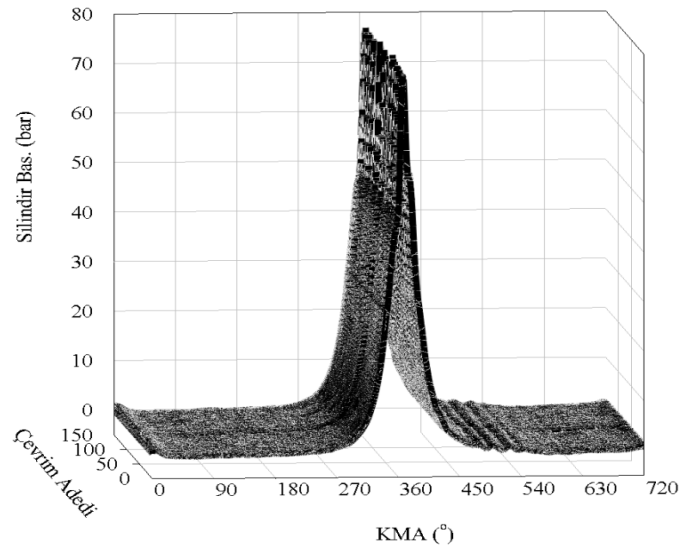
Şekil 5.13'te 5.9 nolu eşitlik yardımı ile hesaplanan silindir hacminin anlık değişimi verilmiştir.



Şekil 5.13. Silindir hacminin anlık değişimi.

5.3.2. Silindir Basıncının Analizi

Teorik olarak dizel motorlarda kısılmaz emiş koşulları gerçekleştiğinden yanma odasına alınan dolgu miktarı belirli bir devir için hep aynıdır. Ancak gerçek motor çalışması koşullarında içeri alınan dolgu miktarındaki küçük değişimler ve silindir içindeki yerel koşulların değişimi silindir içi basınçlarında değişime sebep olur. Silindir basıncındaki çevrimden çevrime değişen bu farklılıkları en aza indirmek için 100 çevrimin ortalaması alınarak tek çevrim şeklinde ifade edilmiştir. Şekil 5.14'te çevrimden çevrime oluşan farklılıklar gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Çevrimden çevrime oluşan farklılıklarının değişimi.

Özellikle IÇO'daki salınımları azaltmak için, ortalaması alınan basınç eğrileri 4. dereceden alçak geçiren dijital butter-worth filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. Filtreleme işleminde oluşan faz farkının önüne geçebilmek için butter-worth filtresi ileri ve geri yönlü olarak uygulanmıştır.

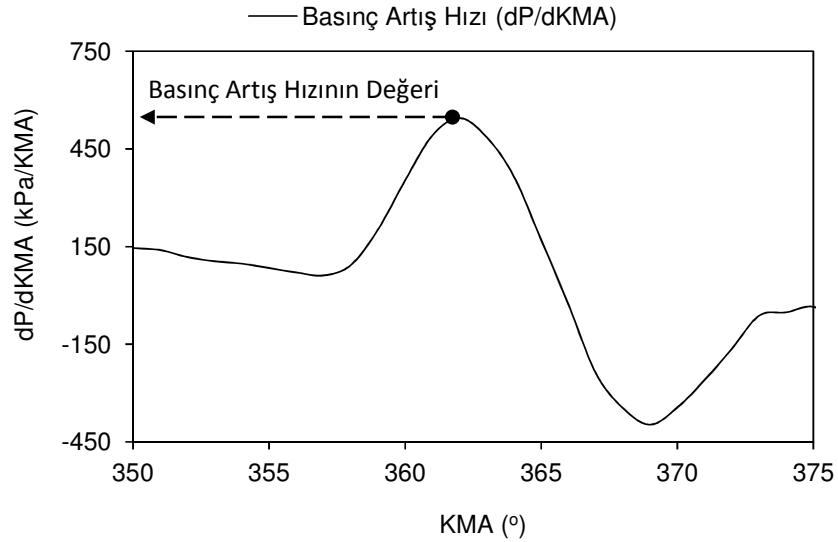
Basınç artış hızı silindir basınç eğrilerinin birinci türevlerinden bulunur. Bu çalışmada, basınç artış hızının tespiti için Eşitlik (5.10)'da ifade edilen düşük gürültülü süper Lanczos algoritması kullanılmıştır [126-128].

$$dP = \frac{\left(\begin{array}{l} 86(P_{\theta-4} - P_{\theta+4}) + 142(P_{\theta+3} - P_{\theta-3}) \\ +193(P_{\theta+2} - P_{\theta-2}) + 126(P_{\theta+1} - P_{\theta-1}) \end{array} \right)}{1188d\theta} \quad (5.10)$$

P Silindir basıncı

θ Krank Mili Açısı ($^{\circ}$ KMA)

Şekil 5.15'de 5.10 nolu eşitlik yardımı ile hesaplanan basınç artış hızının anlık değişimi gösterilmiştir. Basınç artış hızının gösterildiği grafikteki basınç artış hızının maksimum değeri basınç artış hızı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.15. Basınç artış hızının değişimi.

5.3.3. Isı Açığa Çıkış Oranının (İÇÖ) ve Yanma Periyotlarının Analizi

İçten yanmalı motorlara ait İÇÖ, termodinamiğin birinci kanunu kullanan bir yanma analiz metodudur ve yanma sürecinde yakıttaki kimyasal enerjinin açığa çıkış hızını gösterir. Dizel motordaki yanmanın anlaşılması ve bu çalışmada kullanılan yakıtların yanma özelliklerinin karşılaştırılması için tek boyutlu basitleştirilmiş bir yanma modeli kullanılmıştır. Tek boyutlu yanma modelinde, yanma odasındaki hava ve yakıt karışımından oluşan dolgu ideal gaz olarak kabul edilmiştir ve emme supabının kapanmasından egzoz supabının açılmasına kadarki süreçte yanma odasındaki dolgunun miktarında ve kompozisyonunda bir değişim oluşmamıştır. Yanma odasındaki yakıtın yanması ile açığa çıkan enerji aynı zamanda silindire sürülen enerji olarak kabul edilmiştir. İçten yanmalı motorlarda yanma termodinamiğin birinci kanunu ile tanımlanabilir ve enerji dönüşüm eşitliği Eşitlik (5.11) gibi yazılır ise [37];

$$\frac{du}{d\theta} = Qn - W \quad (5.11)$$

$$mC_v \frac{dT}{d\theta} = Qn - P \frac{dv}{d\theta} \quad (5.12)$$

Burada;

du = Sistem içerisindeki kütlenin iç enerji değişimi.

Qn = Yanma odasında ortaya çıkan net ısı (İÇÖ).

W = Sistem sınırı tarafından yapılan iş.

Günümüz motorlarında sistemdeki kütle ve ısı transferinin İÇÖ üzerindeki etkisi çok küçük olduğu için genellikle ihmal edilir [37]. Bu yüzden Qn hesaplanırken, yanma odasından silindir cidarlarına ve soğutma suyuna olan ısı transferi dahil edilmemiştir.

Bu noktada ideal gaz kabulü yapılarak;

$$PV = mRT \quad (5.13)$$

Eşitlik (5.13) için, kütleinin sabit kaldığı kabulü ile türev alınırsa;

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{1}{mR} \left[P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (5.14)$$

Eşitlik (5.14) ve eşitlik (5.12) kullanılarak beraber düzenlenir ise;

$$Qn = \left[\frac{C_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{d\theta} + \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{d\theta} \quad (5.15)$$

ifadesi elde edilir. $\frac{C_v}{R}$, (k) özgül ısı oranı cinsinden eşitlik (5.16)'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\frac{C_v}{R} = \frac{1}{k - 1} \quad (5.16)$$

Eşitlik (5.16), eşitlik (5.15)'de yerine yazılarak İÇO'nun anlık değişimi elde edilir (Eşitlik 5.17);

$$Qn = \left[\frac{k}{k - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k - 1} V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (5.17)$$

Qn Isı açığa çıkış oranı (İÇO) (J/KMA°)

P Silindir basıncı (Pa)

V Silindir hacmi (m³)

θ Krank mili Açısı (°)

Dizel motorlardaki yanma analizinde, $k=1,35$ olarak önerilmiştir [37]. Toplam ısı açığa çıkış oranı (TIÇO) ise eşitlik (5.17)'in integrali alınarak elde edilebilir;

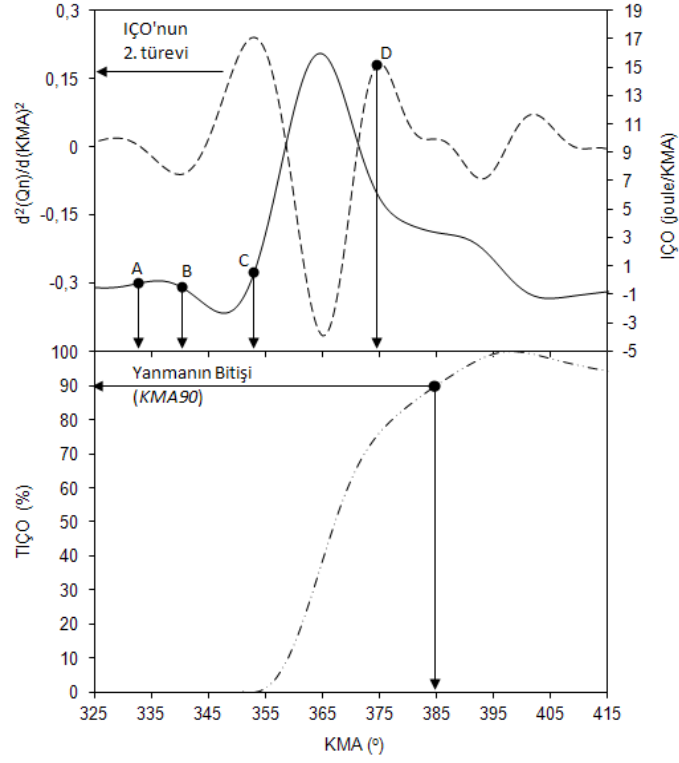
$$TIÇO = \int \left(\frac{k}{k - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k - 1} V \frac{dP}{d\theta} \right) \quad (5.18)$$

Bu çalışmada, yanma analizi hesaplamaları iki kısımda gerçekleştirilmiştir. Yanma analizinin ilk kısmında IÇO hesaplanmıştır. İkinci kısımda ise, yanmanın bitişinin (*KMA90*) belirlenmesi için TIÇO hesaplanmıştır. TIÇO, IÇO'nun integrali şeklinde hesaplanmıştır ve belirli bir çıkış işin harcanan enerji miktarını ifade eder.

Yanmanın başlangıcı, yakıtın püskürtülmesinden hemen sonra IÇO'nun negatiften pozitifte geçiş yaptığı krank mili açısı olarak tanımlanmıştır. Tutuşma gecikmesi, püskürtme başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki fark alınarak ifade edilmiştir. Yanmanın bitişi, TIÇO'nun %90'nına karşılık gelen krank mili açısı (*KMA90*) olarak belirlenmiştir. Toplam yanma süresi, yanma başlangıcı ile yanmanın bitişi arasındaki farktan bulunmuştur [76].

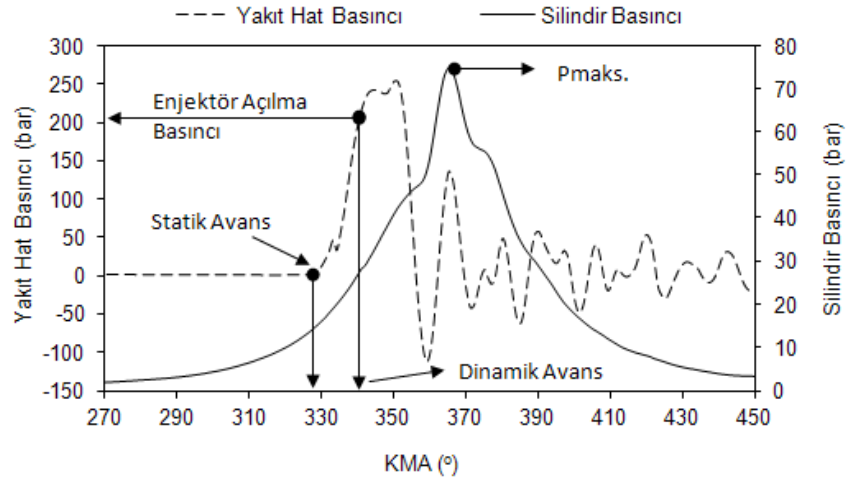
Ani ve difüzyon kontrollü yanma periyotları, IÇO'nun ikinci türevi alınarak krank mili açısı cinsinden tespit edilmiştir [129, 130]. Yukarıda hesaplanan yanma özellikleri Şekil 5.16'da özetlenmiştir.

Yanma odasına püskürtülen yakıtın püskürtme başlangıcını belirlemek için yakıt hat basınçları ölçülmüştür. Ölçülen yakıt hat basınçları üzerindeki motora ait püskürtme basıncına karşılık gelen krank mili açısı püskürtme başlangıcı olarak belirlenmiştir (Şekil 5.17).



- (A) Statik Püskürtme Avansı (B) Dinamik Püsk. Avansı
(C) Yanmanın Başlangıcı (D) Ani Yanma Per. Sonu
(A-B) Püskürtme Gecikmesi (B-C) Tutuşma Gecikmesi
(C-D) Ani Yanma Periyodu (KMA90) Yanmanın Sonu
Toplam Yanma Süresi= (KMA90 - C)
Dif. Kont. Yanma Periyodu=
(Toplam Yanma Süresi - Ani Yanma Periyodu)

Şekil 5.16. Hesaplanan yanma parametrelerinin özet grafiği.



Şekil 5.17. Püskürtme başlangıcının belirlenmesi.

Silindir içerisindeki ortalama gaz sıcaklıkları, silindir içindeki basıncı, sıcaklığı ve hacmi bilinen referans bir noktaya göre hesaplanmıştır [126]. Sistem sınırlarından ısı alış verişini olmadığı kabulü ile ($PV^n = \text{sabit}$);

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (5.19)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (5.20)$$

Sıcaklığı, basıncı ve hacmi bilinen referans bir nokta için (emme supabının kapanması gibi) ideal gaz denklemi eşitlik (5.21) ve (5.22) şeklinde düzenlenebilir;

$$P_{ref}V_{ref} = nRT_{ref} \quad (5.21)$$

$$\frac{T_{ref}}{P_{ref}V_{ref}} = \frac{1}{nR} \quad (5.22)$$

Emme supabının kapanması ve egzoz supabının açılması arasında herhangi bir noktadaki ortalama gaz sıcaklığını hesaplamak için yine ideal gaz denkleminde;

$$T_{ort.gaz} = P_{cyl}V_{cyl} \frac{1}{nR} \quad (5.23)$$

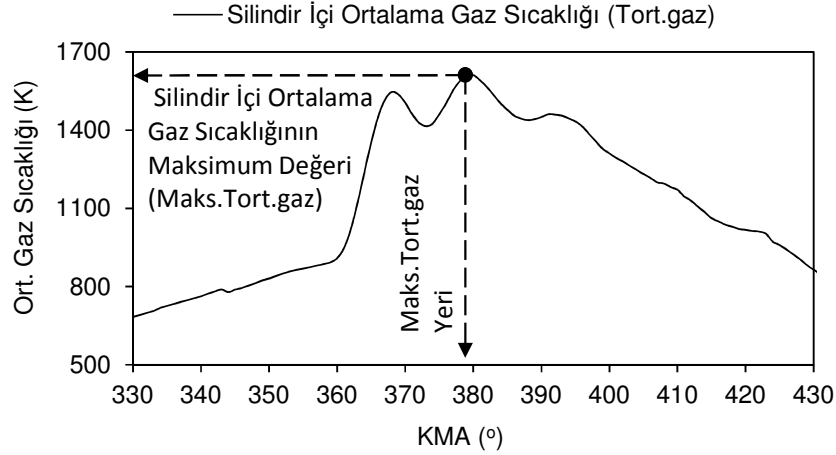
$$\frac{T_{ort.gaz}}{P_{cyl}V_{cyl}} = \frac{1}{nR} \quad (5.24)$$

n ve R sabit kabul edilerek eşitlik (8.22) ve (8.24) beraber düzenlendiğinde;

$$T_{ort.gaz} = P_{cyl}V_{cyl} \frac{T_{ref}}{P_{ref}V_{ref}} \quad (5.25)$$

$T_{ort.gaz}$	Silindir içi ortalama gaz sıcaklığı (K)
P_{cyl}	çevrim basıncı (kPa)
V_{cyl}	Silindir hacmi (m ³)
T_{ref}	Emme supabının kapandığı noktadaki referans sıcaklık (K)
P_{ref}	Emme supabının kapandığı noktadaki silindir basıncı (kPa)
V_{ref}	Emme supabının kapandığı noktadaki silindir hacmi (m ³)

Ortalama gaz sıcaklığının hesaplanmasında, yanmanın stokiyometrik şartlarda gerekleştiiği kabul edilmiştir. Eşitlik (5.25) yardımı ile hesaplanan silindir içi ortalama gaz sıcaklığının ($T_{ort.gaz}$) anlık değişimi şekil 5.18’de verilmiştir.



şekil 5.18. Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının değişimi.

5.4. DENEY şARTLARI VE DENEYLERİN YAPILIşI

Motor testlerinde deney yakıtı olarak, oksidatif desülfürizasyon sonrası yakıt özellikleri iyileştirilen pirolitik yakıt ve dizel yakıt kullanılmıştır. Dizel ve LPY içeren yakıt karışımları hacimsel olarak altı karışım oranında (Dizel, LPY20, LPY40, LPY60, LPY80 ve LPY100) hazırlanmıştır. Örneğin LPY40 yakıt karışımı, %60 dizel ve %40 LPY yakıtlarından oluşmaktadır.

LPY-Dizel yakıt karışımları ile çalışan dizel motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin motor hızı, motor yükü ve yakıt püskürtme basıncı ile değişimini

incelemek için motor deneyleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ilk aşaması, LPY-dizel karışımlarının ve motor hızının performans, emisyon ve yanma karakteristiklerine etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu amaçla oluşturulan yakıt karışımları, tam yükte ve dört farklı motor hızında (1400, 2000, 2600, 3200 d/d) test edilmiştir. Deneylerde, referans verilerini oluşturmak için önce standart dizel yakıt kullanılmıştır. Daha sonra, değişik hacimsel oranlarda hazırlanan LPY-Dizel yakıt karışımları aynı deney şartlarında test edilmiştir.

Motor deneyleri sırasında 3100 d/d'den sonra, %100 LPY'li motor çalışmasında kararsızlık oluşmuştur. Bu nedenle LPY100 ile yapılan çalışmalar 2600 d/d ile sınırlandırılmıştır.

Deneylerin ikinci aşaması ise, LPY-dizel karışımları ile çalışan dizel motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin motor yükü ve yakıt püskürtme basıncı ile değişimini incelemek için yapılmıştır. Dizel motorun maksimum güç devrine yakın sabit bir motor hızında (3400 d/d), dört farklı yükte (2,7 Nm (%25 Yük), 5,4 Nm (%50 Yük), 8,1 Nm (%75 Yük) ve 10,8 Nm (%100 Yük)) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her bir yakıt karışımı için dört farklı yakıt püskürtme basıncı (185 bar, 205 bar, 225 bar ve 245 bar) kullanılmıştır. Deney motorun orijinal püskürtme basıncı 205 bar'dır. Deney motoruna ait yakıt sisteminde, enjektör yayının altındaki basınç ayar pulları yardımı ile enjektör püskürtme basıncı değiştirilmiştir.

Testler sırasında, emisyonlar ve is, dinamometreden okunan kuvvet değeri, motor hızı, yakıt tüketimi, silindir basıncı, yakıt hat basıncı ve T_{Egzoz} kaydedilmiştir. Motor hızı, dinamometreden okunan kuvvet değeri ve yakıt tüketimi kullanılarak motor torku, motor gücü, FÖET ve motor efektif verimi (η_e) hesaplanmıştır.

Krank mili açısına bağlı olarak ölçülen silindir basıncı, yakıt hat basıncı ve motorun geometrik özellikleri aracılığı ile ayrıntılı yanma karakteristikleri hesaplanarak grafiksel olarak ifade edilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL BULGULAR

Bu çalışmada, atık taşıt lastiklerinin vakum pirolizi ile elde edilen pirolitik yakıtın yakıt özellikleri iyileştirilerek dizel motorda alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır.

LPY-Dizel yakıt karışımları ile çalışan dizel motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin motor hızı, motor yükü ve yakıt püskürtme basıncı ile değişimini incelemeye yönelik olarak yapılan motor deneylerinin sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

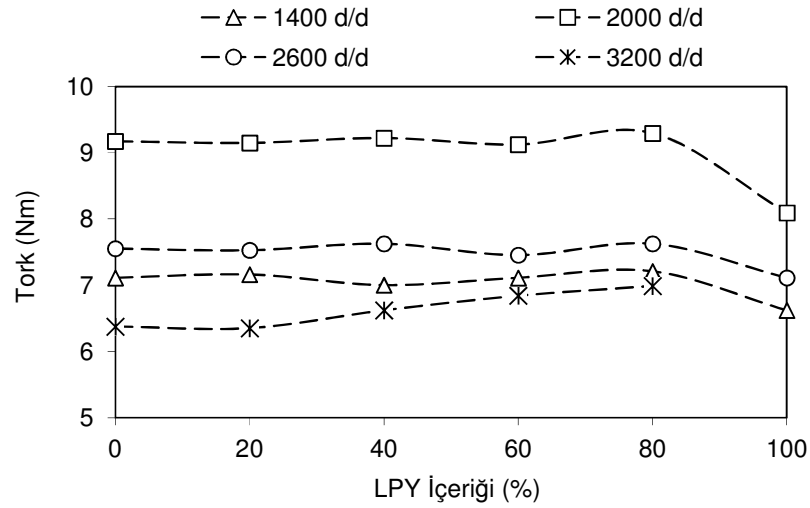
6.1. MOTOR HIZININ ETKİSİ

6.1.1. Motor Performansı

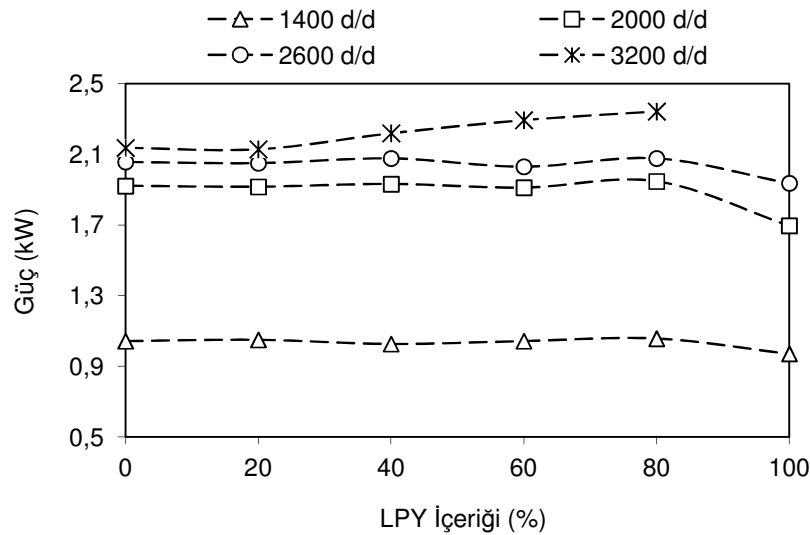
Bu bölümde, test yakıtlarının LPY içeriği ve motor hızının motor performansına etkisini ortaya koymak için yapılan deneylerde, motor performans değişkenleri motor test verilerinin analiz edilmesi ile elde edilmiştir. Motor torku, motor gücü, FÖET, efektif verim ve T_{Egzoz} 'dan oluşan motor performans değişkenleri, motor hızına ve test edilen yakıt içerisindeki LPY yüzdesine bağlı olarak grafiksel olarak sunulmuş ve incelenmiştir.

Motor deneyleri sırasında 3100 d/d'den sonra, %100 LPY'li motor çalışmasında kararsızlık oluşmuştur. Bu nedenle LPY100 ile yapılan çalışmalar 2600 d/d ile sınırlandırılmıştır.

Motor çıkış torku ve motor gücünün motor hızına ve test yakıtlarının LPY içeriğine bağlı değişimleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de sırası ile gösterilmiştir. 3200 d/d haricindeki bütün motor hızları için, yakıtın %80’e kadar olan LPY içeriği genellikle motor tokunu ve gücünü önemli ölçüde etkilememiştir. Ancak, 3200 d/d motor hızı için motor torku ve gücü bir miktar artış göstermiştir. Genellikle yakıtın viskozitesi yakıtın püskürtme karakteristiklerini ve dolayısı ile yanma odasındaki karışım teşkil hızını etkiler.



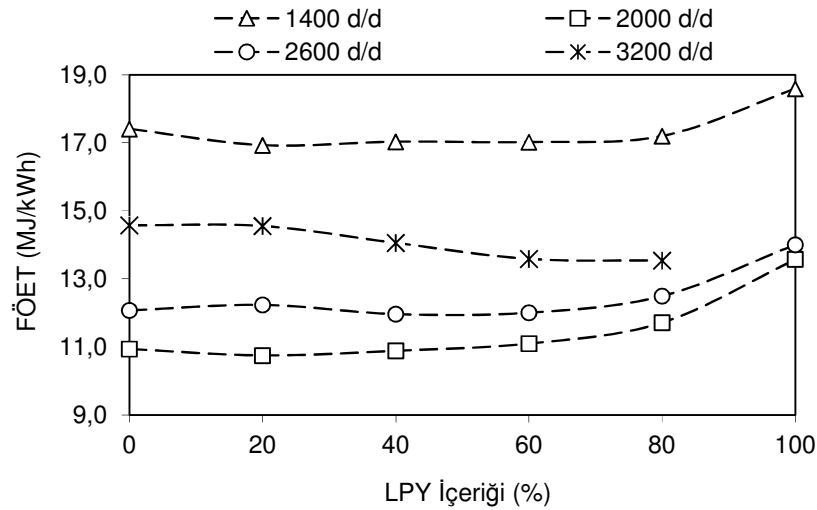
Şekil 6.1. Motor hızının ve LPY içeriğinin motor torkuna etkisi.



Şekil 6.2. Motor hızının ve LPY içeriğinin motor gücüne etkisi.

Düşük motor hızlarında, yakıtın karışım oluşturma hızını etkileyen yakıt püskürtme hızı düşük viskoziteli yakıtlar için düşüktür. Ayrıca düşük viskoziteli yakıtların yanma odasındaki yakıt hüzmeye derinliği de düşüktür. Bu durum motor torkunu ve gücünü olumsuz olarak etkiler. Yüksek hızlı motor çalışmasında ise silindir içi sıcaklıkları ve yakıt hüzmelerinin ilerleme hızı daha yüksektir. Yakıt hüzmelerinin ilerleme hızındaki artış ise karışım teşkil hızını artırdığından motor torkuna ve gücüne olumlu yönde etkir [131-133]. Bunun yanında yakıtın yoğunluğundaki artış, yanma odasına kütleli olarak daha fazla yakıt sağlayacağı için motor torkunu ve gücünü artırır. Literatürdeki bazı çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilirken [26], bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar ifade edilmiştir [97].

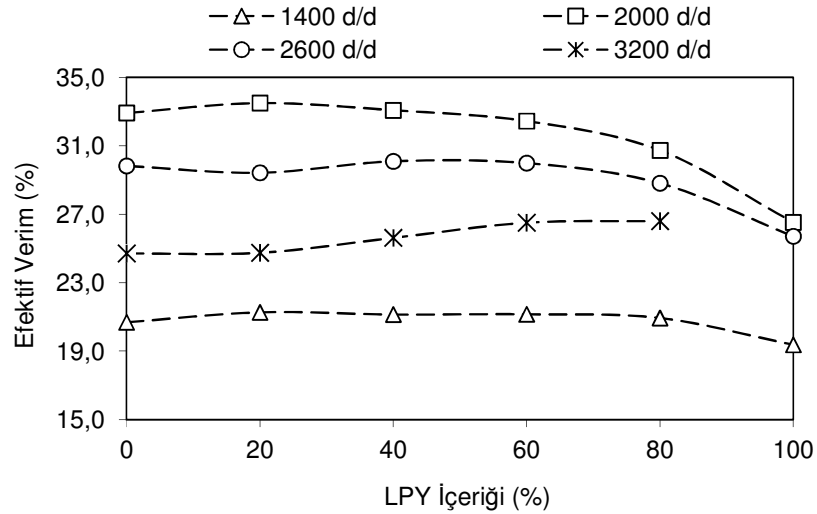
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin FÖET'e etkisi Şekil 6.3'te verilmiştir. Özellikle farklı yoğunluk ve ısıl değerdeki yakıtların karşılaştırılmasında FÖET uygun bir parametredir. FÖET, belirli bir çıkış gücü için verilmesi gereken enerjiyi ifade eder ve FÖYT ve yakıtın ısıl değeri kullanılarak hesaplanır. Şekil 6.3'te görüldüğü gibi, test yakıtları içerisindeki LPY içeriğinin %60'e kadar artırılması 3200 d/d haricindeki bütün motor hızlarında FÖET'ni önemli ölçüde etkilememiştir. Ancak, test yakıtlarının LPY içeriğinin daha fazla artması, 3200 d/d dışındaki bütün motor hızlarında FÖET'nin önemli ölçüde artışına sebep olmuştur. 3200 d/d motor hızında ise, test yakıtlarının LPY içeriğinin artırılması FÖET'ni iyileştirmiştir.



