



**ATIK TAŞIT LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN
PİROLİTİK YAĞIN REAKTİVİTE KONTROLLÜ
SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ MOTORLARDA
KULLANIMININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Okan ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi

**Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL
İkinci Danışman: Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT**

TEMMUZ – 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK TAŞIT LASTİKLERİNDEN ELDE EDİLEN PİROLİTİK YAĞIN
REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ MOTORLARDA
KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Okan ÇELİK
(161136101)

Ana Bilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği
Programı: Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09 TEMMUZ 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 29 TEMMUZ 2019

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Şehmus ALTUN (B.T.Ü.)

Dr. Öğr. Üyesi. İsmail TÜRK BAY (F.Ü.)

TEMMUZ – 2019

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak hazırlamış olduğum bu çalışmada, kullanım ömrünü tamamlamış atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanımının deneysel olarak araştırılması konu edilmiştir. Çalışma sonucunda elde ettiğim verilerin katkısıyla kullanışsız olarak görülebilen atık taşıt lastiklerinin bundan sonraki değerlendirmelerinde katma değeri yüksek bir yakıt olarak görülmesini ayrıca hazırlamış olduğum bu tezin gelecek çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Bu konuda araştırma yapmamda bana yol gösteren, değerli bilgi ve tecrübeleriyle birlikte desteklerini esirgemeyen ve güvenen, tez danışmanım olmasından dolayı her zaman onur duyduğum, Sayın Prof. Dr. Yasin VAROL hocama, deneysel çalışmalarımın tez teslim aşamasına kadar geçen bu zorlu süreçte yanımda olan, yardımlarını, engin bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli ikinci tez danışmanım, Sayın Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT hocama, çalışmam sırasında emeğini ve bilgilerini benimle paylaşarak destek olan Sayın Arş. Gör. Mutlu OKCU hocama çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesi esnasında finansal destek sağlayan ve TEKF.18.01 numaralı proje ile yüksek lisans tezimi destekleyen FÜBAP'a (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi), çalışmayı 118M650 nolu proje ile destekleyen TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), pirolitik yağ için destek veren Marmore Mühendislik Araştırma San. Tic. A.Ş. firmasına, desteklerinden dolayı meslektaşlarım Melih ŞENOCAK ve Uğurcan YARDIMCI'ya ve Teknoloji Fakültesi enerji laboratuvarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni daima destekleyen Birsen Güler BÜYÜKDEMİRCİOĞLU teyzeme saygı ve sevgilerimi sunarım. Son olarak tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen varlıklarıyla bana güç katan kıymetli anneme, babama ve abime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Okan ÇELİK
ELAZIĞ - 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İçten Yanmalı Motorlar	20
1.2. Dizel Motorlar	21
1.3. Dizel Motorlarda Yanma.....	23
1.4. Dizel Motorlarda Oluşan Emisyonlar	26
1.4.1. Azot Oksitler	26
1.4.2. Karbon Monoksit	27
1.4.3. İs (Duman) Emisyonları.....	27
1.4.4. Toplam Hidrokarbon.....	28
1.4.5. Dizel Motorlar İçin Emisyon Standartları.....	29
1.5. İçten Yanmalı Motorlarda Düşük Sıcaklıklı Yanma Konsepti	30
1.5.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşleme (HCCI).....	32
1.5.2. Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma Ateşleme (PCCI).....	33
1.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşleme (RCCI)	35
1.6. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar	40
1.6.1. Sıkıştırılmış Doğalgaz.....	40
1.6.2. Biyogaz	41
1.6.3. Biyodizel	41
1.6.4. Hidrojen	41
1.6.5. Atık Taşıt Lastikleri	42
2. MATERYAL ve METOT	45
2.1. Deneysel Çalışma.....	45

2.1.1. Deney Setinin Tanıtılması.....	45
2.1.2. Deney Test Motoru	47
2.1.3. Düşük Reaktiviteli Yakıt Kontrol Sistemi	49
2.1.4. Egzoz Emisyonu Ölçüm Cihazları.....	50
2.1.5. Ölçüm ara yüzünün tanıtılması	53
2.1.6. Net Isı Salınımı ve Vuruntu Yoğunluğunun Hesabı	56
2.1.7. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar	56
2.1.8. Deneysel Yöntem.....	60
3. BULGULAR	61
3.1. Düşük Reaktiviteli Yakıtların Püskürtme Zamanının Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkisi	61
3.2. Farklı Çalışma Şartlarında Düşük Reaktiviteli Yakıt Olarak Benzin ve ALY'nin Karşılaştırılması	67
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	83
5. ÖNERİLER.....	86
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ	98

ÖZET

Bu çalışmada, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar düşük reaktiviteli yakıtların kullanımına uygun olacak şekilde modifiye edilmiş tek silindirli, dört zamanlı ve direk püskürtmeli bir dizel motorda yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda yüksek reaktiviteli yakıt olarak petrol kökenli dizel yakıtı, düşük reaktiviteli yakıt olarak ise benzin ve atık lastik yağı (ALY) kullanılmıştır. Test yakıtları hacimsel olarak, %70 dizel-%30 benzin, %70 dizel-%30 atık lastik yağı, %40 dizel-%60 benzin ve %40 dizel-%60 atık lastik yağı olacak şekilde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, ilk aşamada 2500 d/d motor devrinde ve %20 motor yükünde düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı şartlarda değişen püskürtme zamanları incelenmiştir. İkinci aşamada ise 2500 d/d motor devrinde ve %0, %20 ve %60 motor yüklerinde düşük reaktiviteli yakıtların %30 (RCCI30) ve %60 (RCCI60) oranında kullanıldığı şartlarda motor performans ve emisyon değerleri araştırılmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde, üst ölü noktadan önce -160 püskürtme zamanında %20 yük koşulunda ve RCCI30 durumunda benzin ve ALY yakıtlarının motor performansını ve yanma karakteristiklerini belirli ölçüde değiştirerek bazı egzoz emisyonlarını iyileştirdiği görülmüştür. RCCI30 ve RCCI60 durumlarında oluşan silindir içi basınçların geleneksel dizel sonuçlarına yaklaştığı, ısı salınımının ise belirgin bir şekilde değişmediği görülmüştür. RCCI60 durumunda vuruş yoğunluğunun dizele göre benzin yakıtı kullanımı durumunda daha düşük çıktığı, ALY kullanımında ise yaklaştığı görülmüştür. Egzoz emisyonlarında ALY'nin HC ve NO_x emisyonlarında, benzinin ise NO_x ve is emisyonlarında düşüş yaşanmasına belirgin şekilde etki ettikleri tespit edilmiştir. Özgül yakıt tüketiminin benzin için en düşük, ALY yakıtı için ise en yüksek olduğu görülmüştür. Fren termal veriminin benzin için %0 yük ve RCCI30 durumlarında düşük, %60 yük ve RCCI60 durumlarında ise yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, ALY yakıtı için ise genel olarak düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, deneysel çalışmalarda ALY ve benzinin RCCI motorda başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: RCCI, ALY, Düşük Sıcaklıklı Yanma, Püskürtme Zamanı, Egzoz Emisyonları, Sayısal Modelleme

SUMMARY

Experimental Investigation of the Use of Waste Vehicle Tires Derived Pyrolytic Oil in Reactivity Controlled Compression Engines

In this study, the use of pyrolytic oil obtained from waste vehicle tires as a low reactivity fuel in an reactivity controlled compression ignition engine was investigated experimentally. Experimental studies were carried out in a single cylinder, four stroke and direct injection diesel engine modified to be suitable for the use of low reactivity fuels. In the experimental studies, diesel fuel of petroleum origin was used as high reactivity fuel. Gasoline and waste tire oil (WTO) were used as low reactivity fuel. The test fuels were used by volume as 70% diesel- 30% gasoline, 70% diesel- 30% waste tire oil, 40% diesel- 60% gasoline and 40% diesel- 60% waste tire oil. In experimental studies, injection times varying in conditions using 30% of low reactivity fuels at 2500 rpm engine speed and 20% engine load were investigated in the first stage.

When the test results were examined, it was observed that before top dead center, gasoline and WTO fuels improved the engine performance and combustion characteristics to a certain extent under 20% load condition and RCCI30 at -160 injection time and improved some exhaust emissions. In-cylinder pressures in RCCI30 and RCCI60 cases were found to close the conventional diesel results, whereas heat release did not change significantly. In the case of RCCI60, the ringing density was observed to be lower in the case of gasoline fuel use compared to diesel. In the use of WTO, it was found that getting closer the results. It has been found that WTO in exhaust emissions has a significant effect on decreases in HC and NO_x emissions and gasoline in NO_x and soot emissions. Specific fuel consumption was found to be the lowest for gasoline and highest for WTO fuel. Brake thermal efficiency was low for gasoline at 0% load and RCCI30, and high at 60% load and RCCI60. In addition, WTO fuel was generally found to be low. In conclusion, experimental studies have shown that WTO and gasoline can be used successfully in RCCI engine.

Key Words: RCCI, WTO, Low Temperature Combustion, Injection Time, Exhaust Emissions, Numerical Modeling

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Dizel yanma konsepti genel görünümü.....	21
Şekil 1.2. Dört zamanlı dizel motorların gerçek p-v çevrim diyagramı.....	22
Şekil 1.3. Dört zamanlı dizel motorların çalışma prensibi	23
Şekil 1.4. Bir dizel motoruna ait basınç-krank açısı değişimi diyagramı.....	25
Şekil 1.5. Dizel motorlarda oluşan kirletici emisyonlardaki tipik eğilimler	26
Şekil 1.6. Partikül kompozisyonu ve is oluşumu	28
Şekil 1.7. Tutuşma gecikmesi ve sonrası THC emisyonlarının oluşumu.....	29
Şekil 1.8. Düşük sıcaklık yanma konseptinin alt gruplar halinde gösterimi	31
Şekil 1.9. HCCI yanma konsepti genel görünümü.....	32
Şekil 1.10. PCCI yanma konsepti genel görünümü	34
Şekil 1.11. RCCI yanma konsepti genel görünümü	35
Şekil 1.12. a) Yeni yanma konsepti, b) Mevcut yanma konseptlerinin görünümleri.....	36
Şekil 1.13. RCCI motorlarındaki yanmanın şematik gösterimi.	38
Şekil 1.14. RCCI moduna kıyasla, geleneksel dizel yanma ve diğer LTC yanma rejimlerinin çalışma bölgelerini gösteren İ _s , NO _x , UHC ve CO kontur çizgileri	38
Şekil 1.15. Atık taşıt lastiklerinin genel görünümü.....	42
Şekil 2.1. Deney setinin genel görünümü	45
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü	46
Şekil 2.3. Deney test motorunun genel görünümü	47
Şekil 2.4. Düşük reaktiviteli yakıt sistemi kontrol paneli genel görünümü	49
Şekil 2.5. Egzoz emisyon cihazının genel görünümü	51
Şekil 2.6. İ _s ölçüm cihazının genel görünümü	52
Şekil 2.7. Yanma analiz sisteminin ara yüzü	53
Şekil 2.8. Yanma analiz sistemi sensör ayarları.....	54
Şekil 2.9. Yanma analiz sistemi ölçüm ekranı	55
Şekil 2.10. Yanma analiz sistemi veri inceleme ekranı.....	55
Şekil 2.11. Dizel yakıtının genel görünümü.....	57
Şekil 2.12. Benzin yakıtının genel görünümü	58
Şekil 2.13. Ham lastik pirolitik yağı genel görünümü	59

Şekil 3.1. CO emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi.....	62
Şekil 3.2. CO ₂ emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi	63
Şekil 3.3. HC emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi.....	64
Şekil 3.4. NO _x emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi	65
Şekil 3.5. İş emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi	66
Şekil 3.6. Egzoz gaz sıcaklığının püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi.....	67
Şekil 3.7. Silindir içi basıncın %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	69
Şekil 3.8. Silindir içi basıncın %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	70
Şekil 3.9. Isı salınım oranının %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	72
Şekil 3.10. Isı salınım oranının %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	73
Şekil 3.11. Vuruntu yoğunluğunun %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	74
Şekil 3.12. Vuruntu yoğunluğunun %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	75
Şekil 3.13. CO emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi	76
Şekil 3.14. CO ₂ emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi	77
Şekil 3.15. HC emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi	78
Şekil 3.16. NO _x emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi	79
Şekil 3.17. İş emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi	80
Şekil 3.18. Egzoz gaz sıcaklığının farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı olarak değişimi.....	80
Şekil 3.19. Özgül yakıt tüketiminin farklı motor yükü, farklı RCCI durumlarında ve farklı düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	81
Şekil 3.20. Fren termal veriminin farklı motor yükü, farklı RCCI durumlarında ve farklı düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi	82

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Otomobiller için Euro emisyon standartları	2
Tablo 1.2. Ticari taşıtlar için Euro emisyon standartları.	30
Tablo 1.3. RCCI, HCCI ve PCCI konseptlerinin karşılaştırılması	37
Tablo 2.1. Deney test motorunun teknik özellikleri	48
Tablo 2.2. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri	50
Tablo 2.3. Egzoz emisyon cihazları için hata sınırlamaları	50
Tablo 2.4. İş ölçüm cihazının teknik özellikleri	51
Tablo 2.5. Dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	57
Tablo 2.6. Benzin yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	58
Tablo 2.7. Pirolitik yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri	59

SEMBOLLER LİSTESİ

λ	: Hava fazlalık katsayısı [-]
η_e	: Efektif verim [%]
$\dot{m}_y$	: Kütlesel yakıt tüketimi [gr/h]
Be	: Özgül yakıt tüketimi [gr/kWh]
C	: Karbon
CO	: Karbon monoksit
CO₂	: Karbon dioksit
F	: Kuvvet [N]
H	: Hidrojen
H₂	: Hidrojen gazı
H₂O	: Su buharı
H₂S	: Hidrojen sülfür
HC	: Hidrokarbon
Hu	: Yakıt alt ısı değeri [kJ/kg]
K	: Kelvin
N	: Azot
n	: Dakikadaki devir sayısı [d/d]
N₂	: Azot gazı
NO	: Azot oksit
NO₂	: Azot dioksit
NO_x	: Azot oksitler
O₂	: Oksijen
°C	: Santigrat derece
OH	: Hidroksit
Pe	: Efektif motor gücü [kW]
S	: Kükürt
SO₂	: Kükürt dioksit
THC	: Toplam hidrokarbon
UHC	: Yanmamış hidrokarbon

Wf : Sürtünme işi [Nm/d]

x_r : Havanın kuruluk derecesi [-]



KISALTMALAR LİSTESİ

AB	: Avrupa birliği
AÖN	: Alt ölü nokta
ATL	: Atık taşıt lastiği
ALY	: Atık lastik yağı
ATDC	: Üst ölü noktadan sonra
BMEP	: Ortalama efektif basınç
BSFC	: Özgül yakıt tüketimi
CDC	: Geleneksel dizel yakma
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CI	: Sıkıştırma ile ateşleme
cSt	: Santistok
COME	: Pamuk çekirdeği biyodizeli
DI	: Direkt püskürtme
EGR	: Egzoz gazı geri dönüşümü
HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırma ateşleme
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HFK	: Hava fazlalık katsayısı
HLPY	: Ham lastik pirolitik yağı
HP	: Beygir gücü
HRF	: Yüksek reaktiviteli yakıt
HRR	: Isı salınım oranı
IMEP	: Ortalama indike basınç
İLPY	: İşlenmiş lastik pirolitik yağı
KMA	: Krank mili açısı
kWh	: KiloWatt saat
°KA	: Krank açısı derecesi
LPY	: Lastik pirolitik yağı
LRF	: Düşük reaktiviteli yakıt
LTC	: Düşük sıcaklıklı yanma
L	: Litre
MJ	: Mega Joule

NG	: Doğal gaz
PB	: Püskürtme başlangıcı
PCCI	: Ön karışım dolgulu sıkıştırma ateşleme
PFI	: Port yakıt enjektörü
PI	: Port enjeksiyonu
PM	: Partikül madde
ppm	: Milyondaki tanecik sayısı
PS	: Püskürtme sonu
RCCI	: Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
SOI	: Püskürtme başlangıcı
TG	: Tutuşma gecikmesi
TPO	: Lastik piroliz yağı
ÜÖN	: Üst ölü nokta
ÜÖNÖ	: Üst ölü noktadan önce

1. GİRİŞ

Dünyanın hâlihazırdaki ve gelecekteki en büyük sorunlarının başında tükenmekte olan enerji kaynakları gelmektedir. Dünyada, petrol rezervleri uzun yıllardır tüm alanlarda yaygın olarak kullanılmakta ve hayatımızı kolaylaştırma noktasında bizlere fayda sağlamaktadır. Endüstri, ulaşım, sağlık vb. birçok önemli alanda petrol kaynaklarından ve türevlerinden yararlanılmaktadır. Dünya enerji gereksiniminin %78'i fosil yakıtlarla karşılanmaktadır [1]. Birçok ürünün hammaddesi veya katkı maddesi olan bu enerji kaynağının bitmesinin, dünyadaki birçok dengeyi değiştirecek etkiye sahip olduğu açıkça ortadadır. Dünyanın artan nüfusuyla birlikte kullandığımız enerji kaynaklarının en önemlisi olan petrol kaynakları da hızla tüketilmekte ve buna bağlı olarak da bu kaynaklar için verilen mücadeleler hem ülkemizin ekonomisini hem de diğer ülkelerin ekonomisini dolaylı ya da dolaysız olarak etkilemektedir. Ülkeler kendi vatandaşlarının huzur ve refah içinde yaşamaları için tükenmekte olan petrol rezervleri uğruna savaşlar vermektedir. Fosil esaslı yakıt kaynakları, yeni kaynak keşifleri bitmese dahi bir gün tükenecek ve tükeneceği güne kadar bu mücadeleler sürecektir.

Petrolde elde edilen ürünler yaygın olarak en fazla ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Ulaşım sektöründe içten yanmalı motorlarda tüketilen temel yakıtlar dizel ve benzindir. Bunun yanında benzinli motorlarda gaz, dizel motorlarda yağda kullanılabilir. Özellikle otomotiv endüstrisinde fazlasıyla kullanılan benzin ve dizel yakıtlarının azalması, fiyatlarının artması ve emisyon standartlarının zorlaştırılması ile birlikte alternatif yakıt arayışı içine girilmiştir. Alternatif yakıtlar küçük ve büyük ölçekte kullanılma potansiyeli içermektedirler. Bu durumda, alternatif yakıtlar ticari uygulamalarda kullanılan ve kullanılmayı veya test edilmeyi bekleyen yakıtlardır. Petrol kökenli geri dönüşüme uygun atıklardan sıvı halde elde edilen yakıtlar, içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıt olarak ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda emisyon standartlarında, yerine getirilmesi istenilen zorlu şartlar nedeniyle de alternatif yakıtların kullanılarak emisyon ve performans kriterlerine katkı elde edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Tablo 1.1'de AB (Avrupa Birliği) emisyon standartları verilmiştir.

Tablo 1.1. Otomobiller için Euro emisyon standartları [2].

Standart	Tarih	CO (g/km)	NO _x (g/km)	HC+NO _x (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	Temmuz 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
Euro 2	Ocak 1996	1.0	-	0.7	0.08
Euro 3	Ocak 2000	0.64	0.50	0.56	0.05
Euro 4	Ocak 2005	0.50	0.25	0.30	0.025
Euro 5	Eylül 2009	0.50	0.180	0.230	0.005
Euro 6	Eylül 2014	0.50	0.080	0.170	0.005

Tablo 1.1’de görüleceği gibi 2014 yılında yürürlüğe giren Euro 6 emisyon kriterleri ile özellikle dizel motorlarının oluşturabileceği çevreye zararlı maddeler için ciddi kısıtlamalar getirilmiştir. Yerine getirilmesi istenilen bu kısıtlamaları yalnızca motor sonrası egzoz sistemleri ile yakalamak mümkün değildir. Bunun için gerek yanma kalitesini yükseltmek gerekse alternatif yakıtlar kullanarak bu yakıtların verebileceği katkıyı tespit etmek gerekmektedir. Bu katkıyı verebilecek petrol kökenli alternatif yakıtlara iyi bir örnek olarak ATL (atık taşıt lastikleri) gösterilebilir. İyi bir örnek olarak gösterilmesinin sebebi olarak petrol, kömür ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının temelini oluşturan hidrokarbonların ATL’nin de temelini oluşturması gösterilebilir. Kalorifik değeri 32.6-42.8 MJ/kg aralığında olan ve % 90’dan fazlası organik elementlerden oluşan ATL, kalorifik değeri 18.6-27.9 MJ/kg aralığında olan kömürden daha yüksek bir değere sahiptir. Bununla birlikte farklı işlemler aracılığıyla ATL’nin kalorifik değeri, dizel motorlarında kullanılan motorin yakıtının kalorifik değeri olan 40-45 MJ/kg aralığına yükseltilebilir [3].

Motor üreticileri ve araştırmacılar son yıllarda var olan kaynakları daha verimli kullanmanın ve motorlarda daha temiz ve verimli yanma ile ilgili çalışmalara odaklanmışlardır. Bu bağlamda içten yanmalı motorlarla ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Motor sonrası egzoz sistemleri ile emisyonların azaltılması üzerine yapılan çalışmaların güngeçtikçe zorlaştırılan emisyon standartlarından dolayı önemi artmıştır.

Bu alanda yapılan çalışmaların çoğunlukla gelişim göstermesine rağmen, Tablo 1.1’de ifade edilen regülasyon limitlerinin tutturulmasının eş zamanlı olarak başarılı bir yakıt ekonomisinin sağlanmasında yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu sebeple motorlar üzerine yapılan araştırmalar çoğunlukla hem emisyonları azaltma hem de yakıt ekonomisini iyileştirme olanağı sağlayan, düşük sıcaklıklı yanma stratejisine yoğunlaşmıştır.

Motorlarda LTC (Düşük Sıcaklıklı Yanma) stratejileri olarak: HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli), PCCI (Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli) ve RCCI (Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli) sistemler literatürde önemli bir alan oluşturmuştur. RCCI sistemlerinin temel prensibi düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtların, farklı zamanlarda silindir içine ayrı enjektörler ile püskürtülmesine dayanmaktadır. Bu konu, deneysel olarak modelin oluşturulup araştırılmasının yanında, çok yönlü HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) modellemelerinin kullanılmasıyla da araştırmacılar tarafından incelenmeye başlanmıştır. RCCI yanma konsepti ile ilgili çalışmalar bu çalışma kapsamında incelenerek kullanımı için bir literatür oluşturulmuştur. Aşağıda literatürde yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bu kapsamda; Ma vd. [4] çalışmalarında, modifiye tek silindirli bir dizel motor üzerinde benzinli / dizel çift yakıtlı yanmanın, yüksek verimli ve düşük emisyonlu yanma, emisyon, yakıt tasarrufu ve motor çalışma aralığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar motor deneylerinde 1500 d/d (devir/dakika) ve 50 mg/devir toplam eşdeğer dizel yakıtlama hızında tek ve çift enjeksiyon stratejilerini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarda, bu yanma modunun erken enjeksiyon zamanlamasının uygulandığı durumda sifıra yakın NO_x ve is emisyonlarıyla yüksek verim elde etme kabiliyetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Benajes vd. [5] yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, dizel / benzin yakıtlarını kullanarak RCCI yanmasındaki karışım oluşturma ve kendi kendine tutuşma proseslerini incelemişlerdir. Tek boyutlu püskürtme modeli aracılığıyla port ve direkt enjeksiyon yapılarak CI (Sıkıştırma ile Ateşleme) bir motorda çalışma gerçekleştirmişlerdir. Dizel / benzin oranının azaltılmasının tutuşma gecikmesinin artmasına ayrıca karışımın oluşturulması için gerekli olan sürenin uzamasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çalışmada RCCI ve CDC (Geleneksel Dizel Yanma) karşılaştırıldığında, geleneksel yanmaya göre RCCI yanmasının NO_x ve is emisyonlarının azaltılmasında daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Benajes vd. [6] yaptıkları çalışmada, düşük sıcaklıklı yanma konseptinin, ana zorluklarını çözmek için yeni stratejiler önermek üzere orta görevli bir motorun operasyonel limit değerlendirmesi çalışmasını yapmışlardır. Bu bağlamda, ticari dört silindirli motordan türetilmiş tek silindirli motorda, 12.75'lik bir sıkıştırma oranı kullanmışlardır. Düşük reaktiviteli yakıt olarak ticari 95 oktan benzin, yüksek reaktiviteli yakıt olarak ise ticari dizel kullanmışlardır. Sonuçlarda, aşırı düşük seviyede NO_x ve is emisyonları elde ederken basınç yükselme hızı ve maksimum basınç pikinin sınırlarını aşmadan nominal geleneksel dizel yakma ile motor yükünün %80'ine kadar ulaşılmasının mümkün olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak hafif bir yakıt tüketimi düzeyi ile karbon oksit ve UHC (Yanmamış Hidrokarbon) emisyonlarını azaltmışlardır.

Jeon vd. [7] yaptıkları çalışmada, optik tek silindirli sıkıştırma ile ateşleme motorunda benzin-dizel ön karışimli yakıt kullanımını, çeşitli enjeksiyon zamanlaması ve basınç koşullarında araştırmışlardır. Benzin-dizel harman yakıt kullanımının homojen avantajlar elde etmek için alternatif bir strateji olabileceğini önermişlerdir. Karışık yakıtlarla ilgili deneylerde, benzinli yakıtın yakıt / hava karışımını iyileştirdiğini ve daha geniş silindir alanlarında daha homojen karışımlar ürettiğini tespit etmişlerdir. Yakalanan alev görüntülerine dayanarak is yoğunluğunu hesaplamışlar ve yakıt türü ve enjeksiyon koşullarının bir değişimi olarak değişimleri araştırmışlardır.

RCCI motorundaki çift yakıtlı yanma stratejilerinin yanma ve emisyon karakteristiklerine etkisini araştıran Park ve Yoon [8], tek silindirli dizel motorda silindir içine doğrudan enjeksiyon için dizel, ikincil enjeksiyon içinse benzin ve biyogaz yakıtını uygulayarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarında, port enjeksiyon oranının artmasının, ateşleme gecikmesinin artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak, dizel-biyogaz yakıtlarının kullanıldığı DFC'de (İkili Yakıt Yakma) ateşleme gecikmesinin artan genişliğinin dizel benzinli DFC'den daha yüksek olduğunu saptamışlardır. DFC'deki HC ve CO emisyonlarının geleneksel tekli dizel yanma işleminde daha yüksek ancak erken enjeksiyonlu dizel yakmadan daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Dizel / benzinli çift yakıtlı yanma modunda çalışan, hafif sıkıştırma ateşlemeli motorun ısı analizini gerçekleştiren Martin vd. [9] yaptıkları çalışmada, çift yakıtlı RCCI modlarıyla çalışan tek silindirli bir motorun GEB'ni (Küresel Enerji Dengesi) analiz etmişlerdir. Sonuçlarda, düşük reaktiviteli yakıt miktarının arttırılmasının, ısı transfer oranını ve egzoz kayıplarını azaltılmasını sağladığını böylece ısı salınım oranını daha iyi bir seviyeye ulaştırdığını ve buna bağlı olarak da geleneksel dizel yanmasına göre yaklaşık %1 oranında termik verimliliği geliştirdiğini saptamışlardır.

Kullanılan yakıtların kimyasal özelliklerinin RCCI motorunun yanma karakteristikleri üzerindeki etkisini çok boyutlu simülasyonlar kullanarak araştıran Li vd. [10] yaptıkları çalışmada, yakıt verimliliğini, RI'nı (Vuruntu Yoğunluğu) ve NO_x emisyonlarının belirli sınırlarına göre, benzin / dizel ve metanol / dizel yakıtlarının RCCI yanması için yanma aşamasının çalışma aralıklarını belirlemişlerdir. Kısaltılmış yanma süresi, azalan eksik yanma ve daha düşük ısı transfer kayıpları nedeniyle, benzinli / dizel yakıtın kullanıldığı RCCI motoruna göre daha yüksek yakıt verimliliğini metanol / dizel yakıtının kullanıldığı RCCI motorunda elde etmişlerdir.

Düşük sıcaklıkta yanma stratejilerine sahip dizel motorlarında dizel ve biyodizel yakıtı kullanımı durumunda bu yakıtların egzoz emisyonlarına etkisi üzerine bir derleme çalışması gerçekleştiren Imtenan vd. [11] çalışmalarında, dizel egzoz gazından çıkan PM (Partikül Madde) ve NO_x emisyonlarının eşzamanlı olarak miktarlarının indirgenmesinin, mevcut araştırma faaliyetlerinin temelini oluşturduğunu belirtmişlerdir. Fiziksel ve kimyasal özelliklerin bir takım farklılıkları nedeniyle, dizel ve biyodizel yakıtlarının emisyon özelliklerinin LTC stratejilerinde farklılıklar içerdiğini, LTC stratejilerinin NO_x ve PM'yi aynı anda azaltmakta olduğunu ancak HC ve CO emisyonlarını arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yeni çalışmaların katkısıyla biyodizel yakıtı kullanarak LTC'ye daha da yaklaşılabileceği, HC ve CO emisyonlarının daha da azaltılabileceği ve düşen performans değerlerinin arttırılabileceğini belirtmişlerdir.

Yakıt oranı ve enjeksiyon zamanlamasının benzin / biyodizel yakıtlı RCCI motoruna etkisi adlı bir modelleme çalışması yapan Li vd. [12], yanma sürecini modellemek için birleştirilmiş KIVA4-CHEMKIN kodunu kullanmışlardır.

Kodda uygulanan benzin / biyodizel reaksiyon mekanizmasının kendileri tarafından oluşturulduğunu belirtmişlerdir. Benzin enerji oranları ile iki SOI (Püskürtme Zamanlaması) (C-SOI (geleneksel SOI) hem de A-SOI (gelişmiş SOI)) arasındaki yanma özelliklerini karşılaştırmışlardır.

