



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**PPC (KISMİ ÖN KARIŞIMLI SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ) BİR MOTORDA
KEROSEN TÜREVLERİNİN YAKIT OLARAK KULLANIMININ MOTOR
PERFORMANSINA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

FAZIL AKGÜN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. HASAN YAMIK

BİLECİK, 2026

10801235

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI

**PPC (KİSMİ ÖN KARIŞIMLI SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ) BİR MOTORDA
KEROSEN TÜREVLERİNİN YAKIT OLARAK KULLANIMININ MOTOR
PERFORMANSINA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

FAZIL AKGÜN

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. HASAN YAMIK

BİLECİK, 2026

10801235

BEYAN

“PPC (Kısmi Ön Karışımı Sıkıştırma İle Ateşlemeli) Bir Motorda Kerosen Türevlerinin Yakıt Olarak Kullanımının Motor Performansına Ve Emisyonlara Etkisinin Araştırılması” başlıklı doktora tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tezimi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Fazıl AKGÜN

.../.../2026

İmza:

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca yol gösteren, çalışmama yön veren ve katkılarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Hasan YAMIK'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme sürecim boyunca sağladıkları değerli katkılar, yapıcı eleştiriler ve teşvikler için Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU ve Prof. Dr. Oğuz ARSLAN' a, çalışmamın laboratuvar testleri aşamasındaki yardım ve destekleri için Doç. Dr. Samet ÇELEBİ ile Doç. Dr. Üsâme DEMİR' e çok teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman yanımda olup desteklerini esirgemedikleri için sevgili eşim Dilek AKGÜN ve çocuklarım Neslişah Liva ile Ebubekir Tuğrul AKGÜN' e, bugünlere ulaşmamda büyük emekleri olan kıymetli Annem Nurdan ve Babam Tahsin AKGÜN' e en içten dileklerle teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada, tek silindirli bir dizel motorda 1800 rpm max. tork devrinde beş farklı motor yükü için deneyler yapılmış, %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında Kısmi Ön Karışım Sıkıştırma Ateşlemesi (PPCI) koşulları altında JP8-dizel karışımlarının yanma, performans ve emisyon özellikleri incelenmiştir. PPCI modunda JP8-dizel yakıt karışımlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50,100JP8D0) verileri ile standart modda dizel yakıtının verileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, silindir basıncının tüm yakıtlar için motor yüküyle arttığını göstermektedir. %50 motor yükünde, %10 ön enjeksiyon oranı ile 10JP8D90 yakıtı 71.72 bar'lık pik basıncına ulaşırken dizel yakıtının pik basınç değeri 66.59 bar dır. Karışım yakıtlarda JP8 oranının artırılması, tutuşma gecikmesinin uzaması ve dizel yakıtına göre düşük olan enerji yoğunlu nedeniyle ulaşılan tepe basıncında azalmaya sebep olmaktadır. Ön enjeksiyon oranının artışı ise yüksek motor yüklerinde tepe basıncında iyileşme sağlamaktadır. Tam yükte %40 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı ile 85.85 bar'lık en yüksek tepe basıncı elde edilmiştir(Std. dizel 69.88 bar). %75 yükte, 30JP8D70 yakıtı, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranında %0, %30 ön enjeksiyon oranında ise %1.39 ile en düşük is emisyonuna ulaşırken, dizel için bu oran %8.57'dir. Tam yükte, 100JP8D0 yakıtı %30 ön enjeksiyon oranında %7.05 ile dizelden (%14.41) önemli ölçüde daha düşük is emisyonu sağlamıştır. 50JP8D50 yakıtı %75 yükte %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında Std. dizel yakıtına en yakın ve JP8-dizel karışım yakıtları içerisinde en düşük NO_x emisyonları sergilerken, tam yükte ise Std. dizel yakıtından %8.6 daha düşük (852 ppm) NO_x sergilemiştir. Referans dizel yakıtı en yüksek termal verimliliğe %50 yükte %30.71 ile ulaşırken, 100JP8D0 yakıtı ise %10 ön enjeksiyon oranında, %28.72 ile std. dizel yakıtına en yakın değere ulaşan yakıt olmuştur. Bu sonuçlar, JP8 ve karışım yakıtların PPCI yanma modunun desteği ve ön enjeksiyon oranının optimizasyonu ile dizel yakıtına alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: PPCI, JP8, ön püskürtme oranı, motor performansı, egzoz emisyonları.

ABSTRACT

In this study, experiments were conducted on a single-cylinder diesel engine at a maximum torque speed of 1800 rpm across five distinct engine loads. The combustion, performance, and emission characteristics of JP8-diesel blends were investigated under Partially Premixed Compression Ignition (PPCI) conditions, utilizing pilot injection ratios of 10%, 20%, 30%, and 40%. The data obtained from JP8-diesel fuel blends (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) in PPCI mode were benchmarked against baseline diesel fuel operated in standard mode. The results indicate that in-cylinder pressure increases proportionally with engine load for all tested fuels. At 50% engine load and a 10% pilot injection ratio, the 10JP8D90 blend reached a peak pressure of 71.72 bar, whereas the peak pressure for standard diesel was measured at 66.59 bar. Increasing the JP8 fraction in the blends resulted in a decline in peak cylinder pressure, which is attributed to the prolonged ignition delay and the lower energy density of JP8 compared to conventional diesel. However, an increase in the pilot injection ratio was found to enhance peak pressure under high-load conditions. At full load, the 10JP8D90 blend achieved the highest peak pressure of 85.85 bar with a 40% pilot injection ratio, compared to 69.88 bar for standard diesel. Regarding emission characteristics, at 75% load, the 30JP8D70 blend yielded the lowest soot emissions—recorded at 0% for 10% and 20% pilot injection ratios, and 1.39% for a 30% ratio—while diesel exhibited a soot ratio of 8.57%. At full load and a 30% pilot injection ratio, 100JP8D0 achieved significantly lower soot emissions (7.05%) compared to diesel (14.41%). Furthermore, the 50JP8D50 blend exhibited NO_x emissions closest to standard diesel and the lowest among all JP8-diesel blends at 75% load; at full load, it demonstrated an 8.6% reduction (852 ppm) in NO_x compared to standard diesel. In terms of engine performance, standard diesel achieved its maximum Brake Thermal Efficiency (BTE) of 30.71% at 50% load. Among the blends, 100JP8D0 at a 10% pilot injection ratio showed the closest value to diesel with 28.72%. These findings suggest that JP8 and its blends, supported by the PPCI combustion mode and optimized pilot injection ratios, can serve as viable alternatives to conventional diesel fuel.

Keywords: PPCI, JP8, pre-injection rate, engine performance, exhaust emissions.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
GRAFİKLER LİSTESİ	ix
KISALTMALAR/SİMGELER LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İçten Yanmalı Motorlarda Yanma	3
1.2. Dizel Motorlarda Geleneksel Yanma.....	4
1.3. Düşük Sıcaklıkta Yanma (LTC)	6
1.3.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma (HCCI).....	8
1.3.2. Kinetik Modüllü Yanma (MK).....	10
1.3.3. Üniform Hacimli Yanma Sistemi (UNİBUS)	10
1.3.4. Reaktif Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma (RCCI).....	10
1.3.5. Benzinli Sıkıştırma ile Ateşlemeli Yanma (GCI).....	11
1.3.6. Kısmi Ön Karışımli Yanma (PPCI).....	11
1.4. Yakıt	13
1.4.1. Kerosen.....	14
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	16
3. MATERYAL VE METOD	29
3.1. Materyal	29
3.1.1. Deney Motoru	29
3.1.2. Deney düzeneği	30
3.1.3. Dinamometre.....	31
3.1.4. Tüketilen yakıt miktarının ölçümü	32
3.1.5. Motor hızı ölçümü	33

3.1.6. Yakıt Püskürtme sistemi.....	33
3.1.7. Silindir İçi Basınç Ölçümü.....	34
3.1.8. Emisyon Ölçümü	35
3.1.9. Yakıt özellikleri.....	36
3.2. Belirsizlik analizi	36
3.3. Ölçüm Metodu	39
3.4. Hesaplama Yöntemleri.....	41
3.4.1. Motor momenti	41
3.4.2. Motor efektif gücü	41
3.4.3. Yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi	42
3.4.4. Termal verimin hesaplanması	44
3.4.5. Krank açısına bağlı olarak pistonun aldığı yolun ve anlık silindir hacminin hesabı	44
3.4.6. Isı salınım oranı (HRR), Kümülatif ısı salınımı (CHR) ve Yanma süresinin (CD) hesaplanması	46
4. DENEY SONUÇLARI	49
4.1. Yakıt karışım oranının yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi.....	49
4.1.1. Farklı yakıt karışım oranları için silindir içi basınçlarının ve ısı salınım oranının (HRR) değişimi.....	49
4.1.2. Farklı yakıt karışım oranları için silindirde oluşan maksimum basıncın değişimi.....	59
4.1.3. Farklı yakıt karışımları için silindir içi basınç artış oranı (MPRR)'nin değişimi.....	62
4.1.4. Farklı yakıt karışım oranları için motor yüküne bağlı olarak kümülatif ısı salınımının değişimi	65
4.1.5. Farklı yakıt karışım oranları için CA10, CA90 ve yanma süresi (CD)'nin değişimi	69
4.1.6. Farklı yakıt karışım oranları için termik verimdeki değişim	79
4.1.7. Farklı yakıt karışım oranları için (ÖYT) özgül yakıt tüketimindeki değişim	82

4.1.8. Farklı yakıt karışım oranları için ölçülen CO, CO ₂ , HC, NO _x ve İS emisyonu değerleri.....	86
4.2. Ön püskürtme oranlarının yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi.....	102
4.2.1. Farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçları ve ısı salınım oranlarının (HRR) değişimi.....	102
4.2.2. Farklı ön püskürtme oranları için silindirde oluşan maksimum basıncın değişimi.....	111
4.2.3. Farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınç artış hızının (MPRR) değişimi	114
4.2.4. Farklı ön püskürtme oranları için motor yüküne bağlı olarak kümülatif ısı salınımının değişimi.....	117
4.2.5. Ön püskürtme oranına bağlı olarak CA10, CA90 ve yanma süresinin (CD) değişimi	121
4.2.6. Ön püskürtme oranlarının termik verime etkisi.....	128
4.2.7. Ön püskürtme oranlarının (ÖYT) özgül yakıt tüketimine etkisi.....	132
4.2.8. Farklı ön püskürtme oranları için ölçülen CO, CO ₂ , HC, NO _x ve İS emisyonu değişimleri	134
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	150
KAYNAKLAR.....	154
EKLER	169

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1 Yakıtların fiziksel özellikleri	15
Tablo 3.1 Deney motorunun teknik özellikleri	30
Tablo 3.2 Dinamometre teknik özellikleri	32
Tablo 3.3 Hassas terazi teknik özellikleri	33
Tablo 3.4 Enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri	34
Tablo 3.5 Egzoz gaz analizörü teknik verileri	36
Tablo 3.6 JP8 jet yakıtı ve dizel yakıtının karışım oranları ve kodları	36
Tablo 3.7 JP8 jet yakıtı ve dizel yakıtının fiziksel özellikleri.....	36
Tablo 3.8 Chauvenet kriteri	37

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Türkiye’de 2021 yılı sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı.....	2
Şekil 1.2 Üç Farklı yanma şeklinin şematik bir gösterimi ve yanma modellerinin ilgili yanma şekillerine göre durumu	3
Şekil 1.3 Konvansiyonel dizel yanmasının ısı yayılım oranı	5
Şekil 1.4 Dizel Motorlarda yanma sırasında Eşdeğerlik oranı ve yanma sıcaklığına bağlı olarak İ _s ve NO _x oluşumu.....	7
Şekil 1.5 Tipik LTC yanma olayının KMA’na bağlı ısı salınımı oranı.	8
Şekil 1.6 Dizel, Benzinli ve HCCI motorda yanmanın gelişimi	9
Şekil 1.7 PPCI yanma modelinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar	12
Şekil 1.8 Ham petrolün damıtılması.....	14
Şekil 2.1 Düşük yükte, EGR ile seyreltilmiş, tek enjeksiyonlu benzin PPC' nin genişletilmiş püskürtme modeli.....	19
Şekil 2.2 Yanma odasının şeması ve optik görüntülemenin görüş alanı.....	23
Şekil 3.1 Deney Motoru ve revize edilmiş silindir kapağı	29
Şekil 3.2 Deney düzeneğinin şeması.....	30
Şekil 3.3 KEMSAN KK112 model dinamometre ve kontrol panosu	31
Şekil 3.4 Esit STCS 50 model S tipi yük hücresi	32
Şekil 3.5 Hassas terazi ve kronometre.....	32
Şekil 3.6 Motor devir sensörü	33
Şekil 3.7 Enjeksiyon kontrol sistemi paneli	34
Şekil 3.8 Silindir içi basınç sensörü, sinyal düzenleyicisi ve ölçüm ara yüzü	35
Şekil 3.9 BİLSA MOD 2210 WINXP-K Egzoz gaz analizörü.....	35

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 2.1 Benzinli PPCI modda çalışan bir motorda EGR oranının NO_x ve kurum oluşumuna etkisi	16
Grafik 2.2 PPC modda çalışan motorda yakıt enjeksiyon basıncının IMEP'e ve emisyonlara etkisi	17
Grafik 2.3 PPC yük aralığı ve çalışma koşulları	18
Grafik 2.4 Emme giriş sıcaklığının ısı salınım oranına etkisi	18
Grafik 2.5 Düşük oktanlı yakıtların 1500 d/d'da SAPCCI yanma modun da silindir içi basınç ve HRR değişimleri	20
Grafik 2.6 SAPCCI modunda CO, HC, NO_x ve CO_2 emisyonlarındaki değişimler	21
Grafik 2.7 Tek enjeksiyon stratejisinde farklı enjeksiyon zamanlaması altında silindir içi basınç ve HRR değişimleri	25
Grafik 2.8 Farklı ön enjeksiyon zamanlamaları için silindir içi basınç ve HRR değişimi	26
Grafik 2.9 Farklı ön enjeksiyon oranları için silindir içi basınç ve HRR değişimi	26
Grafik 2.10 Etanol-benzin karışımı yakıtlarda Duman, NO_x emisyonları ve HRR değişimleri	27
Grafik 4.1 Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım oranları (HRR)	50
Grafik 4.2 Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları	54
Grafik 4.3 Motor %100 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları	57
Grafik 4.4 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak yakıt karışım oranının etkisi ile oluşan maksimum basınçlar (P_{\max})	60
Grafik 4.5 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak yakıt karışım oranının etkisi ile oluşan basınç artış oranı (MPRR).....	63

Grafik 4.6	Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	66
Grafik 4.7	Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	67
Grafik 4.8	Motor %100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	69
Grafik 4.9	Farklı yakıt karışım oranları için silindire gönderilen yakıtın %10'unun yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA10)	71
Grafik 4.10	Farklı yakıt karışım oranları için silindire gönderilen yakıtın %90'ının yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA90)	74
Grafik 4.11	Farklı yakıt karışım oranları için °KMA cinsinden yanma süresi.....	78
Grafik 4.12	Farklı yakıt karışım oranları için termik verim değerleri.....	80
Grafik 4.13	Farklı yakıt karışım oranları için özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri ...	83
Grafik 4.14	Farklı yakıt karışım oranları için karbon monoksit (CO) emisyonları	87
Grafik 4.15	Farklı yakıt karışım oranları için karbondioksit (CO ₂) emisyonları	90
Grafik 4.16	Farklı yakıt karışım oranları için hidrokarbon (HC) emisyonları	93
Grafik 4.17	Farklı yakıt karışım oranları için azot oksit (NO _x) emisyonları.....	96
Grafik 4.18	Farklı yakıt karışım oranları için is emisyonları	99
Grafik 4.19	Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınç ve ısı salınım (HRR) oranları	103
Grafik 4.20	Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları	106
Grafik 4.21	Motor %100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları	108
Grafik 4.22	Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak ön püskürtme oranının etkisi ile oluşan maksimum basınçlar (Pmax)	112

Grafik 4.23	Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak ön püskürtme oranının etkisi ile oluşan basınç artış oranı (MPRR).....	114
Grafik 4.24	Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	118
Grafik 4.25	Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	119
Grafik 4.26	Motor %100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı.....	120
Grafik 4.27	Farklı ön püskürtme oranları için silindire gönderilen yakıtın %10'unun yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA10)	122
Grafik 4.28	Farklı ön püskürtme oranları için silindire gönderilen yakıtın %90'ının yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA90)	124
Grafik 4.29	Farklı ön püskürtme ve yakıt karışım oranları için °KMA cinsinden yanma süresi	127
Grafik 4.30	Motor yüküne bağlı olarak farklı ön püskürtme oranları için termik verim değerleri	129
Grafik 4.31	Motor yüküne bağlı olarak farklı ön püskürtme oranları için özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri	133
Grafik 4.32	Farklı ön püskürtme oranları için karbon monoksit (CO) emisyonları....	135
Grafik 4.33	Farklı ön püskürtme oranları için karbondioksit (CO ₂) emisyonları	138
Grafik 4.34	Farklı ön püskürtme oranları için hidrokarbon (HC) emisyonları	141
Grafik 4.35	Farklı ön püskürtme oranları için azot oksit (NO _x) emisyonları.....	144
Grafik 4.36	Farklı ön püskürtme oranları için is emisyonları	147

KISALTMALAR/SİMGELER LİSTESİ

- AÖN** : Alt ölü nokta
- CI** : Sıkıştırma ile ateşleme
- CD** : Yakıtın yanma süresi
- CDC** : Geleneksel dizel yanması
- CHR** : Kümülatif ısı yayılımı
- CO** : Karbon monoksit
- CO2** : Karbon dioksit
- DI** : Direkt enjeksiyon
- DICI** : Direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ateşlemeli
- DISI** : Direkt enjeksiyonlu buji ateşlemeli
- EGR** : Egzoz gazı resirkülasyonu
- FSN** : (Filter smoke number) İs yoğunluğu birimi
- HC** : Hidrokarbon
- HCCI** : Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli
- HFK** : Hava fazlalık katsayısı
- HRR** : Isı yayılım oranı
- HTR** : Yüksek sıcaklık reaksiyonu
- İYM** : İçten Yanmalı Motor
- IMEP** : Ortalama efektif basınç
- KMA** : Krank mili açısı
- LTC** : Düşük sıcaklıkta yanma
- LTR** : Düşük sıcaklık reaksiyonu
- MK** : Kinetik Modüllü Yanma
- NATO**: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü

NO_x : Azot oksit

NTC : Negatif Sıcaklık Katsayısı

OECD : Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

PFI : Porttan Yakıt Enjeksiyonu

PLIF : Yanma Ölçümü

PM : Partikül madde

PPC : Kısmi ön karışımli sıkıştırma

PPCI : Önceden karıştırılmış sıkıştırma ile ateşleme

ppm : Milyondaki partikül sayısı

RCCI : Reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme

SACI : Kıvılcım destekli sıkıştırma ile ateşleme

SAPCCI: Kıvılcım destekli Kısmi Ön Karışımli Sıkıştırma Ateşlemeli

SI : Kıvılcım ateşlemeli

SOC : Yanma başlangıcı

SOI : Enjeksiyon başlangıcı

THC : Toplam hidrokarbon

ÜÖN : Üst ölü nokta

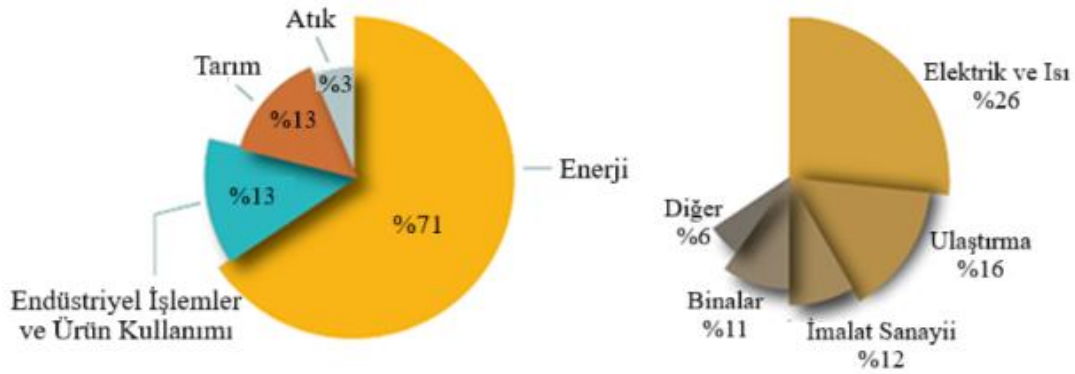
1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar (İYM) özellikle yük ve yolcu taşımacılığında ulaşım araçlarında uzun yıllardır neredeyse alternatifsiz olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda otomotiv sektöründe dizel ve benzinli araçlara ek olarak alternatif enerjili araçlar üzerine önemli araştırmalar gerçekleştiriyor olsa da içten yanmalı motorların, ulaşımında kısa ve orta vadede baskın kalmaya devam edeceği öngörülmektedir. Ancak çevresel baskılar, sürdürülebilirlik hedefleri ve yeni teknolojilerle birlikte İYM' ler de hızlı bir dönüşüm geçirmektedir. Verimlilik artışı, alternatif yakıtlar ve emisyon standartlarında oluşan yeni kısıtlamalar, İYM' lerin gelecekteki rolünü şekillendirmede etkili olacaktır. Fakat otomotiv sektörü ile birlikte toplumun karşılaştığı zorluklar ve ortaya çıkan yeni ihtiyaçlara bağlı olarak içten yanmalı motorlarda da gelişen teknoloji ile ortaya çıkan bu ihtiyaçlara cevap verecek geliştirmeler yapılması gerekmektedir.

Günümüzde İYM' ler de çözülmesi gereken önemli problemlerden bir tanesi de motor emisyonlarının, iklim değişikliği, çevre ve insan sağlığı üzerine olan etkilerinin iyileştirilmesidir. İklim değişikliği Birleşmiş Milletlere göre küresel bir sorun olarak tanımlanmakta ve dünya sağlık örgütü ise 4.2 milyon insanın ölüm sebebinin ortam hava kirliliği olduğunu tahmin etmektedir (Organisation, 2019; Reitz et al., 2020; UN, 2019).

Yaygın bir şekilde kullanılan fosil yakıtlar tüm dünyanın çözüm üretmek zorunda olduğu ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Bu sonuçların en önemlisi, çevresel ve ekonomik birçok etkisi olan küresel ısınmadır. Küresel ısınma, önemli ölçüde sera gazları olarak isimlendirilen karbondioksit, su buharı ve metan gibi gazların atmosferdeki konsantrasyonlarının artışının sebep olduğu bir durum olarak tanımlanmaktadır (Killingsworth, 2007). Atmosferde bulunan sera gazı miktarındaki artış, dünya yüzeyinden yayılan ısı radyasyonunu daha fazla emdiğinden, küresel ısınma atmosferde daha yüksek sıcaklıklara yol açmıştır. Ayrıca, sera gazı konsantrasyonunun artış sebebinin büyük oranda insani faaliyetlere bağlı olarak ortaya çıkan emisyonlar olduğu açıktır. En önemli sera gazlarından biri CO₂'nin atmosferdeki konsantrasyonu, sanayi çağından bu yana %40 oranında artmıştır (Lin et al., 2017). Sera gazlarının temel kaynakları elektrik ve ısı üretimi, tarım ve ormancılık, sanayi ve ulaşımıdır. 2024 yılı itibarıyla ulaşım sektörü, küresel CO₂ emisyonlarının %23.3'ünü oluşturmaktadır

(Solaymani & Botero, 2025). Şekil 1.1 de görüldüğü gibi 2021 yılında ülkemizdeki sera gazı emisyonlarında ulaşım sektörünün etkisi %16' dır. ABD ve Avrupa Birliği'nde ise sera gazı emisyonlarının daha da büyük bir kısmından, sırasıyla %28.8 (2017) ve %24 (2016) ulaşım sektörü sorumludur (Edenhofer, Pichs-Madruga, Sokona, Farahani, Kadner, Seyboth, Adler, Baum, Brunner, Eickemeier, Kriemann, Savolainen, Schlömer, 2014; İklim Değişikliği Başkanlığı, 2024; U.S. Environmental Protection Agency, 2019).



Şekil 1.1 Türkiye'de 2021 yılı sera gazı emisyonlarının sektörel dağılımı (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2024)

İçten yanmalı motorlarda tam yanma sonucunda meydana gelen ürünlerden bir tanesi de maalesef sera gazlarının en önemlilerinden biri olan karbondioksit (CO₂) tir. Yanma işleminin sonunda açığa çıkan net CO₂ miktarını azaltmak için tüketilen fosil yakıt miktarını azaltmak ya da fosil yakıtı düşük karbonlu eşdeğeriyle değiştirmek gerekmektedir (Killingsworth, 2007).

Aslında düşük karbonlu yakıtlar, benzin veya dizel gibi geleneksel fosil yakıtlara kıyasla üretim sırasında daha az karbondioksit (CO₂) üreten bir yakıt türüdür. Günümüzde sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi yaygın olarak kabul gören yakıtlarda dahil olmak üzere çeşitli düşük karbonlu yakıtlar mevcuttur. Ayrıca metanol, etanol gibi alkol bazlı yakıtların yanı sıra biyodizel, biyometanol, biyoetanol ve biyodimetil eter gibi biyoyakıtlarda bulunmaktadır (Trinko et al., 2023).

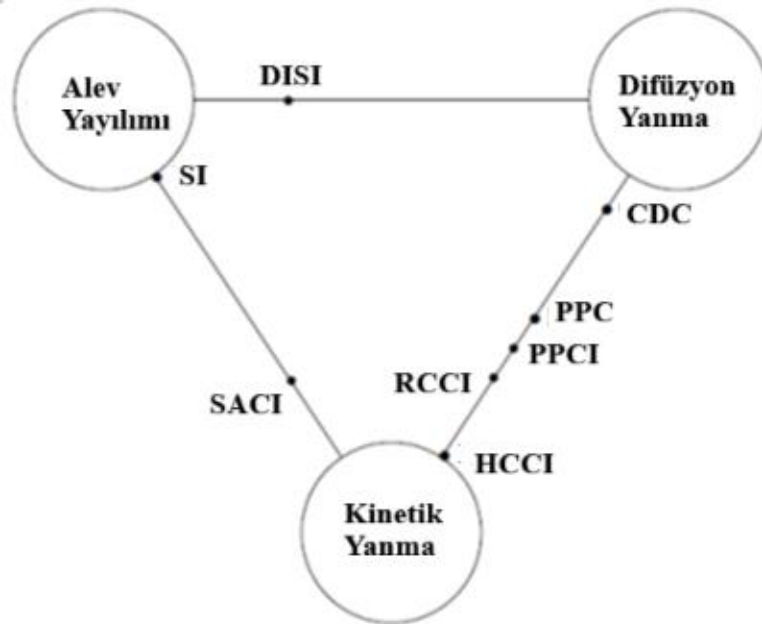
Otomotiv sektöründe kullanılan içten yanmalı motorlar ayrıca atmosfere bırakılan diğer kirleticiler (NO_x, CO, SO₂) ve partikül maddenin de önemli kaynaklarından birisidir. Hava kirliliği küresel çapta büyük ve önemli bir sağlık

sorunudur. 10 mikrondan daha küçük çaplarda solunum sistemine giren partikül madde, kardiyovasküler ve pulmoner hastalıkların yanı sıra erken ölümlerle ilişkilendirilmiştir. Partikül madde emisyonlarının büyük bir kısmından otomotiv sektörünün sorumlu olduğu tahmin edilmektedir. Avrupa da partikül maddenin yaklaşık %30'unun, OECD ülkelerinde ise partikül maddenin yaklaşık yarısının karayolu taşımacılığından kaynaklandığı tahmin edilmektedir (World Health Organisation (WHO), 2019).

Sonuç olarak, fosil yakıtların kullanımındaki azalma önemli kazanımları beraberinde getirmektedir. Bu sorunların çözümü için, verimliliği arttırmak veya alternatif düşük karbonlu yakıtlar kullanarak tüketilen yakıt miktarını azaltmak gerekmektedir (Killingsworth, 2007). Bu alanda yapılan çalışmalar içten yanmalı motorların hem termik verimini yükseltmek hem de zararlı emisyonlarını azaltmak için düşük sıcaklık reaksiyonları ile gerçekleşen yanma türleri (HCCI, RCCI, PPCI v.b.) üzerinde sürdürülmektedir (Cinar et al., 2015; Çinar et al., 2016; Uyumaz, 2015).

1.1. İçten Yanmalı Motorlarda Yanma

İçten yanmalı motorların tümünde yanma olayı aynı şekilde gerçekleşmez. Yanma genel olarak alev yayılımı, difüzyon yanma ve kinetik yanma olmak üzere üçe ayrılır (I. Glassman R. Yetter and N. Glumac, 2015).



Şekil 1.2 Üç Farklı yanma şeklinin şematik bir gösterimi ve yanma modellerinin ilgili yanma şekillerine göre durumu (M. Lundgren, 2016)

Şekil 1.2’de sol üst köşede gösterilen alev yayılımı şeklindeki yanma olayında homojen bir şekilde karışmış yakıt ve oksitleyici harici bir ateşleme kaynağından ateşlenerek bir alev çekirdeği oluşturulur ve yanma bu alev çekirdeğinin ilerleyişi şeklinde olur.

Difüzyon yanmada ise yakıt ve oksitleyici başlangıçta bir birinden ayrıdır ve yanma esnasında karıştırılır. Yanma yakıt ve oksitleyicinin karışım hızına bağlıdır ve difüzyon yanmanın olduğu motorlarda yakıt ile oksitleyicinin karışım hızı türbülans tarafından yönlendirilir (Stiesch, 2013).

Son yanma şekli olan kinetik yanma da ise diğerlerine göre daha hızlı bir yanma meydana gelmektedir. Bu yanma şeklinde homojen bir karışım kendiliğinden tuttuğu için aynı basınç sıcaklık şartlarında bir den çok yerde tutuşma olayı meydana gelir. Birden fazla noktada kendiliğinde tutuşma meydana gelmesi yanma hızını artırmaktadır.

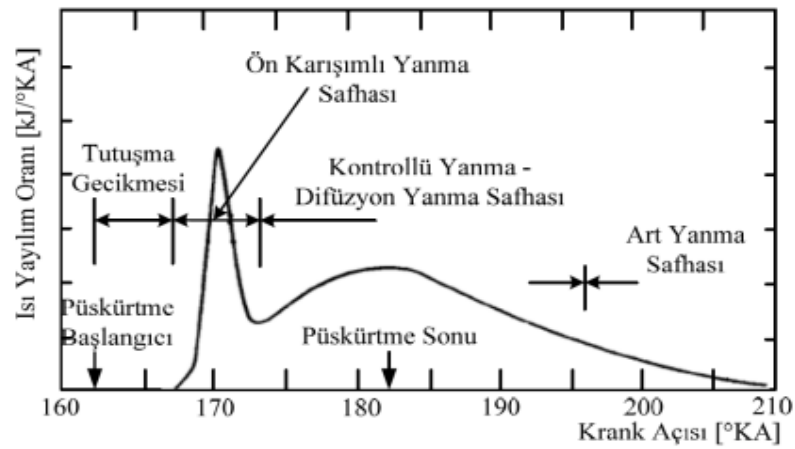
Günümüz otomobillerinin çoğunda ya buji ile ateşlemeli ya da sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar kullanılmaktadır.

Yanma modelleri, Şekil 1.2’ de ki üçgenin çizgileri boyunca dağılmıştır. Buji ile ateşlemeli motorlardaki yanma şekli, yanmanın harici bir kaynak tarafından başlatıldığı alev yayılımıdır. SI motorlarda kullanılan yakıt, kendiliğinden yanmaya karşı dirençlidir, ancak bazı durumlarda SI motorlarda, motora zarar verebilecek, istenmeyen bir kinetik yanma şekli olan vuruntu meydana gelebilir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlar, konvansiyonel dizel yanma şeklini kullanan otomobillerde bulunur. Dizel yanma konsepti, birden fazla yanma modunun bir karışımıdır. Difüzyon yanması baskın mod olmasına rağmen, yanma, püskürtme ve türbülans kontrollü yanmaya geçmeden önce yakıt ve havanın bir kısmının otomatik olarak tutuşacağı kinetik bir yanma olayıyla başlayacaktır. HCCI, prensipte sadece kinetik yanmayı kullanan bir yanma konseptidir. Ancak, PPCI, RCCI, SACI ve DISI gibi konseptler en az iki yanma şeklinin bir karışımını kullanmaktadır (Klos & Kokjohn, 2016; Kokjohn et al., 2015; Nieman et al., 2012).

1.2. Dizel Motorlarda Geleneksel Yanma

Geleneksel sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorlarda yanma olayı zamansal olarak ta hacimsel olarak ta heterojen bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Sıvı fazda

bulunan yakıt yüksek yoğunluklu yanma odasına enjektör ile püskürtüldüğü zaman küçük damlacıklar şeklinde parçalara ayrılır. Bu parçalanma sürecinden sonra yakıtın sıvı fazdan gaz fazına geçişi hızlanır, sıvı yakıt püskürtme sınırlarında buharlaşmaya başlar. Tüm bunlar olduğu periyotta hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmez. Yakıt buharlaştıktan sonra kendiliğinden tutuşma sürecinin ilk aşaması 750 K gibi düşük bir sıcaklıkta başlar. Yakıtın yavaş oksidasyonu silindir içi basınçta küçük bir miktar artış meydana getirir. Bu kimyasal hareketliliğe ve yakıtın sıcak gazlarla karışımına bağlı olarak yakıt sıcaklığını artırmaya devam eder. Püskürtme başlangıcında yakıtın tutuşmasına kadar geçen bu süreye tutuşma gecikmesi denir (Erbakan, N., 1953).



Şekil 1.3 Konvansiyonel dizel yanmasının ısı yayılım oranı (Glassman, I., Yetter, R. and Glumac, N., 2015; Kokjohn et al., 2015)

Tutuşma gecikmesi safhası tamamlandıktan sonra ön karışımli yanma periyodu olarak da isimlendirilen yüksek sıcaklıkta, kendi kendine tutuşma aşaması başlar. Tutuşma gecikmesi safhası süresince biriken tutuşabilme sınırındaki yakıt/hava karışımı Şekilde 1.3' te görüldüğü gibi KMA cinsinden çok kısa bir zaman aralığında aniden yanmaya başlar. Bu yanan karışım ile birlikte yanma sınırında hazır halde bulunan karışımında hızlıca yanması sonucu ön karışımli yanma periyodunda birim krank mili açısı başına açığa çıkan ısı miktarını ifade eden ısı yayılım oranı maksimum seviyeye çıkar. Daha sonra birikim miktarında tutuşma gecikmesi süresinin doğrudan etkili olduğu tutuşabilme sınırındaki yanmaya hazır halde olan yakıt/hava karışımının tükenmesi ve ani yanma esnasında açığa çıkan ısı partiküllerinin de etkisi ile ısı yayılım oranı Şekilde 1.3' te görüldüğü gibi düşer (I. Glassman R. Yetter and N. Glumac, 2015; Kokjohn et al., 2015).

Ön karışimli yanma periyodunun bitmesinden sonra difüzyon ya da kontrollü yanma olarak isimlendirilen, yanmanın püskürtülen yakıt miktarı ile kontrol edildiği safha başlar. Kontrollü yanma periyodunda silindir içerisinde ulaşılan yüksek sıcaklıklar sebebi ile yakıtın yanması için gerekli olan buharlaşma, ayrışma ve hava ile karışma süreçlerine yeterince zaman kalmamasının sonucu is emisyonlarının ortaya çıkması kaçınılmaz olur. Ortaya çıkan is partiküllerinin bir kısmı oksijen ile reaksiyona girerek tekrar yansa da bir miktar is partikülü daima kalır.

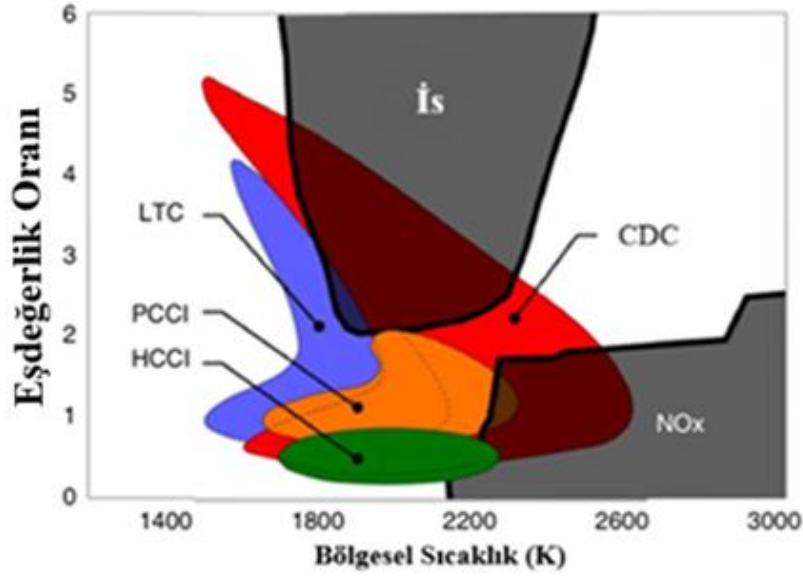
Tüm bu yanma periyodlarından sonra dördüncü safha olarak art yanma safhası başlar. Art yanma sürecinde bir önceki periyottan kalan is partikülleri ve silindir yüzeylerine yapışan yanmamış HC' lar yanmaya çalışır. Bu safhada silindire yakıt enjeksiyonunun bitmiş olması ve pistonun AÖN' ya doğru genişlemesiyle düşen basınç ile sıcaklıklara bağlı olarak is partiküllerinin yanması yavaşlar fakat yüksek sıcaklıklarda oluşan NO_x emisyonları ise oluşmaz (Klos & Kokjohn, 2016; Kokjohn et al., 2015).

1.3. Düşük Sıcaklıkta Yanma (LTC)

Son yıllarda taşıt emisyonlarının sınırlandırılması ile ilgili süre gelen tartışmaların sonucunda emisyonlar ile ilgili mevzuat çok katı bir hale getirilmiştir. Otomotiv endüstrisinde de bu kriterleri sağlamak için emisyonları motor dan çıktıktan sonra iyileştirecek sistemlerden ziyade üretim maliyetini düşürecek yeni sistemler bulma yoluna gidilmektedir. Bu amaç için yapılan çalışmalar ile düşük emisyon değerleri ve yüksek verimlilik sağlayan düşük sıcaklıkta yanma modelleri geliştirilmiştir.

LTC, yanma başlangıcından (SOC) önce silindir içi hava-yakıt karışımını iyileştiren, EGR kontrollü yanma ile yakıtı Ü.Ö.N.' ya daha yakın enjekte eden, değişken yakıt reaktivitelerine sahip çift yakıt enjeksiyonu v.b. erken yakıt enjeksiyonu stratejilerine imkân veren gelişmiş yanma konseptidir. LTC yanma modellerinde geliştirilmiş yakıt-hava karışımı yakıt açısından zengin bölgeler oluşmasını önler ve yanma sıcaklığını 2100 K'in altında tutmaya imkân verir (Benajes et al., 2012; J. Zheng & Caton, 2012).

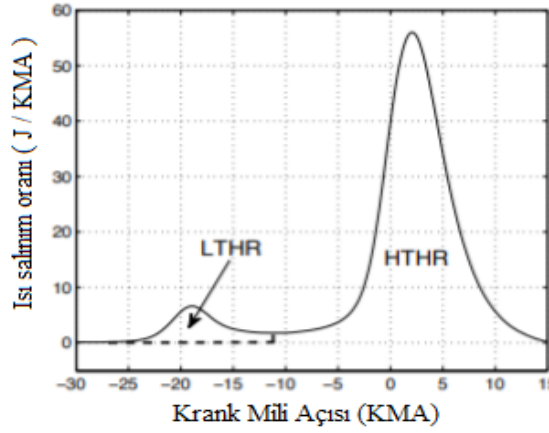
LTC, gerekli olan yakıt-hava karışımının oluşumuna imkân vererek karışım homojenliğini artırıp alev sıcaklığını düşürmeyi hedefleyen bir yanma stratejisidir. LTC yanma stratejisi ile NO_x ve kurum emisyonları alev sıcaklığı ve eşdeğerlik oranı (Φ) önemli derecede etkilendiği için, alev sıcaklığının ve eşdeğerlik oranının kontrol edilmesi bu emisyonların azaltılmasına olanak sağlayabilir (Ramesh & Mallikarjuna, 2016).



Şekil 1.4 Dizel Motorlarda yanma sırasında Eşdeğerlik oranı ve yanma sıcaklığına bağlı olarak ısı ve NO_x oluşumu (Bharadwaz & Kumari, 2023)

Şekil 1.4' te görüldüğü gibi düşük yanma sıcaklığı NO_x emisyonlarının oluşumunu azaltmaktadır. EGR kontrolü ile silindir içerisine alınan hava seyreltilerek yanma sıcaklığı düşürülebilir. Ayrıca düşük yanma sıcaklığı ve artırılmış ön karıştırmanın birlikte kombine edilmesiyle ısı oluşumu da önlenebilmektedir (Kook et al., 2005).

Şekil 1.5' te düşük sıcaklıkta yanma (LTC) olayı için ısı salınımı oranı görülmektedir. Isı, Gauss eğrisi gibi hızlı bir şekilde serbest kalmaktadır. Hızlı yanmaya bağlı olarak, verimlilik artar ve etkili bir genişleme oranı sağlanır. Motorun dayanıklılığı yanma oranını sınırlasa da, seyreltme kullanılarak yanma oranı azaltılabilir (Dev et al., 2017).



Şekil 1.5 Tipik LTC yanma olayının KMA'na bağlı ısı salınımı oranı. (Truedsson, 2014)

Şekil 1.5' te görüldüğü gibi düşük sıcaklık reaksiyonları, ana ısı salınımı olayından önce ısı salınımına katkı sağlar. Bu katkı iki aşamalı ateşleme işlemine sahip yakıtlarla sınırlıdır. Düşük sıcaklık reaksiyonları, sıcaklık arttığında durur ve reaksiyonlar negatif sıcaklık katsayı rejimine girer. Sıcaklık kritik bir seviyeye ulaştığında ana yanma reaksiyonları başlar (Truedsson, 2014).

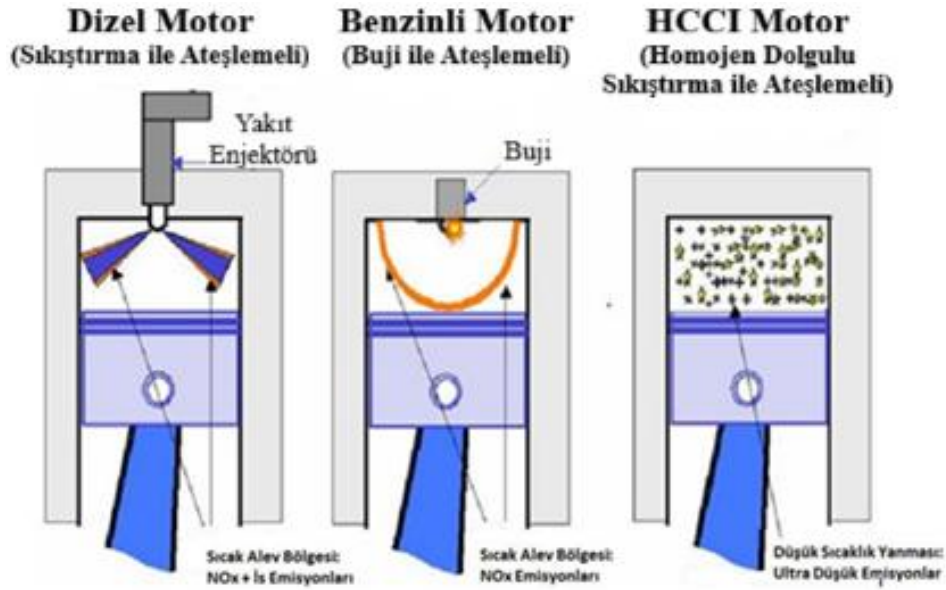
Literatürde düşük sıcaklıklı yanmanın çoğunlukla homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli yanma (HCCI), kısmi ön karışimli yanma (PPCI), reaktif kontrollü sıkıştırma ateşlemeli yanma (RCCI) ve benzinli sıkıştırma ile ateşlemeli yanma (GCI) olmak üzere farklı yöntemlerle elde edildiği görülmektedir (S. W. Park & Reitz, 2007; Sluder & Wagner, 2006; Wagner et al., 2003).

1.3.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma (HCCI)

İlk düşük sıcaklıkta yanma modellerinden biri olan HCCI' nin araştırılması 1970'lerde başlamış ve araştırma 2000'li yılların başına kadar devam etmiştir. HCCI yanma fikri kinetik yanmaya dayanmaktadır. Yakıt ve hava, homojen olarak karıştırılır ve sıkıştırma zamanı sonunda silindirin her bölgesinde oluşan kendiliğinden tutuşma hızlı bir yanma olayı meydana getirir. Yanma sıcaklığının düşük olmasına bağlı olarak NO_x oluşumu azalmaktadır (Johansson, 2007).

HCCI motorların çalışmasındaki iki temel aşama ile NO_x ve is emisyonlarının sifıra yakın seviyelere kadar düşmesi sağlanır. Birinci aşama homojen bir karışımın oluşturulması, ikinci aşama ise, bu karışımın sıkıştırma ısıyla kendi kendine

tutuşmasıdır. Fakat bu ana karakteristikler, aynı zamanda temel zorlukları da meydana getirmektedir.



Şekil 1.6 Dize, Benzinli ve HCCI motorda yanmanın gelişimi

Eğer silindir içerisinde mükemmel bir homojen karışım oluşturulabilirse, sıkıştırma zamanında artan basınç ve sıcaklık etkisiyle, konvansiyonel dize tutuşmasındaki gibi belirli bir noktada yapılan püskürtmeden farklı olarak, dolgunun kendi kendine tutuşmasını sağlayacak ve yanma, eşzamanlı olarak bütün yanma odası boyunca gerçekleşecektir. Sonuç olarak Şekil 1.6' da görüldüğü gibi, kendi kendine tutuşma silindirin her noktasında eşzamanlı olarak gerçekleşeceğinden, SI motorlardaki gibi alev cephesi önünde oluşan yüksek sıcaklık ortaya çıkmayacaktır. Yüksek sıcaklıktaki bir alev cephesinin olmaması, NO_x ' lerin en düşük seviyede meydana gelmesini sağlayacaktır. (Zhao, 2007).

HCCI motorlarda yanma olayı emme havası giriş sıcaklığı, EGR, sıkıştırma oranı, hava/yakıt oranı ve yakıt özellikleri gibi değişkenler ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bunların içerisinde yakıt özellikleri kendi kendine tutuşma ve motor yük aralığının genişletilmesinde en önemli kontrol parametrelerinden biridir (M. Y. Kim et al., 2008; H. Liu et al., 2013; Yang & Zhao, 2013).

Fakat HCCI motorlarda yüksek yüklerde görülen kararsız çalışma, meydana gelen vuru, yanmanın kontrol edilmesindeki zorluklar ve motor çalışma aralığının

sınırlı kalması gibi dezavantajlar bulunmaktadır (Cinar et al., 2015; Çinar et al., 2016; Uyumaz, 2015).

1.3.2. Kinetik Modüllü Yanma (MK)

MK, Nissan Motor Company' deki araştırmacıların, dolguyu seyreltmek için yüksek oranda EGR kullandığı ve genişleme zamanında da yanmayı sürdürmek ve yakıt ile havanın karışması için zaman sağlamak amacıyla Ü.Ö.N.' dan sonra yakıtın enjekte edildiği bir yöntemdir (Kimura et al., 1999, 2001). Fakat bu yöntemde, yanmanın genişleme zamanında olması, gerekenden geç tamamlanmasına bağlı olarak yanma verimi düşük, ayrıca yakıtın çok geç püskürtülmesinden dolayı yüksek yüklere çıkmak zor olmaktadır.

1.3.3. Üniform Hacimli Yanma Sistemi (UNIBUS)

UNIBUS, Toyota Motor Corporation tarafından geliştirilen bir düşük ısılı yanma sistemidir. Bu sistem prensip olarak dizel yakıtı en az iki enjeksiyona bölmektedir. İlk püskürtme, silindir içi şarjı hazırlamak için düşük sıcaklık reaksiyonlarını başlatmaktadır. Ana yanma olayını başlatacak olan ikinci püskürtme ise Ü.Ö.N. ya yakın gerçekleşmektedir (Hasegawa & Yanagihara, 2003; Hildingsson et al., 2005).

1.3.4. Reaktif Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma (RCCI)

Reaktif kontrollü sıkıştırma ateşlemeli (RCCI) yanma modu, ateşleme ve yanmayı kontrol etmek için reaktivite dereceleri birbirinden farklı iki farklı yakıtın kullanıldığı bir yanma modudur. Porttan ve direkt silindir içerisine olmak üzere iki noktadan yakıt püskürtülerek karışım kontrollü bir yanma meydana getirilmektedir. İlk olarak porttan yanma direnci yüksek bir yakıt püskürtülür ve daha sonra yanmayı başlatmak için yanma direnci daha düşük bir yakıt silindire püskürtülerek yanma kontrol edilir. Yanmanın kontrolü için her bir yakıtın silindire püskürtülme zamanları ve her bir yakıttan ne kadar püskürtüleceğinin kontrolü kontrol edilmesi gereken parametrelerden birkaçıdır. Farklı reaktivite özelliklerine sahip yakıtların silindirde oluşturduğu karışım ile yanma fazı kontrol edilebilmekte, NO_x ve is emisyonları önemli derecede azaltılabilmektedir. Fakat sistemin karmaşıklığı üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bununla birlikte konvansiyonel yanma modlarına göre RCCI motorların termik verimleri yüksektir (Ansari et al., 2016; Hanson et al., 2010; Inagaki et al., 2006; Kokjohn et al., 2009; Papagiannakis & Hountalas, 2003; Reitz & Duraisamy, 2015).

1.3.5. Benzinli Sıkıştırma ile Ateşlemeli Yanma (GCI)

Benzin sıkıştırma ateşlemeli yanma, daha düşük emisyon yaydığı ve yüksek yakıt verimliliği sağladığı bildirilen LTC yanma stratejilerinden biridir. GCI, geleneksel dizel yakıtı yerine sıkıştırma ateşlemeli motorda yakıt olarak benzin kullanan gelişmiş bir düşük sıcaklık yanma stratejisidir ve daha düşük emisyonlar ile daha yüksek verimlilik veya en azından dizel benzeri verimlilik sağlar (D. Kim & Bae, 2017). Benzin sıkıştırma ateşlemeli yanma (GCI), aynı zamanda benzinli doğrudan enjeksiyonlu sıkıştırma ateşlemeli (GDCl) motor ve kısmen ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli (PPCl) motor olarak da bilinir (Badra et al., 2016; Sellnau et al., 2014). Yakıt enjeksiyon sistemleri ve otomatik ateşleme kontrol edilebilirliği açısından GCI yanması HCCI ve PCCI yanması gibi diğer LTC stratejilerinden daha iyi performans sağlamaktadır (Putrasari & Lim, 2017).

GCI motorlarında, benzin yakıtı, HCCI motorlarına göre TDC'ye yakın ancak geleneksel dizel yanmasından daha erken doğrudan yanma odasına enjekte edilir. Yüksek basınçlı enjeksiyon sistemleri kullanan dizel motorlara kıyasla düşük basınçlı enjeksiyon sistemi kullanabildiği için maliyet açısından etkili bir motordur (Chang et al., 2013).

1.3.6. Kısmi Ön Karışimli Yanma (PPCl)

Kısmi ön karışimli yanma (PPCl), Önceden karıştırılmış dolgu sıkıştırma ile ateşleme (PCC), Önceden karıştırılmış sıkıştırma ile ateşleme (PPC) gibi farklı kavramların kullanıldığı yanma modelleri arasında benzer modellerdir. Benzer yanma modellerine birden fazla isim verilmesinin sebebi bu modeli tanımlayan sınırların belirsiz olması, net olmamasıdır. PPCl, yanma sürecinde istenen tutuşma gecikmesini ve yanma aşamalarını sağlayabilmek için yakıt katmanlaşmasını kullanır. Enjeksiyon başlangıcı ve enjeksiyon sonu arasında net bir ayırım yapılması da PPCl modelinin tanımlanmasının bir yoludur (Musculus et al., 2013).

Geniş anlamda PPCl geleneksel dizel yanması (CDC) ile Homojen dolgu sıkıştırmalı ateşleme (HCCI) yanma modelleri arasında kalan bir geçiş modelidir. Geleneksel dizel yanmasının avantajları arasında yakıt verimliliği, kararlı yanma, kolay kontrol, düşük HC ve CO emisyonları ve geniş bir çalışma yükü aralığı sayılabilirken dezavantajları ise esas olarak yüksek is oluşumu ve NO_x emisyonlarıdır. HCCI modda

yanma da silindirde meydana gelecek çok zengin yakıt cepleri kurum oluşumuna, homojen karışımın yüksek basınç artış oranı hızlı yanmaya veya yanma veriminin düşmesine yol açabileceğinden silindir içerisine doldurulan karışımın durumu büyük önem arz eder. EGR, sıcaklığı düşük tutmak için kullanılmaktadır fakat çok yüksek EGR oranları da daha yüksek kurum emisyonlarına yol açmaktadır (Kalghatgi et al., 2007).

PPCI yanması, daha düşük emisyonlar ve daha yüksek verimlilik ve ayrıca CI ve SI motorlarına göre önemli ölçüde daha hızlı yanma süreci ile hem HCCI hem de doğrudan enjeksiyon sıkıştırma ateşlemeli (DICI) yanma modellerinin avantajlarına sahiptir (Dempsey et al., 2014; Reitz, 2013).

PPCI yanma stratejisi için yakıt, yanma odasına üç yöntemle gönderilmektedir. Bunlar emme portuna yakıt enjeksiyonu, gelişmiş direkt enjeksiyon ve geç direkt enjeksiyon yöntemleridir. İlk iki yöntem HCCI yanmasına benzer şekilde kullanılır ve yakıtın silindir duvarına çarpması, yakıtın tamamının buharlaşmaması gibi sorunlar yaşarken, geç enjeksiyon stratejisi duvar çarpışmasını önler ve yanma aşamasını kontrol etmek için kullanılır (MANIMARAN,R.; THUNDIL, 2013).

PPCI yanmada hedeflenen farklı enjeksiyon stratejileri ve zamanlamaları ile olması istenilen bir ön karışım meydana getirip aşırı uçlar arasında bir denge oluşturmaktır (Kalghatgi et al., 2006, 2007).

1.4. Yakıt

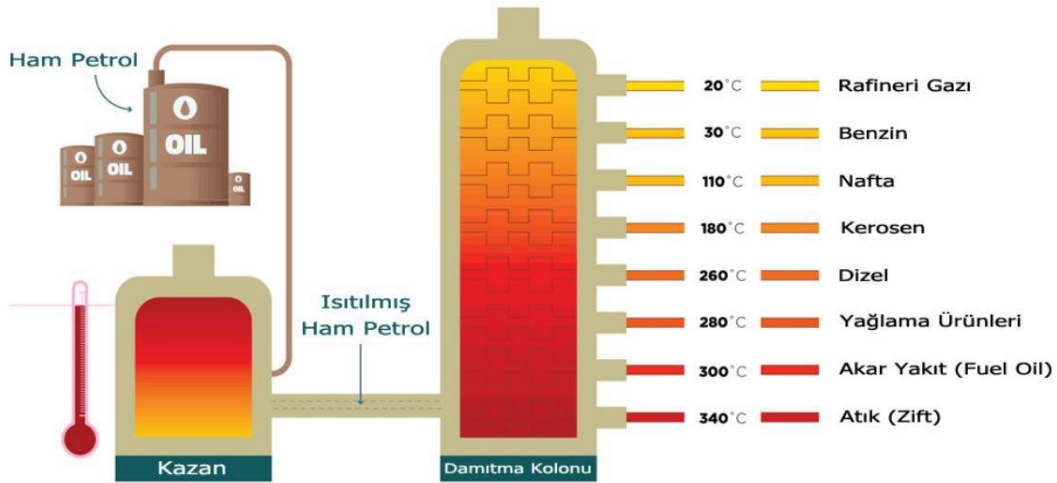
Düşük sıcaklıklı yanma (LTC) çalışmalarının başlarında yakıt olarak dizel yakıtı tercih edilmiştir, fakat sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için tasarlanmış olan ve kolay tutuşabilen dizel yakıtının kısmi ön karışımlı yanma (PPCI) için uygun bir yakıt olmadığı anlaşılmıştır. Dizel yakıtı kullanan PPCI motorunun ticarileşmesindeki teknik engeller, silindir içi karışım oluşumunu ve yanma fazı kontrolünü zorlaştıran düşük uçuculuk ve yüksek tutuşa bilirlidir (Pachiannan et al., 2019). Daha sonra PPC motorlarda yüksek setan değerine sahip yakıtlardan tutuşma direnci daha yüksek olan yakıtlara geçiş yapılmıştır. Tutuşma direnci yüksek olan yüksek oktanlı yakıtlarda ise tekleme ve kararsız yanmaya sebebiyet veren kendiliğinden tutuşmaya karşı direnç nedeniyle PPCI'ı çalıştırmanın daha zor hale geldiği gözlemlenmiştir (Shamun, Sam;

Novakovic, Maja; Malmborg, Vilhelm B.; Preger, Calle; Shen & Messing, Maria E.; Pagels, Joakim; Tunér, Martin; Tunestål, 2017; Shamun et al., 2018; Shen et al., 2013).

Çalışmamızda setan sayısı referans dizel yakıtından düşük (dizel 54, JP8 45), tutuşma gecikmesi dizel yakıtından uzun ve uçuculuğu dizel yakıtından yüksek olan kerosen türevi JP-8 yakıtı kullanılmıştır.

1.4.1. Kerosen

Kerosen petrol rafinerilerinde Şekil 1.8'de görüldüğü gibi ham petrolün damıtılması ile elde edilen, kaynama aralığı 150 °C ile 350 °C arasında değişen, yoğunluğu ortalama 803 kg/l ve uçuculuğu benzin ile dizel arasında olan bir yakıttır. Kerosen, benzin ve dizel yakıtının fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.8 Ham petrolün damıtılması(Çelebi, 2021)

Kerosen jet yakıtı, evsel brülör ve fırınlarda kullanılır. Genellikle C₁₀ ile C₁₆ arasında değişen doymuş hidrokarbonların bir karışımıdır. Kerosen petrolün damıtılması ile elde edilen, cracking işlemi ile üretilmeyen, n-alkanlar, alkil benzenler ve naftalenler den oluşan bir petrol ürünüdür (Kaltschmitt & Deutschmann, 2012).

Kerosen, dizel yakıtına göre daha kısa karbon zincirlerine sahip olduğu için daha düşük sıcaklıklarda buharlaşır (daha uçucudur). Bu durum onu havacılık ve aşırı soğuk şartlar için ideal yaparken, dizel motorlarda tek başına kullanıldığında düşük yağlayıcılık ve erken ateşleme gibi riskler doğurur.

Tablo 1.1 Yakıtların fiziksel özellikleri (Kaltschmitt & Deutschmann, 2012; Yamık, H.; Calam, A.; Solmaz, H.; İçingür, 2013)

Yakıt	JP-8 (Kerosen)	Dizel	Benzin
Moleküler ağırlık	170 g/mol (Kerosen)	202 g/mol	113 g/mol
Donma noktası	-52 °C	-10 °C	-65 °C
Kaynama noktası	150-290 °C	160-371 °C	50-200 °C
15 °C'de yoğunluk	0,775 – 0,840 kg/L	0,820-0,845 kg/L	0,720-0,775 kg/L
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	229 °C(Kerosen)	260 °C	280 °C
Parlama noktası	38 °C	> 52 °C	-43 °C
Setan sayısı	45	54	
Alt ısı değer	8290 kcal/kg	10200 kcal/kg	10400 kcal/kg

Kerosen yakıtı benzin, dizel ve biyodizel gibi önemli bir ulaşım yakıtı sınıfıdır, çoğunlukla askeri ve sivil havacılıkta Jet-A, Jet-A1 ve JP-8 jet yakıtı olarak kullanılmaktadır. Askeri ve sivil havacılık yakıtları kimyasal bileşim açısından çok benzerdir sadece yakıtta katılan katkı maddelerinde farklılıklar vardır (Dagaut & Cathonnet, 2006).

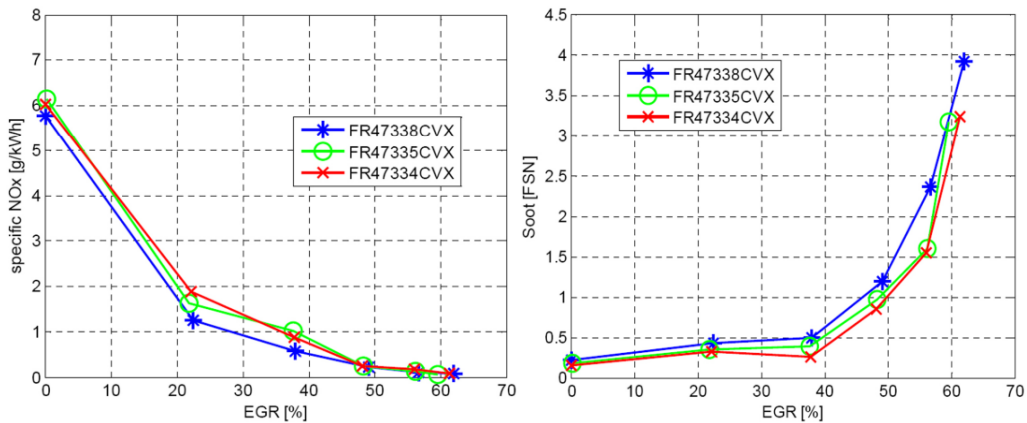
Askeri havacılıkta kullanılan JP-8 yakıtı aslında donmayı önlemek için yakıt sistemi buzlanma önleyici katkı maddesi, yakıtın nakil işlemleri sırasında statik deşarjdan kaynaklanan kazaları önlemek için statik dağıtıcı katkı maddesi, yakıt pompası arızasını önlemeye yarayan katkı maddesi içeren askeri bir katkı paketine sahip Jet-A yakıtıdır (Maurice et al., 2001).

Kerosen ağırlıklı olarak havacılıkta gaz türbinli motorlarda kullanılıyor olsa da İYM' ler de özellikle dizel motorlarda da kullanılmaktadır. Dizel motorlarda kerosenin kullanımını teşvik eden önemli sebeplerden bir tanesi NATO ordusunun lojistik kolaylık sağlanması için tüm otomobil ve ekipmanlarda tek yakıt olarak JP-8 kullanmayı düşünmesidir (Anastopoulos et al., 2002). Farklı çalışma şartlarında kerosen yakıtlı motor performansını optimize etmek için dizel motorlarda yakıt olarak kerosen kullanımını inceleyen, avantaj ve dezavantajlarını değerlendiren daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir (Lee et al., 2012).

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Yamık vd. yaptıkları çalışmada %98.8' i kerosen den meydana gelen ve askeri uygulamalara uygun hale gelmesi için çeşitli katkı maddeleri karıştırılan, donma noktası -40°C nin altında olan JP-8 yakıtını hacimsel olarak referans dizel yakıtı ile %5, %10, %25 ve %50 oranlarında karıştırmışlardır. Meydana getirilen yakıtlar tek silindirli, 4 zamanlı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda performans parametreleri ve egzoz emisyonları açısından incelenmiştir. Motor momenti ve özgül yakıt tüketimi JP-8 karışımı yakıtlarda referans dizel yakıtına göre kötüleşme göstermiştir. Egzoz emisyonları bakımından NO_x emisyonları JP-8 karışımı yakıtlarda referans dizel yakıtına göre iyileşirken, CO ve is emisyonlarında artış gözlenmiştir (Yamık, H.; Calam, A.; Solmaz, H.; İçingür, 2013).

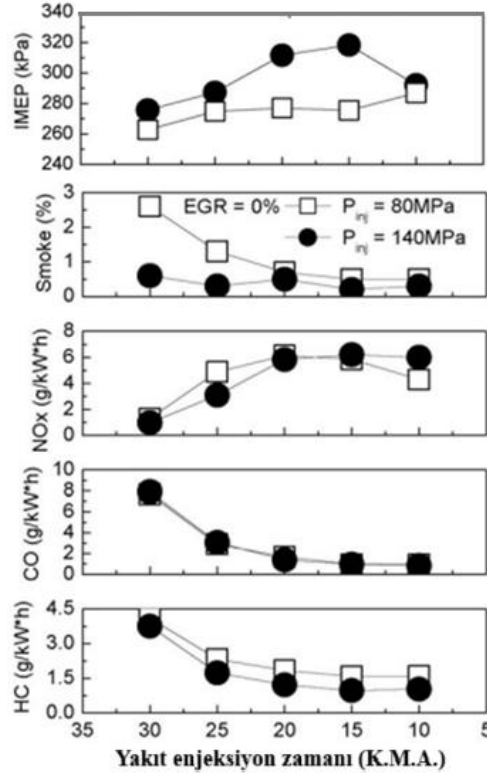
Manente vd. yüksek oktanlı üç farklı benzin türünün (RON:99, 89, 69) PPCI yanma modunda enjekte edildiği tek silindirli ağır hizmet tipi bir motorda giriş basıncı, EGR, motor devri ve ön püskürtme/ana püskürtme oranının yanma parametrelerine (verimlilik, NO_x , İS, MPRR) etkilerini incelemiştir. Grafik 2.1'de görüldüğü gibi EGR ilavesiyle yanma sıcaklığındaki düşüğe bağlı olarak NO_x emisyonlarında azalma görülmüştür. Motor emisyonunu Euro VI mevzuatının altında tutmak için %50'ye kadar EGR kullanılmış, ancak EGR arttıkça kurum seviyelerinde artış olmuştur. Aynı zamanda EGR' nin %60 olduğu durumda yanma verimi %99 olmuş, bu da CO ve HC emisyonlarının düşük olmasını sağlamıştır (Manente et al., 2010).



Grafik 2.1 Benzinli PPCI modda çalışan bir motorda EGR oranının NO_x ve kurum oluşumuna etkisi (Manente et al., 2010)

Kiplimo vd. PPCI modda çalışan tek silindirli optik bir motorda enjeksiyon basıncının etkisini incelemişler; 80 MPa ve 140 MPa enjeksiyon basınçlarında

yaptıkları çalışmada yüksek enjeksiyon basıncının sağladığı daha kısa enjeksiyon süresi, yüksek yakıt çıkış hızı ve uzun ön karıştırma zamanı sayesinde daha yüksek IMEP değerlerine ulaşılacağını göstermişlerdir.