Şekil 6.3. Motor hızının ve LPY içeriğinin FÖET'e etkisi.

Genellikle yoğunluk, viskozite, alt ısı değer, uçuculuk gibi yakıt özellikleri özgül enerji tüketimine önemli ölçüde etkir [66]. Düşük viskoziteli ve daha uçucu LPY yakıt karışımları yanma odasındaki karışım teşkilini iyileştirir ve özgül enerji tüketimini azaltır. Ancak, LPY yakıtlarının düşük enerji içeriği ve yüksek yoğunluğu genellikle özgül enerji tüketimini artırmaktadır [59, 134]. Birbirleri ile çelişen bu faktörlerin toplam etkisi yüksek ve düşük motor hızlarında farklı davranışlar sergilemiştir. Mevcut çalışmadaki sonuçlar ile literatürdeki bazı çalışmalar benzer sonuçlar göstermiştir [26].

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin efektif verim üzerine etkisi Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi, 3200 d/d haricindeki bütün motor hızları için, LPY60'a kadar olan yakıt karışımları efektif verim açısından standart dizel yakıtı ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Bununla birlikte 3200 d/d için, test yakıtlarının LPY içeriğindeki artış efektif verimi bir miktar artırmıştır.

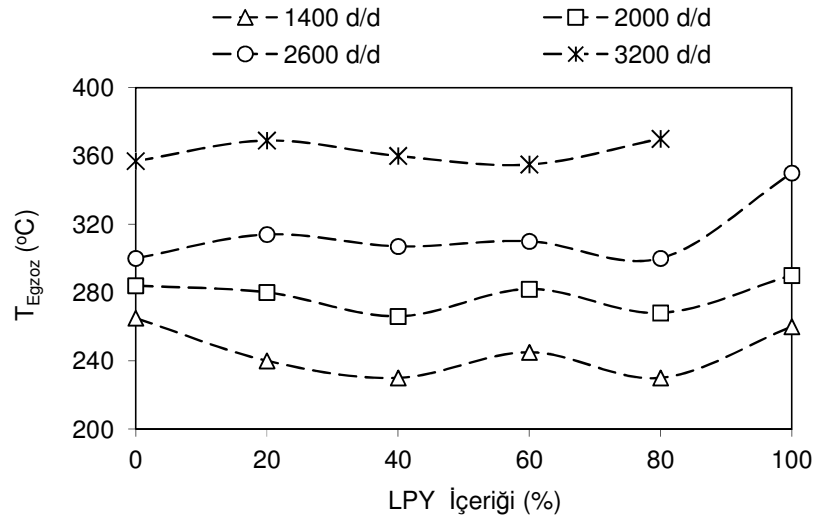


Şekil 6.4. Motor hızının ve LPY içeriğinin efektif verime etkisi.

Yüksek motor hızlarında efektif verimdeki bu artış, LPY yakıtlarının viskozitelerinin düşük olması ile ve uçuculuğunun fazla olması ile açıklanabilir [66]. Çünkü, daha uçucu ve daha düşük viskoziteli yakıtlar, özellikle yüksek motor hızlarındaki yakıt hüzmelerinin ilerleme hızının artışından dolayı tutuşma gecikmesi periyodunca daha iyi bir karışım teşkili sağlarlar. Ayrıca motor hızındaki artış yanma odasındaki sıcaklıkları da artırarak yanmayı bir miktar iyileştirir. Düşük motor hızlarında ise

karişım teşkili daha yavaştır. Bununla birlikte, LPY yakıtlarının dūřuk viskozite ve yūksək uğuculuğu yanma odasındaki karişım teşkilinin iyileşmesini sağlarken efektif verimi de artırır. Test yakıtlarına %60'dan fazla LPY ilavesi, tutuşma gecikmesini ařırđ artırarak yanmanın genişleme stroğuna doğru kaymasına ve efektif verimin dūřmesine sebep olmaktadır [135]. Bu ęalıřmada elde edilen sonuğlar, efektif verim ağısından literatürdeki bazı ęalıřmalar [64, 100-102] ile benzerlik gōstermiřtir.

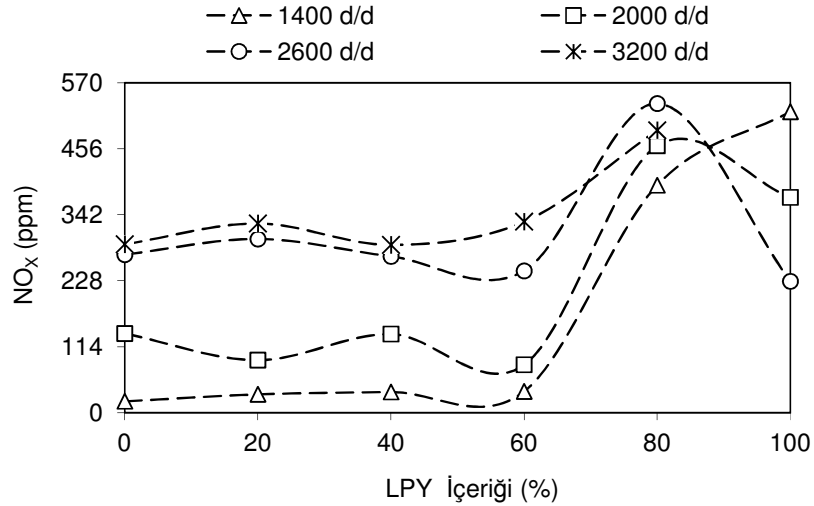
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY iğeriğinin T_{Egzoz} 'a etkisi şekil 6.5'te verilmiştir. Genellikle dūřuk ve orta motor hızları ięin, LPY80'a kadar olan yakıt karişımları T_{Egzoz} 'u ęok azda olsa dūřürmüřtür. Yūksək motor hızlarında ise, LPY60'dan daha fazla yakıt ilavesi T_{Egzoz} 'u artırma yönünde bir eğilim gōstermiřtir. Ancak bu artış ęok kūęük düzeydedir. Genellikle yūksək uğuculuğa sahip yakıtlar buharlaşırken ęevrelerinden ısıyı ęekerek soğutma etkisi sağlarlar ve T_{Egzoz} 'u dūřürürler [136]. LPY iğeren test yakıtları ise standart dizel yakıtına gōre daha uğucudurlar. Bunun yanında, test yakıtları iğerisindeki LPY iğeriğinin artışı ile azalan setan sayısının sebep olduğu tutuşma gecikmesindeki artış ani yanma safhasındaki sıcaklıkları artıracağından T_{Egzoz} 'u da artırabilir. Bu sebeplerin toplam etkisi, test yakıtlarına %80'a kadar LPY ilavesinin genel olarak T_{Egzoz} 'u bir miktar azaltacağı şeklindeydir.



şekil 6.5. Motor hızının ve LPY iğeriğinin T_{Egzoz} 'a etkisi.

6.1.2. Egzoz Emisyonları

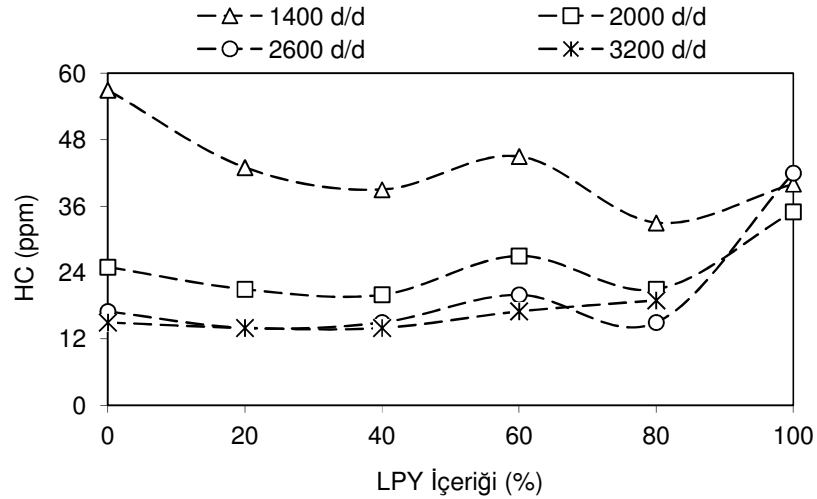
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin NO_x emisyonlarına etkisi Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Bütün motor hızları için, test yakıtlarının LPY içeriğinin %60'a kadar artırılması motorun ürettiği NO_x emisyonlarını önemli ölçüde etkilememiştir. LPY60'dan daha fazla yakıt ilavesi ise NO_x emisyonlarını kayda değer ölçüde artırmıştır. LPY içeren test yakıtların yüksek yoğunluğu ve yüksek aromatik içeriği NO_x emisyonlarının artışına sebep olabilir. Yüksek yoğunluğa sahip yakıtlar, yanma odasındaki yakıt miktarını artırarak yanma odasındaki sıcaklıkları artırır. Yakıtın yüksek aromatik içeriği ise adyabatik alev sıcaklığını artırarak NO_x emisyonlarının oluşumuna yardım eder [41, 42, 137]. Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının düşük setan sayısı NO_x emisyonlarının oluşumunu artırır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, NO_x emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik [64, 100] gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir [97, 101, 102].



Şekil 6.6. Motor hızının ve LPY içeriğinin NO_x emisyonlarına etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin HC emisyonlarına etkisi Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Test yakıtları içerisindeki LPY içeriğinin %40'a kadar artırılması hemen hemen bütün motor hızlarında HC emisyonlarını iyileştirmektedir. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile birlikte yakıt viskozitesi azalmış ve uçuculuğu artmıştır. Bu durum, hava ile yakıtın tutuşma gecikmesi periyodunca iyi karışmasını ve dolayısı ile HC emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca,

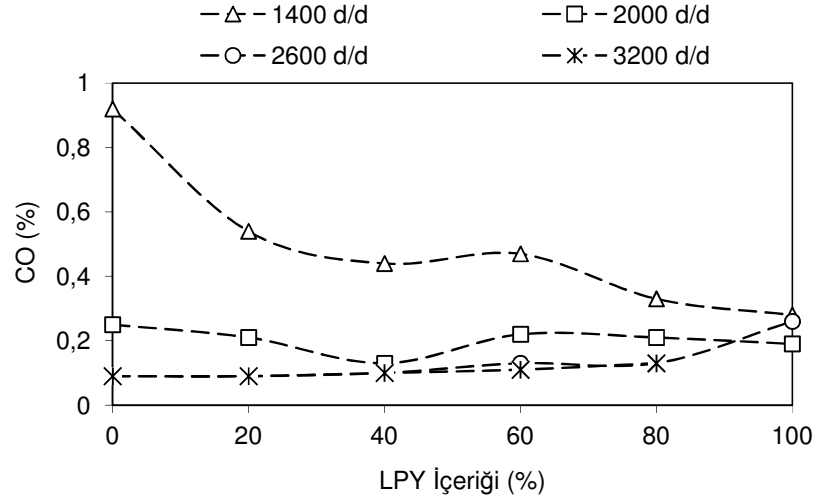
LPY yakıtlarının yüksek atık karbon içeriği özellikle LPY60'dan sonra yanmayı güçleştirmesinden dolayı HC emisyonları artmıştır [67]. LPY içeriğinin artışı ile birlikte artan yakıt yoğunluğu karışımı zenginleştirmekte ve HC emisyonlarını artırmaktadır [59]. Bununla birlikte düşük setanlı ve yüksek aromatik içeriğine sahip yakıtlar genellikle daha fazla HC emisyonu üretirler [36, 56]. Yukarıda ifade edilen parametrelerin toplam etkisi olarak, yakıtın LPY içeriğini %40'a kadar artırmak HC emisyonları açısından özellikle düşük hızlı motor çalışmasında olumlu sonuçlar ortaya çıkarmıştır. LPY40 ile standart dizel yakıtın ürettiği HC emisyonları ise bütün motor hızları için karşılaştırılabilir düzeydedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, HC emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik [26, 102] gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir [64, 97, 100, 101].



Şekil 6.7. Motor hızının ve LPY içeriğinin HC emisyonlarına etkisi.

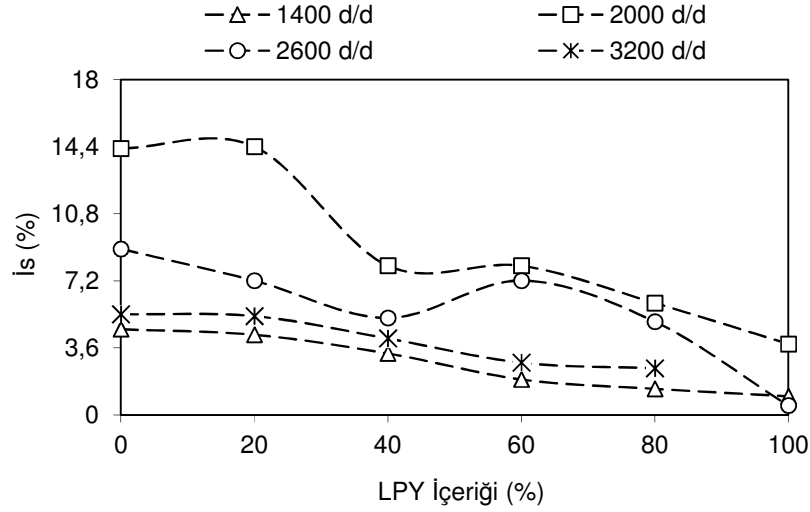
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin CO emisyonlarına etkisi Şekil 6.8'de verilmiştir. 2600 d/d ve üzeri motor çalışmasında, test yakıtlarının LPY içeriğini artırmak CO emisyonlarını artırmıştır. Fakat bu artış ihmal edilebilir düzeydedir. Bunun yanında, düşük ve orta hızlı motor çalışmasında ise, test yakıtlarının artan LPY içeriği CO emisyonlarını azaltmıştır. Yüksek hızlı motor çalışmasında ortaya çıkan CO emisyonlarındaki artış artan yakıt yoğunluğu ve yakıt tüketimi ile ilişkilendirilebilir. Bundan başka, LPY yakıtlarının yüksek uçuculuğu, yanma odasında soğutma etkisi oluşturduğundan, CO emisyonlarının oksidasyonunu güçleştirir [134]. Ayrıca, LPY içeren yakıtların düşük viskozitesi, yanma odasındaki

karışım teşkilini iyileştirerek CO emisyonlarının oksidasyonu hızlandırır [58, 59]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, CO emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik [26, 102] gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir [97, 100].



Şekil 6.8. Motor hızının ve LPY içeriğinin CO emisyonlarına etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin is emisyonlarına etkisi Şekil 6.9'da verilmiştir. Test yakıtları içerisindeki LPY içeriğinin artırılması bütün motor hızlarında is emisyonlarını azaltmıştır. Bu durum, LPY içeren test yakıtlarının düşük viskozitesi ve yüksek uçuculuğu ile açıklanabilir. Düşük viskoziteli ve daha uçucu yakıtlar genellikle is emisyonlarını azaltır [50, 51, 54, 135, 138]. Ayrıca, düşük viskoziteli yakıtlar yakıtın püskürtülmesi sırasında daha küçük taneciklere ayrıştığından yakıt hüzmesi çevresindeki lokal bölgelerdeki yakıt/hava oranını azaltarak karışım teşkilini fakirleştirir. Bu durum is emisyonlarının azalmasına yardım eder. Bunun aksine, atık karbon içeriği yüksek olan yakıtların yanması güçtür ve eksik yanmaya ve is emisyonlarına sebep olurlar [67]. LPY içeren test yakıtlarının atık karbon içeriği ise standart dizel yakıttan daha yüksektir. Genel olarak, motorun tam yük koşullarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile is emisyonlarının azaldığı söylenebilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, is emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar [26] ile benzerlik gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir [97, 100-102].

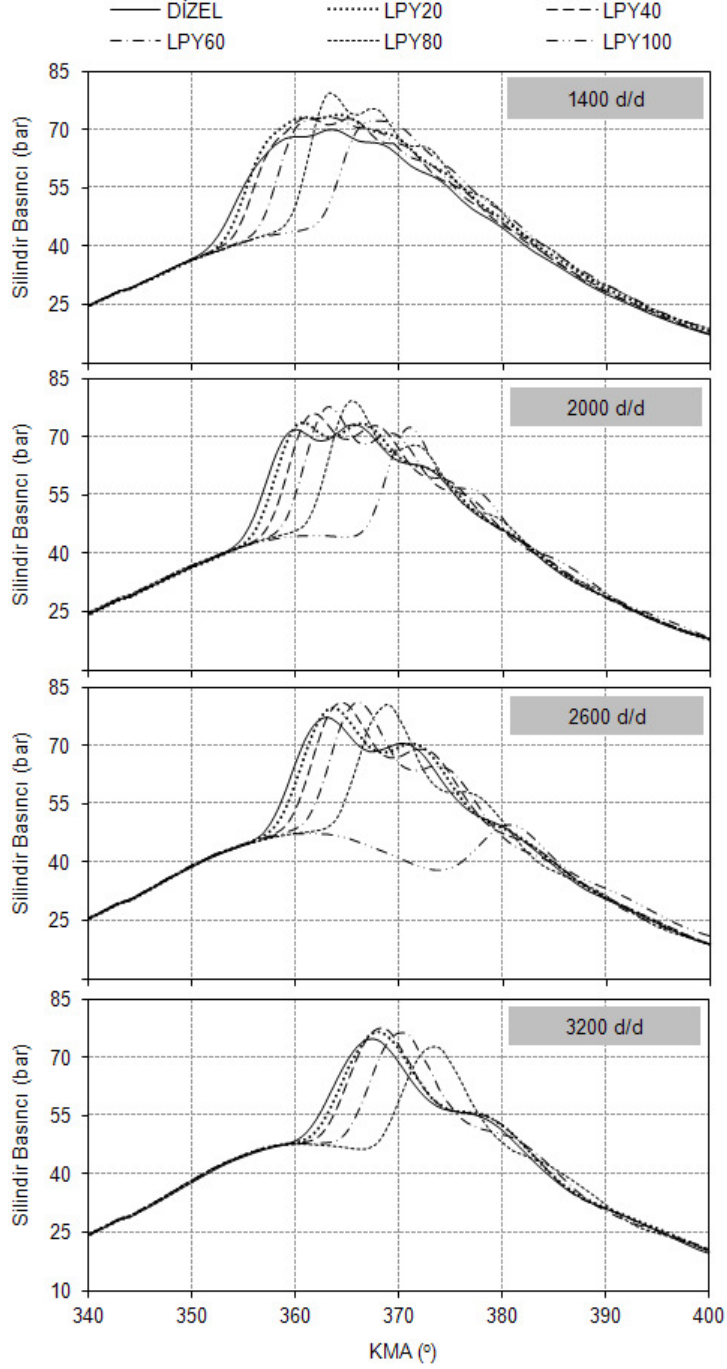


Şekil 6.9. Motor hızının ve LPY içeriğinin is emisyonlarına etkisi.

6.1.3. Yanma Karakteristikleri

Yanma odasında gerçekleşen olayları ve yanma sürecini anlamak için silindir içi basınçlarının ölçülmesi ve analiz edilmesi önemlidir. İçten yanmalı motorlar, iş yapmak için motor silindirleri içerisinde basınç oluştururlar. Bu yüzden, yüksek yanma sonu basıncı istenen bir durumdur. Bunun yanında, aşırı yüksek ve değişken silindir içi basınçların motor için önemli bir hasar kaynağı olduğu bilinmelidir ve bundan kaçınılmalıdır. Pmaks ve maksimum basınç artış hızı bilgisi, test edilen yakıtların motora sağlayacağı olası katkıların olumlu veya olumsuzluğu hakkında bir sonuca varılmasına yardım eder. Krank mili açısı ile silindir içi basınçlarının değişimi arasındaki ilişki motor performansı ile ilgili bilgiler verir. İçten yanmalı motorlarda tutuşma gecikmesi, Pmaks'ın değeri, Pmaks'ın olduğu yer, silindir içi basınçların artış hızı, vuruntu, yanma süresi ile ilgili sorulara cevap bulmak için silindir içi basınçlardan faydalanılır.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi Şekil 6.10'da verilmiştir. Dizel motorlardaki silindir basıncı, ani yanma fazındaki yakıtın yanma hızına bağlıdır. Genel olarak bütün hız aralıklarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı silindir içi basınçlarının oluşumunu geciktirmektedir.

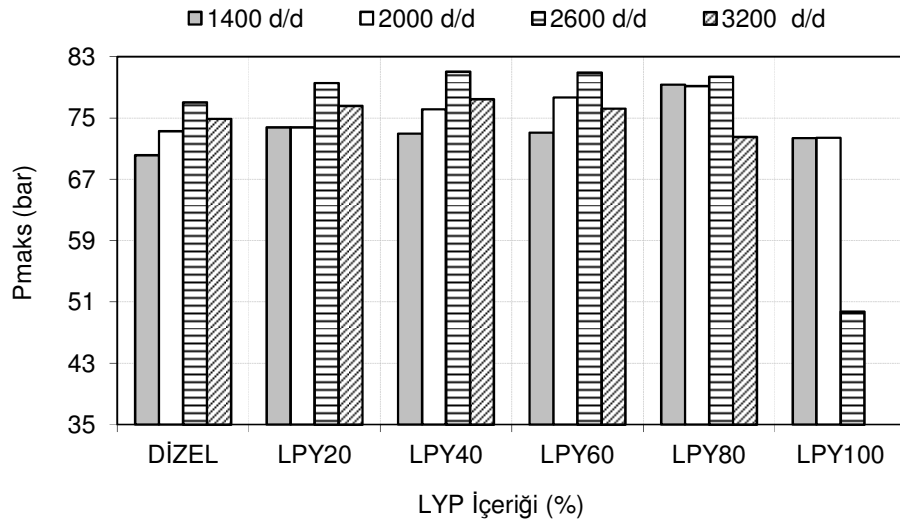


Şekil 6.10. Motor hızının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi.

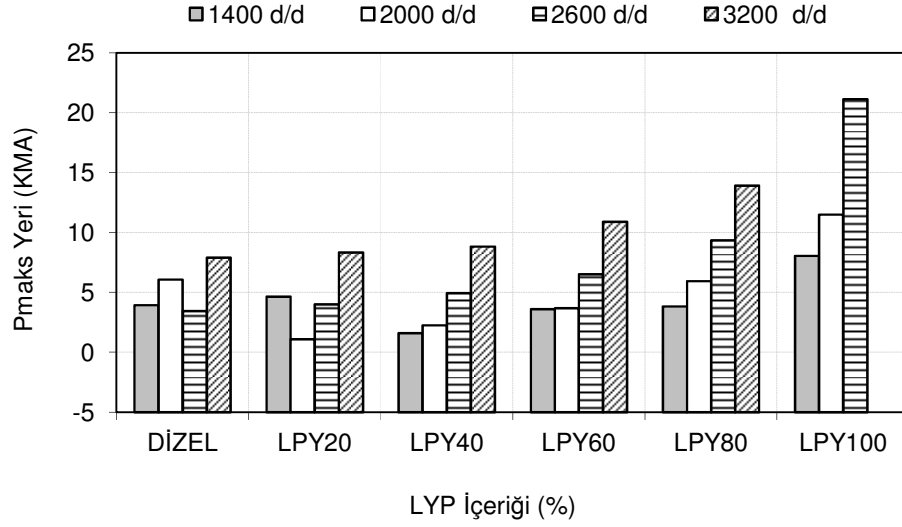
Özellikle 2600 d/d'den sonra, LPY100 test yakıtı silindir içi basınçlarının oluşumunu daha fazla geciktirmektedir. Bunun yanında, 3100 d/d'den daha yüksek motor hızları için LPY100 ile çalışan test motorunda silindir basınçları etkili bir şekilde oluşamamıştır. Bu sonuç, test motorunun neden LPY100 yakıt ile 3100 d/d'den daha

yüksek motor hızlarında çalışmadığını açıklayabilir. Yüksek oranda LPY içeren test yakıtları ile çalışan dizel motorun özellikle düşük setan sayısından ve yüksek uçuculuğundan kaynaklanan tutuşma gecikmesindeki aşırı artış, silindir basınçlarının etkin şekilde oluşumunu kısıtlamaktadır. Çünkü aşırı tutuşma gecikmesinde yakıtın tutuşmaya başlaması, piston genişleme yönünde ilerlerken gerçekleşir ve bu durumda tutuşmanın başladığı hacim oldukça büyüktür ve yanma kararlı bir şekilde devam ettirilemez.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin Pmaks' ve Pmaks'ın yerine etkisi Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'te sırasıyla verilmiştir. Pmaks, tutuşma gecikmesi tarafından yönlendirilen ani yanma fazında püskürtülen yakıt miktarına bağlıdır. Daha uçucu ve daha düşük enerji içeriğine sahip yakıtlar, tutuşma gecikmesindeki artış ile birlikte ani yanma periyodundaki yakıt miktarının artışına sebep olurlar ve Pmaks'ı artırır [67]. Dolayısı ile Pmaks aynı zamanda, ani yanma periyodu öncesi tutuşma gecikmesi periyodunda biriken yakıt miktarının da bir göstergesidir [122].1400 ve 2000 d/d için, yakıtın LPY içeriğini %80 oranına kadar artırmak Pmaks'ı artırırken test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak Pmaks'ı azaltmaktadır. 2600 ve 3200 d/d için ise yakıtın LPY içeriğini %40 oranına kadar artırmak Pmaks'ı artırırken test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak Pmaks'ı azaltmaktadır.



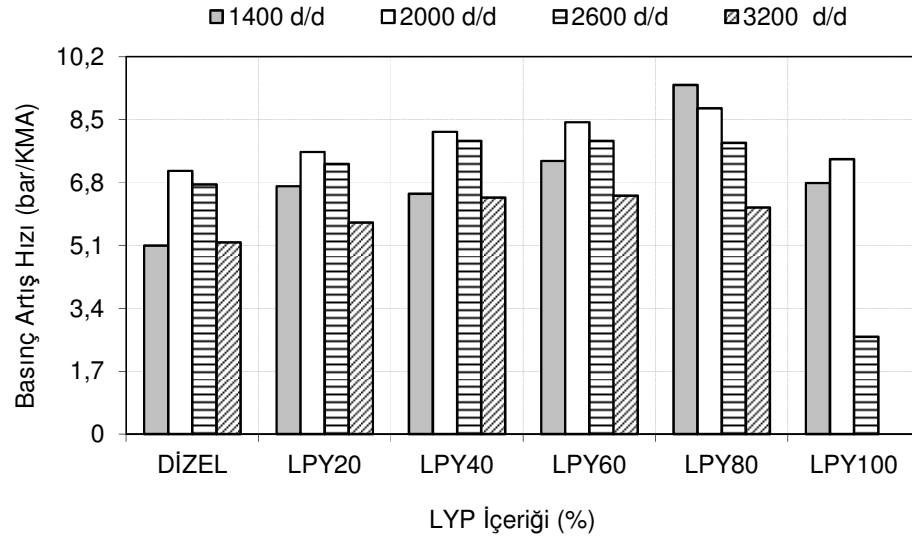
Şekil 6.11. Motor hızının ve LPY içeriğinin Pmaks'a etkisi.



Şekil 6.12. Motor hızının ve LPY içeriğinin Pmaks'ın yerine etkisi.