Li vd. [13] yaptıkları çalışmada, enjeksiyon stratejisinin RCCI motorların performansını ve emisyon oluşumunu nasıl etkileyebileceğini tespit etmek için fraksiyonel faktöryel tasarıma dayalı daha etkili bir yaklaşımın kullanılmasını araştırmışlardır. Bu çalışmada, ilk SOI zamanlaması, birinci ID (Püskürtme Süresi), ikinci SOI zamanlaması, ikinci ID, birinci enjeksiyonda dizel kütle fraksiyonu ve doğal gazın toplam havaya oranı olmak üzere altı faktör ile çalışmışlardır. Motorun performansını ve emisyonunu, birleştirilmiş KIVA4-CHEMKIN kullanarak değerlendirmek için on altı simüle edilmiş çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıntılı reaksiyon mekanizmasına sahip kod ile sonuçlarda, en baskın olan ön karışmış doğal gazın belirtilen güç ile pozitif bir korelasyona sahip olduğunu ve CO, NO_x ve is emisyonlarını aynı anda azaltılabileceğini tespit etmişlerdir. NO_x'i daha da azaltmak için, gecikmiş ikinci SOI zamanlaması ve genişletilmiş ikinci kodu önermişlerdir.

Paykani vd. [14] yaptıkları çalışmada, modifiye edilmiş ağır hizmet tipi reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme motorda, doğalgaz / dizel yakıtlarını kullanarak, dizel enjeksiyon stratejilerinin, yanma ve kirletici emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Düşük reaktiviteye sahip doğal gazın, emme portundan motora girdiğini varsayarlarken, yüksek reaktiviteye sahip dizel yakıtı doğrudan bir çift enjeksiyon stratejisi kullanarak motora enjekte etmişlerdir. Araştırmacılar, is ve NO_x emisyonlarının azaltıldığını, motor verimliliğinin geliştirildiğini, incelenen enjeksiyon stratejileri ile bu durumun başarılabildiğini ancak HC ve CO emisyonlarının kötüleştiğini tespit etmişlerdir.

Kakaee vd. [15] yaptıkları çalışmada, doğal gaz bileşimi, motor devri ve motorun orta yükünde gösterilen 9 barlık ortalama indike basıncın, doğal gaz / dizel yakıtı kullanılan bir RCCI motorundaki yanma ve emisyon özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Düşük reaktiviteye sahip doğal gazın, emme portundan motora girdiğini varsayarlarken, yüksek reaktiviteye sahip dizel yakıtı doğrudan bir çift enjeksiyon stratejisi kullanarak motora enjekte etmişlerdir.

Gazların WN'nın (Wobbe Sayısı) ve motor devrinin, RCCI motorundaki yakıt yakma prosesini ve emisyonlarını önemli ölçüde değiştirdiğini saptamışlardır. Daha yüksek WN'ye sahip olan gazın; daha yüksek tepe basıncı, sıcaklık ve NO_x emisyonu meydana getirdiğinin bunun yanında daha az miktarda CO ve UHC emisyonları oluşturduğunun sonucuna varmışlardır.

Rahmana ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada, doğal gaz / dizel çift yakıtlı reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme motorunun farklı yakıt türlerine ilave olarak N₂, H₂, reformer gazı ve H₂ - N₂, karışımlarının eklenmesi durumunda farklı motor yüklerinde yanma ve egzoz emisyonu özelliklerine etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Katkı maddesi olarak H₂ ve sentetik gaz (reformer gazı) kullanılmasının, düşük yüklerde motorun yanma sürecini iyileştirebildiğini belirtmişler, ancak bu gazların kullanılmasının yüksek motor yüklerinde yüksek tepe basınç yükselme oranı ve yüksek rezonans yoğunluğu oluşturması nedeniyle RCCI motoru çalışmasını sınırlandırdığını tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, düşük motor yüklerinde H₂ ve reformer gazı kullanıldığında yanmanın geliştiğini, CO ve HC emisyonlarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Hafif RCCI motorunda doğal gaz / dizel yakıtlarını kullanarak dizel enjeksiyon stratejilerinin bu motordaki yanma ve emisyon özelliklerine etkilerini sayısal olarak araştıran Poorghasemi ve arkadaşları [17] yaptıkları analizde, detaylı bir kimyasal kinetik mekanizması olanağı sağlayan HAD kodunu, yanma prosesinin ve emisyon tahmininin 3D simülasyonu için kullanmışlardır. NG'nin (Doğal Gaz) ve PR'nin (Önceden Karıştırılma Oranı), dizel yakıt fraksiyonunun birinci ve ikinci enjeksiyon pulslarının, birinci ve ikinci enjeksiyon başlama zamanının, enjeksiyon basıncının ve püskürtme açısının da dahil olmak üzere çeşitli parametrelerin motor performansı üzerindeki etkisini ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır. Sonuçlarda, bu parametrelerin hafif RCCI motor performansını ve emisyonlarını azaltmada belirgin etkilere sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Stokiyometrik karışım ile çalışan dizel / doğal gaz çift yakıtlı motorun emisyonunu ve performansını inceleyen Vavra vd. [18] deneyleri tek silindirli bir motor üzerinde gerçekleştirmişler. Araştırmacılar testlerde; motor performansı, verimlilik, gaz emisyonları ve partiküler madde üzerine yoğunlaşmışlardır.

CH₄'ün (Metan) otomatik ateşleme direncinin yüksek olması nedeniyle, ateşleme için daha yüksek reaktiviteye sahip başka bir yakıt kullanmak gerektiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla, dizel yakıtın düşük karbonlu yakıtla kısmen ikame edilmesinin CO₂ emisyonlarının kademeli olarak indirgenmesi için anlamlı bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Emisyonlarda oluşan parçacıkların sayısı mevcut standart emisyon düzenlemesinde sınırlıdır. Bu nedenle Yang vd. [19] bir dizel / doğal gaz çift yakıt motorunda parçacıkların davranışını keşfetmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada araştırmacılar, sürekli motor devrinde değişen motor yüklerine sahip bir dizel / doğal gaz çift yakıtlı motorun parçacık emisyon karakteristiğini, elektrikli düşük basınçlı çarpma aracını kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir.

Mikulski ve Bekdemir [20] yaptıkları çalışmada, çift yakıtlı RCCI motorunda düşük reaktivite yakıt tabakalaştırması rolünün anlaşılması için bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, doğal gaz / dizel ikili yakıt konseptinin uygulanabilir hale getirilebilmesi için ele alınması gereken önemli bir hususun kısmi motor yüklerinde düşük yanma veriminin ve buna bağlı yüksek CH₄ emisyonunun olduğunu belirtmişlerdir. Çift yakıtlı RCCI'deki gazlı yakıt tabakalaştırmasının, yanma verimliliğini arttırmaya ve CH₄ ve CO emisyonlarını azaltmaya yardımcı olduğunun sonucuna ulaşmışlardır.

Li vd. [21] yaptıkları çalışmada, dizel / metanol yakıtları ile çalışan bir motorda, çok boyutlu model ile NSGA-II (Baskın Olmayan Genetik Algoritma Sınıflandırması - II) algoritmasını birleştirerek deney motorunun RCCI yanmasını optimize etmişlerdir. Deney sonuçlarında ilk olarak sıcaklık ve EGR'nin (Egzoz Gazı Geri Dönüşümü) motor performansı ve emisyonları üzerinde en büyük etkiye sahip nicelikler olduğunu tespit etmişlerdir. Lokal zengin ve yüksek sıcaklık karışım bölgelerinde NO_x emisyonlarının önemli oranda azaltılmasında metanol miktarının ve enjeksiyon zamanlamasının etkili olduğunu vurgulamışlardır. Yüksek metanol miktarının ve avansa alınmış enjeksiyon zamanlamasının, RCCI yanmasındaki yakıt verimliliğinin artmasına ve oluşan emisyonların azaltılmasına olanak sağladığını saptamışlardır.

Benajes vd. [22] yaptıkları çalışmada, 17.5 / 1 sıkıştırma oranına sahip bir EURO VI orta görev dizel motorunda etanol / benzin karışımı ve biyodizel yakıtı kullanarak motorun tüm çalışma aralığını kapsayacak şekilde hem çift modlu reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme stratejisinin hem de geleneksel dizel yakma stratejisinin performanslarını tespit etmek amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri, çok silindirli motordan türetilmiş tek silindirli araştırma dizel motoru kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yüksek reaktiviteli yakıt olarak %7 biyodizel içeren bir dizel kullanmışlardır. Sonuçlarda, dayatılan kısıtlamalar altında, reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme stratejisinin %25 ve %35 yükler arasında kullanılabileceğini saptamışlardır. Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemesinin, geleneksel dizel yakma yöntemine göre %2 oranında daha yüksek brüt verimlilik sağlayabildiğini, ancak düşük motor devirlerinde düşük verimliliğe neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Gross ve Reitz [23] yaptıkları çalışmada, hafif hizmette özelleştirilmiş MCE (Çok Silindirli Motor) pistonlarıyla geçici "Tek Yakıtlı" RCCI yanmasını araştırmışlardır. Mevcut çalışmada, porta enjekte edilmiş benzin ve doğrudan enjekte edilen benzin ve setan geliştirici EHN (2-Etilheksil Nitrat) ile karıştırılarak RCCI yakma için "tek yakıtlı" bir yakışımı, özel olarak tasarlanmış geçici koşullardaki pistonlarda, 13.75 / 1 sıkıştırma oranı ile incelemişlerdir. Araştırmacılar deneyleri, GM (General Motors) Z19DTH 1.9-L dizel motorunda sabit 1500 d/d'da 1 ila 4 bar BMEP'e (Ortalama Efektif Basınç) göre kademeli bir yük değişimi üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda, tek yakıtlı RCCI işleminin başarılabileceğini ancak çalışma koşullarının önemli ölçüde değiştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca benzin / benzin-EHN işleminin için NO_x emisyonlarının önemli ölçüde arttığını saptamışlardır.

Liu vd. [24] yaptıkları çalışmada, DME (Dimetil Ether) / Metan yakıtına H₂ ilavesinin RCCI motorunda meydana getirebileceği etkileri incelemişlerdir. Araştırmacılar, yeni bir DME oksidasyon mekanizmasını denemişlerdir. Maksimum silindir basıncı elde etmek H₂ ilavesiyle birlikte tutuşma zamanlamasını avansa almışlardır. CH₄ yanması sonucu oluşan emisyonların H₂ ilavesi sonucunda azalma gösterdiğini, fakat meydana gelen alevin dolgu boyunca oluşmadığını saptamışlardır. Çalışmadaki CO oluşumuna ön karışımli yanmada yakılan CH₄ yakıtının sebebiyet verdiğini gözlemlemişlerdir.

Ayrıca H₂ ilavesi ile NO emisyonlarının arttığını tespit etmişlerdir. Çift yakıtlı çalışma şartları altında elde edilen simülasyon sonuçlarında NO_x emisyon miktarının enjeksiyon stratejisi ile pilot yakıt miktarından doğrudan etkilendiğini saptamışlardır.

Liu vd. [25] yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, n-bütanol / biyodizel yakıt karışımlarının yanma ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. N-bütanol yakıtını emme portuna enjekte ederken biyodizel yakıtını doğrudan silindir içerisine enjekte edilmesini sağlamışlardır. Araştırmacılar deneylerde üç farklı karışım oranı (%80, %85 ve %90) kullanmışlardır. Ayrıca düzenli bir yanma sağlamak için biyodizelin enjeksiyon zamanlamasını, karışımın %50'sinin yanmasının tamamlandığı nokta esas alınarak ÜÖN'den (Üst Ölü Nokta) 2 ile 10 °KA (Krank Açısı Derecesi) arasında değiştirmişlerdir. EGR oranını %35'den %45'e çıkartmışlar ve böylece NO_x ve is emisyonlarını azaltmışlar, ancak bunun yanı sıra HC ve CO emisyonlarının artışı engelleyememişlerdir.

E vd. [26] yaptıkları çalışmada, biyodizel katkı maddeleri, EGR, WI (Su Enjeksiyonu), ET (Emülsiyon Teknolojisi), enjeksiyon strateji modifikasyonu, ST'ler (eş zamanlı teknoloji) gibi biyodizel yakıtlı motorlara uygulanan farklı yaklaşımların kapsamlı bir incelemesini yapmışlardır. Bu teknolojilerin motor performansı ve emisyon özellikleri üzerindeki etkilerini özetlemişlerdir. Karşılaştırmalar yaptıktan sonra, LTC modunu kullanmanın diğer modları kullanmaktan daha verimli ve uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarda motor performansının az miktarda azaldığını, NO_x ve PM emisyonlarını aynı anda sırasıyla %95 ve %98 oranında azaltılabildiğini tespit etmişlerdir.

Biyodizel / doğalgazla çalışan, RCCI motorunda deneysel bir çalışma gerçekleştiren Gharehghani vd. [27] RCCI motorunun yanma özelliklerini, performansını ve egzoz emisyonunu çeşitli yük koşulları altında deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlarda, ikili yakıt modunda yüksek reaktivite yakıt olarak atık balık yağı biyodizelini kullanmışlar ve bu yakıtın daha kısa bir ısı salınım hızı süresine sahip geleneksel yanmaya göre daha yüksek silindir basıncına yol açtığını ortaya çıkarmışlardır. CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz) / biyodizel modu için CO emisyon konsantrasyonunun, yüksek motor yük koşulları için geleneksel yanma ile aynı seviyeye ulaştığını ve UHC emisyonunun, tüm motor yüklerinde ortalama olan CNG / dizel durumuna göre karşılaştırıldığında yaklaşık %32.5'e düştüğünü belirtmişlerdir. CNG / biyodizel yakıtı kullanımı durumunda oluşan NO_x emisyonu miktarının CNG / dizelden daha yüksek olduğunun sonucuna ulaşmışlardır.

Reitz ve Duraisamy [28] yaptıkları derlemede, RCCI motorundaki yakıt verimliliğini ve yanmayı iyileştirmek için yakın zamanda yapılan çalışmaları özetlemişlerdir. Araştırmacılar, hafif ve ağır taşıt motorlarında yapılan son RCCI deneylerini ve hesaplama çalışmalarını incelemişlerdir. Ayrıca geleneksel ve alternatif yakıtları (doğalgaz, etanol ve biyodizel) kullanarak geleneksel dizel, gelişmiş dizel ve HCCI kavramlarını karşılaştırmışlardır.

Kalsi ve Subramanian [29] yaptıkları çalışmada, HCNG'nin (Hidrojenle Harmanlanmış Sıkıştırılmış Doğal Gaz), biyodizel yakıtlı RCCI motorunda kullanılması durumunda; motorun performans, yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Pilot yakıt olarak B100'ü (Pongamia Pinnata Biyodizel) doğrudan sıkıştırma sırasında motor silindirine enjekte etmişler, ana kontrollü yakıt olarak CNG ve %18 HCNG yakıtı kullanarak emiş stroku sırasında elektronik kontrollü ünite yardımıyla enjekte etmişlerdir. Deneysel testleri motor üzerinde 5 kW elektrik gücü çıkışı ile 1500 d/d sabit hızla gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarda, tüm HCNG enerji paylaşımlarındaki HC, CO ve is emisyonlarının, CNG'ye kıyasla daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, NOx emisyonunun HCNG ile sıra dışı olarak arttığını, ancak bu artışın biyodizel yakıtı kullanımı durumundakinden daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Costa vd. [30] yaptıkları çalışmada, sentetik gaz / biyodizel ikili yakıt modunda çalışan sıkıştırma ateşlemeli motorun sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar amaçlarının, sentaz gazının kullanımı ile ilgili yanma prosesi üzerindeki ana etkileri ve farklı biyokütle nem içeriğinin güç çıkışı ve ana kirletici emisyonu üzerindeki etkilerini saptamak olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak da, enerji verimliliğini artırmak ve çevresel etkiyi azaltmak için motorların uygun şekilde değiştirilmesi ve optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Yüksek yüklü dizel güç jeneratöründe yalancı biyodizel harmanlarıyla, etanol RCCI uygulamasının analizini gerçekleştiren Işık ve Aydın [31] yaptıkları çalışmada, aspir yağı-biyodizel / dizel karışımlarını kullanarak bir dizel jeneratörde RCCI'nin etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Sonuçlarda, etanol kullanılarak yapılan RCCI işleminde, her iki RCCI modu için yanma geciktirilirken, özellikle yüksek reaksiyona dayanıklı yakıt olarak B50'nin (Biyodizel-Dizel Karışımında %50 Aspir Biyodizel) kullanımı ile tepe basınç değerlerinin arttığını bulmuşlardır. Özellikle, BSFC'nin (Efektif Özgül Yakıt Tüketimi) önemli derecede arttığını gözlemlemişlerdir. NO_x, emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını, CO ve HC emisyonlarının düşük miktarda arttığını tespit etmişlerdir.

Molina vd. [32] yaptıkları çalışmada, ağır hizmet tipi bir motorda RCCI yanma konseptinin düşük yükten tam yüke kadar olan ki çalışma aralığının uzatılması konusunda çalışma yapmışlardır. HD (Ağır Hizmet) tek silindirli araştırma motorunda düşükten tam yüke doğru RCCI işlemini gerçekleştirmişlerdir. Performans ve emisyon sonuçlarını, motor testini 3D-HAD modellemesi ile birleştirerek analiz etmişlerdir. Sonuçlarda, düşükten orta yüke kadar RCCI işlemi için çift enjeksiyon stratejilerinin kullanılması gerektiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, yüksekte tam yüke kadar ki olan çalışmada, esasen silindir içinde aşırı miktarda oluşan basınç gradyanlarından kaçınmak için tekli enjeksiyon stratejileri kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Benajes vd. [33] yaptıkları deneysel çalışmada, RCCI'lı yanma konseptinin bütün motor haritasında çalıştırılabilme özelliklerini araştırmışlar ve CDC'ye kıyasla avantajlarını tartışmışlardır. Deneyleri, benzinli ve dizel yakıtlı, tek silindirli bir dizel motor kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların, bu yanma stratejisini kullanarak elde ettikleri motor haritalama sonuçlarında, RCCI'lı yanmanın, 14 bar IMEP'e (Ortalama İndike Basınç) kadar EURO VI NO_x emisyon sınırını karşılamasına izin verdiğini saptamışlardır. Son olarak, RCCI'nın nominal motor ayarlarını kullanarak CDC ile doğrudan karşılaştırmasını yapan araştırmacılar, RCCI'nın SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) ve DPF (Dizel Partikül Filtresi) gibi sonradan işleme sistemlerinin kullanımını azaltmak için potansiyel bir çözüm olabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Lee vd. [34] yaptıkları çalışmada, çift yakıtlı yanmanın özelliklerini tek yakıtlı yanma ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar çift yakıtlı yanma modlarını HRR (Isı Salınım Oranı) şekillerinin analizine göre sınıflandırmışlardır. Dizel enjeksiyon zamanlamasını, dizel ve port enjeksiyonunda kullanılan benzin oranlarını ve toplam eşdeğerlik oranını her iki yakıtlı yanma modunu karakterize etmek için ana değişkenler olarak seçmişlerdir.

Sonuç olarak, ikili yakıt yanmasının HRR şekillerine göre üç tip olarak sınıflandırılabilceğı ve çoğunlukla reaktivite gradyanı ve toplam eşdeğerlik oranından etkilenebileceğı sonucuna ulaşmışlardır.

Kavuri ve Kokjohn [35] yaptıkları çalışmada, birden fazla modda eş zamanlı performansı göz önüne alarak, bir RCCI'lı yanma sisteminin hesaplamalı optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. RCCI yanmanın, orta yük koşullarında verimlilik ve emisyon açısından CDC üzerinde geliştirilmiş performans sunduğunu saptamışlardır. Bununla birlikte, yüksek ve düşük yük koşullarında çalışmanın, RCCI yanmasında önemli bir sorun teşkil ettiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar mevcut analizde, düşük yük-yüksek hız koşulunda ve yüksek yük-düşük hız koşulundaki işletim performansını dikkate alarak gerçekleştirilen bir hesaplama optimizasyon çalışmasından elde edilen sonuçları tartışmışlardır.

Kavuri vd. [36] mevcut çalışmada, yüksek yük ve düşük hız koşullarında RCCI ve GCI (Benzin ile Sıkıştırma Ateşleme) yanma stratejilerini karşılaştırmak için ayrıntılı CFD modellemesini ve motor deneylerini gerçekleştirmişlerdir. RCCI ve GCI yanmasının hesaplamalı optimizasyonlarını, 20 bar brüt ortalama indike basınç ve 1300 d/d'da gerçekleştirmişlerdir. GCI stratejisinin şarj koşullarındaki küçük değişikliklere, RCCI stratejisinden daha duyarlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Dempsey vd. [37] yaptıkları çalışmada, HCCI, RCCI ve PPC (Kısmen Ön Karışmış Yanma) yanma türlerinin silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. RCCI yanmasını HCCI ve PPC yanma modelleri ile karşılaştırdıklarında RCCI yanmasının daha uzun yanma süresine ve daha düşük basınç artış oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak daha düşük yanma verimi meydana gelmesine rağmen, RCCI yanmasında daha az miktarda ısı kaybı oluşmasından dolayı indike verimin daha yüksek olduğunu saptamışlardır.

Dört zamanlı, dört silindirli, direkt enjeksiyonlu RCCI bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve HFK (Hava Fazlalık Katsayısı) değişimlerinin yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak inceleyen Uyumaz ve Solmaz [38] yaptıkları çalışmada, RCCI bir motorda porttan izooktan yakıtını direkt olarak silindir içerisine, n-heptan yakıtını ise ÜÖN'dan 100, 80, 60, 50, 40, 30, 20 °KA önce püskürterek RCCI yanması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Sonuç olarak araştırmacılar, maksimum indike termik verimi 80 °KA enjeksiyon zamanlamasında ve HFK= 2.2 değerinde %42.47 olarak elde etmişlerdir.

Tang vd. [39] yaptıkları çalışmada, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemesinde yakıt tabakalaşma derecesinin etkisi üzerine çoklu optik teşhis konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmada deney motorunu, 1200 d/d hızında ve yaklaşık 7 bar yük altında brüt IMEP'de çalıştırmışlardır. Zamanla çözülen doğal yanma parlaklık görüntüleme ve tek atışlı OH PLIF görüntüleme yardımıyla, RCCI-10 örneğinin aşamalı yanma işlemi sunduğunu, yanma odasında yüksek reaktivite bölgesinde otomatik ateşlemenin gerçekleştiğini ve daha sonra başka bir otomatik ateşlemenin yapıldığını tespit etmişlerdir. Formaldehitin PLIF görüntülerinde, n-heptanın bulunduğu bölgelerde LTHR (Düşük Sıcaklık Isı Salınımı) fazında formaldehitin ilk kez oluştuğunu tespit etmişlerdir.

RCCI motorlarının emisyon ve performans karakterinin incelenmesi adlı yüksek lisans tez çalışmasında Gözen [40], RCCI motorunda azot oksit ve partikül emisyonları, metanol ve dizel yakıtını farklı yakıt karışım oranları, farklı enjeksiyon zamanları ve bunlara EGR etkisini araştırmıştır. Dizel modelin doğrulanmasında FORD OTOSAN test laboratuvarlarından alınan motor dinamometre sonuçları ile AVL Fire CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programının analiz sonuçlarını kullanmıştır. RCCI motorunu 32 farklı analiz deneyi ile incelemiştir. Alınan analizlerden, 25'inde NO emisyonunda azalma gözlemleyebilirken, sadece 7 tanesinde is oluşumunu düşürebildiğini belirtmiştir.

Wang vd. [41] yaptıkları çalışmada, dizel motorlarda çeşitli motor yüklerinde RCCI operasyonunu sağlamak için bir parametrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yanma performansı üzerine operasyonel parametrelerin (emme basıncı, egzoz gazı devridaim oranı, benzin oranı, dizel enjeksiyon zamanlaması, vb.) etkisini araştırmaya odaklanan deneysel araştırmalar yapmışlar ve çeşitli motor yüklerinde emisyon özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlarda, ultra düşük NO_x ve is emisyonlarının yanı sıra yüksek termik verimliliğin benzin / dizel çift yakıtlı RCCI rejimi ile orta-yüksek yüklerde eş zamanlı olarak elde edilebileceğini tespit etmişlerdir.

RCCI motorunun yanma ve performans kalitesinin artırılması için yakıt enjeksiyon parametrelerinin modellenmesini ve analizini gerçekleştiren Nazemi ve Shahbakhti [42], CONVERGE CFD kodunda ayrıntılı bir 3D/CFD yanma modeli geliştirmişler ve farklı motor çalışma koşullarında deneysel verilere göre doğrulamışlardır.

Optimizasyon sonuçlarında, püskürtme açısının 55° , SOI = -53° ATDC (Üst Ölü Noktadan Sonra), 580 bar enjeksiyon basıncı ve PR = 0.76 değerlerinin, incelenen hız ve yük koşulları için dört ana yakıt enjeksiyon parametresi içinde en iyi kombinasyonu sağladığını saptamışlardır. Bu parametre setini seçerek, HC ve CO emisyonlarını temel duruma göre %23 ve %39 oranında azalttıklarını ve yanma verimlerinde gözle görülür bir iyileşme tespit ettiklerini belirtmişlerdir.

Wang ve arkadaşları [43] yaptıkları çalışmada, dizel yakıtlı LTC'nin, düşük yükte yüksek termik verimliliğini korumasını ve buna bağlı olarak aynı anda düşük NOx ve is emisyonlarını elde etme potansiyelini araştırmışlardır. Sonuçlarda, dizel LTC'nin biraz daha yüksek is ve NOx emisyonları verebileceğini, ancak yakıt tüketiminin yanı sıra dizel LTC rejimini temsil eden RCCI stratejisi ile CO ve HC emisyonlarının da düşük yüklerde daha uygun olabildiğini gözlemlemişlerdir.

Benajes vd. [44] yaptıkları deneysel çalışmada, piston gövdesi geometrisinin düşük, orta ve yüksek motor yüklerinde RCCI performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, 14.4 / 1 sıkıştırma oranına sahip üç farklı piston geometrisi ve tek ve çift enjeksiyon stratejilerini kullanarak çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri, çift yakıtlı çalışma için uyarlanmış, ağır hizmet tipi tek silindirli bir motorda 1200 d/d'da gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda, piston geometrisinin, düşük yük koşullarında yanma gelişiminde büyük etkiye sahip olduğunu, daha çok tek enjeksiyon stratejileri kullanıldığında verimli olduğunu tespit etmişlerdir. Emisyon koşulları ve üç geometrinin, çift enjeksiyon stratejileri kullanıldığında düşük ve orta yükte, ultra-düşük NOx ve is emisyonları sağladığını, yüksek yükte ise kabul edilemez emisyonlar oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kakaee vd. [45] yaptıkları çalışmada, piston gövdesi geometrisinin, doğal gaz / dizel yakıtının kullanıldığı orta yükte çalışan bir RCCI motorundaki performans ve emisyonlara olan etkilerini araştırmışlardır. Stok, küvet ve sabit sıkıştırma oranı 16.1 / 1 olan üç farklı piston kase geometrisine sahip pistonları çift enjeksiyon stratejisinde kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda, küvet tasarımının yüksek hızlarda en iyi performansı ve emisyonu sağladığını saptamışlardır.

Li vd. [46] yaptıkları çalışmada, yüksek hızda çalışan bir benzinli / biyodizel yakıtlı RCCI motorunda kullanılan üç farklı piston kâse geometrisinin yanma karakteristikleri, motor performansı ve emisyonlara olan etkilerini sayısal çalışma gerçekleştirerek araştırmışlardır. Bu üç geometrinin; HCC (Yarım Küre Yanma Odası), SCC (Sığ Derinlik Yanma Odası) ve OCC (Omega Yanma Odası) olduğunu belirtmişlerdir. RCCI motorundaki yanmayı simüle etmek için, birleştirilmiş KIVA4-CHEMKIN kodunu kullanmışlardır. Simülasyon sırasında, motor devrini 3600 d/d'da sabitlemişlerdir. Sonuçlarda, kullanılan SCC geometrisinin, incelenen çalışma koşulları altında üç geometri içerisinde RCCI yanması için en uygun piston tasarımı olduğunu belirtmişlerdir. SCC ile göreceli olarak daha düşük CO, NO ve is emisyonlarının oluştuğunu, bunun yanında daha iyi yanma ve performans elde edildiğinin sonucuna varmışlardır.

Lee ve arkadaşları [47] yaptıkları çalışmada, harmanlanmış benzinli dizel yakıtın yakılmasıyla çalıştırılan sıkıştırma ateşlemeli motorun, yanma odası geometrisinin ve çalışma koşullarının optimizasyonu için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar sayısal çalışmada, benzin-dizel yakıtının yanma ve emisyon özelliklerini modellemek için KIVA CHEMKIN çok boyutlu CFD kodu kullanmışlardır. Çalışmada yakıt karışımındaki benzin oranının etkilerini bulmak için yanma ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır. Benzin oranının artması ile ateşleme gecikmesinin ve maksimum basıncın yükselme oranının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca is emisyonunu geleneksel dizel yanma ile karşılaştırdıklarında %90'a kadar azalttıklarını belirtmişlerdir.

Li vd. [48] yaptıkları derlemede, RCCI yanma tekniğinin son durumu hakkında kapsamlı bir bilgi edinmek amacıyla; alternatif yakıtların ve setan sayısal iyileştiricilerin kullanımını ve yakıt oranını, farklı enjeksiyon stratejilerini, EGR oranını, CR (Sıkıştırma Oranı) ve kase geometrisinin motor performansı ve emisyon oluşumuna etkileri dahil olmak üzere konuyla ilgili ayrıntılı inceleme sunmuşlardır. Kullanılan iki yakıtın enjeksiyon zamanlamalarını stratejik olarak ayarlayarak, üretilen reaktivite degradasyonunu, yanma aşamasını kontrol edebilir olduğunu, ayrıca basınç yükselme oranının ve ısı salınım oranının azaltılabilir olduğunu tespit etmişlerdir.