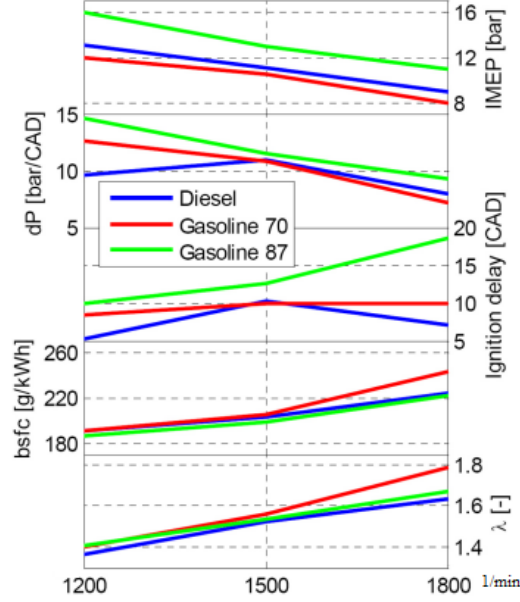
Grafik 2.2 PPC modda çalışan motorda yakıt enjeksiyon basıncının IMEP'e ve emisyonlara etkisi (Kiplimo et al., 2012)

Grafik 2.2'de aynı zamanda yüksek enjeksiyon basıncının, CO emisyonu üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı fakat daha düşük \dot{Q}_s , NO_x , HC emisyonlarına imkan sağlayabileceği görülmektedir.

Yapılan çalışmada yüksek enjeksiyon basıncı ile, daha iyi püskürtme atomizasyonuna ve dolayısıyla daha kaliteli bir yanmaya, yüksek enjeksiyon basıncı ve hızlı yanma oranı sayesinde de daha yüksek bir ısı salma zirvesine ulaşıldığı bildirilmiştir (Kiplimo et al., 2012).

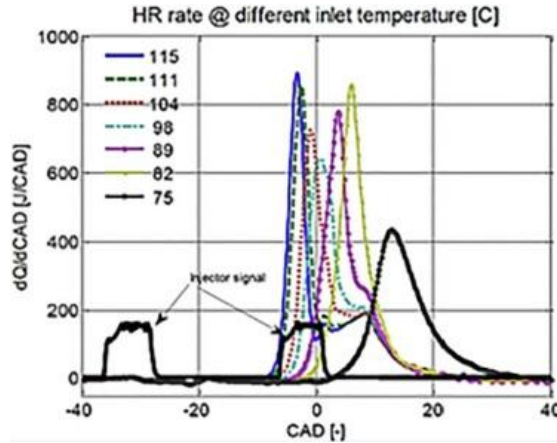
Lewander vd. çok silindirli ağır hizmet tipi bir motorda düşük, orta ve yüksek hızlarda yaptıkları çalışmada yakıt olarak dizel, düşük oktanlı benzin ve yüksek oktanlı standart benzin olmak üzere üç farklı yakıtla PPCI gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarında (Grafik 2.3) yüksek oktanlı yakıtın, daha uzun tutuşma

gecikmesi ve PPCI'ın çalışma bölgesini genişletme kabiliyeti nedeniyle PPCI yanması elde etmek için en uygun yakıt olduğu görülmüştür (Lewander et al., 2011).



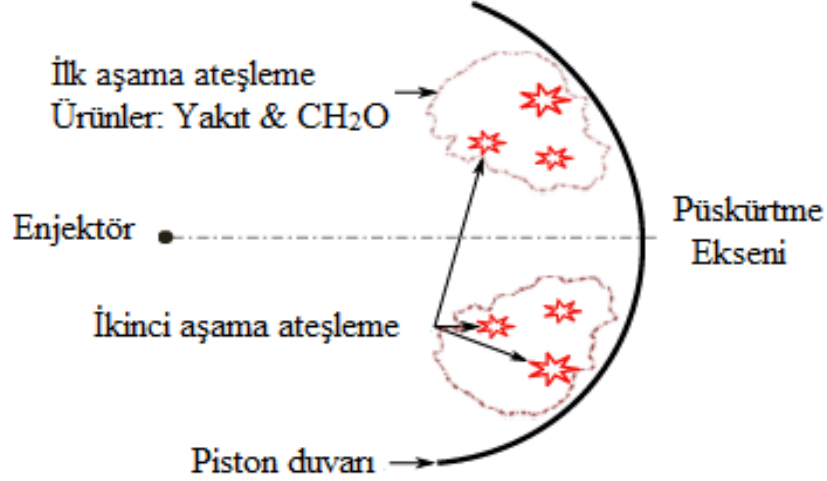
Grafik 2.3 PPC yük aralığı ve çalışma koşulları (Lewander et al., 2011)

Kaiadi vd. çift enjeksiyon stratejisi kullanan tek silindirli bir motorda PPC koşulları altında etanol yakıtının ateşlenmesi ve yanma üzerindeki emme havası sıcaklığının etkisini incelemiş ve emme havası sıcaklığı (70-120) °C arasında değiştirilmiştir. Grafik 2.4'te gösterildiği gibi (LTC) düşük sıcaklıkta yanmanın, örneğin 100 °C ve 115 °C' de yüksek sıcaklıktaki hava girişi için SOI' den kısa bir süre sonra başladığını, ikinci yakıt enjeksiyonunun ise ana yanmayı kontrol ettiğini ortaya koymuştur (Kaiadi et al., 2013).



Grafik 2.4 Emme giriş sıcaklığının ısı salınım oranına etkisi (Kaiadi et al., 2013)

Wang vd. ait kavramsal bir benzinli PPC modeli Şekil 2.1’de görülmektedir. Model, PRF87 (hacim bazında %87 izo-oktan ve %13 n- heptan) yakıtlı ağır hizmet tipi dizel motorunda düşük yük, EGR ile seyreltilmiş ve tek enjeksiyon koşullarında elde edilmiştir.



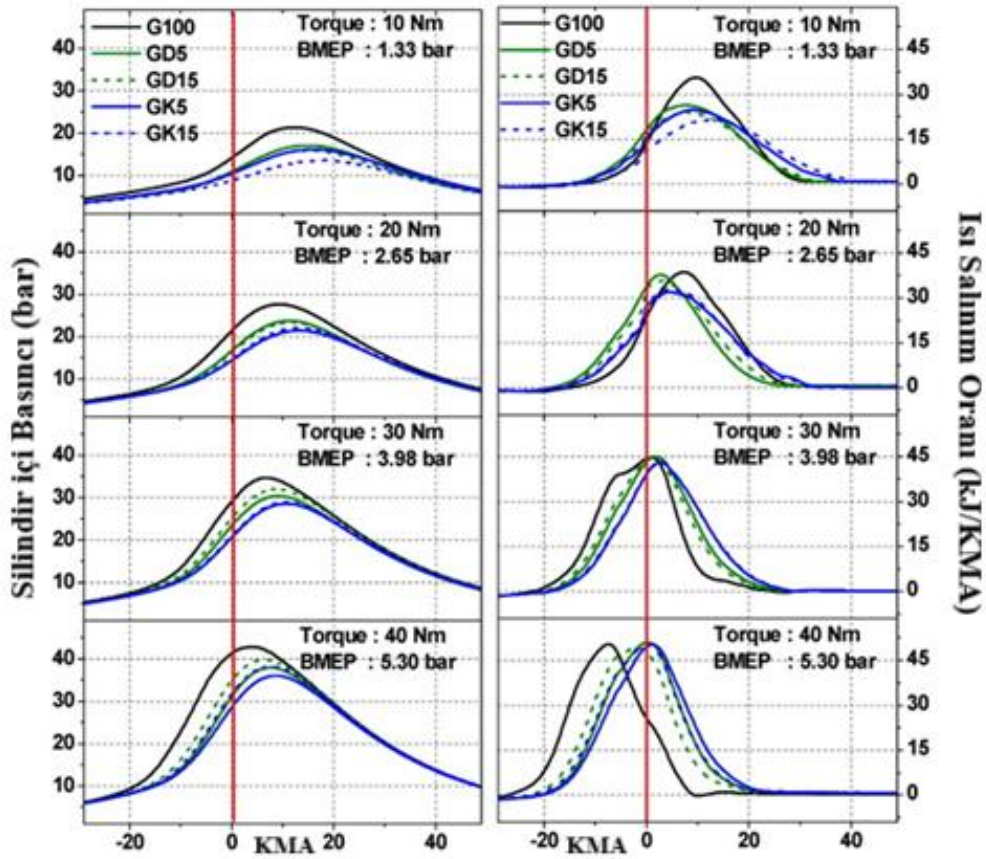
Şekil 2.1 Düşük yükte, EGR ile seyreltilmiş, tek enjeksiyonlu benzin PPC' nin genişletilmiş püskürtme modeli.(Zhenkan Wang, 2018)

Yüksek oktanlı yakıtların uzun tutuşma gecikmesi nedeniyle, püskürtme eksenini boyunca alanlar oldukça eğimlidir. Birinci aşama ateşleme ürünlerinin çoğu, püskürtme ekseninin her iki tarafındaki türbülans bölgelerinde oluşur. İkinci aşama ateşleme, yerel sıcaklık ve eşdeğerlik oranına bağlı olarak türbülans bölgesinin içinde veya çevresinde başlayabilir. İkinci kademe yanmanın ürettiği basınç dalgası, türbülans bölgesindeki yakıtı ve formaldehiti piston çanağının merkezine doğru iter ve enjektörü çevreleyen zayıf karışımların oksidasyonunu tamamlar (Zhenkan Wang, 2018).

Zhang vd. birincil referans yakıt PRF70 (hacim bazında %70 izo-oktan ve %30 n- heptan) ile PPCI' nin ateşleme ve yanma süreçlerini araştırmak için çift enjeksiyon strajesinin kullanıldığı üç boyutlu bir doğrudan sayısal simülasyon (DNS) geliştirdiler. Yapılan çalışmaların sonucunda enjeksiyondan sonra simülasyon alanının eşdeğerlik oranına (ϕ) göre üç bölgeye ayrıldığı görülmektedir. Bu bölgeler içerisindeki yakıtın esas olarak ilk enjeksiyondan geldiği zayıf ve neredeyse homojen bir bölge ($\phi < 0,5$), yakıtın ikinci enjeksiyondan geldiği yakıt açısından zengin bir bölge ($\phi > 1.2$) ve bu iki bölge arasında stokiyometriye yakın bir yük bölgesi ($0.5 < \phi < 1.2$) dir.

Ateşlemenin fakir ve stokiometrik karışım bölgesinde başladığını, ardından yakıt açısından zengin bölgede kısmen önceden karıştırılmış alev yayılması ve bir CO oksidasyon işlemi ile tamamlandığını bulmuşlardır (F. Zhang et al., 2015).

Verma vd. yaptıkları çalışmada benzin, gazyağı ve dizel karışımları gibi bir dizi düşük uçuculuğa sahip karışimli yakıtın kıvılcım destekli kısmen ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli (SAPCCI) modda çalışan bir motordaki performanslarını incelemişler. Deneyleerde benzin yakıtı temel alınarak dizel ve kerosenin belli oranlarda benzine karıştırıldığı beş deney yakıtı dört farklı motor yükünde yanma, performans ve emisyon değerleri açısından değerlendirilmiştir (Verma et al., 2016).

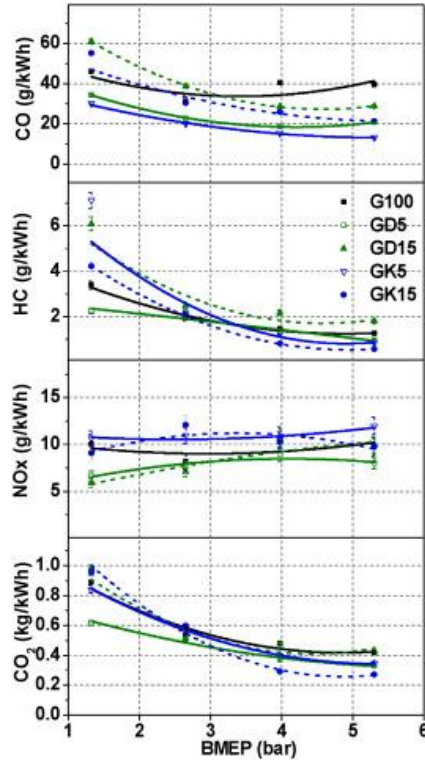


Grafik 2.5 Düşük oktanlı yakıtların 1500 d/d'da SAPCCI yanma modun da silindir içi basınç ve HRR değişimleri (Verma et al., 2016)

Benzin, tüm test yakıtları arasında en yüksek silindir tepe basıncını göstermiştir. Benzine %5 ila %15 dizel/kerosen eklenmesi silindir içindeki tepe basıncını doğrudan etkilemiş, GK5 orta ve yüksek motor yüklerinde tüm test yakıtları arasında en düşük

silindir içi tepe basıncını göstermiştir ayrıca, 10 Nm motor yükünde GK5 ve GD5'in, GK15 ve GD15'ten daha yüksek silindir içi tepe basıncı gösterdiği gözlenmiştir (Grafik 2.5). Bunun nedeni, düşük motor yüklerinde, nispeten daha yüksek benzin oranı nedeniyle GK5 ve GD5'te şarjın ön karıştırılmasının üstün olmasıdır (Verma et al., 2016).

SAPCCI modunda HC emisyonları, yüksek motor yüklerinde CI motorlar ile benzer şekilde gelişmiştir. Düşük yüklerde ise daha düşük silindir içi sıcaklık koşullarında şarjın oluşumundaki olumsuzluklar SAPCCI modunda daha yüksek HC emisyonlarına yol açmıştır. GK15 ve GK5 yakıt karışımlarında nispeten daha yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle CO emisyonunun diğer test yakıtlarından daha düşük olduğu görülmüştür.



Grafik 2.6 SAPCCI modunda CO, HC, NO_x ve CO₂ emisyonlarındaki değişimler(Verma et al., 2016)

SAPCCI yanma modunda, daha yüksek BMEP'de, daha yüksek silindir içi sıcaklıkları nedeniyle NO_x artmaktadır. Grafik düşük oktanlı yakıt kullanan SAPCCI motorunun NO_x emisyonunun, tipik bir CI motorununkine benzer olduğunu, ancak daha düşük kaliteli yakıt kullanabilme avantajına sahip olduğunu göstermektedir.

Grafik 2.6’da benzin-gazyacı karışımlarının, benzin-dizel karışımlarına ve baz benzine göre genel olarak daha üstün performans gösterdiği, CO, HC ve CO₂ emisyonlarının, artan motor yüküyle birlikte azaldığı fakat NO_x emisyonlarının, artan yük ile birlikte arttığı görülmektedir (Verma et al., 2016).

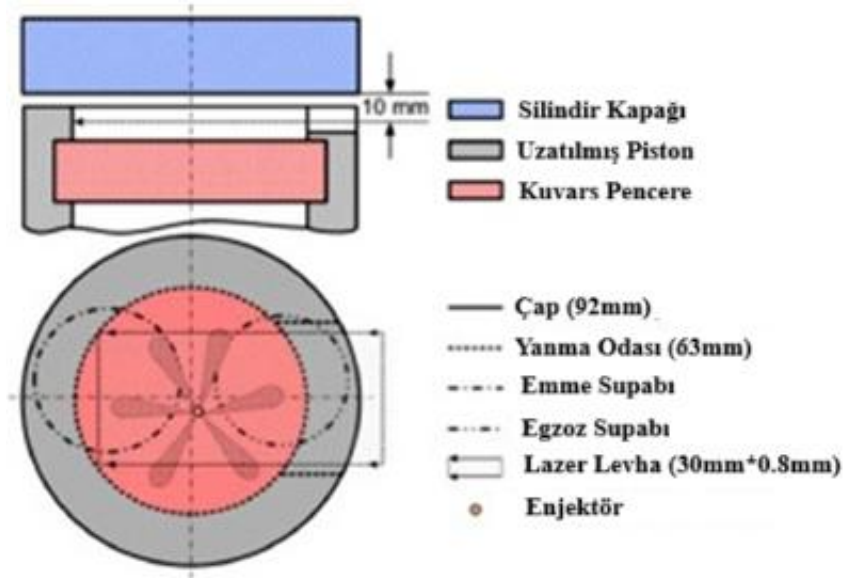
Ibron vd. kısmi ön karışımlı PPC yanmalı sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda dolgu malzemesinin homojen oluşturulamamasının yanma sürecine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma -70 KMA ile -17 KMA aralığında beş farklı enjeksiyon başlangıcı (SOI) için hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar k-ε türbülans kapanması ve Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) modelleri kullanılarak yapılmıştır.

Simülasyonlar, kendiliğinden ateşlemenin kritik olarak hem yakıt hem de sıcaklık katmanlaşmasına bağlı olduğunu göstermektedir. Ateşlemenin, yakıtın zayıf olduğu bölgelerde meydana geldiği ve yakıtın yanmış gazlar ile seyreltilmesine ve silindir gazı sıcaklık katmanlaşmasına (enjeksiyondan önce) bağlı olarak ateşleme noktasının belirlendiği görülmüştür. Daha sonraki enjeksiyon durumlarında, hazne içindeki karışımın daha yüksek eşdeğerlik oranına bağlı olarak daha yüksek bir ısı yayma hızı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışılan yakıtın negatif sıcaklık katsayısı (NTC) ısı salma davranışı, ateşleme dalgası yayılımını kısaltmada rol oynar. Gelişmiş enjeksiyon durumlarının simülasyonlarında yanma fazı daha yavaş ve doğru tahmin edilirken, yanma veriminin emme sıcaklığına çok duyarlı olduğu bulunmuştur (Ibron et al., 2019).

Lonn vd. geleneksel dizel yanmasına oranla daha yüksek verimlilik ve düşük emisyon vaat eden düşük sıcaklıklı yanma modlarından homojen şarjlı sıkıştırmalı ateşleme (HCCI) benzeri yanmadan geleneksel dizel (CDC) yanmaya kadar değişen bir ara yanma modu olan Kısmi n karışımlı (PPCI) yanma modunda farklı enjeksiyon başlangıcı (SOI) zamanlamalarının ateşleme ve yanmayı nasıl etkilediğini optik olarak incelemişlerdir. Türbülanslı, optik olarak erişilebilir tek silindirli ağır hizmet tipi bir motorda yapılan çalışmada enjeksiyon başlangıcı taramasında yanma fazını 50 (°KMA) ~3 °KMA ..N.’dan sonra da sabit tutmak için emme sıcaklığı değiştirilirken emme basıncı sabit tutulmuştur. Deneysel olarak yakıt olarak 81 oktan sayısına sahip birincil referans yakıtların karışımı olan bir yakıt, yanmanın nerede başladığını belirlemek ve

doğal parlaklığı tespit etmek için ise yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Sonuçlar ateşleme davranışındaki değişikliğin, yanma odasında duvarlara yakın noktalarda ve orta noktada farklı yakıt/hava oranları olduğundan, yakıt enjeksiyonu ve piston arasındaki etkileşimden etkilendiğini göstermiştir (Lonn et al., 2017).

Liu vd. hafif hizmet tipi bir optik motorda kısmi ön karışimli yanma (PPC) ve reaktif kontrollü sıkıştırırmalı ateşleme (RCCI)'da yakıtın katmanlaşmasını, ateşleme ve alevin gelişimini çoklu optik tekniği ile Şekil 2.2' deki gibi bir düzenek ile incelemiştir. Her iki yanma modunda ki çalışma için de yakıt reaktivitesi (PRF numarası) 70 ve konsantrasyonu (yakıt/hava denklik oranı) 0.77 olarak sabit tutulmuş ve doğrudan enjeksiyon zamanlaması (DI) -25 °KMA Ü.Ö.N.' dan önce konumunda sabitlenmiştir.



Şekil 2.2 Yanma odasının şeması ve optik görüntülemenin görüş alanı (H. Liu et al., 2019)

Önceden karıştırılmış dolgulu PPC ve RCCI yanma özellikleri incelenirken RCCI için port içine enjeksiyon kütle miktarı artırılmış, PPC için ise bölünmüş direkt enjeksiyon stratejisi kullanılmıştır. Sonuç olarak yakıttaki reaktivite tabakalaşmasına bağlı olarak RCCI modda çalışmada PPC modda çalışmadan daha kısa bir tutuşma gecikmesi görülmüş ayrıca doğal alev parlaklığı, formaldehit ve OH PLIF (Planer Lazer Induced Fluorescence) görüntüleri, PPC' nin erken aşamasında alev önü yayılmasının oluştuğunu kanıtlamış, RCCI' de belirgin bir alev önü yayılımı meydana gelmemiştir.

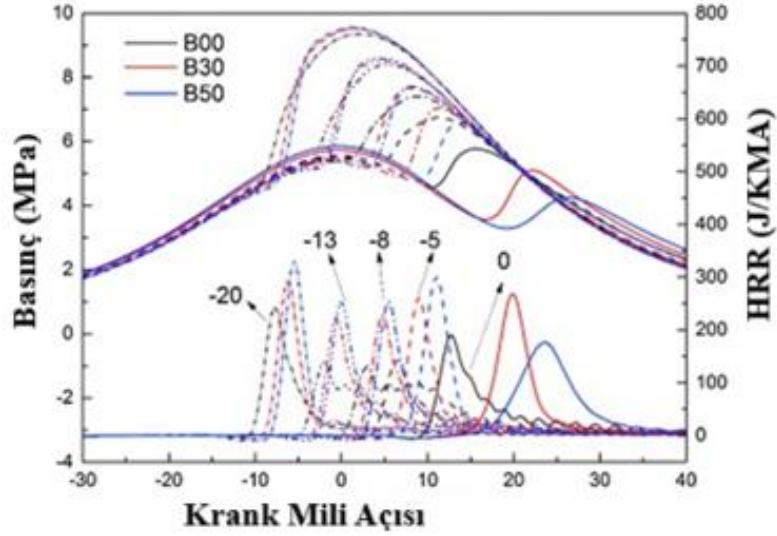
İkinci aşamada ise daha yüksek bir ön karışım oranının PPC yanma modunda daha hızlı bir yanma oranı sağladığı fakat RCCI yanma modunda yanma oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak Reaktif kontrollü sıkıştırılmalı ateşleme (RCCI) ve kısmi ön karışım (PPC) yanma modlarında farklı yakıt enjeksiyon stratejileri uygulanıp yakıtın katmanlaşması üzerinde oluşturulacak kontrol ile kendiliğinden tutuşma oranı ve alev önü yayılımının kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır (H. Liu et al., 2019).

Han vd. yüksek sıkıştırma oranlı motorlarda dizel, benzin, n-bütanol ve etanol kullanımının düşük sıcaklıkta yanma (LTC) stratejileri (HCCI, RCCI, PPC) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yakıtların silindire alınış yöntemleri düşük sıcaklıklı yanma modlarının yapısına göre tek bir yakıt veya çift yakıt kullanımı için yakıt özelliklerine bağlı olarak planlanmıştır. Yapılan testler, yakıt dağıtım oranlarının ve EGR oranlarının etkisini incelemek için ortalama efektif basıncın (IMEP) 0.8-1.2 MPa olduğu yük seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testlerde uçuculuğu yüksek bir yakıtın porttan silindir içerisine gönderilmesi ile düşük sıcaklıkta yanma için avantaj sağlayan silindir içerisinde yüksek bir homojenlik oluştuğu görülmüştür. Fakat yüksek sıkıştırma oranlarında benzin ve n-bütanol'ün porttan verilmesi durumunda erken kendiliğinden tutuşmayı önlemekte zorlanılmaktadır. Yüksek motor yüklerinde yanma kontrolü için daha az reaktif bir yakıt olan etanol tercih edilmesi durumunda kontrolsüz yanma ürünleri olan $\dot{I}s$ ve NO_x emisyonlarının oluşumunun azaltılabileceği görülmüştür. Dizel yakıt ile birlikte esas enerji kaynağı olarak saf etanol kullanıldığında iyi bir yanma performansı ile birlikte 1.7 MPa IMAP'a kadar olan motor yüklerinde çok çok düşük NO_x ve $\dot{I}s$ emisyonları elde edilmiştir (Han et al., 2013).

Liu B. vd. yaptıkları çalışmada dört silindirli turbo şarjlı bir dizel motorda n-bütanol/dizel karışımları (B30 ve B50) kullanarak erken püskürtme ve enjeksiyon öncesi püskürtme arasında PPCI yanma modunda çeşitli enjeksiyon parametrelerinin motor yanması ve emisyonlar üzerine etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada, tek enjeksiyon stratejisinde dizel yakıtla kıyasla bütanol karışımlarında 4.23 MPa'lık düşük silindir basıncı ve gecikmeli yanma başlangıcı (>5 °KMA) gözlemlenmiştir. Grafik 2.7'

de görüldüğü gibi enjeksiyon zamanlaması °KMA cinsinden Ü.Ö.N. dan 0' dan -20 dereceye ilerlediğinde bu eğilim (9.49 MPa tepe silindir basıncı) tersine çevrilmiştir.

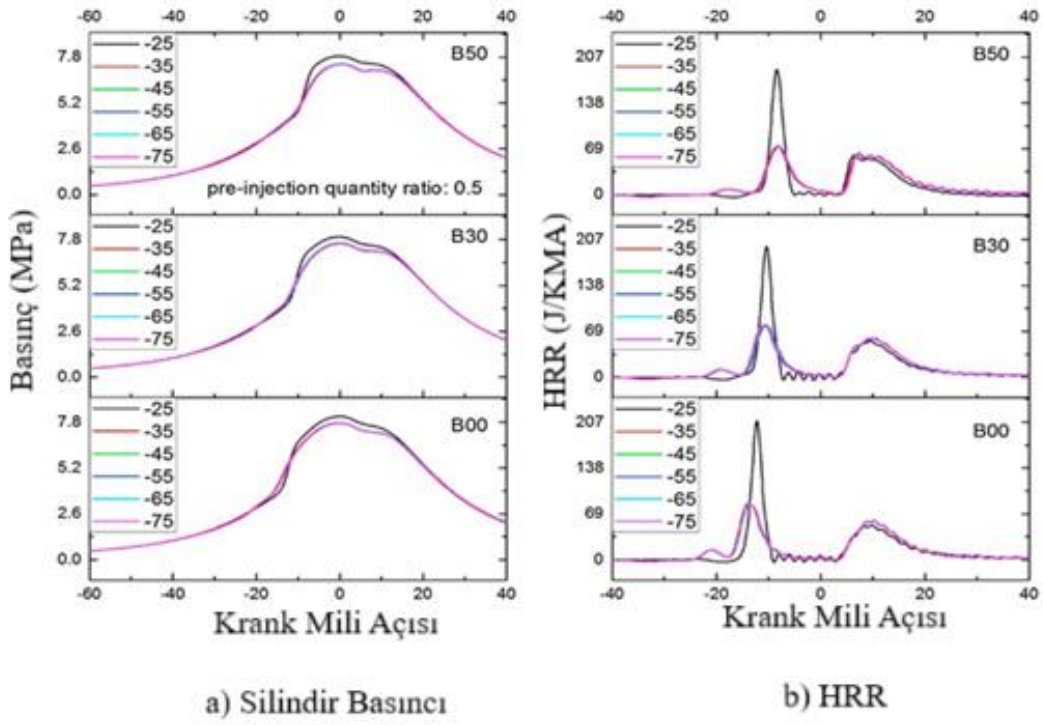


Grafik 2.7 Tek enjeksiyon stratejisinde farklı enjeksiyon zamanlaması altında silindir içi basınç ve HRR değişimleri (B. Liu et al., 2018)

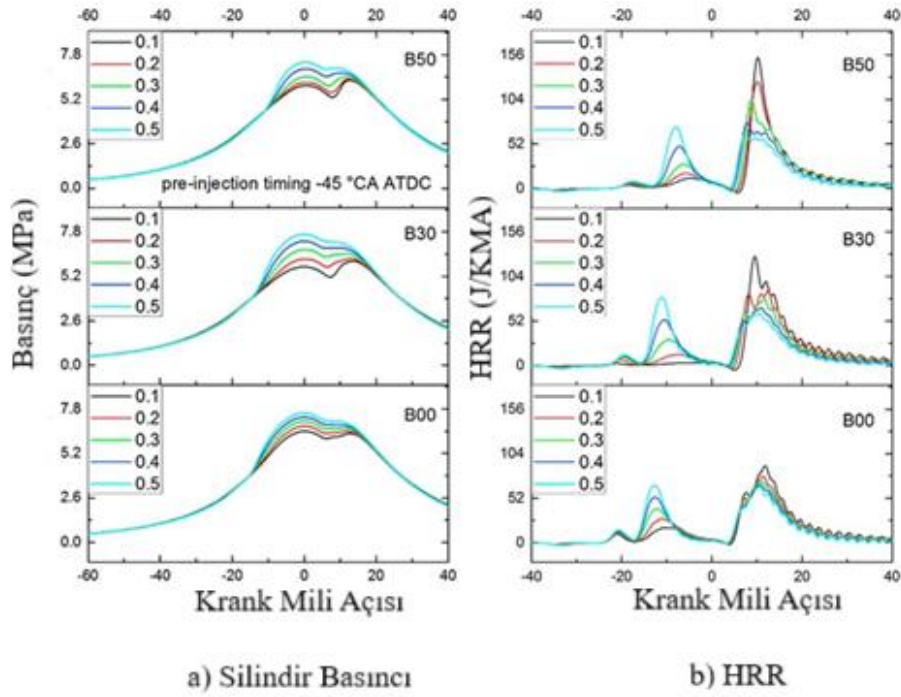
Yapılan çalışmada Grafik 2.8’de görüldüğü gibi bölünmüş enjeksiyon stratejisi için ise, ön enjeksiyon zamanı Ü.Ö.N. dan KMA cinsinden -25 ila -75 derece arasında yapılan deneylerde dizel yakıtınkine benzer silindir basıncı ve ısı yayma oranı özellikleri görülmüştür.

Ön enjeksiyon zamanlaması -25 °KMA Ü.Ö.N' dan daha erken olduğunda, basınç ve HRR eğrilerinin tümü aynı şekilde oluşmaktadır. Ön enjeksiyon da yanma olayının iki modluluk sergilediği ve yanma işleminin, ön enjeksiyon zamanlamasından bağımsız olarak kimyasal reaksiyon kinetiğinin kontrolü altında olduğu görülmektedir.

Bununla birlikte, bütanol oranı %50'ye kadar artırıldığında, buharlaşma sırasında bütanol yakıtı tarafından daha fazla ısının emilmesi nedeniyle, önceden karıştırılmış yanmanın gecikmesine bağlı olarak soğuk alev aşamasındaki azami ısı açığa çıkış hızı azalır. Grafik 2.9’da görüldüğü gibi ön enjeksiyon oranındaki 0.1'den 0.5'e artış, önceden karıştırılmış yanmanın artmasına ve azami ısı açığa çıkış oranının 154.6' dan 61.57 J/°KMA' na düşmesine neden olmuştur (B. Liu et al., 2018).

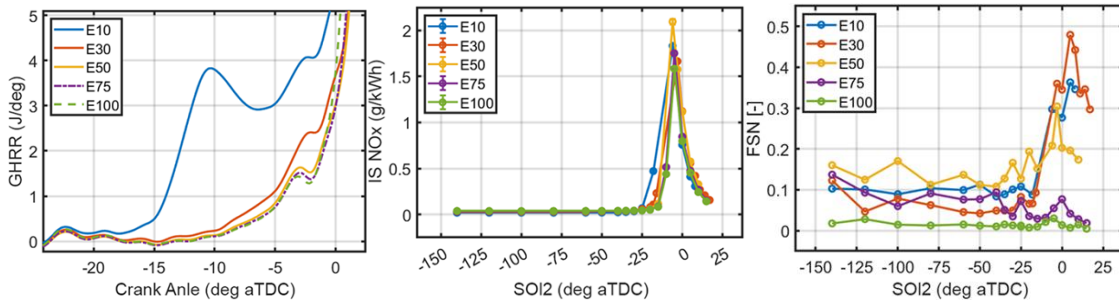


Grafik 2.8 Farklı ön enjeksiyon zamanlamaları için silindir içi basınç ve HRR değişimi (B. Liu et al., 2018)



Grafik 2.9 Farklı ön enjeksiyon oranları için silindir içi basınç ve HRR değişimi (B. Liu et al., 2018)

Gainey vd. yaptıkları çalışmada çift enjeksiyonlu kısmi ön karıştırmalı sıkıştırma ile ateşleme stratejisinde benzin içerisine %10, %30, %50, %75 etanol karıştırılmış E10, E30, E50, E75 ve E100 yakıtlarını deneysel olarak incelemişler. E10'un soğuk alev reaktivitesi ve E75 ile E100'ün yüksek soğutma potansiyeli sayesinde HRR salınımının kontrolüne imkan sağladığı tespit edilmiştir. NO_x emisyonlarının etanol içeriğinden önemli ölçüde etkilenmediği fakat is emisyonunun etkilendiği belirlenmiştir. E100 neredeyse hiç is üretmezken tüm etanol-benzin karışımlarının bir miktar is oluşumuna sebep olduğu görülmüştür. Yakıtın %20'sinin sıkıştırma zamanının ortasında püskürtüldüğü E10, E30, E50 ve E75 yakıtlarının tamamı çok düşük İS emisyonları üretmiştir. İkinci enjeksiyon Ü.Ö.N.' ya yakın bir yere kaydırıldığında E75' in İS emisyonu düşük kalırken E10, E30 ve E50' nin is emisyonları 0.3 FSN'nin (is yoğunluğu) üzerinde bir değere yükselmiştir (Grafik 2.10). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, düşük ve yüksek etanol içerikli benzinlerin kısmen önceden karıştırılmış yanma sistemleri için uygun bir seçenek olduğunu fakat orta etanol içerikli benzinlerden kaçınılması gerektiğini göstermektedir (Gainey et al., 2024).



Grafik 2.10 Etanol-benzin karışımı yakıtlarda Duman, NO_x emisyonları ve HRR değişimleri(Gainey et al., 2024)

Zhang vd. yaptıkları çalışmada kısmi ön karışimli yanma modunda, pilot ateşlemeli doğrudan enjeksiyonlu bir doğal gaz motorunda hava/yakıt oranının ve dizel enjeksiyon miktarının, yanma ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak değerlendirmiştir. Sonuçlar, hava/yakıt oranının artırılmasının maksimum silindir basıncının artmasına ve daha gelişmiş bir yanma sürecine yol açacağını, daha yüksek dizel enjeksiyon miktarlarının ise silindir tepe basıncının düşmesine ve yanma fazının gecikmesine neden olacağını göstermiştir. Emisyonlar göz önüne alındığında, daha yüksek hava/yakıt oranlarının NO_x, CO ve is emisyonlarının kontrolü için faydalı

olabileceğini; ancak orta ve yüksek motor yüklerinde toplam hidrokarbon emisyonlarında (THC) artışa yol açabileceğini göstermektedir. Dizel enjeksiyon miktarının artırılması NO_x emisyonlarının kontrolü için faydalı iken, CO ve is emisyonlarında kötüleşmeye neden olabilmektedir. THC emisyonları için düşük motor yüklerinde daha yüksek dizel enjeksiyon miktarları kullanılarak daha düşük değerler elde edilebilirken, orta ve yüksek motor yüklerinde daha düşük dizel enjeksiyon miktarları kullanılarak iyileştirmeler elde edilebileceği görülmüştür (Q. Zhang et al., 2025).

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada tek silindirli geleneksel dizel enjeksiyonlu (CDI) bir motora gerekli sensörler (devir sensörü, krank mili konum sensörü, sıcaklık sensörleri silindir içi basınç sensörü v.b.), emilen hava miktarını ve tüketilen yakıt miktarını ölçecek (Hava akış debimetresi, hassas terazi, kronometre) mekanizmalar, PPC modda çalışabilmesi için gerekli yakıt enjeksiyon sistemi ve enjektörler ilave edilmiştir. Deney motoruna eklenen sensör ve mekanizmalar bilgisayar üzerinden kontrol edilmiştir.

Deneylerde motor torku ölçümü için kullanılan Eddy current dinamometre' den ve sensörlerden alınan veriler kullanılarak motor karakteristikleri (Tork, güç, özgül yakıt tüketimi) sabit motor devrinde, farklı motor yükleri altında, yakıt cinsine ve ön püskürtme oranına bağlı olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca motor karakteristiklerinin ölçüldüğü deneyler esnasında aynı anda egzoz gaz analizörü ile NO_x, HC, CO₂, CO, O₂ ve PM emisyonlarının ölçümü yapılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. Deney Motoru

Deneylerde Şekil 3.1'de görülen Antor 3LD510 model dört zamanlı tek silindirli direkt enjeksiyonlu hava soğutmalı motor kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney Motoru ve revize edilmiş silindir kapağı

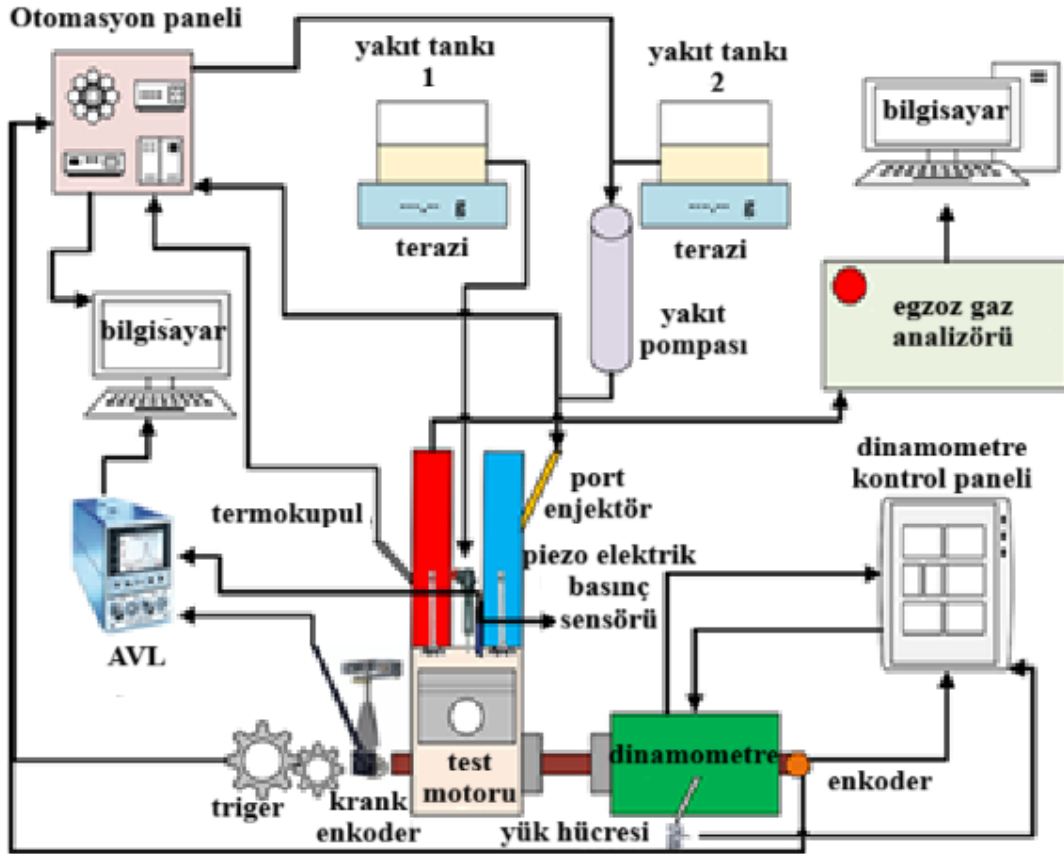
Silindir içi basınç ölçümü için motor silindir kapağı delinmiş ve AVL marka silindir içi basınç sensörünün montajına uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.1).

Motorun Kısmi Ön karışımli Sıkıştırma ile Ateşlemeli (PPCI) modda çalıştırılabilmesi için gerekli olan porttan ön püskürtme uygulamasında kullanılacak port yakıt enjektörünün (PFİ) emme portu girişine montajına imkân veren bir enjektör yuvası yapılmıştır.

Tablo 3.1 Deney motorunun teknik özellikleri

Markası ve Modeli	ANTOR 3LD510
Motor Tipi	Dört zamanlı direkt enjeksiyonlu dizel motoru
Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi	510 cm ³
Silindir çapı - Kurs boyu	85mm - 90 mm
Sıkıştırma Oranı	17,5 / 1
Maksimum motor devri	3000 d/dk
Maksimum motor gücü	9kW (3000 d/dk)
Maksimum motor torku	32,8 Nm (1800 d/dk)
Soğutma Şekli	Hava soğutmalı

3.1.2. Deney düzeneği

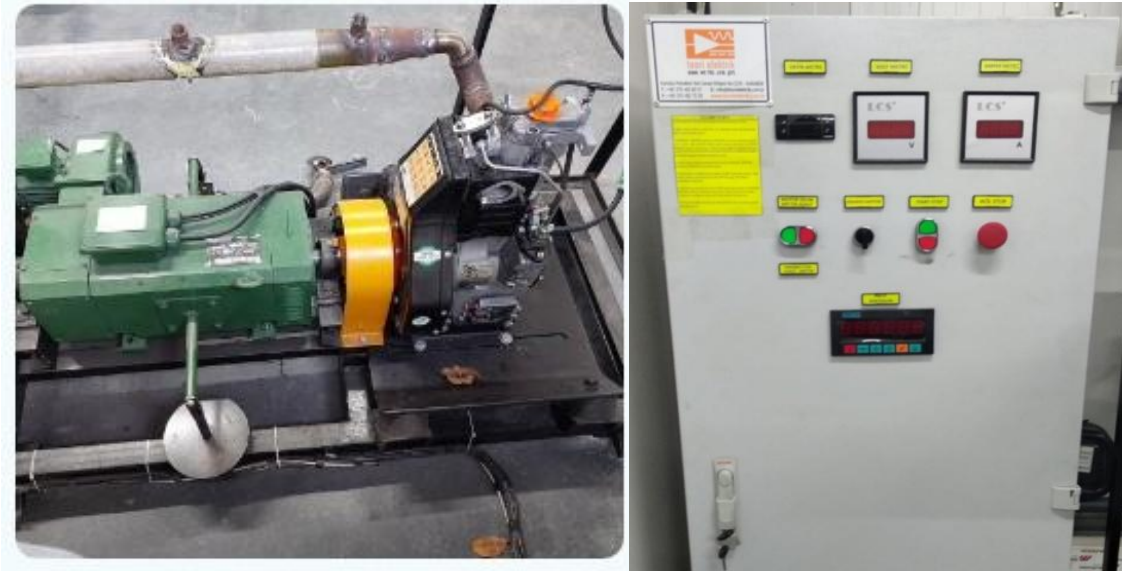


Şekil 3.2 Deney düzeneğinin şeması

Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 3.2.'de verilmiştir. Deneyler, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Arifiye Meslek Yüksekokulu Motor Testi ve Simülasyon Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin resimleri EK-1'de verilmiştir. Deney esnasında deney motoru, bir elektrikli dinamometre tarafından yüklenerek motor performans verilerinin ölçümü yapılmıştır.

3.1.3. Dinamometre

Deneylerde şekil 3.3'te görülen KEMSAN marka KK112 model 3000 d/d da 15 kW çıkış gücüne sahip elektrikli DC dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrenin teknik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Motor, krank mili çıkışından dinamometreye ara bağlantı aparatı (kaplin) ile bağlanmış ve motor yükü 50 kg kapasiteli "S" tipi bir yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür.



Şekil 3.3 KEMSAN KK112 model dinamometre ve kontrol panosu

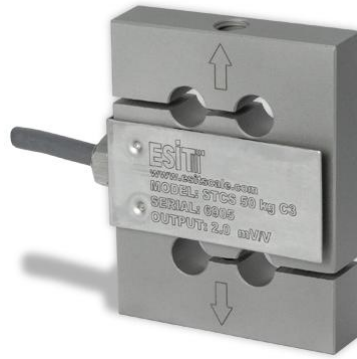
Şekil 3.3'te görülen dinamometre kumanda panosu kullanılarak hem deney motoruna ilk hareket (marş) verilmiş hem de motorun istenen yüklerde çalışması için gerekli olan yükleme yapılmıştır.

Dinamometrenin marş motoru olarak kullanılması için şebekedeki alternatif akımın doğru akıma çevrilmesi gerekir. Deney motoru çalıştıktan sonra kumanda panosundaki düğme dinamometre konumuna getirilerek, dinamometrenin çıkışındaki direnç kontrol edilerek motor istenen yüklere yüklenmektedir.

Tablo 3.2 Dinamometre teknik özellikleri

Markası	KEMSAN
Frenleme Gücü (max)	15 kW
Devir (max)	3000 d/d
Yük hücresi modeli	Esit STCS 50 kg (S tipi)
Yük hücresi kapasitesi	50 kg
Elektrik ihtiyacı	220/380 V. 50 Hz.
Dönüş yönü	Sağa dönüşlü
Dinamometre moment kol uzunluğu	0.15 metre

Deney motorunun volanından alınan gücün ölçümü için dinamometre koluna Şekil 3.4'te görülen, toplam hata oranı $\leq \pm 0.05$ % olan Esit STCS 50 model S tipi yük hücresi bağlanmıştır. Deneyler öncesinde yük hücresinin kalibrasyonu hassas bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.4 Esit STCS 50 model S tipi yük hücresi

3.1.4. Tüketilen yakıt miktarının ölçümü

Tüketilen yakıt miktarının belirlenmesi için deneylerde CAS ED-H marka hassas terazi ve hassasiyeti 0.01 saniye olan KENKO KK-613D marka kronometre kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Hassas terazi ve kronometre

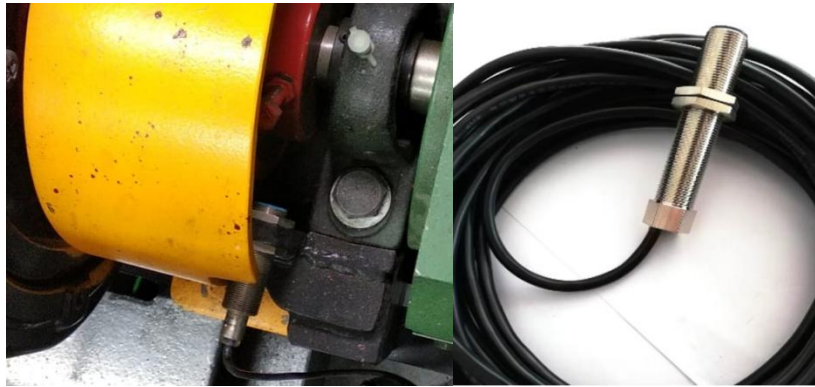
Kullanılan hassas terazi ve kronometre Şekil 3.5’te, hassas terazinin teknik özellikleri ise Tablo 3.3’te görülmektedir. Yakıt tüketimi ölçümleri her test noktasında en az üç kez tekrarlanmıştır.

Tablo 3.3 Hassas terazi teknik özellikleri

Markası ve Modeli	CAS/ED-H
Kapasite (kg)	6
Hassasiyet (g)	0.2
Çözünürlük	1/30000
Ekrandaki rakam sayısı	6
Ekran tipi	LCD (mavi arka ışık)
Güç tipi	Şarj edilebilir pil veya DC adaptörü
Cihaz ağırlığı (kg)	4.5

3.1.5. Motor hızı ölçümü

Deneyler esnasında motor devrini ölçmek için Şekil 3.6’da görülen hall effect bir devir sensörü kullanılmıştır. Deney motorunun çıkış mili üzerinde sensörün okuyabileceği bir pim ile motor hızı ölçülmüştür. Devir sensörü 5 mm’den daha yakın bir mesafeden ölçüm yapmaktadır. Ölçüm yapılan sensörün hassasiyeti 1 d/d’dır.



Şekil 3.6 Motor devir sensörü

3.1.6. Yakıt Püskürtme sistemi

Geleneksel dizel motorunu PPCI (kısmi ön karışimli sıkıştırma ile ateşlemeli) moda çalıştırabilmek için emme manifolduna yakıt püskürtebilen elektronik kontrollü bir enjeksiyon sistemi montajı yapılmıştır. Motorun çıkış miline bağlı bir konum sensörü ile belirlenen konum dikkate alınarak, enjeksiyon sisteminin kontrol paneli üzerinden ayarlanan krank mili açısı değerine göre enjeksiyon başlatılmakta ve kullanıcı tarafından istenen süre kadar püskürtme devam etmektedir.



Şekil 3.7 Enjeksiyon kontrol sistemi paneli

Enjeksiyon sisteminin kumanda panosunda; devir, süre ve enjeksiyonun başlayacağı krank mili açısına ait ayarlanan ve gerçek değerler görülmektedir. Alt menüleri kullanarak ayar işlemleri ayrı ayrı yapılabilmektedir. Enjeksiyon sisteminde kontrolü sağlayan iki adet mikroişlemci bulunmaktadır.

Ayrıca enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir

Tablo 3.4 Enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri

Besleme gerilimi	220 V
Enjektör kontrol gerilimi	12 V
Enjektör kontrolü için zaman ayarı	1 ms
Geri bildirim	360 sinyal üreten devir sayıcı
Enjektör kontrol açısı hassasiyeti	1 derece

3.1.7. Silindir İçi Basınç Ölçümü

Silindir iç basıncının ölçümünde AVL marka basınç sensörü kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce motorun sıkıştırma sonu-yanma başlangıcındaki ÜÖN konumu basınç sensörü ölçüm sisteminde bulunan krank mili açısı algılayıcısına tanıtıldığında sistem KMA’na bağlı olarak basınç değerini gösteren grafikler üretebilmektedir. Silindir içi basınç verileri her bir derece krank açısı için ölçülmüş ve elde edilen verilerin çevrim farklarını azaltmak için 200 ardışık çevrim boyunca ölçüm tekrarlanmıştır. Sonuçlar AVL tarafından geliştirilen bir yazılım vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu ölçüm sonuçları, ısı salınım hızı (heat release rate), kümülatif ısı salınımı (cumulative heat release), CA10, CA90, maksimum basınç (P_{max}) ve maksimum basınç artış hızı (MPRR) parametrelerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Silindir içi basınç ölçümünde kullanılan yazılım ara yüzü Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8 Silindir içi basınç sensörü, sinyal düzenleyicisi ve ölçüm ara yüzü

3.1.8. Emisyon Ölçümü

Egzoz emisyonlarının ölçümünde Şekil 3.9’da görülen BİLSA MOD 2210 WINXP-K marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Kullanılan gaz analizörü CO, CO₂, HC, O₂, NO_x emisyonları ve λ ’nın ölçümünü gerçekleştirmektedir. Cihazın teknik özellikleri Tablo 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.9 BİLSA MOD 2210 WINXP-K Egzoz gaz analizörü

Cihazda CO, CO₂ ve HC oranlarının ölçülmesinde dispersif olmayan kızılötesi yöntem kullanılmakta, O₂ ölçüm işleminde ise egzoz gazında bulunan oksijen miktarı cihazda bulunan O₂ ölçüm değeri enkoderi tarafından havadaki %20.9 hacimsel oksijen oranı ile karşılaştırılmaktadır.

Tablo 3.5 Egzoz gaz analizörü teknik verileri

PARAMETRE	ÖLÇÜM SINIRI	HASSASİYET
CO	0-%10	0.01%
CO ₂	0-%20	0.01%
HC	0-10000 ppm	1 ppm
O ₂	0-%25	0.01%
NO _x	0-5000 ppm	1 ppm
LAMBDA	0-5	0.001

3.1.9. Yakıt özellikleri

Deneyleerde standart Dizel yakıtı, JP8 jet yakıtı ve bu iki yakıtın hacimsel olarak belirli oranlarda karışımları kullanılmıştır. Tablo 3.6’da yakıt karışım oranları ve verilen kodları, Tablo 3.7’de ise kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.6 JP8 jet yakıtı ve dizel yakıtının karışım oranları ve kodları

Hacimsel karışım oranları	Deney yakıtına verilen kod
%0 JP8 jet yakıtı - %100 dizel yakıtı	Std. Dizel
%10 JP8 jet yakıtı - %90 dizel yakıtı	10JP8D90
%30 JP8 jet yakıtı - %70 dizel yakıtı	30JP8D70
%50 JP8 jet yakıtı - %50 dizel yakıtı	50JP8D50
%100 JP8 jet yakıtı - %0 dizel yakıtı	100JP8D0

Tablo 3.7 JP8 jet yakıtı ve dizel yakıtının fiziksel özellikleri(Yamık, H.; Calam, A.; Solmaz, H.; İçingür, 2013)

ÖZELLİK	JP8 YAKITI	DİZEL YAKITI
Yoğunluk (kg/l, 15 °C)	0.7950	0.8372
Setan sayısı	45	54
Enerji içeriği (Mj/kg)	43.2	44-46
Parlama noktası (°C)	41	73
Viskozite (cst)	3.87 (40 °C)	2.8 (40 °C)

3.2. Belirsizlik analizi

Yapılan çalışma esnasında karşılaşılan ölçme hataları ve belirsizlikler, deneysel çalışmanın doğasında vardır. Deney sonuçları ve bu sonuçlara bağlı olarak hesaplanan değerlerin doğruluğu, deney esnasında kullanılan ölçü aletleri ve cihazların hassasiyetleri ve çevresel faktörlerden (sıcaklık, titreşim, basınç v.b.) etkilenmektedir. Çalışma sonucu elde edilen verilerdeki hata analizi için hem cihaz belirsizlikleri hem de ölçüm belirsizlikleri belirsizlik analizi yöntemi ile hesaplanmıştır.

Deney verileri değerlendirilirken ölçüm yöntemlerinin farklı olmasından dolayı her deney için (Basınç, Yakıt tüketimi v.b.) ortalamalar ayrı ayrı hesaplanmıştır. Örneğin yakıt tüketimi için üç deney verisinin ortalaması alınırken, silindir içi basınç verisi için iki yüz çevrimin ortalaması alınmıştır. Sonuçları değerlendirmek ve hatalı sonuçları düzenlemek ya da elemek için; deney verilerindeki sapmaların ve standart sapmanın hesabından sonra şüpheli verilerin ayıklanmasın da kullanılan Chauvenet kriteri uygulanmıştır. Her bir deney için standart sapmalar hesaplanmış ve sınırlar dışında kalan veriler tekrar incelenerek ya düzenlenmiş ya da elenmiştir.

Tablo 3.8 Chauvenet kriteri (Murcak, 2012)

Okunma sayısı (n)	Maksimum kabul edilebilir sapmanın standart sapmaya oranı ($d_{max}/(\text{standart sapma})$)
2	1.15
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.80
10	1.96
15	2.13
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14

Sapma (d_m) her bir deney verisi ile ortalama arasındaki farkı ifade eder.

$$d_m = (X_m - \bar{X}) \quad (D.1)$$

Ölçülen bir büyüklüğün n tekrarlı ölçümünün ortalaması (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum X_m}{n} \quad (D.2)$$

Ölçülen verilerin standart sapması (SD)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_m - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (D.3)$$

Deneyel verilerin belirsizliği ise (U)

$$U = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (D.4)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Burada;

n : Tekrarlı ölçüm sayısı

SD : Ölçümün standart sapması

U : Deneysel verilerin belirsizliği (Senturk Acar & Arslan, 2017)

Toplam belirsizlik U_R için ise kareleri toplamının karekökü metodu kullanılmıştır.

Örneğin;

50JP8D50 yakıtı ile %10 ön püskürtme oranı için yapılan deneylerde %0 (yüksüz) motor yükü durumunda 60 saniyelik yakıt tüketimi üç defa ölçülmüş ve sonuçlar 5.5 gr/dk – 5.7 gr/dk – 5.8 gr/dk olarak ölçülmüştür.

Deney verilerinin ortalaması denklem D.2 İle

$$\bar{X} = \frac{(5.5+5.7+5.8)}{3}$$

$$\bar{X} = 5.666$$

bulunur.

Verilerin ortalamadan sapma değerleri denklem D.1 ile

$$d_{m1} = 0.16$$

$$d_{m2} = 0.04$$

$$d_{m3} = 0.14$$

bulunur.

Verilerin standart sapması D.3 nolu denklemden;

$$SD = \sqrt{\frac{(0.16^2+0.04^2+0.14^2)}{(3-1)}}$$

$$SD = 0.152$$

olarak hesaplanmıştır.

Chauvenet kriteri için $\frac{d_m}{SD}$;

$$\frac{d_{m1}}{SD} = \frac{0.16}{0.152} \quad 1.05$$

$$\frac{d_{m2}}{SD} = \frac{0.04}{0.152} \quad 0.26$$

$$\frac{d_{m3}}{SD} = \frac{0.14}{0.152} \quad 0.92$$

bulunur.

Tablo 3.8'de üç tekrarlı ölçüm için Chauvenet kriteri olarak deney verisinin sapmasının standart sapmaya oranı 1.38 belirlenmiştir. Hesaplanan oranların değerleri bu sınırın içinde olduğu için verilerde ayıklama yapmaya gerek olmadığı görülmüştür.

Bu deney kademesi için yakıt tüketiminde belirsizlik ise denklem D.4'ten;

$$U = \frac{0.152}{\sqrt{3}}$$

$$U = 0.088$$

olarak hesaplanmıştır.

3.3. Ölçüm Metodu

Deneylere başlamadan önce deney motorunun tüm bakım ve ayarları yapılmış, motor yağı ve filtreleri değiştirilmiştir. Motorun yakıt düzenleyici sistemi devre dışı bırakılmış ve deney yapılırken motor hızı kontrolü el ile sağlanmıştır. Ölçümlere motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra başlanmış, her bir deney kademesi tamamlandığında motor bir sonraki deney öncesi ara dinlenmeye bırakılmıştır.

Deneyler kısmi ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli (PPCI) modda çalıştırılabilen bir motor üzerinde standart dizel yakıtı, JP8 jet yakıtı ve bu iki yakıtın hacimsel olarak belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen deney yakıtları kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmada, ana enjektör ve port enjektörü olmak üzere iki enjeksiyon sistemi kullanılmış, ana enjektör direkt enjeksiyon ile motorun silindir içine yakıt verirken, port enjeksiyon sistemi emme manifolduna yerleştirilmiştir. Port enjektörünün yakıt püskürtme karakteristiği her bir deney yakıtı için gram/saniye cinsinden belirlenmiştir.

Port enjeksiyon sistemi, bir elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmekte olup, enjeksiyon süresi ve miktarı ayarlanabilmektedir. Ancak, port enjeksiyon zamanlaması ve ana enjeksiyon zamanlaması deneyler boyunca sabit tutulmuş, ön püskürtme oranları %10, %20, %30 ve %40 olarak değiştirilmiştir.

Motor geleneksel modda standart dizel yakıtı ile çalıştırılıp yapılan ölçümler ile referans veriler alınmıştır. Daha sonra deney motoru PPCI modda deney motorunun maksimum tork devri olan 1800 devir/dakika hızında, %0, %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde test edilmiştir. Motor yükü dinamometre kontrol paneli üzerinden ayarlanmış, motor hızı ise dinamometreye bağlı bir devir sayıcı ile kontrol edilmiştir. Testler belirlenen beş farklı yakıt (0JP8D100, 10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ve dört farklı ön püskürtme oranı (%10, %20, %30, %40) için yapılp alınan veriler işlenmiştir.

Ana yakıt enjektörü aracılığıyla motor içine püskürtülen yakıt, hassas terazi ve kronometre kullanılarak 60 saniyedeki tüketim miktarı gram cinsinden ölçülmüştür. Yakıt tüketimi ölçümleri her test noktasında en az üç kez tekrarlanmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır.

Silindir içi basınç ölçümleri AVL marka basınç sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Silindir içi basınç verileri her bir derece krank açısı için ölçülmüş ve elde edilen veriler çevrim farklarını azaltmak için 200 ardışık çevrim boyunca tekrarlanmıştır. Bu ölçümler, ısı salınım hızı (HRR), kümülatif ısı salınımı (CHR), CA10, CA90, yanma süresi (CD), maksimum basınç (P_{max}) ve maksimum basınç artış hızı (MPRR) parametrelerinin hesaplanması için kullanılmıştır.

Deney sonuçlarının doğruluğunu sağlamak amacıyla ölçümlerde belirsizlik analizi yapılmıştır. Tork ölçüm belirsizliği ± 0.1 Nm, yakıt akış hızındaki belirsizlik $\pm \%0.4$ olarak hesaplanmıştır. Egzoz emisyonları için kullanılan cihazın doğrulukları CO_2 ve O_2 için $\pm \%0.1$, NO_x için ± 1 ppm olarak belirlenmiştir. Birleşik belirsizlik, ölçümlerin doğruluğunu sağlamak için standardize edilmiştir ve elde edilen verilerin güvenilirliğini desteklemektedir. Bu materyal ve metot yaklaşımı ile, motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon parametreleri üzerine deney yakıtlarının ve ön enjeksiyon oranlarının etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.4. Hesaplama Yöntemleri

Deney motorundan elde edilen veriler (yük hücresinden okunan kuvvet değeri, yakıt tüketimi, motor devri) kullanılarak; döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt tüketimi, termal verim değerleri hesaplanmıştır.

Ayrıca AVL basınç sensöründen elde edilen basınç verileri kullanılarak Isı salınım oranı (Heat Release Rate), Kümülatif ısı salınımı (Cumulative Heat Release) ve Yanma süresi (Combustion Duration) hesaplamaları yapılmıştır.

3.4.1. Motor momenti

Deney motoru maksimum tork devri olan 1800 d/dak' da farklı yükler altında çalışırken kuvvet değeri yük hücresi göstergesinden okunmuştur. 1800 d/dak sabit motor devrinde ölçüm yapılan her bir motor yükü (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) için göstergede okunan kuvvet değeri, dinamometre moment kolu uzunluğu ile çarpılarak o çalışma şartlarındaki motor momenti bulunmuştur (Denklem 5). Deney düzeneğinde dinamometre moment kolu uzunluğu 0.15 m'dir.

$$Me = F.L \quad (D.5)$$

Burada;

Me : Motor Momenti (Nm)

F : Kuvvet (N)

L : Moment kolu uzunluğu (m) (B. Düzcan, 2017)

Örneğin;

%10 ön püskürtme oranı için %50 motor yükünde 1800 d/dk motor hızında yapılan deneyde göstergeden okunan kuvvet 98.1 N' dur. Bu değer denklem D.5' te yerine yazıldığında

$$Me = 98.1 * 0.15$$

Me = 14.715 Nm olarak hesaplanır.

3.4.2. Motor efektif gücü

Efektif motor gücü, bir motorun tüm iç kayıpları ve çalışması için gerekli olan yardımcı üniteler çıktıktan sonra, volan milinden (krank milinden) alınan gerçek güçtür.

Deneyley sonunda motor efektif gücünün belirlenmesinde aşğıdaki eşitlik kullanılmıştır (Denklem D.6) (B. Düzcan, 2017; Murcak, 2012).

$$Pe = \frac{M.n}{9549} \quad (D.6)$$

Burada;

Pe : Efektif güç (kW)

M : Moment (Nm)

n : Motor devri (d/dak)

Motor gücü moment ve motor devrine bağılı olarak denklem D.6 ile

$$Pe = (14.715 * 1800) / 9549$$

Pe = 2.7738 kW olarak hesaplanmıştır.

3.4.3. Yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi

Motorun ana enjektöründen püskürtülen yakıt hassas terazi ve kronometre kullanılarak 60 saniyedeki tüketim miktarı gram cinsinden ölçülmüştür. Port enjektöründen püskürtülen yakıt miktarının belirlenmesinde ise her bir deney yakıtı için enjektörün 60 saniye sürekli açık kalarak püskürttüğü yakıt miktarı belirlenerek enjektör karakteristiğı çıkarılmıştır. Her bir deney kademesi için porttan püskürtülecek yakıt miktarı ve gerekli olan enjektör açık kalma süresi hesaplanmıştır.

$$B = (B_{ana} + B_{port}) \quad (D.7)$$

Özgül yakıt tüketimi, deney sırasında tüketilen yakıt miktarının ölçülen güce oranıdır.

$$be = \frac{B}{Pe} . 60 \quad (D.8)$$

Burada;

be : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B : Yakıt tüketimi (g/dk)

Pe : Motor gücü (kW)

B_{ana} = Ana enjektörden püskürtülen yakıt miktarı (g/dk)

3.4.4. Termal verimin hesaplanması

Termal verimlilik, motorun yakıt enerjisini ne kadar verimli bir şekilde işe dönüştürdüğünü gösteren bir göstergedir; daha yüksek termal verimlilik değerleri, daha iyi performansı ifade etmektedir. Termal verim sistemden alınan enerjinin sisteme verilen enerji miktarına oranı olarak denklem D.9 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\eta_t = \frac{P_e}{m_y \cdot H_u} \quad (D.9)$$

η_t = Termal verim

P_e = Motor gücü (kW)

m_y = Silindire gönderilen yakıt miktarı (kg/s)

H_u = Yakıt alt ısı değeri (kJ/kg)

Örneğin:

10JP8D90 yakıtı ile %10 ön enjeksiyon oranında %50 motor yükünde yakıt tüketimi 16.131 g/dk = 0.00027 kg/s olarak yukarıda hesaplanmıştır. Ölçülen motor gücü 2.7738 kW ve 10JP8D90 yakıtının alt ısı değeri 43590 kJ/kg olduğuna göre;

$$\eta_t = \frac{P_e}{m_y \cdot H_u}$$

$$\eta_t = \frac{2,7738}{0,00027 \cdot 43590} = 0.236 \text{ olarak hesaplanır.}$$

3.4.5. Krank açısına bağlı olarak pistonun aldığı yolun ve anlık silindir hacminin hesabı

Isı salınım oranı ve benzeri bazı motor performans değerlerinin hesaplanabilmesi için krank açısına bağlı olarak anlık silindir hacminin ve türevinin değişiminin hesaplanması gerekir.(Gürsoy, 2023)

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (D.10)$$

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad (D.11)$$

$$V_s = V_h + V_c \quad (D.12)$$

Denklem D.10, D.11 ve D.12 sırasıyla krank hacmi, yanma odası hacmi ve silindir hacminin hesaplanması için kullanılan eşitliklerdir.