LPY içeren test yakıtlarının artan yoğunluğu ve uçuculuğu ile birlikte azalan setan sayısı nedeni ile tutuşma gecikmesi ve dolayısı ile Pmaks'ın değeri artış göstermiştir [134, 139]. Genel olarak, test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça Pmaks'ın yeri de genişleme stroğuna doğru kaymaktadır (Şekil 6.12). Pmaks'ın oluşumu ve yeri açısından, yakıtın LPY içeriğini %40 oranına kadar artırmak özellikle düşük ve orta hızlı motor çalışmasında dizel yakıt ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin basınç artış hızına etkisi Şekil 6.13'te verilmiştir. Basınç artış hızı, ölçülen silindir basıncının birinci türevinin maksimum değeridir ve motorun yumuşak veya sert çalışmasını etkiler. Genellikle, LPY içeren test yakıtlarının basınç artış hızı dizel yakıtlı motor çalışmasına göre daha yüksektir. 1400 ve 2000 d/d için, yakıtın LPY içeriğini %80 oranına kadar artırmak basınç artış hızını artırırken test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak basınç artış hızını azaltmaktadır. 2600 ve 3200 d/d için ise yakıtın LPY içeriğini %60 oranına kadar artırmak basınç artış hızını artırırken test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak basınç artış hızını azaltmaktadır.

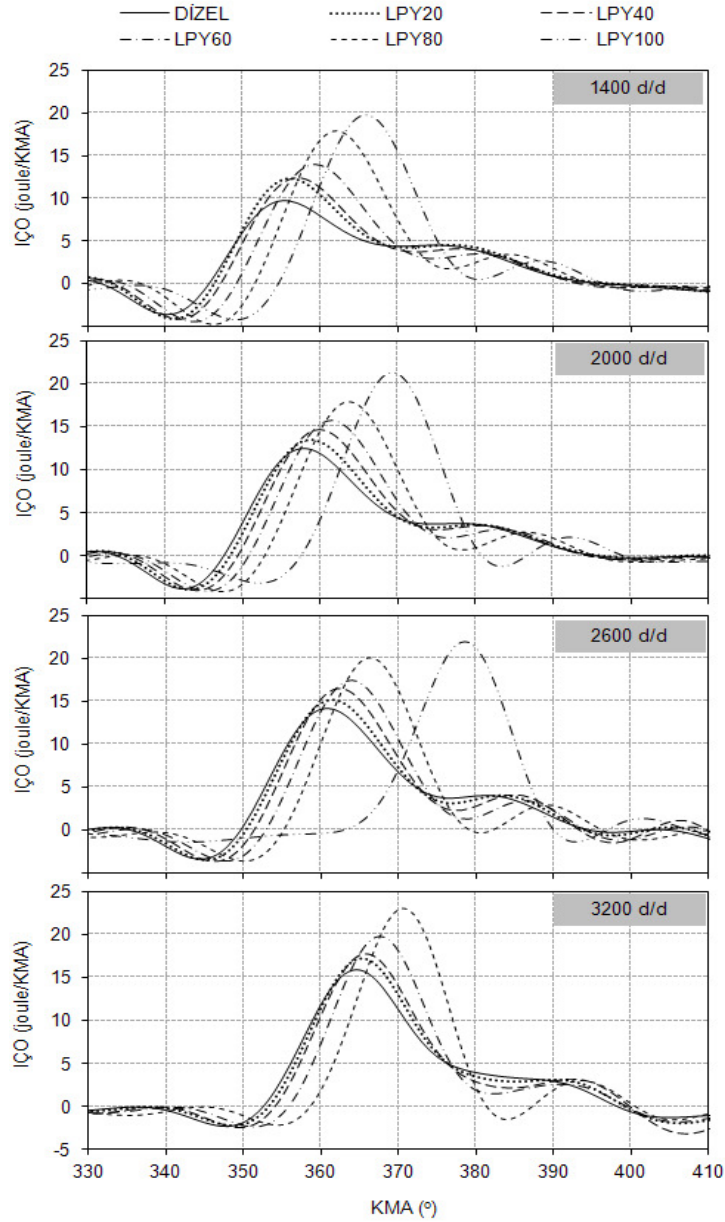


Şekil 6.13. Motor hızının ve LPY içeriğinin basınç artış hızına etkisi.

Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan basınç artış hızı, artan tutuşma gecikmesi ile ilişkilendirilebilir. Çünkü, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan tutuşma gecikmesi periyodunda biriken püskürtülmüş haldeki yakıt ani ve kontrolsüz bir şekilde ani yanma periyodunda yanarak yanma odasındaki silindir basıncını ve basınç artış hızını önemli ölçüde artırır [135]. Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının artan yakıt yoğunluğu, yanma odasına kütleli olarak daha fazla yakıt sağlar ve basınç artış hızını artırır. Ancak yüksek hızlı motor çalışmasında, yüksek oranda LPY içeren test yakıtlarının tutuşma gecikmesinin aşırı uzatması sonucu basınç artış hızı düşer. Çünkü aşırı uzun tutuşma gecikmesinde yakıtın tutuşmaya başlaması, piston genişleme yönünde ilerlerken gerçekleşir ve bu durumda tutuşmanın başladığı hacim oldukça büyüktür ve ani yanma fazındaki basınç artış hızı düşmeye başlar. Özet olarak, standart dizel yakıtına LPY ilavesi tutuşma gecikmesini, P_{maks} 'ı ve basınç artış hızını artırır, silindir basınçlarının oluşumunu genişleme stroğuna doğru öteleyer.

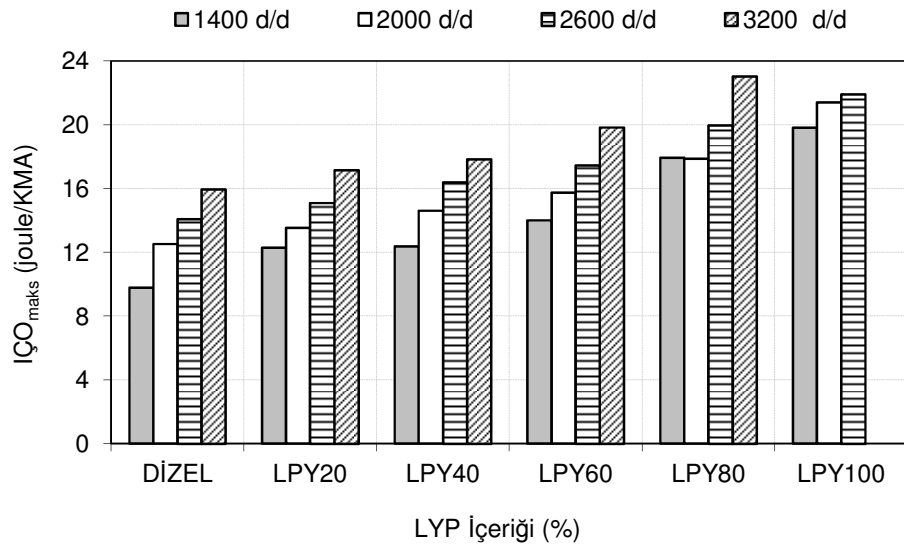
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin İÇÖ'ya etkisi Şekil 6.14'te gösterilmiştir. İÇÖ özellikle yakıtın tutuşma noktasının belirlenmesinde, NO_x ve is emisyonlarının oluşmasında etkilidir. Belirli bir motor hızı için, test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça ısı açığa çıkışının başlaması da gecikmektedir. Isı açığa çıkışının bitimi ise genellikle değişmemiştir. Artan motor hızı ise hem İÇÖ'nun başlangıç

noktasını hem de bitiş noktasını ötelemektedir. Püskürtme periyodu boyunca yanma odasından emilen ısı, LPY içeren yakıtların yüksek uçuculuğundan dolayı daha fazladır. Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının setan sayısı daha düşüktür. Test yakıtlarının artan uçuculuğu ve azalan setan sayısı, yakıtın tutuşmaya başladığı noktayı ötelemektedir [139]. Özellikle yüksek hızlı motor çalışmalarında, %80'den fazla LPY ilavesi İÇÖ'yu önemli ölçüde genişleme stroğu sonuna doğru yaklaştırmıştır.



Şekil 6.14. Motor hızının ve LPY içeriğinin ısı açığa çıkış oranına (İÇÖ) etkisi.

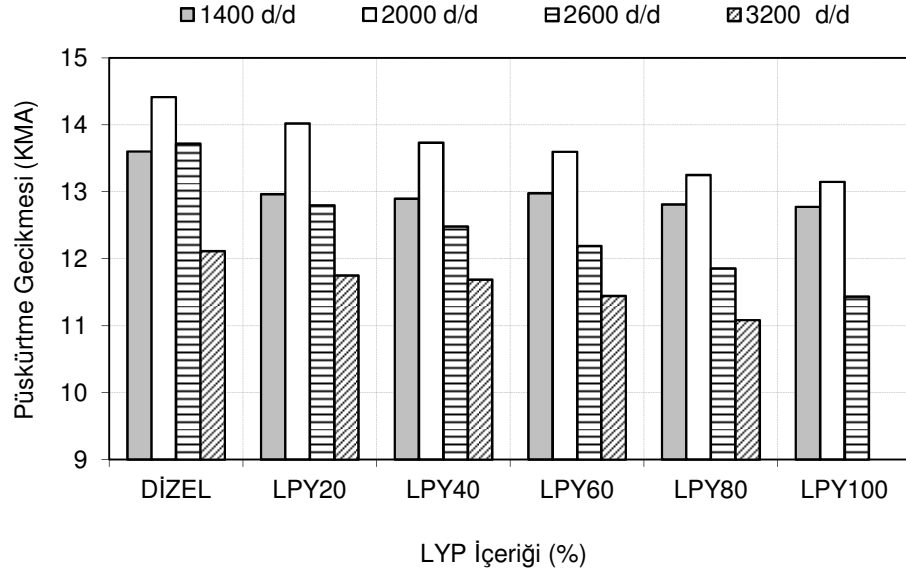
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin $I\dot{C}O_{maks}$ 'ın maksimum değerine ($I\dot{C}O_{maks}$) etkisi Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bütün motor hızlarında, test yakıtlarının artan LPY içeriği $I\dot{C}O_{maks}$ 'ın maksimum değerini artırmaktadır. Bu durum LPY içeren yakıtların daha uzun tutuşma gecikmesine sebep olması ile açıklanabilir. Artan tutuşma gecikmesi periyodu ani yanma periyodunda yanan yakıt miktarını ve $I\dot{C}O_{maks}$ değerini artırır [139]. Bundan başka, artan tutuşma gecikmesi periyodunca püskürtülen LPY içerikli yakıtın yüksek yoğunluğundan dolayı artan yakıt kütlesi de ani yanma safhasında kontrolsüz bir şekilde yanarak $I\dot{C}O_{maks}$ 'ın değerini artırmaktadır [73]. $I\dot{C}O_{maks}$ aynı zamanda ani yanma periyodundaki maksimum $I\dot{C}O$ 'yu da temsil eder. Bu yüzden, LPY içeren test yakıtlarının yanma karakteristiklerinde ani yanma periyodunun daha baskın olduğu söylenebilir.



Şekil 6.15. Motor hızının ve LPY içeriğinin $I\dot{C}O_{maks}$ 'a etkisi.

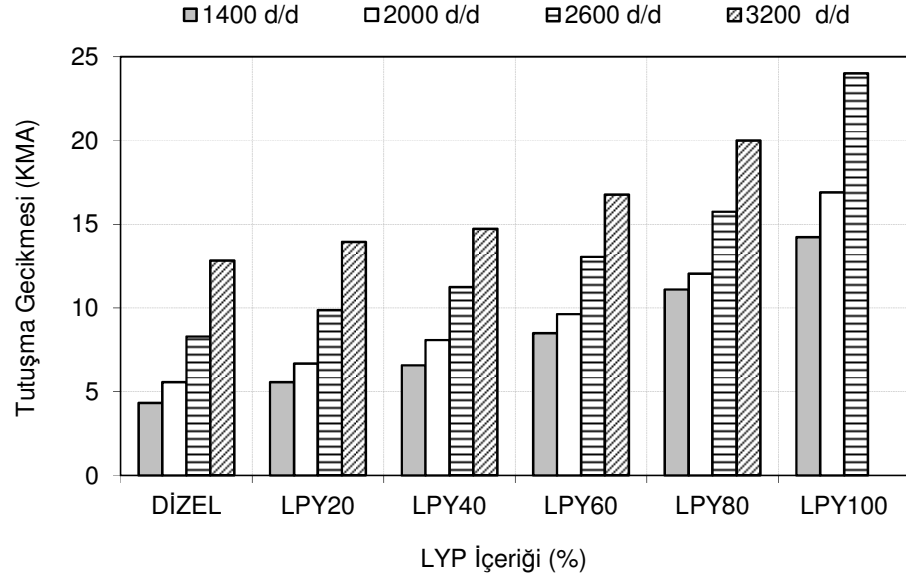
Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin püskürtme gecikmesine etkisi Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Bu çalışmada püskürtme gecikmesi, statik püskürtme açısı ile dinamik püskürtme açısı arasındaki fark olarak alınmıştır. Genel olarak, artan motor hızı ile püskürtme gecikmesi azalmaktadır. Ancak en yüksek püskürtme gecikmesi orta hızlı motor çalışmasında görülmektedir. Bununla birlikte, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı, püskürtme gecikmesini azaltmaktadır. Bu sonuç, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan yakıt yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak, LPY içeren yakıtların yüksek yoğunluğu püskürtme başlangıcını daha öne almaktadır

[140]. Püskürtme başlangıcının daha öne alınması püskürtülen yakıt taneciklerinin, yanma odasındaki sıcaklıkların kısmen daha düşük olduğu koşullarla karşılaşacağı anlamına gelir. Bu durum ise genellikle tutuşma gecikmesini artırır [139, 141, 142].



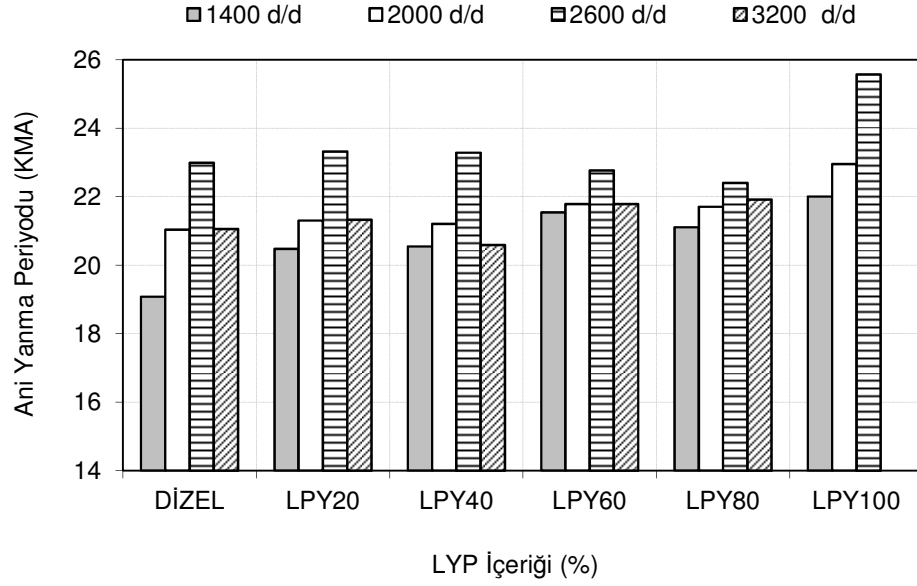
Şekil 6.16. Motor hızının ve LPY içeriğinin püskürtme gecikmesine etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin tutuşma gecikmesine etkisi krank mili açısı cinsinden Şekil 6.17’de verilmiştir. Genel olarak, motor hızı ve test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça tutuşma gecikmesi artış göstermiştir. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışına bağlı olarak artan tutuşma gecikmesi, test yakıtlarının düşük setan sayısı ve yüksek uçuculuk karakteristikleri ile açıklanabilir [73, 135, 139, 142, 143]. LPY içeren test yakıtlarının artan uçuculuğu (düşük parlama noktası) yakıtın yanma odasında buharlaşmasını kolaylaştırırken silindir içi sıcaklıkların düşmesine neden olur ve tutuşma gecikmesini artırır. Ayrıca, LPY içeren yakıtların yüksek yakıt yoğunluğu yakıtın püskürtme başlangıcını bir miktar öne alır. Daha erken püskürtülen yakıt, yanma odasındaki basınç ve sıcaklığın kısmen daha düşük olduğu bir atmosfer ile karşılaşır [140]. İfade edilen bu sebepler, LPY içeren yakıt karışımları ile çalışan motordaki tutuşma gecikmesini artırır.



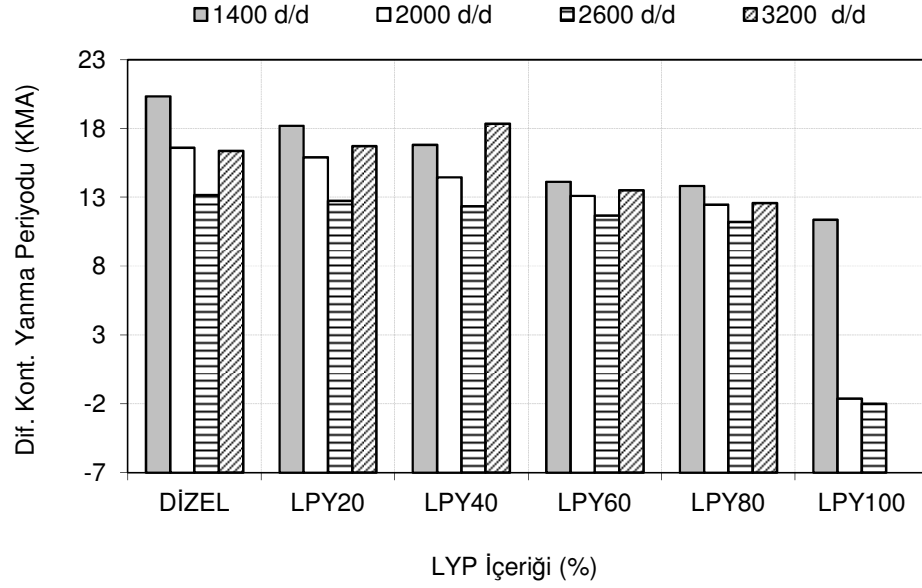
Şekil 6.17. Motor hızının ve LPY içeriğinin tutuşma gecikmesine etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin ani yanma periyoduna etkisi Şekil 6.18’de verilmiştir. Ani yanma periyodu özellikle tutuşma gecikmesinden etkilenir ve NO_x emisyonlarının oluşumunda etkilidir. 1400 d/d ve 2000 d/d motor hızı için, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ani yanma periyodunun uzamasına sebep olmaktadır. 2600 d/d’li motor çalışmasında ise test yakıtlarının LPY içeriğinin %40’a kadar artırılması ani yanma periyodunu önemli ölçüde etkilememiş ancak LPY60 ve LPY80’li motor çalışmasında ani yanma periyodu bir miktar kısalmıştır. Ani yanma periyodundaki artış düşük hızlı motor çalışmaları daha belirgindir. Ayrıca, düşük hızlı motor çalışmaları gözlemlenen ani yanma periyodundaki artış miktarı, yüksek hızlı motor çalışmasına göre daha büyüktür. Ani yanma periyodundaki artış, test yakıtlarının artan LPY içeriğinin bir sonucu olan tutuşma gecikmesinin uzamasından kaynaklanmaktadır [139]. Ayrıca, ani yanma periyodunun artışı, silindirlere püskürtülen yakıtın büyük bir kısmının ani yanma periyodunda yandığının da bir göstergesidir.



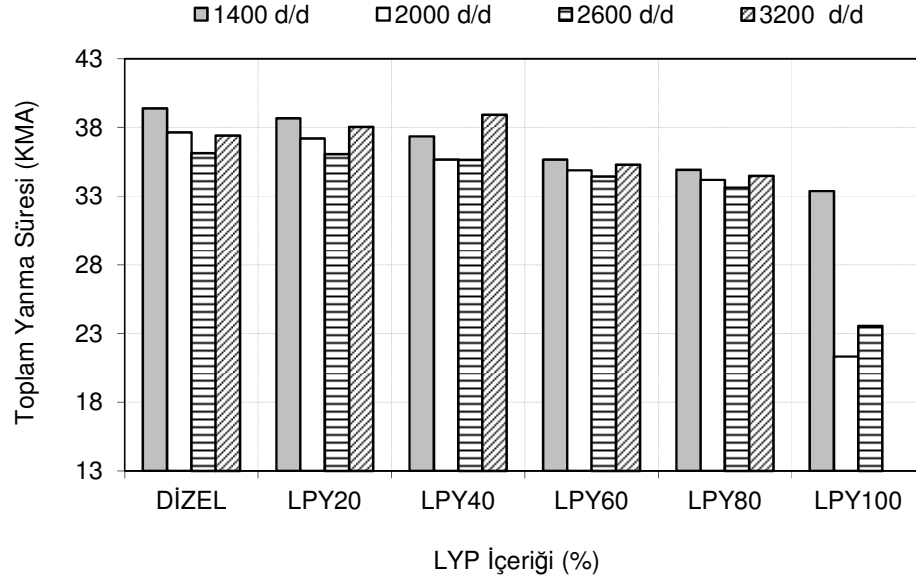
Şekil 6.18. Motor hızının ve LYP içeriğinin ani yanma periyoduna etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LYP içeriğinin difüzyon kontrollü yanma periyoduna etkisi Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Bütün motor hızları için, test yakıtlarının artan LYP içeriği difüzyon kontrollü yanma periyodunu genellikle kısaltmıştır. Azalan difüzyon kontrollü yanma periyodu özellikle is emisyonlarının oluşumu için önemlidir [73-75]. Isı açığa çıkış oranlarının sunulduğu grafikler incelendiğinde, ısı açığa çıkışının bitiş noktası belirli bir motor hızı için yaklaşık aynıdır. Bundan dolayı, toplam yanma periyodu içerisindeki difüzyon kontrollü yanma periyodu ile ani yanma periyodu ters orantılı olarak değişim göstermiştir. Ayrıca, düşük viskoziteli yakıtların difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısalttığı bilinmektedir [144]. Düşük viskoziteli yakıtlar, yanma odasındaki karışım teşkil hızını artırarak difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısaltırlar [145]. LYP içeren test yakıtlarının düşük viskozitesi difüzyon kontrollü yanma periyodunun kısalmasında etkili olmuştur.



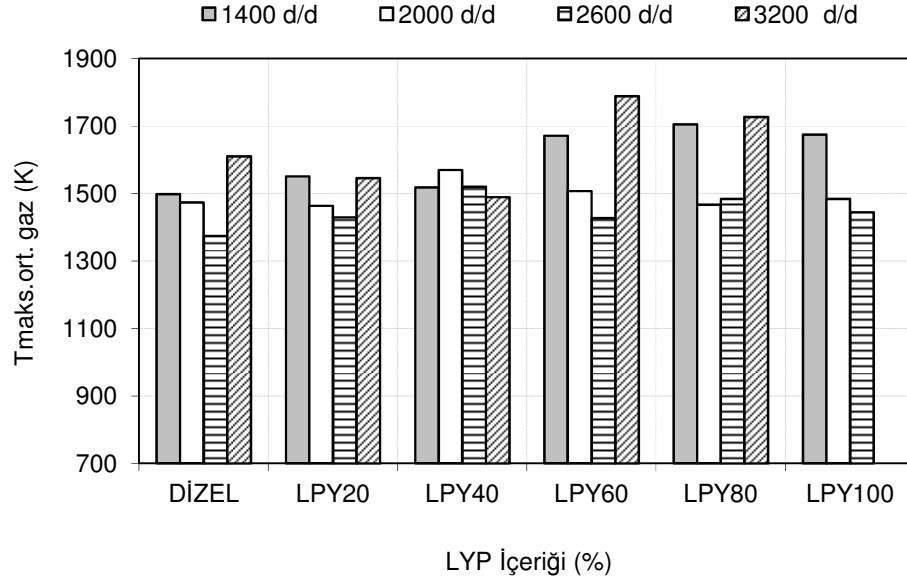
Şekil 6.19. Motor hızının ve LPY içeriğinin difüzyon kontrollü yanma periyoduna etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin toplam yanma süresine etkisi Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Bütün motor hızları için, test yakıtlarının artan LPY içeriği toplam yanma süresini genellikle kısaltmıştır. Isı açığa çıkış oranlarının sunulduğu grafikler incelendiğinde, ısı açığa çıkışının bitiş noktası belirli bir motor hızı için yaklaşık aynı olmasına rağmen ısı açığa çıkışının başlangıcı genişleme stroğuna doğru kaymaktadır. Bundan dolayı, toplam yanma süresi kısaltılmıştır. Ayrıca, düşük setanlı yakıtlar genellikle toplam yanma süresini kısaltırlar [69]. Bundan başka, düşük setan sayısından dolayı tutuşma gecikmesinin artışı ile yanma öncesi biriken yakıt miktarı artar. Tutuşma gecikmesi boyunca biriken yakıtın büyük bir kısmı ani yanma periyodunda yanarak difüzyon kontrollü yanma periyodunu azaltır ve toplam yanma süresini kısaltır [144]. LPY içeren test yakıtları ile elde edilen daha kısa yanma periyodu yukarıdaki sebeplerle ilişkilendirilebilir.

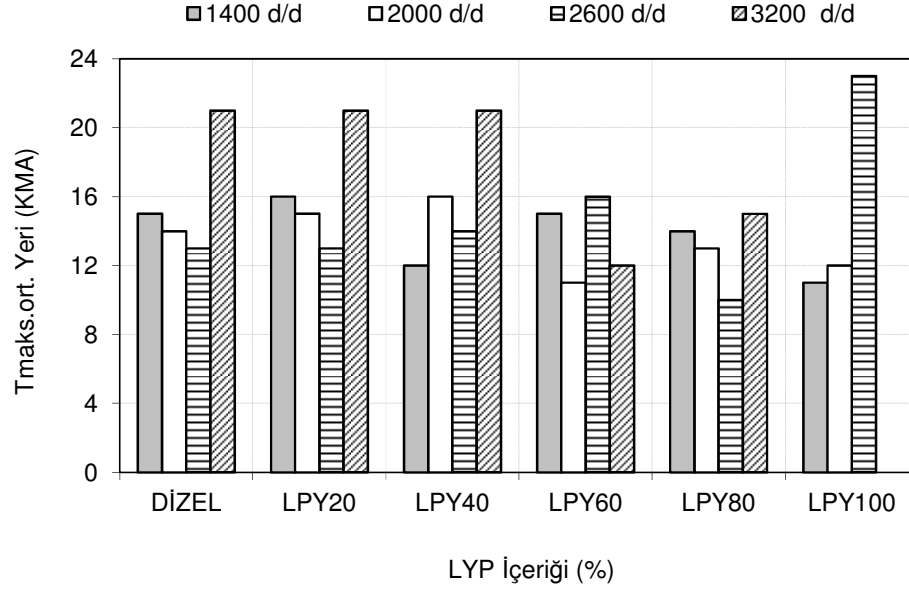


Şekil 6.20. Motor hızının ve LPY içeriğinin toplam yanma süresine etkisi.

Motor hızının ve test yakıtlarının LPY içeriğinin silindir içindeki $T_{maks.ort.gaz}$ ve oluşma yerine etkisi sırası ile Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de verilmiştir. Düşük hızlı motor çalışmasında, test yakıtlarının LPY içeriğini artırmak silindir içindeki $T_{maks.ort.gaz}$ ’ı artırmıştır. Aynı zamanda, test yakıtlarının artan LPY içeriği, silindir içi $T_{maks.ort.gaz}$ ’ın oluşumunu üst ölü noktaya doğru yaklaştırmıştır (Şekil 6.22). 1400 ve 2000 d/d için, yakıtın LPY içeriğini %40 oranına kadar artırmak silindir içindeki $T_{maks.ort.gaz}$ ’ı artırırken test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak $T_{maks.ort.gaz}$ ’ı azaltmaktadır. 3200 d/d için ise, yakıtın LPY içeriğini %40 oranına kadar artırmak silindir içindeki $T_{maks.ort.gaz}$ ’ı azaltmaktadır. Silindir içi $T_{maks.ort.gaz}$, test yakıtlarının tutuşma gecikmesini etkileyen uçuculuk, setan sayısı, aromatik içerik, viskozite gibi özelliklerinden etkilenmektedir. Bununla birlikte bütün motor hızları için, test yakıtlarının artan LPY içeriği özellikle LPY60’tan sonra (LPY100 hariç), silindir içi $T_{maks.ort.gaz}$ ’ın oluştuğu yeri ÜÖN’ya doğru yaklaştırmıştır.



Şekil 6.21. Motor hızının ve LYP içeriğinin Tmaks.ort.gaz'a etkisi.



Şekil 6.22. Motor hızının ve LYP içeriğinin Tmaks.ort.gaz'ın yerine etkisi.