Salahi vd. [49] yaptıkları çalışmada, bir RCCI motorundaki bazı çalışma aralıklarını genişletmek için bir ön haznenin kullanılmasını, detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar ile birleştirilmiş çok boyutlu HAD kullanarak araştırmışlardır. Bunu başarmak için RCCI modunda, doğal gaz / dizel ile çalışan bir ön hazneli tek silindirli bir motorda yanma ve akış alanını sayısal olarak modellemişlerdir. Sonuçlarda, dizel yakıt yerine doğal gazın kullanılması durumunda doğalgazın daha büyük bir bölümünü kullanacak şekilde genişletme yeteneği sağladığını tespit etmişlerdir.

Benajes vd. [50] yaptıkları çalışmada, çift modlu çift yakıtlı yanma sistemi ile partikül madde özelliklerini ve ikili yakıt modundaki yakıt tüketimini tespit etmek amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmayı, 15.3 / 1 sıkıştırma oranına sahip orta menzilli EURO VI dizel motoru kullanarak tüm motor haritası üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda tamamen ön karışmış RCCI yanmasında, küçük partiküllerin hakim olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Benajes ve arkadaşları [51] yaptıkları çalışmada, 1200 d/d temsili bir motor devri için düşük yükten tam yüke kadar çift modlu çift yakıt konseptini kullanarak gaz emisyonlarının yanı sıra partikül boyutu dağılımını ölçmüşlerdir. Çalışmanın ana sonuçlarında, çift modlu çift yakıt konseptinin daha az is oluşturmaya rağmen geleneksel dizel yakma moduna göre daha fazla partikül oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Garcia vd. [52] yaptıkları çalışmada, ağır hizmet tipi motorlar için EURO VI emisyon düzenlemesi tarafından önerilen WHVC (Dünya Uyumlaştırılmış Araç Döngüsü) testinin bir şasi dinamometre versiyonu olan WHTC (Dünya Uyumlaştırılmış Geçici Döngü Stratejisi) uyarınca ikili yakıt modlu RCCI yanma stratejisinin emisyonlarını ve performansını karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda, NO_x emisyonlarını ikili modlu ikili yakıt sistemi yardımıyla yaklaşık %87 oranında daha düşük değerde elde etmişler ve bir SCR işleme sistemi gerekmeden EURO VI gerekliliklerini karşıladıklarının sonucuna ulaşmışlardır.

Jo ve arkadaşları [53] yaptıkları çalışmada, RCCI motorda; yakıt besleme oranı, enjeksiyon zamanlaması ve emme havası sıcaklığı ile ilişkili olarak yanma ve egzoz özelliklerini analiz etmişlerdir. Etanolü bir giriş portuna enjekte etmişler; etanol tarafından sağlanan oranın artırılmasının, ateşleme gecikmesini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Ayrıca yanma süresinin uzamasının ve yanma sıcaklığının düşmesinin NO_x emisyonunu 19.1'den 2.7 g / kWh'e düşürdüğünü; ancak, THC emisyon değerini 1.1'den 2.5 g / kWh'e ve CO emisyon değerini ise 5.2'den 10.1 g / kWh'e yükselttiğini belirtmişlerdir. Ek olarak, hava giriş sıcaklığının artmasının, THC (Toplam Hidrokarbon) ve CO emisyonlarının düşmesine, NO_x emisyonlarının ise artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Charitha vd. [54] bir dizel motoru modifiye ederek RCCI yanmasının performans ve emisyon özelliklerini test etmişlerdir. Ayrıca CDC ile mevcut motor üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar düşük reaktiviteli yakıt olarak COME (Pamuk Çekirdeği Biyodizeli) yakıtını enjektör yardımıyla emme manifolduna, yüksek reaktiviteli yakıtı ise doğrudan enjeksiyon yoluyla silindire enjekte etmişlerdir. Sonuçlarda COME yakıtı kullanımı ile NO_x, is ve CO₂ emisyonlarında azalma UHC emisyonunda ise; düşük COME yüzdelğinde düşüş ve yüksek COME yüzdelğinde ise artış gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, %10-20 COME kullanımının optimum sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Zhong ve arkadaşları [55] yaptıkları çalışmada, düşük yüklerdeki ateşleme zorluğunun ve yüksek yükler sırasında azami basınç yükselme oranının RCCI motorunun ticarileştirilmesinin ana sorunu olduğunu belirtmişler ve bu sorunu çözmek için, hidrojene katalitik biyodizeli farklı oranlarda benzin ile karıştırmışlar ve farklı çalışma yükleri altında yanma ve emisyon özelliklerini tek bir enjeksiyon modunda incelemişlerdir. Sonuçlarda; G70H30 karışım yakıtının kapsamlı bir şekilde daha iyi yanma ve emisyon performansı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, yüksek yüklerde yüksek maksimum basınç artış hızı ve yüksek partikül madde emisyonunun problem teşkil ettiğini belirtmişlerdir. Yukarıdaki belirtilen bu sorunu çözmek amacıyla G70H30 için çoklu enjeksiyon stratejilerini uygulamışlar ve %20 pilot enjeksiyon oranı için partikül madde emisyonunun, tek enjeksiyon modundan daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Atık taşıt lastiklerinden üretilen prolitik yağ ile ilgili çalışmalarda bu çalışma kapsamında incelenerek kullanımı için bir literatür oluşturulmuştur. Bu çalışmalarda;

Wang vd. [56] yaptıkları çalışmada, atık lastiklerin termal pirolizinden üretilen alternatif yakıtların dizel motorlarında kullanımı adlı çalışmasında atık lastik pirolizinden elde edilen katı, sıvı ve gaz ürünlerinin verimlerini araştırmışlardır. Sonuçlarda, 400 °C piroliz sıcaklığının en iyi sıvı ürün elde etmek için en uygun çalışma sıcaklığı olduğunu belirtmişlerdir.

Piroliz sıcaklığı arttırılma işleminin yüksek kalorifik değere sahip TPO (Lastik Piroliz Yağı) üretimine olanak sağladığı ve bunun da motor beygir gücünü arttırdığını tespit etmişlerdir. Yüksek TPO oranı sonucunda TPO / dizel karışımının yüksek kükürt ve yüksek SO₂ emisyonu oluşturduğunu saptamışlardır. Aynı motor devrinde, yüksek TPO oranının ateşleme gecikmesinin uzamasına bu durumda daha yüksek silindir basıncının oluşmasına yol açtığını tespit etmişlerdir.

Öztop vd. [57] yaptıkları çalışmada, buji ateşlemeli bir motorda atık taşıt lastiklerinden elde edilen yakıtın benzin gibi kullanımını inceledikleri çalışmalarında, atık taşıt lastiklerinden elde edilen yakıtın buji ateşlemeli bir motordaki performansı ve egzoz emisyonuna etkilerini deneysel bir çalışma ile incelenmişlerdir. Atık lastiklerden elde edilen yakıtın benzin gibi direkt yakıt olarak kullanımının sınırlı olduğunu ve kurşunsuz benzin ile karşılaştırıldığında viskozitesinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılan test motorunun %60'a kadar atık lastik yakıt içeren karışım yakıtıyla normal çalışma şartlarında çalıştığını tespit etmişlerdir. Atık lastik yakıtının motor performans parametrelerinde ve emisyonlarında herhangi bir değişiklik olmadan %60'a kadar karışmış biçimde benzin yakıtı olarak kullanılabilir olduğunun sonucuna ulaşmışlardır.

Tudu vd. [58] yaptıkları çalışmada, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda lastikten üretilmiş, dizel ile karıştırılmış yakıtta dietil eterin etkisi adlı çalışmasında lastikten elde edilen yakıtın dizel ile karışımının küçük miktardaki ilavelerinin motorun performans, yakıt yakma ve emisyon parametreleri üzerinde etkilerini değerlendirmişlerdir. Testleri tek silindirli dört zamanlı hava soğutmalı 4.4 kW gücünde 1500 d/d sabit hızda bir dizel motorunda farklı yük koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarında, DEE (Diethyl Ether) eklenmesinin performansı, yanmayı iyileştirdiği ve is emisyonlarını azalttığını belirtmişlerdir.

Murugan vd. [59] yaptıkları çalışmada, dizel motorlarında lastik piroliz yağı kullanımı adlı çalışmada tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda %10, %30 ve %50 oranlarında lastik piroliz yağının dizel yakıtı ile karışımından oluşan yakıtın performans, emisyon ve yanma karakteristiklerini testlerle değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, Aromatik içeriğini ve viskozitesini azaltarak dizel motorlarda TPO yakıtının kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

Murugan vd. [60] yaptıkları çalışmada, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda kullanılan lastik piroliz yağı ile dizel yakıt karışımının performans, emisyon ve yanma özelliklerinin araştırmışlardır. Çalışmalarında, atık taşıt lastiklerinden türetilen TPO'nun özelliklerini analiz etmişler ve sıkıştırma ateşlemeli motor için yakıt olarak kullanılabileceğini fakat ham TPO yağının yüksek viskozitesinin ve kükürt içeriğinin problem oluşturabileceğinden bahsetmişlerdir.

Aydın [61] yaptığı doktora tezi çalışmasında, atık taşıt lastiklerinden yakıt üretilmesi ve dizel motorlarında kullanılmasını araştırmış, atık taşıt lastiklerinden piroliz yöntemi ile elde edilen yakıtın dizel motorlarında kullanılabilecek bir yakıt olduğunun sonucuna ulaşmıştır. Deneyler için, tek silindirli, silindir hacmi 0.406 L (Litre) olan maksimum 10 HP (Beygir Gücü) gücüne sahip, dört zamanlı, hava soğutmalı Rainbow LA186 marka bir dizel motoru kullanmıştır.

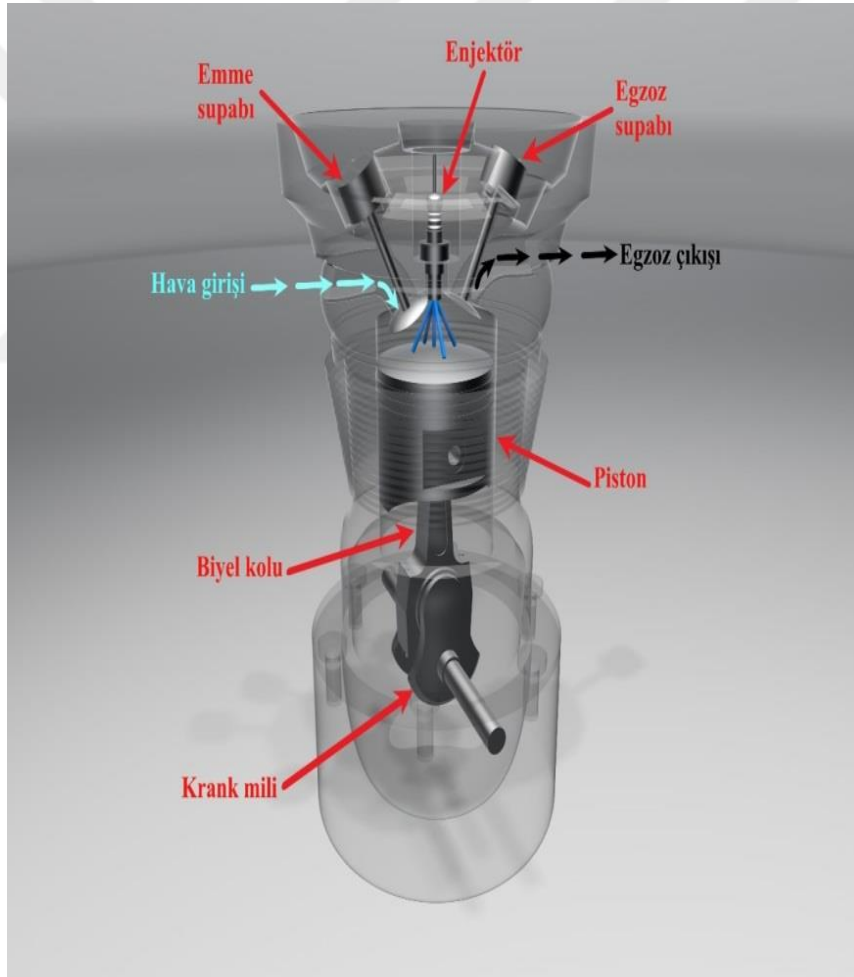
Yapılan literatür araştırmaları yukarıda iki bölüm halinde sunulmuştur. Bu bağlamda, yapılacak çalışmanın mevcut çalışmalara katkı vereceği düşünülmektedir. Yapılan çalışmada RCCI sistemine uygun hale getirilen dizel esaslı tek silindirli bir motorda farklı oranlarda pirolitik yağ, dizel ve benzin karışımları kullanılmıştır. Çalışmanın daha anlaşılır hale gelmesi amacıyla; içten yanmalı motorlar, dizel motor prensipleri, düşük sıcaklık yanma konseptleri ve kullanılacak yakıtlarla ilgili bazı bilgiler bundan sonraki bölümlerde sunulmuştur.

1.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar şu anda farklı birçok alanda güç üretmek için yaygın olarak kullanılan makinalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu makinalara örnek olarak, benzinli motorlar, dizel motorlar, gaz türbinli motorlar ve roket tahrik sistemleri verilebilir. İçten yanmalı motor, hava ve yakıtın periyodik ateşlemesiyle karakterize edilir ve genelde pistonlu motor olarak adlandırılır. Aynı hacimlerde hava ve yakıt çevrimsel olarak işlenir. Benzinli pistonlu motorlar ve dizel motorlar bu gruba örnek olarak verilebilir [62].

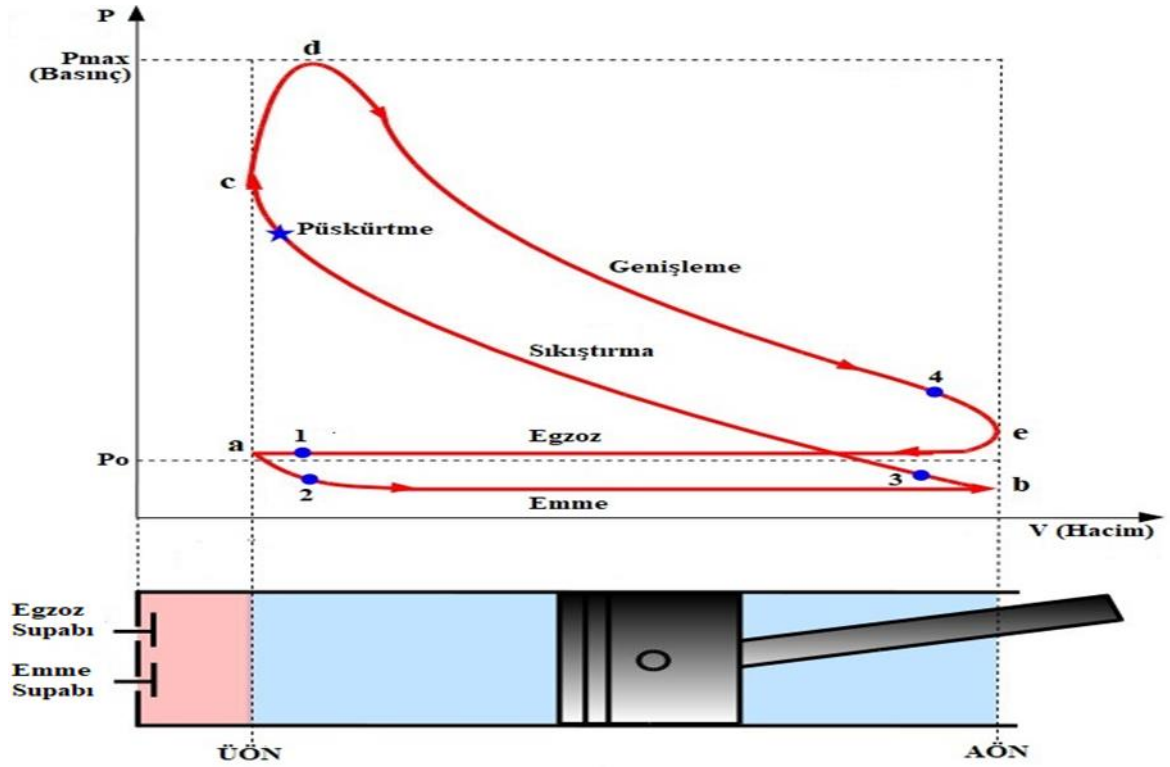
1.2. Dizel Motorlar

Prof. Dr. Rudolf Diesel 1892 yılında, havanın belirli oranlarda sıkıştırılması sonucunda meydana gelen sıcaklığın, yakıtın tutuşma sıcaklığından yüksek olduğu, bugünün modern dizel motorlarına benzeyen dört zamanlı ve mekanik püskürtmeli ilk makinesinin patentini aldığı bilinmektedir. Bu makinede havanın sıkıştırılmasından sonra, yakıt ÜÖN'den önce silindirlere püskürtülmekte ve yanmanın başlaması bir basınç yükselmesi olmadan meydana gelmektedir. Yakıt enjeksiyonu sona erince, yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşmış gaz kütlelerinin genişlemesi işlemine geçilmektedir [63]. Şekil 1.1'de bu sisteme ait genel görünüm verilmiştir.



Şekil 1.1. Dizel yanma konsepti genel görünümü

Bu temel çalışma prensibi hala daha günümüz dizel motorlarının çalışmasına olanak sağlamaktadır. Aşağıdaki Şekil 1.2 ve 1.3'de dizel motorların gerçek çevrim diyagramı ve çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Dört zamanlı dizel motorların gerçek p-v çevrim diyagramı [64].

1: Emme supabı açılması.

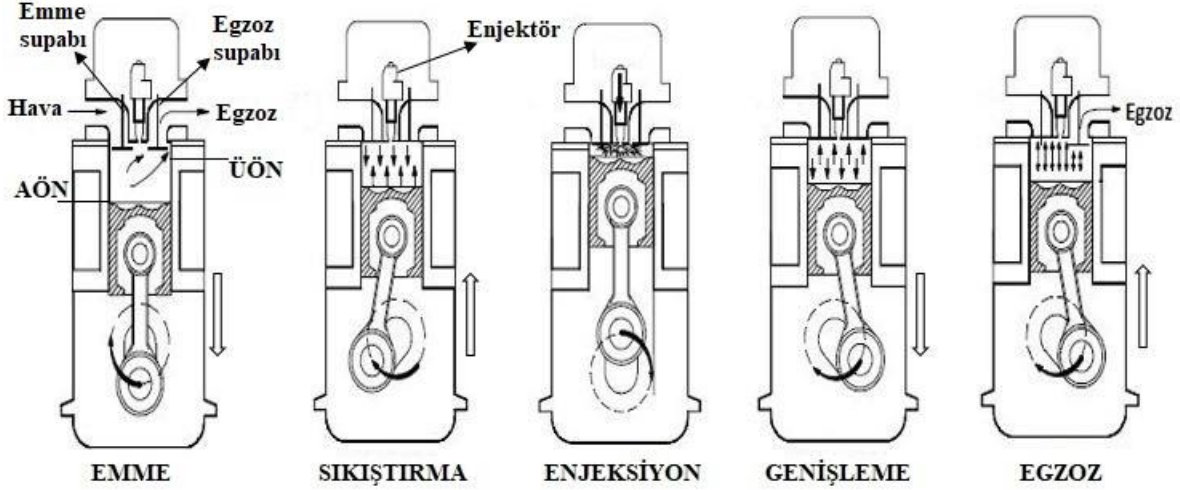
3: Emme supabı kapanması.

2: Egzoz supabı kapanması.

4: Egzoz supabı açılması.

Dizel motorları; sıkıştırılarak basınç ve sıcaklığı arttırılan havanın içerisine püskürtülen yakıtın kendiliğinden tutuşması prensibine göre çalışırlar. Bu ilkeye göre ısının işe dönüşmesi şu aşamalara göre olmaktadır: Başlangıçta temiz hava motor silindirleri içerisinde oluşan alçak basıncın etkisiyle emilir veya doldurulur. Ardından piston silindir içerisindeki havayı sıkıştırarak basınç ve sıcaklığını arttırır. Sıkıştırma oranına bağlı olarak sıkıştırılan havanın basıncı 28-40 bar, sıcaklığı ise 450-650 °C aralığında seyredir. Ardından yakıt enjeksiyonu esnasında meydana gelen tutuşma aşamasından sonra yanma aşaması başlar ve buna bağlı olarak da silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık sırasıyla 40-80 bar ve 1400-1900 °C mertebelerine yükselir. Oluşan bu yüksek basınçlı gazlar piston tepesine kuvvet uygulayarak biyel kolu aracılığıyla işi krank miline aktarırlar. Bu süreç esnasında, yakıtın yanmasıyla açığa çıkan ısı enerjisinin büyük bir kısmı, krank milinin dönmesini sağlayan mekanik enerjiye dönüştürülür. Krank mili kendisine iletilen devir hareketini taşıtın tekerleklerine iletir.

Ardından iş kursunun sonuna doğru basınç ve sıcaklığı azalan yanmış gazlar atmosfere atılır ve silindirlerin yeni bir çevrim için, temiz hava ile doldurulması olayı tekrarlanır [63].



Şekil 1.3. Dört zamanlı dizel motorların çalışma prensibi [65].

1.3. Dizel Motorlarda Yanma

Maddelerin oksijenle tutuşma sıcaklığında oluşturdukları kimyasal reaksiyona yanma denir. Yanmayı oluşturan kimyasal reaksiyon sonucunda ısı enerjisi açığa çıkar. Silindir içinde yanma ile sıcaklığı ve basıncı artan gazın genişlemesi ile mekanik enerji elde edilir.

Hava/yakıt karışımı oranı ve oluşan yanma ürünlerine göre yanma dört grupta incelenmektedir. Bu yanma grubunu; teorik tam yanma, tam yanma, eksik yanma ve kısmi eksik yanma oluşturmaktadır.

1-) Teorik tam yanmada, tepkimeye giren yakıt moleküllerinden tam yanma ürünü olarak isimlendirilen ürünler (CO_2 , H_2O , N_2) oluşur. Yanmada kimyasal reaksiyon için minimum oksijen kullanılan ve yanma ürünleri arasında O_2 bulunmayan yanma şeklidir. Teorik tam yanma için gerekli olan hava miktarına teorik hava miktarı denir. Yanma için gerçekte kullanılan hava miktarının, teorik hava miktarına oranı HFK olarak adlandırılır. Teorik tam yanmada HFK olarak adlandırılan λ değeri 1.00'dir.

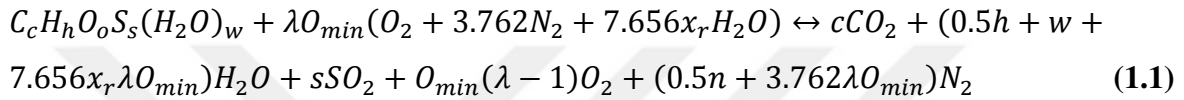
2-) Tam yanmada ise, gerekli hava miktarı teorik tam yanma durumundan fazla yani λ değeri 1.00'den büyüktür.

Yanma reaksiyonu sonucu tüm yakıt yanar ve ürünler arasında eksik yanma ürünleri yoktur. Tam yanma ürünleri CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 ve N_2 'dir.

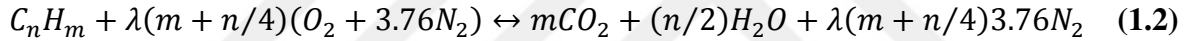
3-) Eksik yanma gerçekleşmesi halinde ise, hava fazlalık katsayısı 1.00'den küçüktür ve oksidasyonun tam olarak gerçekleşmemesinden dolayı yanma ürünleri arasında CO gibi eksik yanma ürünleri de bulunur. Eksik yanma ürünleri olarak C, CO ve H_2 verilebilir.

4-) Kısmi eksik yanmada ise, λ 'dan bağımsız olarak silindir içi sıcaklığa bağlı olarak CO_2 ve H_2O molekülerinin ısı parçalanma ile CO, OH, H gibi eksik yanma ürünlerine dönüştüğü yanma tipidir.

En genel halde yanma denklemi aşağıdaki gibidir.



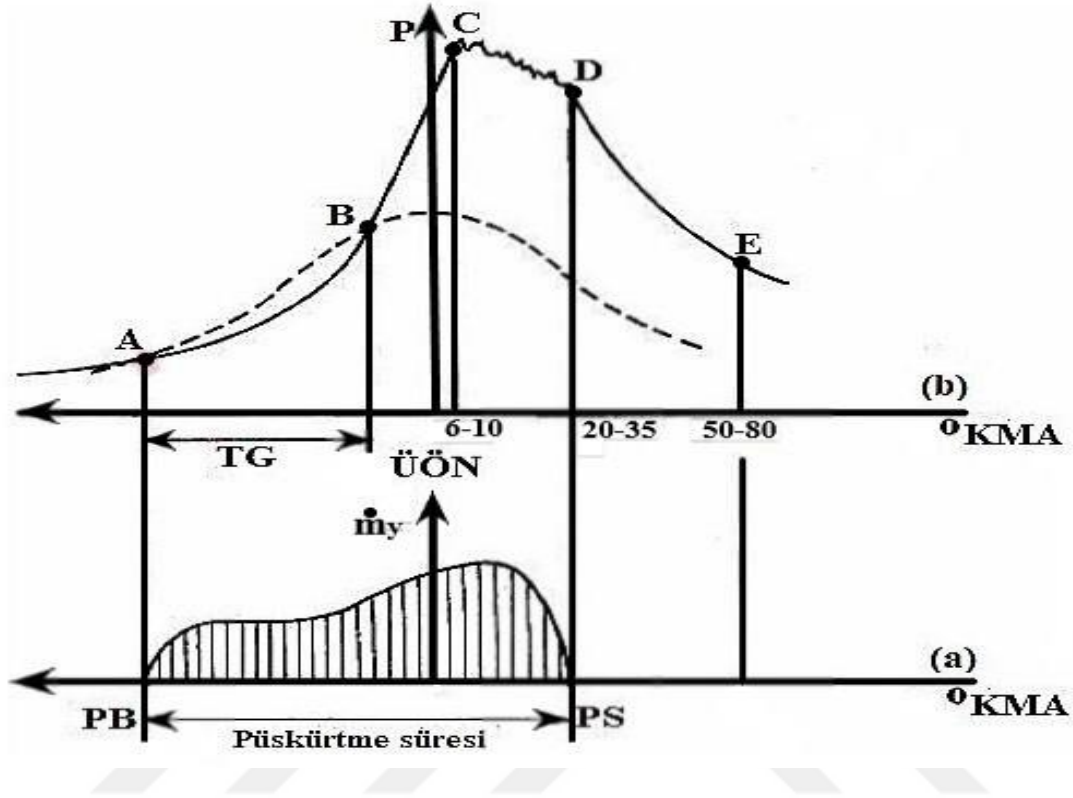
Aşağıda bir tam yanma hidrokarbon-hava reaksiyonu için temel stokiyometrik kimyasal eşitlik verilmiştir;



Uygulamada, benzinli motorlarda λ değeri yaklaşık 1.05'e ayarlanır. λ değeri 1.10'dan daha yüksek olursa yanma hızı azalır ve yanma süresi uzar. Bu problemi önlemek için ateşleme avansı arttırılır. Ancak bu durumda vuruntu oluşma durumu meydana gelebilir. Dizel yakıt kullanılan motorlarda ise λ değerinin 1.30'den düşük olması istenir, aksi takdirde yanma sıcaklığı düşme eğilimi içerisine girer ve motorda is oluşum miktarı artar ve bu durum sıkıştırma ateşlemeli motorlar için istenmeyen bir durumdur [66].

Dizel motorlarında yanma işlemini incelediğimizde hava, yakıtın tutuşma sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar sıkıştırılır, ardından enjeksiyonu yapılan yakıtın sıcak havayla teması sonucunda yanma işlemi başlar. Dizel motorlarında sıkıştırma işlemi esnasında yalnızca hava sıkıştırıldığı için yakıtın kendi kendine tutuşması söz konusu değildir. Bu sebeple dizel motorları çok yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabilirler. Dizel motorlarında yakıtın püskürtülmesi işlemi, pistonun üst ölü noktaya ulaşmasından önce başlar ve genişleme strokunun ilk bölümüne kadar devam eder ve bunu bağlı olarak da yanma daha uzun bir sürede gerçekleşir [67]. Yanma olayını üç ayrı safha halinde inceleyen Ricardo bunların; tutuşma gecikmesi, ani ve kumandalı (kontrollü) yanma safhaları olduğunu belirtmiştir.

Bu safhalar aşağıda açıklanmıştır [68]. Şekil 1.4’de bir dizel motoruna ait basınç – krank mili açısı derecesi değişimi diyagramı ile bu safhalar gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Bir dizel motoruna ait basınç-krank açısı değişimi diyagramı [68].

a) Püskürtme seyri

b) A-B arası Tutuşma gecikmesi; yakıtın enjektör yardımıyla silindire püskürtülmesi ile başlayan ve ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği ana kadar geçen süredir. Yakıtın yaklaşık %5-15’lik kısmı yanar.