Burada;

V_h : Kurs hacmi (m^3)

V_c : Yanma odası hacmi (m^3)

V_s : Silindir hacmi (m^3)

H : A.Ö.N. ile Ü.Ö.N. arasındaki mesafe (m)

ε : Sıkıştırma oranı

D : Silindir çapı (m)

Pistonun silindir içerisinde aldığı yolun hesabı için;

$$S = L + r - r \cdot \cos\theta - L \cdot \cos\beta \quad (D.13)$$

Eşitliği yazılıp trigonometrik dönüşümler yapıldığında $\cos\beta$ ' nin θ cinsinden ifadesi hesaplanabilir.

$$L \cdot \sin\beta = r \cdot \sin\theta$$

$$\sin\beta = \frac{r}{L} \cdot \sin\theta$$

$$\sin^2\beta + \cos^2\beta = 1$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\beta}$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L} \cdot \sin\theta\right)^2} \quad (D.14)$$

D.14 nolu denklem D.13 nolu denklemde yerine yazılıp düzenlendiğinde

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

$$S(\theta) = r \cdot \left((1 - \cos\theta) + \frac{1}{\alpha} - \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - \sin^2\theta} \right) \quad (D.15)$$

Burada;

L : Biyel kolu uzunluğu (m)

r : Krank mili yarıçapı (m)

θ : Krank mili açısı

α : Krank mili yarıçapının biyel kolu uzunluğuna oranı

$S(\theta)$: Pistonun krank mili açısına bağlı olarak aldığı yol (m)

Krank mili açısına bağlı olarak anlık silindir hacminin hesabı için ise;

$$V = V_c + \frac{\pi.D^2}{4}.S(\theta) \quad (D.16)$$

yazılabilir. Denklem D.16'nın türevi alındığında her bir derece krank açısı için silindir hacminin değişimini ifade eden eşitlik elde edilmiş olur.

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi.D^2}{4} \cdot \left(r \sin\theta + \frac{\cos\theta \cdot \sin\theta}{\sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - \sin^2\theta}} \right) \quad (D.17)$$

Denklem D.18 ise her bir derece krank açısı için basınç değişimini hesaplamada kullanılmıştır.

$$\frac{dP}{d\theta} = P_i - P_{i-1} \quad (D.18)$$

3.4.6. Isı salınım oranı (HRR), Kümülatif ısı salınımı (CHR) ve Yanma süresinin (CD) hesaplanması

Motor içerisindeki ihmal edilebilecek kütleli kaçaklar (supaplardan ve segmanlardan olan kaçaklar) dikkate alınmadığında yanma sonucunda açığa çıkan ısı, soğutma sıvısına transfer olan ısı ve piston üzerinde meydana gelen sınır işine bağlı olarak Termodinamiğin birinci yasası kapalı sistemler için uygulandığında;

$$dQ - \delta W - dQ_d = dU \quad (D.19)$$

D.19 numaralı denklem elde edilir. Burada dQ silindir içerisindeki yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısıyı, dQ_d ise silindir cidarlarından soğutma sıvısına transfer olan ısıyı ifade etmektedir. Denklem D.19'a iç enerji ve iş terimleri de ilave edildiğinde Denklem D.20 elde edilir.

$$dQ = mc_v dT + p dV \quad (D.20)$$

$$dT = \frac{1}{mR} V dp + \frac{1}{mR} p dV \quad (D.21)$$

İdeal gaz kanunu türevinden elde edilen denklem D.20 ve Denklem D.21 düzenlendiğinde

$$dQ = mc_v \left(\frac{1}{mR} V dp + \frac{1}{mR} p dV \right) + p dV \quad (D.22)$$

$$dQ = \frac{c_v}{c_p - c_v} V dp + \left(1 + \frac{c_v}{c_p - c_v} \right) p dV \quad (D.23)$$

Denklem D.23'ü özgül ısıların oranı olarak tekrar düzenlediğimizde

$$dQ = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P dV + \frac{1}{\gamma - 1} V dP \quad (D.24)$$

elde edilir.

Yanma odasında yanma süreci sonunda açığa çıkan ısı miktarı Denklem D.24 ile hesaplanmaktadır. Isı salınım oranının (HRR) hesabı için ise denklemin tekrar krank açısı başına değişimi gösterecek şekilde düzenlenmesi gerekir.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (D.25)$$

Elde edilen son eşitlik (Denklem D.25) silindir içerisindeki birim krank açısı başına açığa çıkan enerjiyi tanımlayan ısı salınım oranının hesabında kullanılmaktadır. Burada $\frac{dQ}{d\theta}$ ısı salınım oranını ifade etmektedir.

Burada;

P : Silindir içi basınç (Pascal)

V: Silindirin anlık hacmi (m³)

γ : Özgül ısıların (c_v , c_p) oranı

Kümülatif ısı salınımının (Q_{CHR}) hesabı için denklem D.26

$$Q_{CHR}(\theta) = Q_\theta + Q_{\theta-1} \quad (D.26)$$

Yanma süresinin (CD) hesabı için ise denklem D.27 kullanılmıştır.

$$CD = \int_{SOC}^{EOC} d\theta \quad (D.27)$$

Burada SOC (Start of Combustion) yanma başlangıcı olarak kabul edilen toplam ısı salınımının %10'unun gerçekleştiği (CA10) krank açısını, EOC (End of Combustion) ise yanma olayının sonu olarak kabul edilen toplam ısı salınımının %90'ının gerçekleştiği (CA90) krank açısını ifade etmektedir. CA10 ile CA90 değerlerinin

gerçekleştđđđ °KMA' larının arasındaki fark yanma olayının süresini (CD) temsil etmektedir (Işcan, 2020; Nidhi Chaudhary, 2022; Solmaz, Hamit ; İpci, 2020).

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Yakıt karışım oranının yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi

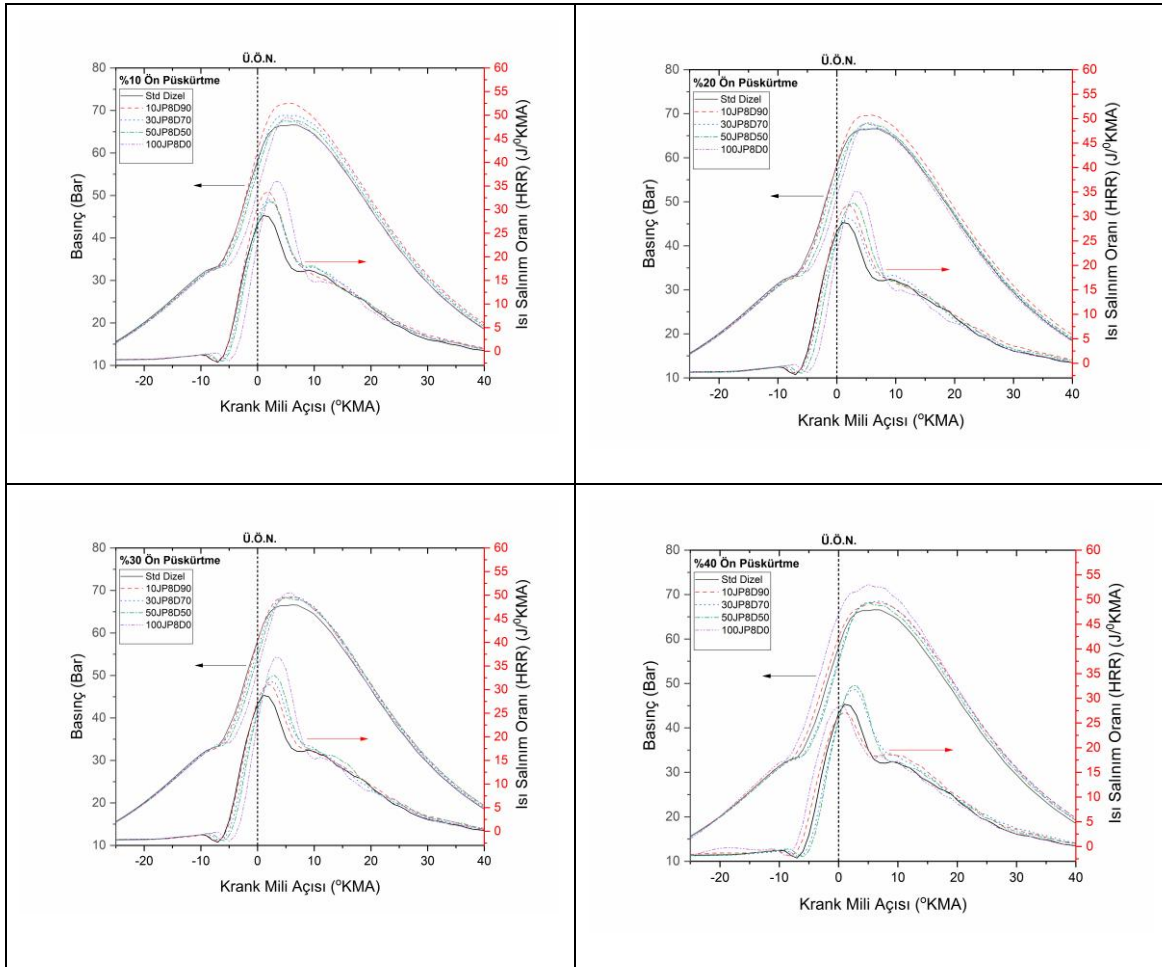
4.1.1. Farklı yakıt karışım oranları için silindir içi basınçlarının ve ısı salınım oranının (HRR) değişimi

Silindir içi basıncı ve ısı salınım oranı (HRR), motorun tork, güç, verimlilik ve emisyon gibi performans parametrelerini belirleyen ana faktörlerdendir. Yüksek silindir içi basınçlar genellikle daha yüksek tork ve motor gücü üretimiyle ilişkilendirilebilir. Bu yüzden silindir içi basınç profilleri yanma dinamiklerinin değerlendirilmesinde temel verilerdir, çünkü doğrudan yanma sürecinin enerji salınımı ve verimliliği ile ilişkilidir. HRR yanma süreçlerinde birim °KMA başına salınan ısı miktarını ifade eden temel bir parametredir. Erken ve hızlı ısı salınımı, yüksek basınç artış oranlarına ve potansiyel motor vuruntusuna yol açabilirken, daha kontrollü ve yayılmış bir HRR profili ise ısı kayıplarını azaltıp verimliliği artırabilir. HRR' nin şekli ve zamanlaması yanma dinamikleri hakkında önemli bilgiler sağlar ve yanma işlemi sırasında salınan enerji oranını gösterir. HRR eğrisinin geniş olması yüksek türbülans, çoklu yanma rejimleri, karışım homojenliğindeki farklılıklar ve enjeksiyon stratejilerinden kaynaklanır. Bu faktörler, yanma sürecinin zamana yayılmasına ve enerji salınımının daha uzun sürmesine neden olur (Hänggi et al., 2021).

Bu bölümde farklı motor yükleri (%50, %75, %1000) ve ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20, %30 ve %40), PPCI modda deney yakıtları 10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0 için ölçülen silindir içi basınç ve HRR değişimleri ile standart modda dizel yakıtı ile ölçülen basınç ve HRR verilerinin karşılaştırıldığı grafikler değerlendirilecektir.

Grafik 4.1'de motor %50 yükte çalıştırıldığında, farklı ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda deney yakıtları için ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen silindir içi basınç ve HRR değerleri krank mili açısına bağlı olarak gösterilmektedir. Standart modda dizel yakıtının düşük motor yüklerinde (%0 ve %25) yüksek setan sayısı ve daha verimli ısı salınımı sayesinde JP8-dizel karışımlarından daha yüksek silindir içi tepe basınçları sergilediği EK-2 ve EK-3' de görülmektedir. Fakat orta ve yüksek yüklerde

(%50, %75, %100) JP8-dizel karışımlarının ön püskürtmenin etkisi, JP8'in iyi uçuculuğu ve gecikmeli yanma başlangıcına bağlı olarak daha hızlı bir yanma ile standart modda dizel yakıtı ile elde edilenden daha yüksek tepe basınçlarına ulaştığı görülmektedir (Lee & Bae, 2011). %50 motor yükünde yapılan deneylerde tüm ön enjeksiyon oranlarında, PPCI modda JP8-dizel karışım yakıtlarının tamamı ve saf JP8 yakıtı standart modda dizel yakıtının pik basınç değerinden daha yüksek silindir içi basınç değerine ulaşmıştır.



Grafik 4.1 Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım oranları (HRR)

%50 motor yükünde en yüksek silindir içi basınç değeri %10 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı ile elde edilen 71.721 bar iken standart modda dizel yakıtı ile ölçülen silindir içi basınç değeri ise 66.595 bar' dır. JP8-dizel karışım yakıtlarının içerisindeki JP8 oranının artışına bağlı olarak pik basınç değerinde bir miktar azalma

meydana geldiği görülmektedir. %30 ön enjeksiyon oranında karışım yakıtların (10JP8D90, 30JP8D70 ve 50JP8D50) pik basınç değerleri sırasıyla 68.52 bar, 68.44 bar ve 67.95 bar' dır. Bu durumun JP8 in dizel yakıtına göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olması ve düşük setan sayısından dolayı tutuşma gecikmesinin artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Fernandes et al., 2007). Ayrıca ön enjeksiyon oranı artışına bağlı olarak aynı deney yakıtı için tepe basınç değerinin hafifçe azaldığı görülmektedir. Örneğin 30JP8D70 yakıtı için %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında 68.84 bar, 68.75 bar, 68.44 bar ve 68.35 bar' lık silindir içi basınç tepe değerleri ölçülmüştür. Fakat saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtının karışım yakıtlardan farklı davranış gösterdiği ve ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte ulaştığı pik değerlerde de artış olduğu görülmektedir. 100JP8D0 yakıtının ön enjeksiyon oranlarına bağlı olarak ulaştığı tepe basınç değerleri sırasıyla 68.19 bar, 68.81 bar, 69.44 bar ve 71.32 bar' dır. PPCI modda 100JP8D0 yakıtının ön enjeksiyon oranı değişimine, JP8-dizel karışım yakıtlardan farklı bir davranış sergilemesi JP8 yakıtının tutuştuktan sonra yanma hızının dizel yakıttan daha yüksek olması ile açıklanabilir. Dizel yakıtı yüksek setan değeri, hızlı enerji salınımı ile en erken yanma başlangıcına sahip olan ve silindir tepe basıncına en erken ulaşan yakıt iken, 100JP8D0 yakıtı özellikle %40 ön enjeksiyon oranında daha net şekilde görüldüğü gibi ön enjeksiyon oranındaki artışa bağlı olarak tutuşma gecikmesinin kısılması ve hızlı yanma avantajıyla en erken ve en yüksek tepe değerine ulaşmıştır (Fernandes et al., 2007).

%50 motor yükü için dört farklı ön enjeksiyon oranında deney yakıtlarının oluşturduğu HRR profillerini değerlendirildiğinde; %10 ön enjeksiyon oranında karışım içerisindeki JP8 oranının artırılmasının HRR tepe noktasında azalmaya ve eğri profilinde daralmaya sebep olduğu görülmektedir. Karışım yakıtlarda ısı salınımı başlangıcının yakıt içerisindeki JP8 oranı arttıkça Ü.Ö.N.' ya yaklaştığı fakat maksimum ısı salınımının gerçekleştiği KMA' sı ve ısı salınım profillerinin tepe noktasından sonraki kısmının neredeyse aynı kaldığı gözlenmektedir. PPCI modda 10JP8D90, 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtlarının üçü' de Ü.Ö.N.' dan sonra 2 °KMA' da maksimum ısı salınımı değerine ulaşmış ve sırasıyla 33.898 J/°KMA, 32.168 J/°KMA ve 31.775 J/°KMA ısı salınımı gerçekleştirmişlerdir. Standart modda dizel yakıtı ise 28.789 J/°KMA' lık maksimum değere Ü.Ö.N.' dan 1 °KMA sonra ulaşmaktadır. Karışım içerisindeki JP8 oranının artışına bağlı olarak ısı salınımı başlangıcındaki

gecikme JP8'in düşük setan sayısından dolayı tutuşma gecikmesinin uzamasıyla, pik noktaya aynı KMA' larında ulaşmaları ise JP8'in yanma hızının daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca JP8'in enerji yoğunluğunun dizel yakıtından daha düşük olması nedeniyle JP8 oranı yüksek yakıtlarda eğrideki daralmaya rağmen tepe noktada düşüş yaşanmaktadır (Lee & Bae, 2011; Xu et al., 2016). Buda silindir içi basınç grafiğinde maksimum basınçlarda azalma olarak karşımıza çıkmaktadır. 100JP8D0 yakıtı ise dar bir HRR profili ve en yüksek ısı salınımı oranına (35.786 J/°KMA) sahip olan yakıt olmasına rağmen en uzun tutuşma gecikmesine sahip olduğu için ısı salınımına Ü.Ö.N.' ya en yakın başlayan ve HRR tepe noktasına en geç ulaşan (Ü.Ö.N.' dan 4 °KMA sonra) yakıt olmuştur. 10JP8D90 yakıtı PPCI modda %10 enjeksiyon oranı için dengeli bir HRR profili ile en yüksek silindir içi basıncına ulaşan yakıttır.

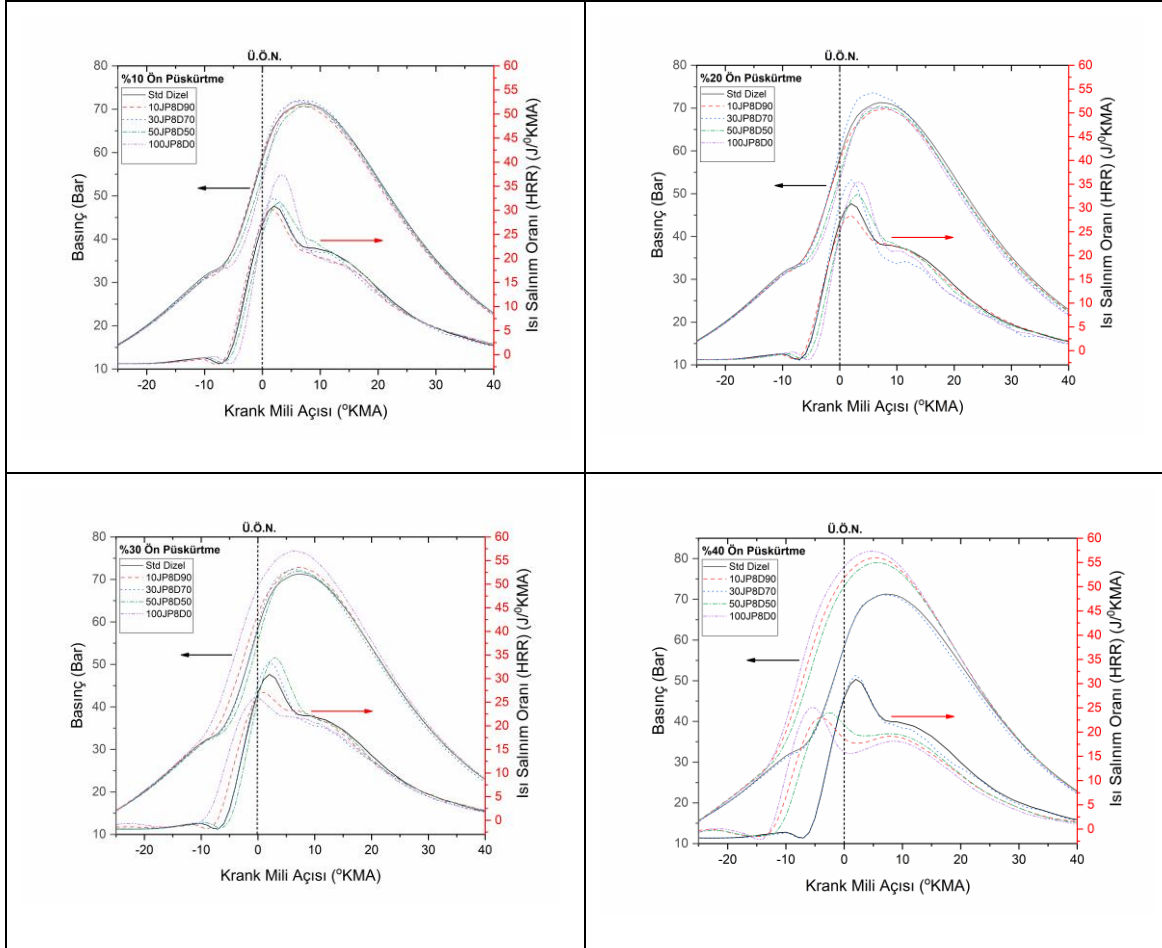
PPCI modda ön enjeksiyon oranı artırıldığında (%20 ve%30) HRR profilleri %10 ön enjeksiyon oranına kıyasla daha geniş hale gelmekte ve HRR tepe noktası azalmaktadır. 10JP8D90 yakıtının %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranların da ki tepe HRR değerleri sırasıyla 33.898 J/°KMA, 32.509 J/°KMA ve 31.229 J/°KMA' dır. Bu durum ön enjeksiyondaki artışın yanma yoğunluğunu azaltarak daha dengeli bir yanma meydana getirdiğini düşündürmektedir. Ayrıca HRR tepe değerinin azalması ve daha düşük yoğunluklu yanma NO_x emisyonunun oluşumunu da azaltmaktadır. Kısmi ön karışımdaki yakıt miktarının artışına bağlı olarak karışım içerisindeki JP8 oranı düşük olan yakıtlar daha düşük tepe noktasına sahip ve daha geniş HRR profilleri sergilemektedirler. %30 ön enjeksiyon oranında karışım yakıtlar içerisinde en düşük tepe değerine sahip olan yakıt 31.229 J/°KMA ile 10JP8D90 iken onu takip eden yakıtlar 31.589 J/°KMA ile 30JP8D70, 32.514 J/°KMA ile 50JP8D50 ve 34.113 J/°KMA ile 100JP8D0 olmuştur. Standart modda dizel yakıtının tepe HRR değeri ise 28.49 J/°KMA' dır. 10JP8D90 yakıtı %30 ön enjeksiyonda daha yavaş ısı salınımı ve daha düşük HRR tepe değeri ile NO_x emisyonlarında iyileşme sağlamaktadır. Diğer karışım yakıtların ise içerisindeki JP8 oranı arttıkça JP8 yakıtının sağladığı daha hızlı ve yoğun yanma ile HRR profilleri daralmakta ve tepe değerleri yükselmektedir. Bunun da JP8'in ısıl değerinin dizel yakıtından düşük olmasına rağmen içerisinde dizel oranı yüksek yakıtlar ile aynı silindir içi basınçlara ulaşılmasını sağladığı görülmektedir (Lee et al., 2012; Lee & Bae, 2011).

%40 ön enjeksiyon oranında ise emme portuna püskürtülen yüksek miktardaki yakıtın istenen noktadan daha erken tutuşmaya sebep olduğu, HRR tepe noktalarının Ü.Ö.N.' ya yaklaştığı, özellikle 100JP8D0 yakıtında maksimum ısı salınımının tam Ü.Ö.N.' da gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum sıkıştırma zamanında pistonun daha fazla yüke karşı hareket etmesine neden olarak negatif işte artışa sebebiyet verebilir. PPCI modda 10JP8D90 yakıtı %50 motor yükü için hem NO_x oluşumu açısından hem de silindir içi basınç ve motor performansı açısından diğer deney yakıtlarından daha iyi performans sergilemektedir.

Grafik 4.2'de motor %75 yükte çalıştırıldığında, farklı ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda deney yakıtları için ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen silindir içi basınç ve HRR değerleri krank mili açısına bağlı olarak gösterilmektedir. %75 motor yükünde PPCI modda %40 ön enjeksiyon oranında JP8-dizel karışım yakıtlar içerisinde 80.22 bar tepe basıncı ile 10JP8D90 yakıtı ve 81.80 bar tepe basıncı ile 100JP8D0 yakıtı en yüksek silindir içi basınç değerlerine ulaşmıştır. Standart modda dizel yakıtının aynı şartlarda ulaştığı pik silindir içi basınç 71.28 bar' dır. Motor yükünün artması ile birlikte silindir içi basınçlarının pik seviyeleri de artmıştır. %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında (%30 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 hariç) deney yakıtlarının pik basınç değerleri artmış fakat yakıtların sağladığı değerler birbirine çok yaklaşmıştır. Örneğin %10 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtlarının silindir içi tepe basınç değerleri 70.62 bar, 72.07 bar, 70.20 bar ve 71.72 bar iken standart modda dizel yakıtının tepe basınç değeri de 70.97 bar' dır. Bu ön enjeksiyon oranlarında en yüksek tepe basıncına ulaşan JP8-dizel karışım yakıtı 72.07 bar, 73.63 bar ve 72.46 bar ile 30JP8D70'tir.

Dizel yakıtı JP8'e göre daha yüksek setan sayısı ve hızlı enerji salınımına sahipken, motor yükünün ve ön enjeksiyonunda etkisiyle %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında düşük ve orta motor yüklerindeki silindir tepe basıncına en erken ulaşan yakıt olma özelliğini kaybettiği görülmektedir. %40 ön enjeksiyon oranında deney yakıtlarının dizel yakıtına göre hem daha yüksek tepe basınç değerlerine ulaştığı hem de daha geniş bir basınç eğrisine sahip olduğu görülmektedir. %40 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 ve 10JP8D90 yakıtlarının tepe silindir içi basınç değerleri 80.19 bar ve 81.81 bar iken dizel yakıtının tepe basınç değeri 71.28 bar' dır. Yüksek tepe basıncı, yanma sırasında çok fazla enerjinin kısa sürede açığa çıktığını gösterirken diyagram genişliği

ise bu yüksek basıncın uzun süre korunduğunu, yani yanmanın hem hızlı başladığını hem de uzun sürdüğünü göstermektedir. Bu tip basınç profili genellikle yüksek güç ve tork ile ilişkilendirilebilir. Fakat yüksek ve uzun süreli basınç aynı zamanda vuruntu riskini, NO_x gibi zararlı emisyonları ve uzun vadede mekanik stresi artırabilir.



Grafik 4.2 Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları

%75 motor yükünde %10 ön enjeksiyon oranında PPCI modda JP8-Dizel karışım yakıtlar standart modda dizel yakıtı ile elde edilen HRR profiline benzer profiller sergilemektedir. 100JP8D0 yakıtının diğerlerinden daha geç ısı salınımına başlaması ve pik HRR değerine diğerlerinden 1 °KMA daha geç ulaşması nedeniyle diğerlerinden daha yüksek bir HRR tepe noktası oluşturmasına rağmen basınç grafiğinde bir fark oluşmadığı görülmektedir. %20 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 10JP8D90 yakıtının HRR profilinin standart modda dizel yakıtı ile sağlanan HRR profilinden hem daha dar hem de pik değerinin (28.475 J/°KMA) daha düşük olması,

50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtlarının ise pik değerlerinin (32.978 J/°KMA, 35.526 J/°KMA) dizel yakıtının pik değerinden (30.887 J/°KMA) yüksek olmasına rağmen ısı salınımına daha geç başlaması ve pik değerlerine diğer yakıtlardan daha geç ulaşması nedeniyle maksimum basınç değerleri dizel yakıtının altında kalmıştır. 30JP8D70 deney yakıtı ise diğerlerinden daha yüksek pik değeri (35.923 J/°KMA) ve daha dar bir HRR profili ile yüksek silindir içi basınçlara ulaşan yakıt olmuştur.

%30 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları diğer yakıtlardan daha erken ısı salınımına başlamaları (-7 °KMA ve -9 °KMA), düşük pik HRR değerlerine rağmen daha geniş bir HRR profili ve Ü.Ö.N.' ya yakın maksimum ısı salınımı yapmaları ile hem düşük yoğunluklu bir yanma hem de yüksek silindir içi basınç değerlerine ulaşan yakıtlar olmuştur. %40 ön enjeksiyon oranında ise emme portuna püskürtülen yakıt miktarının artışı dolgu malzemesinin hazır hale gelmesini hızlandırmış ve tutuşma gecikmesini kısaltarak yakıtların çok erken ısı salınımına başlamasına neden olmuştur. PPCI modda 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları Ü.Ö.N.' dan 12 °KMA önce ısı salınımına başlarken 50JP8D50 yakıtı ise Ü.Ö.N.' dan 11 °KMA önce ısı salınımına başlamaktadır. Standart modda dizel yakıtının ısı salınımına başladığı nokta ise Ü.Ö.N.' dan 5 °KMA öncedir.

Tutuşma gecikmesinin kısılması ve ön enjeksiyonda püskürtülen yakıt miktarının artışı çift pik ısı salınım profili gözlenmesine sebep olmuştur. İlk tepe noktası ön enjeksiyonda gönderilen yakıtın, ikinci tepe noktası ise ana enjeksiyonda gönderilen yakıtın yanması ile gerçekleşmektedir. Ayrıca yüksek ön enjeksiyon oranlarında (%30, %40) erken ısı salınımı daha yüksek silindir içi basınçlarına ulaşmaya imkan sağlasa da sıkıştırma zamanında pistonun daha büyük yüklere karşı çalışmasına ve mekanik yorulmanın fazla olmasına sebep olmaktadır. PPCI modda 50JP8D50 yakıtı bu motor yükünde geniş HRR profilleri, daha düşük pik değerleri ve düşük yoğunluklu yanma ile hem düşük emisyonlara imkan veren hem de dengeli basınç değerleri sunan yakıt olmuştur (Zhou et al., 2022; Zhu et al., 2013).

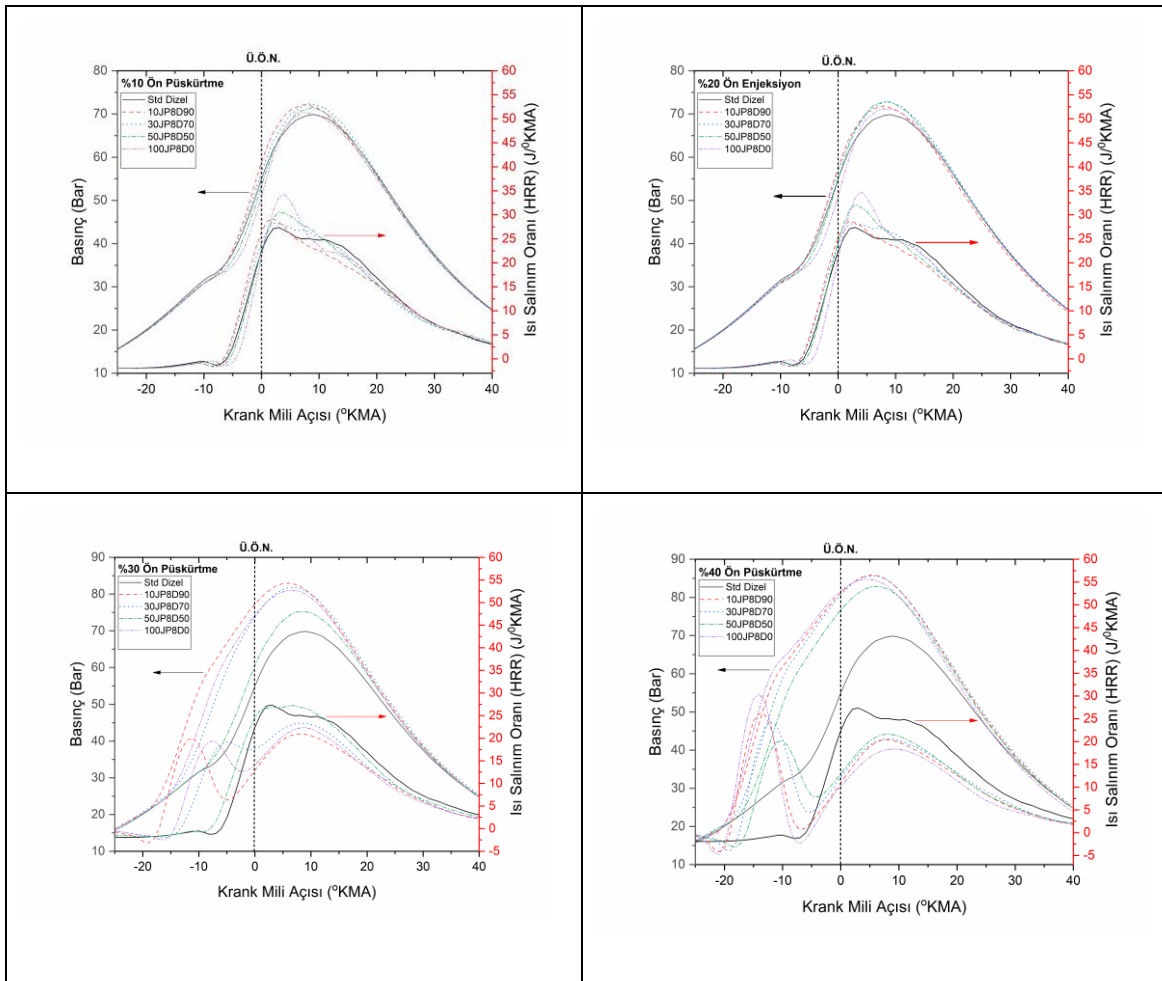
Grafik 4.3'te motor tam yükte (%100) çalışırken PPCI modda yapılan deneylerde farklı ön enjeksiyon oranlarında deney yakıtları ile elde edilen ve standart modda dizel yakıtı ile ölçülen silindir içi basınç ve HRR değerleri krank mili açısına bağlı olarak gösterilmektedir. 10JP8D90 yakıtı tam yükte tüm ön enjeksiyon

oranlarında yüksek sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklıkları ile birlikte PPCI çalışmanın da etkisi ile dizel yakıtından daha erken yanma başlangıcı göstererek tepe basınç değerine de daha erken ulaşmıştır. Ayrıca %20 ön enjeksiyon oranı hariç diğer tüm ön enjeksiyon oranlarında en yüksek silindir içi tepe basınç değerleri gösteren yakıttır. 10JP8D90 yakıtı %10 ön enjeksiyon oranında 8 °KMA' da 72.19 bar, %20 ön enjeksiyon oranında yine 8 °KMA' da 71.91 bar, %30 ön enjeksiyon oranında 6 °KMA' da 83.02 bar ve %40 ön enjeksiyon oranında 5 °KMA' da 85.85 bar tepe basıncına ulaşırken standart modda dizel yakıtı 9 °KMA' da 69.87 bar maksimum basınç değeri göstermektedir. Yanma başlangıcının ve pik basınç değerine ulaşılan KMA' sının yaklaşık 3-4 °KMA öne çekilmesi tam yükte PPCI çalışma modunun ve ön enjeksiyon oranının yanma dinamikleri üzerindeki etkisini göstermektedir.

JP8-dizel karışımlarında diğer motor yüklerinde de görüldüğü gibi karışım içerisindeki JP8 oranının artışı, tutuşma gecikmesi ve düşük enerji yoğunluğuna bağlı olarak yine tepe basıncında azalmaya sebep olmaktadır. Örneğin %30 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90, 30JP8D70 ve 50JP8D50 JP8-dizel karışım yakıtlarında ulaşılan tepe basınçları sırasıyla 83.02 bar, 81.84 bar ve 75.25 bar dır. Sadece JP8'den oluşan 100JP8D0 yakıtı düşük setan sayısına bağlı olarak tutuşma gecikmesinin etkisi ve dizel yakıtına göre daha düşük alt ısıl değere sahip olması nedeniyle %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda deney yakıtları arasında en düşük pik basınç değerine sahip yakıttır. Fakat 100JP8D0 yakıtı %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ön enjeksiyonda püskürtülen yakıt miktarının artması, ön karıştırmanın etkisi ile tutuşma gecikmesindeki iyileşme ve JP8 yakıtının yanma hızının avantajıyla 10JP8D90 yakıtından sonra en yüksek pik basınç değerine sahip yakıt olmuştur.

Tam yükte görülen çift pik ısı salınım profili sebebiyle yüksek ön enjeksiyon oranlarındaki basınç grafiklerinde Ü.Ö.N' dan yaklaşık 10 °KMA önce ye kadar daha dik bir basınç artışı görülmektedir. Bu durum Ü.Ö.N.' dan hemen sonra tepe basıncına ulaşılmasına ve daha yüksek tepe basınçlarına imkan verirken aynı zamanda sıkıştırma zamanında Ü.Ö.N.' ya kadar pistonun daha yüksek basınç değerlerine maruz kalmasına sebep olmaktadır. Örneğin %20 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı için -10 °KMA' da ki silindir içi basınç 30.84 bar iken %30 ön enjeksiyon oranında bu değer 54.03 bar' a yükselmektedir.

Motor tam yükte çalışırken %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında deney yakıtlarının oluşturduğu HRR profillerinde küçük farklılıklar olmasına rağmen basınç grafikleri bir birlerine benzerlik göstermektedir. Standart modda dizel yakıtı ile PPCI modda 10JP8D90 ve 30JP8D50 yakıtları maksimum ısı salınımını 2 °KMA Ü.Ö.N.' dan sonra gerçekleştirirken 50JP8D50 yakıtı 3 °KMA' da ve 100JP8D0 yakıtı ise 4 °KMA' da pik HRR değerine ulaşmaktadır. 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları daha yoğun ve hızlı bir yanma sergileyerek daha dar HRR profilleri ile daha yüksek tepe HRR değerlerine ulaşmaktadır.



Grafik 4.3 Motor %100 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları

Tam yükte ve %75 motor yükünde özellikle yüksek ön enjeksiyon oranlarında çift pik ısı salınım profili gözlenmektedir. İlk tepe noktası PPCI modda ön enjeksiyon da porta gönderilen yakıt miktarının artışı ve önceden karıştırılmış dolgunun hızlı

yanmasına karşılık gelirken, ikinci tepe noktası ana enjektörden yanma odasına enjeksiyon ile başlatılan ana yanma fazını temsil etmektedir. %75 motor yükünde sadece %40 ön enjeksiyon oranında oluşan çift pik HRR grafiği motor yükündeki artış ile tam yükte hem %30 hem de %40 ön enjeksiyon oranında görülmektedir (Zhou et al., 2022; Zhu et al., 2013). %30 ön enjeksiyon oranında 50JP8D50 yakıtı hariç diğer tüm deney yakıtlarının çok erken ısı salınımına başladığı ve ön enjeksiyonda püskürtülen yakıtın Ü.Ö.N.' dan önce tamamen yandığı görülmektedir. %30 ön enjeksiyonda 10JP8D90 yakıtı -17 °KMA' da, 100JP8D0 yakıtı -14 °KMA' da ve 30JP8D70 yakıtı -13 °KMA' da ısı salınımına başlamıştır. %40 ön enjeksiyon oranında ise 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları -19 °KMA' da ısı salınımına başlayıp -14 °KMA' da sırasıyla 26.318 J/°KMA ve 30.479 J/°KMA HRR değerleri ile ilk pik seviyelerini, 8 °KMA' da ise 20.389 J/°KMA ve 18.253 J/°KMA HRR değerleri ile ikinci pik seviyelerini meydana getirmektedir. PPCI modda tüm yakıtların Ü.Ö.N.' dan çok erken ısı salınımına başlaması ve ön enjeksiyonda püskürtülen yakıtın tamamının Ü.Ö.N.' dan önce yanması sıkıştırma zamanında pistonun maruz kaldığı yükü artırmaktadır. Tam yükte %30 ve özellikle %40 ön enjeksiyon oranında karşılaşılan çift pik ısı salınımı oluşumu motor vuruntusuna sebep olmaktadır.

Standart modda dizel yakıtının düşük motor yüklerinde (%0 ve %25) yüksek setan sayısı ve daha verimli ısı salınımı sayesinde JP8-dizel karışımlarından daha yüksek silindir içi tepe basıncı sergilediği EK-2 ve EK-3'te görülmektedir. Fakat orta ve yüksek yüklerde ise (%50, %75 ve %100) JP8-dizel karışımlarının JP8'in iyi uçuculuğu, gecikmeli yanma başlangıcına bağlı olarak daha hızlı bir yanma ve PPCI'nin etkisi ile daha yüksek tepe basınçlarına ulaşabildiği görülmüştür. Karışım yakıtlarda JP8 oranının artırılması tutuşma gecikmesinin uzaması ve dizel yakıtına göre düşük olan enerji yoğunlu nedeniyle ulaşılan tepe basıncında azalmaya sebep olmaktadır. PPCI modda, orta ve yüksek motor yüklerinde JP8-dizel karışım yakıtları standart modda dizel yakıtının ulaştığından daha yüksek tepe basınçlarına ulaşmaktadır. Dizel yakıtının en yüksek tepe basınç değerlerine sahip olduğu düşük motor yüklerinde tepe basıncı daha erken oluşur bu da daha kısa tutuşma gecikmesinin etkisini yansıtır. Daha yüksek motor yüklerinde PPCI çalışmanın da etkisiyle deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) dizel yakıtından daha yüksek tepe basınçlarına ulaşmaktadır.

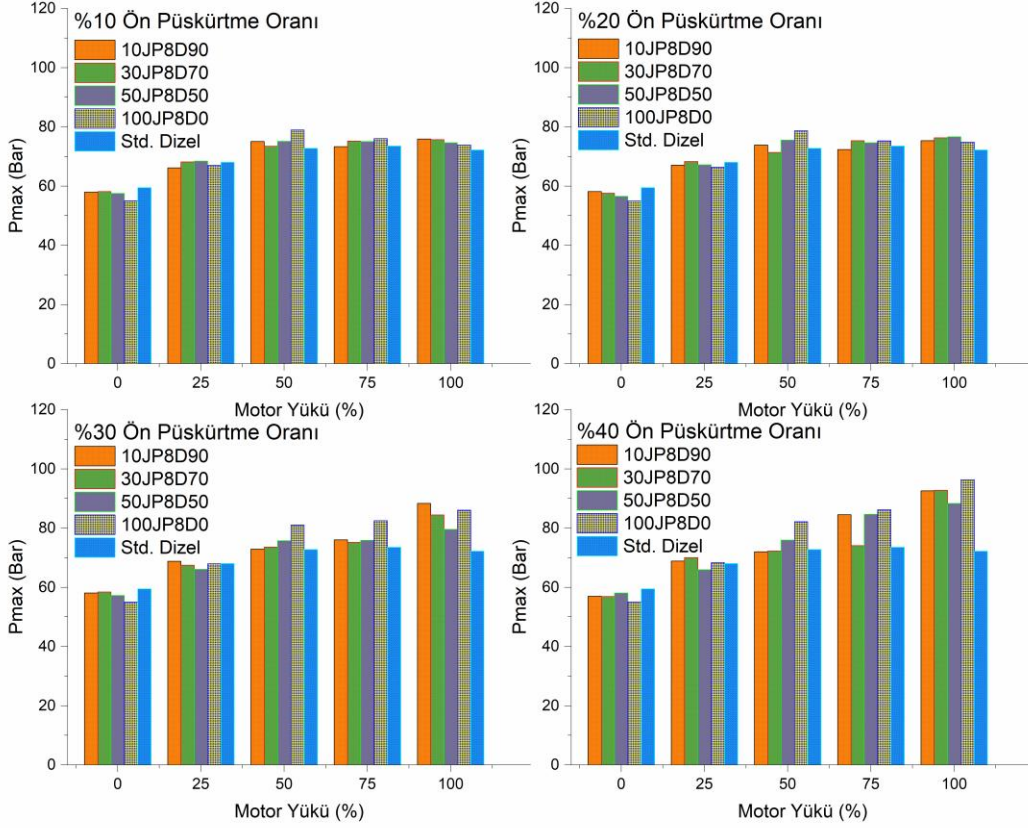
10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları orta ve yüksek motor yüklerinde en yüksek tepe basınç değerlerine ulaşan yakıtlardır.

Standart modda dizel yakıtı genel olarak daha yoğun bir yanma ile daha keskin HRR tepeleri oluşturmaktadır. PPCI modda yapılan deneylerde JP8-dizel karışım yakıtların içerisindeki JP8 oranının artırılmasının tutuşmayı geciktirdiği ve JP8'in daha düşük setan sayısı ve yavaş ısı salınımı sayesinde yanma yoğunluğunu azaltarak HRR profillerini genişlettiği görülmektedir. Ön enjeksiyon oranlarındaki artış tüm yakıt karışımlarında HRR profillerini genişletmekte, tepe HRR değerini azaltmaktadır. Artan motor yükleri ise püskürtülen yakıt miktarının artışı ve daha yüksek silindir içi basınçlar nedeniyle tüm yakıt karışımları için HRR tepe değerlerini yükseltmektedir (Ickes et al., 2009). Ancak yüksek motor yüklerinde JP8'in daha yavaş yanma kinetiğinin dizel ile karşılaştırıldığında daha geniş HRR profilleri oluşturduğu daha net görülmektedir. HRR'nin şekli ve zamanlaması optimize edilerek hem yüksek verimlilik hemde düşük emisyon elde edilebilir; bu nedenle modern motor kontrol stratejilerinde HRR analizi ve yönetimi kritik öneme sahiptir. PPCI motorlarda JP8-Dizel karışımları kullanılarak HRR ve basınç eğrilerinin kontrol edilebileceği, motor vuruntusunun önlenilebileceği ve emisyonlarda iyileşmelerin sağlanabileceği görülmektedir. HRR grafikleri değerlendirildiğinde farklı motor yükü ve ön enjeksiyon oranlarında 10JP8D90 ve 50JP8D50 yakıtları diğer karışım yakıtlardan daha iyi performans sergilemektedir.

4.1.2. Farklı yakıt karışım oranları için silindirde oluşan maksimum basıncın değişimi

Maksimum silindir basıncı (P_{max}), içten yanmalı motorlardaki tepe yanma basıncını anlamak için önemli bir parametredir. P_{max} , motor performansını, termal verimliliği ve motor parçaları üzerindeki mekanik gerilmeleri doğrudan etkiler. Grafik 4.4 deney yakıtlarının dört farklı ön enjeksiyon oranında ve farklı motor yüklerinde verdiği P_{max} değerlerini (bar cinsinden) göstermektedir. Altta yakıt karışımının, ön enjeksiyon oranının ve motor yükünün P_{max} 'ı nasıl etkilediği incelenmektedir. P_{max} , özellikle düşük yüklerde yakıt karışımı içerisindeki JP8 oranının artışına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum tutuşmayı geciktiren ve yanmanın yoğunluğunu azaltan JP8'in daha düşük setan sayısına bağlanabilir. P_{max} tüm yakıt karışımları için motor yüküyle önemli ölçüde artar, çünkü daha yüksek yükler daha

fazla miktarda yakıt enjeksiyonu gerektirir ve bu da daha yüksek silindir içi basınçlarına ve sıcaklıklarına sebep olur (Sharma et al., 2023; Wang & Li, 2021).



Grafik 4.4 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak yakıt karışım oranının etkisi ile oluşan maksimum basınçlar (P_{max})

%10 ön enjeksiyon oranında standart modda dizel yakıtı düşük motor yüklerinde (%0, %25) yüksek setan sayısının sağladığı avantaj ile daha hızlı tutuşması sayesinde JP8-dizel karışım yakıtlarından daha yüksek P_{max} değerleri sunmaktadır. Motor yüksüz durumdayken PPCI modda en yüksek P_{max} değeri 58.124 bar ile 30JP8D70 yakıtından elde edilirken aynı motor yükünde dizel yakıtı 59.473 bar P_{max} değerine ulaşmaktadır. Orta ve yüksek motor yüklerinde (%50, %75, %100) ise silindirlere gönderilen yakıt miktarındaki artış, JP8'in yüksek uçuculuk ve yüksek yanma hızının da etkisi ile PPCI modda deney yakıtlarının tamamı standart modda dizel yakıtı ile elde edilen P_{max}

değerinden daha yüksek silindir içi maksimum basınçlara ulaşmışlardır. %50 ve %75 motor yüklerinde sırasıyla 78.99 bar ve 76.013 bar ile 100JP8D0 yakıtı en yüksek P_{max} değerlerine ulaşırken dizel yakıtı aynı motor yükleri için sırasıyla 72.76 bar ve 73.52 bar P_{max} değerlerine ulaşmıştır. Tam yükte ise standart modda dizel yakıtı 72.20 bar'lık maksimum basınç sağlarken PPCI modda 10JP8D90 yakıtı 75.89 bar ile en yüksek P_{max} değerine ulaşan yakıt olmuştur.

%20 ön enjeksiyon oranında yüksüz durumda ve %25 motor yükünde yine 59.473 bar ve 68.013 bar ile standart modda dizel yakıtı en yüksek P_{max} değerine ulaşan yakıttır. PPCI modda yüksüz durumda 58.14 bar ile 10JP8D90 ve %25 motor yükünde 67.32 bar ile 30JP8D70 JP8-dizel karışım yakıtları dizel yakıtına en yakın P_{max} değerleri sergileyen yakıtlar olmuştur. Orta ve yüksek motor yüklerinde ise geciken tutuşmaya ve yanma kinetiğine bağlı olarak PPCI modda neredeyse tüm JP8-dizel karışımları standart modda dizel yakıtının sağladığından daha yüksek P_{max} değerlerine ulaşmaktadır. Yüksek motor yüklerinde karışım içerisindeki JP8 oranının artışı P_{max} değerini de artırmaktadır (Aydoğan & Altınok, 2019). %50 ve %75 motor yüklerinde 78.64 bar ve 75.26 bar ile 100JP8D0 deney yakıtı en yüksek P_{max} değerlerine sahip olan yakıttır. Bu motor yüklerinde dizel yakıtının P_{max} değerleri ise 72.76 bar ve 73.52 bar'dır. Tam yükte 76.65 bar'lık basınç ile 50JP8D50 yakıtı en yüksek değere ulaşırken dizel yakıtının P_{max} değeri 72.20 bar'dır.

%30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ön enjeksiyon da emme portuna gönderilen yakıt miktarındaki artışa bağlı olarak yanma başlangıcında yanmaya hazır yakıt miktarı da artmış olduğundan düşük ön enjeksiyon oranlarından farklı olarak düşük motor yüklerinde de PPCI modda elde edilen P_{max} değerleri standart modda dizel yakıtının P_{max} değerlerinden daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. Örneğin %40 ön enjeksiyon oranı ve %25 motor yükünde PPCI modda 70.08 bar ile 30JP8D70 yakıtı en yüksek değere ulaşırken dizel yakıtının P_{max} değeri 68.01 bar'dır. %50 ve %75 motor yüklerinde %30 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 yakıtı 81.05 bar ve 82.51 bar, %40 ön enjeksiyon oranında 82.173 bar ve 86.163 bar ile bu yüklerde en yüksek P_{max} sergileyen yakıt olmuştur. Tam yükte standart modda dizel yakıtının P_{max} değeri 72.20 bar iken %30 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı 88.37 bar ve %40 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 yakıtı 96.32 bar P_{max} değerlerine ulaşmışlardır.

Standart modda dizel yakıtı yüksek setan sayısı ve daha kısa tutuşma gecikmesi sayesinde düşük motor yüklerinde özellikle düşük ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20) daha kaliteli bir yanma göstererek en yüksek P_{max} değerlerine ulaşmaktadır. Karışım yakıtlarda JP8 içeriğinin artması düşük motor yüklerinde P_{max} 'ı düşürürken orta ve yüksek motor yüklerinde geciken tutuşma ve iyi uçuculuğun yanma kinetiğini etkilemesiyle yüksek P_{max} değerlerine ulaşılmasını sağlar (Elkelawy et al., 2021). 30JP8D70 yakıtı düşük motor yüklerinde PPCI modda en yüksek P_{max} değerlerine ulaşan yakıttır. Orta ve yüksek motor yüklerinde ise saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtı genellikle en yüksek P_{max} değerine ulaşan yakıt olmuştur.

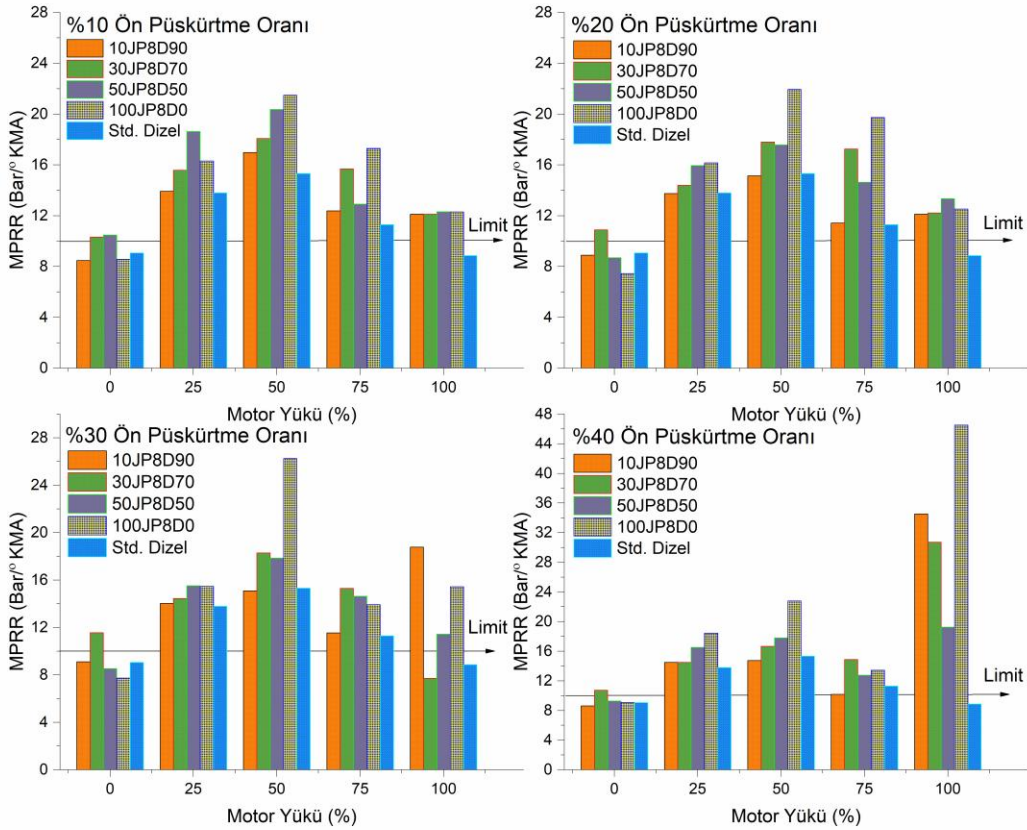
4.1.3. Farklı yakıt karışımları için silindir içi basınç artış oranı (MPRR)'nin değişimi

Maksimum basınç artış oranı (MPRR) yanma kararlılığını ve olası motor vuruntusunu değerlendirmede kullanılan önemli bir parametredir. MPRR, yanma sürecinde yanma odasındaki basıncın ne kadar hızlı arttığını gösterir. Yüksek MPRR değerleri, daha agresif bir yanma sürecini ifade eder; bu da motor gürültüsünü ve mekanik gerilmeleri artırabilir ve motor dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Grafik 4.5 farklı motor yükleri (%0, %25, %50, %75, %1000) ve deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) için PPCI modda %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında elde edilen MPRR değerleri ile standart modda dizel yakıtı ile ölçülen MPRR verilerini bar/°KMA cinsinden göstermektedir (Z. Zheng et al., 2015).

MPRR' nin deney yakıtlarındaki JP8 oranının artışı ile birlikte arttığı görülmektedir; Dizel yakıtından daha düşük setan sayısına sahip olan JP8 yakıtının sebep olduğu tutuşma gecikmesi ve yanma başladıktan sonra yanma hızının dizel yakıtından daha yüksek olması MPRR deki artışa sebep olmaktadır. Deney yakıtlarının tamamında MPRR, %50 motor yüküne kadar artış ve %50 motor yükünden sonra azalma eğilimindedir. %50 motor yükünde tüm deney yakıtları maksimum MPRR değerlerini göstermektedir.

%10 ön enjeksiyon oranında yapılan deneylerde tüm motor yüklerinde dizel yakıtı daha düşük MPRR değerleri sağlamıştır. Bu ön enjeksiyon oranında tüm deney yakıtları için vuru sınıırı olarak kabul edilen 10 bar/°KMA değerinin altında değerler

ölçülmüştür. Yüksüz durumda PPCI modda 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları sırasıyla 8.47 bar/°KMA ve 8.57 bar/°KMA değerleri ile standart modda dizel yakıtı ile elde edilen 9.06 bar/°KMA basınç artış oranından daha iyi MPRR sağlamıştır. Orta ve yüksek motor yüklerinde (%50, %75, %100) standart modda dizel yakıtı için sırası ile 15.32 bar/°KMA, 11.30 bar/°KMA ve 8.87 bar/°KMA MPRR değerleri ölçülürken PPCI modda bu değerlere en yakın verileri sağlayan yakıt 16.98 bar/°KMA, 12.39 bar/°KMA ve 12.13 bar/°KMA MPRR değerleri ile 10JP8D90 yakıtı olmuştur. 100JP8D0 yakıtı için ise tutuşma gecikmesi ve yüksek yanma hızı nedeniyle orta ve yüksek yüklerde 21.50 bar/°KMA, 17.31 bar/°KMA ve 12.30 bar/°KMA değerleri ile en yüksek MPRR değerleri ölçülmüştür.



Grafik 4.5 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak yakıt karışım oranının etkisi ile oluşan basınç artış oranı (MPRR)

%20 ön enjeksiyon oranında da standart modda dizel yakıtının verileri, PPCI modda deney yakıtlarıyla elde edilen MPRR değerlerinden daha düşüktür. Ayrıca ön enjeksiyon oranındaki artışa bağlı olarak daha gelişmiş bir ön karışım oluşması nedeniyle %20 ön enjeksiyon oranındaki MPRR değerleri %10 ön enjeksiyon oranındaki MPRR değerlerine göre bir miktar düşüş göstermiştir. Örneğin %50 motor yükünde, 50JP8D50 yakıtı için %10 ön enjeksiyon oranında ölçülen MPRR 20.3635 bar/°KMA iken %20 ön enjeksiyon oranı için bu değer 17.584 bar/°KMA' na düşmüştür. %75 motor yükünde, 10JP8D90 yakıtı için %10 ön enjeksiyon oranında ölçülen MPRR 12.3908 bar/°KMA iken %20 ön enjeksiyon oranı için 11.4265 bar/°KMA' na gerilemiştir. %20 ön enjeksiyon oranı için tüm motor yüklerinde en yüksek MPRR değerlerini veren yakıt yine düşük setan sayısı ve tutuştuktan sonraki yüksek yanma hızı özellikleri ile 100JP8D0 deney yakıtıdır. Düşük motor yükleri için dizel yakıtından daha düşük, yüksek motor yüklerinde ise dizel yakıtına en yakın MPRR değerlerine tüm motor yükleri için PPCI modda %20 ön enjeksiyon oranında yine 10JP8D90 yakıtı ile ulaşılmıştır. Örneğin tüm motor yüklerinde standart modda dizel yakıtı ile elde edilen MPRR değerleri sırasıyla 9.067 bar/°KMA, 13.796 bar/°KMA, 15.319 bar/°KMA, 11.296 bar/°KMA ve 8.869 bar/°KMA iken PPCI modda 10JP8D90 yakıtı ile elde edilen değerler 8.896 bar/°KMA, 13.741 bar/°KMA, 15.151 bar/°KMA, 11.426 bar/°KMA ve 12.1212 bar/°KMA dır. Düşük motor yüklerinde (%0, %25), daha düşük silindir içi basınçları ve sıcaklıklar nedeniyle MPRR değerleri diğer motor yüklerine göre nispeten daha düşüktür.

%30 ön enjeksiyon oranında, özellikle düşük ve orta motor yüklerinde PPCI modda deney yakıtları ile elde edilen basınç artış oranları diğer ön enjeksiyon oranlarına (%10, %20) göre birbirlerine daha yakın değerler olarak ölçülmüştür. Yüksüz durumda deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 0JP8D50 ve 100JP8D0) için PPCI modda MPRR verileri sırasıyla 9.105 bar/°KMA, 11.572 bar/°KMA, 8.541 bar/°KMA ve 7.731 bar/°KMA iken standart modda dizel yakıtı ile ölçülen MPRR 9.067 bar/°KMA dır. Ön enjeksiyon oranının artışı motorda vuruntuya ve mekanik gerilmelere sebep olan hızlı basınç artış oranının daha düşük değerlerde kalmasını sağlamıştır. Ayrıca tam yük haricinde ön enjeksiyon oranındaki (%30 ve %40) artışın deney yakıtları içerisinde JP8 oranının artışına bağlı olarak ortaya çıkan MPRR deki artışı tolere ettiği görülmektedir. %40 ön enjeksiyon oranında motor yüksüz durumda çalıştırıldığında deney yakıtları ile

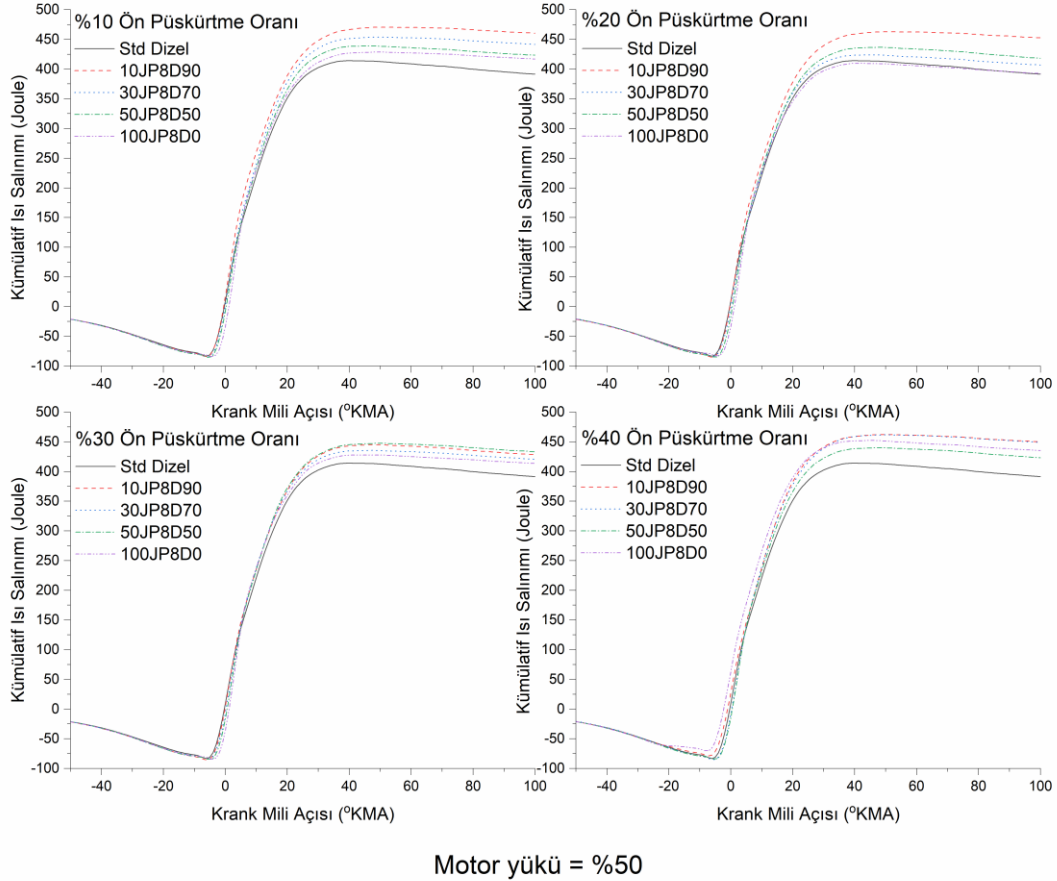
PPCI modda sırası ile 8.617 bar/°KMA, 10.740 bar/°KMA, 9.299 bar/°KMA, 9.099 bar/°KMA ve standart modda dizel yakıtı ile 9.067 bar/°KMA maksimum basınç artış oranı ölçülmüştür. %75 motor yükü için deney yakıtları ile ölçülen MPRR değerleri sırasıyla 10.197 bar/°KMA, 14.888 bar/°KMA, 12.785 bar/°KMA, 13.451 bar/°KMA ve dizel yakıtı için 11.296 bar/°KMA dır.

Dizel yakıtı yüksek setan sayısı ve JP8'e göre daha kontrollü yanma özelliği ile tüm ön enjeksiyon oranlarında sürekli olarak en düşük MPRR değerlerine sahip olmaktadır. Deney yakıtının içerisindeki JP8 oranının artırılması (düşük setan sayısı nedeniyle) tutuşma gecikmesinin uzaması ve yanma sırasında hızlı ısı salınımı nedeni ile MPRR' yi artırmaktadır. Daha yüksek ön enjeksiyon oranları gelişmiş ön hava-yakıt karışımının oluşmasına destek olmakta ve bunun sonucunda daha kontrollü bir yanma ile basınç artış oranında azalma sağlamaktadır. MPRR tüm ön enjeksiyon oranlarında ve tüm deney yakıtları için %50 motor yüküne kadar artmakta, %50 motor yükünden sonra azalmaktadır. Farklı yakıt karışımları, ön enjeksiyon oranları ve motor yüklerindeki MPRR değerleri, yakıt özelliklerinin ve enjeksiyon stratejilerinin yanma kararlılığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Dizel yakıtı neredeyse tüm durumlar için daha düşük MPRR değerlerine ulaşırken, deney yakıtlarındaki daha yüksek JP8 içeriği artan tutuşma gecikmesi nedeniyle MPRR de artışa yol açmaktadır. Ancak ön enjeksiyon oranının artırılması MPRR' yi daha dengeli bir hale getirmekte ve PPCI modda kısmi ön karıştırmanın yanma sürecinde ki etkisini göstermektedir (Ickes et al., 2009; Labeckas, Slavinskas, & Vilutiene, 2015).