6.2. MOTOR YÜKÜNÜN VE YAKIT PÜSKÜRTME BASINCININ ETKİSİ

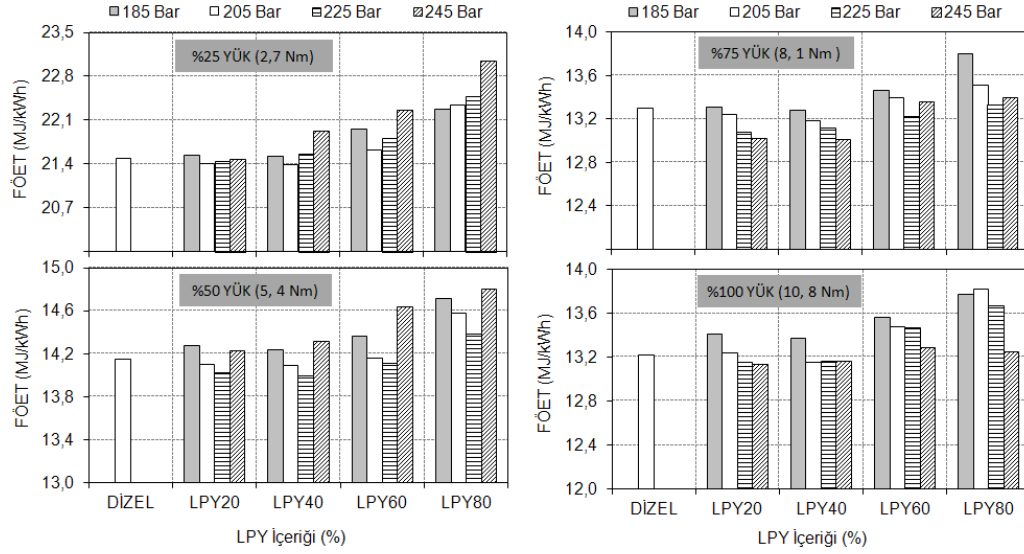
LPY-dizel karışımları ile çalışan dizel motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerinin motor yükü ve yakıt püskürtme basıncı ile değişimini incelemek

amacıyla kısmi yük testleri yapılmıştır. Kısmi yük deneyleri, dizel motorun maksimum güç devrine yakın sabit bir motor hızında (3400 d/d), dört farklı yükte (2,7 Nm (%25 Yük), 5,4 Nm (%50 Yük), 8,1 Nm (%75 Yük) ve 10,8 Nm (%100 Yük)) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her bir yakıt karışımı için dört farklı yakıt püskürtme basıncı (185 bar, 205 bar, 225 bar ve 245 bar) kullanılmıştır. Motorun orijinal püskürtme basıncı 205 bar'dır.

6.2.1. Motor Performansı

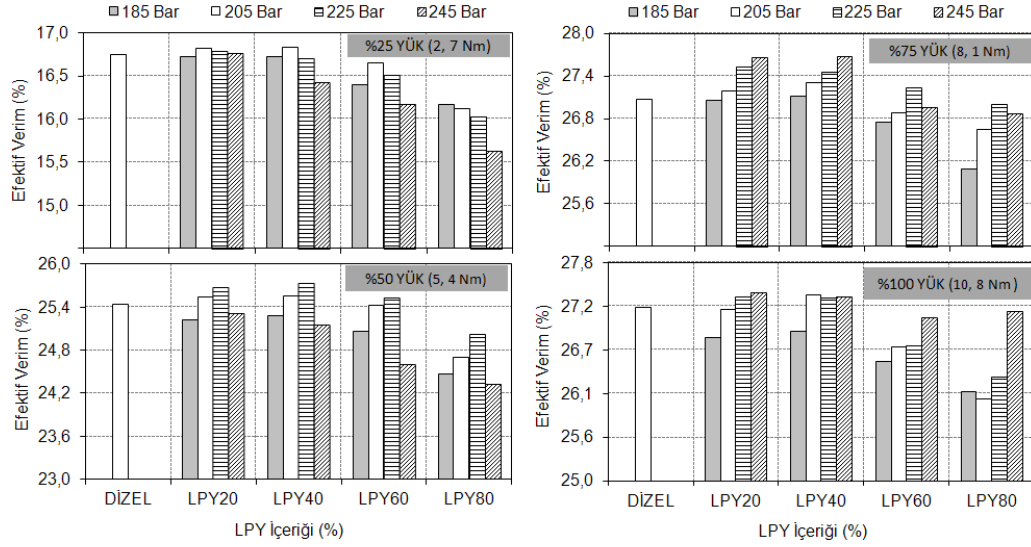
FÖET, efektif verim ve T_{Egzoz} 'dan oluşan motor performans değişkenleri, motor yüküne, test edilen yakıtların LPY içeriğine ve püskürtme basıncına bağlı olarak incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla karışım teşkiline etki eden değişkenlerden birisidir. Enjeksiyon basıncı arttıkça yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülür, hüzmeye hızı ve derinliği artar ve karışım teşkili hızlanır.

Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin FÖET'e etkisi Şekil 6.23'te verilmiştir. Test sonuçları motor yükü ve püskürtme basıncı dikkate alınarak değerlendirildiğinde, dizel yakıtta %40'a varan oranlarda LPY ilavesi motor performansında önemli bir kayıp olmadan kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak, test yakıtlarının LPY içeriğinin daha fazla artması FÖET'nin önemli ölçüde artışına sebep olmuştur. Bu sonuç, LPY içeren test yakıtlarının yoğunluk, viskozite, uçuculuk gibi yakıt özellikleri ile ilişkilendirilebilir [59, 66, 134]. Bununla birlikte, püskürtme basıncı 185 bar ve 245 bar iken özellikle düşük motor yüklerinde özgül enerji tüketimi artmıştır. Ancak, yüksek motor yüklerinde ise artan püskürtme basıncı özgül enerji tüketimini iyileştirmiştir. Yüksek motor yüklerinde artan püskürtme basıncı ile iyileşen özgül enerji tüketimi, artan püskürtme hızı ve karışım teşkili ve motor yükünün artışıyla artan silindir içi sıcaklıklar ile ilişkilendirilebilir [146]. Çünkü, yüksek püskürtme basıncı ile sağlanan atomizasyon kalitesi yanma odasındaki yakıt-hava karışımının etkili bir şekilde kullanımını artırır ve yanmanın iyileşmesini sağlar. Genel olarak test edilen bütün yakıt türlerinin optimum püskürtme basıncı, %25 yük ve %50 yük koşullarında sırası ile 205 bar ve 225 bar, daha yüksek yük koşullarında ise 245 bar olarak tespit edilmiştir.



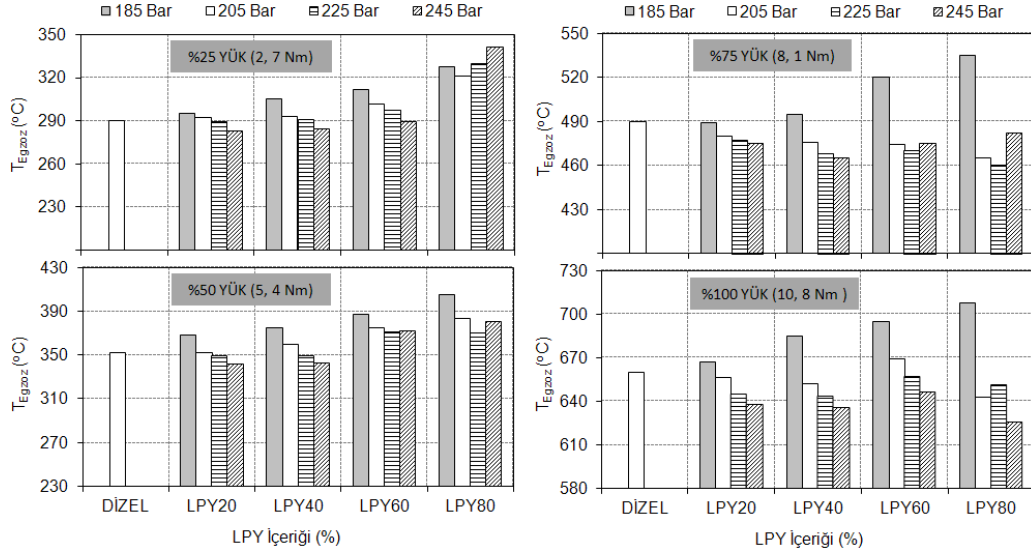
Şekil 6.23. Motor yükünün ve püskürtme basıncının FÖET'e etkisi.

Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin efektif verime etkisi Şekil 6.24'te verilmiştir. Test sonuçları, motor yükü ve püskürtme basıncı dikkate alınarak değerlendirildiğinde, motorun yakıt sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın LPY40'a kadar kullanımının efektif verimi artırdığı görülmüştür. Bu sonuç, LPY yakıtlarının düşük viskozite ve yüksek uçuculuğundan dolayı yanma odasındaki karışım teşkilinin iyileşmesinden kaynaklanmaktadır [66,147]. Test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak efektif verimde azalmaya sebep olmuştur. Bunun en önemli nedenlerinden biri art yanma periyodu boyunca açığa çıkan enerjinin işe dönüştürülememesidir [148]. Bununla birlikte düşük yüklü motor çalışmasında LPY içeren yakıtların püskürtme basıncının 205 bar'dan daha fazla artırılması efektif verimi azaltırken, orta ve tam yüklü motor çalışmalarında efektif verim artış göstermiştir. Düşük yüklü motor çalışmasında, püskürtme basıncının artışı yanma odasına püskürtülen yakıt miktarını artırır ve efektif verimi düşürür [112]. Bundan başka düşük yüklü motor çalışma koşullarında, yüksek püskürtme basıncı ile huzme derinliği artar ve silindir cidarlarına çarparak karışım teşkilini ve yanmayı düzensiz hale getirir. LPY içeren test yakıtları için, motor yükünün artışı ile artan silindir içi sıcaklıkları, püskürtme basıncının artışı ile sağlanan daha iyi karışım teşkili efektif verimi artırmaktadır.



Şekil 6.24. Motor yükünün ve püskürtme basıncının efektif verime etkisi.

Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin T_{Egzoz} 'a etkisi Şekil 6.25'te verilmiştir. Düşük yüklü motor çalışmasında test yakıtlarının LPY içeriğinin artırılması T_{Egzoz} 'u artırırken, yüksek yüklü motor çalışmasında genel olarak T_{Egzoz} düşüş göstermiştir. Bu sonuç, yakıtların uçuculuk ve düşük viskozite özellikleri ile ilişkilendirilebilir [134]. Çünkü, düşük yüklü motor çalışmasında karışım teşkili yavaşlar. Bununla birlikte motorun bütün yük koşullarında, püskürtme basıncını artırmak T_{Egzoz} 'u azaltmıştır. Azalan püskürtme basıncı ile karışım teşkili ve dolayısı ile yanma yavaşlar. Bu durum, düşük püskürtme basınçlarında T_{Egzoz} 'un artışına sebep olur [149].

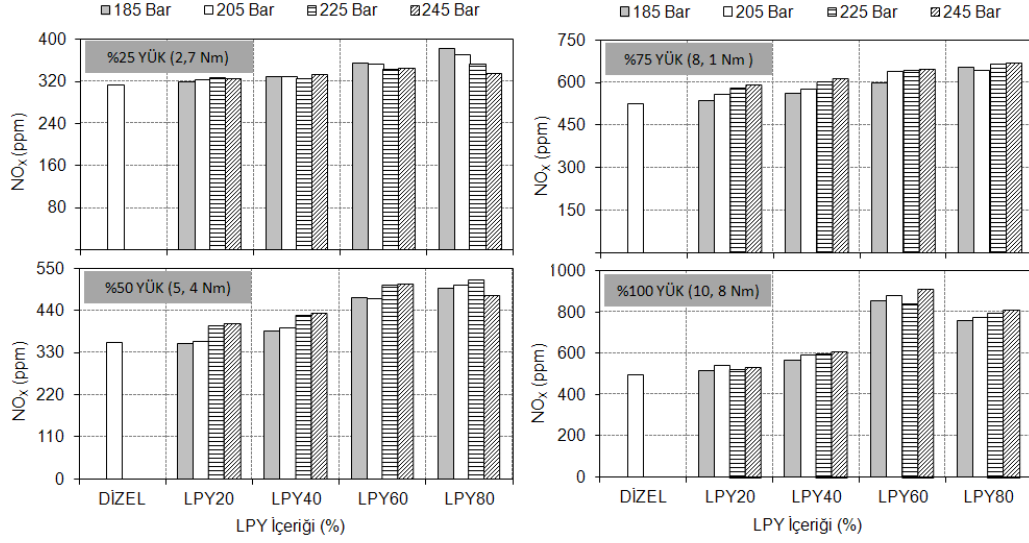


Şekil 6.25. Motor yükünün ve püskürtme basıncının T_{Egzoz} 'a etkisi.

6.2.2. Egzoz Emisyonları

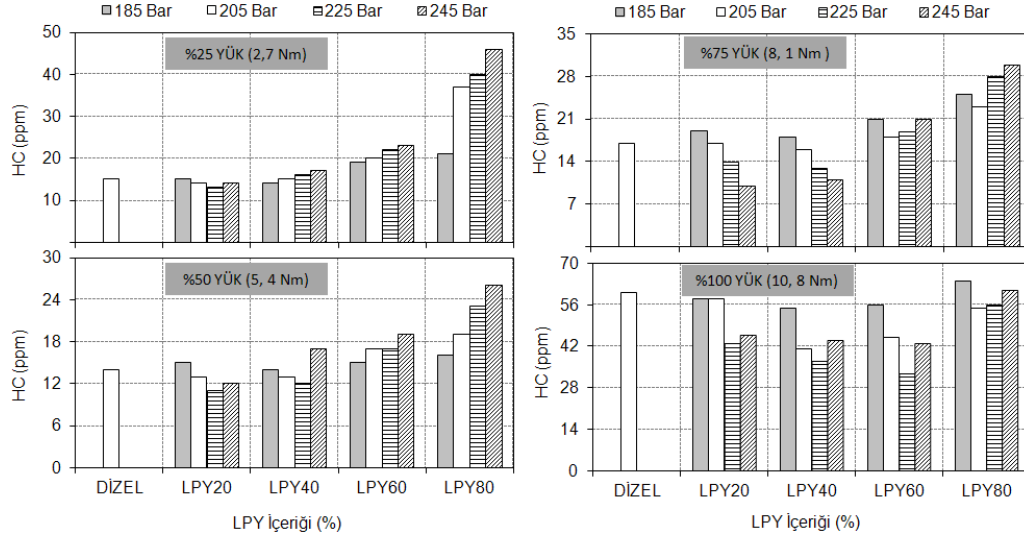
NO_x , HC, CO ve is emisyonlarından oluşan egzoz emisyon değişkenleri, motor yüküne, test edilen yakıtların LPY içeriğine ve püskürtme basıncına bağlı olarak incelenmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Farklı motor yüklerinde, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin NO_x emisyonlarına etkisi Şekil 6.26'da verilmiştir. Test sonuçları, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile NO_x emisyonlarının arttığını göstermektedir. Genellikle yüksek yoğunluğa sahip yakıtlar, yanma odasındaki yakıt miktarını artırarak NO_x emisyonlarının artışına sebep olabilir. Bunun yanında, yakıtın yüksek aromatik içeriği adyabatik alev sıcaklığını artırarak NO_x emisyonlarının oluşumuna katkı sağlar [137]. LPY içeren test yakıtlarının yoğunluğunun ve aromatik içeriğinin yüksek olması NO_x emisyonlarının artışında etkili olmuştur. Artan püskürtme basıncı ve yakıtın artan LPY içeriği ile birlikte NO_x emisyonları da artış göstermiştir. Artan püskürtme basıncı, yanma odasında daha iyi bir karışım teşkili ve yanma sağladığından yanma odası sıcaklıkları ve NO_x emisyonları artar [146, 150].



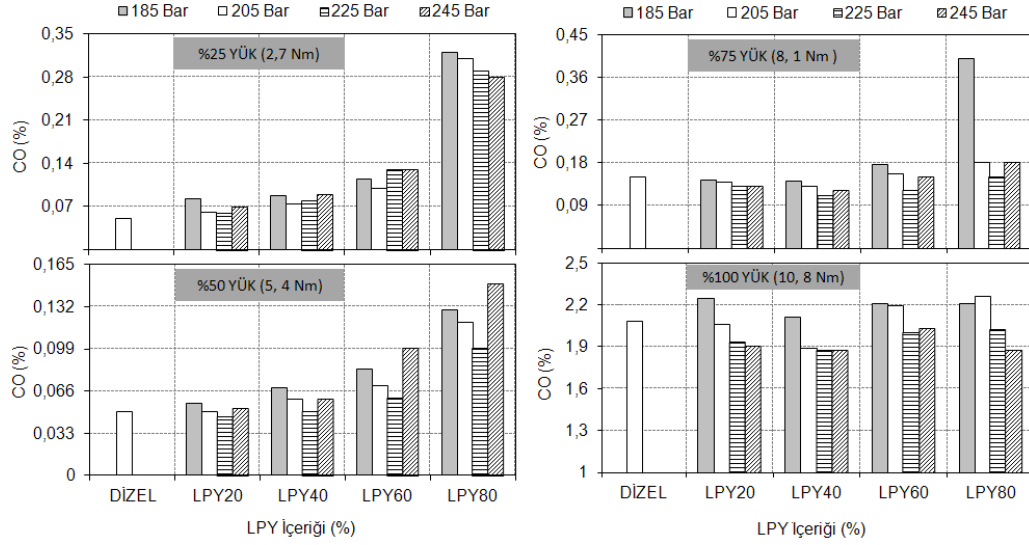
Şekil 6.26. Motor yükünün ve püskürtme basıncının NO_x emisyonlarına etkisi.

Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin HC emisyonlarına etkisi Şekil 6.27’de verilmiştir. Test yakıtlarının LPY içeriğinin %40’a kadar artırılması bütün yük durumlarında HC emisyonlarını iyileştirmektedir. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile birlikte yakıt viskozitesi azalmış ve uçuculuğu artmıştır. Düşük viskoziteli LPY yakıt karışımları, tutuşma gecikmesi periyodunca hava ile yakıtın iyi karışmasını ve dolayısı ile HC emisyonlarının azalmasını sağlamıştır. Ancak, daha uçucu LPY yakıt karışımları tutuşma gecikmesi periyodu boyunca yanma odasından daha fazla ısı çektiklerinden dolayı yanma odasında soğutma etkisi oluştururlar ve HC emisyonlarını artırırlar [135]. Bundan başka, LPY yakıtlarının yüksek atık karbon içeriği özellikle LPY60’dan sonra yanmayı güçleştirmesinden dolayı HC emisyonları artmıştır [67]. LPY içeriğinin artışı ile birlikte artan yakıt yoğunluğu karışımı zenginleştirmekte ve HC emisyonlarını artırmaktadır. Ayrıca, aromatik içeriği yüksek yakıtların HC emisyonlarını artırdığı bilinmektedir [56]. Püskürtme basıncının artışı ise düşük ve yüksek yüklerde farklı etkiler göstermektedir. Ancak yüksek oranlardaki LPY içeriğine sahip yakıtlar ile yapılan testlerde püskürtme basıncının artışı HC emisyonlarını artırmıştır. Yüksek oranlarda LPY içeren test yakıtlarının düşük viskozitesi ve artan püskürtme basıncı püskürtülen yakıtın daha küçük taneciklere ayrışmasına yardım eder. Daha küçük yakıt tanecikleri ise yanma odasında daha derinlere ulaşamaz ve karışım teşkili zayıflar. Bu durum eksik yanmaya sebep olur ve HC emisyonlarını artırır.



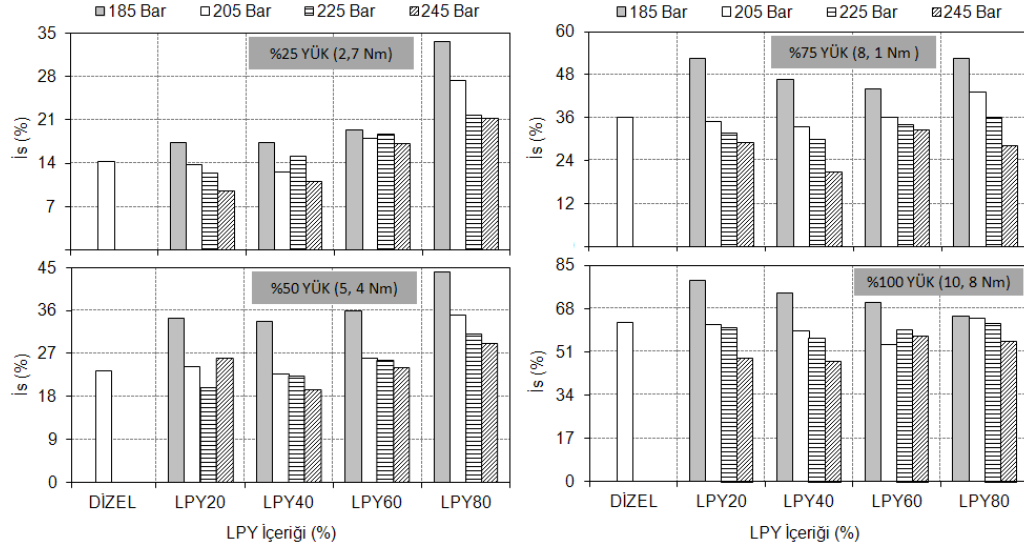
Şekil 6.27. Motor yükünün ve püskürtme basıncının HC emisyonlarına etkisi.

Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin CO emisyonlarına etkisi Şekil 6.28’de verilmiştir. Şekil 6.28’de görüldüğü gibi, yakıtların LPY içeriğinin artışı düşük ve yüksek yüklerde farklı etkiler göstermektedir. %25 ve %50 motor yüklerinde orijinal püskürtme basıncında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artırılması CO emisyonlarını artırmıştır. Motor yükü daha fazla artırıldığında, test yakıtlarının LPY içeriğini %40’a kadar artırmak CO emisyonlarını azaltmıştır. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile birlikte yakıt viskozitesi azalmış ve uçuculuğu artmıştır. Bu durum, yüksek motor yükleri için hava ile yakıtın tutuşma gecikmesi periyodunca iyi karışmasını ve dolayısı ile CO emisyonlarının azalmasını sağlamıştır [135]. Düşük motor yüklerinde, azalan silindir içi sıcaklıkları CO emisyonlarının oksidasyonunu yavaşlatmıştır. Diğer taraftan, yüksek uçuculuğa sahip LPY yakıtlarının yanma odasındaki soğutma etkisi, yanma odasındaki sıcaklıkları düşürerek CO emisyonlarının oluşumunu artırmaktadır. Bununla birlikte özellikle LPY40 yakıtı, CO emisyonları açısından dizel yakıtı ile bütün yük durumları için karşılaştırılabilir sonuçlar ortaya koymuştur. Püskürtme basıncının artışı ise neredeyse bütün yakıt türlerinde CO emisyonlarını azaltmıştır. Püskürtme basıncının artışı ile iyileşen karışım teşkili özellikle yüksek motor yüklerinde silindir içi sıcaklıklarında artmasıyla CO emisyonlarının oksidasyonunu iyileştirmiştir.



Şekil 6.28. Motor yükünün ve püskürtme basıncının CO emisyonlarına etkisi.

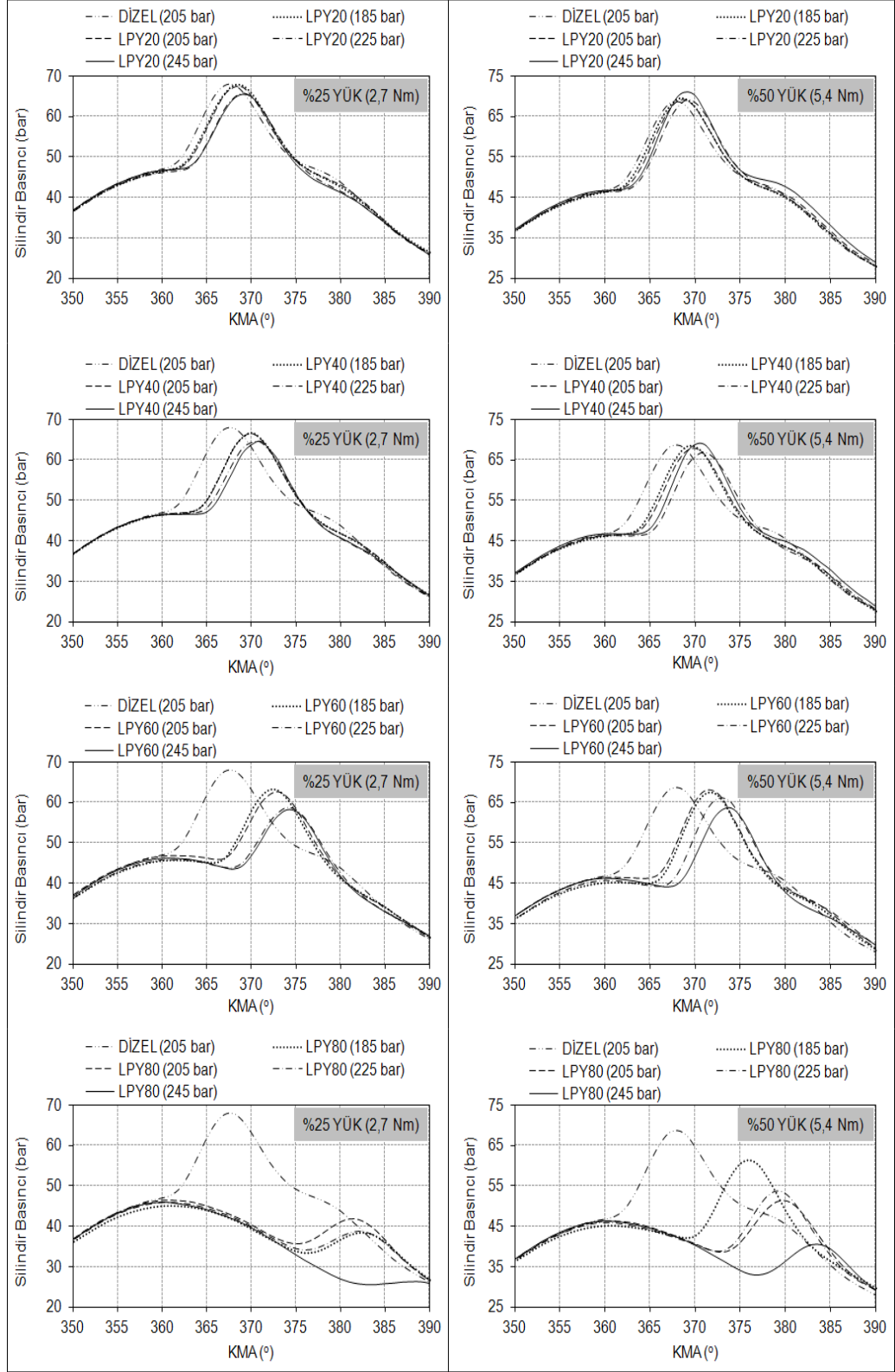
Farklı motor yük durumlarında, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin is emisyonlarına etkisi Şekil 6.29’da verilmiştir. İS emisyonlarının oluşumu, bölgesel sıcaklıklardan ve lokal hava/yakıt oranının dağılım aralığından etkilenen difüzyon kontrollü yanma periyodundaki oksidasyon hızına bağlıdır [73]. İS emisyonlarının oluşumu için yüksek yanma odası sıcaklıkları ve yakıtca zengin çevresel şartlar gereklidir. Şekil 6.29’da görüldüğü gibi orijinal püskürtme basıncındaki (205 bar) bütün yük durumlarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin %40’a kadar artırılması is emisyonlarını bir miktar azaltmıştır. Test yakıtları içerisindeki LPY içeriğinin daha fazla artırılması is emisyonlarını artırırken, yük artışı ile birlikte is emisyonlarının artışı yavaşlamıştır. Genellikle test yakıtların artan aromatik içeriği ve kükürt miktarı is emisyonlarının artışına yardım eder [78]. Düşük viskoziteli ve yüksek uçuculuğa sahip yakıtlar ise yanma odasındaki karışım teşkilini iyileştirirken is emisyonlarını da azaltırlar. Bununla birlikte, is emisyonlarının azalmasındaki diğer bir etken LPY yakıtlarının setan sayısının düşük olmasıdır. Düşük setan sayılı yakıtlar genellikle difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısaltırlar ve daha az is emisyonu üretirler [32, 74, 75]. LPY içeren test yakıtlarının püskürtme basıncının artırılması, is emisyonlarının azaltılması açısından olumlu bir etki sağlamıştır. Püskürtme basıncının artışı ile iyileşen atomizasyon ve karışım teşkili yanmayı iyileştirerek is emisyonlarını azaltmaktadır [146].