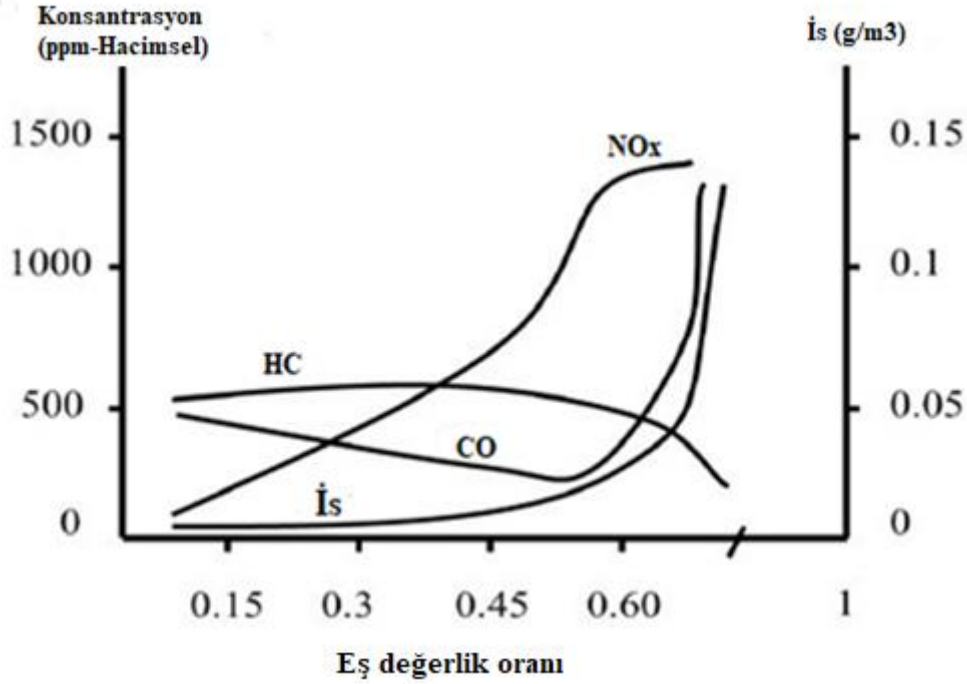
B-C arası Hızlı yanma safhası; alev yayılır, biriken ve gelen yakıt beraber yanar ve maksimum basınca ulaşılır. Kontrolsüz yanma gerçekleşir.

C-D arası Kumandalı yanma; kontrolsüz yanma işlemi bittiğinde silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık miktarı, enjektörden silindir içerisine püskürtülen yakıtı doğrudan doğruya yakabilecek bir seviyeye ulaşır ve hiç gecikme olmadan silindire giren yakıt yanar.

D-E arası Art yanma; diğer evrelerde silindirlere püskürtülen fakat yanma imkânı bulamayan yakıt zerreciklerinin oksijen buldukça yanmaya başlamasıdır. Kısa sürmesi istenir [69].

1.4. Dizel Motorlarda Oluşan Emisyonlar

Dizel motorlarda ortaya çıkan birincil egzoz emisyonları başlıca şunlardan oluşmaktadır; NO_x'ler, PM, CO ve THC'lerden oluşmaktadır. N₂, O₂, H₂O ve CO₂ gibi oluşan ikinci bileşimlerin konsantrasyonları birincil bileşimlere kıyasla çok daha düşüktür. Bununla beraber, emisyonların insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri daha önemlidir. Aşağıdaki şekilde dizel motorlarda oluşan kirletici emisyonlardaki tipik eğilimler gösterilmiştir. Şekil 1.5'de görüleceği üzere emisyon oluşumunda optimum bir aralığın mevcut olmadığı görülmektedir. Bu oluşan emisyonların temel oluşum mekanizmaları ve reaksiyon yolları aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmaktadır.



Şekil 1.5. Dizel motorlarda oluşan kirletici emisyonlardaki tipik eğilimler [70].

1.4.1. Azot Oksitler

NO_x'ler azot ve oksijenden oluşan bir kimyasal gruptur. Dizel motorlarda en çok rastlanan iki NO_x emisyonu NO ve NO₂ 'dir. NO_x emisyonları çoğunlukla bir NO₂ eşdeğeri temelinde düzenlenir, çünkü atmosferdeki insan faaliyetleri tarafından üretilen en yaygın NO_x formudur. Geleneksel dizel motor egzozundan çıkan birincil NO_x kirleticileri NO emisyonudur.

Dizelin geleneksel yüksek sıcaklık yanma işleminde NO oluşumu genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile açıklanabilir [71], bu mekanizmaya ait reaksiyonlar (1.3), (1.4) ve (1.5)'de verilmiştir. Ayrıca bu mekanizma, ısıl mekanizma olarak da adlandırılır, çünkü NO'nun çoğunluğunun 1727 °C'yi aşan bir sıcaklıkta oluştuğu bilinmektedir. Reaksiyon (1.3), N₂'deki güçlü üçlü bağları kırmak için yüksek aktivasyon enerjisi (yüksek sıcaklık) gerektirir. Bu nedenle, yerel yanma sıcaklığı ve yerel alev sıcaklığı termik NO_x oluşum hızını belirler [72].



1.4.2. Karbon Monoksit

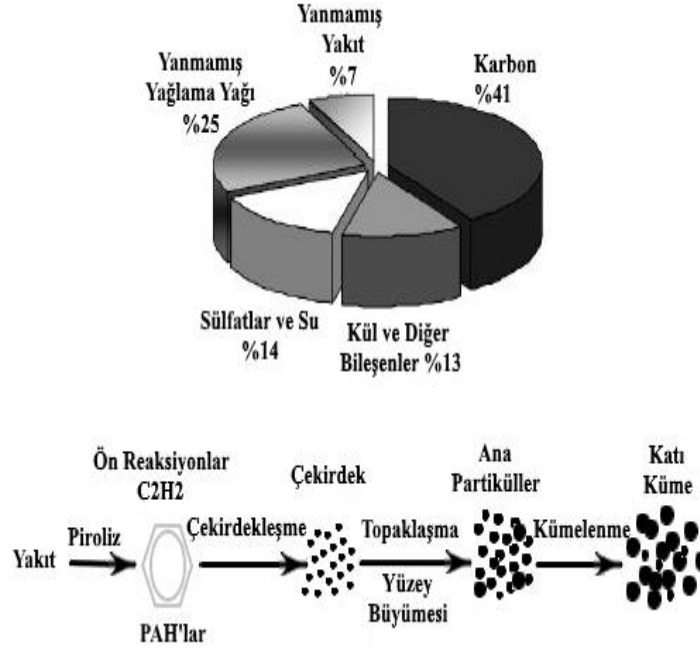
Karbon monoksit, bir hidrokarbon yakıtının tamamlanmamış oksidasyonu ile üretilir. Yeterli derecede yüksek sıcaklık ve mevcut oksijen, CO emisyonlarının CO₂'ye daha da oksitlenmesinin iki temel şartıdır. Bu sebeple, yakıt bakımından zengin bölgelerde başlangıçta oluşan CO emisyonları, geleneksel yüksek sıcaklık yanmasında fazla oksijen ile oksitlenmektedir. Tam tersi olarak, CO emisyonları, düşük sıcaklıkta yanmada, NO_x ve is emisyonlarını düşürmek için uygulanan oksitlenme eğilimi daha düşüktür [69]. Hidrokarbon alevlerinde karbon monoksitin oksidasyonu için baskın reaksiyonlar [66]:



1.4.3. İs (Duman) Emisyonları

Siyah duman olarak bilinen is, hava miktarının yetersiz olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Dizel motorlarında hem yakıt cinsinden hem de karışım şeklinden dolayı is oluşumuna sebebiyet veren etmenler fazladır.

İs teşekkülü olayına, oksijence fakir bölgelerde bulunan yakıt moleküllerinin ısı parçalanması (termik kraking) şeklinde bakılabilir. Sıvı ve gaz fazındaki hidrokarbonların katı is partikülüne dönüşümü altı aşamada tamamlanır. Bu aşamalar Şekil 1.6'da gösterildiği gibidir.



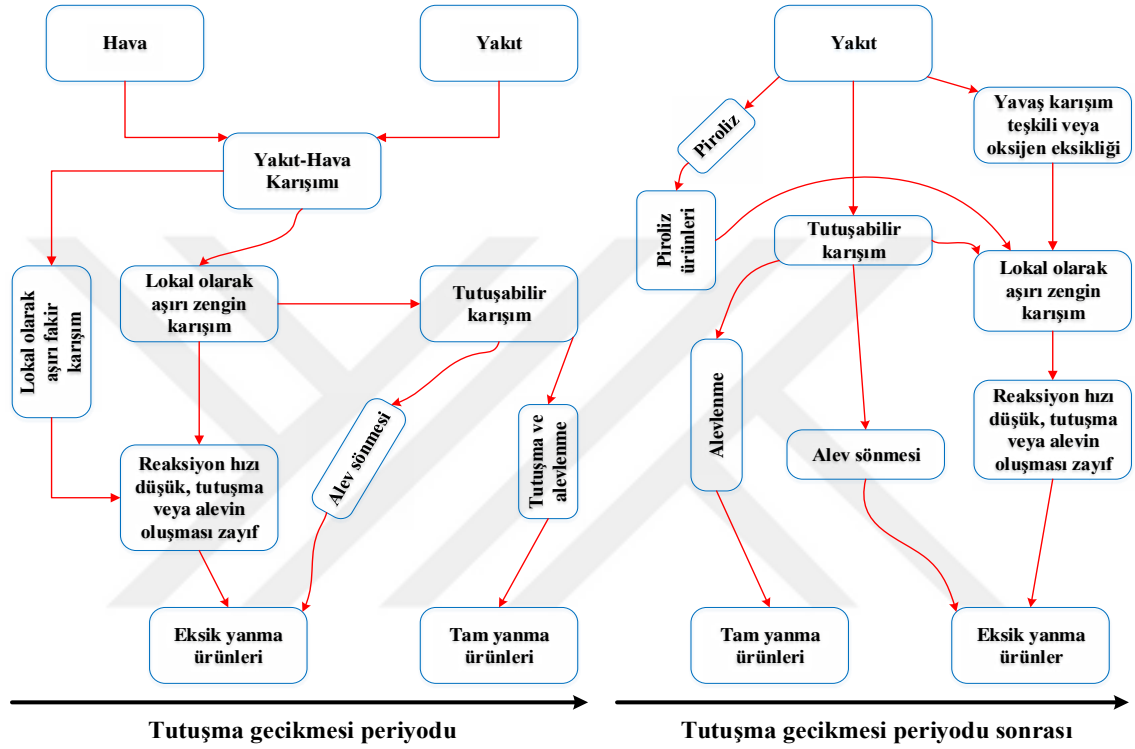
Şekil 1.6. Partikül kompozisyonu ve is oluşumu [73].

Şekil 1.6'da görüldüğü gibi hidrojenleri ayrılan karbonca zengin büyük moleküller birleşmektedirler (polimerizasyon), bu birleşmeler fazlaştıkça is zerrecikleri tezahür etmektedir (aglomerizasyon). Bu is zerrecikleri hava ile yeterli bir zaman ve sıcaklık içinde temasa geçebilirlerse yanabilmektedirler [68].

1.4.4. Toplam Hidrokarbon

Toplam hidrokarbon emisyonlarının çoğunluğunu, yakıt yakma reaksiyonlarındaki yanmamış yakıt ve hafif hidrokarbonlar oluşturmaktadır. THC emisyonlarının küçük bir kısmı, motor yağlama yağının buharlaşması ve oksitlenmesinden kaynaklanmaktadır.

Yüksek sıcaklık yanma modunda çalıştırılan dizel motorlar, yakıtsız yanma, yüksek yanma sıcaklığı, yüksek sıkıştırma oranı ve silindir içindeki doğrudan yakıt enjeksiyonu nedeniyle genellikle düşük THC emisyonları üretir. Yüksek THC emisyonlarının oluşması da uzun ateşleme gecikmelerinde ve düşük sıcaklıklı yanma modunda gerçekleşmektedir [72].



Şekil 1.7. Tutuşma gecikmesi ve sonrası THC emisyonlarının oluşumu [74].

Şekil 1.7’de tutuşma gecikmesi periyodu esnasında ve sonrasında THC emisyonlarının oluşum mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Tutuşma gecikmesi periyodundaki ve sonrasındaki şartlar; HC emisyonlarının oluşumu, yanmanın kararlı hale gelmesi ve özellikle emisyonların oluşumu açısından önem teşkil eder.

1.4.5. Dizel Motorlar İçin Emisyon Standartları

Son yıllarda zorunlu hale getirilen emisyon standartları oldukça katı sınırlamalar içermektedir. Son 25 yılda özellikle NO_x ve PM emisyon standartları değerleri ortalama %90 seviyelerinde düşürülmüştür.

NO_x ve PM oluşumlarının azaltılması için gerekli olan emisyon gereksinimleri dizel motor gelişimindeki zorlukları önemli ölçüde arttırmış ve buna bağlı olarak yeni yanma stratejileri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Tablo 1.2’de AB’nin belirlemiş olduğu emisyon standartlarının bazıları verilmiştir;

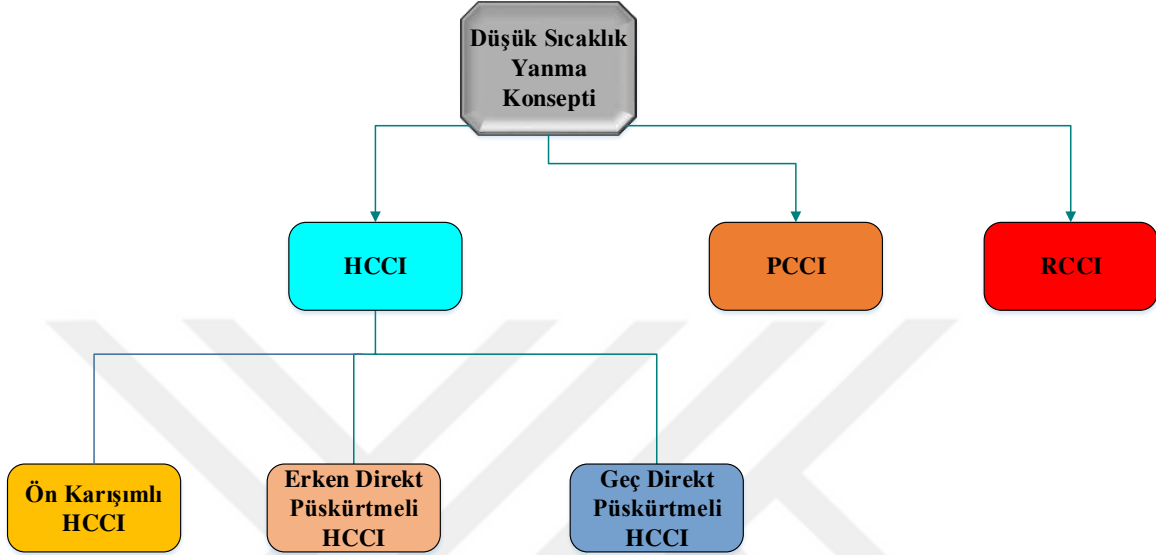
Tablo 1.2. Ticari taşıtlar için Euro emisyon standartları [2].

	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6	Taşıt ağırlıkları
CO (g/km)	2.72	1.0	0.64	0.5	0.5	0.5	< 1305 kg
	5.17	1.25	0.80	0.63	0.640	0.640	1305 - 1760 kg
	6.9	1.5	0.95	0.74	0.74	0.74	1760 - 3500 kg
NO _x (g/km)	–	–	0.50	0.25	0.18	0.08	< 1305 kg
	–	–	0.65	0.33	0.235	0.105	1305 - 1760 kg
	–	–	0.78	0.39	0.28	0.125	1760 - 3500 kg
HC+NO _x (g/km)	0.97	0.7	0.56	0.30	0.23	0.17	< 1305 kg
	1.4	1.0	0.72	0.39	0.295	0.195	1305 - 1760 kg
	1.7	1.2	0.86	0.46	0.35	0.215	1760 - 3500 kg
PM (g/km)	0.14	0.08	0.05	0.025	0.005	0.005	< 1305 kg
	0.19	0.12	0.07	0.04	0.005	0.005	1305 - 1760 kg
	0.25	0.17	0.1	0.06	0.005	0.005	1760 - 3500 kg
	Temmuz 1992	Ocak 1996	Ocak 2000	Ocak 2005	Eylül 2009	Eylül 2014	

1.5. İçten Yanmalı Motorlarda Düşük Sıcaklıklı Yanma Konsepti

Düşük sıcaklıkta yanma terimi, homojen dolgulu sıkıştırma ateşleme, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme veya ön karışım dolgulu sıkıştırma ateşleme de dâhil olmak üzere bir dizi gelişmiş yanma stratejilerini kapsamaktadır. Bu yanma stratejilerinin şematik gösterimi Şekil 1.8’de verilmiştir.

LTC yakma, çok düşük NO_x ve PM emisyonları üretebilir, ancak genellikle CO ve HC emisyonlarının artışı ile sonuçlanır. LTC stratejilerini kullanan motorların performansı ve emisyonu, yakıt özelliklerine bağlıdır [75]. LTC motorları dar çalışma aralıklarına sahiptir ve daha karmaşık yanma kontrolü gerektirirler [76].



Şekil 1.8. Düşük sıcaklık yanma konseptinin alt gruplar halinde gösterimi

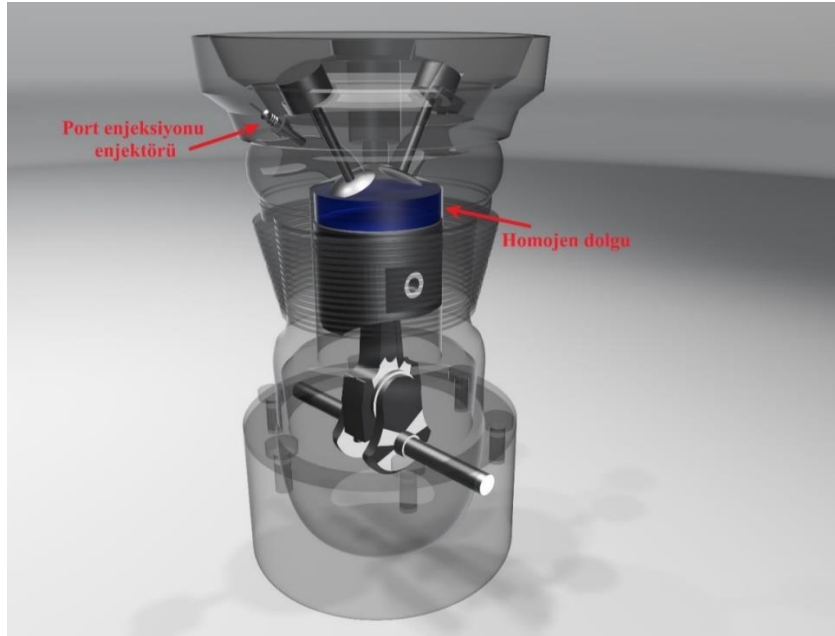
NO_x ve dizel partiküler maddelerinin indirgenmesi için sonradan arıtma sistemlerinin uygulanmasını zorunlu kılan dizel motor emisyon standartlarının sunulmasından bu yana, dizel yakma prosesinin gelişimi değer kazanmıştır. Gelişmiş yanma stratejileri, bu emisyon standartlarını tam olarak karşılamak için yeni bir yaklaşım bulmaya ve böylece arıtmanın kullanılmasına veya en azından, arıtılma sistemlerinden gelen performans taleplerini azaltmaya ve böylece maliyetlerini ve karmaşıklığını azaltmaya çalışmaktadır. Yanma sisteminin geliştirilmesinde ana odağı NO_x emisyonlarını düşürmek olmakla birlikte, PM emisyonlarının düşürülmesi de büyük önem arz etmektedir. Bu gelişmiş yanma sistemlerinin birçoğu yanma işlemini doğru olarak yansıtabilen veya tam olarak yansıtamayan HCCI, RCCI ve PCCI gibi çok sayıda kol taşır.

Sınırlı yük aralığı, kontrol edilebilirlik ve HCCI'nin yarattığı vuruntu gibi birçok zorluğun üstesinden gelmek için, bu homojen yük yaklaşımından bir takım diğer kavramlar geliştirilmiş ve çoğu durumda yük katmanlandırması ortaya çıkmıştır.

HCCI terimi, bu sistemlerin çoğunu artık doğru bir şekilde tanımlayamadığından, LTC terimi, bu ve diğer ileri yanma kavramlarına atıfta bulunmak için genel bir terim olarak kullanılabilir, çünkü genel amaç, NO_x ve / veya kurum oluşum kimyasını avantajlı bir şekilde değiştirmek üzere yanma sıcaklıklarını düşürmektir. Literatürde HCCI terimi tutarlı bir şekilde kullanılmamaktadır. Bazı durumlarda, kullanımı, aslında hava ile yakıtın nispeten homojen bir karışımına dayanan yanma sistemlerini ifade eder. Diğer durumlarda, HCCI terimi, homojen olmayan yanma sistemlerine atıfta bulunur; bunlar aslında oldukça heterojendir [75]. Aşağıda LTC konseptini oluşturan üç yanma stratejisi hakkında genel bilgiler verilmiştir.

1.5.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşleme (HCCI)

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar adından da anlaşılacağı gibi homojen bir karışımın sıkıştırma yoluyla kendi kendine tutuşturulması esasına dayanır [77,78]. Bu sistem hem dizel motorların hem de benzinli (buji ateşlemeli, otto) motorların avantajlarını bir araya getiren yeni bir konsept olarak ortaya çıkmaktadır. Sisteme ait görsel Şekil 1.9'da verilmiştir. Bu konsept, ön karışimli HCCI, erken direkt püskürtmeli HCCI ve geç direkt püskürtmeli HCCI olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bu gruplarda kendi aralarında birçok alt gruplara ayrılmaktadır.



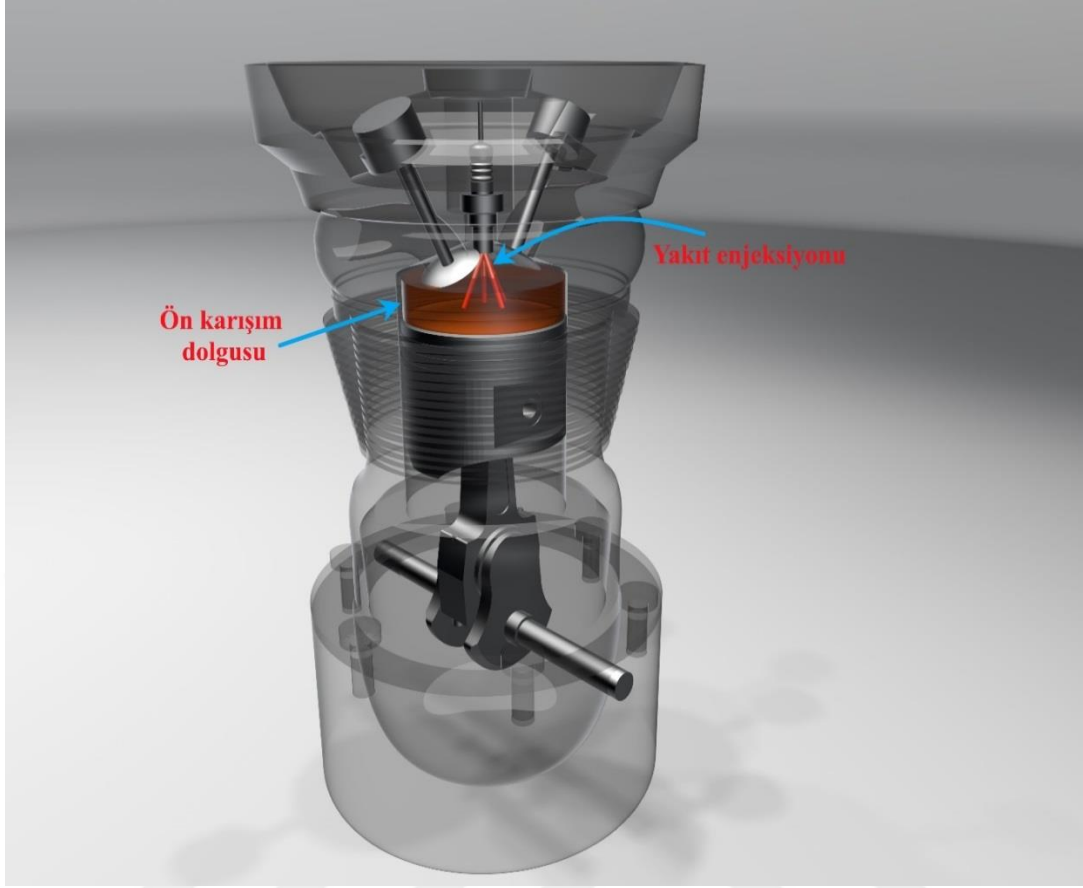
Şekil 1.9. HCCI yanma konsepti genel görünümü

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar dizel motorlarının avantajı olan yüksek termik verimi ve BAM'lerin (Buji Ateşlemeli Motor) avantajı olan düşük NO_x emisyonlarını bir arada barındırabildiği için, dikkatleri üzerine çeken bir çalışma alanıdır. Fakat HCCI motorlarda yanmanın kontrol gücü, dar bir çalışma alanı olması ve düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan HC ve CO emisyonları başlıca dezavantajlarıdır [79].

HCCI çalışmalarının amacı, ateşlemeden önce mümkün olduğunca homojen bir hava ve yakıt karışımı elde etmektir ki bu da geleneksel buji ateşlemeli motorda olduğu gibidir. Bu, ya emme portuna ya da doğrudan silindirin içine yakıt enjekte edilerek ve hava ile yakıtın tamamen karışmasını sağlamak için enjeksiyon ile ateşleme arasında yeterli zamana izin vererek gerçekleştirilebilir. Şarj daha sonra, sıkıştırılmış gazlar tarafından ısıtıldığından otomatik ateşleme yapar; hiçbir kıvılcım veya diğer zorla ateşleme yöntemleri kullanılmaz [75]. HCCI konsepti, SAM'li (Geleneksel Sıkıştırma Ateşleme) ve DI'lı (Direk Püskürtme) motorlara kıyasla yüksek verimlilik ve düşük NO_x ve PM emisyonu elde etmek için yeni bir yanma konseptidir [80]. Bir başka deyişle homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemesi, yüksek yakıt verimliliğini korurken, hem partikül madde hem de NO_x emisyonlarını azaltma potansiyeli olan bir dizel motor için alternatif bir çalışma modudur [81]. HCCI ile yapılan temel çalışmalar NO_x ve PM emisyonlarının mevcut dizel motor teknolojisinin yaklaşık %1-10'una indirilebileceğini göstermiştir. Bu, düzenlenmiş emisyon sınırlarını karşılamak için gerekli olan egzoz sonrası arıtma sistemlerinin gerekliliğinin ortadan kaldırılması veya basitleştirilmesi olasılığını gündeme getirmiştir [75].

1.5.2. Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma Ateşleme (PCCI)

Ön karışım dolgulu sıkıştırma ateşleme konsepti, bir buji ateşlemeli motorun emisyon seviyelerini, bir sıkıştırma ateşlemeli motorun verimliliği ile birleştirmeyi taahhüt eden yakıtın ön karışmış halde yandığı bir yakma işlemine neden olan erken enjeksiyonun kullanıldığı bir yanma konseptidir [82]. PCCI, yakıt ve hava karışımının ateşlenmesi anında kısmen tabakalaştırıldığı HCCI yanmasının genelleştirilmesidir [83]. Bu konsept ağırsel Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1.10. PCCI yanma konsepti genel görünümü

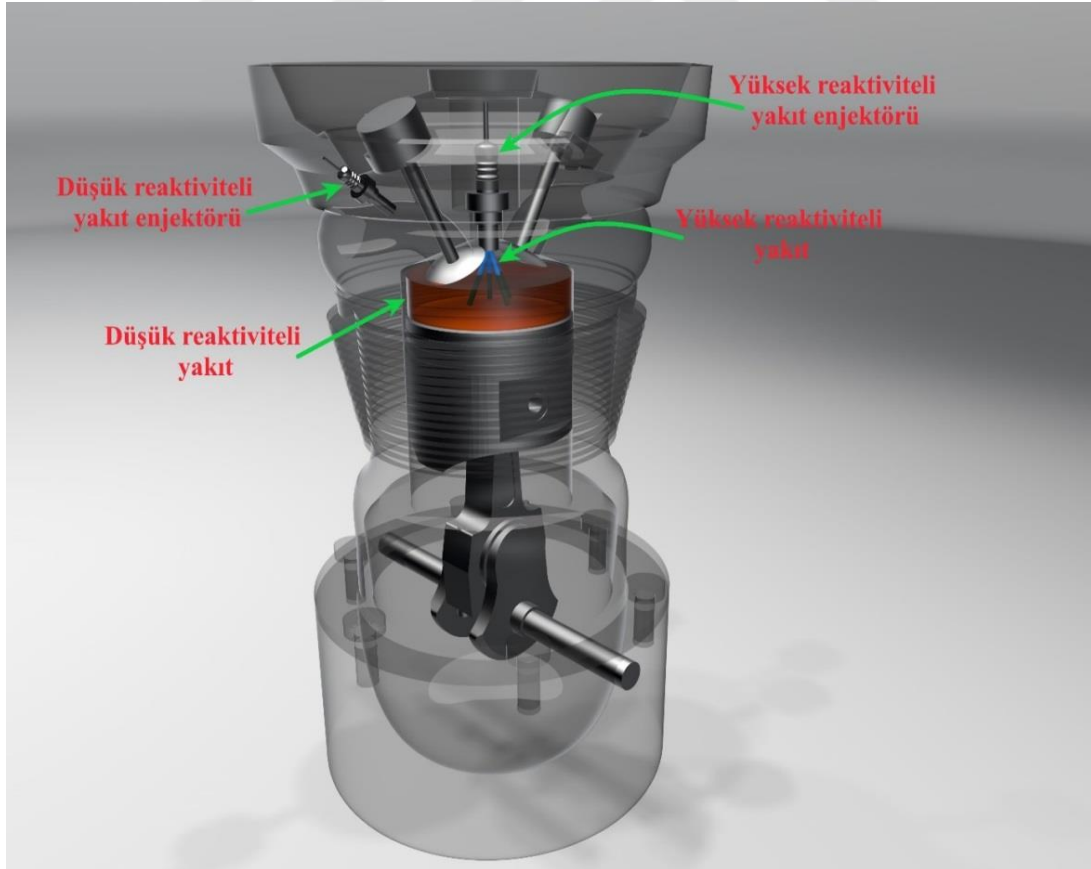
Yakıtın ve havanın karışımına dayalı PCCI motoru, kendiliğinden tutuşmanın gerçekleşmesi için alçak basınç ve sıcaklık koşullarında yakıtın silindire enjekte edilmesiyle yanmanın başlamasından önce sağlanmaktadır. PCCI motorunun yanması, kimyasal kinetik ile kontrol edilebilmektedir. Ağır atık gaz devridaim oranlarının uygulanması yardımıyla ateşleme sürecine hâkim olmak için silindir sıcaklık seviyeleri kontrol edilebilir. Bu durum yüksek seviyelerdeki NO_x ve PM emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur.