4.1.4. Farklı yakıt karışım oranları için motor yüküne bağlı olarak kümülatif ısı salınımının değişimi

Toplam ısı salınımı (CHR) profilleri, yanma sırasında salınan toplam enerjiyi temsil eder, yanma verimliliği ve yanmanın ilerlemesi hakkında fikir verir. CHR enerji dönüşümünü ve performansı analiz etmek için temel parametrelerden biridir. Yanma başlangıcı CA10 ve yanma sonu CA90 verileri CHR grafikleri üzerinden hesaplanır. Dizel yakıtı daha yüksek setan sayısı ve alt ısıl değeri sayesinde %50 motor yükü hariç tüm motor yüklerinde ve ön enjeksiyon oranlarında sürekli olarak daha hızlı toplam ısı salınımı sergilemektedir (Işcan, 2020). Yüksüz durum ve %25 motor yükünde oluşan CHR grafikleri EK-4 ve EK-5' te verilmiştir. Grafik 4.6, 4.7 ve 4.8'de %50, %75 ve

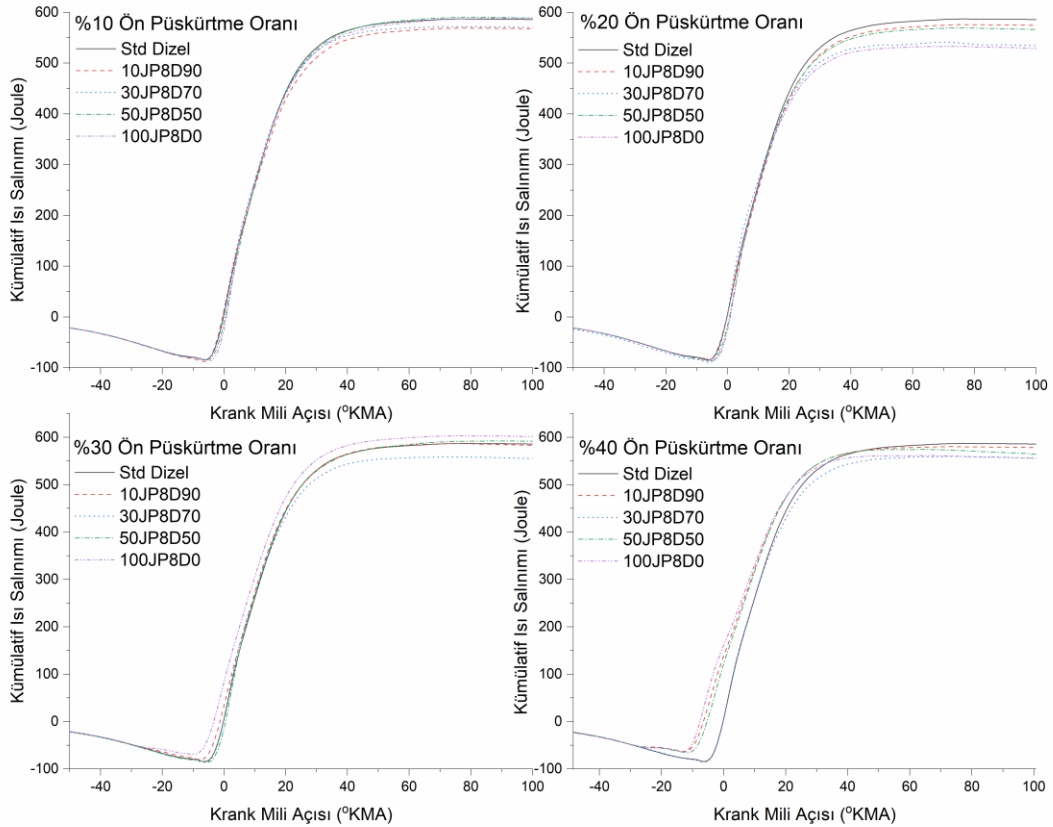
%100 motor yükleri için dört farklı ön enjeksiyon oranında, PPCI çalışma modunda JP8-dizel karışımı deney yakıtları ve standart modda dizel yakıtının CHR değişimleri gösterilmektedir.



Grafik 4.6 Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

Grafik 4.6’da görüldüğü gibi %50 motor yükünde PPCI modda tüm deney yakıtları dört farklı ön enjeksiyon oranında da standart modda dizel yakıtının CHR eğrisinden daha dik bir grafik oluşturmuş ve daha fazla toplam enerji salınımı gerçekleştirmiştir. Deney yakıtlarının daha dik bir grafik sergilemesi enerji salınımının (yanma reaksiyonunun) dizel yakıtından daha hızlı olduğunu göstermektedir. 10JP8D90 yakıtı özellikle düşük ön enjeksiyon oranlarında hızlı yanma reaksiyonu ile en kısa sürede enerji salınımını gerçekleştiren, ayrıca en yüksek CHR değerine sahip olan yakıttır. Dizel yakıtının içerisindeki düşük miktardaki JP8 yakıtının yüksek uçuculuk

özelliği ve yanma hızı ile karışım yakıtın yanma hızını yükselttiği düşünülebilir. Fakat karışım yakıt içerisindeki JP8 oranının artırılması JP8 yakıtının dizelden daha düşük enerji yoğunluğu nedeniyle CHR eğrisinde 10JP8D90 yakıtı ile aynı performansı sergilemesine engel olmaktadır. Yakıt içerisindeki JP8 oranı arttıkça grafikteki hem eğim hem de maksimum CHR dizel yakıtının eğrisine yaklaşmaktadır. Kümülatif ısı salınımındaki hızlı yükselme yanma reaksiyonunda açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmının Ü.Ö.N.' ya yakın bir noktada salındığını gösterir. Bu durum termik verimin önemli olduğu orta motor yüklerinde termik verimde iyileşme sağlayabilir, fakat hızlı bir yanma sonucu yoğun enerji salınımı silindir içerisinde ani basınç yükselmeleri sebebiyle motorda mekanik gerilmelere de sebep olabilir.

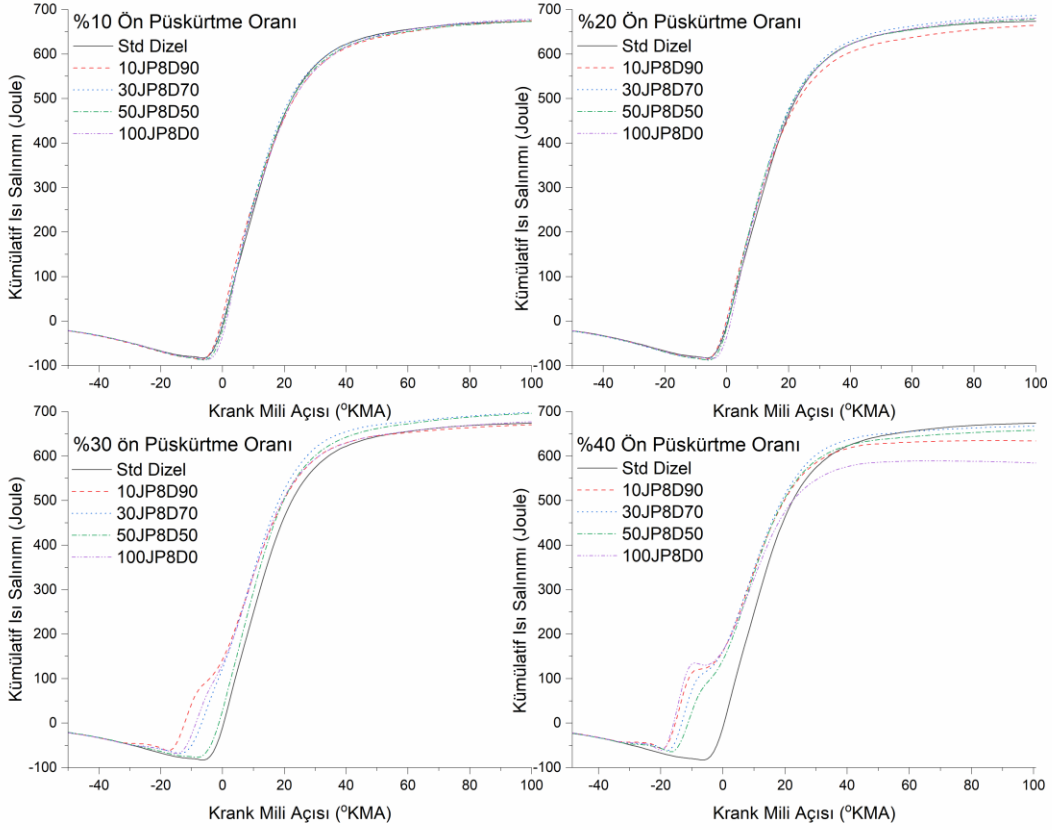


Motor yükü = %75

Grafik 4.7 Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

%75 motor yükünde PPCI modda, %30 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 yakıtı haricinde tüm deney yakıtları standart modda dizel yakıtı ile elde edilen CHR grafiğine yakın fakat daha düşük CHR grafikleri sergilemişlerdir. Tüm ön enjeksiyon oranlarında maksimum enerji salınımında 50JP8D50 yakıtı dizel yakıtına en yakın performans veren yakıt olmuştur. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında porttan yüksek miktarda yakıt enjekte edilmesi ve bu yakıtın daha hızlı hava ile karışıp yanmaya başlamasına bağlı olarak enerji salınımı dizel yakıtından daha erken başlamıştır. Özellikle %40 ön enjeksiyon oranında tüm deney yakıtları dizel yakıtından yaklaşık 10°KMA daha erken enerji salınımına başlamış fakat CHR grafiği dizel yakıtın grafiğinden daha eğik olarak oluşmuştur. Bu durumun ön enjeksiyonda gönderilen yakıtın erken yanmaya başlaması ve ana yakıtın daha sonra enjekte edilmesiyle kademeli bir yanma meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. HRR grafiklerinde %75 motor yükü için %40 ön enjeksiyon oranında, %100 motor yükü için ise hem %30 hem de %40 ön enjeksiyon oranında kademeli yanmaya bağlı olarak çift pik oluşumu görülmektedir. %75 motor yükü için 50JP8D50 yakıtının PPCI yanma modunun desteği ile aynı motorda dizel yakıtının yerine kullanılabilmesi görülmektedir.

Tam yükte yapılan deneylerin sonuçları da %75 motor yüküne benzer şekilde olmuş, özellikle %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında tüm deney yakıtları dizel yakıtı ile benzer CHR grafik verileri sergilemiştir. Tam yükte %30 ön enjeksiyon oranında silindir içi basınç, sıcaklıklar ve PPCI yanma modunun etkisiyle tüm deney yakıtları dizel yakıtından daha yüksek maksimum CHR değerlerine ulaşmıştır. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında motor yüküne bağlı olarak artan toplam yakıt miktarı ve dolayısıyla ön enjeksiyonda gönderilen yakıt miktarındaki artış dizel yakıtından daha erken yanma başlangıcına ve ön enjeksiyon ile ana enjeksiyonda HRR grafiklerinde ayrı ayrı pik oluşumuna neden olmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde PPCI yanmanın desteği ile orta motor yükünde 10JP8D90 yakıtının, yüksek motor yüklerinde ise 50JP8D50 yakıtının dizel yakıtının alternatifi olabileceği görülmektedir.



Motor yükü = %100

Grafik 4.8 Motor % 100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

4.1.5. Farklı yakıt karışım oranları için CA10, CA90 ve yanma süresi (CD)'nin değişimi

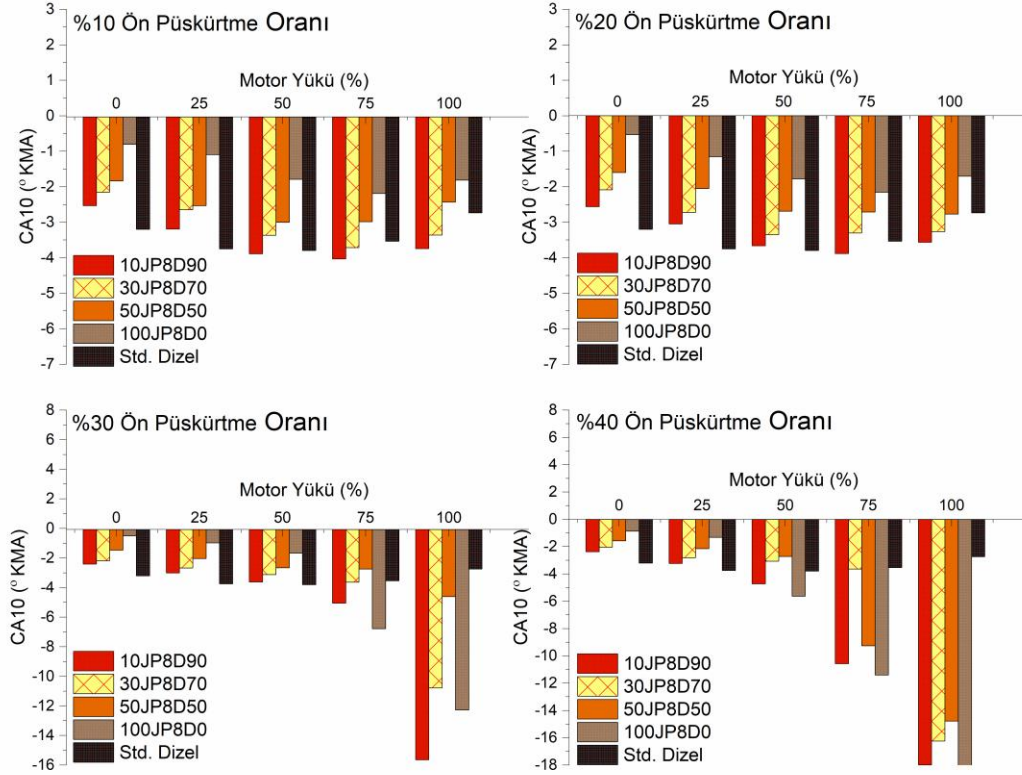
CA10 değeri bir çevrimdeki toplam ısı salınımının %10'unun gerçekleştiği krank mili açısını ifade etmektedir. CA10 yanma başlangıcı olarak kabul edildiği için yanmanın hangi krank mili açısında başladığının belirlenmesini sağlamaktadır (Ning et al., 2020).

Grafik 4.9'da PPCI modda farklı yakıt karışım oranlarına sahip deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ile ve standart modda dizel yakıtı ile dört farklı ön püskürtme oranında (%10, %20, %30, %40) , farklı motor yüklerinde yapılan deneylerde elde edilen CA10 değerleri görülmektedir.

Ön enjeksiyon oranlarından bağımsız olarak yakıt karışımındaki JP8 oranının artırılması CA10'u geciktirmektedir. Başka bir ifade ile yapılan deneylerde yakıt içerisindeki JP8 oranı arttıkça yanma başlangıcının Ü.Ö.N. ya doğru yaklaştığı görülmüştür. Bu durum JP8'in dizel yakıtına göre daha düşük setan sayısına sahip olmasının ateşleme kinetiğini yavaşlattığını göstermektedir. Ayrıca düşük ve orta motor yüklerinde (%0, %25, %50) ön enjeksiyonun yanma başlangıcına etkisinin olmadığı da grafiklerde görülmektedir.

Örneğin motor yüksüz durumda iken 10JP8D90 deney yakıtı için dört farklı ön enjeksiyon oranı için elde edilen CA10 değerleri -2.53 °KMA, -2.56 °KMA, -2.40 °KMA ve -2.36 °KMA dır. Düşük motor yükleri, daha düşük silindir içi basınç ve sıcaklıkları nedeniyle gecikmeli CA10 (daha az negatif) sergilemektedir. Yüksek motor yüklerinde (%75, %100) ise yanma başlangıcına (CA10) yakıtın özelliğinin yanında yüksek ön enjeksiyon oranlarının da (%30, %40) etkisinin olduğu, silindir içi basınç ve sıcaklıkların artması ile birlikte CA10'u daha negatif krank mili açısına çektiği gözlenmiştir. %10 ön enjeksiyon oranında motor yüksüz durumda ve %25 yük altında çalıştığı esnada en erken yanma başlangıcı standart modda dizel yakıtı ile sırasıyla -3.197 °KMA ve -3.748 °KMA iken bu değerlere en yakın CA10 değerleri PPCI modda 10JP8D90 yakıtı ile -2.531 °KMA ve -3.191 °KMA olmuştur.

Orta ve yüksek motor yüklerinde (%50,%75, %100) ise 10JP8D90 yakıtı ile -3.884 °KMA, -4.031 °KMA ve -3.744 °KMA CA10 değerleri alınırken standart modda dizel yakıtı ile aynı motor yükleri için -3.792 °KMA, -3.534 °KMA ve -2.734 °KMA CA10 değerleri ölçülmüştür. Bu değerler yüksüz durumda dizel yakıtının yüksek setan sayısına bağlı olarak daha erken °KMA' da CA10 değerine ulaştığını gösterirken yüksek motor yüklerinde ise PPCI' ın sağladığı kısmi ön karıştırmanın 10JP8D90 yakıtı içerisindeki JP8'in olumsuz etkisine rağmen daha etkili olduğunu göstermektedir. Tüm motor yüklerinde kullanılan yakıt içerisindeki JP8 oranı artışı CA10 değerini geciktirmiştir. Tutuşma gecikmesinin en uzun sürdüğü yani en geç CA10 değerine sahip yakıt ise motor yüküne göre sırasıyla -0.805 °KMA, -1.093 °KMA, -1.789 °KMA, -2.19 °KMA ve -1.813 °KMA CA10 değeri ile saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtı olmuştur.



Grafik 4.9 Farklı yakıt karışım oranları için silindire gönderilen yakıtın %10'unun yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA10)

%10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında deney yakıtlarına göre çizilen CA10 grafikleri bir birlerine çok benzemektedir. Her iki ön enjeksiyon oranında yapılan deneylerde belirlenen CA10 değerleri birbirlerine çok yakındır. %20 ön enjeksiyon oranında da %0 ve %25 motor yükleri için en erken yanma başlangıcı standart modda dizel yakıtı ile -3.197 °KMA, -3.748 °KMA olarak elde edilirken %50, %75 ve %100 motor yükleri için en erken yanma başlangıcı PPCI modda 10JP8D90 yakıtı ile -3.802 °KMA, -3.881 °KMA ve -3.563 °KMA olarak elde edilmiştir. %20 ön enjeksiyon oranında en uzun tutuşma gecikmesine sahip deney yakıtı ise yine motor yükleri için sırasıyla -0.530 °KMA, -1.151 °KMA, -1.774 °KMA, -2.151 °KMA ve -1.702 °KMA CA10 değerleri ile saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtıdır. Ayrıca tüm deney yakıtları için %20 ön enjeksiyonda CA10 değeri %10 ön enjeksiyon oranına göre biraz daha Ü.Ö.N.'

ya doğru kaymaktadır. Yakıtların tutuşması bir miktar gecikmektedir. Örneğin 10JP8D90 yakıtı için yukarıda verilen CA10 değerleri arasında %50, %75 ve %100 motor yüklerinde %10 ve %20 ön enjeksiyon oranı için sırasıyla 0.082 °KMA, 0.15 °KMA, 0.181 °KMA fark vardır.

%30 ön enjeksiyon oranında düşük ve orta motor yüklerinde (%0, %25, %50) tüm deney yakıtları önceki ön enjeksiyon oranları ile aynı grafikleri oluşturup yaklaşık olarak aynı CA10 değerlerini tekrarlamaktadır. Fakat %75 ve %100 motor yüklerinde PPCI modda 10JP8D90 yakıtı ile elde edilen -5.035 °KMA, -15.636 °KMA CA10 değerleri, 100JP8D0 yakıtı ile elde edilen -6.779 °KMA, -12,265 °KMA CA10 değerleri standart modda dizel yakıtı ile elde edilen -3.534 °KMA, -2.734 °KMA CA10 değerlerinden çok daha erken yanmanın başladığını göstermektedir.

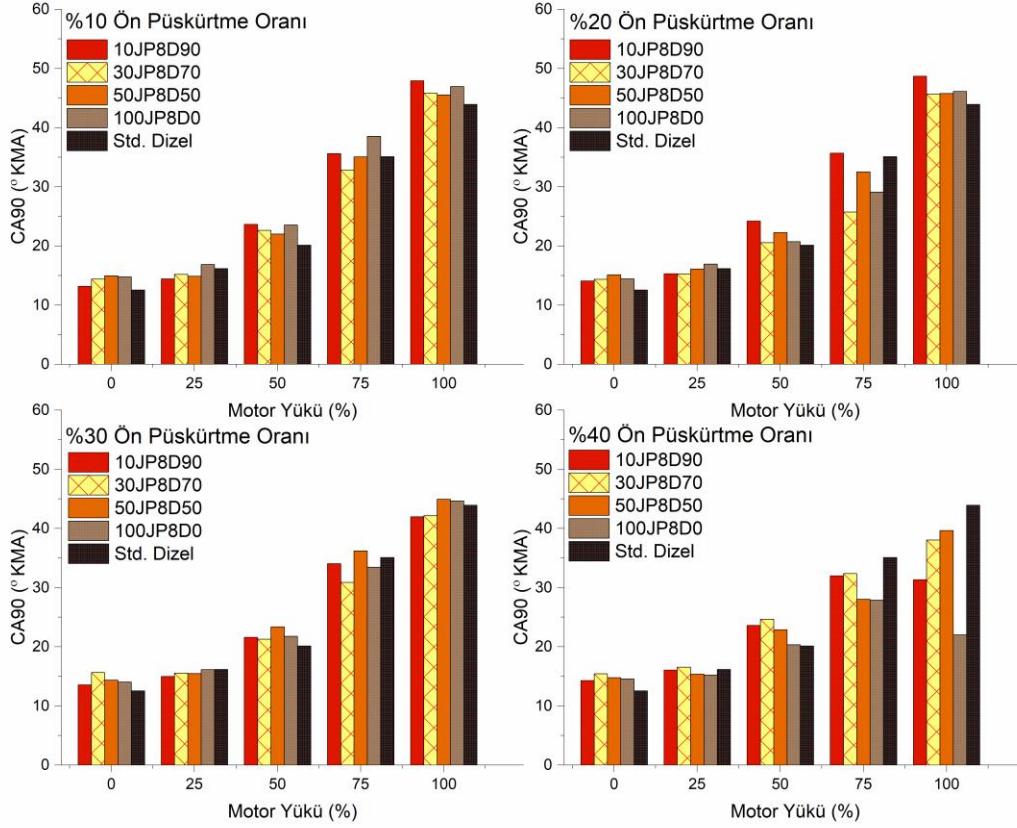
%40 ön enjeksiyon oranında PPCI modda elde edilen CA10 değerleri yanma başlangıcının %50 motor yükü ile birlikte diğer ön enjeksiyon oranlarına göre çok daha erkene çekildiğini göstermektedir. Örneğin PPCI modda %100 motor yükü için deney yakıtlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) CA10 değerleri sırasıyla -17.991 °KMA, -16.236 °KMA, -14.769 °KMA, -18.300 °KMA iken standart modda dizel yakıtı ile elde edilen CA10 değeri -2.734 °KMA' dır. PPCI bir motorda artan motor yükleri, kimyasal reaksiyonları ve yanmayı hızlandıran silindir içi basınç ve sıcaklıklar nedeniyle CA10 u daha erkene taşımaktadır.

Bunlara ilave olarak yüksek motor yüklerinde ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte yanma başlangıcı çok erken gerçekleşmektedir. Bu eğilim özellikle orta ve yüksek motor yüklerinde %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında neredeyse tüm deney yakıtlarında gözlenmektedir. Çok erken CA10 değerleri yanmanın Ü.Ö.N.' dan hemen sonra tamamlanmasını ve buna bağlı olarak yüksek yanma sonu basınç ve sıcaklıklarına ulaşılmasını sağlar. Bu durum motor performansı için olumlu olarak değerlendirilirken aynı zamanda motorun aşırı mekanik ve ısı gerilmelere maruz kalmasına sebep olabilir. Oluşan yüksek sıcaklıklar NO_x emisyonlarında kötüleşmeye sebep olabilir. Elde edilen bulgular JP8 ve karışımlarının PPCI motorlarda uygun enjeksiyon stratejileri ile dizel yakıtına alternatif olarak kullanılabileceğini hatta orta ve yüksek motor yüklerinde daha iyi performans verdiklerini göstermektedir (Liang et al., 2019; B. Liu et al., 2018; Rezaei et al., 2013).

CA90 toplam ısı salınımının %90'ının gerçekleştiği, yanma sürecinin büyük ölçüde tamamlandığı, teorik olarak yanma süresinin sonu olarak kabul edilen krank açısıdır. Yanma olayının değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. CA90'ın zamanlaması egzoz sıcaklığı ve emisyonlar üzerinde belirleyici rol oynar. Enjeksiyon zamanlaması, şarj hareketi, ön enjeksiyon ve ön yanma odası tasarımı gibi faktörler CA90'ı etkiler. Grafik 4.10'da farklı motor yükleri için standart modda dizel yakıtı ve PPCI modda dört farklı deney yakıtı ile %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında yapılan deneylerde elde edilen CA90 değerleri grafik olarak gösterilmektedir (Z. Zheng et al., 2015).

%10 ön enjeksiyon oranında motor yüksüz durumda iken yüksek setan sayısına sahip dizel yakıtının yanabilme kabiliyetinin daha iyi olması en düşük CA90 değerine ulaşılmasını sağlamıştır. JP8 ve JP8-Dizel karışım yakıtlarında ise yakıt içerisindeki JP8 oranının artışı CA90' a ulaşımı geciktirmiştir. JP8 yakıtının tutuşma kabiliyetinin düşük olması Grafik 4.9'da da görüldüğü gibi yanma başlangıcını (CA10) geciktirmekte, geciken yanma başlangıcı ise CA90'ın gecikmesine sebep olmaktadır. %25 motor yükünde JP8-Dizel karışımları sırasıyla 14.442 °KMA, 15.214 °KMA, 14.893 °KMA CA90 değerleri ile dizel yakıtının sağladığı 16.172 °KMA CA90 değerinden daha erken yanma sonuna ulaşmışlardır. Saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtı ise 16.852 °KMA CA90 değeri ile yanmanın en geç tamamlandığı yakıt olmuştur.

%50 motor yükünde 20.134 °KMA CA90 değeri ile standart modda dizel yakıtı en düşük değeri vermiştir. 10JP8D90 yakıtı 23.643 °KMA ve 100JP8D0 yakıtı 23.536 °KMA CA90 değerleri ile yanmanın en geç tamamlandığı yakıtlar olmuştur. PPCI modda %75 ve %100 motor yüklerinde en yüksek CA90 değerlerine yine 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtları ile ulaşılmıştır. %75 yük için CA90 değerleri 35.633 °KMA ve 38.546 °KMA iken tam yükte bu değerler 47.946 °KMA ve 46.960 °KMA olmuştur. Standart modda dizel yakıtı ile ise %75 yük için 35.081 °KMA, tam yük için ise 43.945 °KMA CA90 değerleri ölçülmüştür. %10 ön enjeksiyon oranında orta ve yüksek motor yüklerinde yüksek setan sayısı ve iyi bir tutuşma kabiliyetine sahip olan dizel yakıtı ile en avantajlı CA90 değerlerine ulaşılırken en kötü performansı veren yakıtlar 10JP8D90 ve 100JP8D0 karışım yakıtları olmuştur. 50JP8D50 yakıtı ise JP8 ve dizel yakıtının yanma özelliklerini yansıtarak genel olarak deney yakıtları içerisinde en iyi performansını sergilemiştir.



Grafik 4.10 Farklı yakıt karışım oranları için silindire gönderilen yakıtın %90'nın yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA90)

%20 ön enjeksiyon oranında yüksüz durumda standart modda dizel yakıtı yine 12.561 °KMA CA90 değeri ile en erken CA90 değerine ulaşan yakıttır. Deney yakıtları ise sırasıyla 14.102 °KMA, 14.361 °KMA, 15.142 °KMA ve 14.438 °KMA CA90 verileri ile birbirlerine yakın değerler sergilemiştir. %25 motor yükünde ise 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtları dizel yakıttan daha iyi bir performans sergileyerek sırasıyla 15.291 °KMA, 15.255 °KMA CA90 değerlerine ulaşmıştır. Bu yük için dizel yakıtının CA90 değeri 16.172 °KMA' dır. %50 motor yükünde PPCI modda 30JP8D70 yakıtı 20.547 °KMA CA90 verisi ile dizel yakıtına (20.134 °KMA) en yakın CA90 değerini sağlamaktadır. %50 motor yükü için 10JP8D90 yakıtı 24.212 °KMA CA90 değeri ile en kötü performans veren yakıt olmuştur. %25 ve %50 motor yüklerinde dizel yakıtına yakın veriler gösteren 30JP8D70 yakıtı %75 motor yükünde ise 25.734 °KMA' da

yanmanın tamamlanması ile en iyi performans veren yakıt olmuştur. Bu motor yükünde 10JP8D90 yakıtı hariç diğer tüm deney yakıtları dizel yakıtından daha iyi veriler sağlamıştır. %75 motor yükünde dizel yakıtının CA90 değeri 35.081 °KMA' dır. Motorun tam yükte çalıştığı durumda 10JP8D90 yakıtı hariç diğer üç deney yakıtı birbirlerine yakın CA90 değerleri (45.657 °KMA, 45.765 °KMA, 46.111 °KMA) sağlamıştır. Tam yükte en iyi performansı veren dizel yakıtının CA90 değeri 43.945 °KMA' dır. %20 ön enjeksiyon oranında tüm motor yüklerinde deney yakıtları içerisinde en iyi performansı 30JP8D70 yakıtı sağlamaktadır. Orta ve yüksek motor yüklerinde 10JP8D90 yakıtı en yüksek CA90 değerlerine ulaşarak en kötü verileri sağlamıştır. Düşük motor yüklerinde deney yakıtları arasında yakın değerler gözlenirken orta ve yüksek yüklerde karışımın oluşumu, yüksek silindir içi basınçlar, yüksek sıcaklıklar, yük artışına bağlı olarak artan yakıt miktarı v.b. değişimler yakıtların farklı CA90 değerlerini göstermesinin nedenleri olabilir (Polat, 2020).

%30 ön enjeksiyon oranında yüksüz durumda ve %25 motor yükünde yapılan deneylerde elde edilen CA90 değerleri %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında elde edilen veriler ile benzerlik göstermektedir. Deney yakıtları PPCI modda bir birlerine yakın CA90 değerleri sağlarken standart modda dizel yakıtı yüksüz durumda yine en düşük CA90 verisine sahiptir. %25 motor yükünde ise tüm deney yakıtlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) dizel yakıtından daha iyi bir yanma performansı sergilediği görülmektedir. Yanmanın Ü.Ö.N.' ya en yakın noktada tamamlandığı yakıt 14.974 °KMA' da CA90 değerine ulaşan 10JP8D90 yakıtıdır. %50 motor yükünde standart modda dizel yakıtı ile elde edilen CA90 değeri (20.134 °KMA), yanmanın en kısa sürede tamamlandığını göstermektedir. Karışım yakıtlarda PPCI modda dizel yakıtına en yakın performans gösteren yakıt 21.294 °KMA' ile 30JP8D70 yakıtı, en kötü performans gösteren yakıt ise 23.377 °KMA' ile 50JP8D50 yakıtıdır. Motor yüküne ve enjeksiyon oranına bağlı olarak karışım yakıtların gösterdiği performansta değişiklikler göstermektedir. %75 ve %100 motor yükü için CA90 değeri en iyi olan yakıt 30JP8D70 yakıtı (30.87 °KMA, 42.15 °KMA) olmuştur. Aynı motor yükleri için yanma olayını en geç tamamlayan yakıt ise 36.218 °KMA ve 44.947 °KMA CA90 verileri ile 50JP8D50 yakıtıdır.

%40 ön enjeksiyon oranında ön enjeksiyon ile emme portuna gönderilen yakıt miktarının yüksek olması büyük miktarda yakıtın erken bir anda yanmaya hazır hale

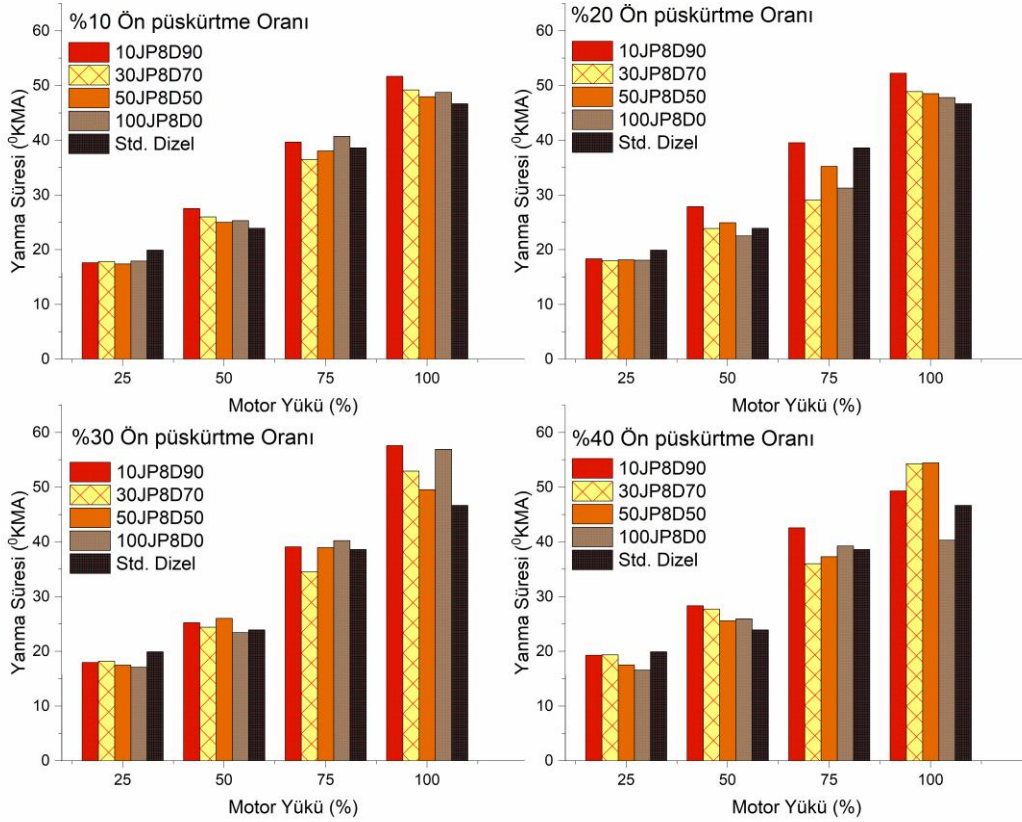
gelmeye imkân vermektedir. Bu durum JP8 yakıtının tutuşma gecikmesi dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. JP8' in yanma hızının dizel yakıtından daha yüksek olması sebebiyle yüksek ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 yakıtı özellikle orta ve yüksek motor yüklerinde diğer ön enjeksiyon oranlarındaki verilerinden daha farklı değerler göstermektedir. Yüksüz durumda ve %50 motor yükünde standart modda dizel yakıtı sırasıyla 12.561 °KMA ve 20.134 °KMA ile en düşük CA90 değerlerini verirken PPCI modda 100JP8D0 yakıtı yüksüz durumda 14.574 °KMA ve %50 motor yükünde 20.330 °KMA CA90 değerleri ile dizel yakıtına en yakın değerleri sağlamaktadır. 30JP8D70 yakıtı yüksüz durumda 15.437 °KMA ve %50 motor yükünde 24.670 °KMA CA90 değeri ile bu yüklerde en kötü performansı göstermektedir. %25, %75 ve %100 motor yüklerinde 100JP8D0 yakıtı sırasıyla 15.247 °KMA, 27.880 °KMA ve 22.033 °KMA ile en iyi CA90 değerlerini göstermektedir. Aynı motor yüklerinde standart modda dizel yakıtının ulaştığı CA90 değerleri ise 16.172 °KMA, 35.081 °KMA, 43.945 °KMA' dır ve dizel yakıtı bu yüklerde en kötü performansı sergilemektedir. 100JP8D0 yakıtının 'Ü.Ö.N.' ya en yakın CA90 değerlerine ulaşması yüksek silindir içi basınç ve sıcaklıklara imkân verdiği için motor performansı açısından olumlu olarak değerlendirilebilir. Fakat aynı durumun motorun yüksek mekanik ve termal yüklere maruz kalmasına da sebep olacağı göz ardı edilmemelidir. Ayrıca yüksek sıcaklıkların emisyonları açısından avantaj sağlarken NO_x emisyonları açısından dezavantaj oluşturduğu unutulmamalıdır (J. Zhang et al., 2025).

Düşük yüklerde CA90 değerleri nispeten daha düşüktür ve silindire gönderilen yakıt miktarına bağlı olarak daha kısa yanma sürelerini yansıtmaktadır. Daha yüksek motor yüklerinde ise CA90 değerleri tüm deney yakıtları için artar. Bunun nedeni, yanma sürecini uzatan daha fazla yakıtın silindirlere enjekte edilmesidir. Bu eğilim tüm yakıt karışımları ve ön enjeksiyon oranlarında tutarlıdır, ancak artışın büyüklüğü yakıt bileşimine göre değişmektedir. Düşük motor yüklerinde (%0, %25) standart modda dizel yakıtı ile elde edilen CA90 değerine en yakın değerler sağlayan ve rekabet edebilen JP8-dizel karışım yakıtı 10JP8D90 yakıtı iken orta ve yüksek (%50, %75, %100) motor yüklerinde en iyi performans veren yakıt 30JP8D70 yakıtı olmuştur. Saf JP8 olan 100JP8D0 yakıtı ise düşük ön enjeksiyon oranlarında dizel yakıtına göre daha düşük olan setan sayısı ve daha düşük olan tutuşma kabiliyetinden dolayı en yüksek CA90 değerleri gösterirken ön enjeksiyon oranının artması ve dizelden daha yüksek

olan yanma hızının da etkisiyle %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında nispeten daha iyi CA90 değerleri göstermektedir. Standart modda dizel yakıtı tüm ön enjeksiyon oranlarında yüksüz durumda ve %50 motor yükünde en iyi CA90 değerini verirken diğer motor yüklerinde neredeyse tüm ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda en az bir deney yakıtı ile elde edilen veri dizel yakıtından daha iyi CA90 sunmaktadır. Yakıt karışımları, ön enjeksiyon oranları ve motor yüklerine bağlı olarak CA90 değerlerindeki değişim, PPCI motorlarda yanma süresini ve bütünlüğünü şekillendirmede yakıt özelliklerinin ve enjeksiyon stratejilerinin önemini vurgulamaktadır (Ickes et al., 2009; Labeckas, Slavinskas, & Vilutiene, 2015).

İçten yanmalı motorlarda yanma süresi, yakıt-hava karışımının tutuşmasından başlayıp yanmanın tamamlanmasına kadar geçen KMA veya zaman aralığıdır. Genellikle yakıt kütlelerinin %10' nun yandığı nokta (CA10) yanma başlangıcı, %90'nın yandığı nokta (CA90) yanma sonu olarak kabul edilir. Yanma süresi motorun performansı, verimliliği ve emisyonları üzerinde doğrudan etkilidir (Saxena et al., 2021). Grafik 4.11'de dört farklı ön enjeksiyon oranında deney yakıtlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) ve dizel yakıtının motor yüküne bağlı olarak yanma süreleri görülmektedir.

%25 motor yükünde %40 ön enjeksiyon oranı hariç diğer tüm ön enjeksiyon oranlarında deney yakıtlarının tamamının bir birine yakın yanma sürelerine sahip olduğu görülmektedir. Deney yakıtlarının PPCI modda yanma süreleri yaklaşık 18 °KMA civarında iken (%20 ön enjeksiyon oranında yanma süreleri sırasıyla 18.33 °KMA, 17.97 °KMA, 18.14 °KMA ve 18.08 °KMA) standart modda dizel yakıtının yanma süresi 19.92 °KMA'dır. %40 ön enjeksiyon oranında ise en hızlı yanan yakıt 16.56 °KMA ile 100JP8D0 yakıtıdır. %50 motor yükünde yanma süresi en uzun olan yakıt 10JP8D90 yakıtı onu takip eden yakıt ise 30JP8D70 yakıtıdır. %10 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında yanma süresi en kısa olan yakıt 23.92 °KMA ile dizel yakıtı iken %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında sırasıyla 22.51°KMA, 23.45 °KMA yanma süreleri ile 100JP8D0 yakıtı olmuştur.



Grafik 4.11 Farklı yakıt karışım oranları için °KMA cinsinden yanma süresi

%75 motor yükünde PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranlarında sırasıyla 36.51 °KMA, 29.03 °KMA, 34.50 °KMA ve 36.03 °KMA yanma süreleri ile yanma hızı en yüksek yakıt 30JP8D70 deney yakıtıdır. Standart modda dizel yakıtı ise bu motor yükünde yanma reaksiyonunu 38.61°KMA’da tamamlamaktadır. Yanma süresi en uzun süren yakıt ise %10 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında 100JP8D0 yakıtı iken %20 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında 10JP8D90 yakıtı olmuştur.

Tam yükte %40 ön enjeksiyon oranı hariç en yavaş yanan yakıt PPCI modda 10JP8D90 yakıtı iken en hızlı yanan yakıt ise standart modda dizel yakıtı olmuştur. Dizel yakıtına en yakın yanma hızına sahip deney yakıtı ise 100JP8D0 yakıtıdır. %40 ön enjeksiyon oranında ise 40.33°KMA yanma süresi ile PPCI modda 100JP8D0 yakıtı

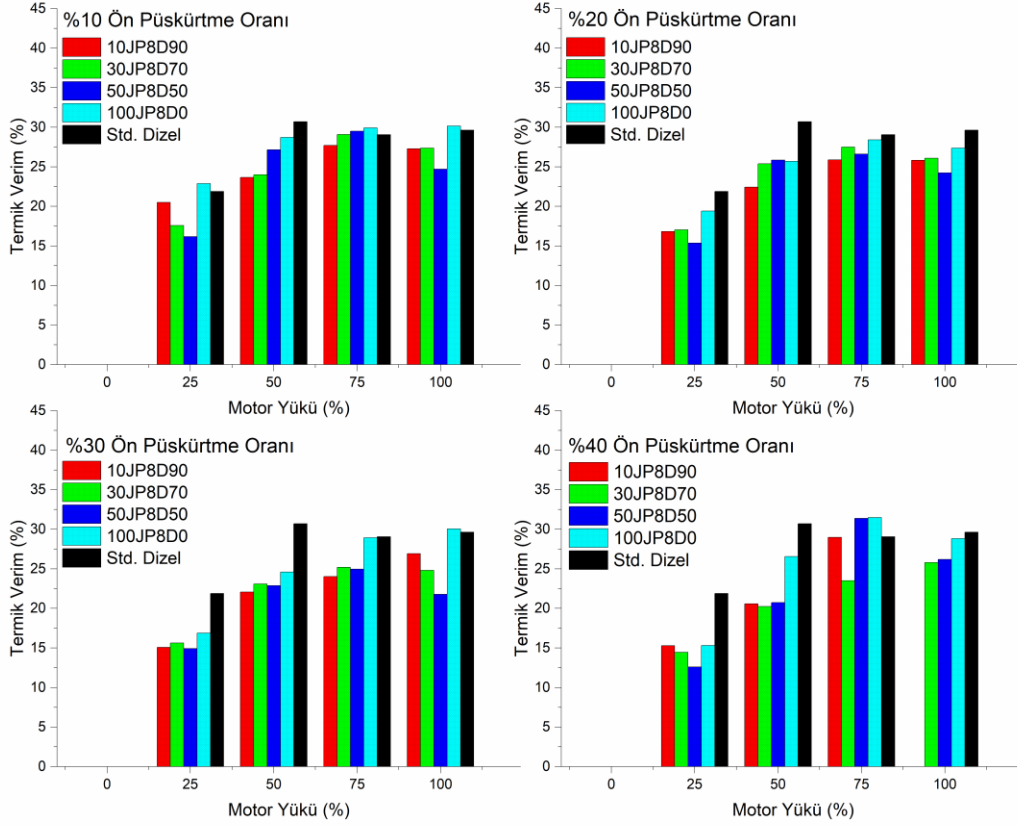
tam yükte yanma hızı en yüksek yakıt olmuştur. Standart modda dizel yakıtının yanma süresi 46.68°KMA' dır.

Genel olarak bakıldığında 10JP8D90 yakıtı daha uzun yanma süreleri gösterirken 100JP8D0 yakıtı deney yakıtları içerisinde daha hızlı yanan yakıt olmuştur. Bu durum JP8 yakıtının dizel yakıtından daha yüksek uçuculuğa ve yanma hızına sahip olmasıyla açıklanabilir. Fakat yanma süreleri sadece yakıtların özellikleri ile açıklanamaz, aynı zamanda motor yüküne bağlı olarak artan yakıt miktarı, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklıkları da burada etkili olmaktadır. %50 motor yükünde ise yanma süresi en kısa olan yakıt dizel yakıtıdır. Kısa yanma süreleri yüksek tepe basınç değerleri, yüksek motor verimi ve düşük emisyonlara imkan vermektedir. Uzun yanma süreleri ise düşük verim, artan emisyon değerleri ve daha düşük tepe basıncına sebep olmaktadır. Uzun yanma sürelerinde CO ve HC emisyonları artarken NO_x emisyonu maksimum sıcaklıkların düşmesine bağlı olarak azalabilir (Khoa & Lim, 2019). Yüksek motor performansı ve düşük CO, HC emisyonları için 100JP8D0 yakıtı PPC yanma modunun desteği ile dizel yakıtına bir alternatif oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

4.1.6. Farklı yakıt karışım oranları için termik verimdeki değişim

İçten yanmalı motorlarda termik verim, yakıtın kimyasal enerjisinin ne kadarının mekanik enerjiye dönüştürülebildiğini değerlendirmek için önemli bir parametredir. Son yıllarda motor tasarımında ve yanma süreçlerindeki teknolojik gelişmeler ile birlikte termik verim de olumlu yönde değişimler görülmektedir. Grafik 4.12'de farklı yakıt karışımları (Std. Dizel, 10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ve ön enjeksiyon oranları (%10, %20, %30,%40) için farklı motor yükleri (%25, %50, %75, %100) altında elde edilen termik verim değerleri görülmektedir. Standart modda dizel yakıtı neredeyse tüm deney kademelerinde JP8-dizel karışımlarına ve saf JP8' e göre daha yüksek termik verim değerleri göstermektedir. Bu durum dizel yakıtının JP8'e göre daha yüksek enerji yoğunluğu (alt ısı değeri) ve daha yüksek olan setan sayısının sağladığı yanma kalitesi ile açıklanabilir. Saf JP8 (100JP8D0) yakıtı PPCI modda deney yakıtları içerisinde tüm ön enjeksiyon oranlarında en iyi termik verim değerlerine ulaşan yakıttır. Buradan karışım yakıtların yanma dinamiklerinin standart dizel yakıtına ve saf JP8 yakıtına göre termik verim açısından olumsuz sonuçları olduğu yorumu yapılabilir.

Ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte, tutuşma gecikmesinin uzaması ve yanmanın daha yavaş olması tüm yakıt karışımları için termik verimi bir miktar azaltmaktadır.



Grafik 4.12 Farklı yakıt karışım oranları için termik verim değerleri

Yüksek ön karışım oranı, yakıt ve havanın daha iyi karışmasını sağlar, bu da tutuşma için gereken sıcaklık ve basınca ulaşmayı geciktirir. Artan motor yükleri ise tüm yakıtlar için termik verimde önemli ölçüde iyileşme sağlamaktadır. Bu iyileşmenin sebebi sürtünme, pompalama ve yardımcı sistem kayıplarının yüklerle orantılı artmaması; yüksek yükte bu kayıpların toplam enerjiye oranının azalmasıdır. Ayrıca motor yükündeki artış ile birlikte silindire gönderilen yakıt miktarı da artar, yanma odasında daha fazla enerji açığa çıkar, ısı kayıplar oransal olarak azalır, yanma daha hızlı ve verimli olur (Kang et al., 2019; Labeckas, Slavinskas, & Vilutiene, 2015).

%25 motor yükünde yapılan deneylerde %10 ön enjeksiyon oranı hariç diğer tüm ön enjeksiyon oranlarında standart modda dizel yakıtı, %21.887 ile en yüksek termik verim değerine sahiptir. PPCI modda deney yakıtları ile elde edilen en yüksek termik verim değerleri ise 100JP8D0 yakıtı ile ölçülen, %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları için sırasıyla %22.870, %19.411, %16.877, %15.315'lik termik verim değerleridir. %10 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 100JP8D0 yakıtı ile ulaşılan termik verim standart modda dizel yakıtı ile elde edilen termik verimden %1 daha yüksektir. %25 motor yükü için en kötü performans veren yakıt ise tüm ön enjeksiyon oranlarında sırasıyla %16.186, %15.363, %14.911 ve %12.588'lik termik verim değerleri ile 50JP8D50 yakıtı olmuştur.

%50 motor yükünde yine tüm ön enjeksiyon oranlarında en iyi termik verim değerine standart modda dizel yakıtı ile (%30.713) ulaşılmıştır. Dizel yakıtına en yakın termik verim sağlayan yakıt ise ön enjeksiyon oranlarına göre sırasıyla %28.722, %25.696, %24.608 ve %26.563'lük termik verim ile 100JP8D0 yakıtıdır. %50 motor yükü için en düşük termik verim değerleri ise 10JP8D90 yakıtı ile elde edilmiştir.

%75 motor yükünde standart modda dizel yakıtı ile elde edilen termik verim değeri ile PPCI modda saf JP8 ve JP8-dizel karışım yakıtları ile elde edilen termik verim değerleri arasındaki fark azalmış, değerler birbirine yaklaşmış hatta bazı ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda daha yüksek termik verim değerlerine ulaşılmıştır. Örneğin %10 ön enjeksiyon oranında 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları ile %29.084, %29.505, %29.932'lik termik verim değerlerine ulaşılmış ve bu termik verim değerleri standart modda dizel yakıtı ile ölçülen %29.0719'lük termik verim değerinden daha yüksektir. %40 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları ile de standart modda dizel yakıtına göre yaklaşık %2.3'lük bir iyileşme sağlanmıştır. Bura da PPCI modda; standart modda dizel yakıtı ile elde edilen termik verim değerinden daha yüksek termik verim değerlerine alt ısı değeri dizel yakıtından daha düşük olan, enerji yoğunluğu daha az olan yakıtlarla ulaşılmışının ayrıca önemli olduğu dikkatlerden kaçmamalıdır. %75 motor yükünde neredeyse tüm deney yakıtları birbirlerine yakın termik verim değerlerine ulaşmıştır.

Tam yükte ise yine PPCI modda 100JP8D0 yakıtı ve standart modda dizel yakıtı birbirlerine yakın ve en yüksek termik verim değerlerine ulaşırken, 50JP8D50 yakıtı

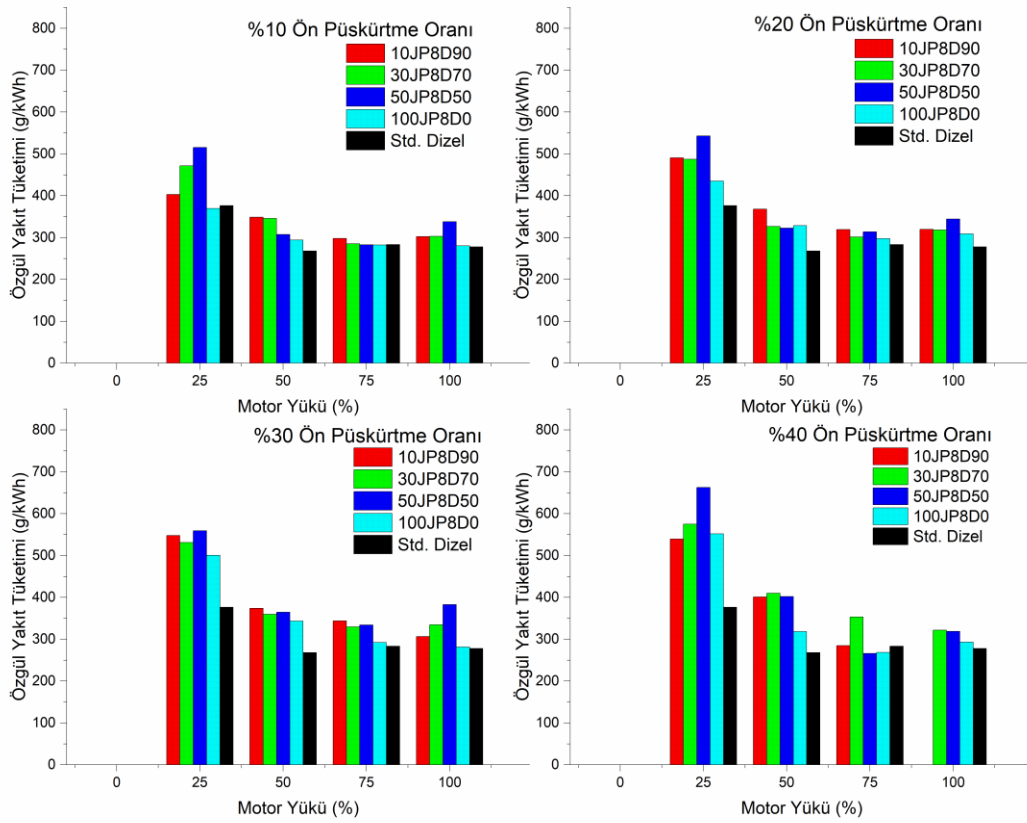
tüm ön enjeksiyon oranlarında sırasıyla %24.694, %24.227, %21.784 ve %26.187 ile en düşük termik verim değerlerine sahiptir. Dizel yakıtının termik verimi %29.675'iken 100JP8D0 yakıtının termik verim değerleri %10 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında %30.163 ve %30.041 ile dizel yakıtından daha yüksek, %20 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ise %27.361 ve %26.187 ile dizel yakıtına yakın değerler olmuştur.

İçten yanmalı motorlar genellikle %75-80 motor yüklerinde en yüksek termik verim değerlerinde çalışır. Düşük motor yüklerinde ise sabit kayıplar (sürtünme, pompalama v.b.) nedeniyle termik verim azalır. PPCI modda saf JP8 (100JP8D0), JP8-dizel karışımlarına göre daha iyi termik verim değerleri sergilerken, standart modda dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında özellikle düşük yüklerde (%25, %50) dizel yakıtından düşük termik verim değerlerinde kalmaktadır. Karışım yakıtlardaki JP8 içeriğinin artışı, JP8'in daha düşük setan sayısı ve alt ısıl değeri nedeniyle termik verimi düşürmektedir. Nerdeyse tüm ön enjeksiyon oranlarında en düşük termik verim değerlerine sahip yakıt 50JP8D50 yakıtıdır. Ön enjeksiyon oranındaki artış termik verimi düşürmektedir. Bu durum ön enjeksiyon oranındaki artışın tutuşma gecikmesini artırmasına ve yanma hızını yavaşlatmasına bağlanabilir. Tüm ön enjeksiyon oranlarında termik verim tüm deney yakıtları için motor yükünün artışıyla birlikte artmaktadır. Bu durum sabit kayıpların (sürtünme, pompalama ve yardımcı sistem kayıplarının) yükle orantılı artmaması ve yüksek yükte ısıl kayıpların oransal olarak azalmasına bağlanabilir (Kannan, 2016; K. Kim et al., 2014; Li et al., 2020).

4.1.7. Farklı yakıt karışım oranları için (ÖYT) özgül yakıt tüketimindeki değişim

Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) bir içten yanmalı motorun yakıt verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir ve üretilen birim güç başına tüketilen yakıt miktarı (g/kWh) olarak ölçülür. Özgül yakıt tüketimi motor performansının optimizasyonunda ve farklı yakıt türlerinin karşılaştırılmasında önemli bir etkidir. Düşük ÖYT daha verimli bir içten yanmalı motor anlamına gelmektedir. Yakıt enjeksiyon stratejileri, sıkıştırma oranı ve motor ayarları ÖYT üzerinde önemli etkiye sahiptir. Grafik 4.13'te farklı ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20, %30, %40), standart modda dizel yakıtı ve PPCI modda deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) için motor yüküne bağlı olarak ölçülen ÖYT grafikleri

görülmektedir. Düşük ve orta motor yüklerinde (%25, %50) dizel yakıtı tüm ön enjeksiyon oranlarında en düşük ÖYT değerlerine sahiptir. Yakıt içerisindeki JP8 oranı arttıkça ÖYT özellikle düşük yüklerde artma eğilimindedir. Bunun nedeni JP8'in dizel yakıtına göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır (Aydoğan & Altınok, 2019).



Grafik 4.13 Farklı yakıt karışım oranları için özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri

%10 ön enjeksiyon oranında düşük ve orta yüklerde standart modda dizel yakıtı %25 motor yükünde 376.379 g/kWh ve %50 motor yükünde 268.224 g/kWh ile en düşük ÖYT değerlerini verirken PPCI modda 100JP8D0 yakıtı ise dizel yakıtına en yakın ÖYT değerlerini sağlamaktadır. 100JP8D0 yakıtının %50 motor yükünde ölçülen ÖYT değeri 294.221 g/kWh' tir. %25 motor yükünde 515.416 g/kWh ile 50JP8D50 yakıtı, %50 motor yükünde ise 348.929 g/kWh ile 10JP8D90 yakıtı en yüksek ÖYT seviyelerini oluşturmuştur. %75 ve %100 motor yüklerinde ise 100JP8D0 yakıtı ile

dizel yakıtı birbirlerine çok yakın ÖYT değerleri göstermektedir. Standart modda dizel yakıtının %75 motor yükünde ve tam yükte ÖYT verileri sırasıyla 283.365 g/kWh ile 277.958 g/kWh iken, PPCI modda 100JP8D0 yakıtının ÖYT değerleri 282.324 g/kWh ve 280.161 g/kWh' tir.

%20 ön enjeksiyon oranında düşük ve orta yüklerde yine en iyi ÖYT sunan yakıt dizel yakıtı ve dizel yakıtına en yakın değerleri sağlayan deney yakıtı ise 100JP8D0 yakıtıdır, fakat ÖYT değerleri arasındaki fark ön enjeksiyonun olumsuz etkisi ile bir miktar artmıştır. 100JP8D0 yakıtının ÖYT değerlerinin %25 motor yükünde 369.497 g/kWh' ten 435.334 g/kWh' e , %50 motor yükünde ise 294.221 g/kWh' ten 328.870 g/kWh' e yükseldiği görülmektedir. Aynı motor yükleri için en yüksek ÖYT verilerini gösteren yakıtlar ise %25 motor yükü için 543.054 g/kWh ile 50JP8D50 ve %50 motor yükü için 368.202 g/kWh ile 10JP8D90 olmuştur. Yüksek motor yüklerinde (%75, %100) dizel yakıtı en düşük ÖYT' yi sağlarken ona en yakın değerler 100JP8D0 yakıtından ölçülmektedir fakat yüksek yüklerde diğer JP8-dizel karışım yakıtlarda 100JP8D0 yakıtına yakın ÖYT değerleri sunmaktadır. Örneğin %75 motor yükü için referans dizel yakıtın ÖYT verisi 283.365 g/kWh iken referans yakıtı en yakın değeri veren 100JP8D0 yakıtının ÖYT değeri 297.577 g/kWh' tir. Aynı motor yükü için 10JP8D90, 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtlarının ÖYT değerleri sırasıyla 319.237 g/kWh, 301.795 g/kWh, 313.653 g/kWh olmuştur.

%30 ön enjeksiyon oranında tüm motor yüklerinde en düşük ÖYT standart modda dizel yakıtı ile elde edilmiş ve tüm motor yüklerinde dizel yakıtına en yakın ÖYT değerlerini 100JP8D0 yakıtı vermiştir. %25 ve %50 motor yüklerinde dizel yakıtının ÖYT değerleri (376.379 g/kWh, 268.224 g/kWh) ile 100JP8D0 yakıtının ÖYT değerleri (500.700 g/kWh, 343.403 g/kWh) arasındaki fark fazla iken %75 ve %100 motor yüklerinde bu fark azalmaktadır. %75 motor yükünde dizel yakıtının ÖYT değeri 283.365 g/kWh' iken 100JP8D0 yakıtının ÖYT değeri 291.980 g/kWh ve tam yükte bu değerler sırasıyla 277.985 g/kWh ile 281.302 g/kWh' tir. %30 ön enjeksiyon oranında tüm motor yüklerinde en yüksek ÖYT değerlerine ulaşan yakıt 50JP8D50 yakıtı olmuştur.

%40 ön enjeksiyon oranında da tüm ön enjeksiyon oranlarındaki grafik şablonunun olduğu görülmektedir. Ön enjeksiyon oranının artışına bağlı olarak ÖYT

değerlerinin diğer ön enjeksiyon oranlarına göre biraz daha yükselmiş olduğu görülmektedir. Diğer ön enjeksiyon oranlarından farklı olarak %75 motor yükünde 100JP8D0 yakıtı 268.370 g/kWh' lik ÖYT ile dizel yakıtından (283.365 g/kWh) daha düşük ÖYT değeri sağlamıştır. Ayrıca %40 ön enjeksiyon oranında %100 motor yükünde 10JP8D90 yakıtı ile deney yapılması esnasında çok yüksek motor vuruşu meydana geldiği için deney verileri alınamamıştır. 10JP8D90 yakıtının % olarak en yüksek dizel oranına sahip yakıt olması, dizel yakıtının yüksek setan sayısı ve tutuşma kabiliyetinin daha iyi olması nedeniyle ön enjeksiyon ile yüksek miktarda yakıtın emme portuna gönderilmesinin motor vuruşuna sebep olduğu düşünülmektedir (Cheng et al., 2016).

Dizel yakıtı JP8'e oranla daha yüksek enerji yoğunluğu ve yanma verimliliği sayesinde neredeyse tüm ön enjeksiyon oranları ve motor yüklerinde en düşük ÖYT' yi sağlayan yakıttır. PPCI modda saf JP8 olan 100JP8D0 deney yakıtı ise tüm durumlarda standart modda dizel yakıtı ile elde edilen ÖYT değerlerine en yakın değerleri sunmuştur. JP8 yakıtının hem ısı değeri olarak hem de yoğunluk olarak dizel yakıtından düşük değerlere sahip olduğu göz önüne alındığında küçük ÖYT farklarının olduğu yüksek motor yüklerinde JP8 yakıtının yanmasının daha verimli olduğu yorumu yapılabilir. JP8-dizel karışım yakıtlarında ise içerisindeki JP8 oranı en fazla olan 50JP8D50 deney yakıtı ulaştığı en yüksek ÖYT değerleri ile en kötü performans sergileyen yakıt olmuştur. Tüm deney yakıtlarında ön enjeksiyon oranındaki artışın yanma verimliliğini azalttığı, birim güç başına tüketilen yakıt miktarını (ÖYT) artırdığı görülmektedir. ÖYT artan motor yükü ile azalır, çünkü daha yüksek motor yükleri çıkış gücüne oranla sürtünme ve ısı kayıpları azaltarak motor verimliliğini artırır. Elde edilen ÖYT değerleri yakıt özelliklerinin, enjeksiyon stratejilerinin ve motor yükünün PPCI motorlarda yakıt verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Standart modda dizel yakıtı sürekli olarak en düşük ÖYT değerlerini sağlarken, PPCI modda JP8-dizel karışımları daha düşük enerji yoğunluğu ve yanma özellikleri nedeniyle daha yüksek ÖYT değerleri sergilemektedir. Bu bulgular JP8 gibi alternatif yakıtlar ile çalışılırken optimum yakıt verimliliği elde etmek için yakıt karışımlarını ve enjeksiyon parametrelerini optimize etmenin önemini vurgulamaktadır (El Shenawy et al., 2019; B. Liu et al., 2018).

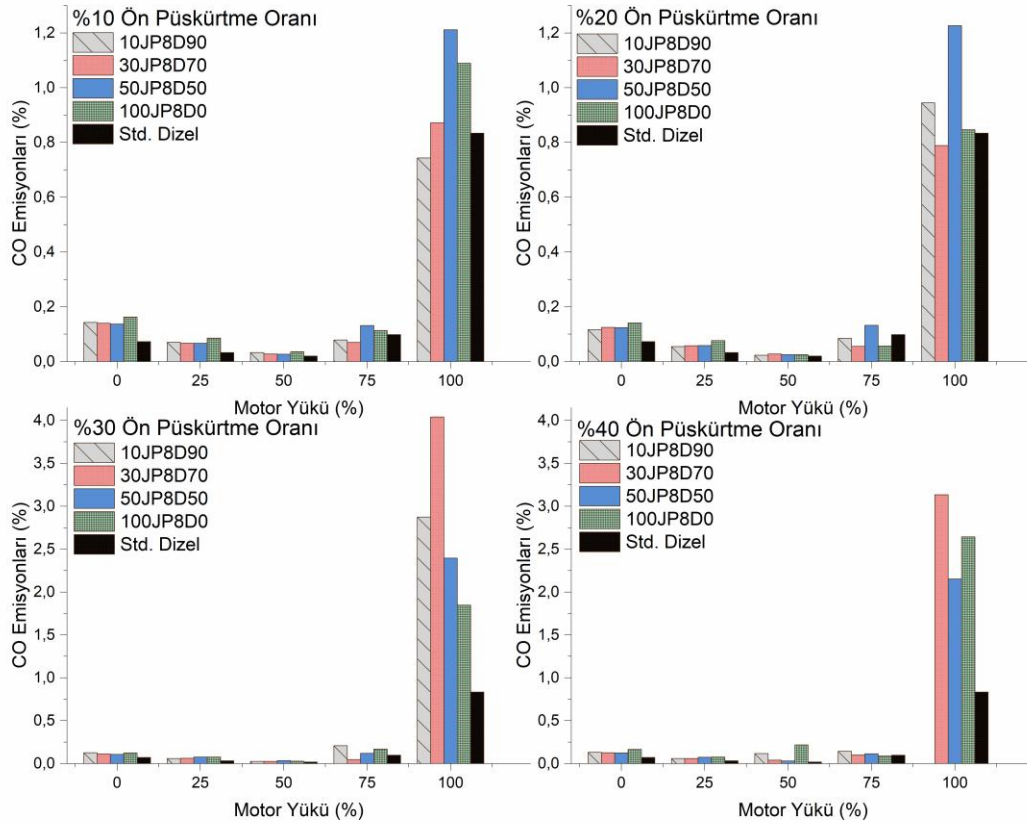
4.1.8. Farklı yakıt karışım oranları için ölçülen CO, CO₂, HC, NO_x ve İş emisyonu değerleri

Karbonmonoksit (CO) emisyonları, genellikle yakıtın oksidasyonu esnasında yeterli oksijen olmadığında oluşan eksik yanmanın bir yan ürünüdür. Taşıtlarda eksik yanma ürünü olarak açığa çıkan CO emisyonu hem hava kirliliği hem de insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Grafik 4.14'te PPCI modda farklı ön püskürtme oranları ve motor yüklerinde dört farklı deney yakıtı (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen CO emisyonları (% olarak) görülmektedir.

PPCI modda JP8-dizel karışımları ve saf JP8 yakıtı ile %0 ve %25 motor yüklerinde ölçülen CO emisyonları dizel yakıtı ile standart modda ölçülen CO emisyon değerlerinden daha yüksektir. %10 ön enjeksiyon oranında yüksüz durumda dizel yakıtının CO emisyonu değeri %0.073 iken deney yakıtları için sırasıyla %0.143, %0.140, %0.137 ve %0.163'tür. %25 motor yükü için dizel yakıtının CO emisyon değeri %0.033, deney yakıtlarının CO emisyon değerleri ise %0.071, %0.067, %0.067 ve %0.086'dır. JP8'in düşük setan sayısı ve daha yavaş yanma başlangıcı özellikleri eksik yanmaya yol açarak düşük motor yüklerindeki yüksek CO emisyonunun nedeni olabilir. Ön enjeksiyon oranının artışı ile birlikte düşük motor yüklerinde kısmi ön karışım miktarındaki iyileşme ve bu iyileşmeye bağlı olarak yanma kalitesindeki artış CO emisyonlarını bir miktar düşürme eğilimindedir. Örneğin yüksüz durumda 30JP8D70 yakıtı için %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında CO emisyonları %0.140, %0.125, %0.114 olarak ölçülmüş, %25 motor yükünde 100JP8D0 yakıtı için ise ön enjeksiyon oranlarına bağlı CO emisyonları sırasıyla %0.086, %0.077 ve %0.076 olarak ölçülmüştür. Verilen örneklerde enjeksiyon oranının artışıyla bağlı olarak CO emisyonundaki azalma net olarak görülmektedir (Xu et al., 2016).