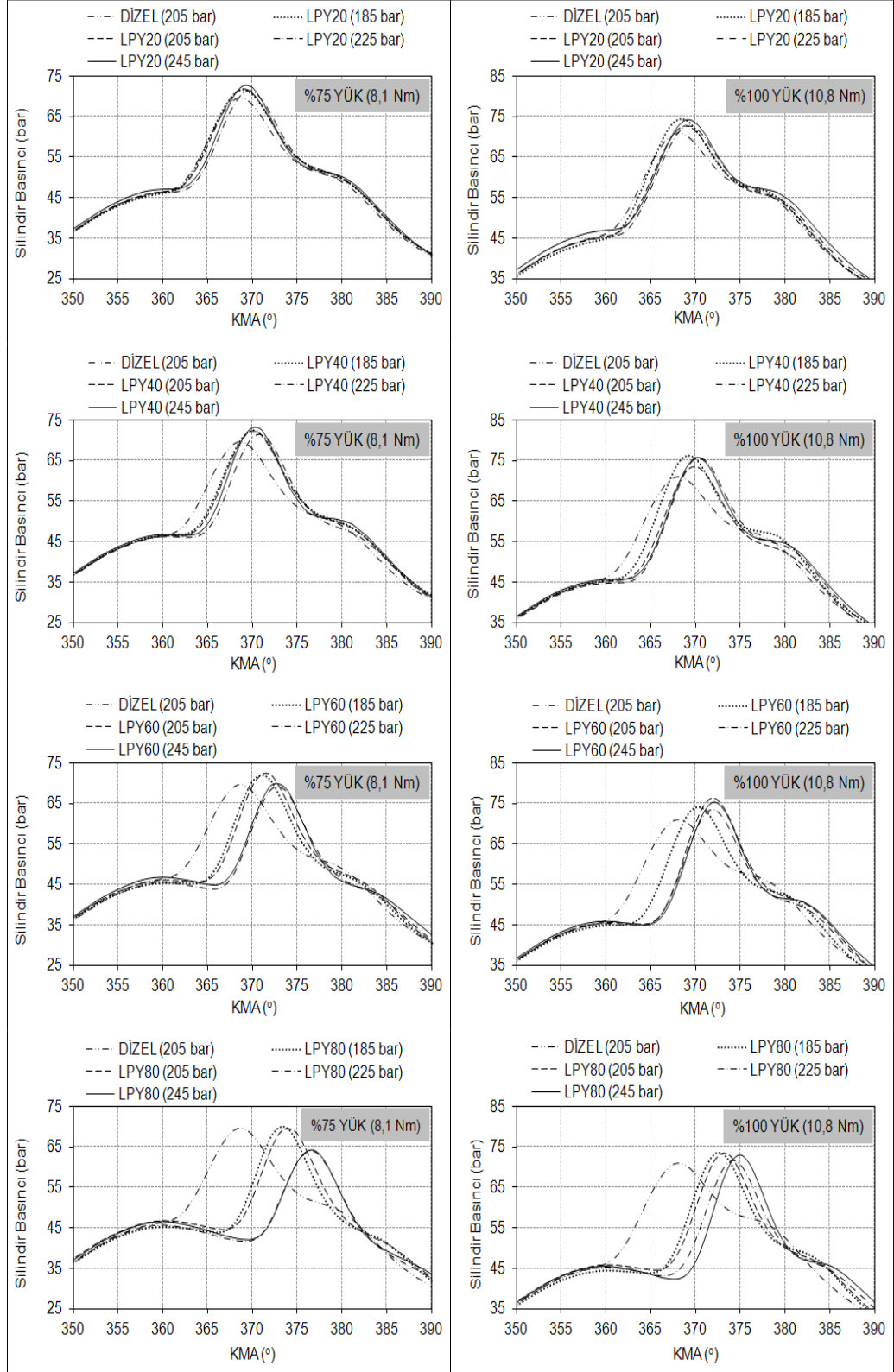
Şekil 6.29. Motor yükünün ve püskürtme basıncının is emisyonlarına etkisi.

6.2.3. Yanma Karakteristikleri

Test edilen farklı karışım oranlarındaki yakıtlar için, %25, %50, %75 ve %100 yüklü motor çalışması için ölçülen silindir içi basınçları püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de verilmiştir. Genel olarak test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça, yanma basıncının oluşumu gecikmektedir. Ayrıca, yakıt püskürtme basıncının artışı ve yakıtın dinamik püskürtme zamanının gecikmesi yanma basıncının oluşumunu ötelemiştir. Bu durum özellikle yüksek oranda LPY içeren test yakıtlarında daha belirgindir. %25 ve %50 yüklü motor çalışmasında yüksek orandaki LPY içerikli yakıtlar için, püskürtme basıncının artırılması silindir basıncının oluşumunu güçleştirmektedir. Motor yükünün artırılması yüksek oranda LPY içeren test yakıtlarına ait silindir basınçlarının oluşumunu iyileştirmiştir. Bu durum, artan motor yükü ile artan silindir içi sıcaklıkları ile ilişkilendirilebilir. Yüksek oranda LPY içeren test yakıtları ile çalışan dizel motorun özellikle düşük setan sayısından ve yüksek uçuculuğundan kaynaklanan tutuşma gecikmesindeki aşırı artış, silindir basınçlarının etkin şekilde oluşumunu kısıtlamaktadır.

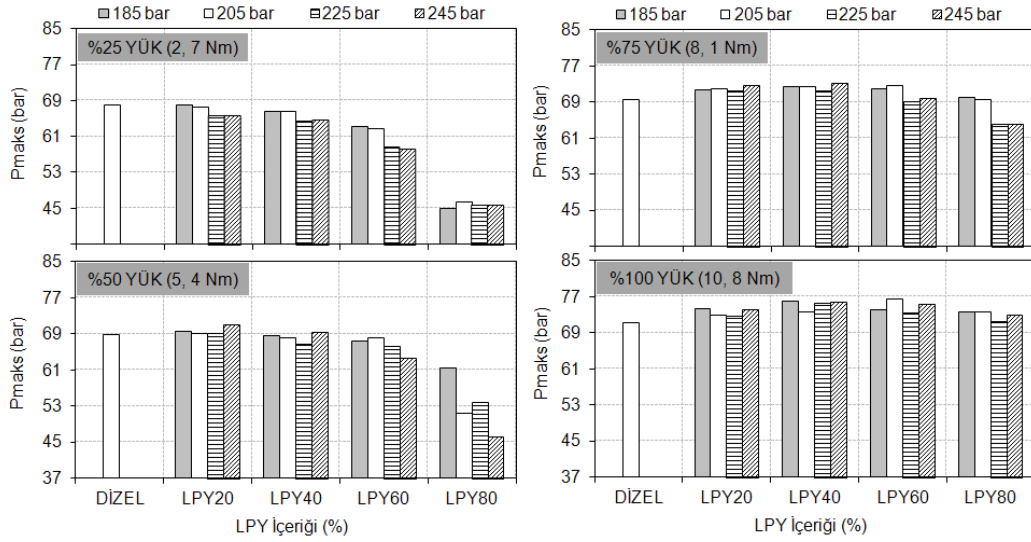


Şekil 6.30. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi (%25 ve %50 Yük).



Şekil 6.31. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin silindir basıncına etkisi (%75 ve %100 Yük).

Farklı yüklerdeki motor çalışması için Pmaks'ın değişimi yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak Şekil 6.32'de verilmiştir. Pmaks büyük oranda tutuşma gecikmesi boyunca püskürtülen yakıt miktarı ile ilgilidir [73]. Düşük setanlı yakıtlar, tutuşma gecikmesi boyunca püskürtülen yakıt miktarını artırarak yüksek İÇÖ'ya ve Pmaks'ın artışına sebep olurlar. Genel olarak, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı düşük ve yüksek motor yüklerinde farklı sonuçlar göstermiştir. Bu durum, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

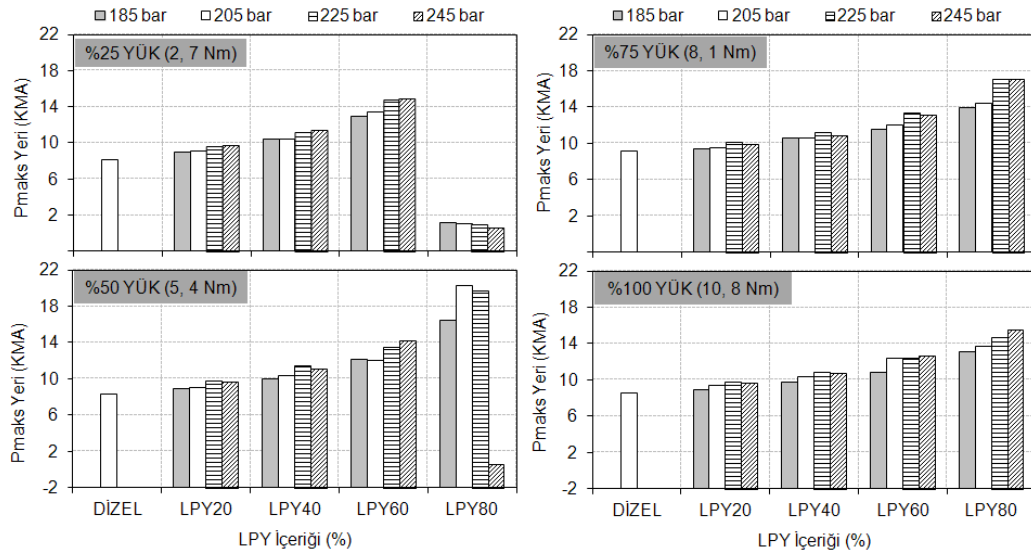


Şekil 6.32. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin Pmaks'a etkisi.

Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı %25 yüklü motor çalışmasında Pmaks değerini azaltırken, daha yüksek yüklerde Pmaks'ın değerini artırmıştır. Düşük yüklü motor çalışmasında, test yakıtlarının artan LPY içeriği ile azalan Pmaks değerleri, düşük yüklerde yanma odasındaki hava hareketlerinin zayıf ve sıcaklıkların düşük olması ile ilişkilendirilebilir [73]. Ayrıca, daha uçucu LPY yakıtları yanma odasında özellikle düşük motor yüklerinde daha fazla ısı çekerler. Motor yükünün artışı ile birlikte test yakıtlarının artan LPY içeriği yanma odasına kütleli olarak daha fazla yakıt sağlar ve maksimum silindir içi sıcaklıkların ve Pmaks'ın artışına sebep olur. Bundan başka, motor yükünün artışı ile artan yanma odası sıcaklıkları LPY içeren test yakıtlarının yanma odasındaki soğutma etkisinin sebep olduğu olumsuzlukları azaltır (tutuşma gecikmesinin aşırı artışı gibi). Ayrıca, yüksek oranda LPY içeren test yakıtları (özellikle LPY80) bütün yük durumlarında Pmaks'ın değerini düşürmüştür.

Bu sonuç, yüksek oranda LPY içeren test yakıtlarının aşırı tutuşma gecikmesinden dolayı yanmanın etkinliğini azaltması ile açıklanabilir. Pmaks, özellikle yüksek oranda LPY içeren test yakıtları için düşük püskürtme basınçlarında genellikle artış gösterirken yüksek püskürtme basınçlarında azalmıştır. Püskürtme basıncının artışı, yanma odasındaki yakıt hüzmesinin aşırı ilerlemesine ve dolayısı ile yanma odası cidarlarına temas eden eksik yanma ürünlerinin artışına sebep olabilir. Eksik yanma ürünleri ise etkili bir şekilde yanma odasındaki reaksiyona katılmadığından Pmaks'ın düşmesine neden olur [146]. Diğer bir neden ise püskürtme basıncının artışı ile azalan tutuşma gecikmesidir. Çünkü azalan tutuşma gecikmesi genellikle Pmaks'ın azalmasına sebep olur. [32, 147]. En düşük Pmaks değeri ise genellikle püskürtme basıncının 245 bar olduğu şartlarda elde edilmiştir.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için Pmaks'ın oluştuğu yerin değişimi yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak Şekil 6.33'te verilmiştir. Bütün yük durumlarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı Pmaks'ın oluştuğu yeri geciktirmiştir. Yakıt püskürtme basıncının artırılması da aynı etkiyi göstermiştir.

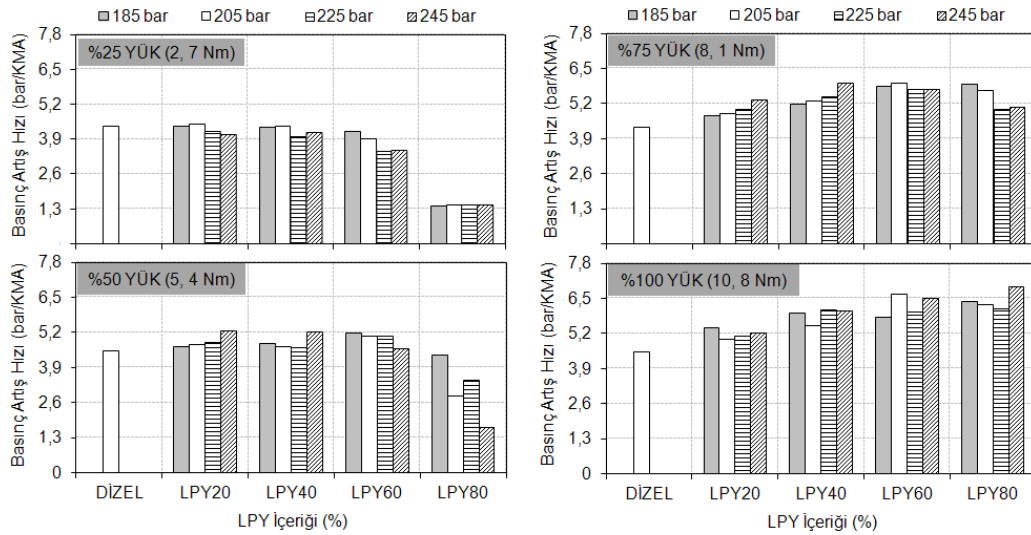


Şekil 6.33. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin Pmaks'ın yerine etkisi.

LPY içeren test yakıtlarının düşük setan sayısı ve yüksek uçuculuk özelliğinden dolayı ötelenen yanmanın başlangıç yeri, Pmaks'ın yerini de öteleyerek genişleme

zamanının sonuna doğru yaklaştırmıştır. LPY80 için, %25 motor yükünde yanmanın etkin bir şekilde oluşmamasından dolayı, Pmaks motorun sıkıştırma basıncının olduğu üst ölü noktada oluşmuştur. Püskürtme basıncının artışı, yakıt püskürtme zamanını geciktirdiğinden, Pmaks'ın yerini de ötelemiştir. Bu durum, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de de görülmektedir.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için basınç artış hızının değişimi Şekil 6.34'de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak verilmiştir. Düşük motor yüklerinde (özellikle %25 yük için) test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı basınç artış hızını azaltmıştır. %75 ve %100 yüklü motor çalışması için ise test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı basınç artış hızını artırmıştır.

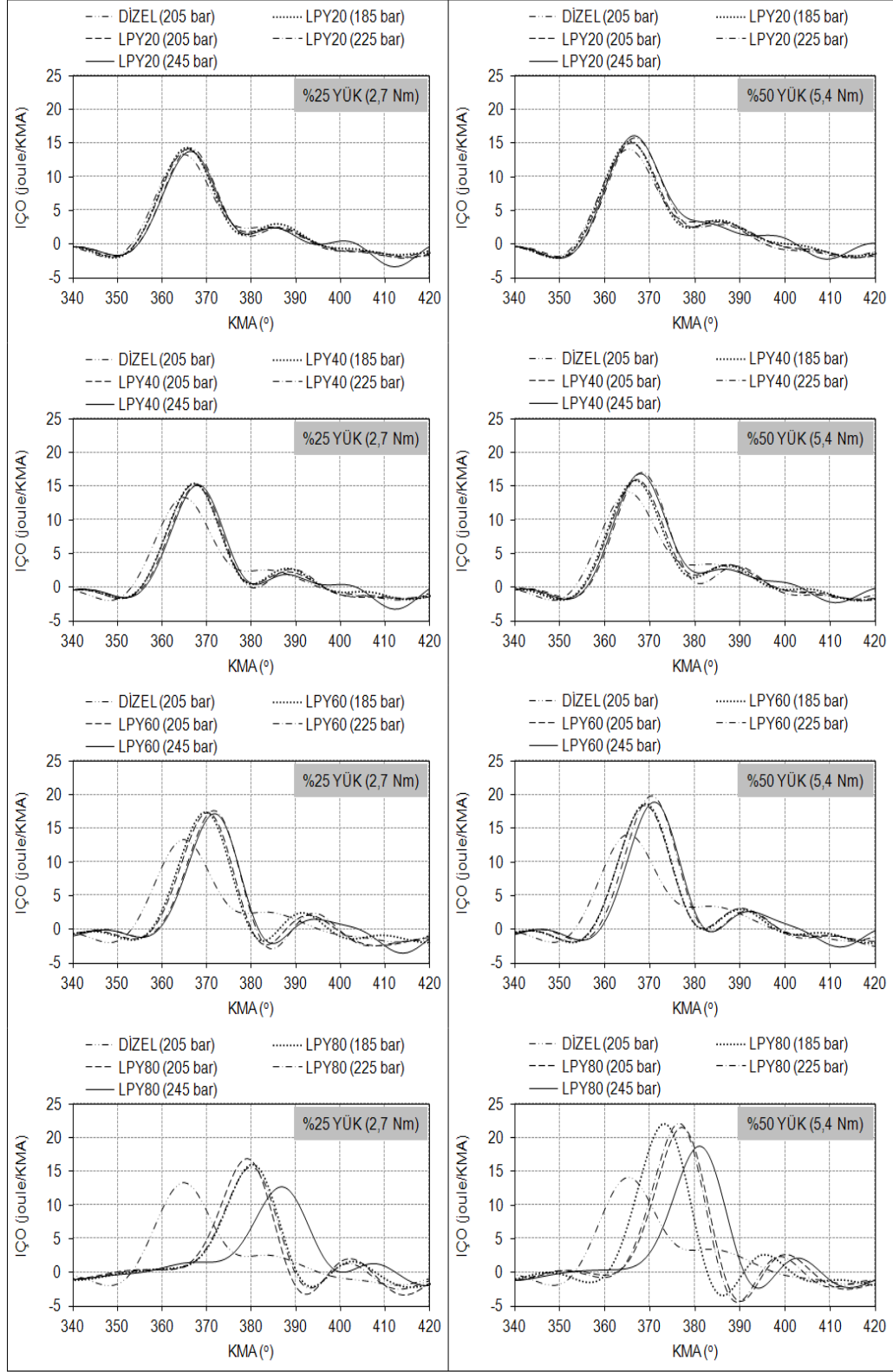


Şekil 6.34. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin basınç artış hızına etkisi.

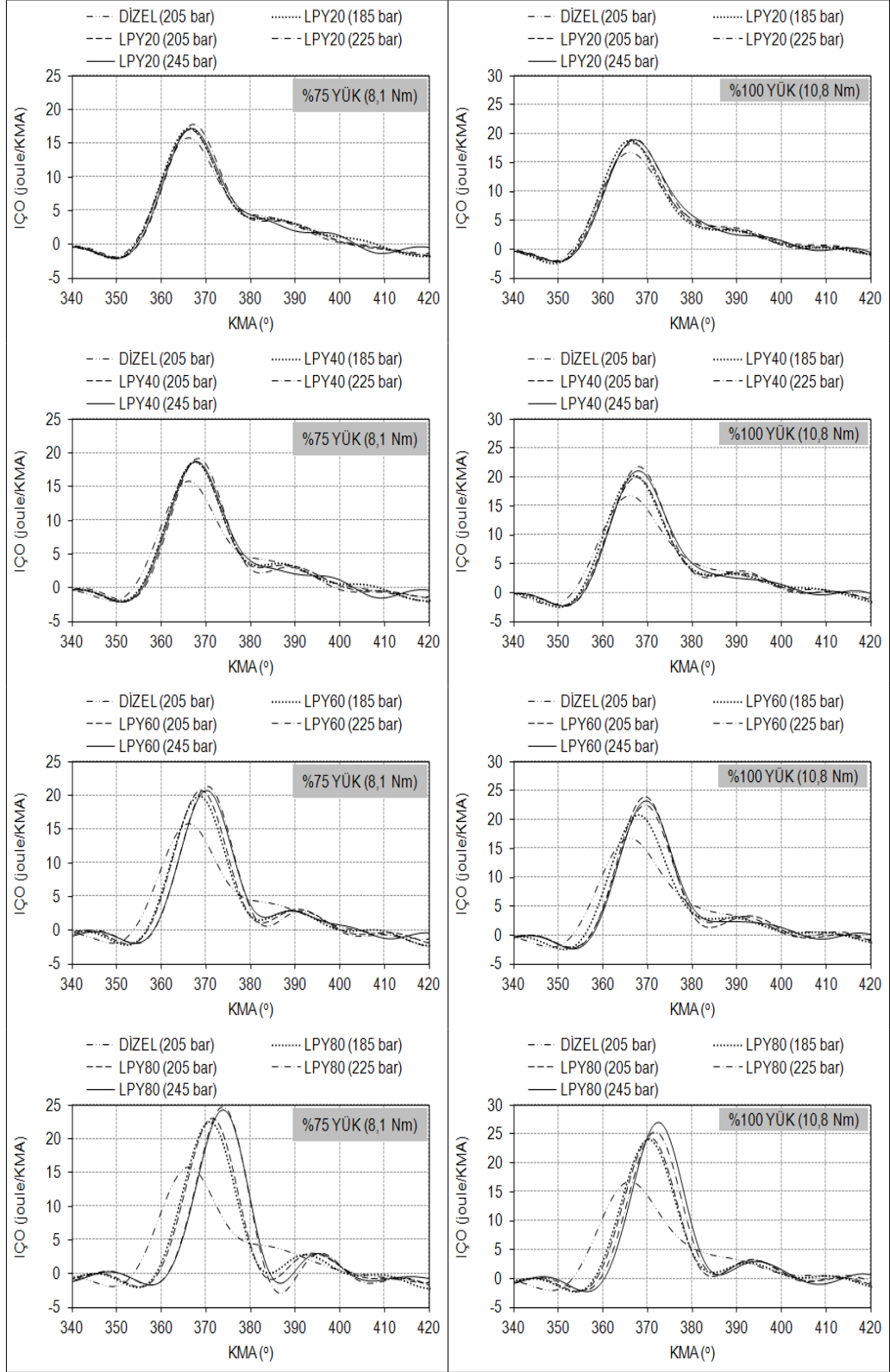
LPY içeren test yakıtlarının düşük setan sayısı ve yüksek yoğunluğu basınç artış hızının artışına sebep olmuştur. Motor yükünün artışı ile artan basınç artış hızı, LPY içeren test yakıtlarının yüksek yakıt yoğunluğundan dolayı silindir içine püskürtülen yakıt miktarının artışı ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte özellikle yüksek yüklü motor çalışmasında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan basınç artış hızı, artan tutuşma gecikmesi ile de ilişkilendirilebilir. Çünkü, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan tutuşma gecikmesi periyodunda biriken püskürtülmüş haldeki yakıt ani ve kontrolsüz bir şekilde ani yanma periyodu boyunca yanarak

yanma odasındaki silindir basıncını ve basınç artış hızını önemli ölçüde artırır [150]. Ancak düşük yüklü motor çalışmasında, yüksek oranda LPY içeren test yakıtlarının tutuşma gecikmesini aşırı uzatması sonucu basınç artış hızı düşer. Yakıt püskürtme basıncının artırılması farklı motor yüklerinde farklı sonuçlar göstermiştir. Düşük yüklü motor çalışmasında, test yakıtlarının artan LPY içeriği ile birlikte artan yakıt püskürtme basıncı, basınç artış hızını azaltırken yüksek motor yüklerinde genellikle basınç artış hızını artırmıştır.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için İÇO'nun değişimi Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Bütün motor yüklerinde, test yakıtlarının artan LPY içeriği ile birlikte ısı açığa çıkışının başlaması gecikmektedir. LPY içeren test yakıtlarının artan uçuculuğu ve azalan setan sayısı, yakıtın tutuşmaya başladığı noktayı ötelemektedir. Çünkü daha uçucu yakıtlar, buharlaşırken yanma odasından daha fazla ısı çekerler ve tutuşmanın başlamasını geciktirirler [139]. Artan motor yükü ise yanma odasındaki sıcaklıkları artırdığından, ısı açığa çıkışının başlangıç noktasını bir miktar öne almıştır. Ancak dizel yakıtlı çalışma ile karşılaştırıldığında, LPY içeren test yakıtlarının ısı açığa çıkışının başlangıç noktası daha geç oluşmuştur. Bununla birlikte, LPY içeren test yakıtlarının püskürtme basıncı artırıldığında İÇO'nun oluşması daha da gecikmektedir. Bu durum, artan püskürtme basıncı ile bir miktar geciken püskürtme zamanlamasının bir sonucudur. Püskürtme basıncının azalması, dinamik avansı bir miktar öne aldığından İÇO'yu daha önce başlatmıştır. Diğer bir ifade ile püskürtme basıncı artırılan LPY içerikli yakıtlar bir miktar gecikme ile yanma odasına püskürtülürler ve ısı açığa çıkışı gecikir [74]. Bütün yük durumlarında, LPY20 ve LPY40 test yakıtları dizel yakıt ile karşılaştırılabilir düzeyde İÇO göstermiştir.

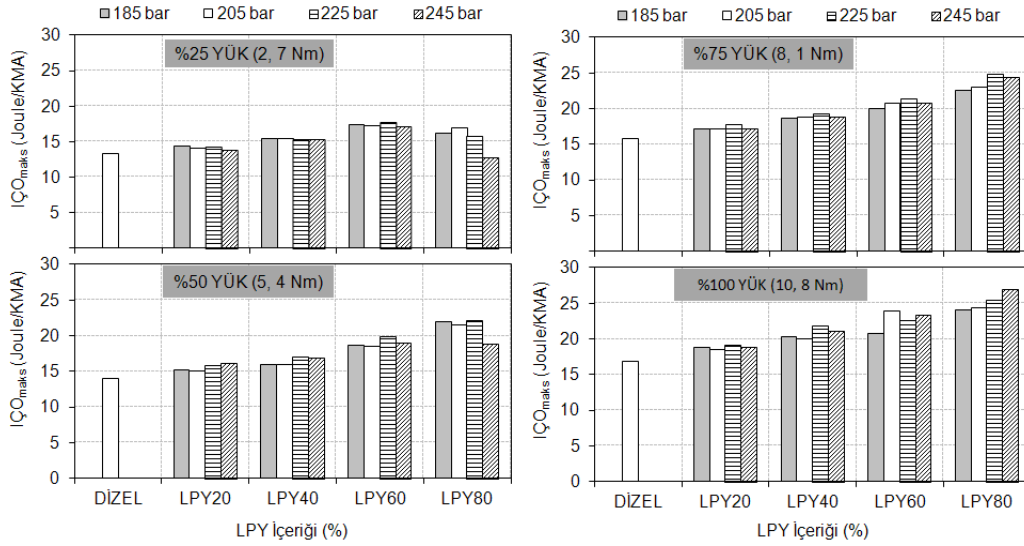


Şekil 6.35. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin IÇO'ya etkisi (%25 ve %50 Yük).



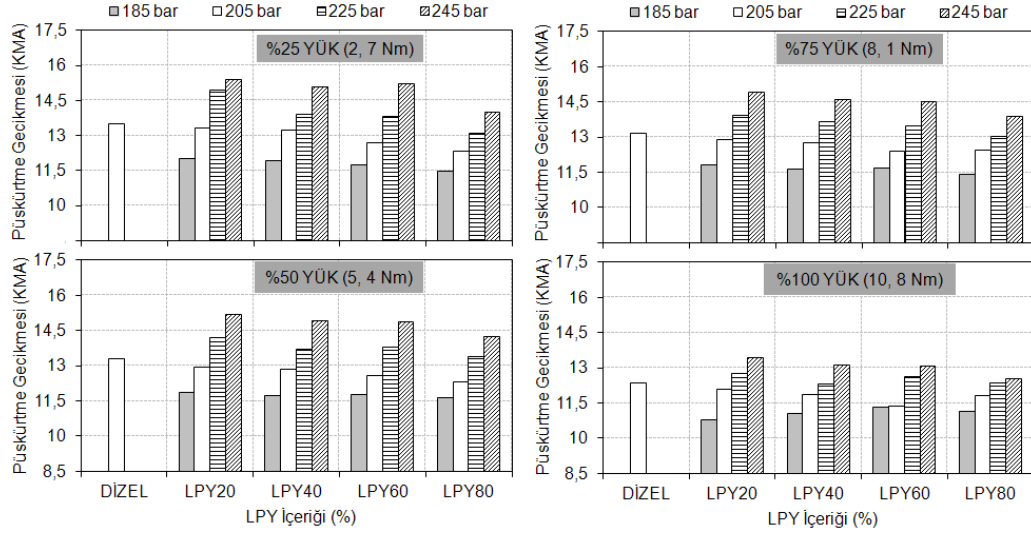
Şekil 6.36. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin IÇO'ya etkisi (%75 ve %100 Yük).