PCCI yanma stratejisinin başlıca dezavantajları [40]:

- ❖ Yüksek yüklerde ateşleme zamanının kontrolsüz hale gelmesi ve hızlı basınç yükselmesi.
- ❖ Düşük termal verimlilik.
- ❖ Motor hasarı.

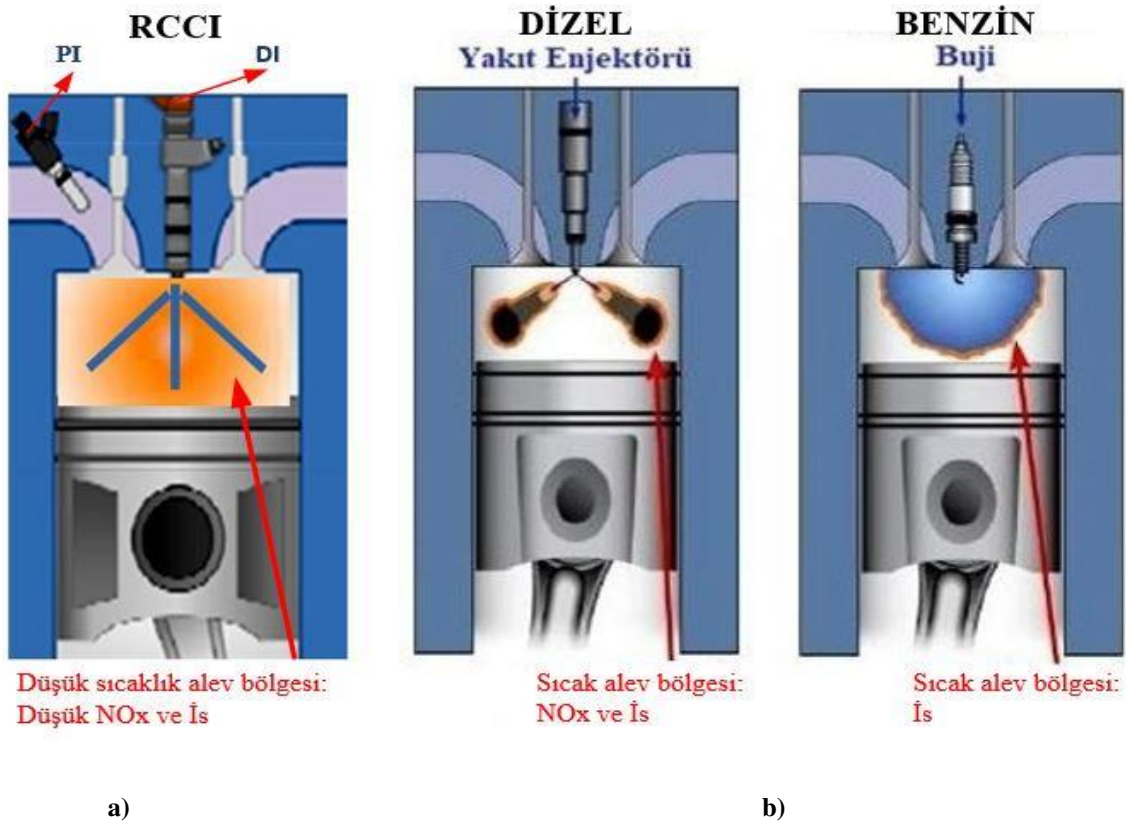
1.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşleme (RCCI)

Reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme, Wisconsin Üniversitesi Madison Motor Araştırma Merkezi laboratuvarlarında geliştirilen çift yakıtlı motor yanma teknolojisidir. RCCI, yanma süreci üzerinde daha fazla kontrol olanağı sağlayan, yakıt tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde düşürecek bir düzeye getiren homojen dolgulu sıkıştırma ateşleme sisteminin bir varyantıdır. RCCI, yanma fazını, süresini ve büyüklüğünü optimize etmek ve silindir içi yakıt reaktivitesini kontrol etmek için farklı reaktiviteli ve çoklu enjeksiyonlardan oluşan en az iki yakıtla silindir içi yakıt karışımını kullanır. Bu süreç, düşük reaktiviteli yakıt, hava ve devridaim egzoz gazlarının iyi karıştırılmış bir yükünü oluşturmak için silindirin içine düşük reaktivite yakıt ilavesini içerir. Yüksek reaktiviteli yakıt, ön karışmış yakıtın tutuşması gerçekleşmeden önce doğrudan yanma odasına tekli veya çoklu enjeksiyonlar kullanılarak enjekte edilir. RCCI için yakıt eşleştirme örnekleri benzin ve dizel karışımları, etanol / dizel ve bir setan sayısı yükseltici'dir (DTBP (Di-Tert-Bütil Peroksit)). Bu konseptte ait görsel Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. RCCI yanma konsepti genel görünümü

RCCI, dizel motorlarda HCCI ve PCCI yanma tiplerinin optimizasyonuna izin verir ve sonradan işleme yöntemlerine ihtiyaç duymadan emisyonları azaltır. Yakıt yüklerinin reaktivitesini uygun bir şekilde seçerek, bunların göreceli miktarları, zamanlaması ve yanması, kontrollü eşitlik oranlarıyla (kurumları kontrol eden) kontrollü sıcaklıklarda (NO_x kontrol ederek) optimum güç çıkışı (yakıt verimliliği) elde edecek şekilde uyarlanabilir [84]. Aşağıdaki Şekil 1.12’de RCCI yanmasının diğer geleneksel yanma sistemleri ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 1.12. a) Yeni yanma konsepti, b) Mevcut yanma konseptlerinin görünimleri [85,84].

Şekil 1.12’de görüldüğü gibi RCCI yanmasında düşük sıcaklıkta yanma gerçekleşir ve buna bağlı olarak da düşük NO_x ve is oluşur. Dizel yanmasında ise sıkışmış ve sıcaklığı artmış havanın içerisine enjeksiyonun yapılmasıyla birlikte ilk enjeksiyon çeper bölgesinde is oluşumu bunun akabinde ilerleyen safhalarda yüksek sıcaklığa bağlı olarak NO_x oluşmaktadır. Benzin yanmasında ise dizel yanmasına nispeten, buji kıvılcımı ile birlikte silindir içerisinde sıkışmış ve sıcaklığı artmış yakıt hava karışımının yanmasıyla birlikte alev cephesinde is oluşumu meydana gelmektedir.

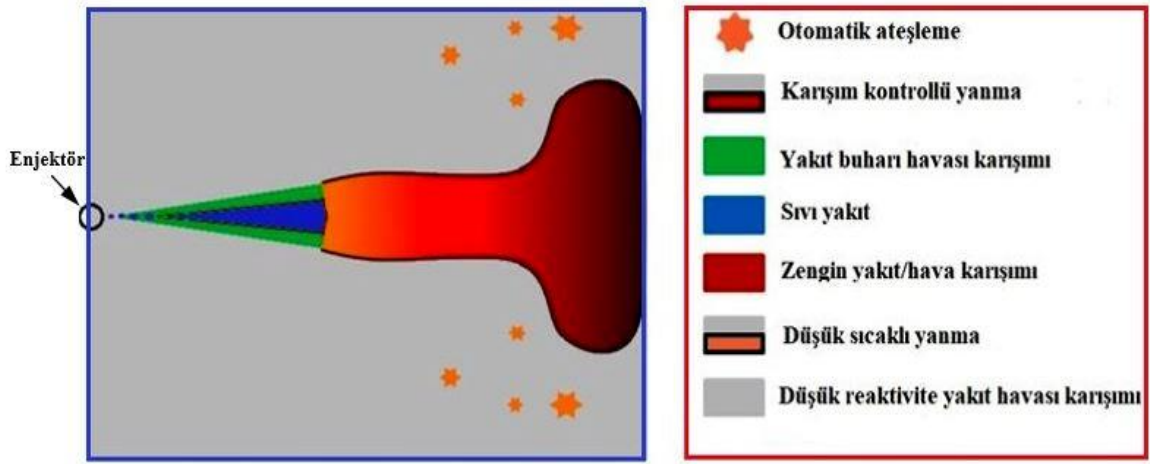
RCCI yanma konseptiyle birlikte is ve NO_x oluşumu miktarları en aza indirilebilmektedir. Ancak düşük seviyelerde emisyonlar üretmesine karşın, günümüzdeki ve gelecekteki modern motorların kontrol ve yüksek güç çıkış gereksinimlerini karşılamalıdır.

Tablo 1.3’de, RCCI, HCCI ve PCCI’ların yakıt alma biçimleri, yanma aşamaları kontrol yöntemleri ve yakıt yakma usulleri açısından karşılaştırmalı bir tanımlaması tablo halinde özetlenmiştir.

Tablo 1.3. RCCI, HCCI ve PCCI konseptlerinin karşılaştırılması [86].

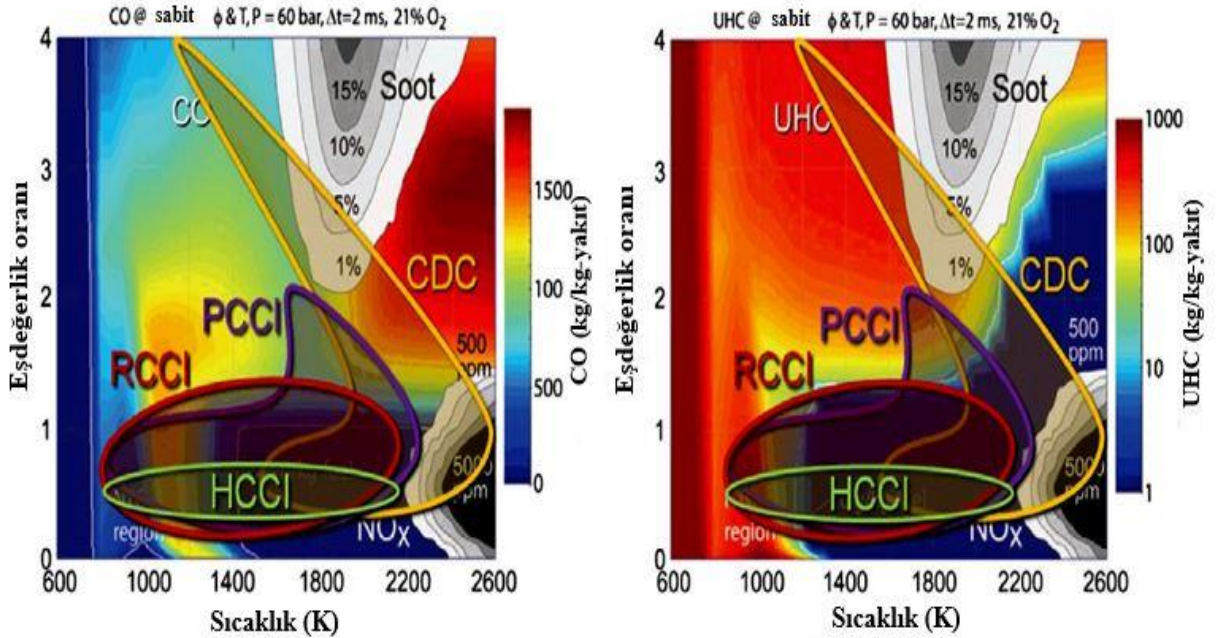
Yanma konsepti	Yakıt alma biçimi	Yanma aşamaları kontrolü	Yakıt yakma şekli
RCCI	Port + direkt enjeksiyon	Doğrudan enjeksiyon zamanlaması, ön karışmış yakıt oranı	Kısmen ön karışmış yanma
HCCI	Port enjeksiyonu	Yakıt kinetiği	Otomatik ateşleme
PCCI	Erken direkt enjeksiyon	Enjeksiyon zamanlaması	Kısmen ön karışmış yanma

Şekil 1.13’de görüldüğü gibi RCCI motorlarında alev yayılımı, otomatik ateşleme ve difüzyon alevi birlikte görülebilir. Normal RCCI yakma işleminde Şekil 1.11’de gösterildiği gibi, HRF (Yüksek Reaktiviteli Yakıt) ile gelişmiş doğrudan enjeksiyon düşük yanma yaşar ve püskürtme buharının ucunda yakıt / hava karışımı yanmayı kontrol eder. Bu arada, ön karışmış LRF (düşük reaktiviteli yakıt) otomatik ateşleme ile tüketilebilir. Difüzyon alevinden küçük miktarda sprey halinde yüksek sıcaklıkta alev oluşturulması, LRF / hava karışımı içindeki alev yayılımını başlatabilir. Böylece HRF ve LRF yakıtlarının birlikte homojen bir şekilde yakılması ile birlikte LRF yakıtının istenilen verimlilikte yanması sağlanabilir.



Şekil 1.13. RCCI motorlarındaki yanmanın şematik gösterimi [86].

Şekil 1.14’de bölgesel yakıt-hava eşdeğer oranı ve alev sıcaklığının bir fonksiyonu olarak farklı yanma modları için HC, CO, is ve NOx emisyon bölgeleri gösterilmektedir. RCCI, HCCI ve PCCI’yi içeren LTC modları, NOx ve emisyon açısından optimum bölgeler sunar. Buna ek olarak, yeterince yüksek alev sıcaklığı (> 1300 K) muhafaza edildiği sürece yüksek HC ve CO emisyonları önlenir.



Şekil 1.14. RCCI moduna kıyasla, geleneksel dizel yanma ve diğer LTC yanma rejimlerinin çalışma bölgelerini gösteren İS, NOx, UHC ve CO kontur çizgileri [76].

RCCI yanma stratejisinin başlıca avantajları:

- ❖ NO_x ve PM emisyonlarını düşürür.
- ❖ Isı transfer kayıplarını azaltır.
- ❖ Yakıt verimliliğini artırır.
- ❖ Maliyetli sonradan işleme (after-treatment) sistemlerine duyulan ihtiyacı azaltır.
- ❖ Egzoz sonrası işleme sistemleri kullanılmadan U.S. EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı) 2010 emisyon standartlarını sağlayabilir [84].

RCCI yanması, zirvedeki termik verimleri %53 gibi yüksek bir seviyede tutarken, sıfıra yakın NO_x ve kurum emisyonları elde etme düşüncesine rağmen, aşağıda listelenen operasyonlarda çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu dezavantajların bazıları;

Sınırlı işletim aralığı:

- ❖ CDC ile karşılaştırıldığında RCCI motoru hem yüksek hem de düşük yüklerde çalışma alanlarında kısıtlamalarla karşı karşıyadır.
- ❖ Yüksek yüklerde, yüksek seviyedeki PPRR (Tepe Basıncı Yükselme Oranı) ve yanma gürültüsü nedeniyle çalışması kısıtlanır.
- ❖ Düşük yük işletim bölgesinde RCCI, daha yüksek UHC ve CO emisyonlarına maruz kalırken, CDC ile de benzer verimlilikler ve NO_x emisyonu elde edilebildiği için RCCI, düşük yüklü işletim bölgesinde CDC'ye karşı avantajlarını kaybeder [87].

Aşamalı yanma kontrolü:

- ❖ Yanma fazlaması, motor verimliliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. RCCI motorunun yanma aşamalı kontrolü için bazı girişimler yapılmıştır [88]. Ancak RCCI motorunun yanma aşamasını kontrol edebilecek bir kontrol cihazı henüz tasarlanmamıştır.

Emisyon kontrolü:

- ❖ Emisyonlar, RCCI motorunun çalışmasında önemli bir faktördür ve çalışması üzerinde önemli kısıtlamalar getirmektedir. Sıkı EPA emisyon standartlarını karşılamanın gereği olarak, modele dayalı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [87].

1.6. Dizel Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Petrol kökenli yakıtların tükenme eğilimi içerisinde girmesiyle birlikte içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıt oluşturma ihtiyacı doğmuştur. Buna bağlı olarak da dizel motorlarda günümüzde yaygın olarak kullanılabilen ya da kullanılamayan birçok yakıt üretilmiş veya türetilmiştir.

Başlıca alternatif yakıt olarak dizel motorlarda;

- ❖ CNG
- ❖ Biyogaz
- ❖ Alkoller (metanol, etanol vb.)
- ❖ Biyodizel
- ❖ Hidrojen
- ❖ LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
- ❖ Atık taşıt lastikleri, kullanılabilmektedir.

Aşağıdaki alt başlıklarda dizel motorlarda alternatif olarak kullanılan yakıtların bazıları hakkında bilgiler verilmiştir. Özellikle tez çalışmasında kullanılacak olan pirolitik yağ ile ilgili bilgiler atık taşıt lastikleri alt başlığı altında genişçe verilmiştir.

1.6.1. Sıkıştırılmış Doğalgaz

Doğal gaz, yüksek oranda metan içeren ve dünya genelinde en bol miktarda elde edilebilen bir gaz yakıttır. Düşük egzoz emisyonu değerine ve yaklaşık 130 gibi yüksek oktan sayısına sahiptir. En önemli yetersizliği yüksek basınç altında veya düşük sıcaklıkta etkin olarak depolanabilmesidir [89]. Doğal gazla çalışan araçların emisyon değerlerinin düşük olması yanında bu araçlardan yayılan egzoz emisyonlarının reaktivitesi de oldukça düşüktür. Örneğin doğal gazla çalışan araçlardan yayılan emisyonların ozon oluşumuna katkısı hidrojen dışındaki diğer yakıtlardan daha düşük seviyededir [90]. Doğal gaz dizel motorlarda kullanımı ise çift yakıt uygulaması şeklinde olabilmektedir.

1.6.2. Biyogaz

Biyogaz, yüksek oranda CH_4 içeren, bunun yanında bileşiminde CO_2 ve az miktarda H_2S , N, C vb. bulunan bir gaz yakıttır. Biyogazın oktan sayısı da yine bileşimine bağlı olarak değişir. %100 CH_4 'ten oluşan biyogaz için oktan sayısı 100 iken, %70 CH_4 ve %30 CO_2 ve diğer gazlardan oluşan biyogaz için oktan sayısı 130 değerine kadar çıkabilir. Biyogaz hem dizel hem de benzin motorlarında kullanılmaya uygun bir yakıttır [91]. Biyogazın dizel motorlarda kullanımı doğalgazda olduğu gibi çift yakıt uygulaması şeklinde yapılabilmektedir.

1.6.3. Biyodizel

Biyodizel yakıtlarla ilgili çalışmalar soya fasulyesi, ayçiçeği, yer fıstığı, pamuk çekirdeği, zeytin, kolza tohumu, palmye ve susam yağları ile bunların karışımları veya esterleri üzerinde yapılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları olan bu bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel veya biyodizelin petrol kökenli yakıtlarla belli oranlardaki karışımları dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca bitkisel yağların yanı sıra hayvansal yağlar ve atık kızartma yağları da biyodizel yakıt kaynakları olarak kullanılabilir. Biyodizel yakıtlarla ilgili olarak yapılan kısa süreli deneysel çalışmalar ümit vericidir. Ancak uzun süreli kullanım sırasında yetersiz yanmadan kaynaklanan bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır [92].

1.6.4. Hidrojen

Hidrojen, fosil yakıtlardan olan kömür ve doğal gazdan, güneş enerjisi ve nükleer enerjiden ve su gibi sonsuz bir kaynaktan elde edilebilir. Hidrojen motor yakıtı olarak kullanıldığında petrol kökenli yakıtlara göre birçok önemli avantaja sahip olur. 130 gibi yüksek oktan sayısı, yüksek yanma hızı ve tutuşma kabiliyeti, ateşleme enerjisinin düşük olması, oldukça geniş tutuşma ve yanma aralıkları, ısı ve termik verimlerinin yüksek olması ve meydana gelen egzoz gazı emisyonlarının düşük miktarlarda oluşması hidrojeni çekici kılmaktadır. Hidrojenin öne çıkan en önemli özelliklerden birisi de çok fakir karışımlardan çok zengin karışımlara kadar uzanabilen geniş bir hava-yakıt karışım oranı yelpazesine sahip olmasıdır. Hidrojen λ 'nın 0.15-4.35 değer aralığında olduğu durumda tutuşma sağlanabilmektedir.

Kimyasal yapısı nedeniyle hidrojenin yanması sonucunda sadece H₂O oluşur. HC, CO ve CO₂ gibi kirletici emisyonlar oluşmaz. Hidrojen çift yakıtlı dizel motorlarda da kullanılmaya uygun bir yakıttır. Hidrojenin üretimi, dağıtımı, taşıtlarda depolanması ve kullanımı ile ilgili eksiklikler giderilebilirse gelecek için en ideal yakıt olarak düşünülmektedir [93].

1.6.5. Atık Taşıt Lastikleri

Atık lastikler çevre kirliliğinin oluşmasına neden olmakta ve insan sağlığı ile doğal dengeyi ciddi derecede etkilemektedir [94]. Biyolojik olarak bozunamayan ömrünü tamamlamış atık lastiklerin kontrolü ve yönetimi, modern toplumlarda ve gelişmekte olan ülkelerde büyüyen bir tehlike haline gelmektedir. Bu problemin ortaya çıkmasına karşın, atık parça lastiklerinin birçoğu yine de kontrolsüz bir şekilde açık alanlara bırakılmaktadır [95]. Bu durumu ifade eden görsel Şekil 1.15’de verilmiştir.



Şekil 1.15. Atık taşıt lastiklerinin genel görünümü [96].

Atık lastikler, ömürlerini tamamladıklarında çevrede yaklaşık olarak %65-70 oranında atık oluşumuna sebebiyet vermektedir. Dünyada yıl boyunca yaklaşık 5×10^6 ton araç lastiği geri dönüştürülmek üzere açığa çıkmaktadır [97]. Lastik atıkları diğer atıklardan ayrı olarak depolandığı zaman, tehlikeler daha belirgin hale gelir. Bütün lastikler arasında yangın başlamasına neden olabilecek kadar yeterli oksijen bulunur. Lastiklerin yanmasıyla birlikte atmosfere tonlarca zararlı bileşik yayılmaktadır.

Siyah bir bulut gibi atmosfere yayılan bu maddeler içinde; karbon siyahı, uçucu organik, yarı uçucu organikler, çok halkalı hidrokarbonlar, yağlar, kükürt oksitleri, azot oksitleri, nitrosaminler, karbon oksitleri, uçucu partiküller ve As (Arsenik), Cd (Kadmiyum), Cr (Krom), Pb (Kurşun), Zn (Çinko), Fe (Demir) ve benzeri gibi metaller bulunabilmektedir. Meydana gelen yangınlar nedeniyle atmosfere yayılan bu kirleticiler yakın çevredeki toprak ve suların kirlenmesine neden olmakta ve bu durum insan sağlığını tehdit etmektedir [94].

Bu sorunları bertaraf etmenin en etkili yollarından birisi; atık lastiklerin yeniden işlenerek, endüstride farklı uygulamalarda kullanılmasıdır. Atık lastiklerinin işlenerek endüstri ve diğer alanlarda kullanılmasına olanak sağlayan yöntemlerden biri olan Piroliz işlemi ile oksijensiz ortamda organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda (500-1000 °C) ısıtılması sonucu ısıl bozunması (kimyasal bağlarının kırılması) sağlanır [95]. Atık lastiklerin pirolizi ile karbonca zengin katı ürün (çar), katran veya yüksek bir pazar değerine sahip HLPY (Ham Lastik Pirolitik Yağı) olarak adlandırılan sıvı ürün elde edilir [98]. STCM'ye (Hurda Lastik Yönetim Konseyi) göre bir lastikten ortalama 4 litre yağ, 3 kg karbon siyahı, 1.5 kg gaz ve 1 kg çelik ve kül üretilir. Elde edilen yağ ve gaz düşük kaliteli yakıt olarak satılır [99].

1.6.5.1. Atık Taşıt Lastiklerinin Yakıt Olarak Kullanımı

Yağ gerçekte atık yağ sınıfına sokulmaması gereken, hurda lastiklerin ısıl işlemi neticesinde elde edilen bir petrol türevidir, ancak bakanlık literatüründe uygun isim bulunamadığından dolayı atık yağ sınıfına sokulmaktadır. Piroliz işlemi sonucu geri dönüştürülen atık lastiğin türüne göre lastik miktarının %35-%42'si oranında atık yağ elde edilir. Elde edilen ürün Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliğine göre 1. sınıf atık yağ kategorisine dâhil edilmiştir. Pirolitik yağ dizel motorlarda yakılarak enerjiye dönüştürülmeye çok uygundur [100]. Pirolitik sıvının elemental analizinde ağırlıkça şu sonuçlar mevcuttur: C = %84.80–85.86; H = %9.01– 9.33; N = %0.50– 0.70; S = %0.9– 1.36; O = %2.87– 4.17 ve kül = %0.10–0.31 [101].

Parafin, olefin ve aromatik bileşiklerin bir karışımı olan lastik piroliz sıvısı 41-44 MJ/kg seviyesinde bir üst ısıl değere sahip olup bu değer geleneksel sıvı yakıtların yerini alacak kadar önemli bir değerdir.

Yakıt olarak onların kullanımına ilave olarak, lastik piroliz sıvıları ham petrolün sahip olduğundan daha yüksek bir pazar değerine sahip olan benzen, tolüen ve ksilen gibi hafif aromatiklerin potansiyel bir kaynağı olarak da gösterilmektedir [102].

Ham lastik pirolitik yağın, özellikleri kükürt içeriğinin ve viskozitesinin azaltılması ile dizel yakıtının özelliklerine yaklaştırılarak dizel yakıt ile beraber belli oranlarda kullanılabilir. HLPY keskin kokulu, koyu kahverengi renkli ve akışkan görünümlüdür. ATL'nin pirolizinden elde edilen pirolitik yakıt özellikleri, yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ile dizel yakıt özelliklerine yaklaştırılabilir [3].

Kimyasal yapıları, ucuz olmaları ve kolayca temin edilebilmeleri nedeniyle, ilerleyen yıllarda atık taşıt lastiklerinin yakıt üretiminde kullanılması olası gözükmektedir. Ayrıca hem iyi bir hammadde kaynağı olabilme ihtimali hem de hali hazırda oluşan çevre sorunlarına yönelik bir katkı sağlayabilme ihtimali nedeniyle ihtiyaç duyulan alanda çözüm kaynaklarından biri olabilmesi öngörülmektedir.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Deneysel Çalışma

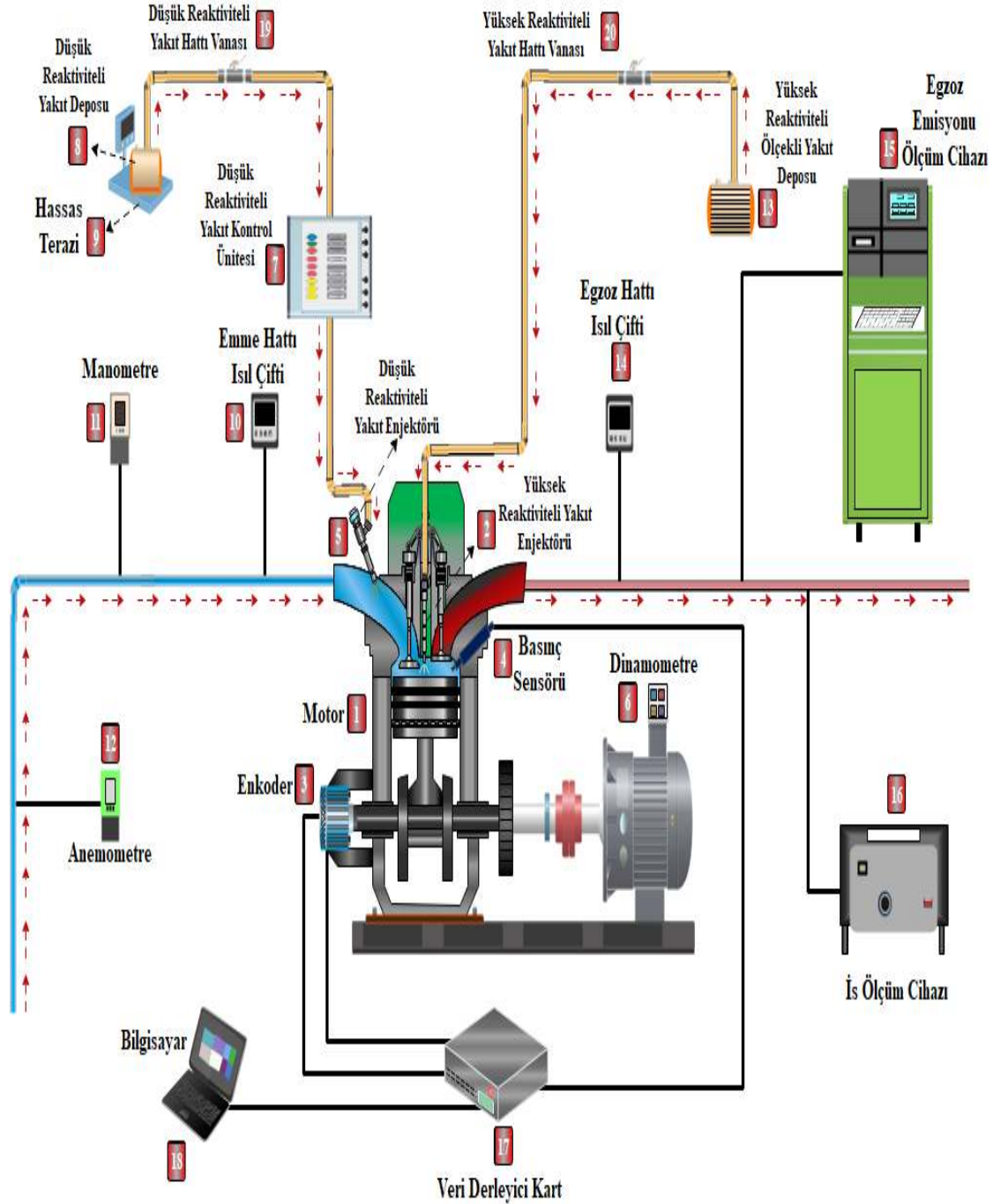
2.1.1. Deney Setinin Tanıtılması

Bu çalışmada atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanımının deneysel olarak araştırılması konu edilmiştir. Çalışmada kullanımı yaygın ve geçerli olan deneysel bir sistem oluşturulmuş olup deneyler Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği motor test laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Hidrolik bir dinamometre bağlanarak gerçek çalışma şartlarına yakın halde işletilen bir dizel motoruna krank açısı ve basınç sensörleri yerleştirilerek motor çalışmasına eş zamanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde tek silindirli 0.406 litre silindir hacimine sahip dört zamanlı, direk püskürtmeli, hava soğutmalı KIPOR marka KDP40E model dizel motoru kullanılmıştır. Sistemin genel görünümü Şekil 2.1’de görülmektedir. Motor ve dinamometre bağlantıları yapıldıktan sonra motor test edilmek amacıyla çalıştırılmış ve merkezlenme sıkıntıları giderilerek düzenli bir çalışma haline getirilmiştir.