%0 ve %25 motor yükleri için belirlenen en düşük CO emisyonları standart modda dizel yakıtı ile ölçülen %0.073 ve %0.033'lük CO emisyonlarıdır. Yüksüz durumda 50JP8D50 yakıtı ile %30 ön enjeksiyon oranında ölçülen %0.109 ve %25 motor yükü için 10JP8D90 yakıtı ile %20 ön enjeksiyon oranında ölçülen %0.055 CO değerleri dizel yakıtına en yakın CO emisyon değerleri olmuştur. Standart modda dizel yakıtı %50 motor yükünde yapılan deneylerde tüm ön enjeksiyon oranlarında %0.02'lik

değer ile en düşük CO emisyonlarını sergileyen yakıttır. Orta motor yükü (%50) için dizel yakıtına en yakın CO emisyon değerleri PPCI modda 50JP8D50 yakıtı ile %10 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ölçülen sırasıyla %0.027 ve %0.032, 10JP8D90 yakıtı ile %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında ölçülen %0.023 ve %0.026'lık CO değerleridir.



Grafik 4.14 Farklı yakıt karışım oranları için karbon monoksit (CO) emisyonları

%50 motor yükün de ön enjeksiyon oranındaki artışın CO emisyonuna olan olumlu etkisine ilave olarak artan silindir içi basınç ve sıcaklıklar ile yanma verimliliğindeki iyileşmeye bağlı olarak CO emisyonlarında bir azalma gözlenmektedir. Dizel yakıtı JP8'e göre daha yüksek setan sayısı ve daha iyi tutuşma özellikleri sayesinde çoğu motor yükünde en düşük CO emisyonlarını sağlamaktadır. %50 motor yükü için deney yakıtlarının sağladığı CO emisyon değerleri birbirlerine yakın olmak ile

birlikte en yüksek CO emisyonları 100JP8D0 kodlu saf JP8 yakıtı ile ölçülen %0.036, %0.028, %0.028 ve %0.218 değerleri olmuştur.

%75 motor yükünde dizel yakıtı ile ölçülen CO değeri %0.099'dur. PPCI modda 30JP8D70 yakıtı %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında sırasıyla% 0.070, %0.056, %0.047 ve %0.0101 verileri ile %75 motor yükü için en düşük CO emisyonu değerlerini sağlamaktadır. Bu motor yükü için PPCI modda en yüksek CO verileri 50JP8D50 yakıtının %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında açığa çıkardığı %0.132, %0.133, %0.120, %0.115'lik emisyon değerleridir. Artan motor yükleri ve buna bağlı olarak silindirlere gönderilen yakıt miktarındaki artış ve yanma için gerekli süre yetersizliği %75 motor yükünde kısmen tam yükte ise yüksek bir CO emisyon artışına neden olmaktadır.

Tam yükte yanma verimliliğindeki düşüş ile eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarında yüksek miktarda bir artış meydana gelmektedir. Tam yükte karşılaşılan CO emisyonundaki artışa yükü karşılamak için ihtiyaç duyulan yakıt miktarının fazlalığı, yanma için yeterli sürenin olmaması, yakıt ile havanın homojen karıştırılmasında karşılaşılan zorluklar ve oksidasyon için gerekli oksijen miktarının yetersizliğinin sebep olduğu eksik yanmanın neden olduğu düşünülmektedir. %100 motor yükünde standart modda dizel yakıtı ile ölçülen CO emisyon değeri %0.834'tür. PPCI modda %10 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı %0.744 ve %20 ön enjeksiyon oranında 30JP8D70 yakıtı %0.789'luk CO değerleri ile tam yük için dizel yakıtından daha düşük emisyon değerlerini sağlamıştır. Diğer tüm deney yakıtları tam yükte dizel yakıtından çok daha yüksek CO değerlerine sahiptir. %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarından 50JP8D50 yakıtı %1.212, %1.227'lik CO emisyonu değerleri ve %30 ve %40 ön enjeksiyon oranında 30JP8D70 yakıtı %4.042, %3.134'lük CO emisyonu değerleri ile tam yükte en yüksek emisyon değerlerini göstermektedir.

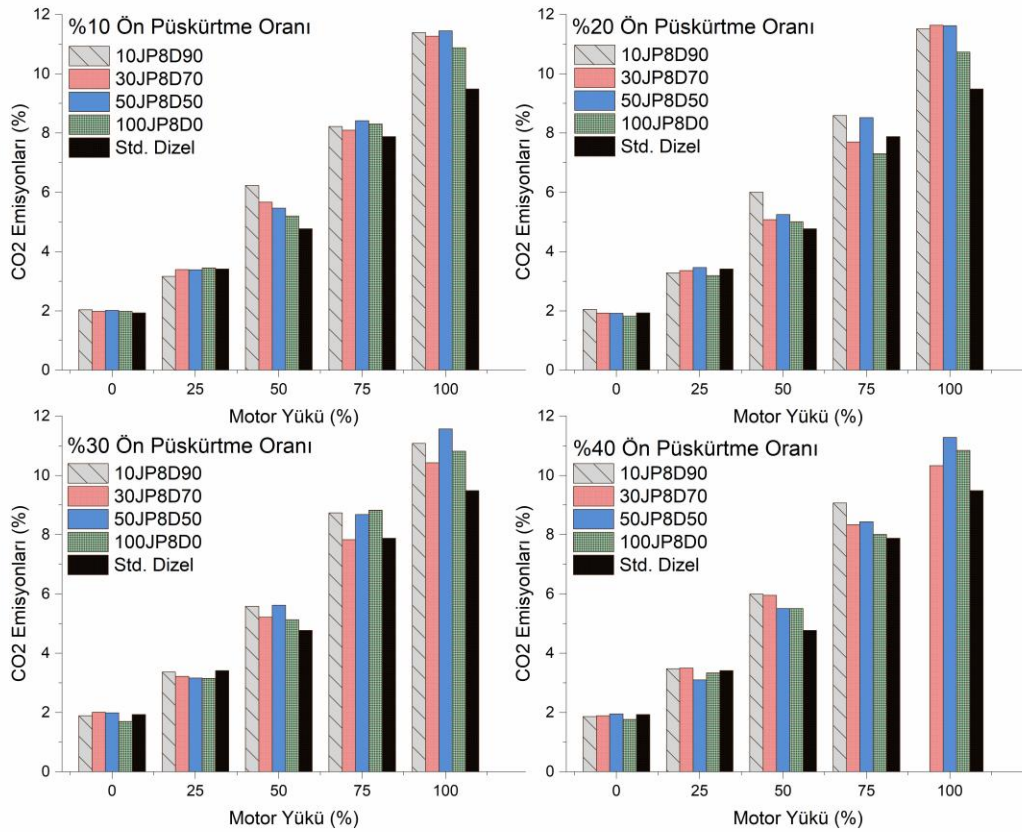
Tüm deney yakıtları için CO emisyonları, düşük motor yüklerinde (%0, %25) daha düşük sıcaklıklar ve silindir içi basınçların etkisiyle oluşan eksik yanmadan dolayı yüksektir. Düşük motor yüklerinde ön enjeksiyon oranındaki artış kısmi ön karışımın iyileşmesi ile birlikte CO emisyonları azalmaktadır. Standart modda dizel yakıtı düşük motor yüklerinde ve tam yükte en düşük CO emisyon değerlerini sağlarken orta motor yüklerinde (%50, %75) JP8-Dizel karışımı deney yakıtları ön enjeksiyon oranlarının da

etkisiyle dizel yakıtından daha düşük CO emisyon değerlerine ulaşabilmektedir. Ön enjeksiyon oranlarında ki artışa bağlı olarak CO emisyonlarındaki azalmanın sebebinin yanma kalitesini artırarak eksik yanmayı en aza indiren kısmi ön karışım miktarındaki iyileşmenin olduğu düşünülmektedir. Elde edilen CO emisyonu verileri motor yüküne bağlı olarak yakıt bileşiminin ve ön enjeksiyon stratejisinin PPCI motorlar da yanma kalitesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Dizel yakıtı genel olarak en düşük CO emisyonlarına ulaşırken JP8-dizel karışımları ve saf JP8, daha yavaş yanma dinamikleri nedeniyle daha yüksek emisyon değerleri sergilemektedir. Ön enjeksiyon oranını artırmak özellikle düşük ve orta motor yüklerinde (%0, %25, %50, %75) CO emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmakta ve kısmi ön karışımın yanma verimliliğini iyileştirmedeki etkisini göstermektedir. PPCI motorlarda 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtlarının gerekli optimizasyon ile nispeten düşük CO emisyonlarına ulaşarak standart modda dizel yakıtına alternatif olarak kullanılabilir olduğu görülmektedir. Veriler PPCI motorlarda eksik yanmayı ve CO emisyonlarını en aza indirmek için motor yüküne bağlı olarak yakıt karışımlarının ve enjeksiyon parametrelerinin optimize edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır (Ashour & Elwardany, 2020; Benajes et al., 2015; Huang et al., 2019).

Karbondiyoksit (CO_2) emisyonları, yanma olayının temel bir göstergesidir ve yanma koşulları hakkında önemli bilgiler verir. Fosil yakıtların yanması esnasında karbonun oksijenle birleşmesi ile CO_2 oluşur; açığa çıkan CO_2 miktarı yanmanın ne kadar verimli ve temiz gerçekleştiği hakkında bilgi sağlar. Tam yanma koşullarında, tepkimeye giren karbonun neredeyse tamamı CO_2 'ye dönüşürken, eksik yanma durumunda karbon monoksit (CO) ve diğer eksik yanma ürünleri de oluşabilir. Karbon içeren yakıtların yanma olayının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olan karbondiyoksit emisyonu bir motorun çevresel etkisini değerlendirmek içinde önemli bir parametredir. Grafik 4.15 farklı motor yüklerinde PPCI modda dört farklı deney yakıtı ve standart modda dizel yakıtı ile yapılan deneylerde farklı ön püskürtme oranlarının (%10, %20, %30, %40) CO_2 emisyonuna etkilerini göstermektedir (Hosseini et al., 2017; B. Liu et al., 2018).

PPCI modda yapılan deneylerde ölçülen CO_2 emisyonları standart modda dizel yakıtı ile ölçülen CO_2 emisyonlarından neredeyse tüm deney yakıtları için daha yüksektir, aynı deney şartlarında CO emisyonunun azalması CO_2 emisyonunun artışı daha

iyi bir oksidasyonu işaret etmektedir ve bu durum PPCI' in yanma kalitesini artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Deney motoru yüksüz durumdayken ve %25 yük altındayken yapılan deneylerde deney yakıtları CO₂ emisyonu için benzer veriler sağlamıştır. Motor yükünün artışıyla birlikte deney yakıtları arasında da açığa çıkan CO₂ emisyonu açısından farklar oluşmaya başlamıştır. CO₂ emisyonları tüm yakıt karışımlarında da motor yükü ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır.



Grafik 4.15 Farklı yakıt karışım oranları için karbondioksit (CO₂) emisyonları

%10 ön enjeksiyon oranında %25 motor yükü hariç diğer tüm yüklerde PPCI modda deney yakıtları ile ölçülen CO₂ standart modda dizel yakıtı ile ölçülen CO₂ miktarından daha yüksektir. Özellikle orta ve yüksek motor yüklerinde arada oluşan fark daha belirgindir. %50 motor yükünde deney yakıtları ile ölçülen CO₂ değerleri %6.23 (10JP8D90), %5.67 (30JP8D70), %5.47 (50JP8D50) ve %5.20 (100JP8D0) iken dizel yakıtı ile ölçülen CO₂ değeri %4.78'dir. Tam yükte yapılan deneylerde ise deney

yakıtlarıyla ölçülen CO₂ miktarları sırasıyla %11.40, %11.27, %11.45, %10.88 iken aynı motor yükünde dizel yakıtının CO₂ değeri %9.50'dir. PPCI modda deney yakıtları ile elde edilen yüksek CO₂ emisyonu değerleri bu yanma modunda standart yanma modundan daha verimli bir yanma meydana geldiğini ifade eder. Ancak CO₂' in motor yüküne bağlı olarak artan yakıt tüketim miktarıyla da artış gösterdiği unutulmamalıdır. %10 ön enjeksiyon oranında Tüm motor yüklerinde en yüksek CO₂ emisyonu değerlerine sahip olan ve yanma veriminin diğer yakıtlardan daha iyi olduğu değerlendirilen yakıt 50JP8D50 yakıtı olmuştur.

%20 ön enjeksiyon oranında yanmanın kalitesini açığa çıkan CO₂ emisyonu üzerinden değerlendirdiğimizde; yüksüz durumda ve %25 motor yükünde yapılan deneylerde tüm yakıtların yakın CO₂ değerlerine sahip olduğu ve PPCI mod ile standart mod arasında yada dizel yakıtı ile deney yakıtları arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Orta ve yüksek motor yüklerinde (%50, %75, %100) ise neredeyse PPCI modda tüm deney yakıtları standart modda dizel yakıtıyla ölçülen CO₂ emisyon değerlerinden daha yüksek CO₂ değerlerine sahiptir. %20 ön enjeksiyon oranında %50 ve %75 motor yüklerinde 10JP8D90 yakıtının CO₂ değerleri %6 ve %8.6 iken dizel yakıtının CO₂ değerleri %4.78 ve %7.9'dur. Tam yükte ise 30JP8D70 yakıtı %11.64 CO₂ değerine sahipken dizel yakıtının CO₂ değeri %9.5'tir. Bu ön enjeksiyon kademesi için yanma kalitesi açısından 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtları ön plana çıkmaktadır.

%30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında da yüksüz durumda ve %25 motor yükünde PPCI modda deney yakıtlarının CO₂ değerleri ile standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değerler arasında dikkate değer bir fark oluşmamaktadır. Fakat orta ve yüksek motor yüklerinde PPCI modda deney yakıtları ile yapılan deneyler ile standart modda dizel yakıtı ile yapılan deneylerde ölçülen ve yanmanın kalitesi ile ilgili yorum yapabilmemizi sağlayan CO₂ değerleri arasında farklar görülmektedir. %50 ve %75 motor yüklerinde 10JP8D90 yakıtı hem %30 ön enjeksiyon oranındaki %5.56, %8.74'lik CO₂ değerleri hem de %40 ön enjeksiyon oranındaki %6 ve %9.1'lik CO₂ değerleri ile en yüksek değerlere sahip yakıttır. Bu motor yüklerinde standart modda dizel yakıtının CO₂ değerleri %50 motor yükü için %4.78 ve %75 motor yükü için %7.9'dur. Tam yükte ise 50JP8D50 yakıtının CO₂ değerleri %30 ön enjeksiyon oranında %11.57 ve %40 ön enjeksiyon oranında %11.29'dur. Dizel yakıtının tam yükteki CO₂ değeri %9.5'tur.

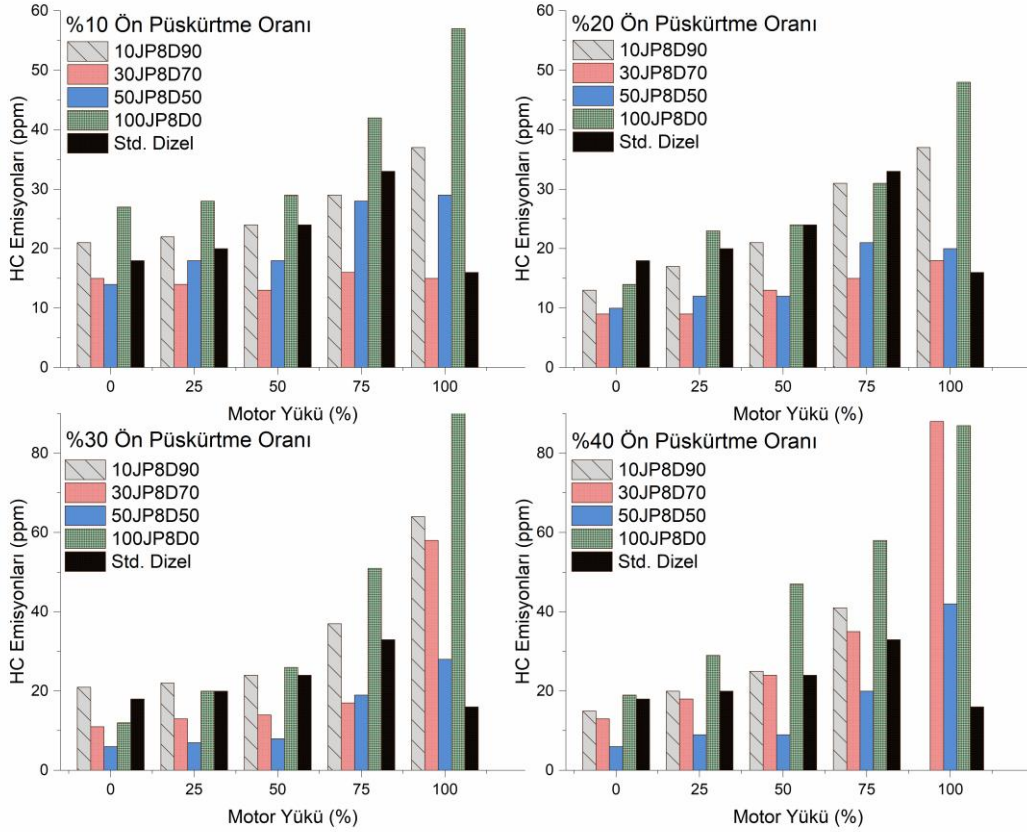
Düşük motor yüklerinde (%0, %25) CO₂ emisyonları tüketilen yakıt miktarının daha az olması nedeniyle her iki yanma modunda ve tüm yakıt karışımları için nispeten daha düşüktür. Daha yüksek motor yüklerinde ise hem artan yakıt tüketimi hem de yanma verimliliğinin etkisiyle yanma ana ürünü olan CO₂ emisyonlarında artış olduğu gözlenmektedir. Orta ve yüksek motor yüklerinde standart modda dizel yakıtı yapılan deneylerde sürekli en düşük CO₂ emisyonu sağlayan yakıttır. JP8 yakıtının daha yüksek karbon içeriği nedeniyle daha yüksek CO₂ emisyonlarına neden olması gerektiği düşünülürken özellikle %50 ve %75 motor yüklerinde içerisindeki JP8 oranı en düşük deney yakıtı olan 10JP8D90'ın en yüksek CO₂ değerlerini göstermesi bu yakıtın PPCI modda kaliteli bir yanma sağladığı ile açıklanabilir (B. Liu et al., 2018).

CO₂ emisyonları, daha yüksek güç taleplerini karşılamak için yakılan daha fazla yakıt miktarını yansıtan tüm yakıt karışımları için motor yüküyle birlikte artar. Yakıt karışımları arasındaki farklar, yanma verimliliğinin karışımlar arasında daha önemli ölçüde değiştiği orta ve yüksek yüklerde daha belirgindir. CO₂ emisyon verileri, yakıt bileşiminin, ön enjeksiyon stratejisinin ve motor yükünün yanma emisyonları üzerindeki kritik etkisini göstermektedir. Dizel sürekli olarak en düşük CO₂ emisyonlarını üretirken, PPCI modda JP8-dizel karışımları ve saf JP8, daha yüksek karbon içerikleri ve yanmanın daha verimli olmasına bağlı olarak daha yüksek CO₂ değerleri sergilemektedir (Singh et al., 2021; Yousefi et al., 2021). Elde edilen bulgular, JP8-dizel karışımlarının PPCI yanma modunda yakıt karışımlarının ve enjeksiyon stratejilerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi ile yanma kalitesini artırmada etkili olacağını göstermektedir. Özellikle %50 ve %75 motor yüklerinde 10JP8D90 yakıtı ve tam yükte 50JP8D50 yakıtı PPCI modda diğer deney yakıtlarından ve standart modda dizel yakıtından daha iyi performans sergileyen yakıtlar olmuştur.

Hidrokarbon (HC) emisyonları, yakıt açısından zengin bölgeler ve kötü hava-yakıt karışımı sonucunda oluşan eksik yanmanın bir göstergesidir. Grafik 4.16 farklı motor yükleri altında farklı JP8-dizel yakıt karışımları ve ön enjeksiyon oranları için HC emisyonlarındaki değişimleri göstermektedir (Lakshminarayanan & Aghav, 2010).

PPCI modda 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtları tüm motor yüklerinde ve tüm ön enjeksiyon oranlarında genel olarak en düşük HC emisyonu üreten yakıtlardır. Bu durum 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtlarının diğer deney yakıtlarına ve standart modda

dizel yakıtına göre daha üstün bir yanma performansına sahip olduğunu göstermektedir. Saf JP8 (100JP8D0) yakıtı ise yüksek HC içeriği, daha düşük setan sayısı ve daha uzun tutuşma gecikmesi nedeniyle tüm ön enjeksiyon oranlarında ve motor yüklerinde en kötü performansı sergileyerek en yüksek HC emisyonlarına neden olmaktadır.



Grafik 4.16 Farklı yakıt karışım oranları için hidrokarbon (HC) emisyonları

%10 ön enjeksiyon oranında %0 motor yükü (yüksüz durumu) hariç diğer tüm motor yüklerinde 30JP8D70 yakıtı ön enjeksiyonun ve JP8'in yanma kalitesini iyileştirmesiyle en düşük HC emisyonlarını sunan yakıt olmuştur. Örneğin standart modda dizel yakıtı ile %25 motor yükünde elde edilen HC emisyon değeri 20 ppm iken, PPCI modda 30JP8D70 yakıtı 14 ppm ile HC emisyonunda %30'luk bir iyileşme sağlamıştır. %10 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 50JP8D50 yakıtı 30JP8D70 yakıtına en yakın HC emisyonu değerlerine sahip olan yakıt iken 100JP8D0 yakıtı en yüksek HC emisyonu değerlerini sunan yakıttır. Örneğin %50 motor yükünde PPCI

modda 30JP8D70 yakıtı 13 ppm, 50JP8D50 yakıtı 18 ppm HC emisyonu salgılarlarken 100JP8D0 yakıtı 29 ppm HC emisyonu salgılamaktadır. Aynı motor yükü için standart modda dizel yakıtı ile ölçülen HC emisyonu değeri ise 24 ppm' dir.

%10 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 100JP8D0 yakıtı tüm yüklerde, daha uzun tutuşma gecikmesi özelliğini yansıtacak şekilde sürekli olarak en yüksek HC emisyonlarını sergilemektedir. %20 ön enjeksiyon oranında da tüm motor yüklerinde en düşük HC emisyonu salınımına sahip yakıtlar 30JP8D70 ve 50JP8D50 deney yakıtlarıdır. PPCI modda orta motor yükünde (%50) 50JP8D50 yakıtı 12 ppm ile en düşük HC emisyonu salınım oranına sahip iken 30JP8D70 yakıtı 13 ppm ile ona en yakın emisyon değerine sahip yakıttır. Aynı motor yükünde standart modda dizel yakıtının HC emisyonu salınımı ise 24 ppm dir.

%20 ön enjeksiyon oranı için %50 motor yükü hariç diğer tüm motor yüklerinde 30JP8D70 en iyi HC emisyon değerlerini sağlayan yakıt olmuştur. %25 motor yükü ve tam yük haricindeki tüm motor yüklerinde standart modda dizel yakıtı en yüksek HC emisyonu değerlerine sahip olan yakıttır. %75 motor yükünde PPCI modda 15 ppm ile 30JP8D70 en düşük HC emisyonu değerine sahip iken standart modda dizel yakıtı ile ölçülen HC emisyonu değeri 33 ppm dir. PPCI modda ön enjeksiyon oranındaki artış kısmi ön karışımdaki gelişme sayesinde yanma verimliliğini artırarak yanmamış HC emisyonunun azalmasını sağlamıştır.

%30 ön enjeksiyon oranında HC emisyonu açısından en iyi performans gösteren yakıt tam yük hariç tüm motor yüklerinde sırasıyla 6 ppm, 7 ppm, 8 ppm ve 19 ppm ile 50JP8D50 yakıtıdır. Düşük (%0, %25) motor yüklerinde 21 ppm ve 22 ppm ile en yüksek HC emisyonu salgılayan yakıt 10JP8D90 yakıtı iken orta ve yüksek (%50, %75, %100) motor yüklerinde ise 26 ppm, 51 ppm ve 90 ppm ile 100JP8D0 yakıtı en yüksek HC emisyon değerlerine sahip olan yakıttır. %30 ön enjeksiyon oranında 30JP8D70 yakıtı HC emisyonu için en iyi performans gösteren ikinci yakıttır. Yakıt içeriğindeki JP8 oranının artması özellikle yüksek ön enjeksiyon oranlarında ve düşük motor yüklerinde HC emisyonunda azalmayı sağlamıştır.

%40 ön enjeksiyon oranında da en düşük HC emisyonu tüm motor yüklerinde PPCI modda 50JP8D50 yakıtı ile elde edilmiştir. Tüm yüklerde en yüksek HC emisyon değerine sahip yakıt 100JP8D0 yakıtıdır. 30JP8D70 yakıtı yine en iyi ikinci değerlere

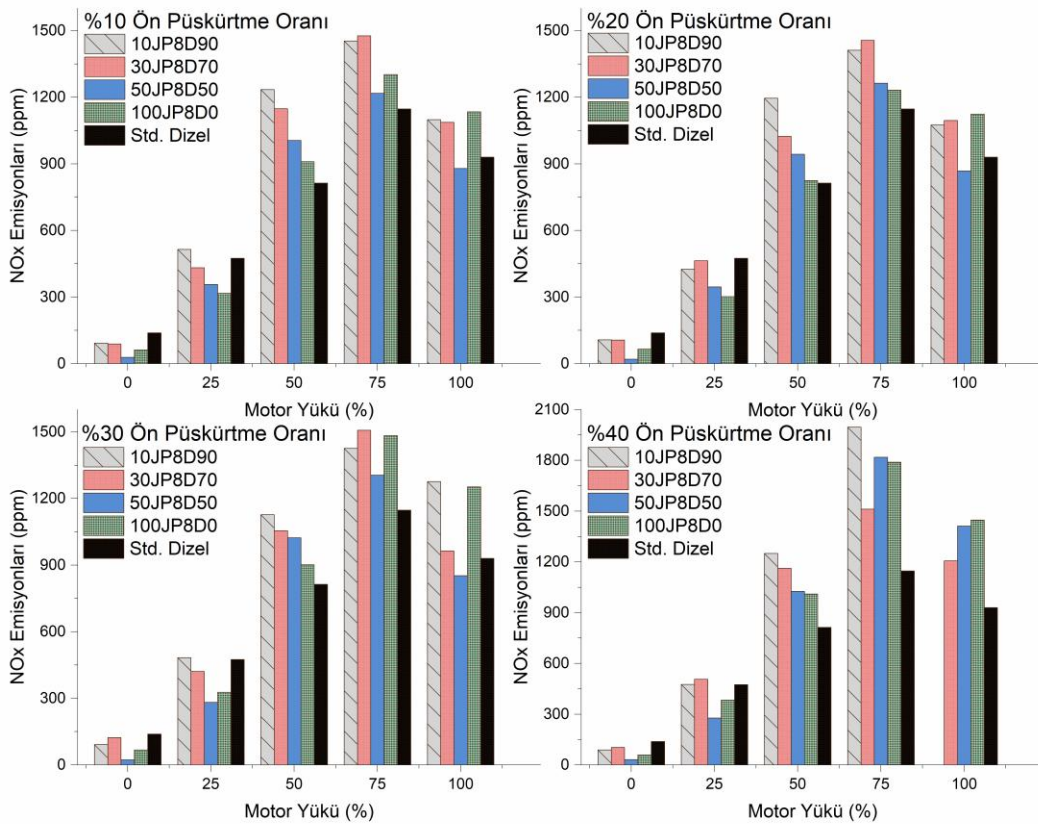
sahip olmasına rağmen %40 ön enjeksiyon oranında diğer ön enjeksiyon oranlarından farklı olarak HC emisyonu verileri 50JP8D50 yakıtının sağladığı değerlerden çok daha yüksektir. Örneğin %50 motor yükünde PPCI modda HC emisyonları 50JP8D50 yakıtı için 9 ppm iken 30JP8D70 yakıtında 24 ppm ve 10JP8D90 yakıtında 25 ppm dir. Aynı motor yükünde standart modda dizel yakıtı ile ölçülen HC emisyonu ise 24 ppm dir.

Standart modda dizel yakıtı tam yükte tüm deney yakıtlarından daha düşük HC emisyonuna sahip yakıttır. Tam yük haricinde ki tüm motor yüklerinde PPCI modda karışım yakıtlar ile (30JP8D70, 50JP8D50) en düşük HC emisyonu değerlerine ulaşılmıştır. Ön enjeksiyon oranındaki artış HC emisyonlarında azalma sağlamaktadır. Ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte gelişmiş ön karışım, hava-yakıt homojenliğini iyileştirerek daha eksiksiz yanmaya ve daha az yanmamış hidrokarbona imkan verir. Saf JP8 (100JP8D0) yakıtı ise düşük setan sayısı ile birlikte uzun tutuşma gecikmesi nedeniyle neredeyse tüm durumlarda en yüksek HC emisyonu salınımına sahip yakıt olmuştur. Elde edilen HC emisyon verileri PPCI motorlarda yanma verimliliğini belirlemede yakıt bileşiminin, ön enjeksiyon stratejisinin ve motor yükünün önemli etkileri olduğunu göstermektedir. 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtları PPCI modda ulaştıkları düşük HC emisyon değerleri ile standart modda dizel yakıtına alternatif olarak değerlendirilebilir. Daha yüksek bir ön enjeksiyon oranı, HC emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur ve yanma verimliliğinin artırılmasında iyileştirilmiş ön karışımın faydalarını gösterir. Elde edilen veriler JP8 ve Dizel yakıtı karışım oranlarının ve enjeksiyon parametrelerinin optimize edilmesi halinde PPCI modda HC emisyonlarında büyük oranlarda iyileşme sağlanacağını göstermektedir (H. Park et al., 2019; Y. Park et al., 2023; Yousefi et al., 2021).

Hem çevre hem de insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturan azot oksit (NO_x) emisyonları, özellikle fazla oksijen varlığında ve yüksek yanma sıcaklıklarında oluşan başlıca zararlı emisyonlardandır. Grafik 4.17 farklı motor yüklerinde (%0, %25, %50, %75, %100), dört farklı ön enjeksiyon oranında deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) ve standart dizel yakıtı ile yapılan deneylerde elde edilen NO_x emisyon değerlerini (ppm cinsinden) göstermektedir.

%10 ön enjeksiyon oranında düşük motor yüklerinde (%0, %25) PPCI modda tüm deney yakıtları için ölçülen NO_x emisyonu değerleri standart modda dizel yakıtı ile

ölçülen NO_x değerinden daha düşüktür. %25 motor yükünde PPCI modda deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) için ölçülen NO_x emisyonu değerleri sırasıyla 515 ppm, 432 ppm, 357 ppm ve 317 ppm iken, standart modda dizel yakıtının NO_x emisyonu 475 ppm dir. JP8 yakıtının ısıl değerinin dizel yakıtının ısıl değerinden düşük olması ve düşük motor yüklerinde silindir içi basınç ve sıcaklıklarının da düşük olması PPCI modda NO_x emisyonu oluşumunun düşük kalmasını sağladığı düşünülebilir.



Grafik 4.17 Farklı yakıt karışım oranları için azot oksit (NO_x) emisyonları

Dizel yakıtının ısıl değerinin JP8 yakıtından daha yüksek olmasına bağlı olarak karışım yakıtlarda içerisinde dizel yakıtı oranı yüksek olanlarda NO_x oluşumunun biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Orta motor yüklerinde ise (%50, %75) artan silindir içi basınç ve sıcaklıklar ile birlikte kısmi ön karıştırmanın da etkisiyle tutuşma

gecikmesinin kısılması NO_x oluşumunu bir miktar artırmıştır. PPCI modda karışım yakıtların içerisindeki JP8 oranı arttığında NO_x oluşumunun azaldığı görülmektedir. Örneğin %50 motor yükü için deney yakıtları ile PPCI modda ölçülen NO_x emisyon değerleri 1235 ppm, 1148 ppm, 1005 ppm ve 910 ppm iken bu motor yükü için en düşük değere sahip olan standart modda dizel yakıtı için NO_x değeri 813 ppm dir. Tam yük kademesinde NO_x emisyonların da orta motor yüklerine göre bir miktar iyileşme meydana gelmiştir. Bu durum tam yükte yanma veriminin iyileşmesi, silindir içerisine alınan yüksek miktardaki karışımın yakıt açısından zengin bölgeler oluşturarak eksik yanmaya sebep olması ve maksimum sıcaklıkların düşmesi ile açıklanabilir. Şekil 5.18 İS emisyonu grafikleri incelendiğinde tam yükte eksik yanma ürünü olarak ortaya çıkan is emisyonunda artış olduğu görülmektedir. Tam yükte en düşük NO_x emisyonuna sahip olan yakıt 879 ppm ile 50JP8D50 yakıtıdır. Standart modda dizel yakıtı ile ölçülen NO_x değeri ise 1134 ppm dir (Ma et al., 2021).

%20 ön enjeksiyon oranında yapılan deneylerde PPCI modda yüksüz durumda 50JP8D50 yakıtı ve %25 motor yükünde 100JP8D0 yakıtı 20 ppm ve 302 ppm ile en düşük NO_x emisyon değerlerini sağlamıştır. Aynı motor yükleri için standart modda dizel yakıtı ile 139 ppm ve 475 ppm lik NO_x ölçümü yapılmıştır. %50 ve %75 motor yüklerinde NO_x emisyonunda %10 ön enjeksiyon oranına göre biraz düşüş ile benzer bir grafik oluşmuştur. Orta motor yükleri için PPCI modda ön enjeksiyon oranındaki artışın etkisiyle açığa çıkan NO_x emisyonunda bir miktar iyileşme olmuş ve standart modda dizel yakıtının sağladığı değere yaklaşmıştır. Gelişmiş ön karışımın yerel sıcaklık artışlarını azaltarak yanma homojenliğini iyileştirdiği ve NO_x oluşumunu düşürdüğü düşünülmektedir. Örneğin %50 motor yükünde PPCI modda 100JP8D0 yakıtı ile 825 ppm NO_x emisyonu ölçülürken aynı motor yükünde standart modda dizel yakıtı ile ölçülen değer 813 ppm dir. Aynı yakıt ve motor yükü için %10 ön enjeksiyon oranında standart modda dizel yakıtının NO_x oranı arasındaki fark 97 ppm iken %20 ön enjeksiyon oranında fark 12 ppm dir. Tam yük durumunda PPCI modda 50JP8D50 yakıtı %20 ön enjeksiyon oranında da 868 ppm ile en düşük NO_x değerine sahip yakıt olmuştur.

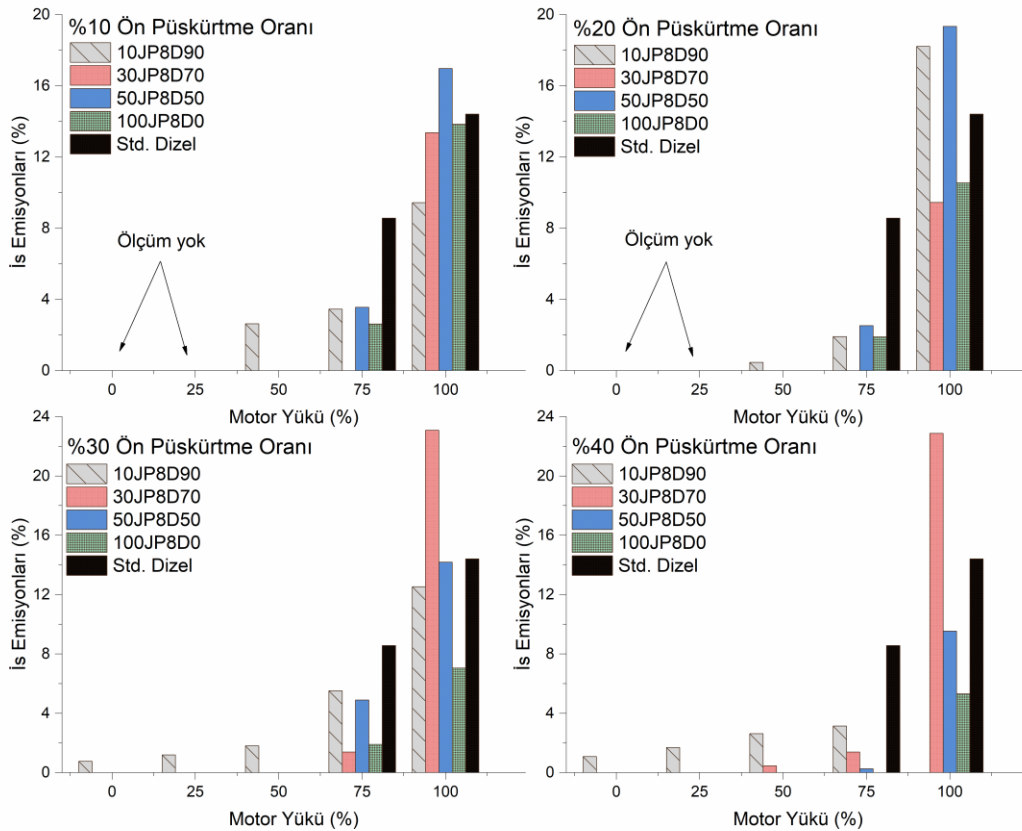
%30 ön enjeksiyon oranında da düşük motor yüklerinde PPCI modda 50JP8D50 yakıtı 23 ppm ve 282 ppm ile en düşük NO_x salınımı yapan deney yakıtıdır. Orta motor yüklerinde 100JP8D0 ve 50JP8D50 yakıtları PPCI modda JP8 ve karışım yakıtlar

arasında en düşük NO_x emisyonuna sahip olmalarına rağmen standart modda dizel yakıtı ile elde edilen NO_x değerlerinden daha yüksek emisyon değerleri sergilemiştir. %50 motor yükünde 100JP8D0 yakıtı 902 ppm, %75 motor yükünde 50JP8D50 yakıtı 1305 ppm NO_x emisyonu salgılamakta aynı motor yüklerinde standart modda dizel yakıtı ise 813 ppm ve 1147 ppm NO_x emisyonu salgılamaktadır. %30 ön enjeksiyon oranı içinde tam yükte en iyi performans gösteren yakıt 852 ppm lik NO_x emisyon ile 50JP8D50 karışım yakıtıdır.

%40 ön enjeksiyon oranında ön karışım miktarının artışı özellikle %75 ve %100 motor yüklerinde JP8 yakıtının yanma hızının dizel yakıtından yüksek olmasının da etkisiyle JP8 oranı yüksek olan yakıtlarda NO_x oluşumunu artırdığı düşünülmektedir. Tam yükte PPCI modda karışım yakıtlar (30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) ile elde edilen NO_x değerleri sırasıyla 1207 ppm, 1412 ppm, 1448 ppm iken standart modda dizel yakıtının NO_x salınımı 930 ppm dir. %0, %25 ve %50 motor yüklerinde ise PPCI modda karışım yakıtlar diğer ön enjeksiyon oranlarına benzer grafikler oluşturmuştur. Yüksüz durumda ve %25 motor yükünde 32 ppm ve 277 ppm ile 50JP8D50 yakıtı en düşük NO_x emisyonuna sahip yakıttır. %50 motor yükünde standart modda dizel yakıtının NO_x salınımıyla PPCI modda karışım deney yakıtları arasından rekabet edebilecek yakıtın 1010 ppm ile 100JP8D0 yakıtı olduğu görülmektedir.

NO_x emisyonlarının standart modda dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında PPCI modda JP8-Dizel karışımları ve saf JP8 yakıtı için genellikle daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin JP8'in dizel yakıtına göre daha düşük setan sayısı ile bağlantılı olan uzun tutuşma gecikmesi ve JP8'in ısıl değeriyle ilişkili olarak oluşan daha düşük tepe yanma sıcaklıkları olduğu düşünülmektedir. NO_x emisyonları tüm yakıt karışımları için motor yüküyle önemli ölçüde artmaktadır. Daha yüksek motor yükleri silindir içi sıcaklıkların ve basınçların yükselmesine neden olarak NO_x'in termal oluşumunu teşvik etmektedir. Yakıt karışımındaki JP8 içeriğinin artırılması gecikmeli ateşleme ve düşük tepe sıcaklıkları nedeniyle NO_x oluşumunu azaltmaktadır. Yakıt karışımları arasındaki farklar JP8'in daha yavaş ateşleme kinetiğinin ve azaltılmış yanma sıcaklıklarının daha büyük bir etkiye sahip olduğu düşük motor yüklerinde daha belirgindir. Ayrıca ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte oluşan gelişmiş ön karışımın bölgesel sıcaklık artışlarını önleyerek daha homojen bir yanma ile NO_x oluşumunu düşürdüğü düşünülmektedir. 50JP8D50 yakıtı alternatif yakıt olarak

özellikle yüksüz durumda, %25 motor yükünde ve tam yükte tüm ön enjeksiyon oranlarında en düşük NO_x emisyonu verilerini sağlayan yakıt olmuştur. Ayrıca %50 ve %75 motor yüklerinde de PPCI modda karışım yakıtlar arasında en düşük emisyon verilerine ulaşarak standart modda dizel yakıtının NO_x verilerine yakın veriler sunan yakıt olmuştur. Elde edilen deney verileri ile tam yükte ve düşük motor yüklerinde PPCI çalışma modu ve JP8 yakıt karışımları ile NO_x emisyonunun azaltılabileceği sonucuna varılabilir. NO_x emisyon verileri yakıt bileşiminin, ön enjeksiyon stratejisinin ve motor yükünün PPCI motorlarda yanma özellikleri üzerinde önemli etkisini vurgulamaktadır. Bu bulgular yanma verimliliğini korurken NO_x emisyonlarını en aza indirmek için yakıt karışımlarını ve enjeksiyon parametrelerini optimize etme ihtiyacını vurgulamaktadır (Fayad et al., 2022; Lee et al., 2015; H. Liu et al., 2016; Pandey et al., 2023).



Grafik 4.18 Farklı yakıt karışım oranları için is emisyonları

Hem çevre hem de insan sağlığı açısından önemli bir sorun olan is emisyonları içten yanmalı motorlarda önemli bir problemdir. İS emisyonları yakıt açısından zengin bölgelerde eksik yanma sonucu oluşan ince karbon parçacıklarıdır ve özellikle dizel motorlarda öne çıkmaktadır. Grafik 4.18’de farklı motor yükleri altında, çeşitli ön enjeksiyon oranlarında deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ile yapılan deneylerde ölçülen is emisyon eğilimleri görülmektedir. Düşük is emisyonları daha verimli yanma ve iyi bir hava-yakıt karışımının göstergesidir (E. et al., 2022; Tree & Svensson, 2007).

Yüksüz durumda ve %25 motor yükünde düşük ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20) is emisyonu hem PPCI modda deney yakıtları için hem de standart modda dizel yakıtı için %0 dır. %0 ve %25 motor yükleri için ön enjeksiyon oranı artırıldığında, %30 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı için is emisyonu sırasıyla %0.77 ve %1.19, % 40 ön enjeksiyon oranı için ise %1.08 ve %1.7 olarak ölçülmüştür. % 50 motor yükünde ise %10, %20, %30 ön enjeksiyon oranlarında yine sadece 10JP8D90 yakıtı ile yapılan deneylerde sırasıyla %2.63, %0.46 ve %1.81 is emisyonuna rastlanırken %40 ön enjeksiyon oranında %2.63 lük 10JP8D90 yakıtı ile ölçülen emisyonuna ek olarak 30JP8D70 yakıtı ile de %0.46’ lık is emisyonu ölçümü yapılmıştır. Dizel-JP8 karışım yakıtlar arasında en yüksek dizel oranına sahip olan 10JP8D90 yakıtı düşük ve orta yüklerde is emisyonu oluşumunda en kötü performans veren yakıttır. Düşük ve orta motor yüklerinde elde edilen veriler bu yüklerde hava-yakıt karışımının daha homojen olduğu ve tam yanma için gerekli oksijen miktarının sağlandığı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca ön enjeksiyon oranının da is emisyonu oluşumunda önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

%75 motor yükünde, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranında PPCI modda 30JP8D70 yakıtı dışındaki tüm deney yakıtları ve standart modda dizel yakıtı is emisyonu oluşturmuştur. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ise %40 ön enjeksiyon oranındaki 100JP8D0 yakıtı hariç tüm yakıtlar için is emisyonu ölçülmüştür. %75 motor yükünde standart modda dizel yakıtı tüm ön enjeksiyon oranlarında %8.57’ lik emisyon değeri ile en yüksek is emisyonu oluşumuna sebep olan yakıttır. Dizel yakıtı JP8’ e göre daha yoğun bir yanma ve daha uzun alev süresi sergilediği için is oluşumu daha

fazla olmaktadır. Aynı motor yükünde en düşük is emisyonu sağlayan yakıtlar ise %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında %0 is emisyonu ve %30 ön enjeksiyon oranında %1.39 is emisyonu değerleri ile 30JP8D70, %40 ön enjeksiyon oranında ise %0 is emisyonu değeri ile 100JP8D0 yakıtıdır.

Tam yük durumunda %10 ve %20 ön enjeksiyon oranında PPCI modda en yüksek is emisyonu oluşturan yakıt %16.97 ve %19.34' lük değerler ile 50JP8D50 yakıtı iken %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ise %23.08 ve %22.87 ile 30JP8D70 yakıtıdır. Yüksek motor yüklerinde daha fazla yakıtın silindirlere gönderilmesiyle hava-yakıt karışımı zenginleşir, ayrıca artan silindir içi basınç ve sıcaklıklarında etkisiyle is oluşumu artar. Tam yükte yüksek ön enjeksiyon oranlarında (%30, %40) en düşük is emisyonu %7.05 ve %5.31' lik değerler ile 100JP8D0 yakıtı ile sağlanmıştır.

JP8 yakıtında alev daha hızlı sönmekte ve is oluşumu daha az olmaktadır. Ayrıca JP8' in düşük setan sayısı nedeniyle tutuşma gecikmesi daha uzun olduğu için daha temiz bir yanma sağlamaktadır. Düşük motor yüklerinde silindire daha az miktarda yakıt enjekte edilmesi ve daha iyi bir hava-yakıt karışımı nedeniyle is emisyonları tüm yakıtlar için en düşük seviyededir. Daha yüksek motor yüklerinde ise tüm yakıt karışımları için is emisyonları önemli ölçüde artar. Yüksek yüklerde enjekte edilen daha yüksek yakıt miktarları is oluşumunu destekleyen yakıt açısından zengin bölgeler oluşturur. Ön enjeksiyon oranının artması is emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Elde edilen is emisyonu verileri, PPCI motorlarda yakıt bileşiminin, ön enjeksiyon stratejisinin ve motor yükünün partikül madde oluşumu üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. İs emisyonu oluşumunu azaltmak için kullanılan yakıtların ve enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonu çok önemlidir (E. et al., 2022; Tree & Svensson, 2007).

4.2. Ön püskürtme oranlarının yanma parametrelerine, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi

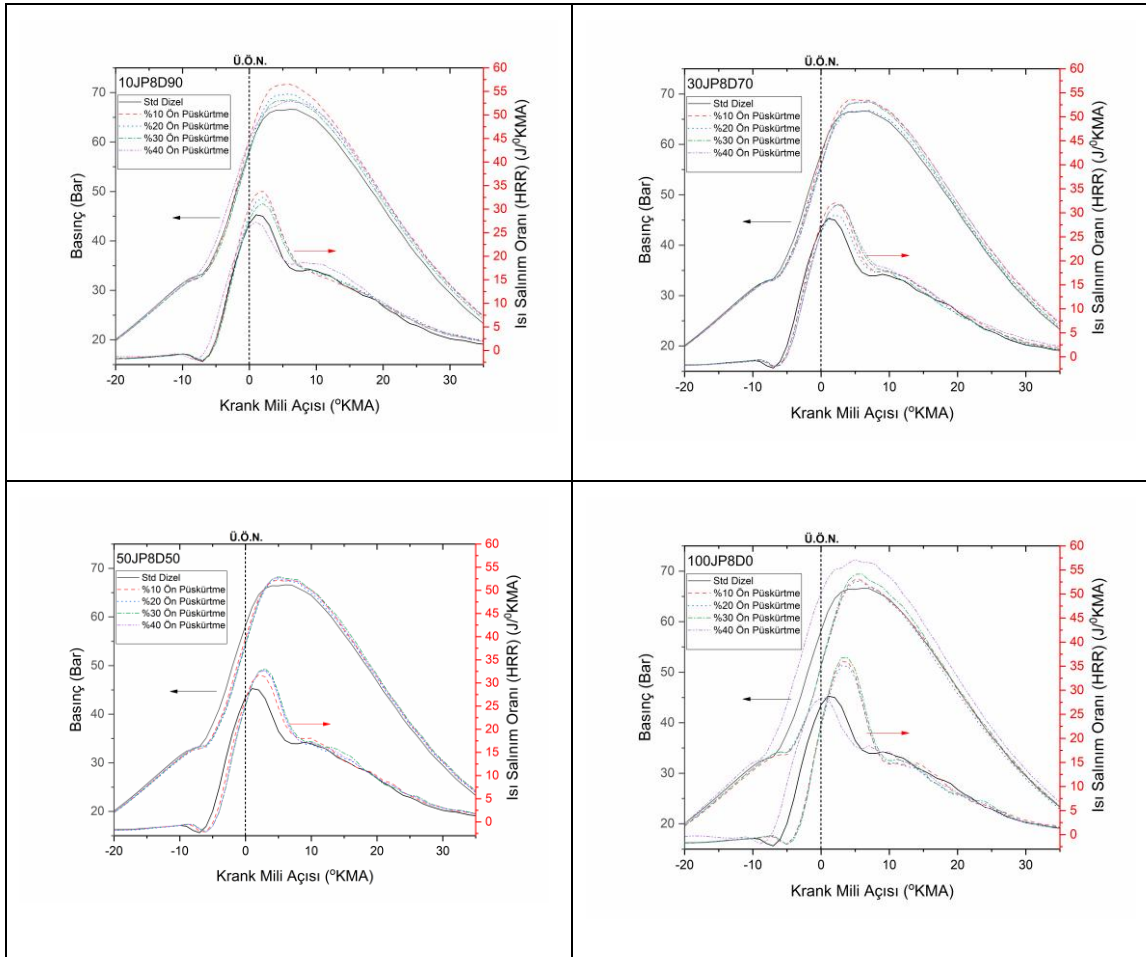
4.2.1. Farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçları ve ısı salınım oranlarının (HRR) değişimi

Bu bölümde PPCI modda çalışan deney motorundan farklı yükler altında (%50, %75 ve %100), %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları için deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) kullanılarak ölçülen silindir içi basınç ve ısı salınım oranı (HRR) değişimlerinin, standart modda dizel yakıtı ile yapılan deneylerde ölçülen silindir içi basınç ve HRR verileri ile karşılaştırıldığı grafikler değerlendirilecektir. Yüksüz durumda ve %25 motor yükünde meydana gelen basınç ve HRR değişimi grafikleri EK-6 ve EK-7’de görülebilir. Bu parametreler, çeşitli ön enjeksiyon stratejileri ve çalışma koşulları altında deney yakıtlarının yanma dinamikleri ve verimliliği hakkında kapsamlı bir görünüm sunmaktadır.

Grafik 4.19’da %50 motor yükünde yapılan deneylerde, her bir deney yakıtı için (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) farklı ön enjeksiyon oranlarında (%10,%20,%30 ve %40) elde edilen veriler ile krank mili açısına ($^{\circ}$ KMA) bağlı olarak çizilen silindir içi basınç ve ısı salınım oranı (HRR) değişiminin grafikleri görülmektedir. %50 motor yükü için tüm deney yakıtlarında ve tüm ön enjeksiyon oranlarında elde edilen pik basınç değerleri, standart modda dizel yakıtı ile elde edilen basınç değerinden daha yüksektir. 30JP8D70 ve 50JP8D50 yakıtında ön enjeksiyon oranlarına bağlı olarak oluşan basınç değerleri arasında küçük farklar varken 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtında ön enjeksiyon oranının basınç grafiğinin oluşumunda etkisi fazlaca hissedilmektedir.

İçerisindeki JP8 oranı düşük olan 10JP8D90 deney yakıtında ön enjeksiyon oranlarına (%10,%20,%30 ve %40) bağlı olarak oluşan pik basınç değerleri sırasıyla 71.72 bar, 69.72 bar, 68.52 bar ve 68.25 bar iken tamamen JP8 yakıtından oluşan 100JP8D0 deney yakıtı ile elde edilen pik basınç değerleri ise 68.19 bar, 67.97 bar, 69.44 bar ve 72.31 bar dır. %50 motor yükü için standart modda dizel yakıt ile ulaşılan pik basınç değeri 66.60 bar olmuştur. Ölçülen bu değerler ön enjeksiyonun yanma olayında etkisinin olduğunu fakat yakıtın yapısının da aynı oranda etkili olduğunu göstermektedir. JP8 oranı düşük olan yakıt ile yapılan ölçümlerde basınç artışında en iyi

performans gösteren ön enjeksiyon oranı %10 ve sırasıyla %20, %30, %40 iken tamamen JP8 den oluşan deney yakıtında en iyi performans gösteren ön enjeksiyon oranı %40 ve sırasıyla %30, %20, %10 olarak sıralanmaktadır. Setan sayısı yüksek olan dolayısıyla yanabilme kabiliyeti iyi olan bir yakıt için çevrimde tüketilecek yakıtın %10'unun ön enjeksiyon ile gönderilmesi yanma performansını artırırken, ön enjeksiyonla gönderilen yakıt oranının artırılmasının yanma kalitesini kötüleştirdiği ve buna bağlı olarak ulaşılan maksimum basınçlarda düşüşe sebep olduğu görülmektedir. JP8 oranı daha yüksek olan deney yakıtlarında ise ön enjeksiyon ile gönderilen yakıt miktarının artırılmasının yanma kalitesini artırdığı ve yüksek ön enjeksiyon oranları ile daha yüksek çevrim basınçlarına ulaşıldığı gözlenmiştir (Wang & Li, 2021).



Grafik 4.19 Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindiri içi basınç ve ısı salınım (HRR) oranları

%50 motor yükü için genel olarak, kullanılan deney yakıtı içindeki JP8 oranının artışı ile birlikte ısı salınım başlangıcının Ü.Ö.N.' yaklaştığı yani grafikte sağ tarafa

kaydığı görülmektedir. Standart modda dizel yakıtı ile yapılan deneylerde ve 10JP8D90 ile 30JP8D70 yakıtlarında ısı salınımı Ü.Ö.N.'dan 5 °KMA önce başlarken 50JP8D50 yakıtında Ü.Ö.N.'dan 4 °KMA önce, 100JP8D0 yakıtında ise Ü.Ö.N.'dan 3 °KMA önce başlamaktadır. Ön enjeksiyon oranı artırıldığında pik ısı salınım değeri düşmekte ve yüksek ön enjeksiyon oranlarında ısı salınım başlangıcı daha erken olmaktadır. Örneğin 10JP8D90 yakıtı ile yapılan deneylerde %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları için ölçülen pik HRR değerleri sırası ile 33.8987 J/°KMA, 32.5099 J/°KMA, 31.2296 J/°KMA ve 27.268 J/°KMA iken standart modda dizel yakıtı ile elde edilen veri ise 28.7899 J/°KMA' dır. Pik HRR değerine %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında Ü.Ö.N.' dan 2 °KMA sonra ulaşılırken %40 ön enjeksiyon oranında 1 °KMA Ü.Ö.N.' dan sonra ulaşılmaktadır.

30JP8D70 ve 50JP8D50 deney yakıtlarında tüm ön enjeksiyon oranları için pik HRR değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Örneğin 50JP8D50 yakıtı için ölçülen maksimum HRR değerleri sırası ile 31.7753 J/°KMA, 32.7941 J/°KMA, 33.0777 J/°KMA ve 32.6326 J/°KMA dır. 100JP8D0 deney yakıtında %40 dışındaki diğer ön enjeksiyon oranlarında maksimum HRR değerlerine Ü.Ö.N.' dan 3 °KMA sonra ulaşılırken %40 ön enjeksiyon oranında maksimum HRR değerine tam Ü.Ö.N.' da ulaşılmakta, standart modda dizel yakıtında ise 1°KMA Ü.Ö.N.' dan sonra ulaşılmaktadır. %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında ısı salınımı 3 °KMA Ü.Ö.N.' dan önce başlarken %40 ön enjeksiyon oranında 7 °KMA Ü.Ö.N.' dan önce, standart modda dizel yakıtında ise 5 °KMA Ü.Ö.N.' dan önce başlamaktadır.

Bu veriler orta motor yükünde (%50) ön enjeksiyon oranının HRR üzerinde deney yakıtındaki JP8 oranına da bağlı olarak kısmen etkili olduğunu göstermektedir. Yüksek ön enjeksiyon oranları (%40) ısı salınımı başlangıcını ve pik HRR değerine ulaşılan noktayı öne çekerken düşük ön enjeksiyon oranları daha yüksek pik HRR değerlerine ulaşmaya imkan vermektedir.

Grafik 4.20'de %75 motor yükünde yapılan deneylerde, her bir deney yakıtının farklı ön enjeksiyon oranlarında elde edilen verileri ile krank mili açısına (°KMA) bağlı olarak çizilen silindir içi basınç ve ısı salınım oranı (HRR) değişiminin grafikleri görülmektedir. Motor yükündeki artış ile birlikte silindir içi basınçların da yükseldiği görülmektedir.

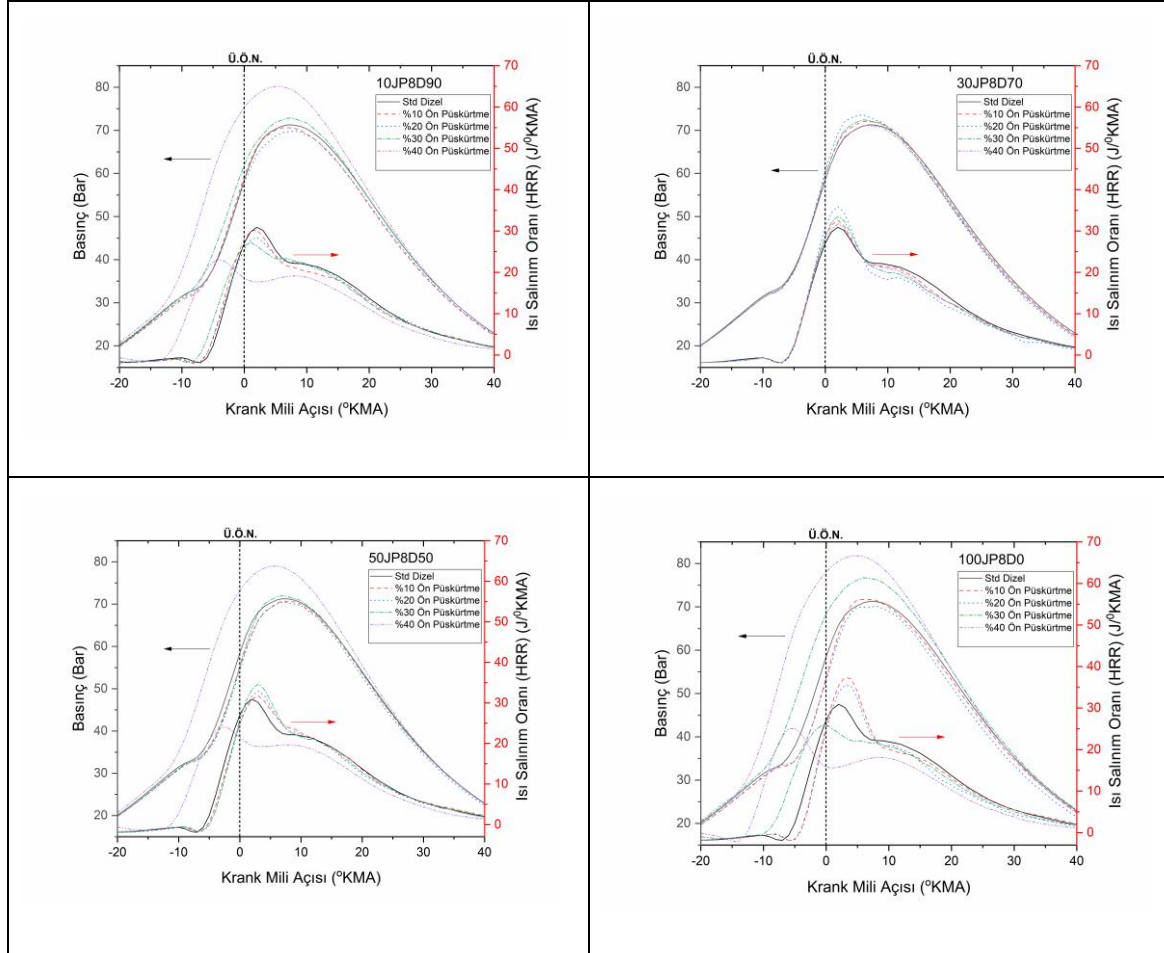
30JP8D70 yakıtında tüm ön enjeksiyon oranlarında elde edilen silindir içi basınç eğrileri bir birlerine ve standart modda dizel yakıtı ile elde edilen basınç eğrisine benzer şekilde gerçekleşmiştir. 30JP8D70 yakıtında ön enjeksiyon oranı değişiminin etkisinin yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Fakat tüm ön enjeksiyon oranlarında pik basınç değerine standart modda dizel yakıtının (7 °KMA Ü.Ö.N.' dan sonra) ulaştığından 1°KMA önce ulaşılmaktadır. 30JP8D70 yakıtında PPCI modda ölçülen pik basınç değerleri %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları için sırasıyla 72.07 bar, 73.63 bar, 72.46 bar ve 71.08 bar iken standart modda dizel yakıtı ile ölçülen pik basınç değeri 71.28 bar' dır.

10JP8D90 ve 50 JP8D70 yakıtları ise silindir içi basınçları açısından yakın değerler göstermiş ve benzer grafikler oluşmasını sağlamıştır. Düşük ön enjeksiyon oranlarında (%10 ve %20) ulaştıkları maksimum basınç dizel yakıtının ulaştığı maksimum basıncın altında kalırken, yüksek ön enjeksiyon oranlarında (%30 ve %40) ise dizel yakıtının üzerinde maksimum basınç değerleri sergilemiştir. Örneğin dizel yakıtının 71.28 bar pik basınç sağladığı durumda 50JP8D50 yakıtının PPCI modda düşük ön enjeksiyon oranlarındaki pik basıncı 70.75 bar ve 70.49 bar iken yüksek ön enjeksiyon oranlarında 72.07 bar ve 78.79 bar' dır. Her iki deney yakıtında da %40 ön enjeksiyon oranında maksimum basınç noktasına dizel yakıtından 2 °KMA daha önce ulaşılmıştır. Ayrıca %40 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtında yaklaşık %13'lük, 50JP8D50 yakıtında ise yaklaşık %11'lik bir maksimum basınç artışı elde edilmiştir. Ön enjeksiyon oranındaki artışın silindirlerde hava-yakıt karışımının oluşumunu iyileştirerek yanma verimliliğinde artış sağladığı düşünülmektedir.

100JP8D0 yakıtı %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında dizel yakıtının basınç eğrisine benzer eğriler oluştururken %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında standart dizel yakıtının pik değerinden çok daha yüksek pik basınç değerlerine dizel yakıtından daha erken (2 °KMA) ulaşmıştır. Yüksek ön enjeksiyon oranlarında emme portuna püskürtülen yakıt miktarındaki artış silindir içerisinde daha kaliteli ve hızlı bir karışım oluşumunu teşvik etmektedir. JP8 (100JP8D0) yakıtının yüksek uçuculuk ile hızlı yanma özelliğinin silindir içi basınç artışında etkili olduğu düşünülmektedir.

Orta motor yüklerinde (%50, %75), silindir içi basıncın daha yüksek ön enjeksiyon oranları ile arttığı görülmektedir. Ön enjeksiyon oranının artırılmasının

silindirde daha iyi hava-yakıt karışımı oluşumunu teşvik ederek yanma verimliliğini artırdığı düşünülmektedir. Bu iyileşmenin port enjektörü aracılığı ile enjekte edildiğinde emme manifoldun da atomizasyon ve buharlaşmayı kolaylaştıran JP8 yakıtının dizel yakıtından daha yüksek olan uçuculuk özelliğine atfedilebilir.



Grafik 4.20 Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları

%75 motor yükünde de kullanılan deney yakıtı içerisindeki JP8 oranının artırılması ısı salınım başlangıcını grafikte sağ tarafa kaydırarak Ü.Ö.N.'ya yaklaştırırken ön enjeksiyon oranındaki artışın ise ısı salınım başlangıcını sol tarafa kaydıracağı görülmektedir. 10JP8D90 yakıtında PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranlarında ısı salınımı başlangıcı standart modda dizel yakıtının ısı salınım başlangıcından (-5 °KMA) önce gerçekleşmektedir. Isı salınımının erken başlamasına bağlı olarak tüm ön enjeksiyon oranlarında HRR pik değerleri dizel yakıtının pik değerinin altında kalmaktadır. %40 ön enjeksiyon oranında ısı salınımının çok erken (-

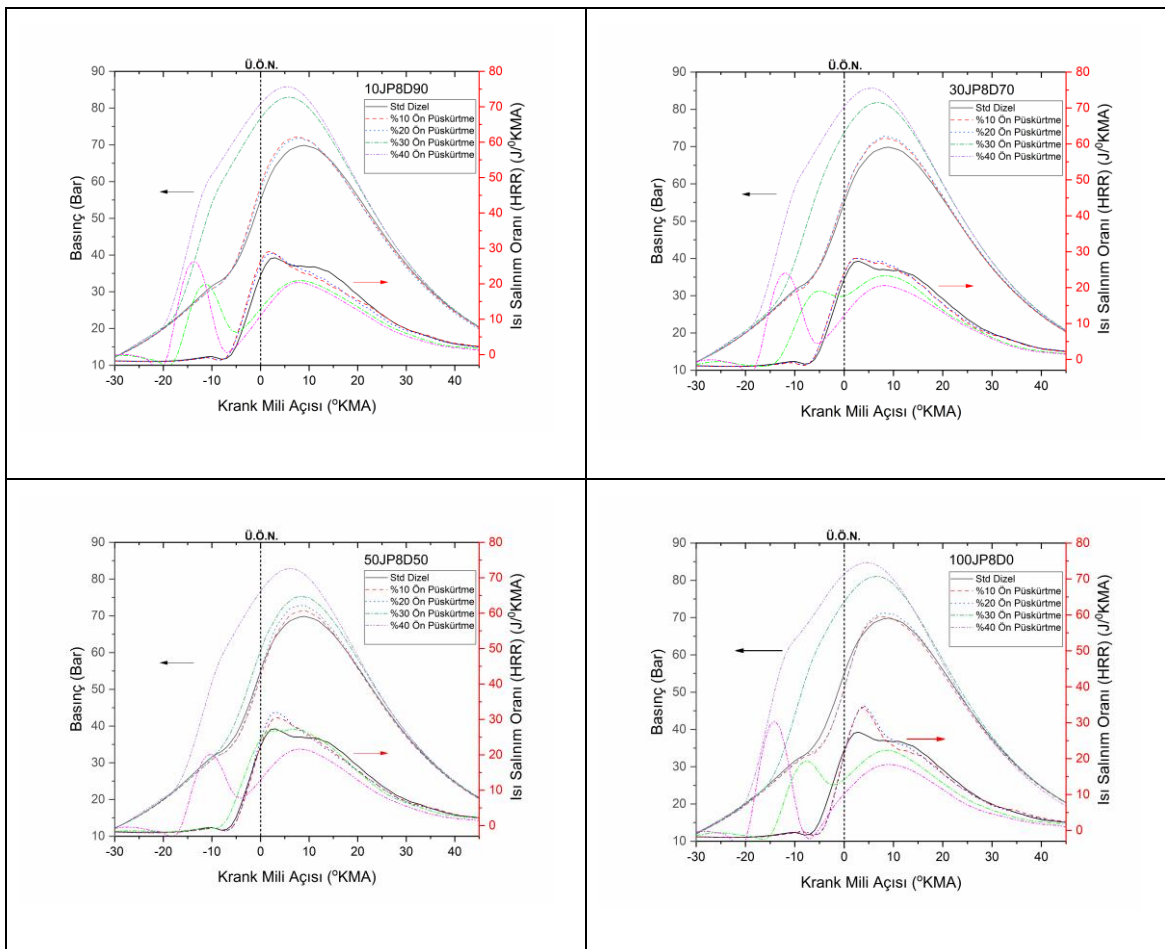
12 °KMA) başlaması, maksimum basıncı Ü.Ö.N.'ya yaklaştırarak dizel yakıtından daha yüksek bir basınç değerine ulaşılmasını sağlarken diğer ön enjeksiyon oranlarında ulaşılan pik basınç değerleri dizel yakıtının pik değerinin altında kalmıştır.