Farklı yüklerdeki motor çalışması için $I\dot{C}O_{maks}$ 'nin maksimum değerinin ($I\dot{C}O_{maks}$) değişimi Şekil 6.37'de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Bütün motor yüklerinde, test yakıtlarının artan LPY içeriği $I\dot{C}O_{maks}$ 'nin maksimum değerini artırmaktadır. Ani yanma periyodunda yanan yakıt miktarının artışı $I\dot{C}O_{maks}$ 'in değerini artırır [73]. Test yakıtlarının artan LPY içeriği ile artan yakıt kütlesi ani yanma safhasında kontrolsüz bir şekilde yanarak $I\dot{C}O_{maks}$ 'in değerini artırmaktadır. Bununla birlikte, yakıt püskürtme basıncındaki artış da genel olarak $I\dot{C}O_{maks}$ 'in değerini artırmıştır. Çünkü, LPY içerikli yakıtların püskürtme basıncındaki artış dinamik püskürtme avansında bir miktar gecikmeye sebep olur ve $I\dot{C}O_{maks}$ 'in değerini artırır. Ayrıca, püskürtme basıncının artışı ile püskürtme hızı ve püskürtülen yakıt miktarı bir miktar artar ve daha yüksek $I\dot{C}O_{maks}$ 'a sebep olur [147].



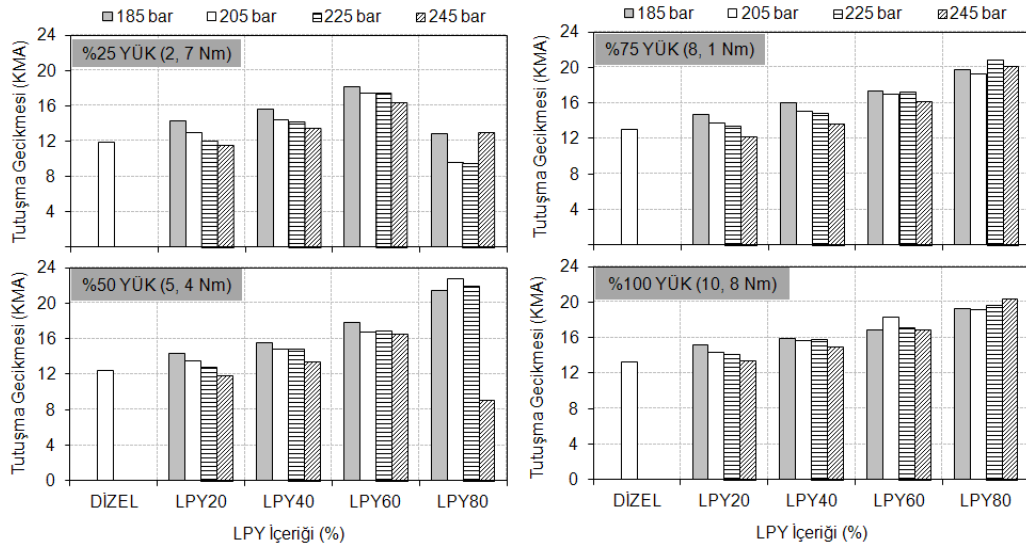
Şekil 6.37. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $I\dot{C}O_{maks}$ 'a etkisi.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için püskürtme gecikmesinin değişimi Şekil 6.38'de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Genel olarak bütün yük durumlarında, test yakıtlarının artan LPY içeriği ile püskürtme gecikmesi azalmaktadır. Bu sonuç, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan yakıt yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir [140]. Ayrıca, püskürtme basıncının artışı bütün yakıt türlerinde püskürtme gecikmesini artırarak yakıtın silindirlere püskürtülmesini geciktirmiştir.



Şekil 6.38. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin püskürtme gecikmesine etkisi.

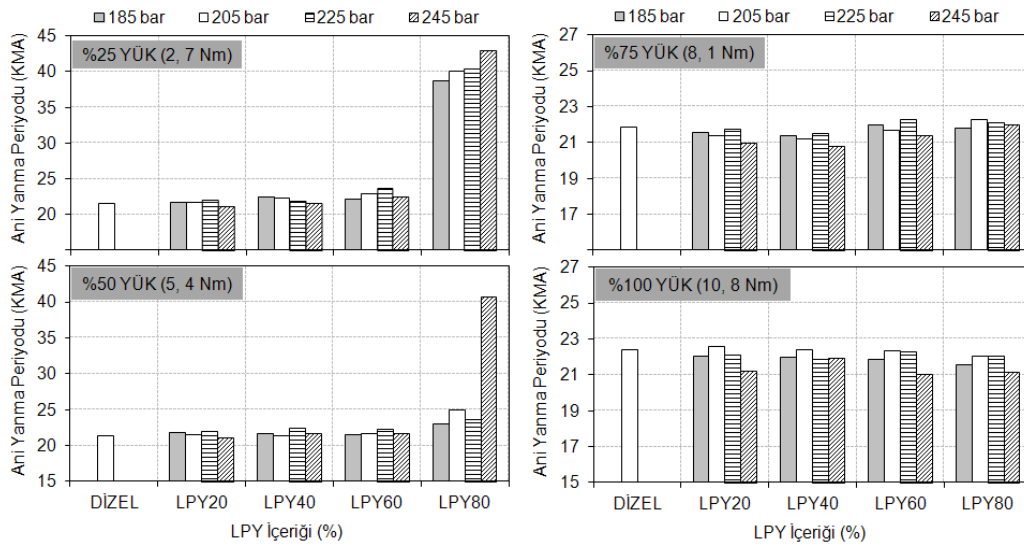
Farklı yüklerdeki motor çalışması için tutuşma gecikmesinin değişimi Şekil 6.39’da yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 6.39’da görüldüğü gibi, genel olarak bütün yük koşullarında test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça tutuşma gecikmesi artış göstermiştir. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artmasına bağlı olarak artan tutuşma gecikmesi, test yakıtlarının düşük setan sayısı ve yüksek uçuculuk karakteristikleri ile açıklanabilir [142-143].



Şekil 6.39. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin tutuşma gecikmesine etkisi.

Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının püskürtme basınçlarındaki artış, tutuşma gecikmesinin azalması yönünde bir etki göstermiştir. Püskürtme basıncının artışı ile püskürtülen yakıtın tanecik çapı küçülür, hüzmeye derinliği ve karışım teşkil hızı artar. Bu yüzden, püskürtme basıncının artırılması ile tutuşma gecikmesi periyodunca püskürtülen yakıtın hava ile karışması ve tutuşabilir özellikte bir karışım oluşturması neticesinde tutuşma gecikmesi azalır [107]. Bundan başka, püskürtme basıncının artışı ile yakıtın püskürtme başlangıcı bir miktar gecikir. Daha geç püskürtülen yakıt, yanma odasındaki basınç ve sıcaklığın kısmen daha yüksek olduğu bir atmosfer ile karşılaşır. Bu durum tutuşma gecikmesini azaltma yönünde etkilidir [140].

Farklı yüklerdeki motor çalışması için ani yanma periyodunun değişimi Şekil 6.40'ta yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Bütün yakıt türleri için artan motor yükü ile birlikte genellikle ani yanma periyodu az da olsa bir miktar artış göstermiştir. Bu durum motor yükünün artışı ile yanma odasındaki artan yakıt miktarı ile ilişkilendirilebilir [73].

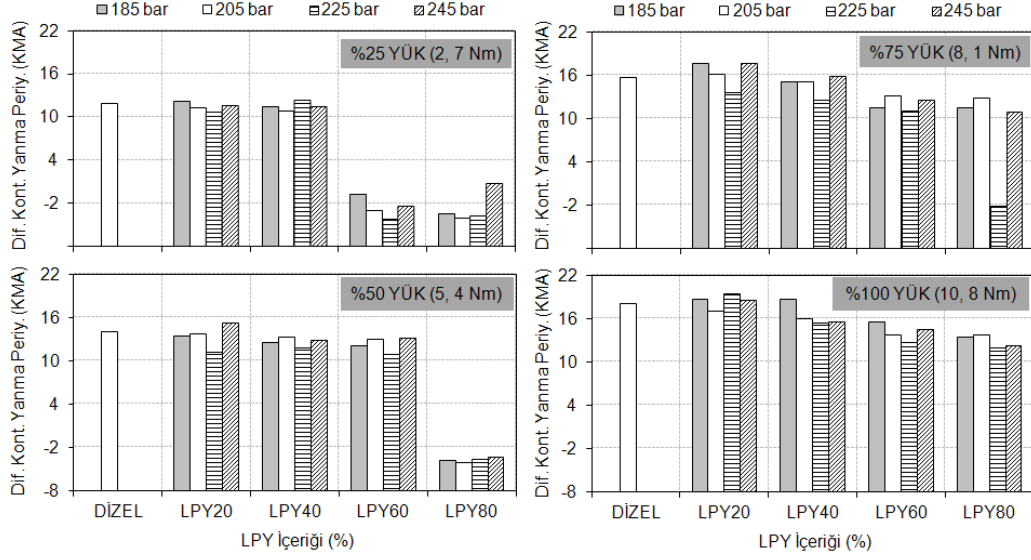


Şekil 6.40. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin ani yanma periyoduna etkisi.

Şekil 6.40'ta görüldüğü gibi, %25'lik motor yükünde test yakıtlarının LPY içeriğinin yüksek oranda artışı ani yanma periyodunun aşırı uzamasına ve toplam yanma periyodunun neredeyse tamamının ani yanma periyodu ile işgal edildiğini göstermektedir. %50 ve %75 yük koşullarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin

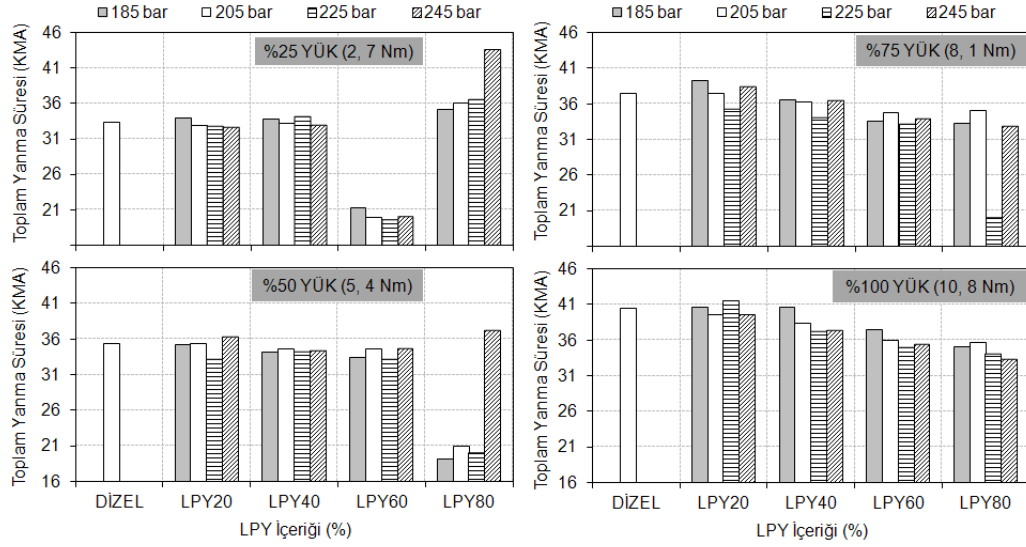
LPY40'ka kadar artırılması ani yanma periyodunu çok azda olsa kısaltmıştır. Bunun yanında %100 yük koşullarında, LPY içeren bütün test yakıtları dizel yakıtla karşılaştırıldığında, ani yanma periyodunun krank mili açısı cinsinden daha kısa sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ancak, %100 yük koşullarında sağlanan ani yanma periyodundaki azalma oldukça düşük düzeydedir. Genel olarak, LPY60'a kadar test yakıtları ile çalışan test motorunda bütün yük koşullarında, İÇÖ artırmasına rağmen ani yanma periyodu açısından dizel yakıt ile benzer davranış göstermiştir. Yakıt püskürtme basıncının artışı genel olarak bütün yük koşullarında LPY40'a kadar ani yanma periyodunu çok az da olsa kısaltmıştır. Test yakıtlarının LPY içeriğinin LPY40'tan daha fazla artışı, püskürtme basıncının artışı ile bütün yük koşullarında genel olarak ani yanma periyodunun uzamasına neden olmuştur. Uzayan ani yanma periyodu, LPY içeren test yakıtlarının düşük setan sayısı ve artan uçuculukları ile ilişkilendirilebilir [134].

Farklı yüklerdeki motor çalışması için difüzyon kontrollü yanma periyodunun değişimi Şekil 6.41'de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Test yakıtlarının artan LPY içeriği difüzyon kontrollü yanma periyodunu genellikle kısaltmıştır. Bu sonuç, test yakıtlarının LPY içeriği arttıkça, ani yanma fazında yanan karışımın miktarı artarken difüzyon kontrollü yanma periyodunda yanan karışımın miktarının azaldığını göstermektedir. Ayrıca, düşük viskoziteli yakıtların difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısalttığı bilinmektedir [144]. Düşük viskoziteli yakıtlar, yanma odasındaki karışım teşkil hızını artırarak difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısaltırlar [145]. Püskürtme basıncının artırılması ile genellikle difüzyon kontrollü yanma periyodu azalmıştır. Bununla birlikte, bütün yakıt türleri için genellikle 225 bar'lık püskürtme basıncı en kısa difüzyon kontrollü periyodu sağlamıştır.



Şekil 6.41. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin difüzyon kontrollü yanma periyoduna etkisi.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için toplam yanma süresinin değişimi Şekil 6.42’de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 6.42’de görüldüğü gibi, özellikle orta ve yüksek motor yükleri için, test yakıtlarının artan LPY içeriği toplam yanma süresini genellikle kısaltmıştır. Bu sonuç, LPY içeren test yakıtlarının düşük viskozitesi ve düşük setan sayısı ile ilişkilendirilebilir. Çünkü, genellikle düşük setanlı yakıtlar yanma süresinin kısalmasına sebep olurlar [75]. Orta ve yüksek yüklü motor çalışmasında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile birlikte artan püskürtme basıncı genellikle toplam yanma süresini kısaltsa da en kısa toplam yanma süresi 225 bar’lık motor çalışmasında elde edilmiştir. Aynı motor çıkış torkunu elde etmek için LPY içeren test yakıtlarından kütleli olarak daha fazla gerekir. Bu durum özellikle ani yanma periyodunu uzatır [74]. Diğer taraftan, özellikle LPY içeren test yakıtlarının düşük viskozitesi ani yanma periyodunu kısaltmaya çalışırken difüzyon kontrollü yanma periyodunu artırır. Bu sebeplerin ortak etkisi ise toplam yanma süresini özellikle yüksek motor yüklerinde kısaltmıştır.

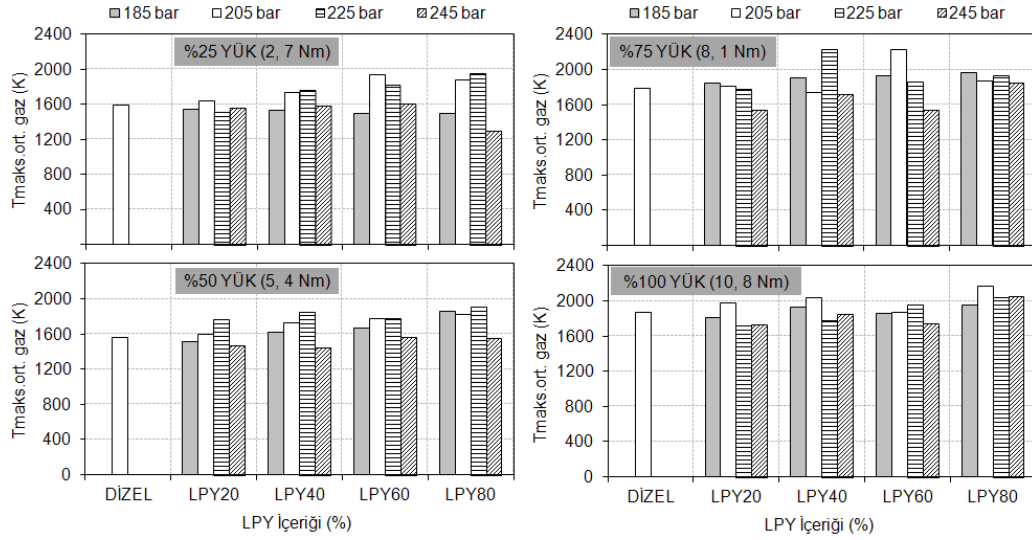


Şekil 6.42. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin toplam yanma süresine etkisi.

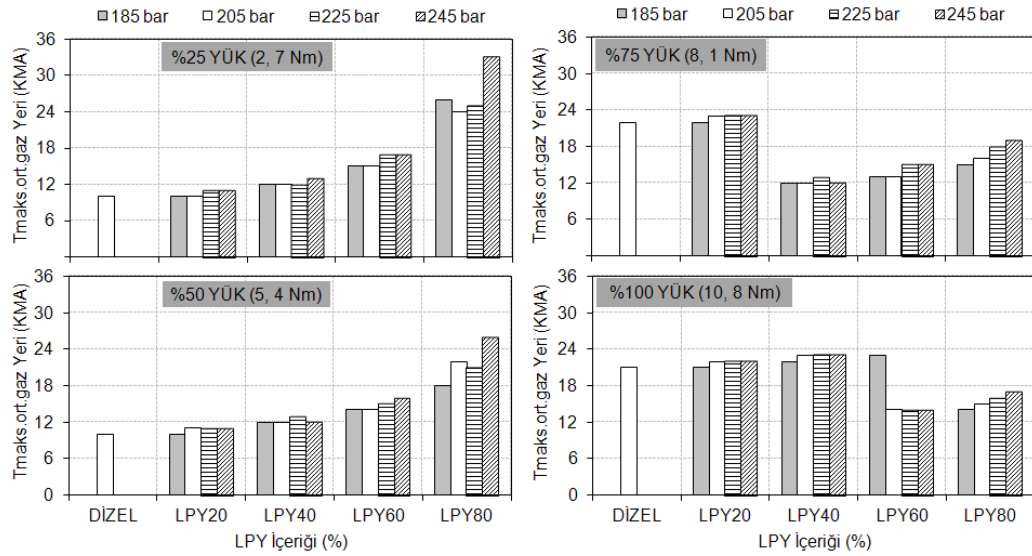
Farklı yüklerdeki motor çalışması için yanma odasındaki $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın değişimi Şekil 6.43'te yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. Motor yükünün artışı ile birlikte yakıtların artan LPY içeriği, genellikle yanma odasındaki $T_{maks.ort.gaz}$ 'ı artırmıştır. Test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile artan yakıt yoğunluğu dolayısı ile ani yanma periyodunda açığa çıkan ısı miktarının artışı $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın artışında etkili olmuştur. Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının yüksek aromatik içeriği alev sıcaklığını artırır ve $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın artışına sebep olur. %25 ve %50 motor yükü için, test yakıtlarının LPY içeriklerinin %40'a kadar artırılması ile birlikte yakıt püskürtme basıncının artırılması genellikle $T_{maks.ort.gaz}$ 'ı artırırken daha yüksek oranlarda LPY içeren test yakıtlarının püskürtme basıncını artırmak $T_{maks.ort.gaz}$ 'ı azaltmıştır. $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın azalması azalan toplam yanma süresi ile ilişkilendirilebilir. Dizel yakıtına LPY ilavesi, genellikle yanmayı hızlandırırken toplam yanma süresini kısaltır ve $T_{maks.ort.gaz}$ 'ı düşürür. Bütün yük durumları dikkate alındığında, en düşük $T_{maks.ort.gaz}$ genellikle 245 bar püskürtme basıncı ile elde edilmiştir.

Farklı yüklerdeki motor çalışması için yanma odasındaki $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın oluştuğu yerin değişimi Şekil 6.44'de yakıt püskürtme basıncına ve LPY içeriğine bağlı olarak gösterilmiştir. %25 ve %50 motor yükü için, test yakıtlarının LPY içeriklerinin artışı ile birlikte $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın oluşum yeri gecikmiştir. Bununla birlikte %75 motor

yükü için LPY20'den fazla ve %100 motor yükü için LPY40'tan fazla yakıt ilavesi $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın oluşum yerini öne almıştır. Ancak, püskürtme basıncının artışı ile $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın oluşum yeri bir miktar gecikmiştir.



Şekil 6.43. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort.gaz}$ 'a etkisi.



Şekil 6.44. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın yerine etkisi.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Atık taşıt lastiklerinin alternatif bir yakıt kaynağına dönüştürülerek bertaraf edilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi ve doğal kaynakların ekonomik kullanılması bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın dizel motorda kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar iki bölümde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yakıtın yakıt özellikleri uygun yöntemler ile iyileştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde motor testleri gerçekleştirilmiştir.

Motor testleri ise iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada; direkt püskürtmeli dizel motor standart dizel yakıt, LPY20, LPY40, LPY60, LPY80 ve LPY100 test yakıtları kullanılarak, tam yük ve değişik hızlarda (1400, 2000, 2600, 3200 d/d) test edilmiştir. Motor hızının ve yakıt türünün tork, güç, FÖET, efektif verim, T_{Egzoz} , NO_x , HC, CO ve is emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca motor hızı ve yakıt türünün yanma karakteristiklerine etkisi detaylı olarak irdelenmiştir. İkinci aşamada; motor testleri sabit motor hızında (3400 d/d), farklı yüklerde (%25, %50, %75, %100) ve değişik yakıt püskürtme basınçlarında (185, 205, 225, 245 bar) gerçekleştirilmiştir. Motor yükü, yakıt türü ve yakıt püskürtme basıncının performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ve ilgili değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

Tam yük ve farklı hızlardaki motor çalışması performans açısından değerlendirildiğinde, test yakıtlarının LPY içeriğini %80'e kadar artırmak genellikle motor gücünü ve torkunu önemli ölçüde etkilememiştir. Ancak, test yakıtlarının LPY içeriğini daha fazla artırmak motor gücünü ve torkunu azaltmıştır. FÖET ve efektif verim açısından, test yakıtlarının LPY içeriğinin %60'a kadar artırılması FÖET'yi ve efektif verimi önemli ölçüde etkilememiştir.

Tam yük ve farklı hızlardaki motor çalışması emisyonlar açısından değerlendirildiğinde, test yakıtlarının LPY içeriğinin %60'a kadar artırılması motorun ürettiği NO_x emisyonlarını önemli ölçüde etkilememiştir. Bununla birlikte, test yakıtlarının LPY içeriğinin %40'a kadar artırılması özellikle düşük hızlı motor çalışmasında HC emisyonlarını iyileştirirken LPY40'tan daha fazla LPY ilavesi ile HC emisyonları artış göstermiştir. Düşük ve orta hızlı motor çalışmasında, test yakıtlarının artan LPY içeriği CO emisyonlarını azaltırken, yüksek hızlı motor çalışmasında ise CO emisyonlarının artışına sebep olmuştur. Genel olarak, motorun tam yük koşullarında, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile is emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Tam yük ve farklı hızlardaki motor çalışması yanma karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde, genel olarak test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı silindir içi basınçlarının oluşumunu geciktirirken P_{maks}'ı ve basınç artış hızını artırmıştır. Test yakıtlarının artan LPY içeriği ile ısı oluşumunun başlaması gecikirken İÇO'nun maksimum değeri artmıştır. Test yakıtlarının artan LPY içeriği bütün motor hızları için püskürtme gecikmesini azaltarak yakıt püskürtme sisteminde bir miktar avans sağlamıştır. Tutuşma gecikmesi, bütün motor hızları için test yakıtlarının artan LPY içeriği ile doğru orantılı olarak bir miktar artış göstermiştir. Yanma safhaları açısından değerlendirildiğinde, bütün motor hızları için test yakıtlarının %40'a kadar artan LPY içeriği, ani yanma periyodu açısından dizel yakıtlı motor çalışması ile benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Bütün motor hızları için test yakıtlarının artan LPY içeriği ile birlikte difüzyon kontrollü yanma periyodu ve toplam yanma süresi genellikle kısalmıştır. Test yakıtlarının %40'a kadar artan LPY içeriği, silindir içindeki T_{maks.ort.gaz} açısından dizel yakıtlı motor çalışması ile benzer sonuçlar ortaya koymuştur.

Farklı yük ve püskürtme basınçlarında yapılan deneyler FÖET ve efektif verim açısından değerlendirildiğinde, motorun yakıt sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın %40'a kadar LPY ilavesinin FÖET'yi ve efektif verimi önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Artan LPY içeriği ile birlikte artan püskürtme basıncı, düşük yüklerdeki FÖET'yi ve efektif verimi kötüleştirirken T_{Egzo}'u artırmış, yüksek yüklerdeki FÖET'yi ve efektif verimi iyileştirirken T_{Egzo}'u azaltmıştır.

Farklı yük ve püskürtme basınçlarında yapılan deneyler emisyonlar açısından değerlendirildiğinde, artan motor yükü ve test yakıtlarının %40'a kadar artan LPY içeriği ile birlikte HC, CO ve is emisyonları azalırken, NO_x emisyonları LPY içerikli bütün yakıt türleri için artış göstermiştir. Ayrıca, LPY içeren test yakıtlarının püskürtme basıncının artışı ile birlikte NO_x emisyonları artarken CO ve is emisyonlarında azalma sağlanmıştır.

Farklı yük ve püskürtme basınçlarında yapılan deneyler yanma karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde, genel olarak test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile yanma basıncının oluşumu gecikmektedir. Bunun yanında yüksek oranda LPY içeren test yakıtları ile çalışan dizel motorda silindir basınçlarının etkin şekilde oluşumu kısıtlanmaktadır. Pmaks açısından, test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı düşük yüklü motor çalışmasında Pmaks'ın değerini düşürürken yüksek motor yüklerinde ise test yakıtlarının LPY içeriğinin %60'a kadar artışı Pmaks'ın değerini artırmıştır. LPY80 ile yapılan çalışmalar bütün yük durumlarında genellikle daha düşük Pmaks ile sonuçlanmıştır. Test yakıtlarının LPY içeriğinin ve püskürtme basıncının artışı, düşük yüklü motor çalışmasında basınç artış hızını azaltırken orta ve yüksek motor yüklerinde artırmıştır. Bütün motor yüklerinde, test yakıtlarının artan LPY içeriği ve artan püskürtme basıncı ısı oluşumunun başlamasını geciktirirken İÇO'nun maksimum değerini artırmıştır. Genel olarak bütün yük durumlarında, test yakıtlarının artan LPY içeriği ve azalan püskürtme basıncı ile püskürtme gecikmesi azalmaktadır. Test yakıtlarının artan LPY içeriği tutuşma gecikmesini artırırken püskürtme basıncındaki artış tutuşma gecikmesini genellikle azaltmıştır. Yanma safhaları açısından değerlendirildiğinde, LPY60'a kadar test yakıtları ile çalışan test motoru bütün yük koşullarında ani yanma periyodu açısından dizel yakıt ile benzer davranış göstermiştir. Bununla birlikte, yakıt püskürtme basıncının artışı genel olarak bütün yük koşullarında LPY40'a kadar ani yanma periyodunu kısaltmıştır. Test yakıtlarının artan LPY içeriği ve artan püskürtme basıncı difüzyon kontrollü yanma periyodunu kısaltmıştır. Toplam yanma periyodu ise hem püskürtme basıncının artışı hem de test yakıtlarının LPY içeriğinin artışı ile kısaltmıştır. Motor yükünün artışı ile birlikte yakıtların artan LPY içeriği, genellikle yanma odasındaki Tmaks.ort.gaz'ı artırmıştır. Püskürtme basıncının artışı ise LPY40'a kadar Tmaks.ort.gaz'ı bir miktar

artırsa da en yüksek püskürtme basıncında genellikle en düşük $T_{maks.ort.gaz}$ 'ın oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmadaki test sonuçları, tam yük, kısmi yük ve püskürtme basınçları dikkate alınarak beraberce değerlendirildiğinde, motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin standart dizel yakıtı hacimsel olarak %40'a kadar LPY ilavesinin motor performansını düşürmeden bazı egzoz gaz emisyonlarını iyileştirerek kullanılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, her bir yakıt türü için optimum püskürtme basıncının motor yüküne göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yakıtın düşük hızlı dizel motorlarda kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıt için optimum yakıt püskürtme avansının belirlenmesi yönünde çalışmalar yapılabilir. Bundan başka, LPY'nin tutuşma gecikmesinden kaynaklanan olumsuzluklarını azaltmak için çeşitli setan artırıcılar ile birlikte harmanlanarak kullanımının motor performansı ve emisyonlar açısından incelenmesi daha pozitif sonuçlar ortaya çıkarabilir. Ayrıca, biyodizel gibi yüksek viskoziteli yakıtlar düşük viskoziteli LPY yakıtları ile beraberce harmanlanarak biyodizelin yüksek viskozitesinden kaynaklanan sınırlılıklar azaltılabilir. LPY içerisindeki kükürt bileşenlerinin daha fazla ve etkin bir şekilde uzaklaştırılması için ayrıntılı bir araştırma yapılabilir. Büyük ölçekli petrol işletmelerindeki yakıt üretim sürecinde, yakıt üretim prosesinin ilk aşamasına LPY'nin de dahil edilerek dizel yakıt elde edilmesi daha ekonomik olabilir.