Şekil 2.1. Deney setinin genel görünümü

Şekil 2.2’de deneysel sistemin şematik diyagramı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi olabildiğince işlevli bir deney seti kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen veriler anlık olarak yüksek okuma hızında bilgisayara aktarılıp kaydedilmiş ve bu şekilde çalışmadaki hatalar en aza indirilerek verilerin takibi yapılmıştır.



Şekil 2.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

2.1.2. Deney Test Motoru

Deneylerde günümüz teknolojisine uygun tek silindirli ve dört zamanlı hava soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Dizel motor reaktivite kontrollü yanmaya uygun olacak şekilde modifiye edilerek çalışır duruma getirilmiştir. Deney test motorunun genel görünümü Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Deney test motorunun genel görünümü

Yapılan deneyde kullanılan test motorunun teknik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Deney test motorunun teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Motor Tipi	Direk Püskürtmeli Dizel
Marka	KIPOR
Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi	0.406 L
Çap	86 mm
Strok	70 mm
Sıkıştırma Oranı	18.1
Enjektör Nozul Sayısı	3
Enjektör Sistemi	Tek Enjektör
Soğutma Şekli	Hava Soğutmalı
Maksimum Devir	3600 devir/dakika
Maksimum Tork	27.5 Nm
Maksimum Güç	10 BG
Maksimum Tork Devri	2500 devir/dakika

Motor bağlantıları tamamlandıktan ve motor düzenli çalışma konumuna getirildikten sonra, gereken ölçümlerin alınmasını sağlayacak olan krank açısı sensörü, basınç sensörü ve yanma analiz sistemi motor üzerine tespit edilmiştir. Krank açısı sensörü motorun her çevrimi için bir sinyal olarak veri derleyici karta gönderen 360 sinyal sıklığına sahip Kübler marka bir enkoderdir. Bu enkoder bir kayış kaskat sistemi vasıtasıyla motor krank mili çıkışına tespit edilmiştir.

Daha sonra basınç sensörünün motor üzerine tespiti yapılmış ve motorun kızdırma bujisine adapte edilmiştir. Fiber optik basınç sensörünün kızdırma bujisine yerleştirilmesinden sonra, motor üzerine herhangi bir modifiye yapılmadan kolaylıkla bağlanabilmiştir.

Motor üzerine yerleştirilen sensörler motora ait yanma sonu verilerinin elde edilmesini sağlamakta, dinamometre sistemi ise bu sonuçların farklı yüklerde ölçülmesini temin etmektedir. Bu sistem çalışır duruma getirildikten sonra sistem bir dizüstü bilgisayara bağlanarak ölçülen sonuçlar doğrudan bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

2.1.3. Düşük Reaktiviteli Yakıt Kontrol Sistemi

Düşük reaktiviteli yakıt sisteminin devir sayısına göre püskürtme süresini ve açısını oluşturulan yazılım aracılığıyla kontrol eden yüksek hassasiyete sahip bir kontrol ünitesi oluşturulmuştur. Motora bağlanan enkoderden alınan veriler yardımıyla birlikte düşük reaktiviteli yakıt enjektörüne bağlı olan ünite istenilen devir sayısında istenilen süre ve açılarda yakıt kontrol ünitesi üzerine entegre edilmiş dijital ekran aracılığıyla sisteme kontrollü bir şekilde yakıtın gönderilmesini sağlamaktadır. Bu sisteme ait görsel Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Düşük reaktiviteli yakıt sistemi kontrol paneli genel görünümü

2.1.4. Egzoz Emisyonu Ölçüm Cihazları

Egzoz emisyonları ve is ölçümü Bosch BEA 350 marka egzoz emisyon cihazında yapılmış olup egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 2.2’de, genel görünümü ise Şekil 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri

Ölçüm Parametreleri	Referans Değer	Okunan Değer	Tolerans	Hata % Hacimsel
CO	0.50 % Hacimsel	0.49 % Hacimsel	%2	%1.40
CO ₂	6.01 % Hacimsel	5.81 % Hacimsel	%1	%3.41
HC	200 ppm	200 ppm	%2	%0.00

Tablo 2.3’de Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının egzoz emisyon cihazları için verdiği maksimum izin verilebilir hataların tablosu yer almaktadır.

Tablo 2.3. Egzoz emisyon cihazları için hata sınırlamaları [103].

Parametre	O Sınıfı	I Sınıfı
CO oranı	± 0.03 hacim $\pm 5\%$	± 0.06 hacim $\pm 5\%$
CO ₂ oranı	± 0.5 hacim $\pm 5\%$	± 0.5 hacim $\pm 5\%$
HC oranı	± 10 ppm hacim $\pm 5\%$	± 12 ppm hacim $\pm 5\%$



Şekil 2.5. Egzoz emisyon cihazının genel görünümü

İs emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 2.4’de, genel görünümü ise Şekil 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.4. İs ölçüm cihazının teknik özellikleri

Ölçüm Parametreleri	Referans Değer %T	Okunan Değer %T	Okunan Değer (k)	Hata (%T)	Ölçüm Belirsizliği (k=2 için, ±%T)
Koyuluk	%52.4	%52.4	1	%0.00	1.28



Şekil 2.6. Is ölçüm cihazının genel görünümü

Özgöl yakıt tüketimi ve efektif verimin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır. Kronometre yardımı ile belirli bir zaman aralığında ölçülen yakıt miktarı kaydedilmiş ve birim zamanda tüketilen yakıt miktarı g/dakika olarak hesaplanmıştır. Sürtünme işi rotorun bir devirde yaptığı sürtünme kuvvetinin işidir. Formüldeki $F \cdot 1$ yani kuvvet çarpı kuvvet kolu (moment) olarak alınmış ve deneylerde d/d olarak çalışıldığından d/sn'ye çevrilmiştir. Hesaplanan kütleli yakıt debisi motor gücüne oranlanarak özgöl yakıt tüketimi bulunmuştur. Efektif verim için ise kullanılan her bir yakıt için alt ısı değer hesaplanmış ve formüldeki yerine konularak efektif verim hesaplanmıştır.

Sürtünme işi

$$Wf = 2\pi \cdot F \cdot 1 \quad (2.1)$$

Motor Gücü

$$Pe = (Wf(n/60))/1000 \quad (2.2)$$

Özgöl Yakıt Tüketimi

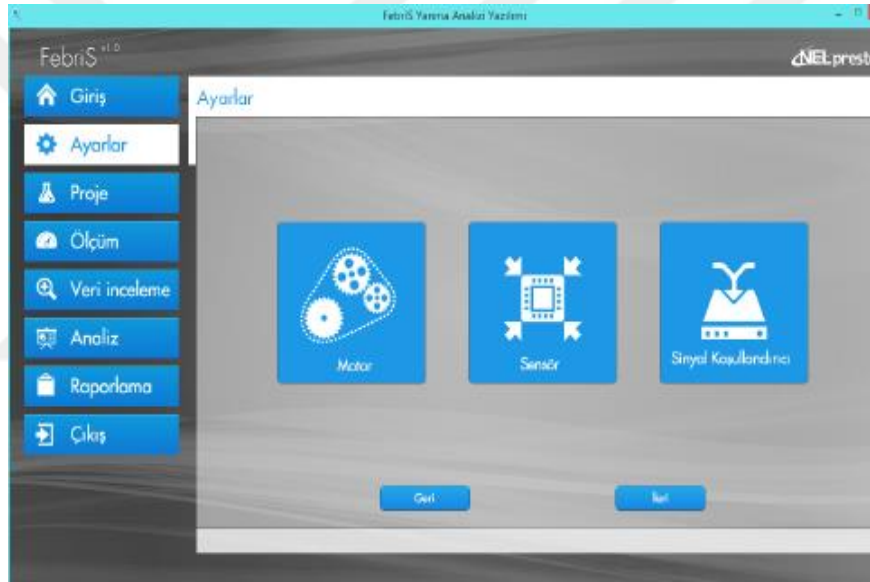
$$Be = (3600 \cdot m_y)/Pe \quad (2.3)$$

Efektif Verim

$$\eta_e = (3.6 \cdot 10^6) / Be \cdot Hu \quad (2.4)$$

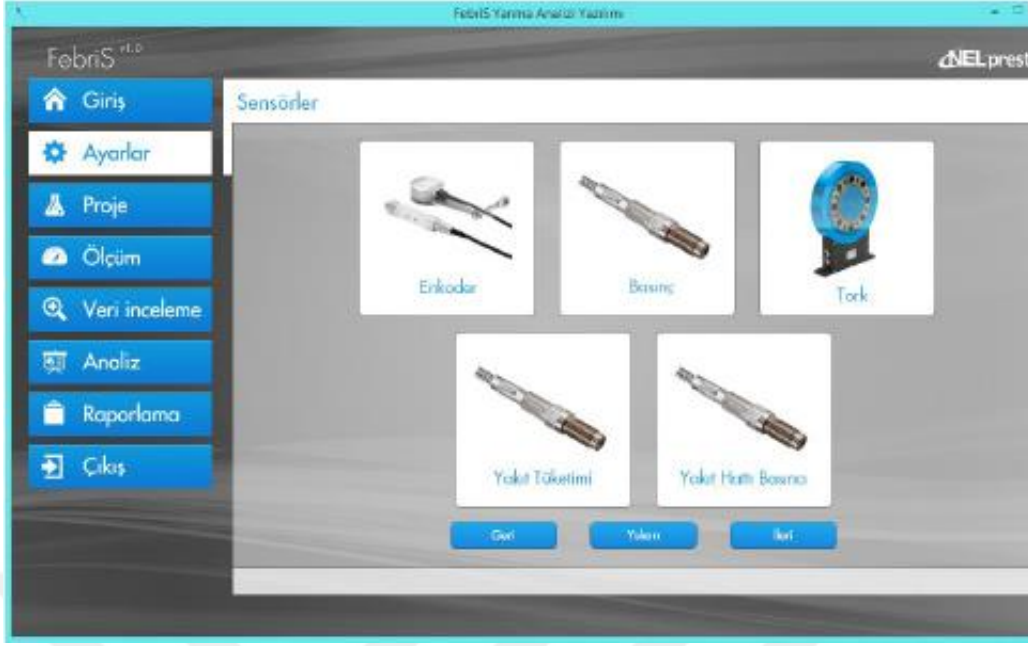
2.1.5. Ölçüm ara yüzünün tanıtılması

Krank ve basınç sensörlerinin bağlanması ve deney setinin çalışır hale getirilmesinin ardından elde edilen veriler veri derleyici kart da toplanır ve anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılır. Bu değerlerin anında anlamlı veriler halinde görünmesi ve motorun diğer kontrollerinin zamanında yapılabilmesi için bir ara yüze ihtiyaç vardır. Yazılım ara yüzü Şekil 2.7’de genel halde görülmektedir.



Şekil 2.7. Yanma analiz sisteminin ara yüzü

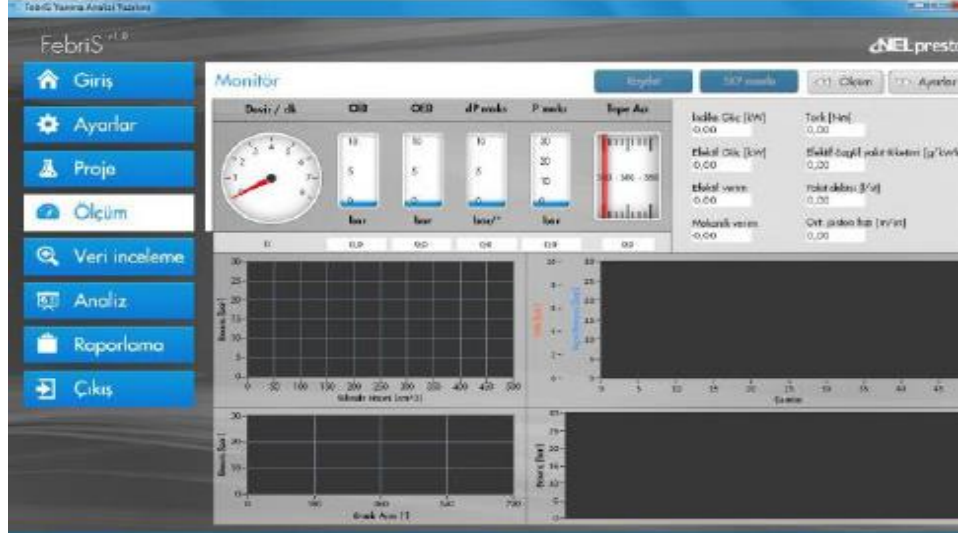
Görüldüğü gibi sol tarafta genel bir menü orta ekranda ise çalışma bölgesi bulunan bir ara yüz olarak basit ve anlaşılırdır. Giriş kısmında yönetici adı ve şifresiyle program çalıştırılmaktadır. Ayarlar kısmında öncelikle motor ayarları yapılmaktadır. Bu kısımda motor silindir çapı, strok boyu, silindir sayısı ve biyel kolu uzunluğu gibi motora ait teknik veriler girilmiştir. Bu verilere göre yazılım toplam motor silindir hacmini hesaplamış ve bu değer doğrulanmıştır. Sonrasında kullanılacak sensörlerin kalibrasyonu yapılmalıdır. Sensör kısmında (Şekil 2.8) tüm sensörler görülebilir ve kalibre edilebilir.



Şekil 2.8. Yanma analiz sistemi sensör ayarları

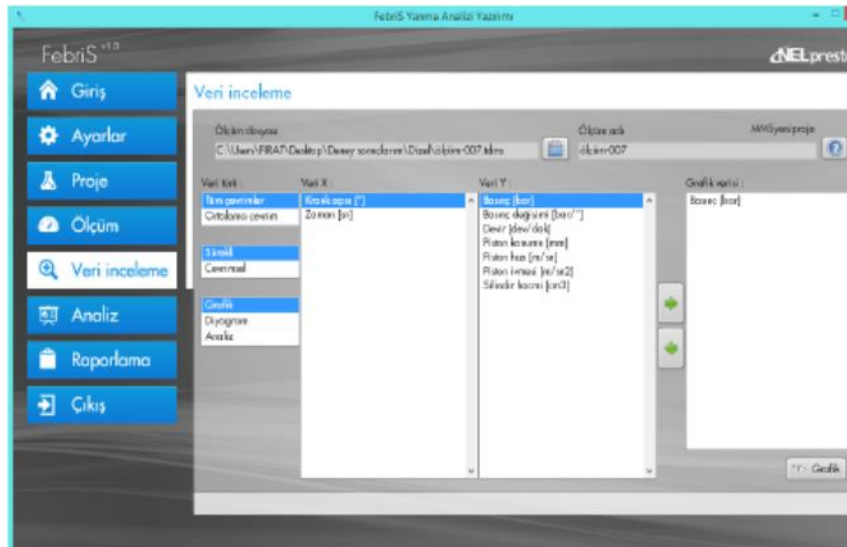
Çalışma kapsamında enkoder (krank açısı sensörü) ve basınç sensörü kullanılmıştır. Her bir sensör teker teker tanıtılmış, veri derleyici kart içerisinde hangi kanallara bağlandığı bu kısımda yazılıma aktarılmıştır. Enkoderin bağlanmasında mikrometre yöntemi kullanılarak motorun ilgili silindirin ÜÖN' sı bulunmuş ve bu noktaya göre enkoder sıfır noktasını tayin etmiştir. Basınç sensörü için ise sensörün teknik özelliklerine göre hassasiyetleri ve diğer bağlantı noktaları seçilmiştir.

Daha sonra sol araç sütunundaki sıraya göre proje ekranına geçilmiş bu kısımda çalışma isimlendirilerek tüm sensörler aktif hale getirilmiştir. Sonrasında yine sıralamaya bağlı olarak ölçüm ekranına geçilmiş ve motor çalıştırıldıktan sonra anlık olarak birçok parametre kontrol edilmiştir. Şekil 2.9'da ölçüm ekranı görülmektedir.



Şekil 2.9. Yanma analiz sistemi ölçüm ekranı

Görüldüğü gibi silindir hacmi (indikatör diyagramı) ve krank mili açısına bağlı olarak basınç değişimleri, ortalama indike ve ortalama efektif basınçlar, devir sayısı ve bazı güç değerleri sürekli çalışma şartlarında görülebilmektedir. Ölçümler yapılırken aynı anda bu ekrandan çevrim sayısına bağlı olarak kayıt yapılabilir. Bu şekilde motorun yüzlerce çevrimi kaydedilip çalışma esnasında oluşacak çevrim hatalarından bağımsız sonuçlar elde edilebilmektedir. Ölçüm işleminde birkaç yüz çevrime ait veriler kaydedildikten sonra verilerin detaylı incelenmesi için veri inceleme basamağına geçilir. Veri inceleme ara yüzü Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Yanma analiz sistemi veri inceleme ekranı

Kaydedilen ölçüm dosyaları bu kısma yüklenerek farklı parametrelerin birbirine göre olan değişimi bu kısımda grafiksel olarak çizdirilip detaylı olarak incelenir. Daha sonra uygun veriler raporlama kısmında farklı dosya uzantılarında hem grafiksel hem de değerler şeklinde raporlanıp çalışma sonlandırılır [104].

2.1.6. Net Isı Salınımı ve Vuruntu Yoğunluğunun Hesabı

Yanma analiz sistemi deneyler sırasında silindir içi basınç verilerini yüksek hızda ve hassasiyette elde etmektedir. Elde edilen bu veri kullanılarak bazı hesaplamalarla yanma verileri elde edilmektedir. Yanma analiz sistemi, yanma sırasında, silindir içindeki gazlar bağlamında gerçekleşen ısı salınımını silindir içi basıncı ve hacimi kullanarak hesaplar [74,105].

Termodinamiğin birinci yasası yardımı ile ısı salınımı oranı;

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanır.

Yanma analiz sistemi yardımıyla vuruntu yoğunluğunu belirlemek için Checkel and Dale [106] çalışmalarında kullanılan, 3. türev yöntemi kullanılmıştır. Aşağıda verilen denklem yardımıyla motor vuruntu yoğunluğu hesaplanmıştır.

$$\frac{dp(\theta) = [86(p_{i-4} - p_{i+4}) + 142(p_{i+3} - p_{i-3}) + 193(p_{i+2} - p_{i-2}) + 126(p_{i+1} - p_{i-1})]}{1118d\theta} \quad (2.6)$$

2.1.7. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar

Deneylerde üç farklı yakıt kullanılmıştır. Bunlardan yüksek reaktiviteli yakıt olarak dizel, düşük reaktiviteli yakıt olarak ise, benzin ve pirolitik yağ farklı deneylerde hacimsel olarak farklı oranlarda kullanılmıştır. Pirolitik yağ İstanbul merkezli bir firma olan Marmore mühendislik adlı geri dönüşüm tesisinden temin edilmiş ve içine herhangi bir katkı maddesi eklenmemiştir.

Deneyde kullanılan dizel yakıtının genel görünümü Şekil 2.11’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Dizel yakıtının genel görünümü

Tablo 2.5. Dizel yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri [107].

Özellikler	Dizel
Kimyasal Formül	$C_{13}H_{28}$
Yoğunluk (kg/m^3 , 15 °C)	829
Parlama Noktası (°C)	67
Kinematik Viskozite (cSt, 40 °C)	2.96
Yakıt Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	42.9
Setan Sayısı	>50
Adyabatik Alev Sıcaklığı (K)	2327
Karbon Kalıntısı (% m/m)	0.3
Kül (% m/m)	0.01
Kükürt (mg/kg)	$\cong 0$
Stokiyometrik H/Y Oranı	14.7

Deneyde kullanılan benzin yakıtının genel görünümü Şekil 2.12’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.12. Benzin yakıtının genel görünümü

Tablo 2.6. Benzin yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri [107].

Özellikler	Benzin
Kimyasal Formül	$C_6H_{14}-C_7H_{16}$
Yoğunluk (kg/m^3)	727
Kaynama Noktası (K)	392
Tutuşma Sıcaklığı (K)	553
Yakıt Buharlaşıma Isısı (kJ/kg)	490
Yakıt Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	42
Araştırma Oktan Sayısı (ROS)	95
Motor Oktan Sayısı (MOS)	86
Hava-Yakıt Oranı	14.5

Deneyde kullanılan pirolitik yağın genel görünümü Şekil 2.13’de, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.13. Ham lastik pirolitik yağı genel görünümü

Tablo 2.7. Pirolitik yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri [3].

Özellikler	Pirolitik Yağ		
	Ham LPY	Distilasyon İşlemi Görmüş LPY	Oksidatif Desülfürizasyon İşlemi Görmüş LPY
Yoğunluk (kg/m ³ , 15 °C)	944.4	889.4	904
Parlama Noktası (°C)	42.5	50.5	60.5
Kinematik Viskozite (cst, 40 °C)	5.06	1.659	2.164
Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	39.98	41.18	40.94
Setan Sayısı	—*	—*	<40
Karbon Kalıntısı (% m/m)	21.51	0.196	1
Kül (% m/m)	0.006	0.001	0.0005
Kükürt (mg/kg)	11.385	4530	4327

—*: İlgili parametreler ölçülememiş veya ölçüm alınmamıştır.

2.1.8. Deneysel Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında reaktivite kontrolü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda benzin ve ALY'lerin düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılması durumu detaylı olarak araştırılmıştır. Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılan ALY ve benzinin kullanımı durumunda yakıt püskürtme zamanının, sabit devir ve yük şartlarında etkilerinin araştırılmasını kapsamaktadır. Bu bölümde dizel yakıtının püskürtme zamanı sabit tutularak, düşük reaktiviteli yakıtın püskürtme zamanı ÜÖNÖ -360 KMA (Krank Mili Açısı) ile -40 KMA arasında 40 KMA artışla değiştirilmiştir. Düşük reaktiviteli yakıt 3 bar basınçla port enjeksiyon yöntemi kullanılarak emme manifoldundan motora püskürtülürken, dizel yakıtı ise yüksek basınçlı olarak direk enjeksiyon kullanılarak püskürtülmüştür. Bu çalışma ile egzoz emisyonları bakımından optimum püskürtme zamanı araştırılmış ve çalışmanın devamı belirlenen püskürtme zamanında sürdürülmüştür. Bu çalışma her iki yakıt için, 2500 d/d motor devri ve %20 motor yükü durumu için tekrarlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise benzin ve ALY için farklı motor yükü ve RCCI oranlarında çalışmalar tekrarlanmıştır. Bu bölümde motorun maksimum tork devri olan 2500 d/d sabit tutularak motorun yüksüz durumu, motorun düşük yük durumlarını temsilen %20 yük durumu ve motorun yüksek yük durumlarını temsilen %60 yük durumu için çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca hacimsel olarak %70 dizel-%30 düşük reaktiviteli yakıt ve %40 dizel-%60 düşük reaktiviteli yakıt olmak üzere iki farklı RCCI oranı için çalışmalar yürütülmüştür. Böylelikle her iki yakıt için de düşük ve yüksek RCCI oranlarında ki etkileri araştırılmıştır. Deneyler esnasında çalışılan motor parametreleri için emme ve egzoz gazı sıcaklıkları, emme basıncı, egzoz emisyonları, silindir içi basınç değişimi ve yakıt tüketimleri anlık olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

3. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda benzin ve atık lastik yağı kullanımının araştırılması amaçlanmıştır. Tez çalışması temel olarak iki ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde düşük reaktiviteli yakıtların (Benzin ve ALY) püskürtme zamanlaması araştırılmıştır. İkinci bölümde ise farklı motor yükleri ve RCCI oranları için benzin ve ALY'nin bir RCCI motorda kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

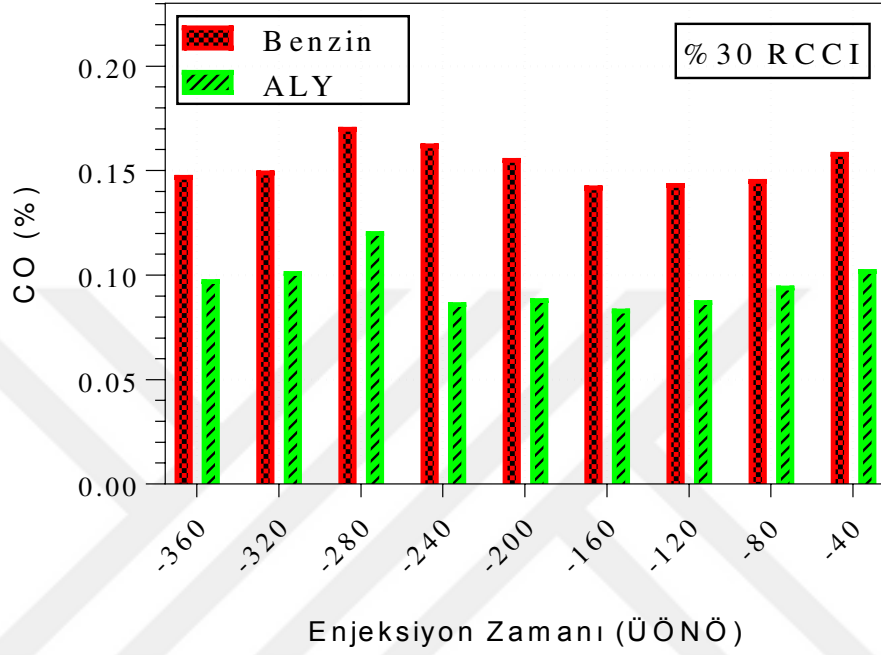
3.1. Düşük Reaktiviteli Yakıtların Püskürtme Zamanının Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde, düşük reaktiviteli yakıtların püskürtme zamanının egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda port enjeksiyon yöntemi ile motora gönderilen benzin ve ALY'nin püskürtme zamanının egzoz emisyonlarına etkisi belirlenmiştir. Böylece tez çalışmasının devamında kullanılacak olan en verimli püskürtme zamanı her iki düşük reaktiviteli yakıt için belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın bu bölümünde, maksimum motor torkunun elde edildiği devir olan 2500 d/d sabit tutularak motorun %20 yük durumu (düşük motor yükleri) için deneyler yapılmıştır. Belirlenen motor çalışma parametreleri için hacimsel olarak %70 dizel-%30 benzin ve %70 dizel-%30 ALY olacak şekilde RCCI oranları belirlenmiş ve püskürtme zamanları her iki düşük reaktiviteli yakıt için de incelenmiştir.

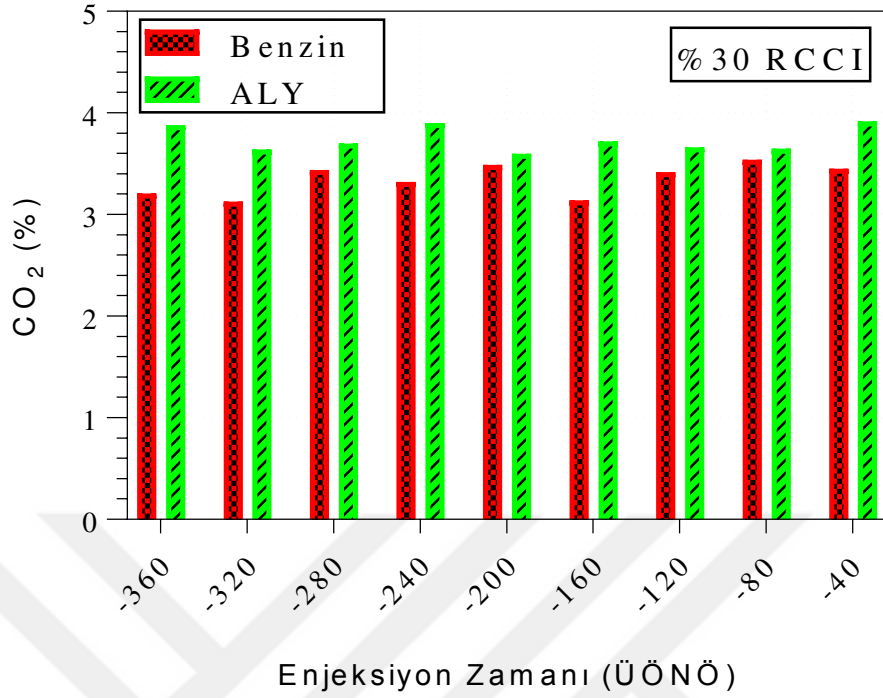
Şekil 3.1'de 2500 d/d sabit motor devrinde, %20 sabit motor yükünde birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı durumdaki CO emisyonunun değişimi görülmektedir. Grafikte belirtilen şartlar altında her iki yakıt için CO emisyonu incelendiğinde özellikle ÜÖNÖ -240 ile -120 derece aralığında püskürtme zamanlamalarında daha düşük CO emisyonu elde edildiği görülmüştür. Eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarının düşüş göstermesi belirtilen püskürtme zamanlamalarında daha iyi bir yanma olduğunu göstermektedir.