PPCI modda 30JP8D70 yakıtı ise tüm ön enjeksiyon oranlarında ve standart modda dizel yakıtı ile aynı noktada (-5 °KMA) ısı salınımına başlamış ve aynı noktada (2 °KMA) pik HRR değerine ulaşmışlardır. Tüm ön enjeksiyon oranlarında 30JP8D70 yakıtı dizel yakıtından daha yüksek pik HRR sergilemiştir. %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında PPCI modda ulaşılan pik HRR değerleri sırasıyla 32.62 J/°KMA, 35.92 J/°KMA, 33.58 J/°KMA ve 31.76 J/°KMA'dır. Dizel yakıtı ise 30.89 J/°KMA pik HRR değerine ulaşmıştır.

50JP8D50 yakıtında ise karışım içerisindeki setan sayısı dizel yakıtına göre daha düşük olan JP8 oranı artışına bağlı olarak ısı salınımı başlangıcı dizel yakıtından daha geç başlamaktadır. %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında ısı salınımı Ü.Ö.N.'ya daha yakın başlaması ve karışımın daha hazır olması sayesinde dizel yakıtından daha yüksek (31.81 J/°KMA, 32.99 J/°KMA, 34.67 J/°KMA) pik HRR değerlerine ulaşmalarına rağmen maksimum silindir içi basınçları dizel yakıtına yakın yada altında kalmıştır. Bunun nedeninin belirtilen ön enjeksiyon oranlarında pik HRR değerine dizel yakıtının ulaştığından 1 °KMA daha geç ulaşması olduğu düşünülmektedir. %40 ön enjeksiyon oranında porttan gönderilen yüksek miktardaki yakıt daha kısa sürede yanmaya hazır hale gelerek diğer ön enjeksiyon oranlarında daha erken (-11 °KMA) ısı salınımına başlamaktadır. %40 ön enjeksiyon oranı en düşük pik HRR değerine (24.00 J/°KMA) rağmen bu değere Ü.Ö.N.' ya yakın ulaştığı için en yüksek silindir içi basınç değerine ulaşılan ön enjeksiyon oranı olmuştur.

100JP8D0 yakıtında düşük ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20) ısı salınımı başlangıcı dizel yakıtına göre 1°KMA gecikmiş ve -4 °KMA'da ısı salınımı başlamıştır. Aynı ön enjeksiyon oranlarında en yüksek pik HRR değerleri elde edilmiş fakat bu değerlere dizel yakıtından 1 °KMA sonra ulaşılmıştır. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları ise -9 °KMA ve -12 °KMA'larında ısı salınımına başlamıştır. Bu veriler ön enjeksiyon oranının HRR üzerinde deney yakıtındaki JP8 oranına da bağlı olarak kısmen etkili olduğunu göstermektedir. Yüksek ön enjeksiyon oranları ısı salınımı başlangıcını ve pik HRR değerine ulaşılan noktayı öne çekerken düşük ön enjeksiyon

oranları daha yüksek pik HRR değerlerine ulaşmaya imkan sağlamaktadır. Daha yüksek ön enjeksiyon oranlarının yakıt ve havanın homojen bir şekilde karışmasını teşvik ettiği ve bununda daha verimli bir yanma süreci sağladığı düşünülebilir. Daha yüksek ön enjeksiyon ile daha erken ısı salınımı, önceden karıştırılmış yakıt karışımı hızla yandığı için daha iyi yanma başlangıcını ifade etmektedir. HRR profilleri ön enjeksiyon oranı arttıkça, pik HRR'nin daha erken bir krank açısına kaydığını ve yanma zamanlamasında bir ilerleme olduğunu göstermektedir. Bu ilerleme, basıncı Ü.Ö.N.'ya daha yakın bir noktaya çıkararak orta yüklerde termal verimliliği artırmaktadır (Huang et al., 2015).



Grafik 4.21 Motor %100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınım (HRR) oranları

Farklı deney yakıtları ve farklı ön enjeksiyon oranlarında tam yükte yapılan deneylerdeki silindir içi basıncı ve HRR değişimlerini gösteren Grafik 4.21'de farklı ön enjeksiyon oranları arasındaki tepe basıncı değişimleri diğer motor yüklerine göre daha

belirgin olarak görülmektedir. Tam yükte PPCI modda tüm deney yakıtları tüm ön enjeksiyon oranlarında standart modda dizel yakıtı ile ölçülen pik basınç değerinden daha yüksek pik basınç değerlerine ulaşmıştır.

Tüm deney yakıtlarında PPCI modda %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında elde edilen basınç eğrileri standart modda dizel yakıtıyla elde edilen basınç eğrisine benzer şekilde oluşmuştur. JP8-dizel karışımı deney yakıtları pik basınç değerine 8 °KMA Ü.Ö.N'dan sonra ulaşırken dizel yakıtı pik değerine 1°KMA gecikme ile 9 °KMA Ü.Ö.N.'dan sonra ulaşmıştır. Deney yakıtlarının basınç değerleri dizel yakıtının pik değerinden daima yüksek olarak gerçekleşmiştir. %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları için en yüksek basınç değerleri 72.37 bar ve 72.83 bar olarak 30JP8D70 yakıtı ile elde edilmiştir. Standart modda dizel yakıtının pik basınç değeri 69.88 bar' dır.

Yüksek ön enjeksiyon oranlarında (%30, %40), düşük ön enjeksiyon oranlarına ve dizel yakıtı kıyasla belirgin bir pik basınç değeri artışı görülmektedir. %30 ön enjeksiyon oranında deney yakıtları ile ulaşılan pik basınç değerleri 83.02 bar, 81.84 bar, 75.25 bar ve 81.06 bar' dır. %40 ön enjeksiyon oranında ise 85.85 bar, 85.70 bar, 82.88 bar ve 84.74 bar maksimum basınç değerlerine ulaşılmıştır. Maksimum basınç değerlerine %30 ön enjeksiyon oranında 8 °KMA Ü.Ö.N.'dan sonra ulaşılırken, %40 ön enjeksiyon oranında ise 6 °KMA Ü.Ö.N.'dan sonra ulaşılmış ve pik basınç noktası Ü.Ö.N.'ya 2 °KMA daha yaklaşmıştır. Değerler PPCI modda yüksek ön enjeksiyon oranları kullanıldığında JP8 yakıtının yüksek yüklerde standart modda dizel yakıtına daha yakın yanma özellikleri sağlayabileceğini göstermektedir. Fakat basınç artışının dizel yakıtı göre JP8 yakıtının yanma hızından dolayı daha hızlı ve daha keskin gerçekleşmesi potansiyel olarak dizel yakıtına göre daha yoğun bir yanma olayını göstermektedir.

PPCI modda JP8 yakıtı ve JP8-dizel karışımları yüksek motor yüklerinde standart modda dizel yakıtına benzer veya daha yüksek pik basınç değerlerine ulaşabilmesine rağmen, yanmanın daha kısa bir zaman diliminde gerçekleşebileceğini ve bunun da termal verimliliği ve emisyonları etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Tam yükte PPCI modda yapılan deneylerde ön enjeksiyon oranları arasındaki HRR farkları da belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca daha yüksek ön enjeksiyon oranları, özellikle %30 ve %40, çift pik ısı salınımı profili sergilemektedir. İlk tepe

noktası port enjeksiyonu nedeniyle oluşan önceden karıştırılmış yakıtın hızlı yanmasına karşılık gelirken, ikinci tepe noktası doğrudan enjeksiyonla başlatılan ana yanma fazını temsil eder.

%10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında yakıt karışımındaki JP8 oranının etkisi ile 10JP8D90 ve 30JP8D50 yakıtı dizel yakıtından 1°KMA daha önce (-6 °KMA) ısı salınımına başlarken 50JP8D50 yakıtı dizel yakıtıyla aynı noktada (-5 °KMA), 100JP8D0 yakıtı ise 1°KMA daha sonra (-4 °KMA) ısı salınımına başlamaktadır. Deney yakıtlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) pik HRR değerleri ise sırasıyla %10 ön enjeksiyon oranında 29.21 J/°KMA, 28.27 J/°KMA, 30.60 J/°KMA ve 34.35 J/°KMA iken %20 ön enjeksiyon oranında 28.70 J/°KMA, 28.13 J/°KMA, 32.20 J/°KMA ve 34.82 J/°KMA'dır. PPCI modda 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtı ile pik HRR değerine standart modda dizel yakıtının ulaştığından 1°KMA daha erken (2 °KMA), 50JP8D50 yakıtı dizel yakıtı ile aynı noktada (3 °KMA), 100JP8D0 yakıtı ise 1°KMA daha sonra (4 °KMA) ulaşmaktadır.

Tam yükte %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında çift pik HRR grafiği gözlenmektedir. Özellikle %40 ön enjeksiyon oranında porttan gönderilen ön karışımın yaklaşık olarak tüm deney yakıtlarında -19 °KMA yakınlarında ısı salınımına başlaması -14 °KMA ve -12 °KMA aralığında ilk pik HRR oluşumuna sebep olmaktadır. İkinci pik HRR değeri ise tüm deney yakıtlarında ana enjeksiyondan gönderilen yakıtın da yanması ile 8 °KMA' da meydana gelmektedir. Çift pik HRR oluşumu yüksek ön enjeksiyon oranlarında kademeli bir yanma süreci yaşandığını göstermektedir. Kademeli yanma nedeniyle özellikle ikinci pik HRR değerleri dizel yakıtının pik değerinden daha düşüktür. Ü.Ö.N.'ya gelmeden önce keskin bir yükseliş ile oluşan ilk pik HRR sebebiyle basınç eğrisinde hızlı ve dik bir artış gözlenmektedir. Ayrıca kademeli yanma oluşumu sayesinde %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında yüksek maksimum basınç noktalarına ulaşılmaktadır.

%30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında oluşan HRR ve silindir içi basınç grafikleri motor güç çıkışını artırabilecek bir yanmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat bu durum aynı zamanda artan basınç artış oranı nedeniyle yüksek mekanik gerilme riskinide oluşturmaktadır.

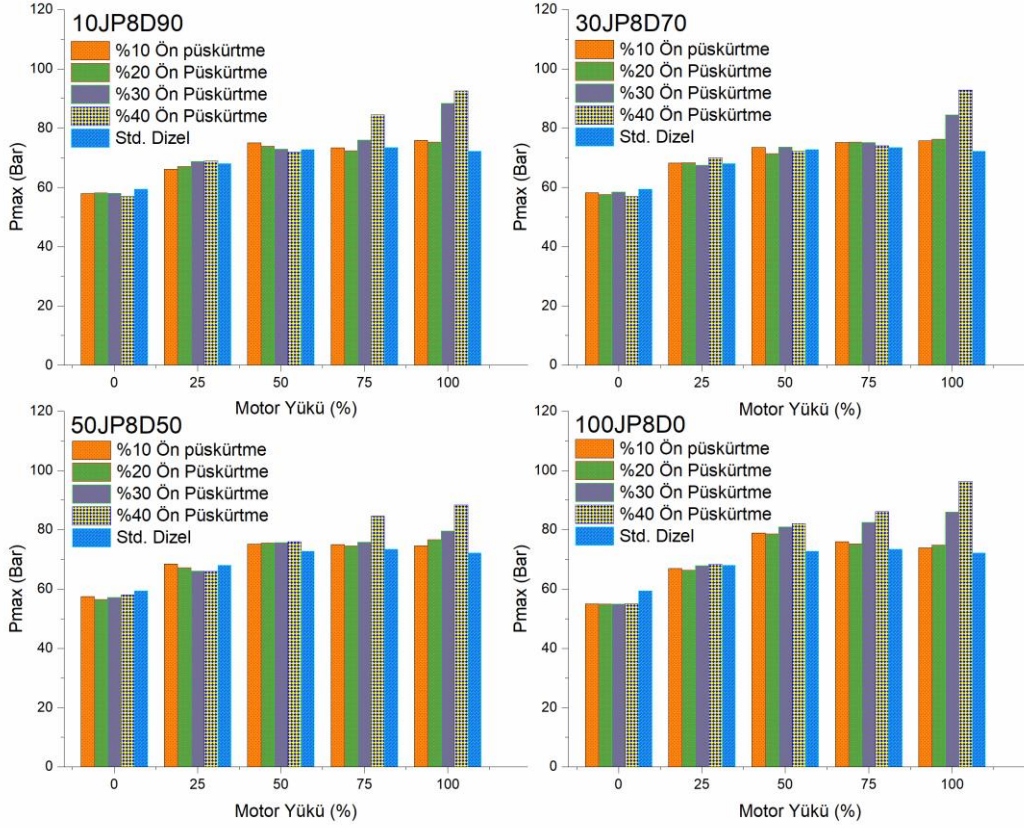
4.2.2. Farklı ön püskürtme oranları için silindirde oluşan maksimum basıncın değişimi

Grafik 4.22’de deney yakıtları için farklı motor yükleri, ön enjeksiyon oranları ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen Maksimum Basınç (P_{max}) değerlerini göstermektedir. P_{max} , yanma sürecinde yanma odasında ulaşılan en yüksek basıncı ifade eder ve bar cinsinden ölçülür. Daha yüksek P_{max} değerleri, daha yoğun bir yanma sürecini gösterebilir ve bu da motorun güç çıkışını artırabilir. Ancak, aşırı yüksek basınçlar motor bileşenleri üzerinde daha fazla mekanik stres oluşturabilir ve dayanıklılık üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Wang & Li, 2021).

Düşük motor yüklerinde (%0, %25), PPCI modda %0 yük için tüm ön enjeksiyon oranları standart modda elde edilen değerlere yakın fakat daha düşük P_{max} değerleri sağlamaktadır. Bu durum, PPCI modunun rölantide daha yumuşak bir yanma süreci sağlayarak motor stresini ve gürültüsünü azaltabileceğini göstermektedir. %25 yük için ise %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları deney yakıtlarının biri hariç diğerlerinde standart modda dizel yakıtından elde edilen P_{max} değerinden daha yüksek maksimum basınç değerleri vermiştir.

%25 motor yükünde %40 ön enjeksiyon oranı için deney yakıtları ile elde edilen P_{max} değerleri sırası ile 68.897 bar, 70.077 bar, 65.919 bar ve 68,288 Bar iken standart modda dizel yakıtı ile elde edilen P_{max} değeri 68.013 bar’ dır. Bu yük seviyesinde, %40 ön enjeksiyon oranı dışındaki ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre biraz daha düşük P_{max} değerleri göstermektedir. %40 oranı, dizel yakıtı ile oldukça yakın değerlere sahiptir ve benzer bir yanma yoğunluğu sağlamaktadır.

%50 motor yükünde, 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtları için en yüksek P_{max} değerleri %10 ön enjeksiyon oranında sırasıyla 75.03 bar ve 73.49 bar olarak ölçülmüştür. 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları için ise %40 ön enjeksiyon oranında 75.97 bar ve 82.17 bar olarak ölçülmüştür. %50 yükte standart modda dizel yakıtı için ölçülen P_{max} değeri 72.76 bar’ dır. Bu sonuçlar, tüm ön enjeksiyon oranlarının dizel yakıtı göre daha yüksek P_{max} değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları en yüksek basınca ulaşarak daha yoğun bir yanma süreci yaratmaktadır.



Grafik 4.22 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak ön püskürtme oranının etkisi ile oluşan maksimum basınçlar (P_{max})

%75 motor yükü seviyesinde, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek P_{max} değerleri sunmaktadır. %40 ön enjeksiyon oranı ile P_{max} değeri deney yakıtlarında 84.51 bar, 74.10 bar, 84.63 bar ve 86,16 bar değerleri ile en yüksek basınç değerlerine ulaşmaktadır. Standart modda dizel yakıtının P_{max} değeri ise 73.524 bar' dır.

Tam yükte (%100 motor yükü), PPCI modda %10 ön enjeksiyon oranı (75.89 bar, 75.67 bar, 74.67 bar ve 73.89 bar) ve %20 ön enjeksiyon oranı (75.30 bar, 76.31 bar, 76.64 bar, 74.88 bar) standart modda dizel yakıtının sağladığı P_{max} değerine (72.20 bar) yakın değerler veririrken, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları daha yüksek değerler sağlamaktadır. Özellikle %40 ön enjeksiyon oranı tam yük için deney yakıtlarında (92.59 bar, 92.80 bar, 88.35 bar ve 96.32 bar) en yüksek P_{max} değerlerini vermektedir.

Bu sonuçlara göre, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtta göre daha yüksek P_{max} değerlerine ulaşmakta olup, %40 ön enjeksiyon oranı 96.32194 bar ile çok yüksek bir değere ulaşmaktadır. Bu kadar yüksek bir basınç, tam yükte motor performansını artırabilir; ancak aşırı mekanik gerilmeler yaratabileceği için motor dayanıklılığı açısından risk oluşturabilir.

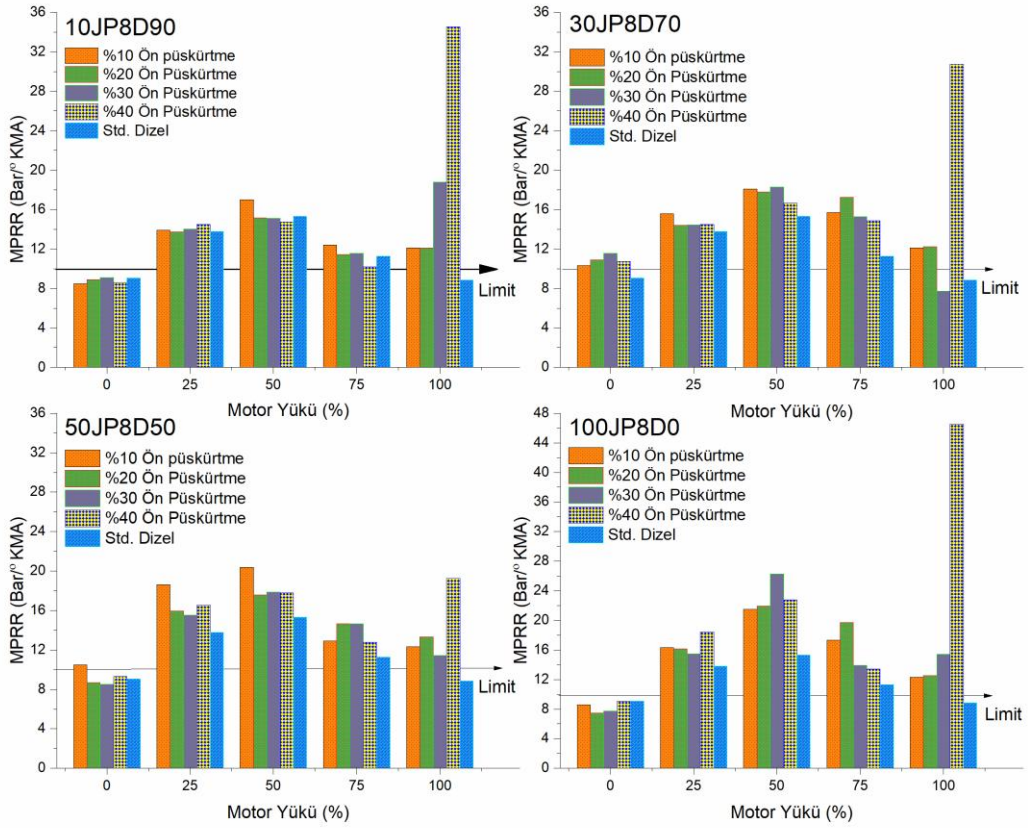
P_{max} değerleri, farklı motor yüklerinde ön enjeksiyon oranlarının yanma yoğunluğu ve motor stresi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Düşük yüklerde (%0 ve %25), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtta göre daha düşük veya yakın P_{max} değerleri sergileyerek yanma hızını sınırlamakta ve motor üzerindeki stresi azaltmaktadır. Ancak, %50 ve üzeri yüklerde, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtta göre daha yüksek P_{max} değerleri sunarak daha yoğun bir yanma süreci yaratmaktadır. Özellikle %40 ön enjeksiyon oranı, %50, %75 ve %100 yük seviyelerinde en yüksek basınç değerlerine ulaşarak motor performansını artırsa da dayanıklılık açısından endişeler yaratmaktadır. Orta yükte (%50), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtta göre daha yüksek P_{max} değerleri göstermekte ve özellikle %40 ön enjeksiyon oranı en yüksek basıncı sağlamaktadır. Bu durum güç çıktısını artırabilir; ancak motor bileşenleri üzerinde artan mekanik stres nedeniyle dayanıklılığa olumsuz etki yapabilir.

Yüksek yüklerde (%75 ve %100), tüm ön enjeksiyon oranları daha yüksek P_{max} değerleri göstermekte olup, %40 oranı en yüksek değere (96.322 bar) ulaşmaktadır. Bu, yanma yoğunluğunu artırarak motor performansını olumlu yönde etkileyebilir; ancak yüksek basınçlar daha fazla mekanik stres yaratıp motor dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir.

Genel olarak, yüksek ön enjeksiyon oranları (%30 ve %40), özellikle orta ve yüksek yüklerde (%50 ve üzeri) daha yüksek P_{max} değerlerine ulaşarak yanma yoğunluğunu artırmaktadır. Düşük ön enjeksiyon oranları (%10 ve %20) ise daha dengeli P_{max} değerleri sunmaktadır, ancak yüksek yüklerde bu oranlar bile dizel yakıtta göre daha yüksek basınçlar oluşturmaktadır. Bu bulgular, ön enjeksiyonun yanma hızını artırarak motor performansına katkı sağlayabileceğini, ancak yüksek yüklerde motor üzerinde aşırı stres yaratabileceğini göstermektedir (Chen, 2016).

4.2.3. Farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınç artış hızının (MPRR) değişimi

Grafik 4.23'te PPCI modda farklı motor yükleri, ön enjeksiyon oranları ve standart modda dizel yakıtı için Maksimum Basınç Artış Hızı (MPRR) değerlerini göstermektedir. MPRR, yanma sürecinde yanma odasındaki basıncın ne kadar hızlı arttığını gösterir ve bar/°KMA cinsinden ölçülür. Yüksek MPRR değerleri, daha agresif bir yanma sürecini gösterir; bu da motor gürültüsünü ve mekanik stresi artırabilir ve motor dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir (Stoffels, 2008).



Grafik 4.23 Maksimum tork devrinde (1800 d/d) motor yüküne bağlı olarak ön püskürtme oranının etkisi ile oluşan basınç artış oranı (MPRR)

Yüksüz durumda, 30JP8D70 yakıtı hariç tüm deney yakıtlarında, bazı ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı ile elde edilen maksimum basınç artış

oranı (MPRR)'den daha yüksek değerler gösterse de vuruñtu sınır değerinin altında kalmıştır. Veriler incelendiğinde uygun ön enjeksiyon oranı seğilmesi ile rölantide daha yumuşak bir yanma süreci ile birlikte motor gürültüsünün ve mekanik stresin azaltılabileceği görülmektedir. Örneğin %20 ön enjeksiyon oranında deney yakıtları için elde edilen MPRR değerleri 8.89 bar/°KMA, 10.89 bar/°KMA, 8.70 bar/°KMA, 7.45 bar/°KMA, iken standart modda dizel yakıtı için elde edilen değer 9.07 bar/°KMA dır. Yüksüz çalışma durumunda %20 ön enjeksiyon oranı seğilerek daha yumuşak bir yanma süreci ile rölanti çalışması esnasında daha az mekanik stres ve daha düşük motor gürültüsü değerlerine ulaşılabilir.

%25 motor yükünde, tüm ön enjeksiyon oranları birbirlerine yakın fakat standart modda dizel yakıtından elde edilen MPRR değerinden daha yüksek değerler göstermektedir. Örneğin 30JP8D70 deney yakıtı için MPRR değerleri ön enjeksiyon oranlarına göre (%10, %20, %30, %40) sırasıyla 15.58 bar/°KMA, 14.40 bar/°KMA, 14.45 bar/°KMA ve 14.49 bar/°KMA iken standart veri 13.80 bar/°KMA dır. Standart veride dahil olmak üzere tüm MPRR değerleri vuruñtu sınırının üzerinde geręekleřmiřtir. %30 ön enjeksiyon oranı standart veriye en yakın değerleri sağlamasına rağmen standart veriye en yakın olduğu 100JP8D0 yakıtında dahi 1.67 bar/°KMA lık bir fark oluşmaktadır. Yakıtı bağlı olarak özellikle %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları, en yüksek basınç artış hızını göstererek düşük yükte daha agresif bir yanma sürecine işaret etmektedir; bu da mekanik stresi ve motorun gürültüsünü artırabilir.

%50 motor yükünde, tüm enjeksiyon oranları için birkaç istisna hariç bir birine yakın değerler görülmüştür (iki yakıt için %10, bir yakıt için %30 ön enjeksiyon oranı). Deney yakıtı içerisinde JP8 oranının artışı standart veri ile deney yakıtlarının oluşturduğu MPRR değerlerinin arasındaki farkı da artırmıştır. Vuruñtu limiti sınırında en fazla sapmanın yaşandığı yük %50 motor yükü olmuştur.

%75 motor yükünde, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek MPRR değerleri sunarak daha agresif bir yanma sürecini göstermektedir. Ancak %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları, dizel yakıtına daha yakın MPRR değerlerine sahip olup %10 ve %20 ön enjeksiyon oranına göre daha yumuşak bir yanma süreci sağlamakta ve motor stresini azaltıcı bir etki yaratmaktadır. 100JP8D0 yakıtı için ön enjeksiyon oranlarına göre (%10, %20, %30 ve %40) MPRR değerleri sırasıyla 17.30

bar/°KMA, 19.73 bar/°KMA, 13.93 bar/°KMA ve 13.45 bar/°KMA iken standart modda dizel yakıtı ile elde edilen MPRR değeri 11.30 bar/°KMA olarak ölçülmüştür.

Tam yükte (%100 motor yükü), %40 ön enjeksiyon oranı hariç diğer ön enjeksiyon oranlarında MPRR değerleri limit çizgisine orta motor yüklerine göre daha yakın değerde olduğu görülmektedir. Fakat %40 ön enjeksiyon oranı için ölçülen MPRR değerleri aşırı yüksek değerlerdedir. %40 ön enjeksiyon oranı için dört farklı deney yakıtı ile elde edilen değerler 34.53 bar/°KMA, 30.73 bar/°KMA, 19.25 bar/°KMA ve 46.52 bar/°KMA iken standart modda elde edilen değer 8.87 bar/°KMA'dır. Bu kadar yüksek bir basınç artış hızı, tam yükte motor üzerinde aşırı mekanik stres yaratabilir ve motor dayanıklılığı açısından risk oluşturabilir (Stoffels, 2008).

MPRR değerleri, farklı motor yüklerinde ön enjeksiyon oranlarının yanma yoğunluğu üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Düşük yüklerde (%0 ve %25), özellikle rölantide %20 ve %30 ön enjeksiyon oranları daha düşük MPRR değerleri sunarak motor gürültüsünü ve stresini azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak %25 yük seviyesinde tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek MPRR değerleri sergilemekte ve yakıtı bağılı olarak %10 ile %40 oranı en yüksek değerlere ulaşarak daha yoğun bir yanma süreci yaratmaktadır.

Orta yükte (%50), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek MPRR değerleri göstermektedir. Özellikle %10 ve %30 oranları en yüksek basınç artış hızını sergileyerek daha agresif bir yanma süreci yaratır. Bu durum, artan mekanik stres nedeniyle motor dayanıklılığı üzerinde olumsuz bir etki yaratabilir. Yüksek yükte (%75), %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtın MPRR değerine göre oldukça yüksek MPRR değerleri sunmakta ve daha yoğun bir yanma sürecini işaret etmektedir.

Tam yükte (%100), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek MPRR değerleri göstermektedir ve %40 oranı 46.518 bar/°KMA gibi çok yüksek bir değere ulaşarak oldukça yoğun bir yanma süreci yaratmaktadır. Bu kadar yüksek bir basınç artış hızı, tam yükte motor dayanıklılığı açısından ciddi riskler oluşturabilir.

Genel olarak, yüksek ön enjeksiyon oranları (%30 ve %40) özellikle orta ve tam yüklerde (%50 ve %100), düşük ön enjeksiyon oranları (%10 ve %20) ise düşük motor yüklerinde daha yüksek MPRR değerlerine ulaşarak daha agresif bir yanma süreci

yaratmaktadır. Bu durum, performansı artırabilse de motor üzerinde mekanik stres oluşturabilir ve dayanıklılığı olumsuz etkileyebilir. Bu bulgular, ön enjeksiyonun yanma yoğunluğunu artırabileceğini ancak yüksek yüklerde motor üzerinde stres yaratabileceğini göstermektedir (Stoffels, 2008).

4.2.4. Farklı ön püskürtme oranları için motor yüküne bağlı olarak kümülatif ısı salınımının değişimi

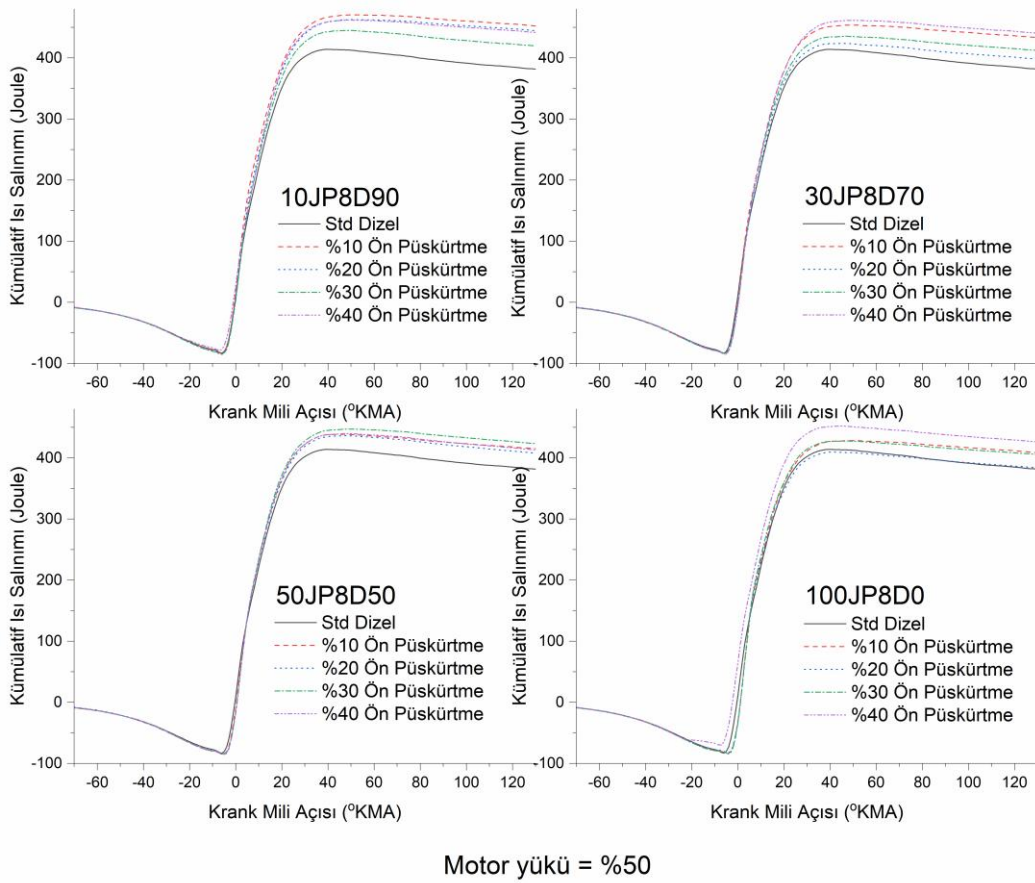
Bu başlık altında farklı ön enjeksiyon oranları ve motor yükleri için Kümülatif Isı Salınımı (CHR) profilleri yorumlanmıştır. CHR, yanma süreci boyunca açığa çıkan toplam ısı miktarının zamana bağlı birikimli olarak hesaplanmasıdır. Motorlarda CHR, silindir içi basınç verileri ve özgül ısı oranı varsayımları kullanılarak hesaplanır. Bu parametre, yakıt enerjisinin ne kadarının etkili bir şekilde işe dönüştürüldüğünü ve enerjinin çevrimin hangi aşamasında salındığını anlamaya yardımcı olur (Olanrewaju et al., 2022).

Düşük motor yüklerinde (%0, %25) PPCI modda farklı ön enjeksiyon oranları kullanılarak deney yakıtları ile elde edilen CHR eğrilerinin tamamı standart modda dizel yakıtı ile elde edilen CHR eğrisinin altında kalmaktadır. Yüksüz durum ve %25 motor yükünde oluşan CHR grafikleri EK8 ve EK-9 da verilmiştir. Deney yakıtlarının oluşturduğu CHR eğrilerinin eğiminin dizel yakıtının eğrisinden daha fazla olması düşük yüklerde PPCI modda yanma reaksiyonunun daha yavaş olduğunu göstermektedir.

Grafik 4.24 %50 motor yükünde PPCI modda tüm deney yakıtlarının tüm ön enjeksiyon oranlarında standart modda dizel yakıtının CHR eğrisinden daha dik bir grafik oluşturarak yanma reaksiyon hızının dizel yakıtından daha yüksek olduğunu göstermekte ayrıca toplam ısı salınımının da dizel yakıtından yüksek değerde olması düşük motor yüklerine göre daha kaliteli ve eksiksiz bir yanma olduğunu göstermektedir. Daha yüksek JP8 oranına sahip JP8-dizel karışımı deney yakıtlarında ön enjeksiyon oranının yükseltilmesi ile birlikte yanma reaksiyonunun daha erken bir aşamasında CHR' de dik bir artış meydana gelmektedir. Bu durum ön enjeksiyonun yakıt/hava karışımını iyileştirdiğini ve daha hızlı bir yanma süreci başlattığını göstermektedir. CHR' de ki hızlı artış yakıt enerjisinin daha fazlasının Ü.Ö.N.' ya yakın

bir yerde salındığını ve daha yüksek termal verimliliğe imkan sağladığını gösterir (Dave et al., 2025; Huang et al., 2015).

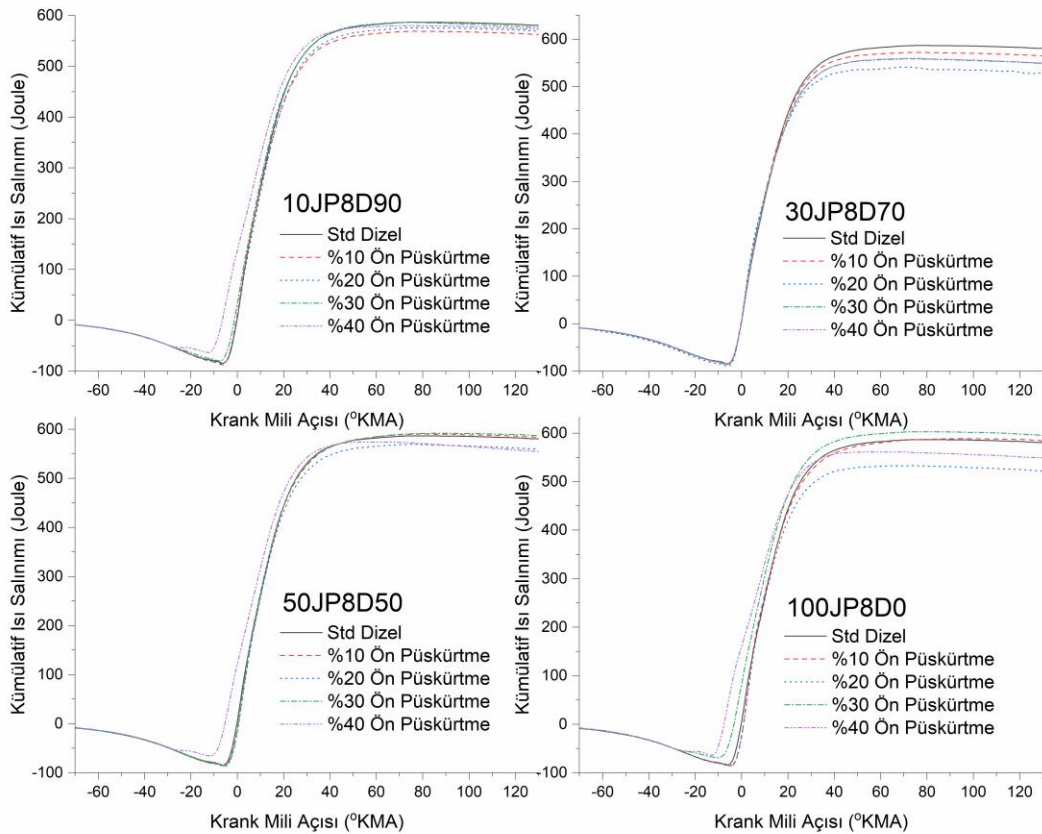
Orta motor yüklerinde yüksek ön enjeksiyon oranlarında yanma sürecinde meydana gelen iyileşme yakıtın enerji içeriğinin daha verimli kullanılmasını ve termal verimliliğin kritik olduğu orta motor yüklerinde termal verimde iyileşme sağlar. Ancak bu aynı zamanda yanma olayının daha yoğun olduğu anlamına gelir ve artan pik basınç değerleri sebebiyle motorda mekanik gerilmelere neden olabilir.



Grafik 4.24 Motor %50 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

Grafik 4.25'te görüldüğü gibi %75 motor yükünde deney yakıtlarının farklı ön enjeksiyon oranlarında çizilen CHR eğrileri dizel yakıtının CHR eğrisine benzer ve yakın değerlerde olmuştur. Motor yükü ile birlikte enjekte edilen yakıt miktarındaki

artış ve silindir içerisinde değişen şartlar %50 motor yüküne oranla PPCI modda yanma kalitesinde bir miktar gerileme olduğu şeklinde yorumlanabilir. Fakat %75 motor yükünde deney yakıtlarının ve dizel yakıtının sağladığı grafiklerdeki bu benzerlik farklı ön enjeksiyon oranlarında JP8-dizel karışımı deney yakıtlarının yakıt/hava karışım kalitesinin ve yanma verimliliğinin dizel yakıtına yakın gerçekleştiğini gösterir. Ayrıca emme portuna püskürtülen yakıt miktarının artışına bağlı olarak özellikle %40 ön enjeksiyon oranında HRR grafiklerinde de görülen çift pik durumunun oluşumunu sağlayan, diğer ön enjeksiyon oranlarından çok daha erken (100JP8D0 yakıtında 4 °KMA) enerji salınımı başladığı görülmektedir. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları tüm deney yakıtlarında dizel yakıtına en yakın CHR eğrilerini oluşturan oranlar olmuştur.

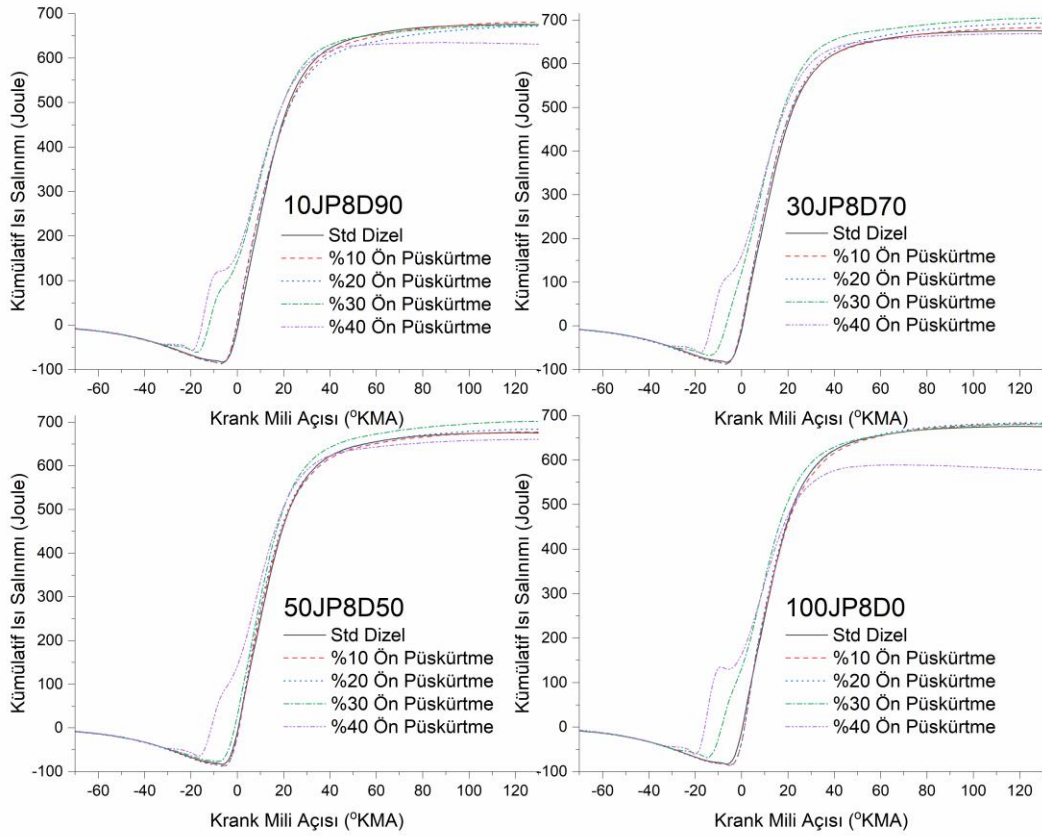


Motor yükü = %75

Grafik 4.25 Motor %75 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

Grafik 4.26’da görüldüğü gibi tam yükte 100JP8D0 yakıtının %40 ön enjeksiyon oranı hariç tüm deney yakıtları tüm ön enjeksiyon oranlarında dizel yakıtına benzer eğimde ve toplam enerji salınımına sahip grafikler oluşturmuştur.

Bu durum tam yükte ön enjeksiyon oranı değişiminin reaksiyon hızında ve yanma kalitesinde bir değişim meydana getirmediği şeklinde yorumlanabilir. Tam yükte ön enjeksiyon oranındaki değişimin sadece enerji açığa çıkışını %30 ön enjeksiyon oranında yaklaşık 5 °KMA, %40 ön enjeksiyon oranında ise yaklaşık 10 °KMA öne çektiği görülmektedir.



Motor yükü = %100

Grafik 4.26 Motor %100 (tam) yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı

Özellikle orta motor yüklerinde PPCI modda ön enjeksiyon oranındaki artış yanma reaksiyon hızını ve yakıt/hava karışım kalitesini iyileştirerek toplam ısı

salınımında dizel yakıtına göre daha iyi bir performans sergilerken, yüksek motor yüklerinde JP8'in düşük enerji yoğunluğu dezavantajına rağmen JP8-dizel karışım yakıtlarının da dizel yakıtına benzer performans sağlamasına imkan vermektedir.

4.2.5. Ön püskürtme oranına bağlı olarak CA10, CA90 ve yanma süresinin (CD) değişimi

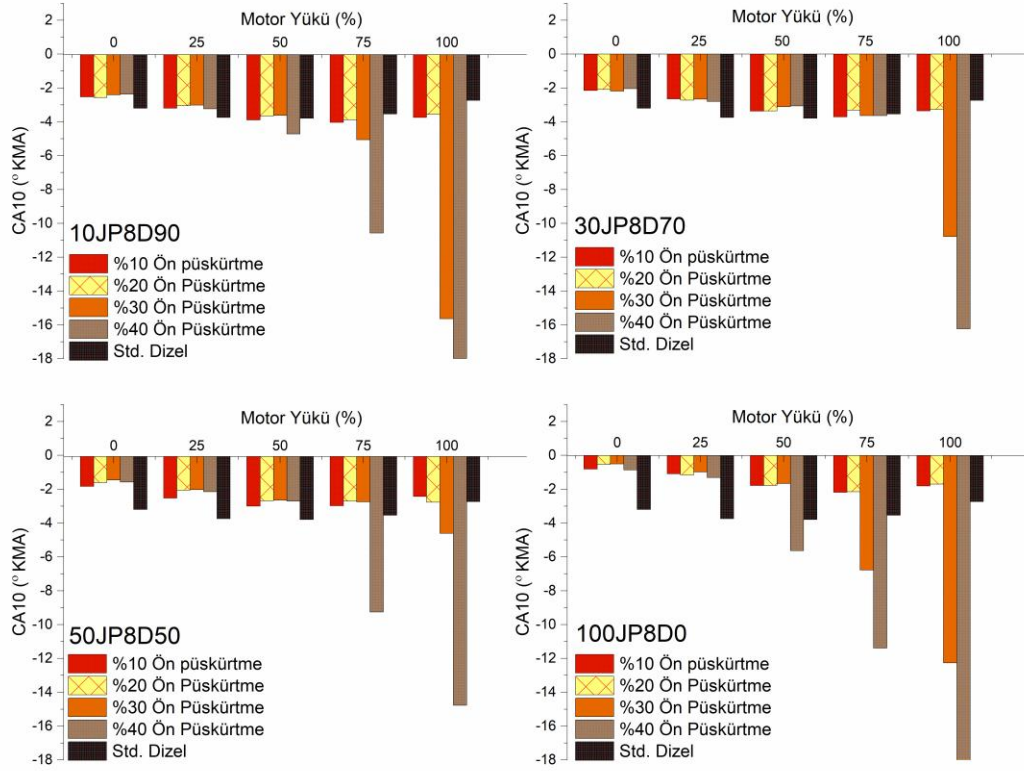
Grafik 4.27'de PPCI modda farklı motor yüklerinde ve farklı ön püskürtme oranlarında (%10, %20, %30, %40) dört farklı deney yakıtı (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) için ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen CA10 değerinin değişimi verilmiştir. CA10, yakıtın toplam ısı yayılımının %10'unun gerçekleştiği krank açısını ifade eder ve yanmanın başlama zamanlaması hakkında bilgi verir. CA10 değerinin daha düşük (daha negatif) olması, yanmanın daha erken başladığını; daha yüksek bir değer ise gecikmiş bir yanma başlangıcını gösterir (Şanlı et al., 2024).

Düşük motor yüklerinde (%0, %25) tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtına göre daha gecikmiş bir yanma başlangıcı göstermektedir. Tüm deney yakıtları için ön enjeksiyon oranları arasında %10 ön enjeksiyon oranı en erken yanma başlangıcına sahiptir. Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında 10JP8D90 yakıtı için %10 ön enjeksiyon oranında CA10 değeri -2.53 °KMA iken standart modda dizel yakıtı için bu değer -3.19 °KMA dır. En fazla gecikme %30 ön enjeksiyon oranında gözlenirken, %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı ile elde edilen verilere en yakın değeri sunmaktadır.

%50 motor yükünde, 100JP8D0 yakıtı hariç diğer deney yakıtlarında standart veri ile dört farklı ön enjeksiyon oranı için elde edilen veriler bir birlerine yakın değerler göstermektedir. Örneğin 30JP8D70 yakıtında %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları için CA10 değerleri sırası ile -3.36 °KMA, -3.34 °KMA, -3.12 °KMA ve -3.07 °KMA iken bu değer standart modda dizel yakıtı için -3.79 °KMA dır. Bu durum orta yüklerde ön enjeksiyonun yanma zamanlamasında tutarlı bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir.

%75 motor yükünde, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları nispeten standart dizel modunda elde edilen veriden daha gecikmiş yanma göstermesine rağmen %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları oldukça erken bir yanma başlangıcı göstermekte ve dizelden

daha erken yanma sağlamaktadır. 100JP8D0 yakıtı için CA10 değeri %30 ön enjeksiyon oranında -6.78 °KMA, %40 ön enjeksiyon oranı için ise -11.39 °KMA iken standart modda CA10 değeri -3.54 °KMA dır. Bu durum, yüksek yüklerde daha yüksek verimlilik ve güç çıktısı elde etmek için faydalı olabilir.



Grafik 4.27 Farklı ön püskürtme oranları için silindire gönderilen yakıtın %10'unun yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA10)

Tam yükte (%100) nerdeyse tüm ön enjeksiyon oranları standart modda elde edilen verilerden daha erken yanma başlangıcı göstermektedir. Örnek olarak 30JP8D70 yakıtı için %10, %20, %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında CA10 değerleri sırası ile -3.36 °KMA, -3.26 °KMA, -10.78 °KMA, -16.24 °KMA iken standart veri -2.74 °KMA dır. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları ise yanma zamanlamasını oldukça ileri çekmektedir, bu yanma verimliliğini artırabilir.

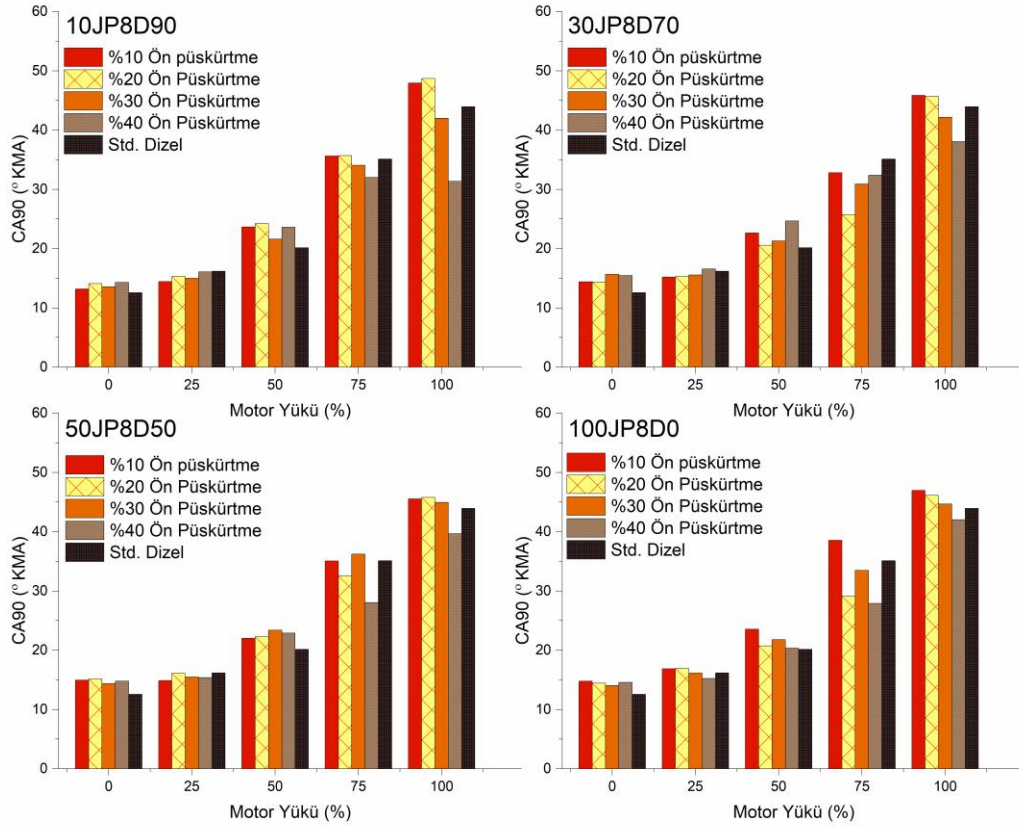
Deneyleerde elde edilen sonuçlar yakıt karışımı içerisindeki JP8 oranının artışının yanma başlangıcında gecikmeye neden olduğunu, CA10 değerlerinin ön enjeksiyon oranına ve motor yüküne bağlı olarak değiştini göstermektedir. Düşük yüklerde (%0 ve %25), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha geç yanma göstermekte olup bu durum düşük silindir içi basınç ve sıcaklıkların ön enjeksiyonlu yakıtın tutuşmasını zorlaştırmasıyla açıklanabilir. Bu gecikmiş yanma, düşük yüklerde verimliliği azaltabilir. Orta yükte (%50), tüm ön enjeksiyon oranları standart veriye yakın değerler göstermekte iken 10JP8D90 ve 100JP8D0 yakıtlarında %40 ön enjeksiyon standart dizel modunda elde edilen veriden daha erken bir yanma başlangıcı göstermektedir. Bu durum, belirli ön enjeksiyon oranlarının yakıt-hava karışımını iyileştirerek yanmayı daha erken başlatabileceğini göstermektedir. Ancak, %10, %20 ve %30 oranları yine dizel yakıtı göre daha geç yanma göstermektedir.

Yüksek motor yükünde (%75), %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları, dizel yakıtı göre çok daha erken bir yanma başlangıcı sağlamaktadır. Bu, yüksek yüklerde ön enjeksiyonun verimliliği ve güç üretimini artırmak için faydalı olabileceğini gösterir. JP8'in düşük setan sayısı ve ön karışım içerisindeki yakıt miktarının azlığı tüm motor yüklerinde düşük ön enjeksiyon oranlarında gecikmiş yanma başlangıcına sebep olmaktadır. Fakat yüksek yük ve yüksek ön enjeksiyon oranlarının karışım içerisindeki yakıt miktarında, silindir içi basınç ve sıcaklıklarında meydana gelen artışında etkisiyle yanma başlangıcını öne çektiği görülmektedir.

Genel olarak, yüksek ön enjeksiyon oranları (%30 ve %40), yüksek yüklerde (%75 ve %100) yanma başlangıcını önemli ölçüde öne çekerek verimlilik ve güç çıktısını artırabilir. Ancak düşük yüklerde (%0 ve %25), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre gecikmiş yanma göstermekte olup bu durum verimliliği olumsuz etkileyebilir. Orta yüklerde (%50) yalnızca %40 ön enjeksiyon oranı iki farklı yakıt için yanma zamanlamasını ileri çekmektedir. Bu bulgular, ön enjeksiyonun yanma zamanlaması üzerindeki etkisinin motor yüküne bağlı olarak değiştini ve yüksek ön enjeksiyon oranlarının özellikle yüksek yüklerde daha avantajlı olabileceğini göstermektedir.

Grafik 4.28'de PPCI modda motor yüküne bağlı olarak deney yakıtlarının farklı ön enjeksiyon oranlarında ve standart modda dizel yakıtı için elde edilen CA90

değerleri verilmiştir. CA90, yakıtın toplam ısı yayılımının %90'ının gerçekleştiği krank açısını ifade eder ve yanma süresi ile tamamlanma verimliliği hakkında bilgi sağlar (Şanlı et al., 2024). Erken CA90 değerleri daha hızlı bir yanma sürecini, daha geç CA90 değerleri ise yanmanın daha uzun sürdüğünü gösterir. Bu durum, motor verimliliğini ve emisyonları etkileyebilir.



Grafik 4.28 Farklı ön püskürtme oranları için silindire gönderilen yakıtın %90'ının yandığı ana denk gelen krank mili açısı (CA90)

Yüksüz durumda, standart modda dizel yakıtı için ölçülen CA90 değeri 12.56 °KMA dır. Tüm ön enjeksiyon oranlarında yanma olayı standart modda ölçülen yanma tamamlanma anından daha geç tamamlanmaktadır. Standart veriye en yakın değerler 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtı için sırasıyla 13.18 °KMA ve 14.39 °KMA, değerlerini sağlayan %10 ön enjeksiyon oranında, 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları için ise 14.35

$^{\circ}\text{KMA}$ ve 14.04°KMA değerlerini sağlayan $\%30$ ön enjeksiyon oranında elde edilmiştir. Bu yüksüz durumda ön enjeksiyonun yanma süresini uzatarak verimliliği düşürebileceğini göstermektedir.

$\%25$ motor yükünde, CA90 değerleri karşılaştırıldığında 100JP8D0 yakıtı hariç diğer tüm yakıtlarda $\%10$ ön enjeksiyon oranının standart modda dizel yakıtının yanma performansından daha iyi bir yanma performansı sağladığı görülmektedir. $\%10$ ön enjeksiyon oranında $\%25$ motor yükünde deney yakıtları için ölçülen yanmanın tamamlandığı kabul edilen CA90 değerleri 14.44°KMA , 15.21°KMA , 14.89°KMA , ve 16.85°KMA dır. Standart modda dizel yakıtı ile ölçülen CA90 değeri ise 16.17°KMA dır. Bu sonuçlara göre, $\%10$ ön enjeksiyon oranı daha erken bir yanma tamamlanması sağlayarak dizel yakıtından daha verimli bir performans göstermiştir. Diğer ön enjeksiyon oranları ise hafif gecikmelerle dizel yakıtına yakın sonuçlar vermiştir.

$\%50$ motor yükünde, Standart dizel yakıtın CA90 değeri 20.13 derece olarak bulunmuştur. Bu yük seviyesinde, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtına göre daha geç yanma süresi göstermektedir. Ancak $\%20$ ve $\%30$ ön enjeksiyon oranları dizel yakıtına en yakın değerleri sunarak yanma süresini verimli tutmak açısından daha etkili olabilir.

$\%75$ motor yükünde PPCI modda ön enjeksiyon oranlarının büyük çoğunluğu standart modda dizel yakıtının CA90 değerinden (35.08°KMA) daha erken yanmanın tamamlanmasını sağlamıştır. 30JP8D70 hariç tüm deney yakıtlarında yanmanın en erken tamamlandığı $\%40$ ön enjeksiyon oranı için CA90 değerleri 32.00°KMA , 32.39°KMA , 28.03°KMA ve 27.88°KMA dır. Bu motor yükünde, deney yakıtına bağlı olarak $\%20$, $\%30$ ve $\%40$ ön enjeksiyon oranları dizel yakıttan daha erken bir yanma tamamlanması sağlayarak verimliliği artırmaktadır. Özellikle $\%40$ ön enjeksiyon oranı 100JP8D0 yakıtı ile en erken (27.88°KMA) yanma tamamlanmasını sağlamış, $\%10$ ön enjeksiyon oranı ise aynı deney yakıtı ile bu motor yükünde en geç (38.54°KMA) yanma tamamlanması göstererek yanma verimliliğini düşürmüştür.

Tam yükte ($\%100$ motor yükü), $\%10$ ön enjeksiyon oranı için 47.94°KMA , 45.84°KMA , 45.54°KMA , 46.96°KMA ve $\%20$ ön enjeksiyon oranı için 48.70°KMA , 45.65°KMA , 45.76°KMA , 46.11°KMA olarak ölçülen CA90 değerleri bu motor yükü için yanmanın en geç tamamlandığı değerleri oluşturmaktadır. Standart modda dizel yakıtının CA90 değeri ise 43.94°KMA dır. Yanmanın en erken tamamlanmasını

sağlayan ön enjeksiyon oranı ise, 31.33 °KMA, 38.04 °KMA, 39.66 °KMA ve 42.03 °KMA CA90 değerlerinin ölçüldüğü %40 ön enjeksiyon oranıdır.

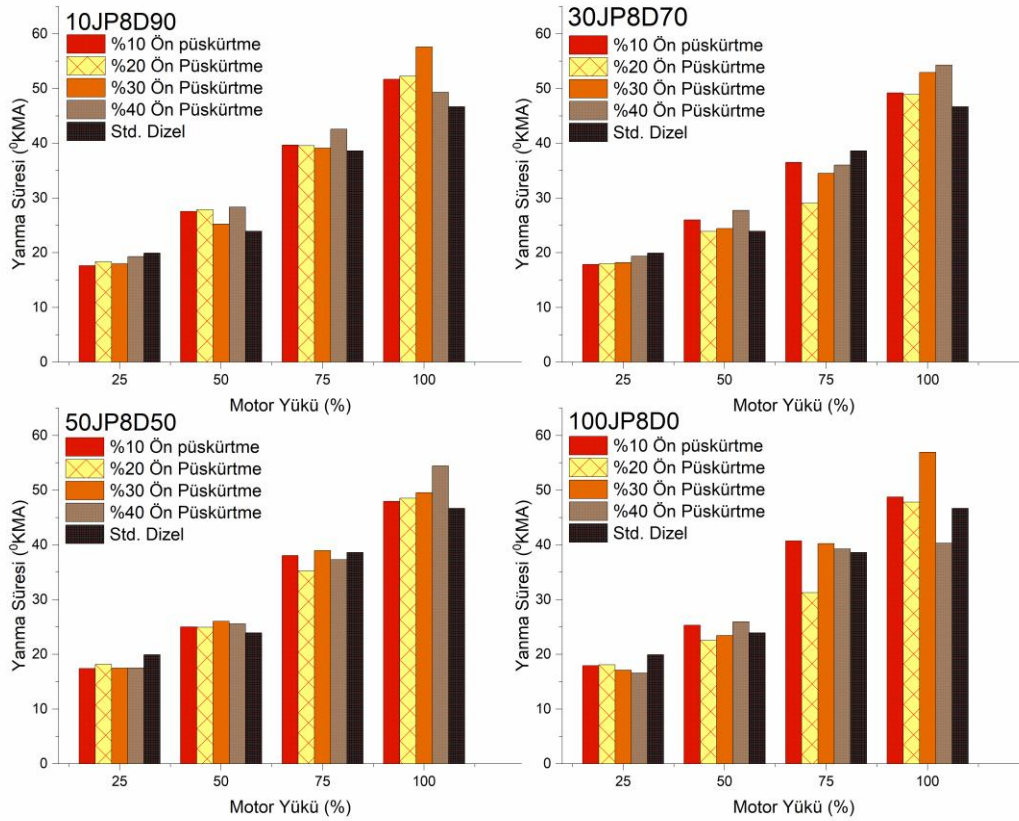
CA90 değerleri, farklı motor yüklerinde ön enjeksiyon oranlarının yanma süresi üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Düşük yüklerde (%0 ve %25) tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha geç yanma göstermektedir. Ancak %25 yükte %10 ön enjeksiyon oranı daha erken bir yanma tamamlanması sağlayarak verimliliği artırabilir. Orta yükte (%50), tüm ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtından daha geç yanma süresi sergilemekte olup, %20 ve %40 oranları dizel yakıtı en yakın değerleri sunmaktadır. Bu durum, orta yük seviyesinde ön enjeksiyon uygulamasının yanma verimliliğini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Yüksek yükte (%75), %40 ön enjeksiyon oranı dizel yakıtı göre daha erken yanma süresi sağlayarak yanma verimliliğini ve güç çıktısını artırabilir. Ancak %10 ön enjeksiyon oranı oldukça geç bir yanma süresi göstererek verimliliği düşürebilir. Tam yükte (%100), %40 ön enjeksiyon oranı en erken yanma süresi sağlayarak en verimli yanma tamamlanmasını göstermektedir. Diğer oranlar daha uzun yanma süresi göstermekte olup, bu da %40 oranının tam yükte en verimli konfigürasyon olabileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, %40 ön enjeksiyon oranı, farklı motor yüklerinde en verimli yanma tamamlanmasını sağlayarak özellikle yüksek yüklerde (%75 ve %100) verimliliği artırarak performansa katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu durum, %40 ön enjeksiyon oranının zorlayıcı koşullarda yanma verimliliği ve güç çıktısını artırabileceğini göstermektedir. Düşük ve orta yüklerde %10 ön enjeksiyon oranı da yanma zamanlamasında göreceli olarak başarılı bir performans göstermektedir. Buna karşılık, yüksek yüklerde daha düşük ön enjeksiyon oranlarının (örneğin %10) yanma süresinin uzaması nedeniyle verimliliği düşürebileceği anlaşılmaktadır.

Yanma süresi (CD), yakıt-hava karışımının yanmaya başlayıp yanmanın tamamlanmasına kadar geçen KMA veya zaman aralığıdır. Genellikle enerji salınımının %10' nun gerçekleştiği nokta (CA10) yanma başlangıcı, %90'nın gerçekleştiği nokta (CA90) ise yanma sonu olarak kabul edilir. Yanma süresi termal verim, basınç ve emisyonlar üzerinde etkilidir (Saxena et al., 2021). Grafik 4.29'da dört farklı deney

yakıt için motor yüküne bağlı olarak ön enjeksiyon oranlarının (%10, %20, %30 ve %40) yanma sürelerine etkisi görülmektedir.

10JP8D90 deney yakıtı %25 motor yükü hariç tüm motor yüklerinde dizel yakıtından daha uzun yanma süresine sahip yakıt olmuştur. %50 ve %75 motor yüklerinde PPCI modda %30 ön enjeksiyon oranı, tam yükte ise %40 ön enjeksiyon oranı ile dizel yakıtına en yakın yanma süreleri elde edilmiştir. Örneğin %75 motor yükünde dizel yakıtın yanma süresi 38.61°KMA, %30 ön enjeksiyon ile 10JP8D90 yakıtının yanma süresi ise 39.09 °KMA' dır. %25 motor yükünde tüm ön enjeksiyon oranlarında 10JP8D90 yakıtının yanma süreleri dizel yakıtından daha kısa sürmüştür.