Atık taşıt lastiklerinin piroliz yöntemi ile alternatif bir enerji kaynağına dönüştürülmesi işleminin yaygınlaşması hem çevre kirliliğinin azaltılmasını hem de doğal kaynakların ekonomik kullanılmasını sağlayacaktır. Ancak, pirolitik yakıtların yaygın üretimi ve kullanımı sektörle ilgili çeşitli kurum ve kuruluşların desteğine bağlıdır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: 9-Kayma Açısı ve Yanal Kuvvet, http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/lastikler/yanal_kuvvet.htm, (2010).
2. Hylands, K. N., Shulman, V., "Civil engineering applications of tyres", *Viridis Report VR5, Crowthorne, TRL Ltd., England*, www.viridis.co.uk, (2003).
3. Barlow, F. W., "Rubber compounding: principles, materials, and techniques", *M. Dekker*, New York, 9–55, (1993).
4. Rehan, A., De Klundert, A. V., and Lardinois, I., "Rubber waste, options for small-scale resource recovery. Urban solid waste series 3", *Waste Company, Netherlands*, 23-24, (1996).
5. İnternet: A National Approach to Waste Tyres, <http://www.environment.gov.au/settlements/publications/waste/tyres/national-approach/pubs/national-approach.pdf>, (2001)
6. World Business Council for Sustainable Development, "Managing end-of-life tires", *WBCSD, Switzerland*, Full Report, www.wbcsd.org/web/tires, 8-9, (2008).
7. Saraf, S., "Thermal decomposition of scrap tires&waste motor oil", Msc. Thesis, *The Graduate School of the University of Wyoming*, Department of Chemical Engineering, Chicago, USA, 14-15, (1992).
8. Islam, M. R., Hiroyuki, H., and Alam, B. M. R., "Limonene-rich liquids from pyrolysis of heavy automotive tire wastes", *Journal of Environment and Engineering*, 2 (4): 681-695 (2007).
9. Murillo, R., Aylón, E., Navarro, M. V., Callén, M. S., Aranda, A., and Mastral, A. M., "The application of thermal processes to valorise waste tyre", *Fuel Processing Technology*, 87 (2): 143-147 (2006).
10. Ucar, S., Karagoz, S., Ozkan, A. R., and Yanık, J., "Evaluation of two different scrap tires as hydrocarbon source by pyrolysis", *Fuel*, 84 (14-15): 1884-1892 (2005).
11. Kyari, M., Cunliffe, A. M., and Williams, P. T., "Characterization of oils, gases and chars in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tyres", *Energy & Fuels*, 19 (3): 1165-1173 (2005).

12. Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., Rodriguez, I. M., Torres, A., Cabrero, M. A., and Chomón, M. J., "Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71 (2): 917-934 (2004).
13. Williams, P. T., Brindle, A. J., "Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 67 (1): 143-164 (2003).
14. Rodriguez, I. M., Laresgoiti, M. F., Cabrero, M. A., Torres, A., Chomón, M. J., and Caballero, B., "Pyrolysis of scrap tyres", *Fuel Processing Technology*, 72 (1): 9-22 (2001).
15. González, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., and Rodriguez, J. J., "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1 (58-59): 667-683 (2001).
16. Mastral, A. M., Murillo, R., Callen, M. S., Garcia, T., and Snape, C. E., "Influence of process variables on oils from tire pyrolysis and hydrolysis in a swept fixed bed reactor", *Energy Fuels*, 14 (4): 739-744 (2000).
17. Dai, X., Yin, X., Wu, C., Zhang, W., and Chen, Y., "Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor", *Energy*, 26 (4): 385-399 (2001).
18. Kaminsky, W., Mennerich, C., "Pyrolysis of synthetic tire rubber in a fluidised-bed reactor to yield 1,3-butadiene, styrene and carbon black", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58-59: 803-811 (2001).
19. Pakdel, H., Pantea, D. M., and Roy, C., "Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 57 (1): 91-107 (2001).
20. Roy, C., Chaala, A., and Darmstadt, H., "The vacuum pyrolysis of used tires: End-uses for oil and carbon black products", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51 (1-2): 201-221 (1999).
21. Roy, C., Rastegar, A., Kaliaguine, S., Darmstadt H., and Tochev, V., "Physicochemical properties of carbon blacks from vacuum pyrolysis of used tires", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 23 (1): 21-30 (1995).
22. Benallal, B., Roy, C., Pakdel, H., Chabot, S., and Poirier, M. A., "Characterization of pyrolytic light naphtha from vacuum pyrolysis of used tyres comparison with petroleum naphtha", *Fuel*, 74 (11): 1589-1594 (1995).
23. Mirmiran, S., Pakdel, H., and Roy, C., "Characterization of used tire vacuum pyrolysis oil: Nitrogenous compounds from the naphtha fraction", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 22 (3): 205-215 (1992).

24. Roy, C., Labrecque, B., and Caumia, B., "Recycling of scrap tires to oil and carbon black by vacuum pyrolysis", *Resources, Conservation and Recycling*, 4 (3): 203-213 (1990).
25. Piskorz, J., Majerski, P., Radlein, D., Torsten, W. and Scott, D. S., "Recovery of carbon black from scrap rubber", *Energy & Fuels*, 13 (3): 544-551 (1999).
26. Kennedy, Z. R., Rathinaraj, D., "Exhaust emissions and performance of diesel engine fuelled with tire based oil blends", *Journal of the Institution of Engineers*, 88: 13-18 (2007).
27. Bosch, R., "Automotive handbook", *Robert Bosch GmbH*, Plochingen, 7. Edition, 313-314 (2007).
28. Svensson, K. I., "Effects of fuel molecular structure and composition, on soot formation in direct-injection spray flames", PhD. Thesis, *Brigham Young University, Department of Mechanical Engineering*, USA, 1-160 (2005).
29. Yang, H. H, Chen, H. W., Chen, C. B, and Chien, S. M., "Effect of fuel properties on particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon emission from diesel engine in Taiwan", *International Journal of Applied Science and Engineering*, 3 (1): 27-36 (2005).
30. Kotzé, J., "A comparative study on the performance of biodiesel in a modern 1.9 litre turbo diesel engine", Msc. Thesis, *University of Stellenbosch, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering*, South Africa, 10-79, (2010).
31. İcingür, Y., Altıparmak, D., "Experimental analysis of the effects of fuel injection pressure and fuel cetane number on direct injection diesel engine emissions", *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 27 (5): 291-298 (2003).
32. İcingür, Y., 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).
33. İckes, A. M, Bohac, S. V., and Assanis, D. N., "Effect of fuel cetane number on a premixed diesel combustion mode", *International Journal of Engine Research*, 10 (4): 251-263 (2009).
34. Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., "İçten yanmalı motorlar, Cilt 1 ", *G. Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Matbaası*, Ankara, 18-100 (1994).
35. Safgönül, B., "Pistonlu motorlar, Cilt-1", *ITU Makine Fakültesi*, İstanbul, 136-145 (1989).
36. İckes, A. M., "Fuel property impact on a premixed diesel combustion mode", PhD. Thesis, *University of Michigan, Department of Mechanical Engineering*, USA, 1-148 (2009).

37. Heywood, J., "Internal combustion engine fundamentals", **McGraw-Hill**. New York, 491-566 (1988).
38. Jeong, C. S., Kang, J., "Effects of fuel composition and properties on autoignition of automotive diesel engine", **Applied Chemistry**, 4 (1): 125-128 (2000).
39. Graboski, M. S., McCormick, R. L., Alleman, T. L., and Herring, A. M., "The effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC Series 60 diesel engine", **National Renewable Energy Laboratory NREL/SR-510-31461**, USA, Final Report, Report 2 in a series of 6, 1-57 (2003).
40. Oh, S. K., Baik, D. S., and Han, Y. C., "Emission characteristics in ultra low sulfur diesel", **International Journal of Automotive Technology**, 4 (2): 95-100 (2003).
41. Yang, C., Kidoguchi, Y., Kato, R., and Miwa, K., "Effects of fuel properties on combustion and emissions of a direct-injection diesel engine", **Bulletin of the M.E.S.J.**, 28 (2): 55-62 (2000).
42. Li, X., Gülder, Ö., "Effects of fuel cetane number, density and aromatic content on diesel engine NO_x emissions at different operating conditions", **4. International Symposium (COMODIA 98)**, Kyoto, Japan, 111-116, July 20-23 (1998).
43. Broering, L. C., "Effect of diesel fuel properties on emissions and performance", **SAE Paper No. 740692**, (1974).
44. Nuskowski, J., Tincher, R. R., and Thompson, G. J., "Evaluation of NO_x emissions from heavy-duty diesel engines with the addition of cetane improvers", **Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 223 (8): 1049-1060 (2009).
45. Lois, E., Stournas, S., "Correlations between diesel fuel properties and engine emissions", **Symposium on Impact of Environmental Constraints on Fuel Composition**, San Francisco, USA, 25-32 (1992).
46. Leddy, D. G., Gratz, L. D., and Ragley, S. T., "The impact of chemical and physical Properties of fuels on diesel engine emissions", **Symposium on Impact of Environmental Constraints on Fuel Composition**, San Francisco, USA, 17-24 (1992).
47. Taylor, C. F., "The internal combustion engine in theory and practice, combustion, fuels, materials, design, Vol. 2.", **MIT Press**, Cambridge MA, 86-240 (1994).
48. Chanchaona, S., Sudsanguan, P., "Effects of cetan number and cetan improvers on small diesel engine emissions", **ASEAN Journal on Science and Technology for Development**, 16 (1): 99-104 (1999).

49. Erdöl, E., "Enjektör parametrelerinin motor egzoz emisyonlarına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi FBE, Makine Mühendisliği*, İstanbul, 30-59 (2007).
50. Erwin, J., "Assay of diesel fuel components properties and performance", *Symposium on Processing and Product Selectivity on Synthetic Fuels*, Washington D.C., USA, 1915-1923, August 23-28 (1992).
51. Yoshida, E., Nomura, H., and Sekimoto, M., "Fuel and engine effects on diesel exhaust emissions", *SAE Technical Paper* 860619 (1986).
52. Zhang, J., He, K., Ge, Y., and Shi, X., "Influence of fuel sulfur on the characterization of PM10 from a diesel engine", *Fuel*, 88 (3):504-510 (2009).
53. Lin, C. Y., Jeng, Y. L., Wi, C.-S., and Wu, K. J., "Influences of fuel sulfur content on diesel engine emission characteristics under varying temperature and humidity of inlet air", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 31 (4): 765-782 (1996).
54. Juva, A., Rautiola, A., Saikkonen, P., and Le Breton, D., "Influence of diesel fuel composition on performance and exhaust emissions of diesel engines", *13th World Petroleum Congress*, Buenos Aires, Argentina, 1-10, October 20-25 (1991).
55. Ng, H. K., Borman, G. L., "The effects of fuel aromatic structure on diesel combustion", *Proceedings of the international symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines (COMODIA 1985)*, Tokyo, Japan, 591-597, Sep. 4-6 (1985).
56. Zannis, T. C., Hountalas, D. T., "Effect of fuel aromatic content and structure on direct-injection diesel engine pollutant emissions", *Journal of the Energy Institute*, 77 (511):16-25 (2004).
57. Bahadur, N. P., Boocock, D. G. B., and Konar, S. K., "Liquid hydrocarbons from catalytic pyrolysis of sewage sludge lipid and canola oil: evaluation of fuel properties", *Energy Fuels*; 9 (2): 248-56 (1995).
58. Martinez-Martinez, S., Sanchez-Cruz, F. A., Riesco-Avila, J. M., Gallegos-Munoz, A., and Aceves, S. M., "Liquid penetration length in direct diesel fuel injection", *Applied Thermal Engineering*, 28 (14-15): 1756-1762 (2008).
59. Yamane, K., Ueta, A., and Shimamoto, Y., "Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuel on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a DI-CI engine", *5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001)*, Nagoya, Japan, 402-409, July 1-4 (2001).
60. Guibet, J. C., "Fuels and engines volume 1", *Institut Français Du Petrole Publications*, France, 1-456 (1999)

61. Ergenç, A. T., "Biodiesel yakıt ile çalışan motordaki püskürtmenin performans ve emisyon yönünden optimizasyonu", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi FBE*, İstanbul, 12-13 (2009).
62. Selim, M. Y. E., "Reducing the viscosity of jojoba methyl ester diesel fuel and effects on diesel engine performance and roughness", *Energy Conversion and Management*, 50 (7): 1781–1788 (2009).
63. Boulanger, J., W. Neill, 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).
64. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines", *Waste Management*, 28 (12): 2743-2749 (2008).
65. Kumar, A. S., Maheswar, D., and Reddy, K. V. K., "Comparison of diesel engine performance and emissions from neat and transesterified cotton seed oil", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 3 (3): 190-197 (2009).
66. Li, D., 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).
67. İnternet: American Clean Energy Systems Inc., "The impact of changes in diesel fuel's specifications", ACES, USA, http://www.americancleanenergysystems.com/americancleanenergysystems/HOME_files/Impact%20of%20Changes%20in%20Diesel%20Fuel.pdf, (2011).
68. Baumgarten, C., "Mixture formation in internal combustion engines", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 1-200 (2006).
69. Pulkrabek, W. W., "Engineering fundamentals of the internal combustion engine", *Prentice Hall*, 2. baskı, New Jersey, USA, 251-261 (2003).
70. Martyr, A. J., Plint, M. A., "Engine testing theory and practice", *Elsevier Ltd.*, Third edition, ISBN-13: 978-0-7506-8439-2, 292-293 (2007).
71. Ganesan, V., "Internal combustion engines", *Tata McGraw-Hill*, 2. Baskı, New Delhi, 736-738 (2006).
72. Gupta, H. N., "Fundamentals of internal combustion engines", *Prentice-Hall of India Pvt. Ltd*, New Delhi, 203-206 (2006).
73. Zhu, R. J., Wang, X. B., Miao, H. Y., and Huang, Z. H., "Combustion and particulate emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-

- dimethoxymethane blends", *Proc. Inst. Mech. Eng., Journal of Automobile Engineering*, 224(4): 521-531 (2010).
74. 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 & Fuels*, 21 (3): 1474-1482, (2007).
 75. Xing-cai, L., Jian-guang, Y., Wu-gao, Z., and Zhen, H., "Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol–diesel blend fuel", *Fuel*, 83 (14-15): 2013–2020 (2004).
 76. Merker, G., P., Schwarz, C., Stiesch, G., and Otto, F., "Simulating combustion: simulation of combustion and pollutant formation for engine-development", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 60-140 (2006).
 77. Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., "Diesel engine transient operation-principles of operation and simulation analysis", *Springer-Verlag London Limited*, Tampere, Finland, 141-178 (2009).
 78. Tree, D., R., Svensson, K., I., "Soot processes in compression ignition engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (3): 272-309 (2007).
 79. 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 & Fuels*, 21 (3): 1504-1510 (2007).
 80. Pundir, B. P., "Engine emissions: pollutant formation and advances in control technology", *Narosa Publishing House Pvt.Ltd.*, New Delhi, 13-78 (2007).
 81. Altun, Ş., "Performance and exhaust emissions of a DI diesel engine fueled with waste cooking oil and inedible animal tallow methyl esters", *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 35 (2): 107-114 (2011).
 82. Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., and Sayin, C., "Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters", *Fuel*, 88 (4): 629-636 (2009).
 83. Ozsezen, A. N., Canakci, M., and Sayin, C., "Effects of biodiesel from used frying palm oil on the performance, injection, and combustion characteristics of an indirect injection diesel engine", *Energy and Fuels*, 22 (2): 1297-1305, (2008).
 84. Utlu, Z., Koçak, M. S., "The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions", *Renewable Energy*, 33 (8): 1936-1941 (2008).

85. Ya-fen, L., Yo-ping, G. W., and Chang-Tang, C., "Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends", *Fuel*, 86 (12–13): 1772-1780 (2007).
86. Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gómez, J., and López, F. J., "Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil", *Fuel*, 82 (11): 1311-1315 (2003).
87. Prakash, R., Singh, R. K., and Murugan, S., "Performance and emission studies in a diesel engine using bio oil-diesel blends", *2nd Int. Conf. on Envi. Science and Tech. (ICEST2011)*, Singapore, 428-433, February 26-28 (2011).
88. Koji, Y., Ryu, Y., "Combustion and exhaust emission characteristics of wood-derived pyrolysis tar oil fueled diesel engines", *Nippon Kikai Gakkai, Jidosha Gijutsukai Nainen Kikan Shinpojiumu Koen Ronbunshu*, Japan, 7-12, (2002).
89. Bertoli, C., Alessio, J. D., Del Giacomo, N., Lazzaro, M., Massoli, P., and Moccia, V., "Running light-duty DI diesel engines with wood pyrolysis oil", *SAE 2000-01-2975*, (2000).
90. Arpa, O., Yumrutaş, R., and Argunhan, Z., "Experimental investigation of the effects of diesel-like fuel obtained from waste lubrication oil on engine performance and exhaust emission", *Fuel Processing Technology*, 91 (10): 1241-1249 (2010).
91. Sugözü, İ., Aksoy, F., ve Baydır, Ş. A., "Atık motor yağının alternatif yakıt olarak bir dizel motorunda kullanılması", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1 (1): 9-16 (2009).
92. Arpa, O., Yumrutaş, R., ve Kaşka, Ö., "Atık motor yağından elde edilen dizel benzeri yakıtın motor performans ve eksoz emisyonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES'2008*, İstanbul, 293-304, 17-19 Aralık (2008).
93. 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).
94. 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).
95. Mani, M., Nagarajan, G., "Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil", *Energy*, 34 (10):1617-1623 (2009).

96. 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).
97. İlkılıç, C., Aydın, H., "Fuel production from waste vehicle tires by catalytic pyrolysis and its application in a diesel engine", *Fuel Processing Technology*, 92 (5): 1129-1135 (2011).
98. Koç, A. B., Abdullah, M. K., Schumacher, L., and Borgelt, S., "Exhaust emissions of a 4-cylinder diesel engine fueled with biodiesel, tire oil and diesel fuel blends", *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)* Paper Number: 1009382, Pennsylvania, USA, June 20-23 (2010).
99. Doğan, O., Özdalyan, B., Dörtbölük, C., Candan, Ş., and Candan, E., "The effect of scrap tyre fuel on diesel engine performance and emissions", *5th International Advanced Technologies Symposium-IATS'09*, Karabük, Turkey, 1957-1960, May 13–15, (2009).
100. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "Assessment of pyrolysis oil as an energy source for diesel engines", *Fuel Processing Technology*, 90 (1): 67-74 (2009).
101. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "A comparative study on the performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis oil-diesel blends", *Fuel*, 87 (10-11): 2111-2121 (2008).
102. 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).
103. Murugan, S., Ramaswamy, M. C., and Nagarajan, G., "Influence of distillation on performance, emission, and combustion of a DI diesel engine, using tyre pyrolysis oil diesel blends", *Thermal Science*, 12 (1): 157-167 (2008).
104. Salman, S., Topgül, T., "Bir dizel motorunda enjeksiyon basıncının motor performansına, soğutma suyu ve egzoz gazı yoluyla kaybedilen ısı enerjisine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 4 (2): 27-30 (2001).
105. Lee, C. S., Park, S. W., "An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays", *Fuel*, 81 (18): 2417-2423 (2002).
106. Pickett, L. M., Siebers, D. L., "Soot in diesel fuel jet: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure", *Combustion and Flame* 138 (1-2): 114-135 (2004).
107. Rosli, A. B., Semin, and Ismail, A. R., "Fuel injection pressure effect on performance of direct injection diesel engines based on experiment", *American Journal of Applied Sciences* 5 (3): 197-202 (2008).

108. İçüngür, Y., Salman, S., ve Koca, A., "Dizel motorlarında servis koşullarından kaynaklanan emisyonların deneysel analizi", *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü 3. Ulusal Sempozyumu*, ODTÜ Çevre Müh., Ankara, 156-167, 11-13 Eylül (1995).
109. Ghazikhani, M., Zangoosee, M. R., and Darbandi, A., "Investigation of the effect of injection pressure on engine specific fuel consumption and exhaust emissions in turbocharged diesel engines", *15th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME2007*, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, May 15-17 (2007).
110. İlkılıç, C., "Bir dizel motorunda enjeksiyon basıncının egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması", *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 20 (3): 483-491 (2008).
111. Rao, R., Raju, V. R., Rao, M. M., Srikanth, P., Suresh, M., and Raviteja, Y. M., "Optimization of injection parameters for a stationary diesel engine", *Global Journal of Researches in Engineering*, 10 (2): 2-10 (2010).
112. Kannan, K., Udayakumar, M., "Experimental study of the effect of fuel injection pressure on diesel engine performance and emission", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 (5): 42-45 (2010).
113. Haque, M. N., Miah, M. Y., Ashruf, S. A., Islam M. R., and Das, A. K., "Effects of acid washing and additives on qualities of waste lubricating oil", *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, 43 (4): 529-536 (2008).
114. Rahman, M. M., Siddiquee, T. A., Samdani, S., and Kabir, K. B., "Effect of operating variables on regeneration of base-oil from waste oil by conventional acid-clay method", *Chemical Engineering Research Bulletin*, 12 (1): 24-27 (2008).
115. Eterigho, E. J., Olutoye, M. A., "Quality improvement of an acid treated fuel oil", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 1(12): 95-104 (2008).
116. Babich, V. I., Moulijn, J. A., "Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: A review", *Fuel*, 82 (6): 607-631 (2003).
117. Farhat, A., M., Al-Maliki, A., El-Ali, B., Martine, G., and Siddiqui, N. M., "Deep desulphurization of gasoline and diesel fuels using non-hydrogen consuming techniques", *Fuel*, 85 (10-11): 1354-1363 (2006).
118. Chica, A., Corma, A., and Domine, E. M., "Catalytic oxidative desulfurization (ODS) of diesel fuel on a continuous fixed-bed reactor", *Journal of Catalysis*, 242 (2): 299-308 (2006).

119. Tam, P. S., Kittrell, J. R., Eldridge, J. W., "Desulfurization of fuel oil by oxidation and extraction. 2. Kinetic modeling of oxidation reaction", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29 (3): 324–329 (1990).
120. Tam, P. S., Kittrell, J. R., and Eldridge, J. W., "Desulfurization of fuel oil by oxidation and extraction. 1. Enhancement of extraction oil yield", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29 (3): 321–324 (1999).
121. Murata, S., Murata, K., Kidena, K., and Nomura, M., "A novel oxidative desulfurization system for diesel fuels with molecular oxygen in the presence of cobalt catalyst and aldehydes", *Energy & Fuels*, 18 (1): 116-121 (2004).
122. Collins, F. M., Lucy, A. R., and Sharp, C., "Oxidative desulphurisation of oils via hydrogen peroxide and heteropolyanion catalysis", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 117 (1-3): 397-403 (1997).
123. Otsuki, S., Nonaka, T., Takashima, N., Qian, W., Ishihara, A., Imai, T., and Kabe T., "Oxidative desulfurization of light gas oil and vacuum gas oil by oxidation and solvent extraction", *Energy Fuels*, 14 (6): 1232-1239 (2000).
124. Shahrani, F. A., Xiao, T., Llewellyn, S. A., Barri, S., Jiang, Z., Shia, H., Martinie G., and Green, M. L. H., "Desulfurization of diesel via the H₂O₂ oxidation of aromatic sulfides to sulfones using a tungstate catalyst", *Applied Catalysis B: Environmental*, 73 (3-4): 311-316 (2007).
125. König, J., "Cylinder-pressure based injector calibration for diesel engines", Msc. Thesis, *KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering*, Stockholm, Sweden, 9-15 (2008).
126. Brown, B. R., "Combustion data acquisition and analysis", Final Year Project, *Loughborough University, M. Eng. Automotive Engineering*, 12-45 (2001).
127. Checkel, M. D., Dale, J. D., "Computerized knock detection from engine pressure records", *SAE Paper 860028*, (1986).
128. Internet: Low-noise Lanczos Differentiators, <http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods/numerical-derivative/lanczos-low-noise-differentiators/>, (2011).
129. Horn, U., Egnell, R., Johansson, B., and Andersson, O., "Detailed heat release analyses with regard to combustion of RME and oxygenated fuels in an HSDI diesel engine", *SAE 2007-01-0627*, (2007).
130. Labecki, L., "Combustion and emission characteristics of biofuels in diesel engines", PhD. Thesis, *Brunel University School of Engineering and Design*, UK, 68-69 (2010).

131. Taskinen, P., "Modelling of spray combustion, emission formation and heat transfer in medium speed diesel engine", PhD. Thesis, *Tampere University of Technology*, Tampere, Finland, 1-96 (2005).
132. Dhananjaya, D. A., Sudhir, C. V., and Mohanan, P., "Combustion and emission characteristics of DI compression ignition engine operated on jatropha oil methyl ester with different injection parameters", *Int J Mech Mater Eng (IJMME)*, 4 (3): 220-231 (2009).
133. Verzee, S., Roels, T., "Experimental study of the injection characteristics of high pressure diesel and rapeseed oil fuel sprays", Msc. Thesis, *Ghent University Faculty of Engineering*, Gent, Belgium, (2011).
134. 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).
135. 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 I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering*, 219 (2): 253-261 (2005).
136. Hall, D., "Automotive engineering", *Global Media*, ISBN: 8190457500, Delhi, India, (2007).
137. Ulman, T. L., Spreen, K. B., and Mason, R. L., "Effects of cetane number, cetane improver, aromatics and oxygenates on 1994 heavy duty diesel engine emissions", *SAE Paper No. 941020* (1994).
138. Totten, G. E., Westbrook, S. R., and Shah, R. J., "Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance, and testing", *West Conshohocken, PA: ASTM International*, 131 (2003).
139. Huang, Z., Lu, H., Jian, D., Zeng, K., Liu, B., Zhang, J., and Wang, X., "Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles", *Bioresource Technology* 95 (3): 331-341 (2004).
140. Huang, Y., Zhou, L., and Pan, K., "Combustion characteristics of a direct-injection diesel engine fueled with Fischer-Tropsch diesel", *Frontiers Energy Power Engineering in China*, 1 (2): 239-244 (2007).
141. Ma, Z., Huang, Z., Li, C., Wang, X., and Miao, H., "Combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-propane blends", *Fuel*, 87 (8-9): 1711-1717 (2008).
142. Shihadeh, A., Hochgreb, S., "Diesel engine combustion of biomass pyrolysis oils", *Energy and Fuels*, 14 (2): 260-274 (2000).

143. Solantausta, Y., Nylund, N. O., Westerholm, M., Koljonen, T., and Oasmaa, A., "Wood pyrolysis oil as fuel in a diesel-power plant", *Bioresour. Technol.*, 46 (1-2): 177–188 (1993).
144. Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J., and Tazerout, M., "A comparative study of different methods of using animal fat as a fuel in a compression ignition engine", *J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, 128 (4): 907–914 (2006).
145. Huang, Z. H., Wang, H. W., Chen, H. Y., Zhou, L. B., and Jiang, D. M., "Study of combustion characteristics of a compression ignition engine fuelled with dimethyl ether", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 213 (6): 647-652 (1999).
146. Raghu, R., Ramadoss, G., "Optimization of injection timing and injection pressure of a DI diesel engine fueled with preheated rice bran oil", *Int. Journal of Energy and Environment (IJEE)*, 2 (4): 661-670 (2011).
147. Purushothaman, K., Nagarajan, G., "Effect of injection pressure on heat release rate and emissions in CI engine using orange skin powder diesel solution", *Energy Conversion and Management*, 50 (4): 962–969 (2009).
148. Venkanna, B. K., Venkataramana, R. C., "Performance, emission and combustion characteristics of direct injection diesel engine running on calophyllum inophyllum linn oil (honne oil)", *Int. J. Agric & Biol Eng*, 4 (1): 26-34 (2011).
149. Hariharan, V. S., Reddy, K. V., "Effect of injection pressure on diesel engine performance with sea lemon oil", *Indian J. of Sci. and Tech.*, 4 (8): 907-909 (2011).
150. Huang, Z. H., Jiang, D. M., Zeng, K., Liu, B., and Yang, Z. L., "Combustion characteristics and heat release analysis of a direct injection compression ignition engine fuelled with diesel–dimethyl carbonate blends", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217 (7): 595-605 (2003).