Grafik incelendiğinde en düşük CO emisyonlarının ÜÖNÖ -160 derece püskürtme zamanında meydana geldiği görülmektedir. Benzer eğilimin her iki düşük reaktiviteli yakıt içinde meydana geldiği görülmüştür.



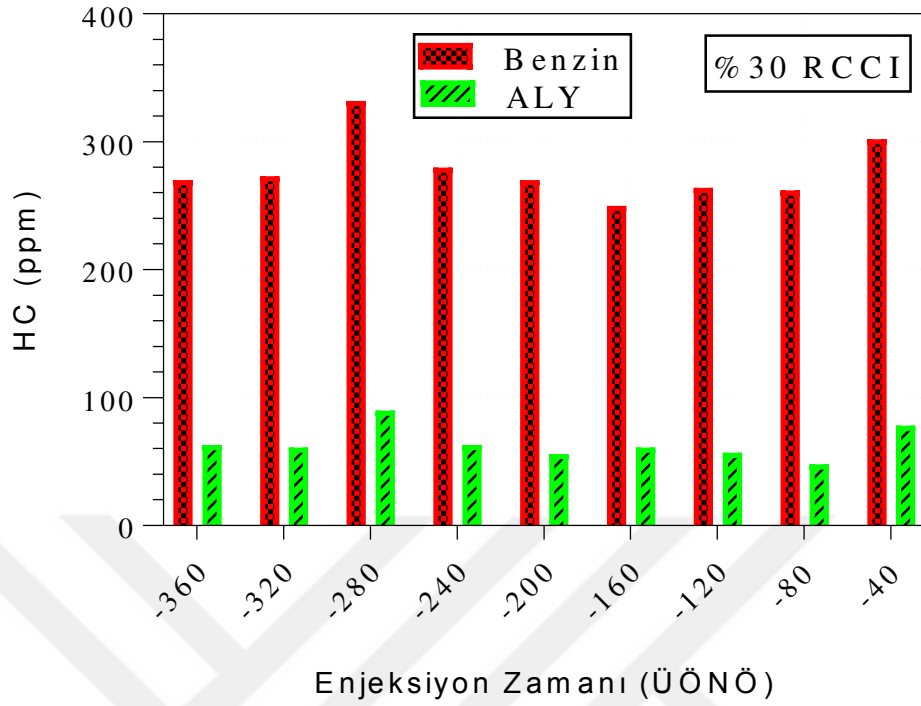
Şekil 3.1. CO emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.2’de 2500 d/d sabit motor devrinde, %20 sabit motor yükünde birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı durumdaki CO₂ emisyonunun değişimi görülmektedir. Yanma sonu ürünü olan CO₂ emisyonunun tüm püskürtme zamanlarında benzer eğilimler verdiği grafikten elde edilen bir sonuçtur. Tüm püskürtme zamanlarında benzin kullanılan durumlarda CO₂ emisyonunun ALY kullanılan durumlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç belirlenen motor şartlarında düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin kullanımının daha iyi bir yanma sağladığını göstermektedir.



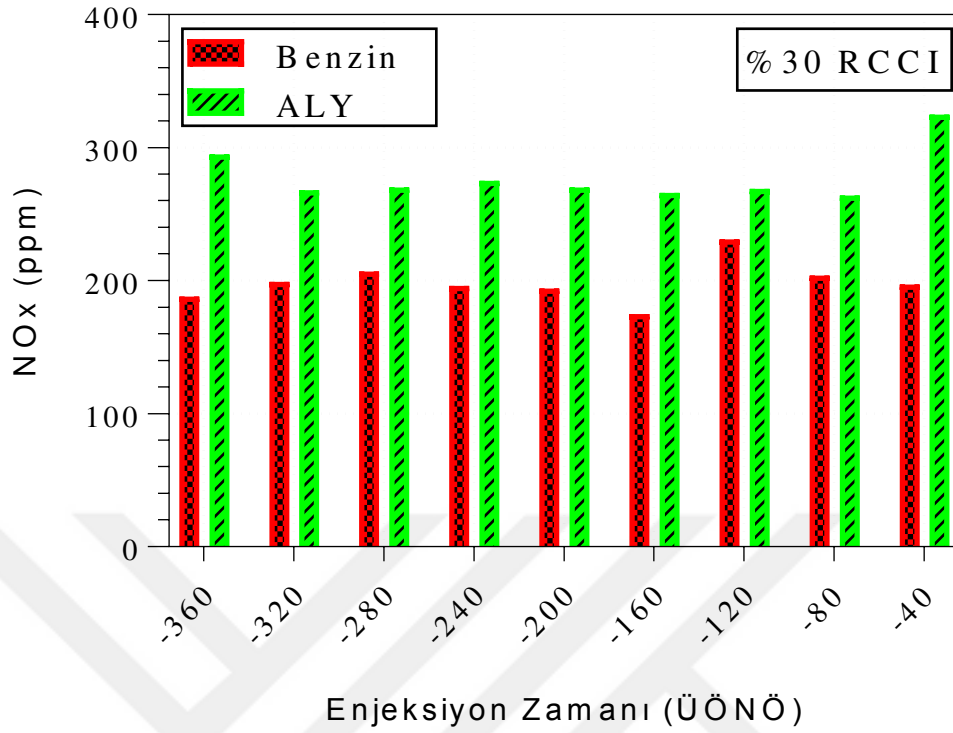
Şekil 3.2. CO₂ emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.3’de birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı RCCI durumundaki HC emisyonunun değişimi görülmektedir. Eksik yanma ürünü olan HC emisyonunun tüm püskürtme açılarında ALY kullanıldığı durumda benzin yakıtının kullanıldığı duruma göre daha düşük HC emisyonu oluşturduğu görülmektedir. ALY için en düşük HC emisyonlarının ÜÖNÖ -200 ve -80 derece püskürtme zamanlarında, benzin yakıtı içinse -160 derece püskürtme zamanında olduğu görülmüştür. HC emisyonları, RCCI motorların sağladığı faydaların yanında ortaya çıkan bir sorun olarak bilinmektedir. Zararlı bir emisyon türü olarak bilinen HC emisyonlarının düşük olduğu püskürtme zamanlamaları bu grafikten elde edilen önemli bir sonuç olarak görülmektedir.



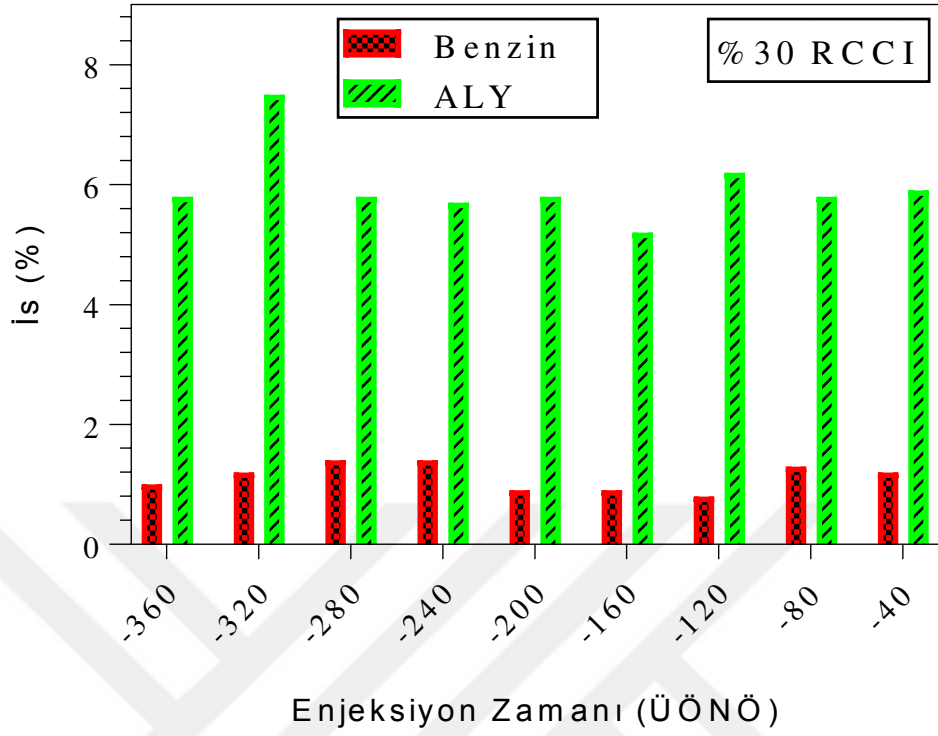
Şekil 3.3. HC emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.4’de, birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı RCCI durumundaki NO_x emisyonunun değişimi görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda oluşumu artan NO_x emisyonunun tüm püskürtme zamanlarında benzin yakıtının kullanıldığı durumda ALY kullanıldığı duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. NO_x emisyonlarının temelde yanma sıcaklıklarına bağlı olarak meydana geldiği bilinmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklı bir yanma konsepti olan RCCI motorlar için düşük NO_x emisyonunun elde edilmesi oldukça önemlidir. Grafikte benzinin düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanıldığı durum için en düşük NO_x emisyonunun ÜÖNÖ -160 derece püskürtme zamanında, ALY için ise -160/-80 derece püskürtme zamanında oluştuğu görülmüştür.



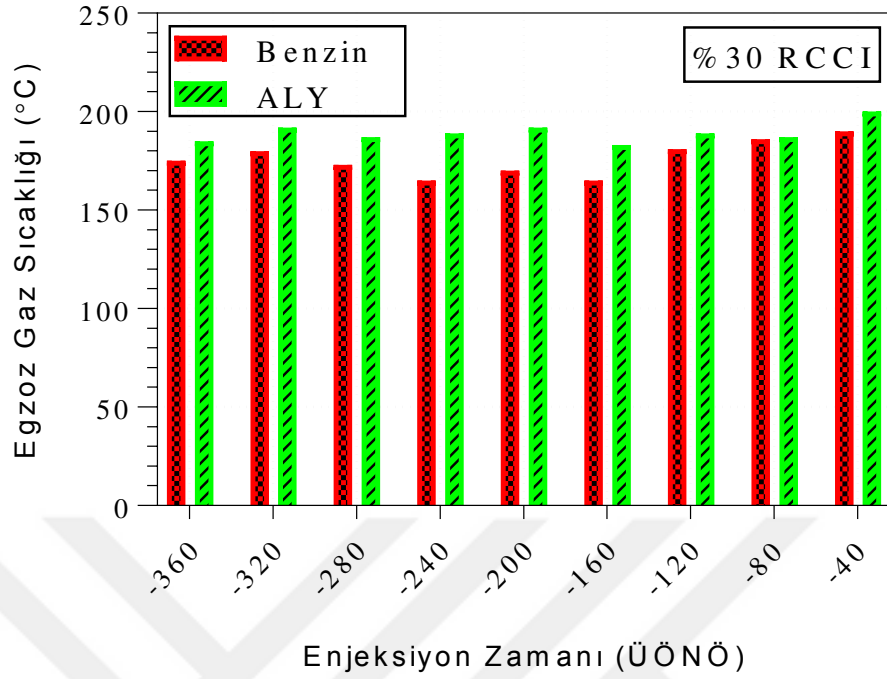
Şekil 3.4. NOx emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.5’de 2500 d/d sabit motor devrinde, %20 sabit motor yükünde birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı RCCI durumundaki İs emisyonunun değişimi görülmektedir. Tüm püskürtme zamanlarında benzin yakıtının kullanıldığı durumda ALY kullanıldığı duruma göre daha düşük is emisyonu oluşturduğu görülmektedir. Benzin yakıtı için en düşük is emisyonlarının ÜÖNÖ -200/-120, ALY için ise -160 derece püskürtme zamanında olduğu görülmüştür. İs emisyonlarının RCCI motor teorisine uygun şekilde düşük reaktiviteli yakıt olarak benzinin kullanıldığı durumlarda minimize edildiği görülmektedir. ALY kullanıldığı durumlarda ise kısmen daha yüksek is emisyonları elde edilmiştir. Bu grafikte püskürtme zamanları bakımından en düşük is emisyonlarının sağlandığı derecelerin belirgin olması oldukça önemli bir sonuçtur.



Şekil 3.5. İS emisyonunun püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.6’da birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 oranında kullanıldığı durumdaki egzoz gazı sıcaklığının değişimi görülmektedir. Tüm püskürtme zamanlarında benzin yakıtının kullanıldığı durumda ALY kullanıldığı duruma göre daha düşük egzoz gazı sıcaklığı olduğu görülmektedir. Şekil 3.4’deki NO_x emisyonu grafiği Şekil 3.6’daki egzoz gazı sıcaklığı grafiğini destekler niteliktedir. Her iki yakıt için en düşük egzoz gazı sıcaklığının ÜÖNÖ -160 derece püskürtme zamanında olduğu görülmüştür.



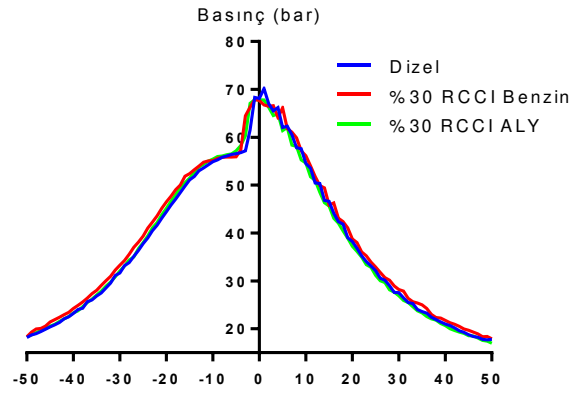
Şekil 3.6. Egzoz gaz sıcaklığının püskürtme zamanına bağlı olarak değişimi

3.2. Farklı Çalışma Şartlarında Düşük Reaktiviteli Yakıt Olarak Benzin ve ALY'nin Karşılaştırılması

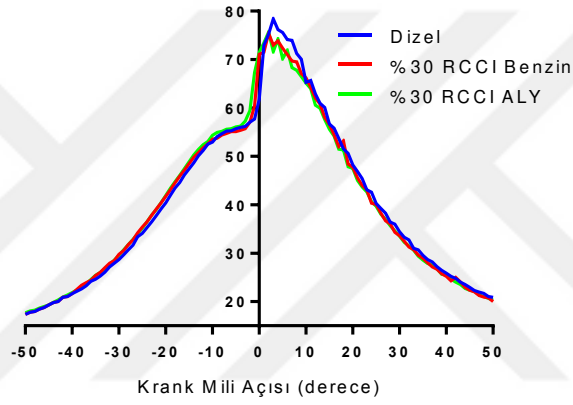
Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde farklı motor çalışma şartlarında, düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin ve ALY'nin kullanılabilirliği ve motor parametreleri bakımından karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar için motor maksimum tork devri olan 2500 d/d'da sabit tutularak çalıştırılmıştır. Ayrıca motorun farklı çalışma şartlarını inceleyebilmek için, motorun yüksüz durumu (%0), düşük motor yükü (%20) ve yüksek motor yükü (%60) olmak üzere üç farklı motor yük şartı sağlanarak çalışma yürütülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde RCCI şartlarının tam olarak belirlenebilmesi için öncelikle motor sadece dizel yakıtı kullanılarak farklı çalışma şartları altında test edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra hacimsel olarak %70 dizel-%30 (RCCI30) düşük reaktiviteli yakıt (benzin veya ALY) ve %40 dizel-%60 (RCCI60) düşük reaktiviteli yakıt kullanılarak tüm deneyler tekrarlanmıştır. Çalışmalarda dizel yakıtı test motorunun yapısına bağlı olarak direk enjeksiyon yöntemi ile motora verilmiştir.

Düşük reaktiviteli yakıtlar ise port enjeksiyon yöntemi ile emme manifolduna yerleştirilen düşük basınçlı bir enjektör ile motora gönderilmiştir. Tüm çalışmalar sadece dizel yakıtının kullanıldığı referans durum, düşük reaktiviteli yakıt olarak benzinin kullanıldığı durum ve düşük reaktiviteli yakıt olarak ALY'nin kullanıldığı durum için tekrarlanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda hem motorun düşük ve yüksek yüklerdeki sonuçları hem de düşük ve yüksek RCCI oranlarındaki davranışları incelenmiştir.

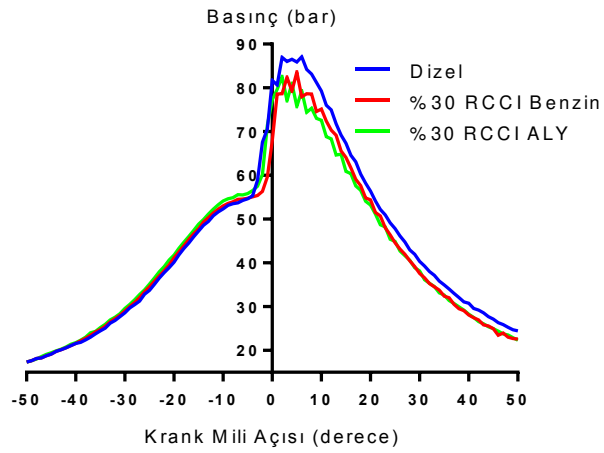
Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de farklı motor yükleri ve RCCI oranları için silindir içi basıncın saf dizel kullanımı durumunda ve RCCI modunda farklı düşük reaktiviteli yakıtlar kullanımına bağlı olarak verilmiştir. Şekil 3.7 (a-c) %30 RCCI oranında farklı yük durumları için silindir içi basınç değişimlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü motor yükü şartlarından bağımsız olarak tüm yük durumlarında dizel yakıtı kullanıldığı durumdaki silindir içi basınç RCCI şartlarına göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bunun yanında yine tüm yük durumlarında benzin ve ALY'nin düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılmaları durumunda basınç eğrilerinin %30 RCCI oranında oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.8 (a-c) %60 RCCI oranında farklı motor yükleri altında silindir içi basınç değişimini göstermektedir. Şekil 3.7'de olduğu gibi bu grafiklerde de dizel yakıtı kullanımı durumunda silindir içi basıncın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Her iki şekilde de düşük yük şartlarında maksimum basıncın ÜÖN civarında olduğu görülmektedir. Motor yükü arttıkça maksimum basınç bölgesi ÜÖN'dan sonra olacak şekilde uzaklaşmaktadır. Bu durum artan motor yüküyle birlikte yanma süresinin kısaldığını ve ateşleme gecikmesinin arttığını göstermektedir. Yine bu sebeple motor yükü arttıkça RCCI modu için silindir içi basınç dizel yakıtı kullanılan duruma göre daha düşük oranda kalmıştır. Bunun yanında motor yükü arttıkça yanmaya giren yakıt miktarına da bağlı olarak silindir içi basıncın arttığı, farklı RCCI oranlarında ise önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür.



a) %0 Motor yükü

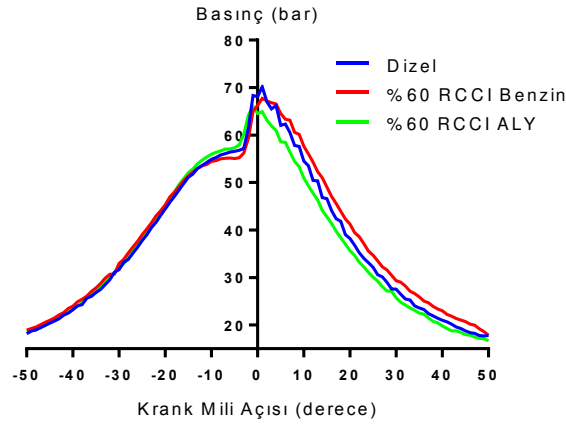


b) %20 Motor yükü

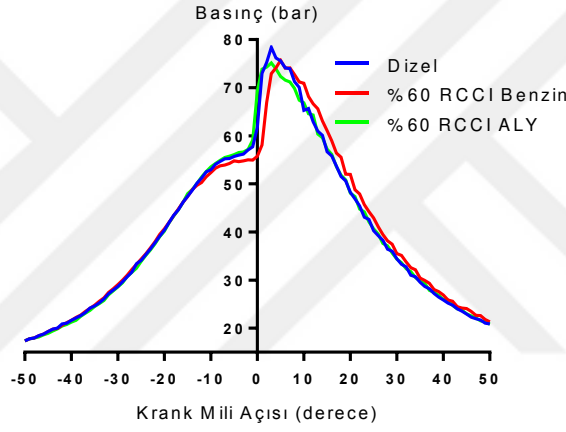


c) %60 Motor yükü

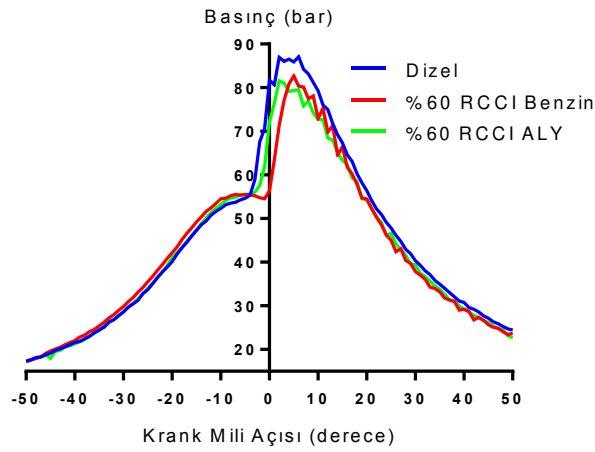
Şekil 3.7. Silindir içi basıncın %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi



a) %0 Motor yükü



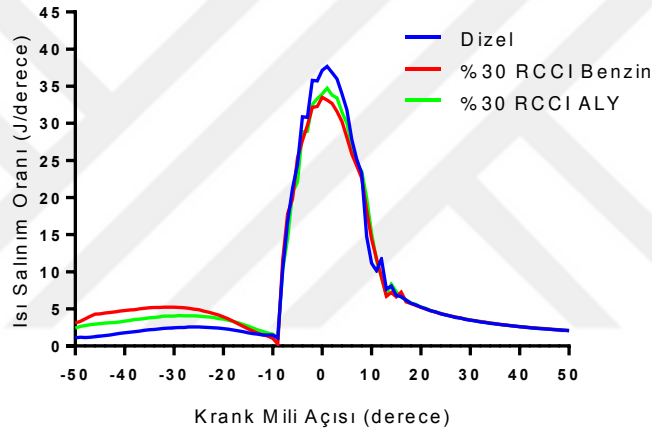
b) %20 Motor yükü



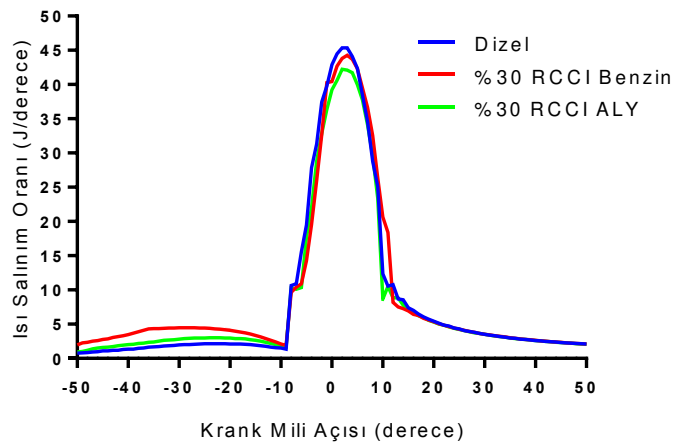
c) %60 Motor yükü

Şekil 3.8. Silindir içi basıncın %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı olarak ısı salınım oranını göstermektedir. Motor yükü arttıkça püskürtülen yakıt miktarına bağlı olarak ısı salınımının arttığı gözlenirken RCCI oranına bağlı ciddi bir artış gözlenmemiştir. Grafikler incelendiğinde motorun yüksüz ve düşük yük durumları için dizel yakıtının ısı salınımını RCCI uygulamasının yapıldığı durumlardan daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu durum dizel yanması için yüksek sıcaklıklı yanmanın göstergesidir. Özellikle benzin yakıtının yüksek uçuculuğu sebebiyle ısı salınımının yayılması ve daha düşük çıkması elde edilmiş bir sonuçtur. Sadece yüksek motor yükleri için gerek benzin miktarının artması gerekse silindir içi soğumaya ve ateşleme gecikmesinin uzamasına bağlı olarak benzin yakıtının maksimumu daha yüksek çıkmıştır.

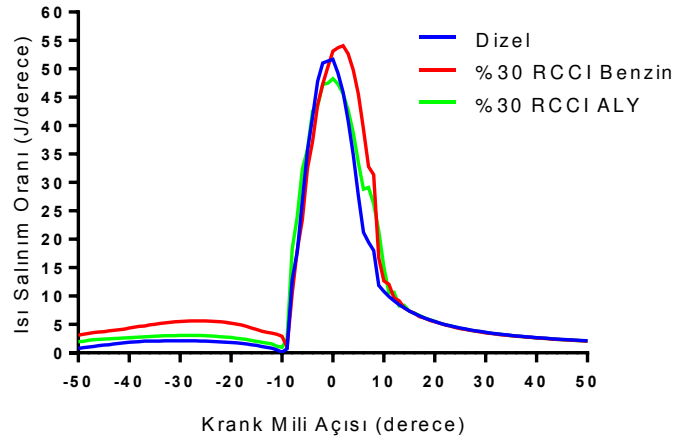


a) %0 Motor yükü



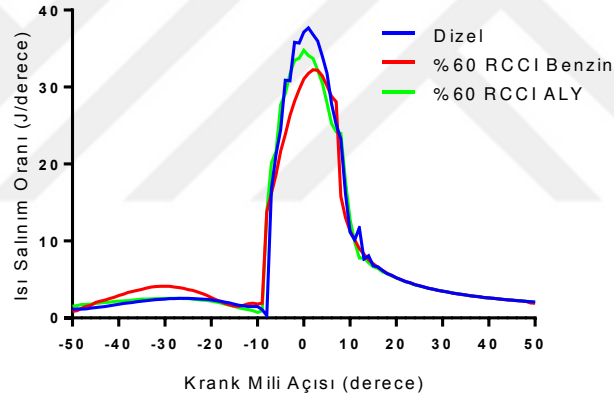
b) %20 Motor yükü

Şekil 3.9.'un devamı

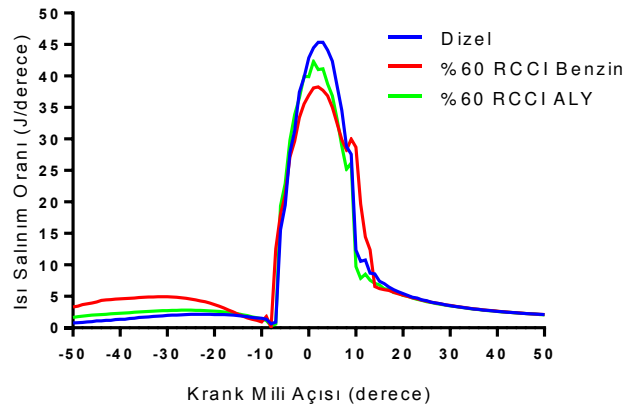


c) %60 Motor yükü

Şekil 3.9. Isı salınım oranının %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

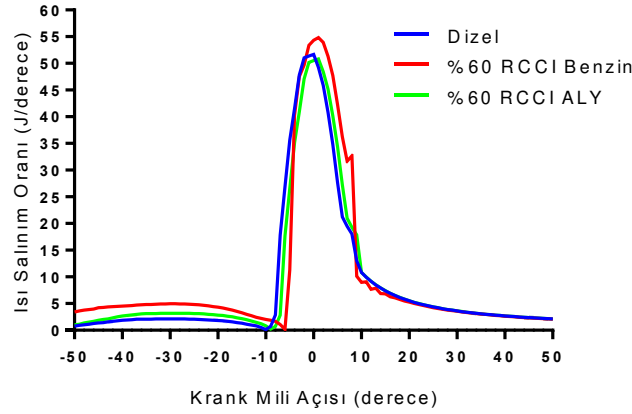


a) %0 Motor yükü



b) %20 Motor yükü

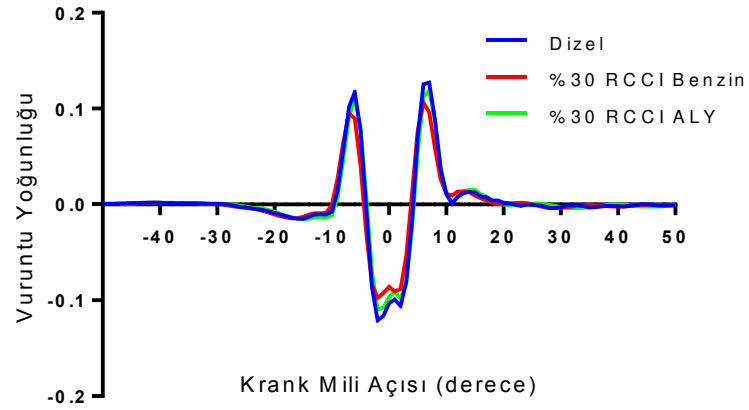
Şekil 3.10.'un devamı



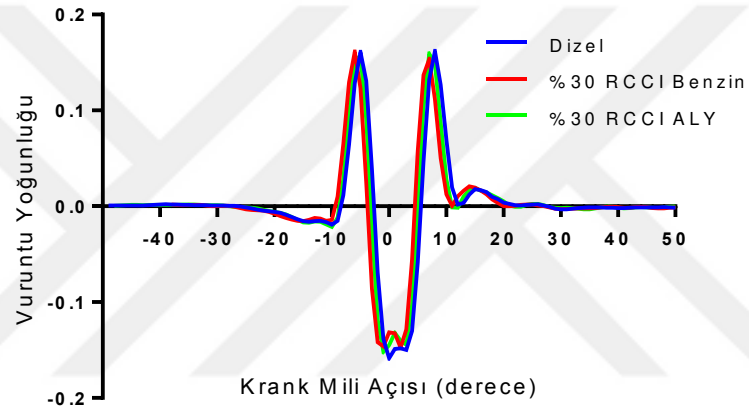
c) %60 Motor yükü

Şekil 3.10. Isı salınım oranının %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