Grafik 4.29 Farklı ön püskürtme ve yakıt karışım oranları için °KMA cinsinden yanma süresi

30JP8D70 deney yakıtı için %20 ön enjeksiyon oranında PPCI modda elde edilen yanma süreleri tüm motor yüklerinde dizel yakıtının yanma süresinden daha kısa sürmüştür. 30JP8D70 deney yakıtı PPCI yanma modunda yüksek motor performansı, yüksek verim ve düşük CO, HC emisyonları için %20 ön enjeksiyon oranı ile dizel yakıtına alternatif oluşturabilir.

50JP8D50 yakıtında %75 motor yükü dışındaki tüm motor yüklerinde en hızlı yanma reaksiyonu sağlayan ön enjeksiyon oranı %10 ön enjeksiyon oranı olmuştur. %10 ön enjeksiyon oranı %50 ve %100 motor yükünde 25.00 °KMA, 47.97 °KMA ile dizel yakıtına yakın (23.93 °KMA, 46.70 °KMA), %25 ve %75 motor yüklerinde ise 17.42 °KMA, 38.05 °KMA yanma süreleri ile dizel yakıtından daha kısa (19.92 °KMA, 38.62 °KMA) yanma süreleri sağlamıştır. %75 motor yükünde ise en kısa yanma süresine 35.24 °KMA ile %20 ön enjeksiyon oranı sahip olmuştur.

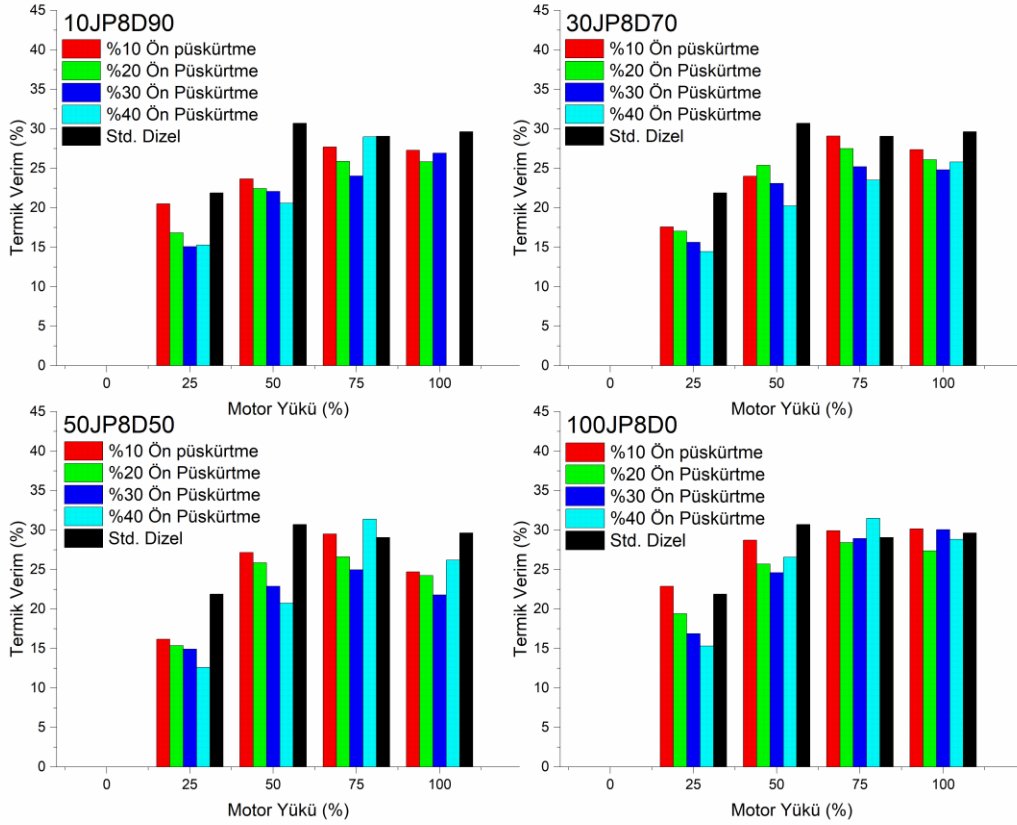
100JP8D0 yakıtı %25 ve %100 motor yüklerinde %40 ön enjeksiyon oranı ile 16.56 °KMA, 40.33 °KMA, %50 ve %75 motor yüklerinde ise %20 ön enjeksiyon oranı ile 22.52 °KMA, 31.26 °KMA ile en hızlı yanma sürelerine ulaşmıştır. Her bir motor yükünde dizel yakıtının yanma süreleri 19.92 °KMA, 23.93 °KMA, 38.62 °KMA ve 46.68 °KMA' dır. Tam yükte %10 ön enjeksiyon oranı genel olarak en uzun yanma sürelerine sahip ön enjeksiyon oranıdır. Grafikler değerlendirildiğinde ön enjeksiyon oranlarının optimizasyonu ile tüm deney yakıtlarının PPCI yanma modunu kullanarak dizel yakıtına alternatif olabileceği sonucuna varılabilir.

4.2.6. Ön püskürtme oranlarının termik verime etkisi

Grafik 4.30'da PPCI modda farklı motor yük seviyelerinde (%25, %50, %75, %100) dört farklı yakıt karışımı (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) için ön püskürtme oranlarına (%10, %20, %30, %40) bağlı olarak oluşan ve standart dizel çalışma modunda dizel yakıtı için ölçülen termik verim değişimi görülmektedir. Termal verimlilik, motorun yakıt enerjisini ne kadar verimli bir şekilde işe dönüştürdüğünü gösteren bir göstergedir; daha yüksek termal verimlilik değerleri, daha iyi performansı ifade etmektedir (Dahham et al., 2022).

Tüm yakıt karışımlarında 50JP8D50 yakıtının %75 motor yükünde ölçülen termik verim hariç tüm motor yükleri için standart dizel çalışma modundan daha düşük termik verim değerleri ölçülmüştür. 100JP8D0 yakıtı için ise %50 motor yükü hariç

diğer motor yüklerinde ön enjeksiyonun etkisiyle en az bir ön enjeksiyon oranı için standart dizel modundan daha yüksek termik verim değerleri ölçülmüştür.



Grafik 4.30 Motor yüküne bağlı olarak farklı ön püskürtme oranları için termik verim değerleri

10JP8D90 yakıtı için düşük yüklerde termik verim kayıpları fazladır. Özellikle %50 motor yükünde en yüksek değeri sağlayan %10 ön enjeksiyon oranı için dahi yaklaşık %7 lik bir kayıp yaşanmaktadır (%10 ön enjeksiyon için termik verim %23.667 ve std dizel modu için termik verim %30.713). Yüksek motor yükleri için ise standart dizel çalışma modunun sağladığı değere yakın termik verim değerleri sağlayan ön enjeksiyon oranları vardır. Örneğin %75 motor yükü için %40 ön enjeksiyon oranında ölçülen termik verim değeri %28.99 iken standart dizel modu için ölçülen değer %29.07

dir. Tam yük için %10 ön enjeksiyon oranında verim %27.27 iken standart dizel modu için ise %29.63 olarak ölçülmüştür.

30JP8D70 yakıtı için ön enjeksiyon oranlarına bağlı olarak termik verim değerlerinde 10JP8D90 yakıtına göre bir miktar iyileşme sağlanmış olsa da düşük motor yükleri için standart dizel çalışma moduna göre kayıplar devam etmektedir. En yüksek termik verimi sağlayan ön enjeksiyon oranı için dahi standart dizel moduna göre %25 motor yükünde yaklaşık %4 , %50 motor yükü için ise %5 lik kayıp oluşmaktadır.

%75 ve %100 motor yüklerinde ise %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları standart dizel modunda elde edilen termik verim değerlerine yakın verim değerleri sağlamaktadır. Örneğin %75 motor yükü için %10 ön enjeksiyon oranında verim %29.03 iken standart dizel modunda verim %29.07 dir.

50JP8D50 yakıtı için %25 ve %50 motor yüklerinde standart dizel modunda elde edilen verim değerlerine göre kayıplar sırasıyla yaklaşık %4 ve %3 tür. Yüksek motor yüklerinde elde edilen verim değerleri standart dizel modunda elde edilen değere yakın hatta %75 motor yükü için %40 ön püskürtme oranında %2.3 lük bir artış sağlanmaktadır. %75 motor yükünde %40 ön enjeksiyon oranında termik verim %31.37 iken standart dizel modunda termik verim %29.07 dir. Bu sonuç, yüksek motor yüklerinde ön enjeksiyonun termal verimliliği artırabileceğini, özellikle %40 oranının daha olumlu bir etki yapabileceğini düşündürmektedir.

100JP8D0 yakıtı ile yapılan deneylerde %50 motor yükü hariç diğer tüm yük kademelerinde %10 ön enjeksiyon oranı standart dizel modunda elde edilen değerlerden daha yüksek termik verim değerleri sağlamıştır. %75 motor yükünde en yüksek termik verim %40 ön enjeksiyon oranında elde edilmiştir.

Yakıt karışımının içerisindeki JP8 oranının artışı ön enjeksiyon kademelerinde tüm motor yüklerinde termik verimi artırmaktadır fakat 100JP8D0 hariç tüm yakıtlar için %25 ve %50 motor yüklerinde elde edilen termik verim değeri standart dizel modunda elde edilen verim değerinden düşük kalmaktadır. 100JP8D0 yakıtında ise %50 yük hariç tüm motor yükleri için %10 ön enjeksiyon oranı ile sağlanan termik verim standart dizel modunda sağlanan verimden daha yüksektir. JP8 yakıtının ısı değerinin dizel yakıtından düşük olmasına rağmen termik verimdeki bu iyileşme JP8 yakıtının yanma hızının dizel yakıtından yüksek olması ile açıklanabilir. Düşük motor

yüklerinde yüksek ön enjeksiyon oranlarının verimliliği olumsuz etkilediği görülmektedir. Tüm motor yükleri ve yakıtlarda ön enjeksiyon oranları içerisinde en iyi sonuçlar %10 ön enjeksiyon oranında sağlanmıştır. Bazı motor yüklerinde (%75 ve %100) %40 ön enjeksiyon oranı en yüksek verimi sağlamaktadır. %10 ön enjeksiyon oranı ise daha geniş yük aralığında kullanılabilme imkanı vermektedir. PPCI modda çalıştırılacak bir motor da JP8 karışımları kullanılacak ise düşük ve orta yüklerde %10 ön enjeksiyon oranı, yüksek yüklerde ise %40 ön enjeksiyon oranının tercih edilmesi termik verim açısından avantaj sağlayacaktır.

Genel olarak, düşük motor yüklerinde (%25) PPCI modda yalnızca %10 ön enjeksiyon oranı termal verimliliği standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değere yakın tutarken, daha yüksek oranlar (%20, %30 ve %40) verimlilikte düşüşe neden olmaktadır. Bu durum, düşük yüklerde aşırı ön enjeksiyonun enerji kayıplarına yol açabileceğini düşündürmektedir. Orta motor yükünde (%50), standart modda dizel yakıt en yüksek verimliliği sağlarken, %10 ön enjeksiyon oranı standart modda dizel yakıtı ile benzer bir performans sergilemektedir. Diğer oranlar ise standart moddan daha düşük verimlilik göstermektedir. Yüksek motor yükünde (%75), %40 ön enjeksiyon oranı en yüksek termal verimliliği sağlamaktadır. Bu yük seviyesinde %10, %20 ve %30 oranları da standart modda elde edilen değere yakın performans göstermektedir. Bu durum, yüksek yüklerde ön enjeksiyonun yanma sürecini iyileştirerek termal verimliliği artırabileceğini düşündürmektedir.

%10 ön enjeksiyon oranı farklı motor yüklerinde standart dizel moduna yakın veya hafifçe daha iyi termal verimlilik sunarak en tutarlı performansı göstermektedir. Yüksek yüklerde (%75), %40 ön enjeksiyon oranı en yüksek termal verimliliği sağlayarak belirli koşullarda performansı artırabilmektedir. Ancak düşük ve orta yüklerde yüksek ön enjeksiyon oranları genellikle termal verimliliği düşürmektedir. Bu bulgular, daha düşük ön enjeksiyon oranlarının (%10 gibi) geniş bir motor yük aralığında termal verimlilik açısından faydalı olabileceğini göstermektedir. Yüksek yüklerde en iyi performansı elde etmek için %40 ön enjeksiyon oranının etkili olduğu görülmektedir.

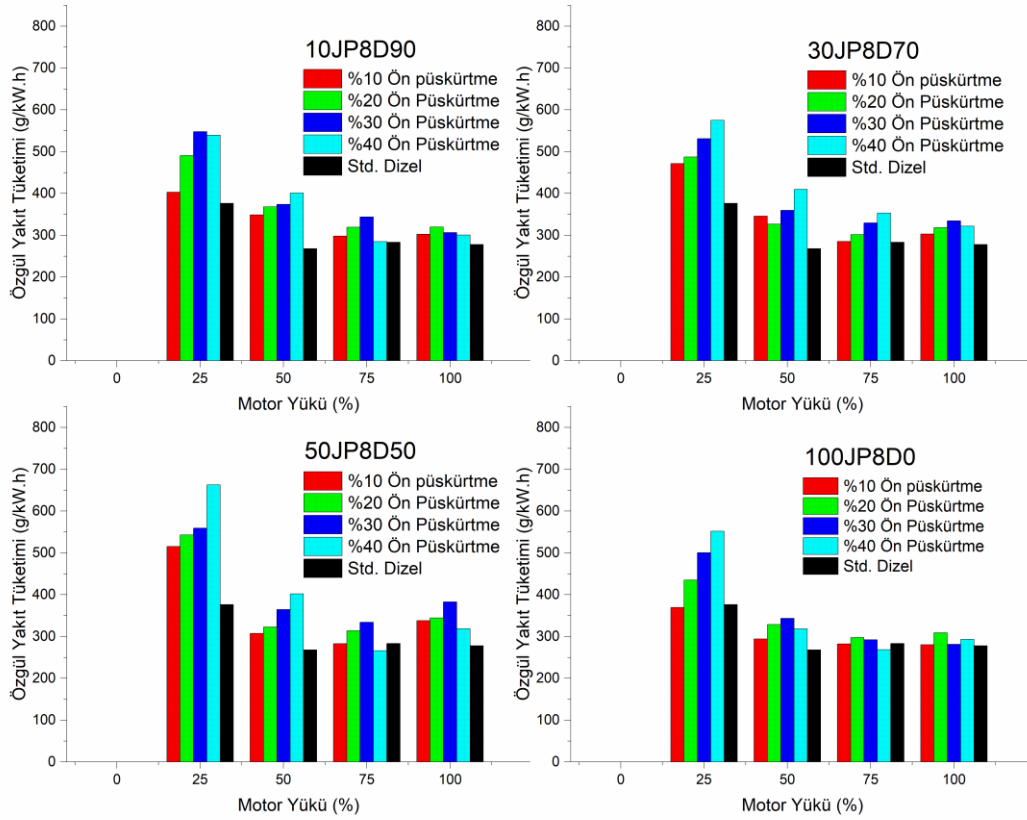
4.2.7. Ön püskürtme oranlarının (ÖYT) özgül yakıt tüketimine etkisi

Grafik 4.31’de farklı motor yüklerinde (%25, %50, %75 ve %100), farklı yakıt karışımları için (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) ön püskürtme oranlarına bağlı olarak (%10, %20, %30, %40) hesaplanan Özgül Yakıt Tüketimi değerleri ve standart dizel yakıtı için Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT) değerleri görülmektedir. Yakıt tüketimi ölçümü yapılarak ÖYT g/kWh cinsinden hesaplanmıştır. ÖYT değeri motorun yakıt verimliliğine dair önemli bir parametredir. Daha düşük ÖYT değerleri daha verimli yakıt kullanımı anlamına gelmektedir (Alif et al., 2022). Bu bölümde, farklı motor yüklerinde her bir ön enjeksiyon oranının standart dizel ile karşılaştırması yapılarak yakıt verimliliği üzerindeki etkisi vurgulanacaktır.

İçerisinde JP8 oranı en düşük (%10) olan deney yakıtı 10JP8D90 için ön enjeksiyon oranlarının özgül yakıt tüketimine (ÖYT) etkisi incelendiğinde %25 ve %50 motor yükünde standart modda dizel yakıtına göre ÖYT de özellikle yüksek ön enjeksiyon oranlarında bir artış görülmektedir. %25 motor yükünde dizel yakıtı için hesaplanan 376.37 g/kWh ÖYT değerine en yakın tüketim %10 ön enjeksiyon oranında 403 g/kWh olarak hesaplanmaktadır. Yüksek motor yüklerinde (%75, %100) ise %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları her iki motor yükü içinde standart modda dizel yakıtının ÖYT değerlerine yakın değerler göstermektedir. %75 motor yükünde standart modda dizel yakıtı için ÖYT 283.37 g/kWh iken %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları için sırasıyla 298.02 g/kWh ve 284.88 g/kWh olarak hesaplanmıştır. 10JP8D90 yakıtı için düşük motor yüklerinde dizel yakıtına en yakın ÖYT değerlerini %10 ön enjeksiyon oranı sağlarken yüksek yüklerde ise sırasıyla %40 ve %10 ön enjeksiyon oranı en iyi değerleri vermektedir.

30JP8D70 ve 50JP8D50 deney yakıtları için %25 ve %50 motor yüklerinde %10 JP8 karışumlu deney yakıtına benzer şekilde ÖYT’ de artış gözlenmiştir. Standart dizel yakıtına en yakın değerler yine %10 ön enjeksiyon oranında gözlemlenmektedir. %75 ve %100 motor yükleri için tüm ön enjeksiyon oranlarında düşük motor yüklerine göre ÖYT de bir iyileşme görülmekte fakat yine standart modda dizel yakıtı 50JP8D50 yakıtının %75 motor yükü hariç en iyi ÖYT değerini sağlamaktadır. %75 motor yükünde dizel yakıtı için hesaplanan ÖYT 283.37g/kWh iken 50JP8D50 yakıtı için %40 ve %10 ön enjeksiyon oranlarında hesaplanan ÖYT değerleri sırası ile 265.91

g/kWh ve 282.76 g/kWh tir. %75 motor yükünde 50JP8D50 yakıtı için %40 ön enjeksiyon oranında ÖYT' de %6.16' lık bir iyileşme görülmektedir.



Grafik 4.31 Motor yüküne bağlı olarak farklı ön püskürtme oranları için özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri

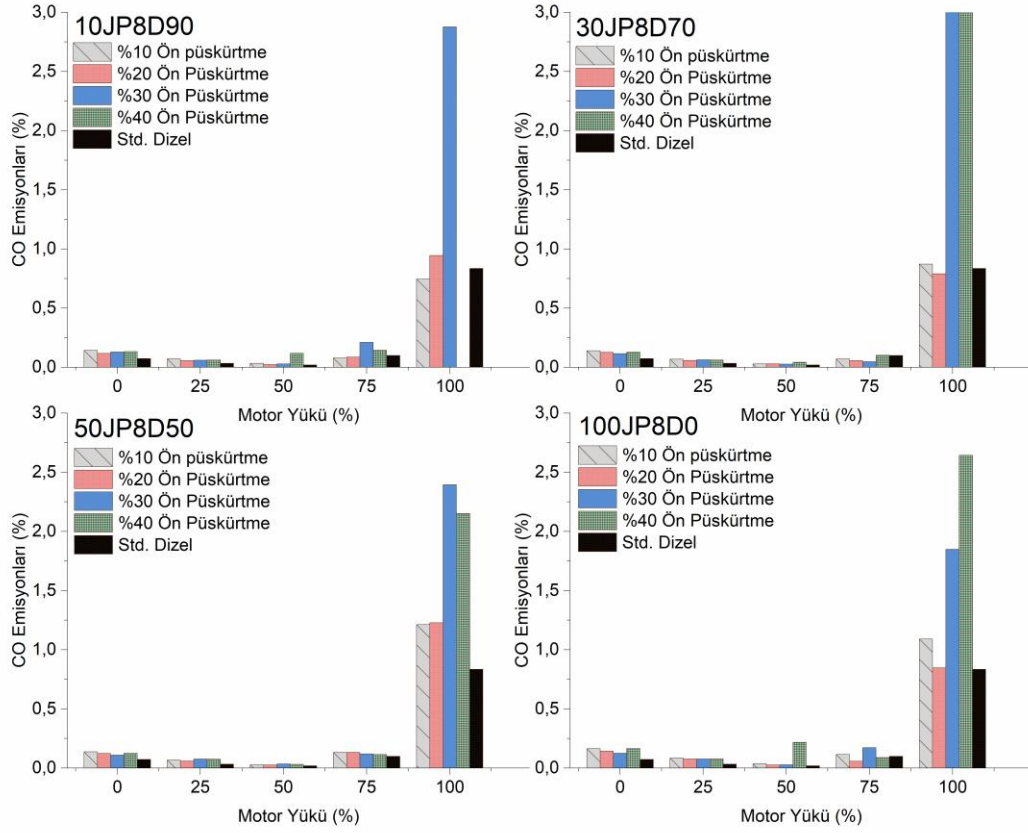
100JP8D0 yakıtı tüm motor yüklerinde standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değere yakın ve bazı ön enjeksiyon oranlarında daha iyi ÖYT değerleri sağlamaktadır. %25 motor yükünde standart modda dizel yakıtı için ÖYT 376.38 g/kWh iken %10 ön enjeksiyon oranı için ise %1.83' lük bir iyileşme ile 369.49 g/kWh olarak hesaplanmıştır. %75 motor yükünde %40 ön enjeksiyon için ÖYT 268.37 g/kWh iken standart modda dizel yakıtı için 283.36 g/kWh olarak hesaplanmıştır. Motor tam yükte çalıştırıldığında standart ÖYT değeri 277.96 g/kWh iken %10 ön enjeksiyon oranı için 280.16 g/kWh olarak gerçekleşmiştir.

ÖYT verilerinin değerlendirilmesi esnasında JP8 ve dizel yakıtı arasındaki ısı değer, setan sayısı ve yoğunluk farkı dikkate alınmalıdır. JP8 yakıtının ısı değer ve yoğunluğunun dizelden düşük olması nedeniyle birim hacimdeki enerji oranı dizelden daha düşük kalmaktadır. Bunun sonucunda yakıt karışımı içerisindeki JP8 oranının artmasına bağlı olarak dizel yakıtı ile aynı motor performans çıktıları elde etmek için silindir içerisine yoğunluk farkından dolayı daha fazla JP8 sürülmesi gerekebilir. JP8 yakıtının yanma hızı ise dizel yakıtına göre JP8 yakıtının bir avantajı olarak görülebilir. Aslında dizel yakıtına yakın fakat biraz fazla ÖYT değerleri veren ön püskürtme oranlarında yanma veriminin daha iyi olduğu değerlendirilebilir (Labeckas, Slavinskas, & Vilutienė, 2015).

Ön enjeksiyon oranının özgül yakıt tüketimine etkisi değerlendirildiğinde tüm deney yakıtları için %10 ön enjeksiyon oranı motor yüklerinin tamamında standart modda dizel yakıtının sağladığı değere en yakın ÖYT değerlerini vermektedir. Yüksek motor yüklerinde (%75, %100) ise %40 ön enjeksiyon oranının 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları için yaklaşık %5 ÖYT' de iyileştirme sağladığı görülmüştür. JP8 karışımlarında daha düşük alt ısı değer ve yoğunluğa sahip olmalarına rağmen standart veriye yakın ve bazı deney kademelerinde daha iyi ÖYT değerleri görülmesi ön enjeksiyon uygulamasının yanma performansında ve yakıt verimliliğinde iyileşme sağladığını düşündürmektedir. Düşük ve orta motor yükleri için %10 ön enjeksiyon oranı, yüksek motor yükleri için ise %40 ön enjeksiyon oranı tercih edilerek standart modda dizel yakıtının sağladığı ÖYT değerlerine yakın değerler elde edilebilir.

4.2.8. Farklı ön püskürtme oranları için ölçülen CO, CO₂, HC, NO_x ve İS emisyonu değişimleri

Grafik 4.32'de PPCI modda motor yüküne bağlı olarak deney yakıtlarının farklı ön enjeksiyon oranları için ve standart modda dizel yakıtı için ölçülen karbon monoksit (CO) emisyon değişimi verilmiştir. CO emisyonları, yanmanın tam gerçekleşmediğinin bir göstergesi olup, daha düşük CO emisyonları genellikle daha eksiksiz bir yanma sürecine ve daha iyi yakıt verimliliğine işaret eder (Gharehghani et al., 2019).



Grafik 4.32 Farklı ön püskürtme oranları için karbon monoksit (CO) emisyonları

%0 motor yükünde, yani yüksüz durumda, PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranlarının standart modda dizel yakıtına kıyasla daha yüksek CO emisyonları açığa çıkardığı görülmektedir. Bu yük seviyesinde %10 ön enjeksiyon oranı, en yüksek CO emisyon değerlerine (%0.143, %0.14, %0.137 ve %0.163) sahiptir. Yüksüz durumda standart modda dizel yakıtı için ölçülen CO emisyonu değeri ise %0.073 tür. Standart değere en yakın CO emisyonu ölçümü %30 ön enjeksiyon oranında 50JP8D50 yakıtı için ölçülen %0.109'dur ve bu değer için bile CO emisyonunda %0.036 lık bir kötüleşme görülmektedir. Ölçülen bu değerler yüksüz durumda ön enjeksiyon stratejilerinin eksik yanmaya yol açabileceğini göstermektedir.

%25 motor yükünde' de CO emisyonları tüm ön enjeksiyon oranları için dizelden daha yüksek seviyede kalmaktadır. Farklı ön enjeksiyon oranları arasında CO

emisyollarında belirgin bir fark olmaması, düşük motor yüklerinde ön enjeksiyonun yanma verimliliğini önemli ölçüde iyileştirmediğini göstermektedir. Standart modda dizel yakıtının CO emisyonu değerine (%0.033) en yakın CO emisyon değerleri %20 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 için ölçülen %0.055 ve 30JP8D70 için ölçülen %0.058 değerleridir. Yine standart veri ve en yakın ölçülen değer arasında %0.022 lik bir fark bulunmaktadır. %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında standart dizel ile benzer CO emisyon seviyeleri göstermekte ancak %50 motor yükünde %40 ön enjeksiyon oranı belirgin bir CO artışına yol açmaktadır. Bu durum, orta yüklerde makul oranlardaki ön enjeksiyonun verimli yanmayı sürdürebildiğini ancak daha yüksek oranların eksik yanmaya neden olabileceğini göstermektedir.

%75 motor yükünde, içerisinde JP8 oranı düşük olan yakıtlar (10JP8D90, 30JP8D70) %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında 10JP8D90 için sırasıyla %0.079 ve %0.085; 30JP8D70 için ise %0.070 ve %0.056 CO emisyonu salgılar iken içerisinde JP8 oranı daha fazla olan yakıtlar ise özellikle 100JP8D0 yakıtı %20 ve %40 ön enjeksiyon oranında %0.057 ve %0.089'luk CO emisyonu salgılamaktadır. Bu değerler %75 motor yükü için tüm deney yakıtları dikkate alındığında özellikle %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarının standart modda dizel yakıtı için ölçülen %0.099 CO emisyon değerine göre daha düşük CO emisyonları sağlayarak yanma verimliliğini artırmada daha başarılı olduğunu göstermektedir. %40 ön enjeksiyon oranının ise %75 motor yükü için en kötü CO emisyon değerlerini sağlayan oran olduğu görülmektedir.

Tam yükte (%100), sadece içerisinde JP8 oranı düşük olan deney yakıtları (10JP8D90 ve 30JP8D70) %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında, 10JP8D90 yakıtı için %0.74 ve %0.94; 30JP8D70 yakıtı ise %0.87 ve %0.79'luk CO emisyonu salınımları ile standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değere (%0.83) yakın bir CO emisyon değeri sağlamakta, diğer ön enjeksiyon oranları ise önemli ölçüde daha yüksek CO emisyonları göstermektedir. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranı ise tüm deney yakıtları için yapılan deneylerde en yüksek CO emisyonunu üreterek tam yükte eksik yanmaya yol açabileceğini göstermektedir.

CO emisyonlarının ön enjeksiyon oranına ve motor yüküne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Düşük yüklerde (%0 ve %25), tüm ön enjeksiyon oranlarının standart modda dizel yakıtına kıyasla daha yüksek CO emisyonlarına neden

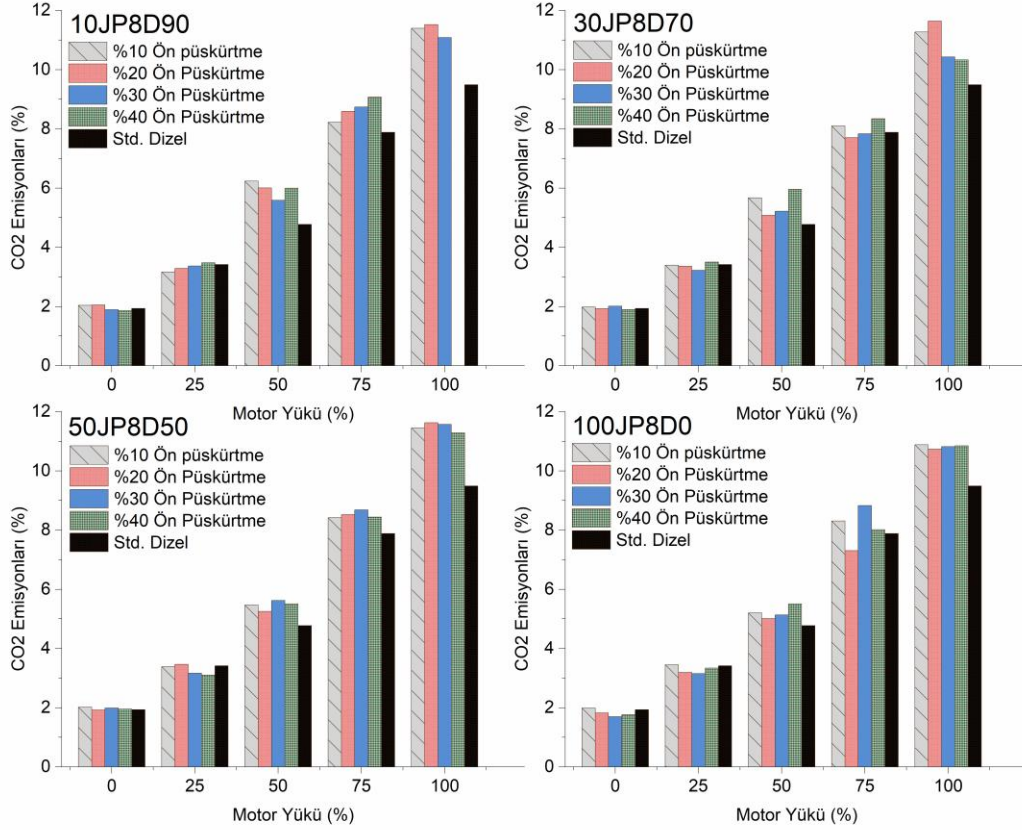
olması, bu seviyelerde ön enjeksiyonun eksik yanmaya katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir. Bunun nedeni, JP8 in dizel yakıtına göre düşük olan setan sayısı, düşük silindir içi basınç ve sıcaklıkların yakıtın tam oksidasyonunu engellemesi olabilir. Ayrıca yanma başlangıcının gecikmesi, yanma süresinin yetersizliğine ve eksik yanmaya bağlı olarak CO emisyonlarında artışa sebep olabilir. Orta yükte (%50), %10, %20 ve %30 ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtına daha yakın CO emisyonları sağlarken, %40 oranı belirgin bir CO artışına neden olmaktadır. Bu durum, orta yüklerde daha düşük ön enjeksiyon oranlarının makul yanma verimliliğini koruyabileceğini ancak daha yüksek oranların eksik yanmaya yol açabileceğini göstermektedir (Labeckas, Slavinskas, & Vilutienė, 2015; Lee et al., 2012).

Orta ve yüksek yüklerde ise silindir içerisinde değişen basınç, sıcaklık değerleri ile birlikte artan gaz hareketleri ve türbülans yanma başlangıcını öne çekebilmektedir. Yüksek yüklerde yanma parametrelerinin iyileşmesine bağlı olarak bazı ön püskürtme oranlarında CO emisyonlarında azalma görülmektedir. %75 motor yükünde, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları, standart modda dizel yakıtına göre daha düşük CO emisyonları sunarak yakıt oksidasyonunu iyileştirmektedir. Bu, belirli ön enjeksiyon oranlarının yüksek yüklerde yanma verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Tam yükte (%100) ise yine %10 ve %20 ön enjeksiyon oranı standart modda dizel yakıtına yakın bir CO emisyonu sağlamakta, diğer ön enjeksiyon oranları (%30 ve %40), önemli ölçüde daha yüksek CO emisyonlarına yol açmaktadır. Bu durum, yüksek ön enjeksiyon oranlarının tam yükte yanma sürecini olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, %20 ön enjeksiyon oranı, özellikle yüksek yüklerde (%75 ve %100) standart veriye yakın veya daha düşük CO emisyonları sağlayarak en dengeli performansı göstermektedir. Buna karşılık, %40 ön enjeksiyon oranı özellikle tam yükte en yüksek CO emisyonlarına yol açmakta ve eksik yanma ihtimalini artırmaktadır. Bu bulgular, yakıt verimliliği ve CO emisyonları açısından %20 gibi orta düzey bir ön enjeksiyon oranının en iyi dengeyi sağlayabileceğini göstermektedir.

Grafik 4.33'te dört farklı deney yakıtı için farklı motor yük seviyeleri ve farklı ön enjeksiyon oranlarında ölçülen CO₂ emisyon değerleri ile standart modda dizel yakıtı için ölçülen karbondioksit (CO₂) emisyonu değişimleri verilmiştir. CO₂ emisyonları, yüzde olarak ölçülmekte olup yanma verimliliği hakkında bilgi sağlar;

genellikle daha yüksek CO₂ emisyonları, daha eksiksiz bir yanmayı işaret eder çünkü CO₂, yakıtın oksidasyonunun ana yan ürünüdür (Han et al., 2013).



Grafik 4.33 Farklı ön püskürtme oranları için karbondioksit (CO₂) emisyonları

Yüksüz durumda, %10 ön enjeksiyon oranı tüm deney yakıtları için standart modda dizel yakıtı ile ölçülen CO₂ değerinden daha yüksek değerler göstermektedir. Deney yakıtları için PPCI modda %10 ön enjeksiyon oranı ile elde edilen CO₂ değerleri sırası ile %2.041, %1.985, %2.02, %1.992 iken standart modda dizel yakıtı için bu değer %1.933 tür. Bu değerler PPCI modda %10 ön enjeksiyon oranının standart modda dizel yakıtı göre daha iyi bir yanma sağladığını göstermektedir. %40 ön enjeksiyon oranı ise tüm yakıtlar için daha düşük CO₂ değerleri göstererek yüksüz durumda yanma verimliliğinin daha düşük olabileceğini işaret etmektedir.

%25 motor yükünde, en iyi CO₂ değerleri 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtları için %40 ön enjeksiyon oranında (sırasıyla %3.476 ve %3.496), 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları için ise %10 ön enjeksiyon oranında (sırasıyla %3.388 ve %3.447) elde edilmektedir. Standart modda dizel yakıtı ile ölçülen değer ise %3.417 dir. Bu yük seviyesinde %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları standart veriden daha yüksek bir CO₂ emisyonu göstererek daha iyi bir yanma verimliliğine işaret etmektedir. Diğer ön enjeksiyon oranları ise, özellikle %30 oranı, biraz daha düşük emisyon değerleri sunarak yanma verimliliğinde hafif bir düşüşü göstermektedir.

Orta motor yükünde (%50), PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranlarında ölçülen CO₂ değerleri standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değerden daha yüksektir. Özellikle %10 ve %40 ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı için ölçülen %4.775 CO₂ emisyonundan daha yüksek CO₂ değerleri sunarak orta motor yüklerinde yanma verimliliğini artırdığını göstermiştir. Örneğin 10JP8D90 yakıtı için %10 ön enjeksiyon oranı ile elde edilen CO₂ değeri %6.23 ve 30JP8D70 yakıtı için %40 ön enjeksiyon oranında ölçülen CO₂ değeri ise %5.995 tir.

%75 motor yükünde, PPCI modda neredeyse tüm ön enjeksiyon oranları standart veriden daha yüksek CO₂ değerleri sağlamaktadır. %10 ve %20 ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek CO₂ değerleri sağlasa da ön enjeksiyon oranları içerisinde diğerlerinden daha düşük CO₂ değerleri sunmaktadır. Özellikle %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları en yüksek CO₂ emisyon değerlerini göstererek en eksiksiz yanmayı sağlamaktadır. Diğer oranlar, özellikle %20 oranı, daha düşük emisyonlar göstererek hafifçe düşük yanma verimliliğine işaret etmektedir.

Tam yükte (%100 motor yükü), tüm ön enjeksiyon oranları standart veriden daha yüksek CO₂ değerleri sunmaktadır. Özellikle %20 ön enjeksiyon oranı neredeyse tüm deney yakıtları için en yüksek CO₂ emisyonu değerlerini sağlamaktadır. %20 ön enjeksiyon oranı için CO₂ değerleri 10JP8D90 için %11.522, 30JP8D70 için %11.635, 50JP8D50 için %11.623 ve 100JP8D0 için %10.731 dir. Bu motor yükünde standart modda dizel yakıtı için ölçülen CO₂ emisyon değeri ise %9.491 dir. Tam yükte tüm ön enjeksiyon oranları daha eksiksiz bir yanma sağlamaktadır, özellikle %20 ön enjeksiyon oranının yanma verimliliğini daha fazla artırdığı görülmektedir.

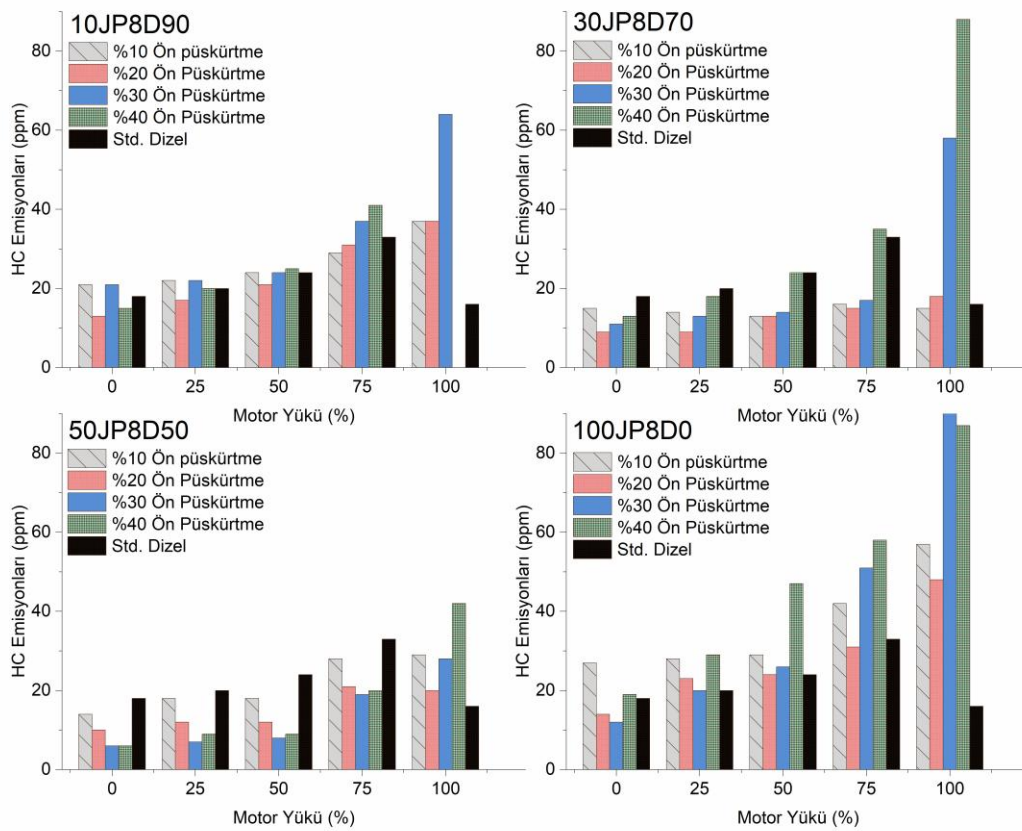
CO₂ emisyon verileri, farklı yük seviyelerinde ön enjeksiyon oranlarının yanma verimliliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. Düşük Yüklerde (%0 ve %25); Yüksüz durumda, yalnızca %10 ön enjeksiyon oranı dizel yakıtı göre daha yüksek CO₂ emisyonu göstererek hafif bir yanma verimliliği artışı sağlamaktadır. Diğer ön enjeksiyon oranları ise daha düşük emisyonlar sunarak verimlilik artışının sınırlı olduğunu göstermektedir. %25 yükte, %40 ve %10 ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtın sağladığı emisyon değeri ile benzer bir emisyon değeri sunarak benzer bir yanma verimliliğine işaret etmektedir. Diğer oranlar ise, özellikle %30 oranı, hafifçe düşük emisyonlar göstererek verimlilikte küçük bir düşüğe işaret etmektedir. %50 motor yükü için tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek CO₂ emisyonları sunmakta olup, özellikle 10JP8D90 yakıtında %10 ön enjeksiyon oranıyla %6.23 lük en yüksek değere ulaşarak %50 motor yükünde en verimli yanmayı sağlamaktadır. Bu durum, orta yüklerde yüksek oranlardaki ön enjeksiyonun yanma verimliliğini artırdığını göstermektedir. %75 motor yükü seviyesinde %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları en yüksek CO₂ emisyon değerlerini sağlayarak en eksiksiz yanmayı göstermektedir.

Tüm ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı ile elde edilen değerlerden daha iyi CO₂ değerleri sağlasa da, özellikle %20 oranı diğer ön enjeksiyon oranlarına göre daha düşük emisyon değerleri göstererek hafifçe düşük yanma verimliliğine işaret etmektedir. Tam yük durumunda ise tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre önemli ölçüde daha yüksek CO₂ emisyonları sunmaktadır. Özellikle %20 ön enjeksiyon oranı 30JP8D70 yakıtında %11.635 ile en yüksek değere ulaşarak en yüksek yanma verimliliğini sağlamaktadır. Tam yükte PPCI modda tüm oranlar daha eksiksiz yanma sağlamakta olup, standart modda çalışmaya göre yanma verimliliğini artırdığı anlaşılmaktadır.

Genel olarak, orta ve yüksek motor yüklerinde (%50, %75 ve %100) PPCI modda ön enjeksiyon uygulaması daha yüksek CO₂ emisyon değerleri sunarak yanma verimliliğini artırmaktadır. Düşük yüklerde ön enjeksiyonun CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde artırmadığı ve hatta bazı ön enjeksiyon oranları için standart modda dizel yakıtı göre biraz daha düşük emisyonlar sunduğu gözlemlenmiştir, bu da rölantide sınırlı bir verimlilik artışı sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, ön enjeksiyonun özellikle

yüksek yüklerde yanma verimliliğini artırarak daha eksiksiz bir yanma sağladığını göstermektedir.

Grafik 4.34'te PPCI modda dört farklı deney yakıtı için farklı motor yük seviyeleri, ön enjeksiyon oranları ve standart modda dizel yakıtı için hidrokarbon (HC) emisyon değişimi verilmiştir. HC emisyonları, eksik yanmanın bir göstergesi olup yanmamış hidrokarbonların salındığı anlamına gelir. Düşük HC emisyonları, genellikle daha eksiksiz bir yanmayı ve daha iyi yakıt verimliliğini gösterir (Y. Park et al., 2023).



Grafik 4.34 Farklı ön püskürtme oranları için hidrokarbon (HC) emisyonları

Düşük motor yüklerinde (%0 ve %25) en iyi HC emisyon değerleri %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında elde edilmiştir. 10JP8D90 ile 30JP8D70 yakıtlarında en düşük HC emisyonları %0 yük için %20 ön enjeksiyon oranında sırasıyla 13 ppm ve 9

ppm, %25 motor yükü için ise 17 ppm ve 9 ppm olarak ölçülmüştür. 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtlarında ise %30 ön enjeksiyon oranında %0 yük için 6 ppm ve 12 ppm olarak, %25 motor yükü için 7 ppm ve 20 ppm olarak ölçülmüştür. Standart modda dizel yakıtının HC emisyon değeri ise %0 yükte 18 ppm, %25 motor yükünde 20 ppm'dir. Bu değerlere göre, farklı yakıtlar için %20 ve %30 ön enjeksiyon oranları en düşük HC emisyonunu göstererek en eksiksiz yanmayı sağlamaktadır. Buna karşın, %10 ön enjeksiyon oranı yüksüz durumda 21 ppm, 15 ppm, 14 ppm ve 27 ppm HC emisyon değerleri ile en yüksek değerleri sunarken, %25 motor yükünde ise 22 ppm, 14 ppm, 28 ppm ve 18 ppm emisyon değerleri ile yine neredeyse standart modda dizel yakıtından ölçülen HC emisyonu değerine yakın hatta bazı durumlarda daha yüksek emisyon değerine sahip olup, standart modda dizel yakıtına göre daha az verimli bir yanma gerçekleştiğini göstermektedir.

%50 motor yükünde, yine %20 ön enjeksiyon oranı tüm deney yakıtları için standart modda ölçülen dizel yakıtı verisinden daha düşük HC emisyonu sağlarken, diğer ön enjeksiyon oranlarına göre de genellikle en düşük HC emisyonu verilerinin ölçüldüğü oran olmuştur. Orta motor yükünde %20 ön enjeksiyon oranı için deney yakıtlarından ölçülen HC emisyon değerleri 21 ppm, 13 ppm, 12 ppm ve 24 ppm iken standart modda dizel yakıtı ile ölçülen emisyon değeri 24 ppm'dir. %20 ön enjeksiyon oranı bu yük seviyesinde en eksiksiz yanmayı sağlamaktadır. %75 motor yükünde, deney yakıtlarına göre farklılık gösterse de en istikrarlı ve standart veriden daha düşük HC emisyon değerlerini %20 ön enjeksiyon oranı 31 ppm, 15 ppm, 21 ppm ve 31 ppm olarak sunmaktadır. Standart dizel yakıtın HC emisyonu ise 33 ppm'dir.

Tam yükte (%100 motor yükü), tüm ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı ile elde edilen emisyon değerinden daha yüksek HC emisyonu değerleri sunmuştur. Standart dizel yakıtın HC emisyonu ise 16 ppm'dir. Bu sonuçlara göre, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre oldukça yüksek HC emisyonlarına sahip olup, %30 ve %40 oranları en yüksek değerlere (64 ppm, 87 ppm, 88 ppm, 90 ppm) ulaşmaktadır. Bu durum, tam yükte yüksek ön enjeksiyon oranlarının eksik yanmaya yol açabileceğini göstermektedir.

Düşük motor yükleri için (%0 ve %25) %20 ile %30 ön enjeksiyon oranları en düşük HC emisyonunu göstererek en eksiksiz yanmayı sağlamaktadır. Ancak %10 ön

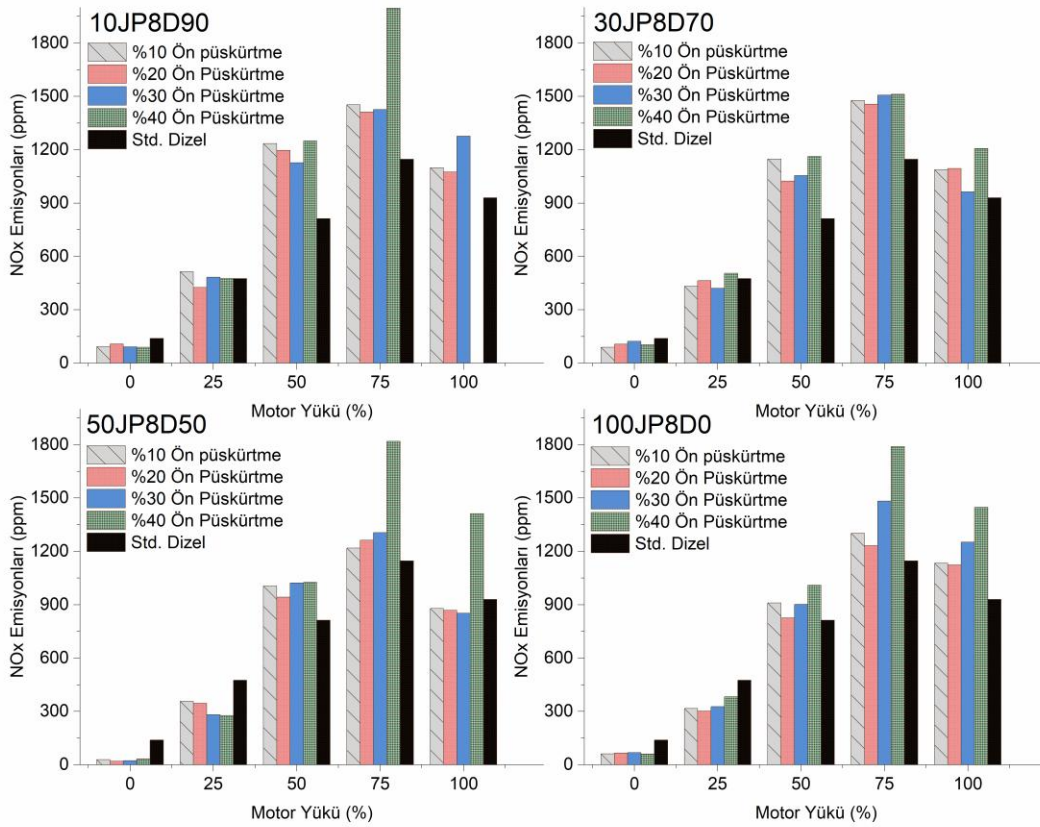
enjeksiyon oranı, dizel yakıtı göre daha yüksek HC emisyonuna sahip olup, bu oranın rölantide yanma verimliliğini artırmada etkili olmadığını göstermektedir. %50 motor yükü seviyesinde, %40 ön enjeksiyon oranı dışında tüm ön enjeksiyon oranları standart modda dizel yakıtı göre daha düşük HC emisyonları göstermektedir. %20 ön enjeksiyon oranı en düşük emisyon değerine sahip olup, en eksiksiz yanmayı sağlamaktadır. Bu durum, orta yüklerde ön enjeksiyon oranlarının yanma verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. %75 motor yükü için de en istikrarlı ve düşük HC emisyon değerlerine %20 ön enjeksiyon oranı sahip olup daha verimli bir yanma sağlamaktadır. Tam yükte ise tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre oldukça yüksek HC emisyonları göstermektedir. %30 ve %40 ön enjeksiyon oranları en yüksek emisyon değerlerine sahip olup eksik yanmaya işaret etmektedir. Bu durum, yüksek oranlardaki ön enjeksiyonun tam yükte eksik yanmaya yol açabileceğini düşündürmektedir.

Genel olarak, tam yük hariç diğer tüm motor yüklerinde ön enjeksiyon oranlarının, HC emisyonlarını azaltarak yanma verimliliğini artırdığı görülmektedir. Ancak tam yükte tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek HC emisyonları göstermekte olup, bu da eksik yanmaya işaret etmektedir. Daha düşük ön enjeksiyon oranları (%10 ve %20), düşük ve orta yüklerde daha verimli bir yanma sağlarken, yüksek oranlar tam yükte verimliliği düşürebilir. Bu bulgular, ön enjeksiyonun yanma verimliliğini artırabileceğini ancak tam yükte HC emisyonlarını artırmamak için dikkatli kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Grafik 4.35'te PPCI modda dört farklı deney yakıtı için farklı motor yük seviyeleri, ön enjeksiyon oranları ve standart modda dizel yakıtı için Azot oksit (NO_x) emisyon değişimi verilmiştir. NO_x emisyonları genellikle yüksek yanma sıcaklığı ve basınç koşullarında artar; bu durum daha eksiksiz bir yanmayı işaret etse de çevresel açıdan NO_x emisyonlarının zararlı etkileri nedeniyle endişe vericidir (Ma et al., 2021).

Yüksüz durumda, PPCI modda deney yakıtlarının tamamında, tüm ön enjeksiyon oranları için ölçülen değerler standart modda dizel yakıtı ile ölçülen (139 ppm) değerden daha düşüktür. Yüksüz durumda en düşük NO_x emisyonu değerleri 50JP8D50 yakıtı ile ölçülmüştür. Tüm ön enjeksiyon oranları için (%10, %20, %30 ve %40) yüksüz durumda ölçülen NO_x emisyonu değerleri sırası ile 29 ppm, 20 ppm, 23

ppm, 32 ppm dir. Bu değerler yüksüz durum için NO_x emisyonunda yaklaşık % 80-85 oranında iyileşme olduğunu göstermektedir. Diğer deney yakıtları (10JP8D90, 30JP8D70 ve 100JP8D0) için yüksüz durumda ölçülen en düşük NO_x değerleri ise sırasıyla 89 ppm, 89 ppm ve 60 ppm dir. Yüksüz durumda %10 ve % 20 ön enjeksiyon oranları en düşük değerleri sunmaktadır. Bu durum, rölantide daha düşük yanma sıcaklıklarının NO_x oluşumunu azalttığını düşündürmektedir.



Grafik 4.35 Farklı ön püskürtme oranları için azot oksit (NO_x) emisyonları

%25 motor yükünde de 10JP8D90 yakıtı için %10 ön enjeksiyon oranı ve 30JP8D70 yakıtı için %40 ön enjeksiyon oranı hariç diğer tüm deney kademelerinde ölçülen NO_x emisyonu değerleri standart modda elde edilen 475 ppm değerinden daha düşüktür. %25 motor yükü için deney yakıtlarında ölçülen en düşük NO_x emisyonu değerleri 426 ppm, 421 ppm, 282 ppm ve 302 ppm' dir. Bu yük seviyesinde, %20 ve

%30 ön enjeksiyon oranları en düşük emisyon değerlerini sunmaktadır. Bu sonuç, düşük yüklerde ön enjeksiyonun NO_x oluşumunu azaltmada etkili olabileceğini göstermektedir.

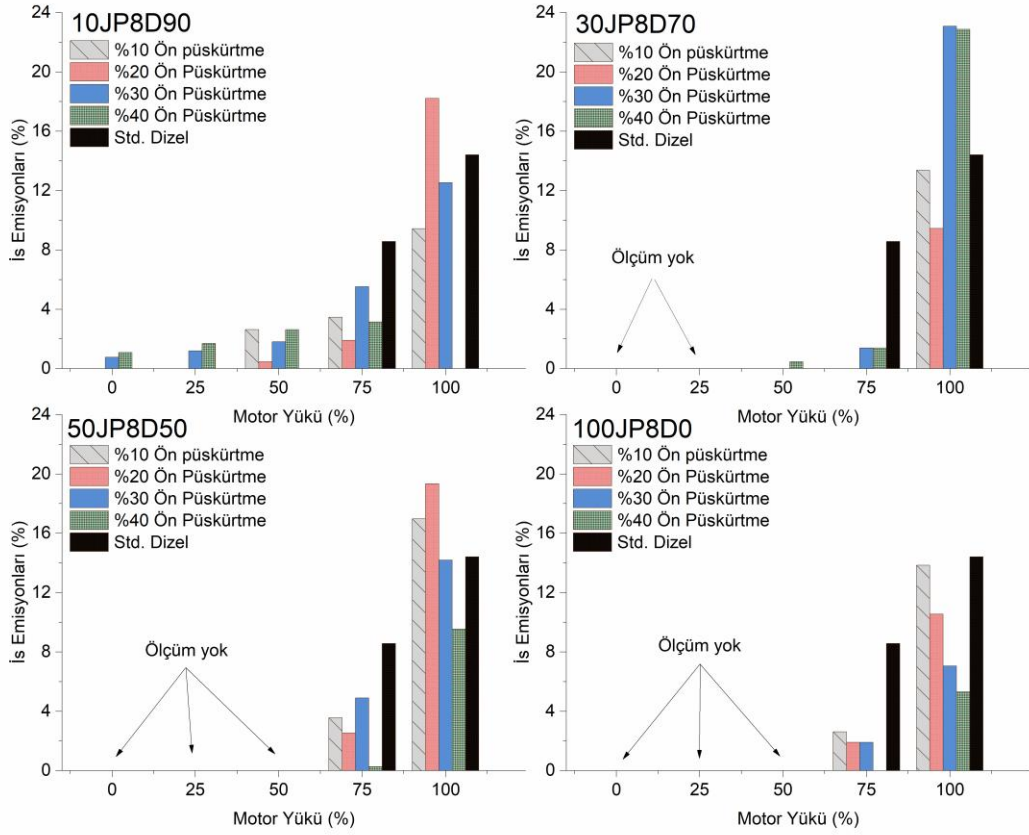
%50 ve %75 motor yüklerinde, PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranlarında NO_x emisyonları standart modda ölçülen NO_x emisyonundan daha yüksektir. %50 yük için standart veriye (813 ppm) en yakın değerleri sağlayan %20 ve %30 ön enjeksiyon oranlarında yakıtlar için ölçülen değerler sırasıyla 1127ppm, 1024ppm, 943 ppm ve 825 ppm'dir. Deney yakıtı içerisindeki JP8 oranının artışının da NO_x emisyonlarında azalma sağladığı görülmektedir. %75 motor yükünde tüm ön enjeksiyon oranları standart modda ölçülen değerden daha yüksek emisyon değerleri gösterirken en yük NO_x emisyonu değerlerine ise %40 ön enjeksiyon oranında ulaşılmaktadır. %75 motor yükü için standart modda dizel yakıtı ile ölçülen NO_x değeri 1147 ppm iken deney yakıtları ile %40 ön enjeksiyon oranı için ölçülen NO_x değerleri ise 1997ppm, 1512 ppm, 1819 ppm ve 1790 ppm'dir. Bu yük seviyelerinde, tüm oranlar dizel yakıtı göre daha yüksek NO_x emisyonu göstermekte olup, %40 oranı en yüksek emisyon değerine ulaşmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek ön enjeksiyon oranlarının yanma sıcaklıklarını ve basınçları önemli ölçüde artırarak NO_x oluşumunu tetikleyebileceğini düşündürmektedir (Gharehghani et al., 2019).

Tam yükte (%100 motor yükü), 50JP8D50 yakıtı hariç diğer deney yakıtlarında ön enjeksiyon oranlarının tamamında NO_x emisyonu, standart modda dizel yakıtı ile ölçülen değerden daha yüksek olarak ölçülmüştür. Bu, tam yükte ön enjeksiyonun yanma sıcaklıklarını aşırı artırarak NO_x emisyonlarını yükselttiğini göstermektedir. Deney yakıtına bağlı olarak %20 ve %30 ön enjeksiyon oranları diğer ön enjeksiyon oranlarına göre standart veriye daha yakın değerler sunmaktadır. Örneğin 30JP8D70 yakıtında %30 ön enjeksiyon oranı için ölçülen değer 964 ppm iken standart modda elde edilen NO_x emisyonu verisi 930 ppm'dir. 50JP8D50 yakıtında ise %40 ön enjeksiyon oranı hariç diğer tüm ön enjeksiyon oranlarında NO_x emisyonu standart modda dizel yakıtı ile elde edilen emisyon değerinden (930 ppm) daha düşüktür. Ön enjeksiyon oranları (%10, %20, %30 ve %40) için 50JP8D50 yakıtı ile elde edilen NO_x değerleri, 879 ppm, 868 ppm, 852 ppm ve 1412 ppm'dir.

Yüksüz durumda ve %25 yükte tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha düşük NO_x emisyonları göstermektedir; bu da yanma sıcaklıklarının düşük kaldığını ve NO_x oluşumunu azalttığını düşündürmektedir. Özellikle %20 ve %30 ön enjeksiyon oranları %25 yükte en düşük NO_x emisyonu sağlamaktadır. %50 yükte, yalnızca %20 ön enjeksiyon oranı dizel yakıtı yakın NO_x emisyonları göstermektedir; diğer tüm oranlar daha yüksek emisyonlar sunmaktadır. %40 ön enjeksiyon oranı en yüksek NO_x emisyonunu göstererek daha yüksek yanma sıcaklıklarına ve dolayısıyla artan NO_x oluşumuna işaret etmektedir. %75 yükte, tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek NO_x emisyonları sunmakta olup, 10JP8D90 yakıtı %40 ön enjeksiyon oranında 1997 ppm ile en yüksek değeri göstermektedir. Bu durum, özellikle yüksek oranlardaki ön enjeksiyonun yanma sıcaklıklarını ve basınçlarını artırarak NO_x oluşumunu tetiklediğini göstermektedir. Tam yükte (%100), tüm ön enjeksiyon oranları dizel yakıtı göre daha yüksek NO_x emisyonları göstermektedir. Özellikle 100JP8D0 yakıtında %40 ön enjeksiyon oranı 1448 ppm ile en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu durum, tam yük koşullarında ön enjeksiyonun yanma sıcaklıklarını aşırı derecede artırarak NO_x oluşumunu yükselttiğini göstermektedir.

Genel olarak, ön enjeksiyon özellikle orta ve yüksek yüklerde (%50 ve üzeri) NO_x emisyonlarını artırmaktadır. Özellikle yüksek oranlar (%30 ve %40), NO_x emisyonlarını belirgin şekilde artırmakta olup bu durum, yüksek yanma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Düşük yüklerde ise özellikle %20 ön enjeksiyon oranı NO_x emisyonlarını düşürerek daha düşük yanma sıcaklıkları sağlamaktadır. Bu bulgular, ön enjeksiyonun belirli koşullarda yanma sürecini iyileştirebileceğini ancak NO_x emisyonlarını azaltmak için dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Grafik 4.36'da PPCI modda farklı motor yük seviyeleri, ön enjeksiyon oranları ile dört farklı deney yakıtı için ve standart modda dizel yakıtı için elde edilen is (kurum) emisyonu değişimleri verilmiştir. İS emisyonları, özellikle yakıtın zengin olduğu durumlarda eksik yanma sonucu oluşur. Düşük is emisyonları, daha verimli yanmayı ve daha iyi hava-yakıt karışımını işaret eder (Song et al., 2024).



Grafik 4.36 Farklı ön püskürtme oranları için is emisyonları

Yüksüz ve düşük yük (%0 ve %25 motor yükü) durumunda PPCI modda 10JP8D90 yakıtı için %10, %20 ön enjeksiyon oranlarında ve standart modda is emisyonu oluşmazken %30 ve %40 ön enjeksiyon oranlarında ise is emisyonları sırasıyla yüksüz durumda %0.77 - %1.08, %25 motor yükünde ise %1.19, %1.7 olarak ölçülmüştür. 10JP8D90 yakıtı dışındaki tüm deney yakıtlarında ise PPCI modda tüm ön enjeksiyon oranları için ve standart modda dizel yakıtı için is emisyon değerleri %0 olarak kaydedilmiştir. Bu, düşük motor yüklerinde verimli yanma gerçekleştiğini ve is oluşumunun en aza indirildiğini hatta dört deney yakıtının üçü için is emisyonunun oluşmadığını göstermektedir. Bu yük seviyelerinde oksijen miktarı eksiksiz yanma için yeterlidir. %50 motor yükünde, 10JP8D90 yakıtında ön enjeksiyon oranları için (%10, %20, %30 ve %40) is emisyonu değerleri %2.63, %0.46, %1.81 ve %2.63 olarak

ölçülmüştür. Diğer üç deney yakıtında ise 30JP8D70 için %40 ön enjeksiyon oranında ölçülen %0.46 is emisyonu hariç diğer deney yakıtları ve ön enjeksiyon oranlarında is emisyonu oluşumuna rastlanmamıştır. %50 motor yükü için standart modda dizel yakıtı ile yapılan deneylerde de is emisyonu oluşumu görülmemiştir. Orta motor yükü koşullarında da hava-yakıt karışımının yeterli olduğu ve eksiksiz yanmanın sürdüğü anlaşılmaktadır.

%75 motor yükünde 10JP8D90 yakıtı ile %20 ön enjeksiyon oranında %1.91 olarak ölçülen is emisyonu bu yakıt için ölçülen en düşük emisyon değeridir. 30JP8D70 yakıtında ise %10 ve %20 ön enjeksiyon oranlarında is emisyonuna rastlanmamıştır. Diğer iki deney yakıtı için ise en düşük is emisyonlarına %40 ön enjeksiyon oranında %0.26 ve %0 değerleri ile ulaşılmıştır. Bu motor yükü için standart modda dizel yakıtı ile ölçülen is emisyonu %8.57'dir. Bu sonuçlar, %75 yükte tüm ön enjeksiyon oranlarının dizel yakıtı göre daha düşük is emisyonları gösterdiğini ve 10JP8D90 ile 30JP8D70 yakıtı için düşük ön enjeksiyon oranlarının (%10, %20), diğer iki deney yakıtı için ise yüksek (%40) ön enjeksiyon oranının en düşük değeri sağladığını göstermektedir. Bu durum, %75 motor yükünde ön enjeksiyon oranının optimizasyonu ile hava-yakıt karışımı iyileştirilerek is oluşumunun azaltılabileceğini göstermektedir.

Tam yükte (%100 motor yükü), deney yakıtlarının (10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50 ve 100JP8D0) ilk iki tanesinde sırasıyla %10 ön enjeksiyon oranında %9.44 ve %20 ön enjeksiyon oranında %9.45 olarak ölçülen değerler bu yakıtlar için en iyi is emisyonu değerleridir. Diğer iki deney yakıtı için ise %40 ön enjeksiyon oranında ölçülen %9.54 ve %5.31 değerleri bu yakıtlar için ölçülen en düşük is emisyonu değerlerini göstermektedir. Tam yük için standart modda elde edilen is emisyonu ise %14.41' dir. Bu veriler, tam yükte deney yakıtına ve ön enjeksiyon oranlarına bağlı olarak standart modda dizel yakıt ile elde edilen değere göre daha düşük is emisyonlarının sağlanabileceğini göstermektedir. Tam yük kademesi için 100JP8D0 yakıtı %40 ön enjeksiyon oranında %5.31 ile en düşük is emisyonu değerini sunmaktadır. Özellikle %40 oranında ön enjeksiyonun, yüksek yakıt talebine rağmen yanma verimliliğini artırarak is oluşumunu azalttığı görülmektedir.