EK AÇIKLAMALAR A.

DENEY SONUÇLARINA AİT ÇİZELGELER

Çizelge EK A.1. Motor hızının ve LPY içeriğinin performansa etkisi deney sonuçları.

Motor Hızı	Yakıt Türü	Moment (Nm)	Güç (kW)	T _{EGZ} (°C)	η_e (%)	FÖET (MJ/kWh)
1400 d/d	DİZEL	7,1	1,0	265	20,68	17,40
	LPY20	7,2	1,0	240	21,27	16,92
	LPY40	7,0	1,0	230	21,14	17,03
	LPY60	7,1	1,0	245	21,15	17,02
	LPY80	7,2	1,1	230	20,94	17,19
	LPY100	6,6	1,0	260	19,37	18,59
2000 d/d	DİZEL	9,4	2,0	284	33,79	10,65
	LPY20	9,4	2,0	280	34,39	10,47
	LPY40	9,5	2,0	266	33,96	10,60
	LPY60	9,4	2,0	282	33,32	10,81
	LPY80	9,5	2,0	268	31,54	11,41
	LPY100	8,3	1,7	290	27,33	13,17
2600 d/d	DİZEL	7,6	2,1	300	29,82	12,07
	LPY20	7,5	2,1	314	29,42	12,23
	LPY40	7,6	2,1	307	30,09	11,96
	LPY60	7,5	2,0	310	29,99	12,00
	LPY80	7,6	2,1	300	28,81	12,49
	LPY100	7,1	1,9	350	25,71	14,00
3200 d/d	DİZEL	6,3	2,1	357	24,23	14,86
	LPY20	6,2	2,1	369	24,26	14,84
	LPY40	6,5	2,2	360	25,14	14,32
	LPY60	6,7	2,3	355	26,03	13,83
	LPY80	6,9	2,3	370	26,13	13,78

Çizelge EK A.2. Motor hızının ve LPY içeriğinin egzoz emisyonlarına etkisi deney sonuçları.

Motor Hızı	Yakıt Türü	HC (ppm)	CO (%)	NO _x (ppm)	İs (%)
1400 d/d	DİZEL	57	0,92	20	4,6
	LPY20	43	0,54	32	4,3
	LPY40	39	0,44	36	3,3
	LPY60	45	0,47	37	1,9
	LPY80	33	0,33	393	1,4
	LPY100	40	0,28	520	1
2000 d/d	DİZEL	25	0,25	137	14,3
	LPY20	21	0,21	91	14,4
	LPY40	20	0,13	136	8
	LPY60	27	0,22	83	8
	LPY80	21	0,21	461	6
	LPY100	35	0,19	372	3,8
2600 d/d	DİZEL	17	0,09	273	8,9
	LPY20	14	0,09	300	7,2
	LPY40	15	0,1	270	5,2
	LPY60	20	0,13	245	7,2
	LPY80	15	0,13	534	5
	LPY100	42	0,26	227	0,5
3200 d/d	DİZEL	15	0,09	291	5,4
	LPY20	14	0,09	327	5,3
	LPY40	14	0,1	290	4,1
	LPY60	17	0,11	330	2,8
	LPY80	19	0,13	488	2,5

Çizelge EK A.3. Motor hızının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (1400 d/d ve 2000 d/d).

Motor Hızı	Yanma Karakteristikleri	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	LPY90	LPY100
1400 d/d	$İÇO_{maks}$ (Joule/KMA)	9,79	12,30	12,37	14,01	17,93	18,29	19,83
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	39,40	38,66	37,34	35,67	34,92	34,55	33,36
	Püskürtme Gecik. (KMA)	13,60	12,96	12,90	12,98	12,81	12,78	12,77
	Tutuşma Gecik. (KMA)	4,32	5,57	6,56	8,48	11,09	12,08	14,22
	Pmaks (Bar)	70,13	73,81	72,98	73,07	79,36	78,55	72,36
	Pmaks Yeri (KMA)	3,92	4,62	1,61	3,62	3,84	4,80	8,06
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	5,09	6,70	6,49	7,38	9,43	9,24	6,79
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	19,08	20,47	20,54	21,54	21,10	22,14	22,00
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	20,32	18,19	16,80	14,13	13,81	12,41	11,36
	Tmaks.ort. Gaz (K)	1498,12	1550,67	1517,66	1671,43	1705,30	1622,50	1674,53
	Tmaks.ort.gaz Yeri (KMA)	15,00	16,00	12,00	15,00	14,00	10,00	11,00
Motor Hızı	Yanma Karakteristikleri	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	LPY90	LPY100
2000 d/d	$İÇO_{maks}$ (Joule/KMA)	12,52	13,53	14,62	15,74	17,88	19,76	21,40
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	37,64	37,19	35,66	34,87	34,17	33,18	21,33
	Püskürtme Gecik. (KMA)	14,41	14,02	13,73	13,60	13,25	13,23	13,15
	Tutuşma Gecik. (KMA)	5,55	6,68	8,07	9,62	12,05	14,41	16,90
	Pmaks (Bar)	73,27	73,79	76,15	77,68	79,17	77,04	72,41
	Pmaks Yeri (KMA)	6,08	1,08	2,24	3,68	5,93	8,66	11,48
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	7,11	7,62	8,17	8,42	8,80	8,28	7,43
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	21,03	21,30	21,20	21,78	21,71	22,36	22,95
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	16,60	15,89	14,46	13,09	12,47	10,82	-1,62
	Tmaks.ort. Gaz (K)	1472,98	1462,98	1569,08	1507,38	1466,76	1454,23	1483,88
	Tmaks.ort.gaz Yeri (KMA)	14,00	15,00	16,00	11,00	13,00	10,00	12,00

Çizelge EK A.4. Motor hızının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (2600 d/d ve 3200 d/d).

Motor Hızı	Yanma Karakteristikleri	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	LPY90	LPY100
2600 d/d	ICO_{maks} (Joule/KMA)	14,08	15,10	16,40	17,46	19,98	22,20	21,91
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	36,13	36,07	35,64	34,44	33,63	22,50	23,55
	Püskürtme Gecik. (KMA)	13,72	12,80	12,48	12,19	11,86	11,76	11,43
	Tutuşma Gecik. (KMA)	8,29	9,88	11,24	13,05	15,74	18,23	24,00
	Pmaks (Bar)	77,10	79,59	81,11	80,99	80,44	76,90	49,73
	Pmaks Yeri (KMA)	3,46	4,00	4,94	6,51	9,35	12,17	21,14
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	6,74	7,29	7,92	7,92	7,87	7,43	2,64
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	22,98	23,32	23,28	22,77	22,40	22,01	25,56
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	13,15	12,75	12,35	11,68	11,23	0,48	-2,01
	Tmaks.ort. Gaz (K)	1374,43	1429,66	1520,37	1426,39	1483,64	1530,05	1444,39
	Tmaks.ort.gaz Yeri (KMA)	13,00	13,00	14,00	16,00	10,00	13,00	23,00
Motor Hızı	Yanma Karakteristikleri	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	LPY90	LPY100
3200 d/d	ICO_{maks} (Joule/KMA)	15,95	17,16	17,84	19,83	23,05	24,83	-
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	37,42	38,06	38,94	35,30	34,49	20,37	-
	Püskürtme Gecik. (KMA)	12,11	11,75	11,69	11,44	11,09	10,87	-
	Tutuşma Gecik. (KMA)	12,83	13,92	14,72	16,77	20,00	25,47	-
	Pmaks (Bar)	74,91	76,62	77,49	76,25	72,57	55,98	-
	Pmaks Yeri (KMA)	7,89	8,34	8,83	10,88	13,94	20,69	-
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	5,18	5,72	6,40	6,44	6,12	3,75	-
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	21,06	21,33	20,59	21,78	21,91	23,67	-
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	16,37	16,73	18,35	13,51	12,57	-3,29	-
	Tmaks.ort. Gaz (K)	1610,75	1545,39	1488,77	1788,96	1727,20	1837,52	-
	Tmaks.ort.gaz Yeri (KMA)	21,00	21,00	21,00	12,00	15,00	22,00	-

Çizelge EK A.5. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin performansa etkisi deney sonuçları.

Püs. Bas.	Motor Yüğü	Yakıt Türü	T _{Egz} (°C)	η_e (%)	FÖET (MJ/kWh)	Püs. Bas.	Motor Yüğü	Yakıt Türü	T _{Egz} (°C)	η_e (%)	FÖET (MJ/kWh)		
185 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	LPY20	295	16,72	21,53	225 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	LPY20	290	16,79	21,44		
		LPY40	305	16,72	21,53			LPY40	291	16,70	21,56		
		LPY60	312	16,40	21,95			LPY60	298	16,52	21,80		
		LPY80	328	16,16	22,27			LPY80	330	16,02	22,47		
	%50 Yük (5,4 Nm)	LPY20	368	25,22	14,27		%50 Yük (5,4 Nm)	LPY20	349	25,68	14,02		
		LPY40	375	25,28	14,24			LPY40	349	25,74	13,99		
		LPY60	387	25,06	14,36			LPY60	370,8	25,52	14,11		
		LPY80	405	24,47	14,71			LPY80	370	25,03	14,39		
	%75 Yük (8,1 Nm)	LPY20	489	27,05	13,31		%75 Yük (8,1 Nm)	LPY20	476,7	27,53	13,08		
		LPY40	495	27,11	13,28			LPY40	467,4	27,45	13,12		
		LPY60	520	26,74	13,46			LPY60	470	27,23	13,22		
		LPY80	535	26,10	13,80			LPY80	460	27,00	13,33		
	%100 Yük (10,8 Nm)	LPY20	667	26,84	13,41		%100 Yük (10,8 Nm)	LPY20	644,4	27,36	13,16		
		LPY40	685	26,92	13,37			LPY40	643	27,34	13,17		
		LPY60	695	26,54	13,57			LPY60	657	26,72	13,47		
		LPY80	708	26,14	13,77			LPY80	651	26,33	13,67		
	205 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	DİZEL	290	16,75		21,49	245 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	LPY20	283	16,77	21,47
			LPY20	292	16,82		21,41			LPY40	285	16,43	21,91
			LPY40	292,7	16,84		21,38			LPY60	290	16,17	22,26
			LPY60	301,5	16,65		21,62			LPY80	342	15,63	23,03
LPY80			320,8	16,12	22,34	LPY20	341,3			25,31	14,22		
%50 Yük (5,4 Nm)		DİZEL	352	25,44	14,15	%50 Yük (5,4 Nm)	LPY40		342,7	25,14	14,32		
		LPY20	352	25,54	14,10		LPY60		372	24,60	14,63		
		LPY40	360	25,55	14,09		LPY80		379,8	24,33	14,80		
		LPY60	375	25,43	14,16		LPY20		475	27,65	13,02		
		LPY80	383,6	24,70	14,57		LPY40		465	27,67	13,01		
%75 Yük (8,1 Nm)		DİZEL	490	27,07	13,30	%75 Yük (8,1 Nm)	LPY60		475	26,95	13,36		
		LPY20	480	27,19	13,24		LPY80		482	26,86	13,40		
		LPY40	476	27,31	13,18		LPY20		637,6	27,41	13,13		
		LPY60	474,2	26,88	13,39		LPY40		635,3	27,35	13,16		
		LPY80	465	26,65	13,51		LPY60		646	27,09	13,29		
%100 Yük (10,8 Nm)		DİZEL	660	27,23	13,22	%100 Yük (10,8 Nm)	LPY80		625,1	27,17	13,25		
		LPY20	656	27,20	13,23		LPY20		290	16,79	21,44		
		LPY40	652	27,38	13,15		LPY40		291	16,70	21,56		
		LPY60	669	26,72	13,47		LPY60		298	16,52	21,80		
		LPY80	643	26,05	13,82		LPY80		330	16,02	22,47		

Çizelge EK A.6. Motor yükünün, püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin emisyonlara etkisi deney sonuçları.

Püs. Bas.	Motor Yükü	Yakıt Türü	HC (ppm)	CO (%)	NO _x (ppm)	İs (%)	Püs. Bas.	Motor Yükü	Yakıt Türü	HC (ppm)	CO (%)	NO _x (ppm)	İs (%)
185 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	LPY20	15	0,08	320	17,3	225 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	LPY20	13	0,06	328	12,4
		LPY40	14	0,09	329	17,4			LPY40	16	0,08	326	15,2
		LPY60	19	0,11	354	19,4			LPY60	22	0,13	344	18,8
		LPY80	21	0,32	382	33,7			LPY80	40	0,29	354	21,8
	%50 Yük (5,4 Nm)	LPY20	15	0,06	354	34,4		%50 Yük (5,4 Nm)	LPY20	11	0,05	400	19,8
		LPY40	14	0,07	386	33,6			LPY40	12	0,05	427	22,2
		LPY60	15	0,08	474	36			LPY60	17	0,06	504	25,6
		LPY80	16	0,13	497	44			LPY80	23	0,10	519	31
	%75 Yük (8,1 Nm)	LPY20	19	0,14	536	52,4		%75 Yük (8,1 Nm)	LPY20	14	0,13	579	31,6
		LPY40	18	0,14	561	46,5			LPY40	13	0,11	600	30
		LPY60	21	0,18	600	44			LPY60	19	0,12	642	34
		LPY80	25	0,40	654	52,4			LPY80	28	0,15	664	36
	%100 Yük (10,8 Nm)	LPY20	58	2,24	516	79		%100 Yük (10,8 Nm)	LPY20	43	1,93	523	60,4
		LPY40	55	2,11	564	74			LPY40	37	1,87	597	56,4
		LPY60	56	2,21	853	70,4			LPY60	33	2,00	843	59,7
		LPY80	64	2,21	757	65			LPY80	56	2,02	794	62
205 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	DİZEL	15	0,05	313	14,3	245 Bar	%25 Yük (2,7 Nm)	DİZEL	14	0,07	325	9,6
		LPY20	14	0,06	324	13,8			LPY20	17	0,09	334	11,1
		LPY40	15	0,07	330	12,6			LPY40	23	0,13	346	17,3
		LPY60	20	0,10	352	18			LPY60	46	0,28	336	21,3
		LPY80	37	0,31	370	27,4			LPY80	12	0,05	405	26
	%50 Yük (5,4 Nm)	DİZEL	14	0,05	355	23,4		%50 Yük (5,4 Nm)	DİZEL	17	0,06	432	19,4
		LPY20	13	0,05	359	24,2			LPY20	19	0,10	509	24
		LPY40	13	0,06	395	22,6			LPY40	26	0,15	478	29,1
		LPY60	17	0,07	470	26			LPY60	10	0,13	591	29
		LPY80	19	0,12	505	35			LPY80	11	0,12	612	20,8
	%75 Yük (8,1 Nm)	DİZEL	17	0,15	526	36		%75 Yük (8,1 Nm)	DİZEL	21	0,15	645	32,6
		LPY20	17	0,14	557	35			LPY20	30	0,18	669	28
		LPY40	16	0,13	578	33,5			LPY40	46	1,90	531	48,6
		LPY60	18	0,16	638	36			LPY60	44	1,87	610	47
		LPY80	23	0,18	642	43			LPY80	43	2,03	913	57
	%100 Yük (10,8 Nm)	DİZEL	60	2,08	498	62,5		%100 Yük (10,8 Nm)	DİZEL	61	1,87	810	55
		LPY20	58	2,06	539	61,6			LPY20	13	0,06	328	12,4
		LPY40	41	1,89	592	59			LPY40	16	0,08	326	15,2
		LPY60	45	2,19	880	54			LPY60	22	0,13	344	18,8
		LPY80	55	2,26	772	64			LPY80	40	0,29	354	21,8

Çizelge EK A.7. Motor yükünün (%25 Yük (2,7 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).

	185 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	14,39	15,40	17,43	16,12
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	33,97	33,86	21,30	35,15
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	12,02	11,92	11,73	11,47
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	14,24	15,67	18,19	12,85
Pmaks (Bar)	–	67,90	66,55	63,16	45,02
Pmaks Yeri (KMA)	–	8,94	10,47	12,90	1,20
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,36	4,34	4,19	1,40
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,74	22,41	22,08	38,68
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	12,23	11,45	-0,78	-3,53
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1543,41	1537,15	1495,56	1492,15
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	10,00	12,00	15,00	26,00
	205 bar				
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	13,35	14,13	15,40	17,31	16,87
Toplam Yanma Süresi (KMA)	33,41	32,94	33,17	19,85	36,07
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	13,52	13,32	13,24	12,68	12,30
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	11,92	13,01	14,40	17,48	9,60
Pmaks (Bar)	67,94	67,45	66,60	62,62	46,39
Pmaks Yeri (KMA)	8,15	9,10	10,46	13,44	1,09
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	4,37	4,45	4,38	3,91	1,46
Ani Yanma Periyodu (KMA)	21,57	21,67	22,35	22,84	40,10
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	11,85	11,27	10,82	-2,99	-4,03
Tmaks.ort. Gaz (K)	1589,27	1637,22	1736,95	1934,94	1874,10
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	10,00	10,00	12,00	15,00	24,00

Çizelge EK A.8. Motor yükünün (%25 Yük (2,7 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).

	225 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	14,25	15,24	17,64	15,70
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	32,81	34,16	19,53	36,57
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	14,94	13,91	13,81	13,09
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	11,96	14,18	17,43	9,45
Pmaks (Bar)	–	65,77	64,50	58,68	45,83
Pmaks Yeri (KMA)	–	9,57	11,15	14,69	0,93
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,19	4,00	3,43	1,45
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	22,10	21,91	23,75	40,46
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	10,70	12,25	-4,22	-3,90
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1502,81	1759,04	1820,45	1957,33
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	11,00	12,00	17,00	25,00
	245 bar				
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	13,74	15,28	17,13	12,74
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	32,61	32,86	20,01	43,67
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	15,41	15,08	15,23	14,02
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	11,45	13,38	16,34	12,94
Pmaks (Bar)	–	65,57	64,69	58,21	45,84
Pmaks Yeri (KMA)	–	9,73	11,39	14,82	0,58
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,07	4,14	3,47	1,44
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,13	21,54	22,43	43,04
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	11,48	11,32	-2,42	0,64
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1557,45	1584,77	1602,81	1295,59
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	11,00	13,00	17,00	33,00

Çizelge EK A.9. Motor yükünün (%50 Yük (5,4 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).

	185 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	15,20	15,89	18,70	22,03
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	35,15	34,12	33,46	19,15
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	11,87	11,73	11,76	11,62
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	14,34	15,60	17,78	21,39
Pmaks (Bar)	–	69,61	68,47	67,44	61,32
Pmaks Yeri (KMA)	–	8,93	9,97	12,18	16,42
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,65	4,77	5,16	4,38
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,79	21,67	21,46	22,99
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	13,37	12,45	12,00	-3,84
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1515,17	1615,97	1662,18	1859,75
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	10,00	12,00	14,00	18,00
	205 bar				
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	14,04	15,07	15,90	18,49	21,53
Toplam Yanma Süresi (KMA)	35,39	35,35	34,66	34,61	20,91
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	13,31	12,93	12,84	12,58	12,33
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	12,38	13,50	14,77	16,75	22,69
Pmaks (Bar)	68,71	69,14	67,99	68,20	51,36
Pmaks Yeri (KMA)	8,35	9,09	10,31	12,00	20,22
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	4,52	4,76	4,68	5,07	2,85
Ani Yanma Periyodu (KMA)	21,31	21,57	21,39	21,68	24,98
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	14,08	13,78	13,27	12,93	-4,07
Tmaks.ort. Gaz (K)	1564,85	1601,06	1728,50	1773,13	1821,35
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	10,00	11,00	12,00	14,00	22,00

Çizelge EK A.10. Motor yükünün (%50 Yük (5,4 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).

	225 bar					
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	
%50 Yük (5,4 Nm)	IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	15,84	17,06	19,89	22,10
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	33,13	34,26	33,23	19,97
	Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	14,19	13,72	13,80	13,38
	Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	12,83	14,82	16,82	21,91
	Pmaks (Bar)	–	69,03	66,77	66,13	53,75
	Pmaks Yeri (KMA)	–	9,70	11,46	13,42	19,66
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,81	4,62	5,04	3,43
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,98	22,46	22,38	23,71
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	11,14	11,79	10,85	-3,74
	Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1759,21	1842,32	1778,98	1901,02
	Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	11,00	13,00	15,00	21,00
	245 bar					
	IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	16,10	16,92	18,96	18,79
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	36,27	34,38	34,69	37,25
	Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	15,20	14,92	14,87	14,26
	Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	11,76	13,42	16,47	9,06
	Pmaks (Bar)	–	71,11	69,24	63,73	46,19
	Pmaks Yeri (KMA)	–	9,58	11,03	14,19	0,58
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	5,27	5,20	4,61	1,69
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,04	21,67	21,66	40,68
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	15,23	12,72	13,03	-3,43	
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1460,98	1435,89	1566,15	1547,66	
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	11,00	12,00	16,00	26,00	

Çizelge EK A.11. Motor yükünün (%75 Yük (8,1 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).

	185 bar					
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80	
%75 Yük (8,1 Nm)	İÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	17,21	18,69	19,94	22,51
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	39,22	36,53	33,52	33,25
	Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	11,80	11,63	11,70	11,42
	Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	14,65	15,97	17,30	19,76
	Pmaks (Bar)	–	71,71	72,47	71,81	69,89
	Pmaks Yeri (KMA)	–	9,43	10,56	11,56	13,88
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,76	5,16	5,83	5,90
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,56	21,40	22,00	21,82
	Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	17,66	15,13	11,53	11,43
	Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1846,94	1905,51	1932,69	1963,37
	Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	22,00	12,00	13,00	15,00
	205 bar					
	İÇO _{maks} (Joule/KMA)	15,76	17,09	18,74	20,75	23,04
	Toplam Yanma Süresi (KMA)	37,44	37,45	36,19	34,74	35,05
	Püskürtme Gecikmesi (KMA)	13,18	12,91	12,77	12,41	12,43
	Tutuşma Gecikmesi (KMA)	12,96	13,68	15,03	16,93	19,27
	Pmaks (Bar)	69,60	71,80	72,38	72,63	69,43
	Pmaks Yeri (KMA)	9,17	9,50	10,58	12,00	14,43
	Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	4,32	4,84	5,31	5,94	5,68
	Ani Yanma Periyodu (KMA)	21,86	21,41	21,20	21,66	22,30
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	15,58	16,04	14,99	13,08	12,75	
Tmaks.ort. Gaz (K)	1791,29	1814,31	1737,71	2231,97	1865,50	
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	22,00	23,00	12,00	13,00	16,00	

Çizelge EK A.12. Motor yükünün (%75 Yük (8,1 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).

	225 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
İÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	17,75	19,23	21,43	24,80
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	35,26	34,05	33,20	19,97
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	13,92	13,68	13,50	13,03
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	13,34	14,82	17,23	20,86
Pmaks (Bar)	–	71,46	71,46	69,07	64,07
Pmaks Yeri (KMA)	–	10,15	11,24	13,29	17,08
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	4,98	5,46	5,70	4,98
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,74	21,50	22,27	22,11
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	13,52	12,56	10,93	-2,14
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1780,53	2222,45	1863,59	1929,22
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	23,00	13,00	15,00	18,00
	245 bar				
İÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	17,15	18,78	20,77	24,35
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	38,48	36,52	33,91	32,80
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	14,93	14,60	14,52	13,91
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	12,12	13,60	16,10	20,07
Pmaks (Bar)	–	72,65	73,24	69,83	64,11
Pmaks Yeri (KMA)	–	9,82	10,84	13,10	17,09
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	5,32	5,95	5,73	5,06
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	20,95	20,80	21,38	22,02
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	17,54	15,72	12,53	10,78
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1535,86	1711,61	1533,45	1851,88
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	23,00	12,00	15,00	19,00

Çizelge EK A.13. Motor yükünün (%100 Yük (10,8 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (185 bar ve 205 bar).

	185 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
İÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	18,76	20,33	20,72	23,99
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	40,67	40,66	37,40	35,02
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	10,76	11,06	11,33	11,13
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	15,20	15,96	16,81	19,30
Pmaks (Bar)	–	74,32	76,07	73,99	73,59
Pmaks Yeri (KMA)	–	8,93	9,72	10,81	13,08
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	5,42	5,96	5,80	6,39
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	22,04	21,99	21,87	21,56
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	18,63	18,67	15,53	13,45
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1813,58	1927,49	1857,32	1954,00
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	21,00	22,00	23,00	14,00
	205 bar				
İÇO _{maks} (Joule/KMA)	16,86	18,44	19,94	23,92	24,36
Toplam Yanma Süresi (KMA)	40,40	39,54	38,38	35,96	35,69
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	12,37	12,10	11,88	11,38	11,83
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	13,21	14,32	15,71	18,30	19,12
Pmaks (Bar)	71,09	72,79	73,49	76,42	73,53
Pmaks Yeri (KMA)	8,54	9,39	10,36	12,41	13,68
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	4,50	4,99	5,47	6,66	6,26
Ani Yanma Periyodu (KMA)	22,41	22,58	22,41	22,32	22,05
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	17,98	16,96	15,97	13,64	13,64
Tmaks.ort. Gaz (K)	1872,42	1982,70	2033,44	1868,00	2166,46
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	21,00	22,00	23,00	14,00	15,00

Çizelge EK A.14. Motor yükünün (%100 Yük (10,8 Nm)), püskürtme basıncının ve LPY içeriğinin yanma karakteristiklerine etkisi deney sonuçları (225 bar ve 245 bar).

	225 bar				
	DİZEL	LPY20	LPY40	LPY60	LPY80
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	19,14	21,85	22,54	25,36
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	41,57	37,23	35,03	34,03
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	12,77	12,29	12,62	12,34
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	14,09	15,82	17,06	19,57
Pmaks (Bar)	–	72,80	75,65	73,37	71,53
Pmaks Yeri (KMA)	–	9,73	10,83	12,37	14,69
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	5,09	6,06	5,98	6,10
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	22,14	21,89	22,32	22,08
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	19,43	15,34	12,71	11,94
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1712,37	1771,72	1957,91	2039,39
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	22,00	23,00	14,00	16,00
	245 bar				
IÇO _{maks} (Joule/KMA)	–	18,85	21,04	23,31	26,94
Toplam Yanma Süresi (KMA)	–	39,69	37,42	35,38	33,28
Püskürtme Gecikmesi (KMA)	–	13,44	13,13	13,09	12,54
Tutuşma Gecikmesi (KMA)	–	13,35	14,90	16,90	20,31
Pmaks (Bar)	–	74,15	75,83	75,39	72,94
Pmaks Yeri (KMA)	–	9,64	10,67	12,57	15,43
Basınç Artış Hızı (Bar/KMA)	–	5,22	6,05	6,49	6,91
Ani Yanma Periyodu (KMA)	–	21,21	21,96	21,01	21,16
Dif. Kont. Yanma Periyodu (KMA)	–	18,48	15,46	14,37	12,12
Tmaks.ort. Gaz (K)	–	1722,42	1842,72	1738,49	2047,42
Tmaks.ort.gaz'ın Yeri (KMA)	–	22,00	23,00	14,00	17,00

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan DOĞAN, 8 Kasım 1977 yılında Tokat'da doğdu. İlköğretimi Ormandibi İlkokulu, orta öğrenimini Tokat Plevne Ortaokulu ve lise öğrenimini Tokat Teknik Lisesi Motor Bölümünde tamamladı. 2001 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı'ndan mezun oldu. 2006 yılında, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamlayarak doktora çalışmalarına başladı. 2002–2008 yılları arasında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2008 yılından itibaren Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. Halen aynı kurumda çalışmalarına devam etmektedir. Oğuzhan DOĞAN evli ve bir çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Karabük Üniversitesi
T. E. F. Makine Eğitimi Bölümü
Otomotiv ABD
100. Yıl / KARABÜK

Tel: +903704338200

E-posta: dogan_oguzhan@yahoo.co.uk.