Özetle, ön enjeksiyon, özellikle yüksek oranlarda (%40) kullanıldığında, yüksek ve tam yük koşullarında (%75 ve %100) is emisyonlarını etkili bir şekilde azaltmaktadır. Düşük yük koşullarında hem PPCI modda ön enjeksiyon hem de standart modda dizel yakıt düşük is emisyonları sergilemektedir; bu, düşük yük koşullarında yeterli oksijen bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, ön enjeksiyonun yüksek yük koşullarında hava-yakıt karışımını iyileştirerek is emisyonlarını azaltmada yararlı olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde yeni emisyon kısıtlamaları (Euro 6d, Euro 7 ve Tier 4 v.b.) motor üreticilerini yakıtın kimyasal yapısının geliştirilmesinin yanında bu yakıtın silindir içerisine nasıl, ne zaman ve hangi püskürtme basıncında alınması gerektiği konusunda da stratejiler geliştirmeye zorlamıştır. Yakıtın tutuşma gecikmesini kullanarak yakıt ve havanın yanma başlamadan önce homojen bir şekilde karışmasını amaçlayan PPCI, HCCI, RCCI v.b. düşük sıcaklıklı yanma (LTC) modlarında da, emisyonları kaynağında yok etmek için farklı yakıtlar ve yakıt karışımları ile birlikte ön enjeksiyon ve artçı enjeksiyon gibi çoklu enjeksiyon stratejileri, common rail gibi ultra yüksek enjeksiyon basınçları, ana enjeksiyonun birkaç kademeye bölüdüğü bölünmüş enjeksiyon stratejileri ve püskürtme debisinin sabit olmadığı esnek enjeksiyon zamanlaması gibi modern enjeksiyon stratejileri konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada kısmi ön karışimli yanma modunda (PPCI) çalışabilmesi için silindir içerisine yakıt enjekte eden temel enjeksiyon sistemine ilave olarak emme portuna bir elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilebilen port enjeksiyon sistemi yerleştirilmiş tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motoru kullanılmıştır. PPCI modda, farklı motor yüklerinde (%0, %25, %50, %75, %100) ve farklı ön enjeksiyon oranlarında (%10, %20, %30, %40) yapılan deneylerde elde edilen JP8 ve JP8-dizel karışım yakıtlarının (0JP8D100, 10JP8D90, 30JP8D70, 50JP8D50, 100JP8D0) yanma, motor performansı ve emisyon verileri standart modda dizel yakıtı ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

- Sonuçlar, silindir içi basıncın tüm yakıtlar için motor yüküyle arttığını göstermektedir. %50 motor yükünde, %10 ön enjeksiyon oranı ile 10JP8D90 yakıtı 71.72 bar'lık pik basınç değeri ile standart modda dizel yakıtından %7,7 daha yüksek pik basınç değerine ulaşmıştır. Karışım yakıtlarda JP8 oranının artırılması, tutuşma gecikmesinin uzaması ve dizel yakıtına göre düşük olan enerji yoğunluğu nedeniyle ulaşılan tepe basıncında azalmaya sebep olmaktadır. Ön enjeksiyon oranının artışı ise yüksek motor yüklerinde tepe basıncında iyileşme sağlamaktadır. Tam yükte %40 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 yakıtı ile 85.85 bar'lık en yüksek tepe basıncı elde edilmiştir (Std. dizel 69.88 bar).

- PPCI modunda, yakıt karışımındaki JP8 miktarının ve ön enjeksiyon oranının artırılmasının yanma şiddetini sönmülediği; bu durumun HRR profillerini genişleterek tepe HRR değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Yüksek motor yüklerinde geniş HRR profilleri daha net görülmektedir. 50JP8D50 yakıtı sahip olduğu düşük pik ve geniş HRR profilleri ile %0, %25 ve %100 motor yüklerinde özellikle NO_x emisyonlarında önemli bir iyileşme sağlamıştır.

- Motor yükündeki artışın sürtünme ve ısıl kayıpları oransal olarak azaltması sayesinde tüm yakıt türlerinde motor yükü ile birlikte termik verim yükselmektedir. %25 ve %50 motor yüklerinde standart dizel yakıtı yüksek setan sayısı ve enerji yoğunluğu ile en iyi performansı sergilerken, %75 ve %100 motor yüklerinde ise PPCI modunda 100JP8D0 yakıtının referans yakıtı yakın veya daha üstün verim değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ön enjeksiyon oranındaki artışın tutuşma gecikmesini uzatıp yanma hızını yavaşlatması nedeniyle verimi genel olarak düşürdüğü, JP8-dizel karışım yakıtların (özellikle 50JP8D50) ise yanma dinamiklerini olumsuz etkileyerek düşük performans değerlerini verdiği saptanmıştır. Baz dizel yakıtı en yüksek termal verimliliğe %50 motor yükünde %30.71 ile ulaşırken, 100JP8D0 yakıtı ise %10 ön enjeksiyon oranında, %28,72 ile baz dizel yakıtına en yakın değere ulaşan yakıt olmuştur. %75 ve %100 motor yüklerinde ise PPCI modda, %10 ön enjeksiyon oranında 100JP8D0 yakıtı standart modda dizel yakıtından sırasıyla %3 ve %1.9 daha yüksek termal verim değerlerine ulaşmıştır.

- Daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan dizel yakıtı tüm ön enjeksiyon oranları ve motor yüklerinde en düşük ÖYT' yi sağlayan yakıt olmuştur. PPCI modda 100JP8D0 yakıtı ise tüm durumlarda baz dizel yakıtına en yakın ÖYT değerlerine sahip olan yakıttır. JP8 yakıtının hem ısıl değer hem de yoğunluk olarak dizel yakıtından düşük değerlere sahip olması dikkate alındığında ÖYT farklarının çok az olduğu yüksek motor yüklerinde JP8 yakıtının daha verimli bir yanma sağladığı yorumu yapılabilir. ÖYT JP8-dizel karışım yakıtlarında referans yakıtı göre artış göstermiştir. Fakat PPCI modda karışım yakıtlar için %10 ön enjeksiyon oranı çoğu yük seviyesinde en düşük ÖYT değerleriyle öne çıkmıştır. 100JP8D0, %75 motor yükünde 282.32 g/kWh ÖYT değeri ile baz dizel yakıtından (283.366 g/kWh) daha düşük bir ÖYT göstermiştir. 50JP8D50 yakıtı ise en yüksek ÖYT değerleri ile en kötü performans sergileyen yakıt

olmuştur. %75 motor yükünde ise %40 ön enjeksiyon oranının 50JP8D50 ve 100JP8D0 yakıtları için yaklaşık % 5 ÖYT' de iyileşme sağladığı görülmüştür.

- PPCI modda deney yakıtları ile ölçülen CO emisyonu değerleri %0-%25 motor yüklerinde düşük silindir içi basınçlar ve JP8'in düşük setan sayısının yol açtığı eksik yanmaya bağlı olarak referans yakıtın CO emisyon değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Örneğin %25 motor yükünde standart modda dizel yakıtının CO emisyonu değerine (%0.033) en yakın CO emisyonu değeri %20 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 için ölçülen %0.055 tir ve standart veri ile arasında %0.022 lik bir fark bulunmaktadır. Ancak motor yükü arttıkça (%75-%100) artan türbülans ve sıcaklıkların etkisiyle yanma parametreleri iyileşmiş, özellikle %20 ön enjeksiyon oranında 10JP8D90 ve 30JP8D70 yakıtları ile baz dizel yakıtının CO verilerine yakın değerler elde edilmiş, hatta %75 motor yükünde 30JP8D70 yakıtı ile %20 ön enjeksiyon oranında elde edilen %0.056'lık CO emisyonu değeri referans yakıt için ölçülen CO emisyonu değerinden (%0.099) daha düşük olmuştur.

- Standart modda dizel yakıtı tam yükte tüm deney yakıtlarından daha düşük HC emisyonuna sahip yakıttır. Tam yük haricindeki tüm motor yüklerinde PPCI modda 30JP8D70, 50JP8D50 yakıtları ile en düşük HC emisyonu değerlerine ulaşılmıştır. 30JP8D70 yakıtında en düşük HC emisyonlarına %20 ön enjeksiyon oranı ile ulaşılırken, 50JP8D50 yakıtında ise en düşük HC emisyonlarına %30 ön enjeksiyon oranında ulaşılmıştır. Örneğin %50 motor yükünde ve %30 ön enjeksiyon oranında 50JP8D50 yakıtı ile ölçülen HC emisyonu 8 ppm iken referans yakıtın HC emisyonu değeri 24 ppm dir. Karışım yakıt içerisindeki JP8 oranı arttığında ön enjeksiyon oranındaki artış ile birlikte gelişmiş ön karışım, hava-yakıt homojenliğini iyileştirerek daha eksiksiz yanmaya ve daha az yanmamış hidrokarbona imkan vermektedir. Saf JP8 (100JP8D0) yakıtı ise düşük setan sayısı ve uzun tutuşma gecikmesi nedeniyle neredeyse tüm durumlarda en yüksek HC emisyonu salınımına sahip yakıt olmuştur.

- NO_x emisyonları tüm yakıt karışımları için motor yüküyle önemli ölçüde artmaktadır. Daha yüksek motor yükleri silindir içi sıcaklıkların ve basınçların yükselmesine neden olarak NO_x' in termal oluşumunu teşvik etmektedir. Yakıt karışımındaki JP8 içeriğinin artırılması gecikmeli ateşleme ve düşük tepe sıcaklıkları nedeniyle NO_x oluşumunu azaltmaktadır. 50JP8D50 yakıtı %75 yükte %10, %20 ve

%30 ön enjeksiyon oranlarında referans yakıtta en yakın ve JP8-dizel karışım yakıtları içerisinde en düşük NO_x emisyonları sergilerken, tam yükte ise baz dizel yakıtından %8.6 daha düşük (852 ppm) NO_x emisyonu sergilemiştir. Genel olarak, ön enjeksiyon orta ve yüksek yüklerde (%50 ve üzeri) NO_x emisyonlarını artırmaktadır. Özellikle yüksek oranlar (%30 ve %40), NO_x emisyonlarını belirgin şekilde artırmakta olup bu durum, yüksek yanma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Ön enjeksiyon belirli koşullarda yanma sürecini iyileştirebilir fakat NO_x emisyonlarını azaltmak için dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir.

- JP8 yakıtının tutuşma gecikmesinin daha uzun, tutuştuktan sonra yanma hızının daha yüksek olması is emisyonu oluşumunu azaltmaktadır. Düşük motor yüklerinde silindire alınan yakıt miktarının az olması ve homojen bir hava-yakıt karışımı tüm deney yakıtları için is emisyonlarını en düşük seviyede tutmaktadır. Yüksek motor yüklerinde ise silindir içerisinde oluşan yakıt açısından zengin bölgeler is emisyonlarının artış eğilimi göstermesine neden olmaktadır. %75 yükte, 30JP8D70 yakıtı, %10 ve %20 ön enjeksiyon oranında %0, %30 ön enjeksiyon oranında ise %1.39 ile en düşük is emisyonuna ulaşırken, baz dizel yakıtı için bu oran %8,57'dir. Tam yükte, 100JP8D0 yakıtı %30 ön enjeksiyon oranında %7.05 ile referans yakıttan (%14,41) önemli ölçüde daha düşük is emisyonu sağlamıştır.

Gelecekteki çalışmalar, farklı motor yüklerinde daha iyi motor performans karakteristiklerine ulaşmak ve düşük emisyon değerleri sağlamak için yakıtın, ön enjeksiyon zamanlamasının ve ön enjeksiyon oranlarının optimizasyonuna odaklanabilir.

KAYNAKLAR

- Alif, H. H., Sari, W. P., Sopha, B. M., Aprilana, A., Mulyani, Y. P., & Tiva W.D., H. (2022). Specific Fuel Consumption Prediction Model for Diesel Engines: A Preliminary Study. *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 0497–0501.
- Anastopoulos, G., Lois, E., Zannikos, F., Kalligeros, S., & Teas, C. (2002). HFRR lubricity response of an additized aviation kerosene for use in CI engines. *Tribology International*, 35(9), 599–604.
- Ansari, E., Poorghasemi, K., Khoshbakht Irdmousa, B., Shahbakhti, M., & Naber, J. (2016, October 17). *Efficiency and Emissions Mapping of a Light Duty Diesel - Natural Gas Engine Operating in Conventional Diesel and RCCI Modes*.
- Ashour, M. K., & Elwardany, A. E. (2020). Addition of two kerosene-based fuels to diesel–biodiesel fuel: Effect on combustion, performance and emissions characteristics of CI engine. *Fuel*, 269, 117473.
- Aydoğan, H., & Altınok, E. Ç. (2019). Effects of Using JP8-Diesel Fuel Mixtures in a Pump Injector Engine on Engine Performance. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 3, 106–111.
- Badra, J. A., Sim, J., Elwardany, A., Jaasim, M., Viollet, Y., Chang, J., Amer, A., & Im, H. G. (2016). Numerical Simulations of Hollow-Cone Injection and Gasoline Compression Ignition Combustion With Naphtha Fuels. *Journal of Energy Resources Technology*, 138(5).
- Benajes, J., García-Oliver, J. M., Novella, R., & Kolodziej, C. (2012). Increased particle emissions from early fuel injection timing Diesel low temperature combustion. *Fuel*, 94, 184–190.
- Benajes, J., Molina, S., García, A., & Monsalve-Serrano, J. (2015). Effects of direct injection timing and blending ratio on RCCI combustion with different low reactivity fuels. *Energy Conversion and Management*, 99, 193–209.
- Bharadwaz, Y. D., & Kumari, A. S. (2023). PCCI combustion of low-carbon alternative fuels: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(12), 5179–5207.

- Çelebi, S. (2021). *HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli) Bir Motorda Nafta Kullanımının Motor Performansına Ve Emisyonlara Etkisinin Araştırılması*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Chang, J., Viollet, Y., Amer, A., & Kalghatgi, G. (2013). *Fuel Economy Potential of Partially Premixed Compression Ignition (PPCI) Combustion with Naphtha Fuel*.
- Chen, G. (2016, October 9). Characterization of Variations in Cylinder Peak Pressure and its Position of High-Power Turbo-Charged Compression-Ignition Engines. *ASME 2016 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*.
- Cheng, X., Li, S., Yang, J., & Liu, B. (2016). Investigation into partially premixed combustion fueled with N-butanol-diesel blends. *Renewable Energy*, 86, 723–732.
- Çınar, C., Uyumaz, A., Polat, S., Yılmaz, E., Can, Ö., & Solmaz, H. (2016). Combustion and performance characteristics of an HCCI engine utilizing trapped residual gas via reduced valve lift. *Applied Thermal Engineering*, 100, 586–594.
- Cinar, C., Uyumaz, A., Solmaz, H., Sahin, F., Polat, S., & Yılmaz, E. (2015). Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels. *Fuel Processing Technology*, 130(C), 275–281.
- Dagaut, P., & Cathonnet, M. (2006). The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(1), 48–92.
- Dahham, R. Y., Wei, H., & Pan, J. (2022). Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. *Energies*, 15(17), 6222.
- Dave, H., Choksi, H., Siddiqui, M. I. H., Dixit, S., & Markiewicz, A. (2025). Investigation of diesel engine characteristics under pilot injection mode using diesel-DTBP blends. *Scientific Reports*, 15(1), 22988.
- Dempsey, A. B., Walker, N. R., Gingrich, E., & Reitz, R. D. (2014). Comparison of Low Temperature Combustion Strategies for Advanced Compression Ignition Engines with a Focus on Controllability. *Combustion Science and Technology*, 186(2), 210–241.

- Dev, S., B Chaudhari, H., Gothekar, S., Juttu, S., Harishchandra Walke, N., & Marathe, N. V. (2017, January 10). *Review on Advanced Low Temperature Combustion Approach for BS VI*.
- Düzcan, B. (2017). *Etanol-Dizel yakıt karışımlarının kısmi homojen dolgulu bir dizel motorun performansına etkisi. (Yüksek Lisans tezi)*. Sakarya Üniversitesi.
- Edenhofer, Pichs-Madruga, Sokona, Farahani, Kadner, Seyboth, Adler, Baum, Brunner, Eickemeier, Kriemann, Savolainen, Schlömer, v. S. and Z. (2014). *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- El Shenawy, E. A., Elkelawy, M., Bastawissi, H. A.-E., Panchal, H., & Shams, M. M. (2019). Comparative study of the combustion, performance, and emission characteristics of a direct injection diesel engine with a partially premixed lean charge compression ignition diesel engines. *Fuel*, 249, 277–285.
- Elkelawy, M., Bastawissi, H. A. E., El Shenawy, E. A., Shams, M. M., Panchal, H., Sadasivuni, K. K., & Choudhary, A. K. (2021). Influence of lean premixed ratio of PCCI-DI engine fueled by diesel/biodiesel blends on combustion, performance, and emission attributes; a comparison study. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100066.
- Erbakan, N. (1953). *“Diesel Motorlarında Tutuşma gecikmesi Hakkında Yeni Araştırmalar” Doçentlik tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Esfahanian, V., Salahi, M. M., Ghareghani, A., & Mirsalim, M. (2017). Extending the lean operating range of a premixed charged compression ignition natural gas engine using a pre-chamber. *Energy*, 119, 1181–1194.
- Fayad, M. A., Chaichan, M. T., Dhahad, H. A., Al-Amiery, A. A., & Wan Isahak, W. N. R. (2022). Reducing the Effect of High Sulfur Content in Diesel Fuel on NO_x Emissions and PM Characteristics Using a PPCI Mode Engine and Gasoline–Diesel Blends. *ACS Omega*, 7(42), 37328–37339.
- Fernandes, G., Fuschetto, J., Filipi, Z., Assanis, D., & McKee, H. (2007). Impact of military JP-8 fuel on heavy-duty diesel engine performance and emissions.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 221(8), 957–970.

Gainey, B., Gandolfo, J., & Lawler, B. (2024). Experimental Study of the Impact of Ethanol Content on Partially Premixed Combustion With Ethanol-Gasoline Blends. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 146(9).

Gharehghani, A., Asiaei, S., Khalife, E., Najafi, B., & Tabatabaei, M. (2019). Simultaneous reduction of CO and NO_x emissions as well as fuel consumption by using water and nano particles in Diesel–Biodiesel blend. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1164–1170. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.338>

Glassman, I., Yetter, R., and Glumac, N. (2015). *Combustion*. Elsevier.

Gürsoy, H. O. (2023). *Fuzel yağı kullanılan HCCI bir motorda çalışma parametrelerinin yanıt yüzey metodu ile optimizasyonu (Y.Lisans Tezi)*. Gazi Üniversitesi.

Han, X., Zheng, M., & Wang, J. (2013). Fuel suitability for low temperature combustion in compression ignition engines. *Fuel*, 109, 336–349.

Hänggi, S., Moretto, G., Albin, T., & Onder, C. (2021). The potential of heat release rate and cylinder pressure feedback control for conventional and premixed charge compression ignition combustion. *International Journal of Engine Research*, 22(9), 3080–3100.

Hanson, R. M., Kokjohn, S. L., Splitter, D. A., & Reitz, R. D. (2010). An Experimental Investigation of Fuel Reactivity Controlled PCCI Combustion in a Heavy-Duty Engine. *SAE International Journal of Engines*, 3(1), 2010-01-0864.

Hasegawa, R., & Yanagihara, H. (2003, March 3). *HCCI Combustion in DI Diesel Engine*.

Hildingsson, L., Persson, H., Johansson, B., Collin, R., Nygren, J., Richter, M., Aldén, M., Hasegawa, R., & Yanagihara, H. (2005, April 11). *Optical Diagnostics of HCCI and UNIBUS Using 2-D PLIF of OH and Formaldehyde*.

Hosseini, S. H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B., & Abbaszadeh-Mayvan, A. (2017). Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with

- carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends. *Renewable Energy*, *111*, 201–213.
- Huang, H., Liu, Q., Yang, R., Zhu, T., Zhao, R., & Wang, Y. (2015). Investigation on the effects of pilot injection on low temperature combustion in high-speed diesel engine fueled with n-butanol–diesel blends. *Energy Conversion and Management*, *106*, 748–758.
- Huang, H., Zhu, Z., Zhu, J., Lv, D., Pan, Y., Wei, H., & Teng, W. (2019). Experimental and numerical study of pre-injection effects on diesel-n-butanol blends combustion. *Applied Energy*, *249*, 377–391.
- Ibron, C., Jangi, M., Lonn, S., Matamis, A., Andersson, O., Tuner, M., Richter, M., & Bai, X.-S. (2019). *Effect of Injection Timing on the Ignition and Mode of Combustion in a HD PPC Engine Running Low Load*.
- Ickes, A. M., Bohac, S. V, & Assanis, D. N. (2009). Effect of fuel cetane number on a premixed diesel combustion mode. *International Journal of Engine Research*, *10*(4), 251–263.
- İklim Değişikliği Başkanlığı. (2024). *İklim değişikliği azaltım stratejisi ve eylem planı (2024-2030)*. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Inagaki, K., Fuyuto, T., Nishikawa, K., Nakakita, K., & Sakata, I. (2006, April 3). *Dual-Fuel PCI Combustion Controlled by In-Cylinder Stratification of Ignitability*.
- Işcan, B. (2020). ANN modeling for justification of thermodynamic analysis of experimental applications on combustion parameters of a diesel engine using diesel and safflower biodiesel fuels. *Fuel*, *279*, 118391.
- Jiagiang, E., Xu, W., Ma, Y., Tan, D., Peng, Q., Tan, Y., & Chen, L. (2022). Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review. *Fuel Processing Technology*, *235*, 107373.
- Johansson, B. (2007). Homogeneous charge compression ignition: the future of IC engines? *International Journal of Vehicle Design*, *44*(1/2), 1.
- Kaiadi, M., Johansson, B., Lundgren, M., & Gaynor, J. A. (2013). Sensitivity Analysis Study on Ethanol Partially Premixed Combustion. *SAE International Journal of Engines*, *06*(1), 2013-01–0269.

- Kalghatgi, G. T., Risberg, P., & Angstrom, H.-E. (2007, January 23). *Partially Pre-Mixed Auto-Ignition of Gasoline to Attain Low Smoke and Low NO_x at High Load in a Compression Ignition Engine and Comparison with a Diesel Fuel*.
- Kalghatgi, G. T., Risberg, P., & Ångström, H.-E. (2006, October 16). *Advantages of Fuels with High Resistance to Auto-ignition in Late-injection, Low-temperature, Compression Ignition Combustion*.
- Kaltschmitt, T., & Deutschmann, O. (2012). Fuel Processing for Fuel Cells. *Advances in Chemical Engineering*, 41, 1–64.
- Kang, R., Zhou, L., Hua, J., Feng, D., Wei, H., & Chen, R. (2019). Experimental investigation on combustion characteristics in dual-fuel dual-injection engine. *Energy Conversion and Management*, 181, 15–25.
- Kannan, K. (2016). An experimental investigation of low temperature combustion regimes in a light duty engine [Michigan Technological University].
- Khoa, N. X., & Lim, O. (2019). The effects of combustion duration on residual gas, effective release energy, engine power and engine emissions characteristics of the motorcycle engine. *Applied Energy*, 248, 54–63.
- Killingsworth, N. J. (2007). *HCCI engine control and optimization*. UC San Diego.
- Kim, D., & Bae, C. (2017). Application of double-injection strategy on gasoline compression ignition engine under low load condition. *Fuel*, 203, 792–801.
- Kim, K., Wang, Z., Wang, B., Shuai, S., Yang, H., & Bae, C. (2014). Load expansion of naphtha multiple premixed compression ignition (MPCI) and comparison with partially premixed compression ignition (PPCI) and conventional diesel combustion (CDC). *Fuel*, 136, 1–9.
- Kim, M. Y., Lee, J. H., & Lee, C. S. (2008). Combustion Characteristics and NO_x Emissions of a Dimethyl-Ether-Fueled Premixed Charge Compression Ignition Engine. *Energy & Fuels*, 22(6), 4206–4212.
- Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., & Aiyoshizawa, E. (2001, March 5). *Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards*.

- Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, S., & Enomoto, Y. (1999, October 25). *New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines*.
- Kiplimo, R., Tomita, E., Kawahara, N., & Yokobe, S. (2012). Effects of spray impingement, injection parameters, and EGR on the combustion and emission characteristics of a PCCI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 37, 165–175.
- Klos, D. T., & Kokjohn, S. L. (2016). Investigation of the Effect of Injection and Control Strategies on Combustion Instability in Reactivity-Controlled Compression Ignition Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 138(1).
- Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A., & Reitz, R. D. (2009). Experiments and Modeling of Dual-Fuel HCCI and PCCI Combustion Using In-Cylinder Fuel Blending. *SAE International Journal of Engines*, 2(2), 2009-01–2647.
- Kokjohn, S. L., Musculus, M. P. B., & Reitz, R. D. (2015). Evaluating temperature and fuel stratification for heat-release rate control in a reactivity-controlled compression-ignition engine using optical diagnostics and chemical kinetics modeling. *Combustion and Flame*, 162(6), 2729–2742.
- Kook, S., Bae, C., Miles, P. C., Choi, D., & Pickett, L. M. (2005). *The Influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-Temperature Diesel Combustion and Emissions*.
- Labeckas, G., Slavinskas, S., & Vilutiene, V. (2015). Effect of the Cetane Number Improving Additive on Combustion, Performance, and Emissions of a DI Diesel Engine Operating on JP-8 Fuel. *Journal of Energy Engineering*, 141(2).
- Labeckas, G., Slavinskas, S., & Vilutienė, V. (2015). The effect of aviation Fuel JP-8 and diesel fuel blends on engine performance and exhaust emissions. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 22(2), 129–138.
- Lakshminarayanan, P. A., & Aghav, Y. V. (2010). *Hydrocarbons from DI Diesel Engines* (pp. 137–146).
- Lee, J., & Bae, C. (2011). Application of JP-8 in a heavy duty diesel engine. *Fuel*,

90(5), 1762–1770.

- Lee, J., Lee, J., Chu, S., Choi, H., & Min, K. (2015). Emission reduction potential in a light-duty diesel engine fueled by JP-8. *Energy*, 89, 92–99.
- Lee, J., Oh, H., & Bae, C. (2012). Combustion process of JP-8 and fossil Diesel fuel in a heavy duty diesel engine using two-color thermometry. *Fuel*, 102, 264–273.
- Lewander, C. M., Johansson, B., & Tunestal, P. (2011). *Extending the Operating Region of Multi-Cylinder Partially Premixed Combustion using High Octane Number Fuel*.
- Li, Y., Jia, M., Xu, L., & Bai, X. S. (2020). Multiple-objective optimization of methanol/diesel dual-fuel engine at low loads: A comparison of reactivity controlled compression ignition (RCCI) and direct dual fuel stratification (DDFS) strategies. *Fuel*, 262, 116673.
- Liang, X., Zheng, Z., Zhang, H., Wang, Y., & Yu, H. (2019). A Review of Early Injection Strategy in Premixed Combustion Engines. *Applied Sciences*, 9(18), 3737.
- Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2017). Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian Mountains. In *Scientific Reports* (Vol. 7, Issue 1).
- Liu, B., Cheng, X., Liu, J., & Pu, H. (2018). Investigation into particle emission characteristics of partially premixed combustion fueled with high n-butanol-diesel ratio blends. *Fuel*, 223, 1–11.
- Liu, H., Tang, Q., Yang, Z., Ran, X., Geng, C., Chen, B., Feng, L., & Yao, M. (2019). A comparative study on partially premixed combustion (PPC) and reactivity controlled compression ignition (RCCI) in an optical engine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(4), 4759–4766.
- Liu, H., Wang, Z., Li, B., Wang, J., & He, X. (2016). Exploiting new combustion regime using multiple premixed compression ignition (MPCI) fueled with gasoline/diesel/PODE (GDP). *Fuel*, 186, 639–647.
- Liu, H., Xu, J., Zheng, Z., Li, S., & Yao, M. (2013). Effects of fuel properties on

- combustion and emissions under both conventional and low temperature combustion mode fueling 2,5-dimethylfuran/diesel blends. *Energy*, 62, 215–223.
- Lonn, S., Matamis, A., Tuner, M., Richter, M., & Andersson, O. (2017). *Optical Study of Fuel Spray Penetration and Initial Combustion Location under PPC Conditions*.
- Lundgren, M., (2016). *Avhandling*. Lund University.
- Ma, C., Song, E. Z., Yao, C., Long, Y., Ding, S. L., & Xu, D. (2021). Analysis of PPCI mode and multi-objective comprehensive optimization for a dual-fuel engine. *Fuel*, 303, 121296.
- Manente, V., Johansson, B., Tunestal, P., & Cannella, W. J. (2010). *Influence of Inlet Pressure, EGR, Combustion Phasing, Speed and Pilot Ratio on High Load Gasoline Partially Premixed Combustion*.
- Manimaran, R.; Thundil, R. . K. R. K. S. K. (2013). Premixed Charge Compression Ignition in a Direct Injection Diesel Engine using Computational Fluid Dynamics. *WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER*, 8(1).
- Maurice, L. Q., Lander, H., Edwards, T., & Harrison, W. E. (2001). Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective. *Fuel*, 80(5), 747–756.
- Murcak, A. (2012). *Farklı yakıt karışımlarının ve çalışma parametrelerinin homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motor performansına etkileri. (Doktora tezi)*. Sakarya Üniversitesi.
- Musculus, M. P. B., Miles, P. C., & Pickett, L. M. (2013). Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(2–3), 246–283.
- Nidhi Chaudhary, K. A. S. (2022). Experimental Investigation of Combustion Characteristics of a Spark Ignition Engine Fueled with Methanol-Gasoline Blends (M15 and M85). *International Journal Of Automotive Science and Technology*, 6(1), 54–60.
- Nieman, D. E., Dempsey, A. B., & Reitz, R. D. (2012). Heavy-Duty RCCI Operation Using Natural Gas and Diesel. *SAE International Journal of Engines*, 5(2), 2012-01–0379.

- Ning, L., Duan, Q., Kou, H., & Zeng, K. (2020). Parametric study on effects of methanol injection timing and methanol substitution percentage on combustion and emissions of methanol/diesel dual-fuel direct injection engine at full load. *Fuel*, 279, 118424.
- Olanrewaju, F. O., Li, H., Aslam, Z., Hammerton, J., & Lovett, J. C. (2022). Analysis of the effect of syngas substitution of diesel on the Heat Release Rate and combustion behaviour of Diesel-Syngas dual fuel engine. *Fuel*, 312, 122842.
- Organisation, W. H. (2019). *World Health Organisation - How air pollution is destroying our health,*". <https://www.who.int/air-pollution/news-and-events/how-air-pollution-is-destroying-our-health>.
- Pachiannan, T., Zhong, W., Rajkumar, S., He, Z., Leng, X., & Wang, Q. (2019). A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies. *Applied Energy*, 251, 113380.
- Pandey, A. K., Nandgaonkar, M., Varghese, A., Sonawane, C., Kohil, R., & Warke, A. (2023, April 11). *Comparison and Evaluation of Engine Wear, Engine Performance, NOx Reduction and Nanoparticle Emission by using Gasoline, JP-8, Karanja Oil Methyl Ester Biodiesel, and Diesel in a Military 720 kW, Heavy-Duty CIDI Engine Applying EGR with Turbo Charging.*
- Papagiannakis, R. G., & Hountalas, D. T. (2003). Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 353–365.
- Park, H., Shim, E., & Bae, C. (2019). Improvement of combustion and emissions with exhaust gas recirculation in a natural gas-diesel dual-fuel premixed charge compression ignition engine at low load operations. *Fuel*, 235, 763–774.
- Park, S. W., & Reitz, R. D. (2007). Numerical study on the low emission window of homogeneous charge compression ignition diesel combustion. *Combustion Science and Technology*, 179(11), 2279–2307.
- Park, Y., Moses-DeBusk, M., Sluder, S. S., & Huff, S. P. (2023). Impact of Biofuel Blending on Hydrocarbon Speciation and Particulate Matter from a Medium-Duty Multimode Combustion Strategy. *Energies*, 16(15), 5735.

- Polat, S. (2020). An experimental investigation on combustion, performance and ringing operation characteristics of a low compression ratio early direct injection HCCI engine with ethanol fuel blends. *Fuel*, 277, 118092.
- Putrasari, Y., & Lim, O. (2017). A study on combustion and emission of GCI engines fueled with gasoline-biodiesel blends. *Fuel*, 189, 141–154.
- Ramesh, N., & Mallikarjuna, J. M. (2016). Evaluation of in-cylinder mixture homogeneity in a diesel HCCI engine – A CFD analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 917–925.
- Reitz, R. D. (2013). Directions in internal combustion engine research. *Combustion and Flame*, 160(1), 1–8.
- Reitz, R. D., & Duraisamy, G. (2015). Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 12–71.
- Reitz, R. D., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T., Kokjohn, S., Moriyoshi, Y., Agarwal, A., Arcoumanis, D., Assanis, D., Bae, C., Boulouchos, K., Canakci, M., Curran, S., Denbratt, I., Gavaises, M., Guenther, M., Hasse, C., Huang, Z., Ishiyama, T., ... Zhao, H. (2020). IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, 21(1), 3–10.
- Rezaei, S. Z., Zhang, F., Xu, H., Ghafourian, A., Herreros, J. M., & Shuai, S. (2013). Investigation of two-stage split-injection strategies for a Dieseline fuelled PPCI engine. *Fuel*, 107, 299–308.
- Şanlı, A., Yılmaz, İ. T., & Öz, A. (2024). Effects of piton coating on combustion stability in a CRDI diesel engine run under dual-fuel mode. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 44(1), 191–205.
- Saxena, M. R., Maurya, R. K., & Mishra, P. (2021). Assessment of performance, combustion and emissions characteristics of methanol-diesel dual-fuel compression ignition engine: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(5), 638–680.
- Sellnau, M., Foster, M., Hoyer, K., Moore, W., Sinnamon, J., & Husted, H. (2014). Development of a Gasoline Direct Injection Compression Ignition (GDICI) Engine.

- SAE International Journal of Engines*, 7(2), 2014-01–1300.
- Senturk Acar, M., & Arslan, O. (2017). Exergo-economic Evaluation of a new drying system Boosted by Ranque-Hilsch vortex tube. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1–16.
- Shamun, S; Novakovic, M; Malmborg, V. B.; Preger, C; Shen, M., & Messing, M. E.; Pagels, Joakim; Tunér, Martin; Tunestål, P. (2017). *Detailed characterization of particulate matter in alcohol exhaust emissions*.
- Shamun, S., Zincir, B., Shukla, P., Garcia Valladolid, P., Verhelst, S., & Tunér, M. (2018). Quantification and Analysis of the Charge Cooling Effect of Methanol in a Compression Ignition Engine Utilizing PPC Strategy. *Volume 1: Large Bore Engines; Fuels; Advanced Combustion*.
- Sharma, A., Kumar, P., Sandhu, S. S., & Singh, M. (2023). Experimental investigation into the effects of Argemone biodiesel/diesel blends on cyclic variations in a multi-cylinder CRDI engine. *Clean Energy*, 7(2), 363–374.
- Shen, M., Tuner, M., & Johansson, B. (2013). *Close to Stoichiometric Partially Premixed Combustion -The Benefit of Ethanol in Comparison to Conventional Fuels*.
- Singh, R., Han, T., Fatouraie, M., Mansfield, A., Wooldridge, M., & Boehman, A. (2021). Influence of fuel injection strategies on efficiency and particulate emissions of gasoline and ethanol blends in a turbocharged multi-cylinder direct injection engine. *International Journal of Engine Research*, 22(1), 152–164.
- Sluder, C. S., & Wagner, R. M. (2006). *An Estimate of Diesel High-Efficiency Clean Combustion Impacts on FTP-75 Aftertreatment Requirements*.
- Solaymani, S., & Botero, J. (2025). Reducing Carbon Emissions from Transport Sector: Experience and Policy Design Considerations. *Sustainability*, 17(9), 3762.
- Solmaz, H.; İpci, D. (2020). RCCI Bir Motorda Farklı Giriş Sıcaklıkları İçin Direkt Enjeksiyon Zamanlaması İle Yanma Fazının Kontrolü. *J. of Thermal Science and Technology*, 40(2), 267–269.
- Song, Z., Li, Z., & Liu, Z. (2024). Comparison of Emission Properties of Sustainable

- Aviation Fuels and Conventional Aviation Fuels: A Review. *Applied Sciences*, 14(13), 5484.
- Stiesch, G. (2013). *Modeling Engine Spray and Combustion Processes*. Springer.
- Stoffels, H. (2008). On the impact of the pressure rise rate on piston and connecting rod dynamics in internal combustion engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 222(1), 31–48.
- Tree, D. R., & Svensson, K. I. (2007). Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 272–309.
- Trinko, D., Horesh, N., Porter, E., Dunckley, J., Miller, E., & Bradley, T. (2023). Transportation and electricity systems integration via electric vehicle charging-as-a-service: A review of techno-economic and societal benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175.
- Truedsson, I. (2014). *The HCCI Fuel Number - Measuring and Describing Auto-ignition for HCCI Combustion Engines*. Lund University.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*.
- UN. (2019). *United Nations - Global Issues - Climate Change*. <http://www.un.org/en/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.
- Uyumaz, A. (2015). An experimental investigation into combustion and performance characteristics of an HCCI gasoline engine fueled with n-heptane, isopropanol and n-butanol fuel blends at different inlet air temperatures. *Energy Conversion and Management*, 98, 199–207.
- Verma, G., Sharma, H., Thipse, S. S., & Agarwal, A. K. (2016). Spark assisted premixed charge compression ignition engine prototype development. *Fuel Processing Technology*, 152, 413–420.
- Wagner, R. M., Green, J. B., Dam, T. Q., Edwards, K. D., & Storey, J. M. (2003). *Simultaneous Low Engine-Out NOx and Particulate Matter with Highly Diluted Diesel Combustion*.
- Wang, Z., & Li, L. (2021). Effect of Pre-Injection on Combustion and Emission

- Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel/Methanol/n-Butanol Blended Fuel. *Processes*, 10(1), 60.
- World Health Organisation (WHO). (2019). *WHO - Sustainable development - Transport - Health Risks - Air pollution*,. <https://www.who.int/sustainable-development/transport/health-risks/air-pollution/en/>.
- Xu, M., Cheng, W., Zhang, H., An, T., & Zhang, S. (2016). Effect of diesel pre-injection timing on combustion and emission characteristics of compression ignited natural gas engine. *Energy Conversion and Management*, 117, 86–94.
- Yamık, H.; Calam, A.; Solmaz, H.; İçingür, Y. (2013). Effects of diesel and JP-8 aviation fuel blends on engine performance and exhaust emissions in a single cylinder diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28, 787–793.
- Yang, C., & Zhao, H. (2013). Naturally aspirated and boosted controlled auto-ignition combustion with positive valve overlap in a four-stroke gasoline engine. *International Journal of Engine Research*, 14(5), 496–511.
- Yousefi, A., Guo, H., Dev, S., Liko, B., & Lafrance, S. (2021). Effect of pre-main-post diesel injection strategy on greenhouse gas and nitrogen oxide emissions of natural gas/diesel dual-fuel engine at high load conditions. *Fuel*, 302, 121110.
- Zhang, F., Yu, R., & Bai, X. S. (2015). Direct numerical simulation of PRF70/air partially premixed combustion under IC engine conditions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3), 2975–2982.
- Zhang, J., Liu, G., & Xu, H. (2025). Research on combustion and emissions of heavy duty diesel engines under low-speed and low-load conditions in low temperature environments. *PLOS ONE*, 20(2), e0318933.
- Zhang, Q., Liu, J., Li, J., Ren, X., Li, M., & Li, Z. (2025). Effects of air/fuel ratio and diesel injection quantity on the combustion and emission characteristics of a pilot ignited direct injection natural gas engine operating at partially premixed combustion mode. *Fuel*, 381, 133501.
- Zhao, H. (Ed.). (2007). *Hcci and Cai Engines for the Automotive Industry* (1st ed.). Woodhead Publishing.

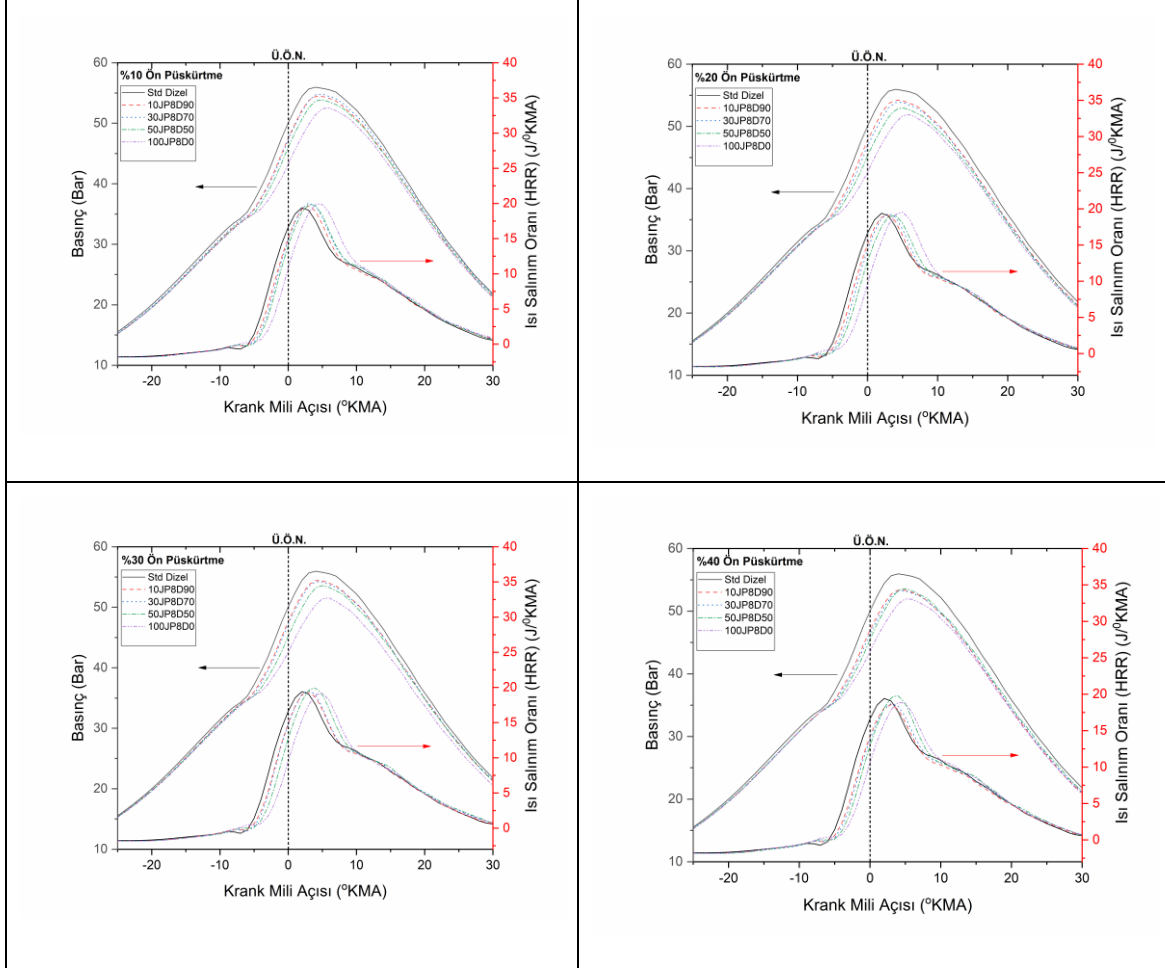
- Zheng, J., & Caton, J. A. (2012). Second law analysis of a low temperature combustion diesel engine: Effect of injection timing and exhaust gas recirculation. *Energy*, 38(1), 78–84.
- Zheng, Z., Yue, L., Liu, H., Zhu, Y., Zhong, X., & Yao, M. (2015). Effect of two-stage injection on combustion and emissions under high EGR rate on a diesel engine by fueling blends of diesel/gasoline, diesel/n-butanol, diesel/gasoline/n-butanol and pure diesel. *Energy Conversion and Management*, 90, 1–11.
- Zhenkan Wang. (2018). *Development and application of laser diagnostics - from laboratory devices towards practical combustion engines*. Lund University.
- Zhou, A., Jin, H., Cao, W., Pang, M., Li, Y., & Zhu, C. (2022). Influence of Pilot Injection on Combustion Characteristic of Methanol–Diesel Dual-Fuel Engine. *Energies*, 15(10), 3578.
- Zhu, H., Bohac, S. V., Nakashima, K., Hagen, L. M., Huang, Z., & Assanis, D. N. (2013). Effect of biodiesel and ethanol on load limits of high-efficiency premixed low-temperature combustion in a diesel engine. *Fuel*, 106, 773–778.

EKLER

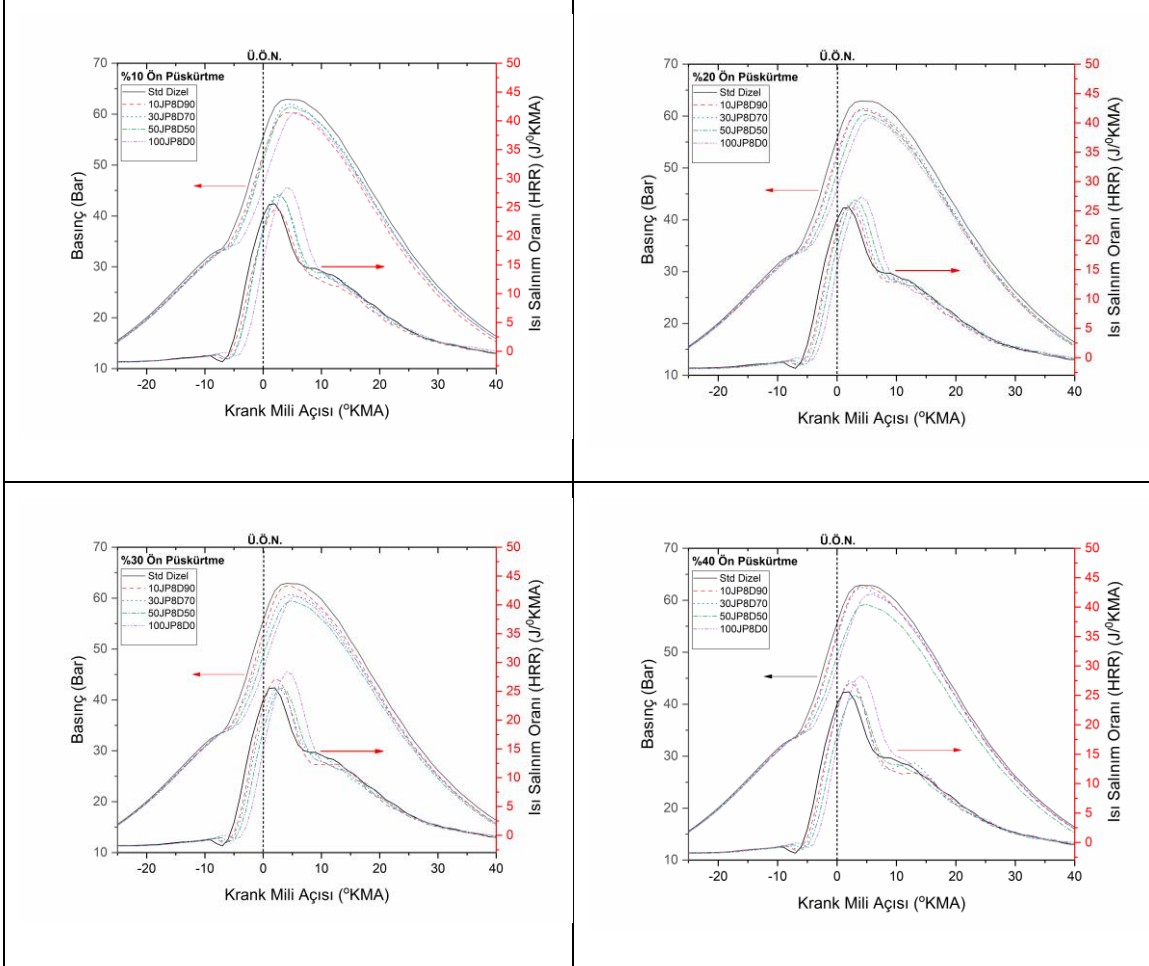
EK-1 Deneylerin yapıldığı motor test laboratuvarı ve deney düzeneği



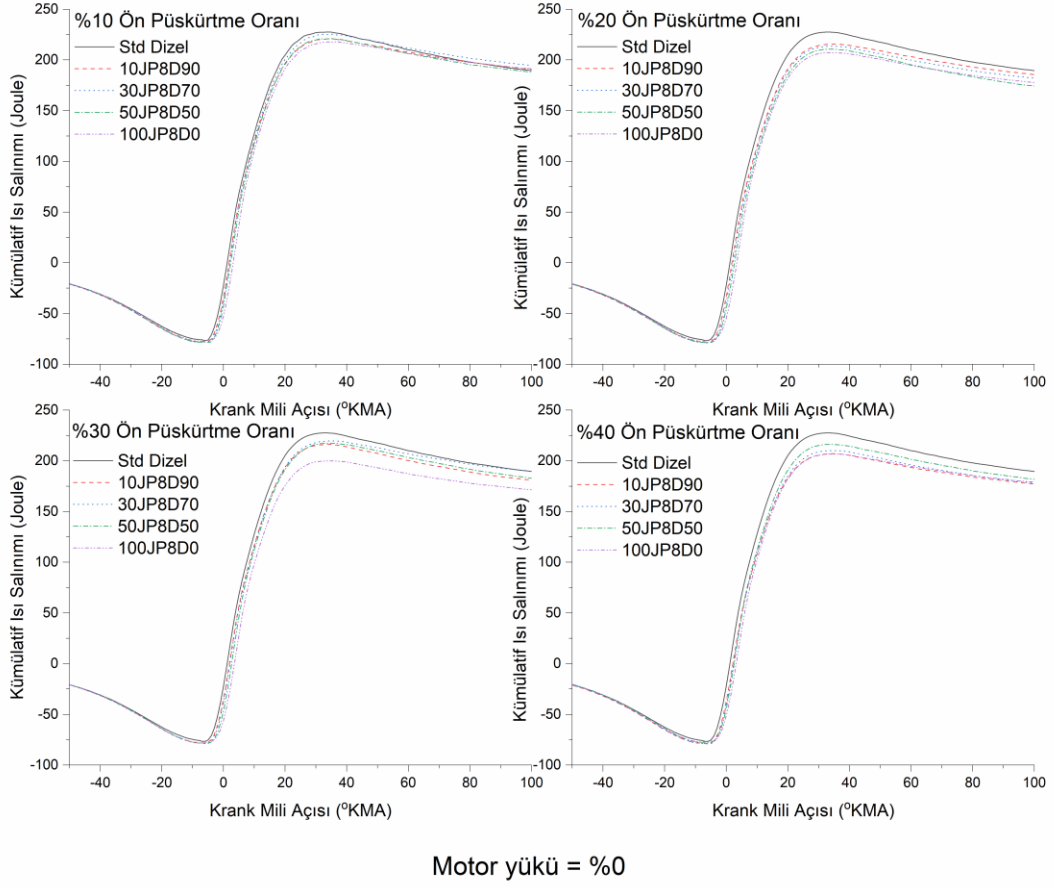
EK-2 Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınımı oranları (HRR)



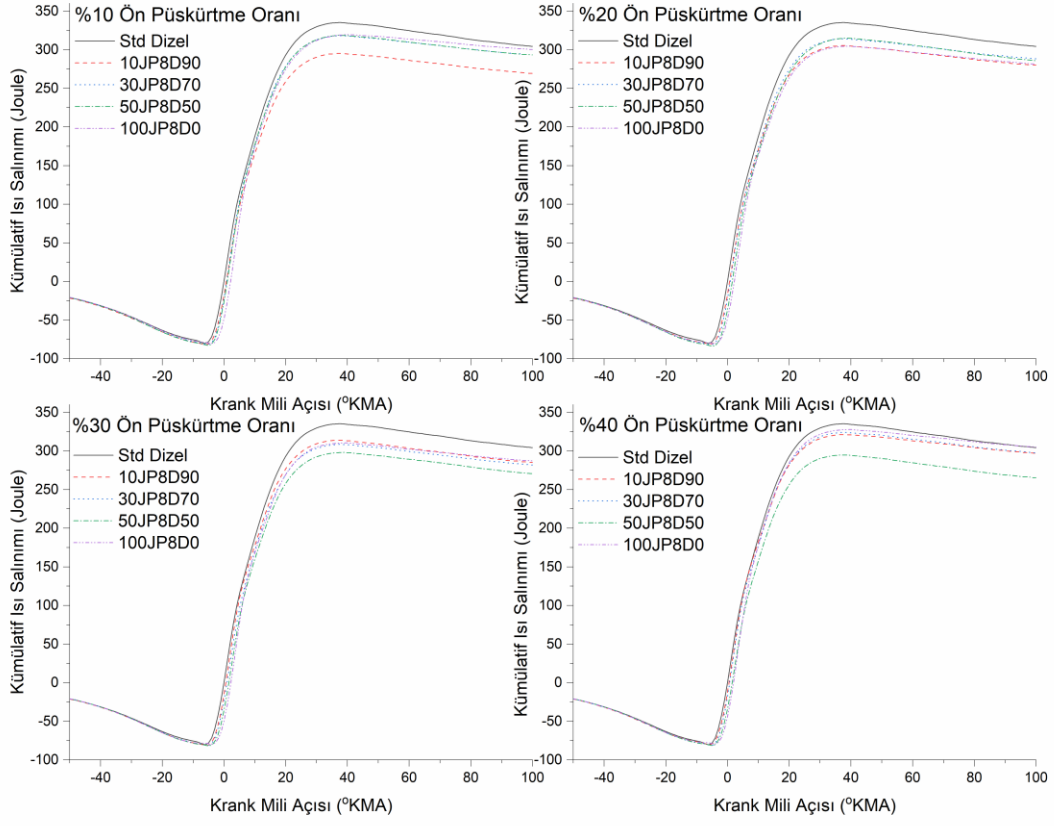
EK-3 Motor %25 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışımları için silindir içi basınçlar ve ısı salınımı oranları (HRR)



EK-4 Motor yuksüz durumda çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı (CHR)

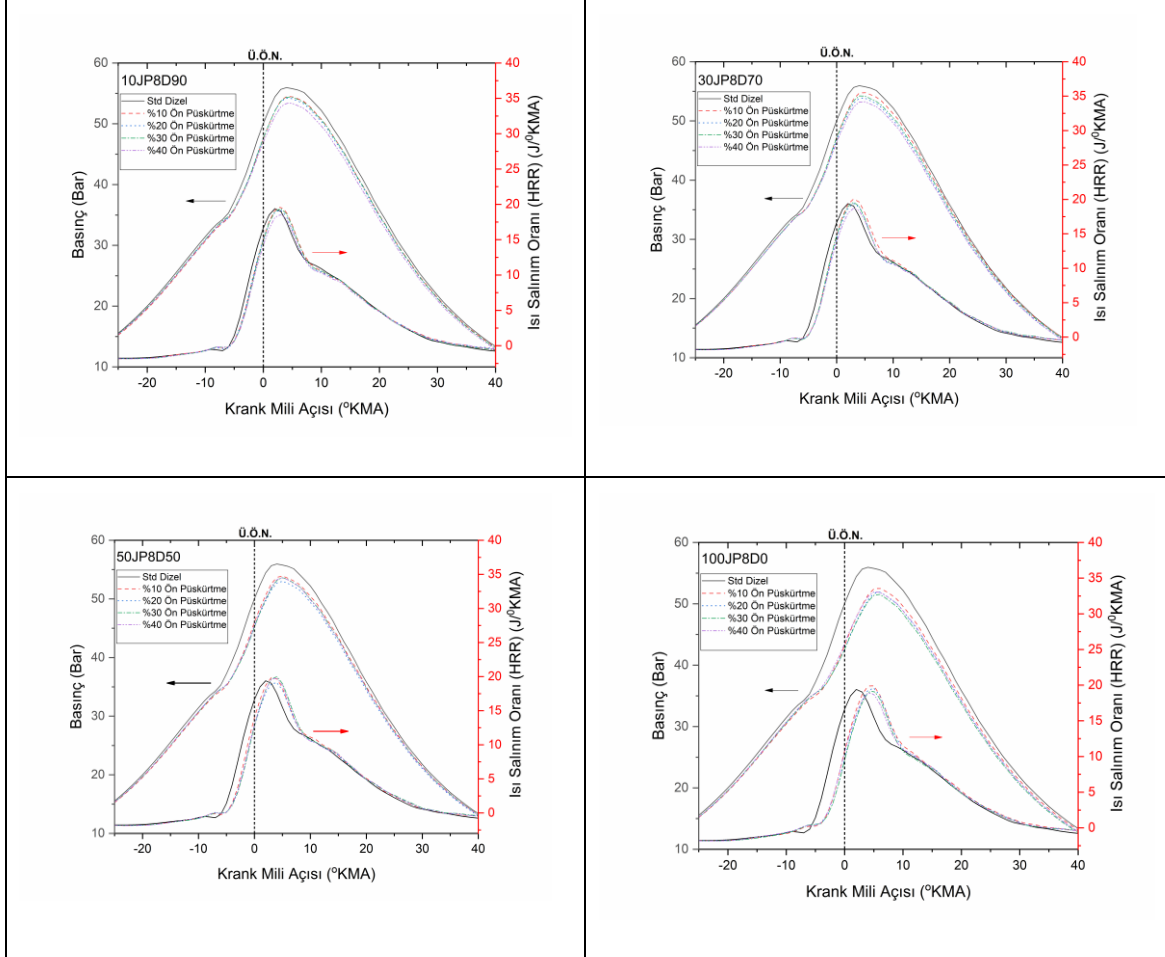


EK-5 Motor %25 yükte çalıştırıldığında farklı yakıt karışım oranlarına bağlı olarak oluşan kümülatif ısı salınımı (CHR)

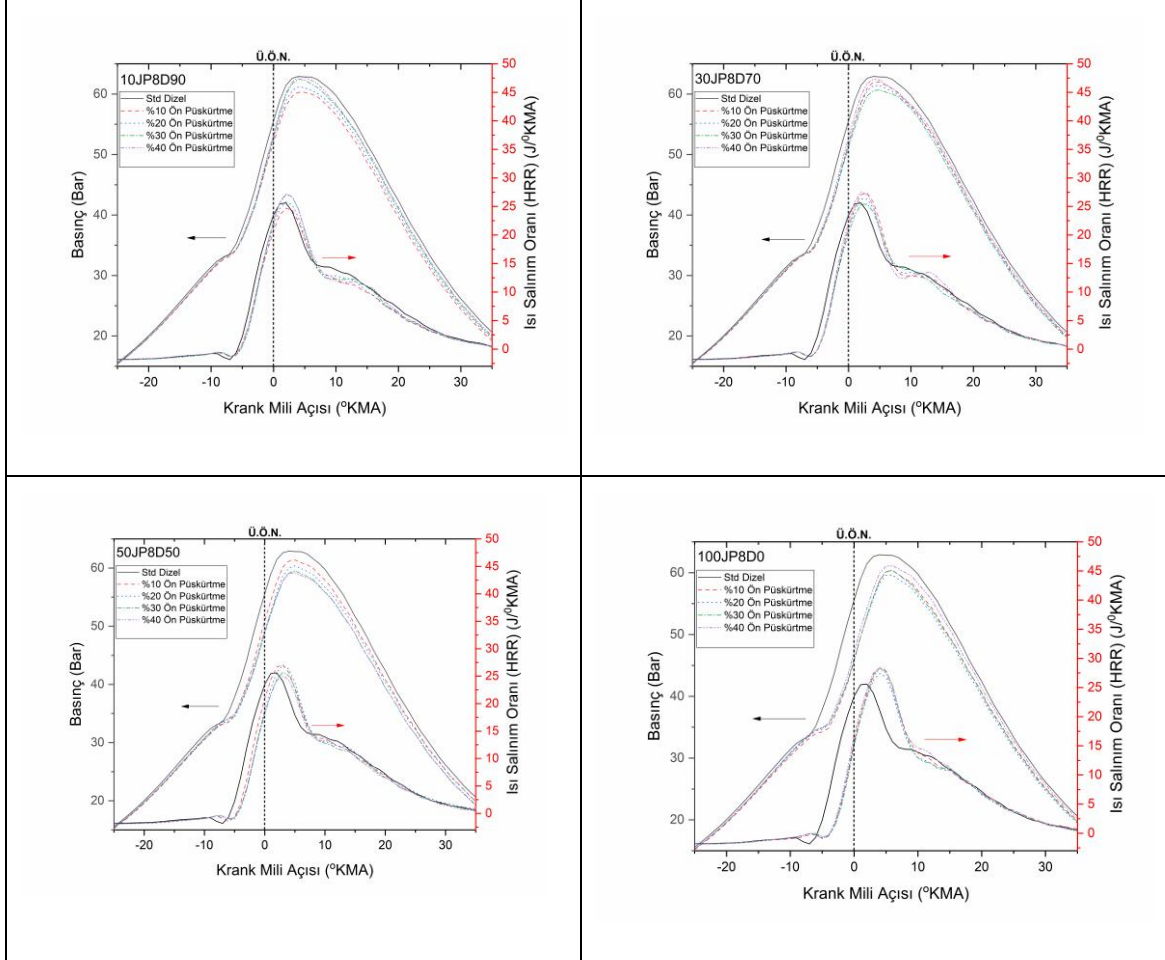


Motor yükü = %25

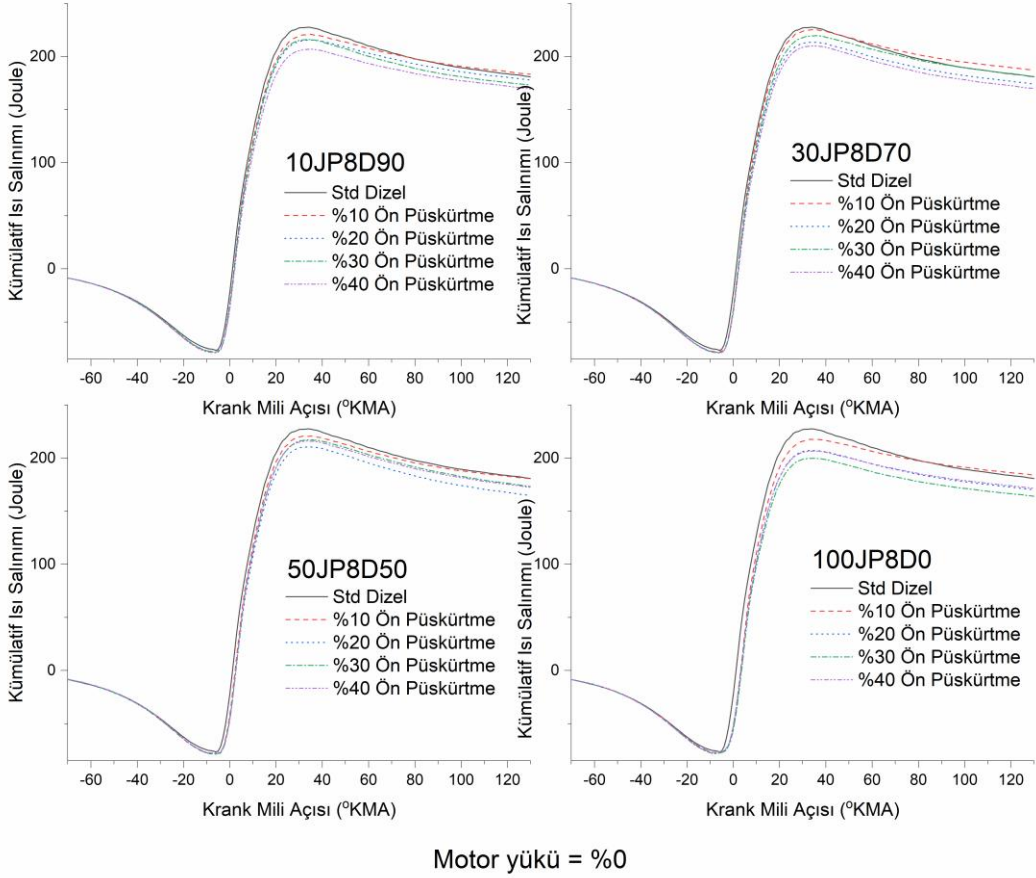
EK-6 Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınımı (HRR) oranları



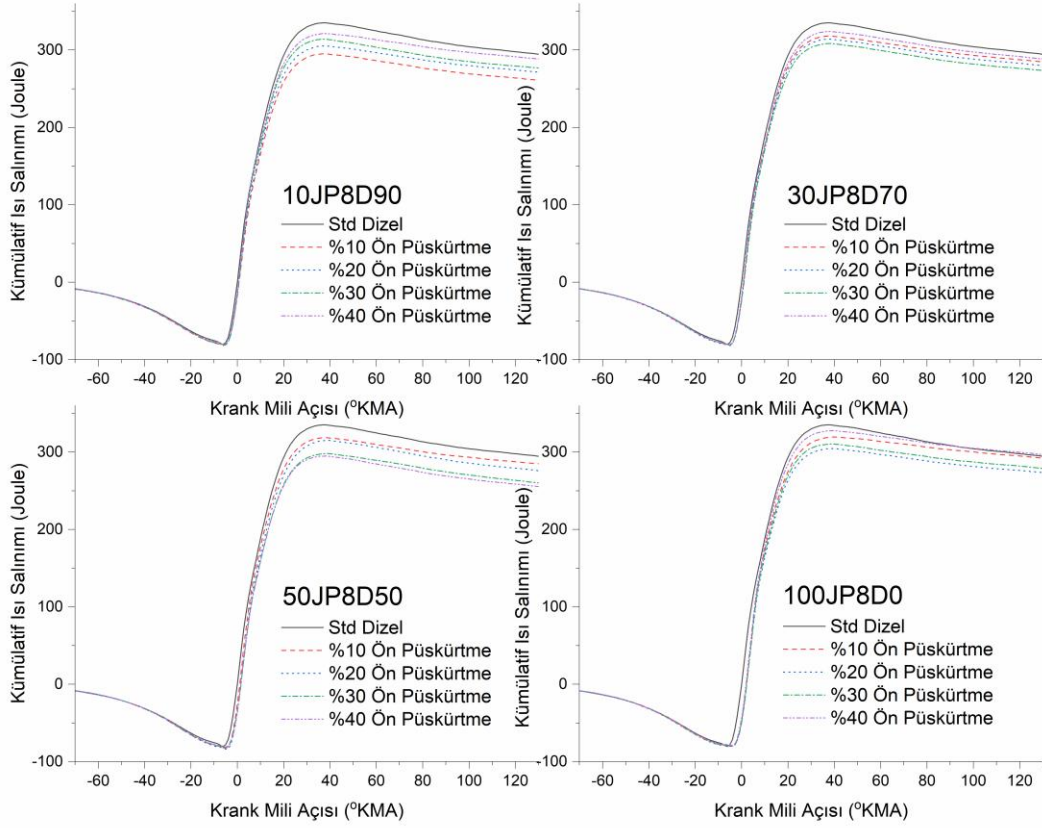
EK-7 Motor %25 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için silindir içi basınçlar ve ısı salınımı (HRR) oranları



EK-8 Motor yüksüz durumda çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için toplam ısı salınımı (CHR) değişimleri



EK-9 Motor %25 yükte çalıştırıldığında farklı ön püskürtme oranları için toplam ısı salınımı (CHR) değişimleri



Motor yükü = %25