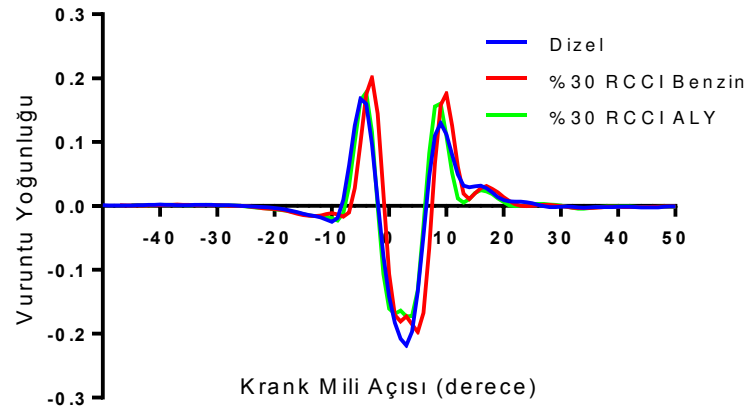
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de farklı motor yükleri ve RCCI oranlarında motor vuruntu yoğunluğu sonuçları grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 3.11’de %30 RCCI oranı için farklı motor yüklerinde vuruntu yoğunluğu görülmektedir. Özellikle bu RCCI oranında RCCI modları ile sadece dizel yakıtı kullanılan durum için benzer vuruntu yoğunlukları elde edilmiştir. Motor yükü arttıkça vuruntu yoğunluğunun kısmen artış gösterdiği yine bu grafikten elde edilen bir sonuçtur. Bu RCCI oranı için yüksek motor yüklerinde RCCI modunda benzin kullanıldığı durum için vuruntu yoğunluğunun kısmen arttığı görülmektedir. Şekil 3.12’de %60 RCCI oranı için farklı motor yüklerinde vuruntu yoğunluğu görülmektedir. Yine düşük motor yüklerinde daha düşük vuruntu görülürken yüksek motor yüklerinde püskürtülen yakıt miktarı ve yanma süresine bağlı olarak vuruntu yoğunluğu artmaktadır. Yüksek RCCI oranında özellikle düşük motor yüklerinde vuruntu yoğunluğunun geleneksel dizel yanmasına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç özellikle düşük motor yüklerinde RCCI modu için umut verici bir sonuçtur. Fakat yüksek motor yüklerinde vuruntu yoğunluğu tekrar yükselmektedir.



a) %0 Motor yükü

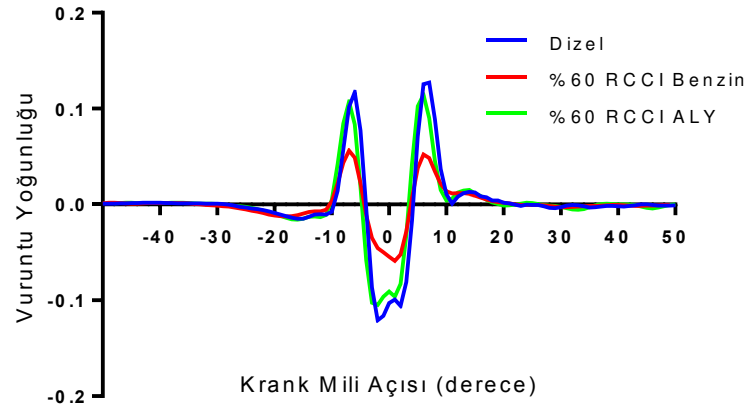


b) %20 Motor yükü

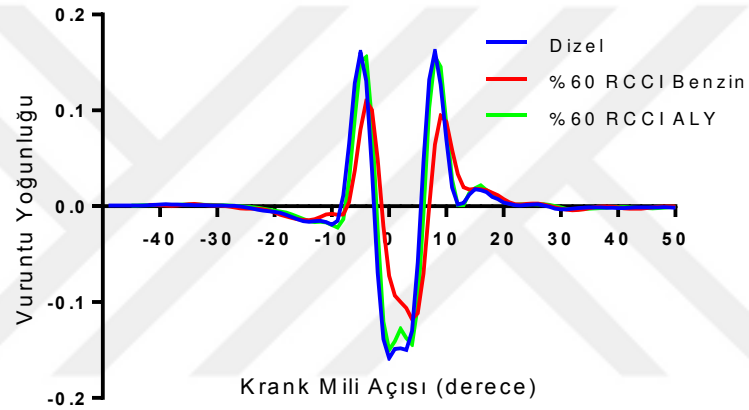


c) %60 Motor yükü

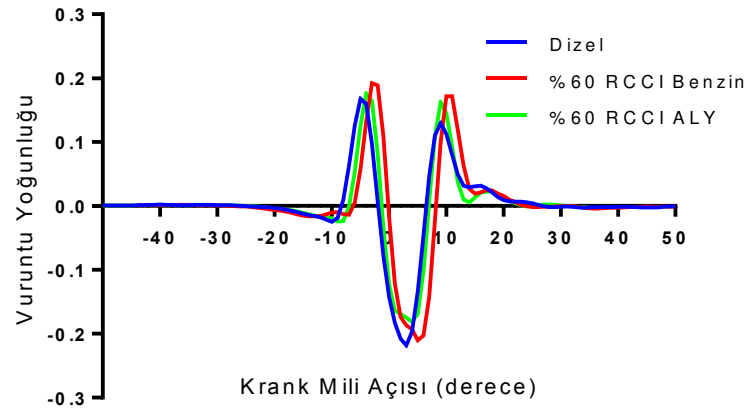
Şekil 3.11. Vuruntu yoğunluğunun %30 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi



a) %0 Motor yükü



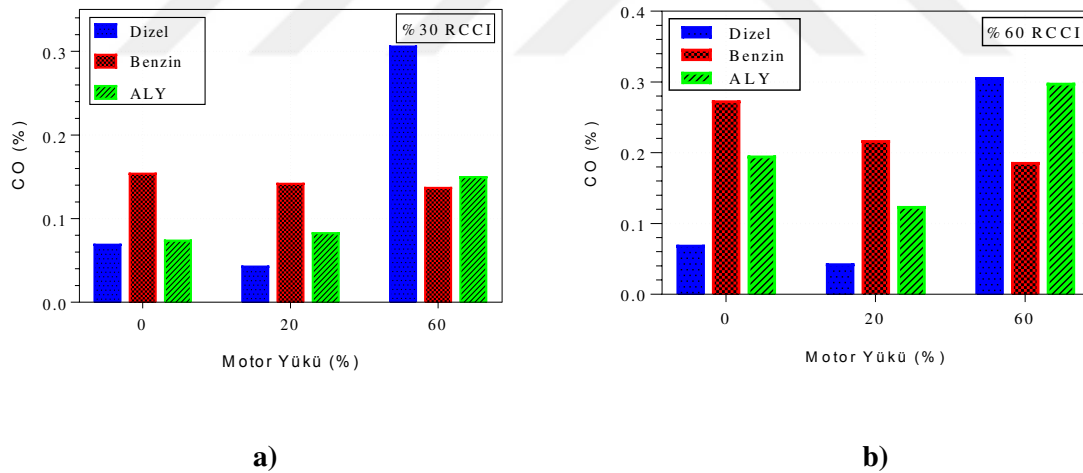
b) %20 Motor yükü



c) %60 Motor yükü

Şekil 3.12. Vuruntu yoğunluğunun %60 RCCI durumunda, farklı motor yükü ve düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

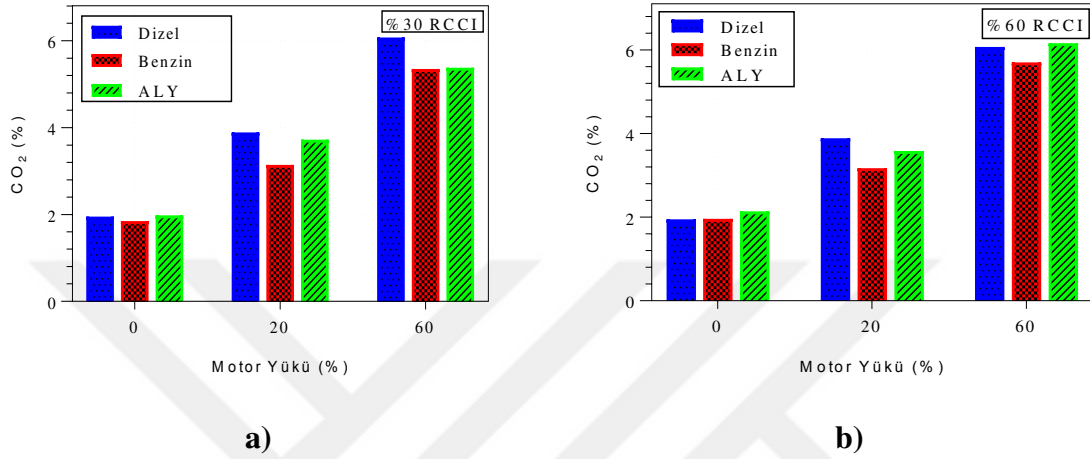
Şekil 3.13’de 2500 d/d sabit motor devrinde ve farklı motor yüklerinde birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı RCCI yanması için CO emisyonunun değişimi görülmektedir. Grafikten görüldüğü gibi RCCI işleminin olmadığı, dizel yakıtının kullanıldığı durumlarda CO emisyonu düşük yüklerde RCCI olan durumlara göre daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Fakat yüksek motor yüklerinde saf dizel kullanılan durumda CO emisyonu artarken RCCI durumlarında CO emisyonunda düşüş görülmüştür. Bilindiği üzere CO emisyonu eksik yanma ürünü olup oluşumu püskürtülen yakıtın atomize olmasına ve yanma odasındaki oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir. Püskürtülen yakıt miktarına göre yakıt parçacıklarının yanma odasında oksijenle buluşma ve yanmanın gerçekleşmesine bağlı olan CO emisyonunun yanmanın daha iyi gerçekleştiği durumlarda düşmesi beklenir. Dolayısıyla yüksek motor yüklerinde RCCI yanmasının daha iyi olduğu bu grafikten çıkarılabilecek bir sonuçtur. %30 RCCI ve %60 RCCI durumlarında benzin kullanılan durumlarda artan motor yüküne bağlı olarak CO emisyonunda azalma görülürken, ALY yakıtı kullanılan durumlarda en düşük CO emisyonu %20 motor yükünde elde edilmiştir.



Şekil 3.13. CO emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi

Şekil 3.14’de birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı, farklı motor yüklerine göre CO₂ emisyonunun değişimi görülmektedir. Şekil 3.13 ile birlikte bu grafik incelendiğinde CO emisyonlarının CO₂’ye dönüşümü net olarak görülmektedir. Düşük motor yüklerinde CO₂ oluşumunun az olduğu ve bu motor yüklerinde benzin yakıtına ait CO₂ emisyonlarının diğer yakıtlara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

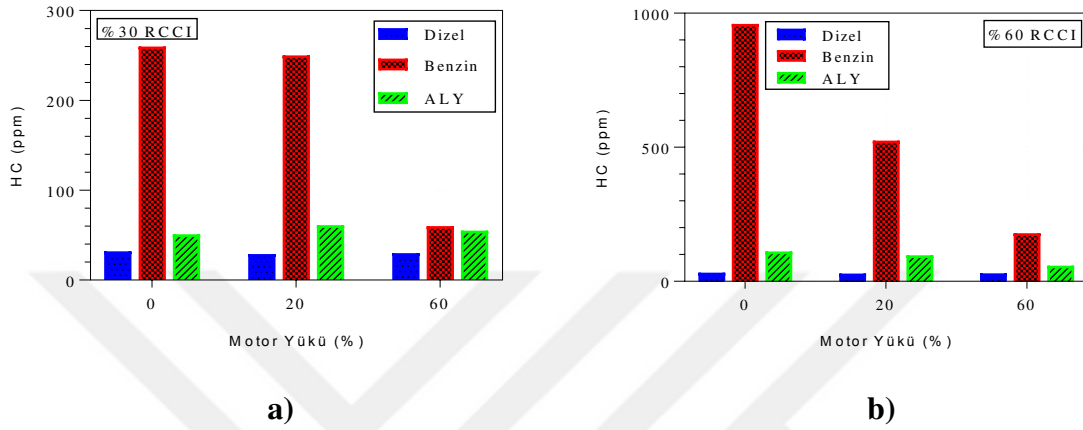
Grafikten görüldüğü gibi motor yükü arttıkça CO₂ emisyonu artış göstermektedir. CO₂ emisyonlarının daha çok tam yanma durumunda görüldüğü göz önünde bulundurulduğunda yüksek yüklerde daha fazla tamamlanmış yanmanın görüldüğü anlaşılmaktadır. RCCI oranının CO₂ emisyonlarını çok ciddi oranda etkilemediği görülürken yüksek RCCI oranında kısmen daha yüksek CO₂ emisyonları elde edilmiştir.



Şekil 3.14. CO₂ emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi

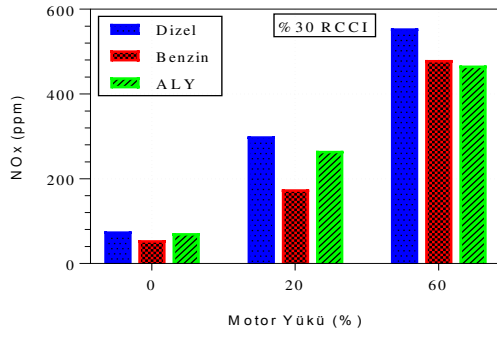
Şekil 3.15’de birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı, farklı motor yüklerine göre HC emisyonunun değişimi görülmektedir. HC emisyonları RCCI motor konseptleri için başlıca problemlerden birisidir. RCCI motorlar sağladıkları faydaların yanında yüksek HC emisyonu salınımı ile sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada uygulanan farklı çalışma stratejileri ile HC emisyonlarında önemli sonuçlar elde edilmiştir. Benzin ve ALY’nin kullanıldığı %30 ve %60 RCCI işlemleri için her motor yükünde düşük reaktiviteli yakıt enjektöründen gönderilen yakıtlar ile gerçekleşen yanmanın RCCI işleminin olmadığı saf dizel yakıtının kullanıldığı durumdakinden daha yüksek HC emisyonu oluşturduğu görülmektedir. Ancak artan motor yüklerine bağlı olarak bu grafikler incelendiğinde düşük reaktiviteli yakıtlar olan benzin ve ALY’nin kullanımı durumunda oluşan HC emisyonlarının genel olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca, grafikte benzin ve ALY’nin kullanıldığı %60 yük durumu için HC emisyonlarının dizele yaklaştığı gözlemlenmiştir. Grafikten elde edilen bir diğer sonuç RCCI oranı arttıkça HC emisyonlarının da artış gösterdiği.

Benzin ve ALY'nin düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanıldığı durumlarda, ALY hem motor yükünden hem de RCCI oranından bağımsız olarak daha düşük HC emisyonu ortaya çıkarmıştır. HC emisyonunun RCCI motorlarda yükselmesi, daha düşük yanma sıcaklığı ve daha düşük oksijen konsantrasyonunun bir sonucudur ve Şekil 3.15'de RCCI modlarında elde edilen yüksek HC değerleri bu sonucu doğrular niteliktedir.

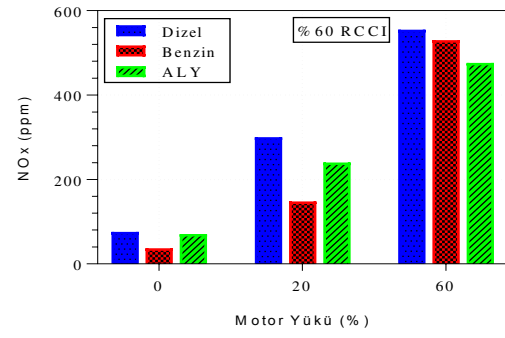


Şekil 3.15. HC emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi

Şekil 3.16'da birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı, farklı motor yüklerine göre NO_x emisyonunun değişimi görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.16 (a) ve (b)'de açıkça görülmektedir ki benzin ve ALY yakıtlarının kullanıldığı RCCI %30 ve %60 işlemleri için saf dizele göre 3 yük durumu içinde genel olarak daha düşük NO_x emisyonu meydana gelmektedir. Bunlar içerisinde %30 ve %60 RCCI için yüksüz ve düşük motor yükü durumlarında en düşük NO_x emisyonunun düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin kullanıldığı durumda, %60 yük durumunda ise düşük reaktiviteli yakıt olarak ALY kullanıldığı durumda elde edildiği görülmektedir. Artan motor yüklerinde ise yanma sıcaklığı arttığından tüm yakıtların kullanıldığı durumlar için NO_x emisyonunda artış görülmekle birlikte RCCI modu uygulanan çalışmalarda her iki RCCI oranı için de daha düşük NO_x emisyonları elde edilmektedir. RCCI modu uygulandığı durumlarda %12 ile %47 arasında daha düşük NO_x emisyonları elde edilmiştir. Bu grafik RCCI modu uygulandığı durumlarda düşük sıcaklık yanma konseptinin sağlandığını açıkça göstermektedir.



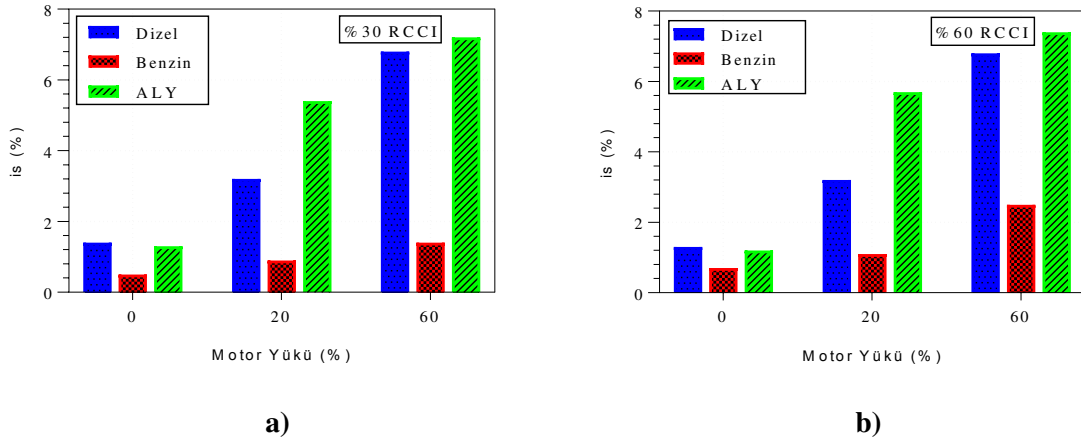
a)



b)

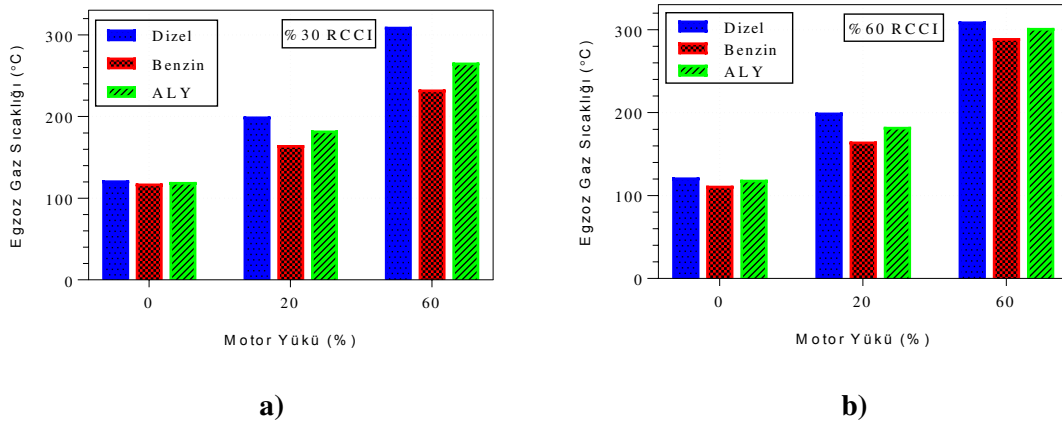
Şekil 3.16. NOx emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi

Şekil 3.17’de birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı, farklı motor yüklerine göre is emisyonunun değişimi görülmektedir. Is emisyonları bilindiği üzere dizel motorlar için oldukça önemli olup yanma kalitesini belirlemektedir. RCCI %30 ve %60 durumları için Şekil 3.17 (a) ve (b)’de verilen tüm yüklerde düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılan benzin yakıtının is emisyonu diğer yakıtlara göre düşük çıkmıştır. Düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılan ALY’nin diğer yakıtlara göre is oluşumu tüm yüklerde en yüksek çıkmıştır. Ayrıca hem %30, hem de %60 RCCI işlemleri için yükselen motor yüklerinde is emisyonu oluşumu tüm yakıtlar için artmıştır. Şekil 3.17 incelendiğinde düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin kullanıldığı durumda is emisyonlarının geleneksel dizel yakıtı kullanıldığı duruma göre %81’e varan oranlarda düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Fakat ALY kullanımı durumunda is emisyonlarının dizel yakıtı kullanıldığı duruma yakın seviyede elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar benzin kullanıldığı durumda alev yapısının silindir içerisine daha iyi yayıldığı ve yanmanın daha homojen dağıldığı görülmektedir. ALY ise yakıt bileşenlerine bağlı olarak aynı alev yapısını sağlayamamaktadır.



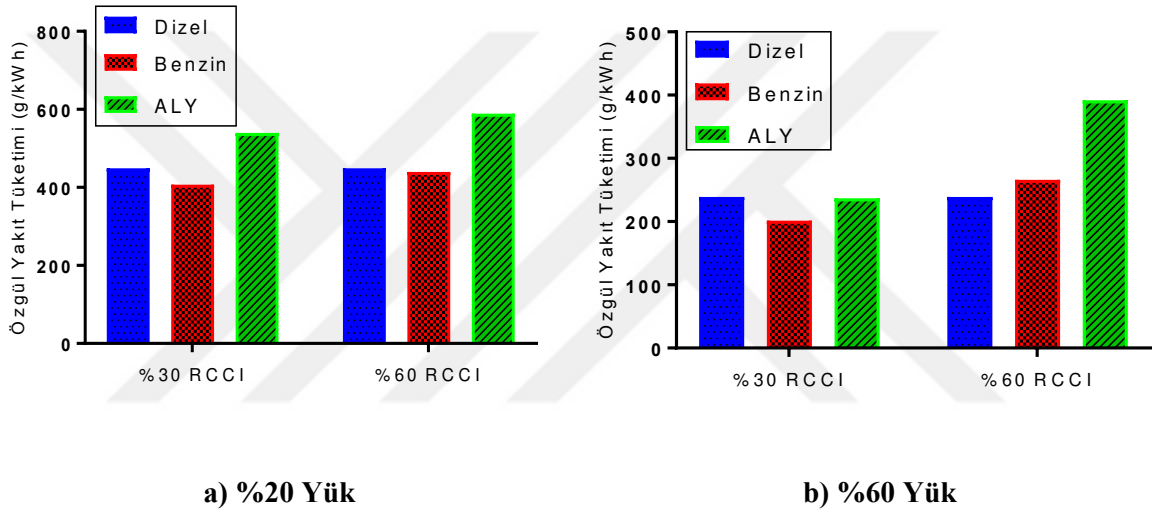
Şekil 3.17. İs emisyonunun farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı değişimi

Şekil 3.18’de birbirinden farklı düşük reaktiviteli yakıtların %30 ve %60 oranında kullanıldığı, farklı motor yüklerine göre egzoz gaz sıcaklığının değişimi görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi RCCI %30 ve %60 işlemleri için tüm yakıtların yükselen yük miktarlarıyla birlikte egzoz gazı sıcaklıkları’da artmıştır. Benzine yakıtının kullanıldığı tüm RCCI işlemleri için diğer yakıtların kullanıldığı durumlara göre genel olarak egzoz gazı sıcaklığı daha düşük olduğu görülmüştür. ALY’nin kullanıldığı durumlarda yük miktarlarının artması ile saf dizele göre egzoz gazı sıcaklığının daha düşük çıktığı görülmüştür. Bu grafikler Şekil 3.16 (a) ve (b) deki NOx sonuçlarını da desteklemektedir.



Şekil 3.18. Egzoz gaz sıcaklığının farklı motor yükü ve RCCI oranlarına bağlı olarak değişimi

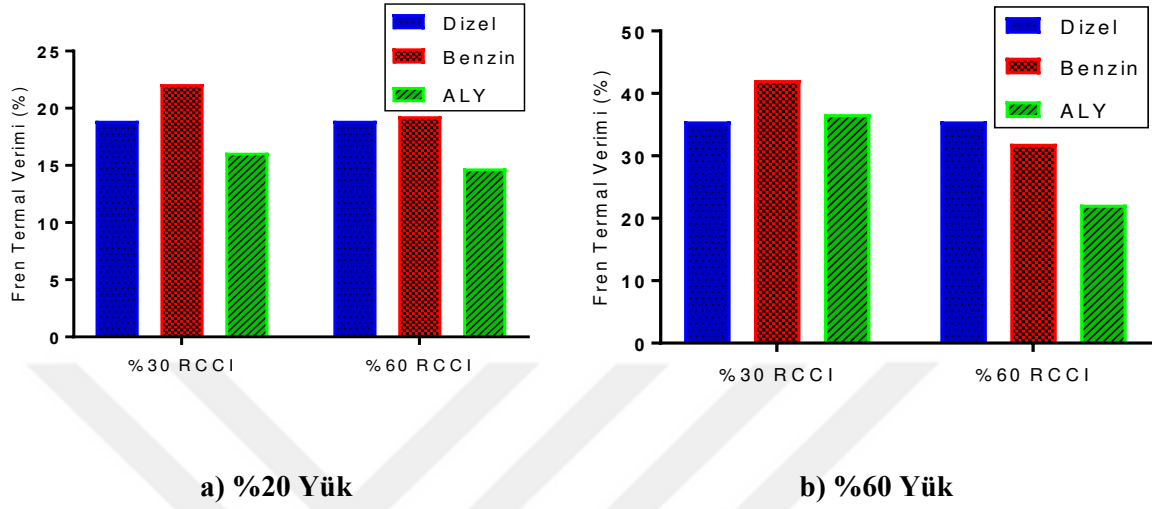
Şekil 3.19’da düşük ve yüksek motor yükü durumunda saf dizel (%100 dizel), %30 RCCI ve %60 RCCI için özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmiştir. Düşük motor yüklerinde her iki RCCI oranında ve yüksek motor yüklerinde düşük RCCI oranında, düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin kullanılması durumunda özgül yakıt tüketimi daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Özellikle ALY yakıtı kullanılan RCCI şartlarında özgül yakıt tüketiminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kullanılan yakıtın alt ısı değeri ve diğer bileşenlerinin buna sebep olduğu düşünülmektedir. Yüksek motor yükü ve yüksek RCCI oranlarında geleneksel dizel yanması durumunda en düşük özgül yakıt tüketimi elde edilmiştir.



Şekil 3.19. Özgül yakıt tüketiminin farklı motor yükü, farklı RCCI durumlarında ve farklı düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

Şekil 3.20’de farklı motor yüklerinde ve RCCI oranlarında fren termal veriminin değişimi görülmektedir. Fren termal verimi içten yanmalı motorlarda kirlenici emisyonların yanında motor performansını belirleyen önemli bir parametredir. Özellikle düşük yük durumlarında benzin yakıtının düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılması durumunda termal verim daha yüksek olarak elde edilmiştir. RCCI oranından bağımsız olarak özellikle düşük motor yüklerinde RCCI stratejisinin termal verim üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Yüksek motor yüklerinde ise düşük RCCI oranında daha yüksek fren termal verimi elde edilmiştir. ALY’nin düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanıldığı durumlarda, çok büyük bir düşüş olmamakla birlikte genel olarak fren termal veriminin diğer durumlara göre daha düşük olarak elde edildiği görülmektedir.

Bu durum ALY yakıtının düşük alt ısı değere sahip olmasının bir sonucudur. Ayrıca yüksek yük ve yüksek RCCI oranlarında daha düşük fren termal verimi elde edilmesi geciken ateşleme zamanıyla da ilgili olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.20. Fren termal veriminin farklı motor yükü, farklı RCCI durumlarında ve farklı düşük reaktiviteli yakıt cinsine bağlı değişimi

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ve grafikler yardımıyla genel olarak bulunan sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Bu çalışmadaki test sonuçları, tüm çalışma şartları dikkate alınarak beraberce değerlendirildiğinde, ÜÖNÖ -160 derece püskürtme zamanında %20 yük koşulunda ve RCCI30 durumunda benzin ve ALY yakıtlarının genel olarak motor performansını önemli ölçüde düşürmeden bazı egzoz emisyonlarını iyileştirdiğini göstermektedir.

Püskürtme zamanlarının değiştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçlarda benzin ve ALY yakıtlarının yaklaşık olarak aynı püskürtme zamanlarında daha düşük CO emisyonu oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ALY yakıtının benzin yakıtına göre tüm püskürtme zamanlarında daha düşük CO emisyonu oluşturduğu tespit edilmiştir.

CO₂ emisyonun benzin ve ALY yakıtları için tüm püskürtme zamanlarında birbirlerine yakın olduğu, ancak ALY yakıtı kullanımı durumunda tüm püskürtme zamanlarında daha yüksek CO₂ emisyonu olduğu görülmüştür.

HC emisyonunun benzin ve ALY için yaklaşık olarak aynı püskürtme zamanlarında en düşük değerler elde edildiği görülmüş ancak ALY yakıtının kullanımı durumunda benzine göre oldukça düşük HC emisyonu elde edilmiştir. Bu sonuç ile RCCI motorlarda meydana gelen yüksek HC emisyonu probleminin ALY kullanımı durumunda ortaya çıkmadığı tespit edilmiştir.

NO_x emisyonu benzin ve ALY yakıtları için genel olarak aynı püskürtme zamanında en düşük seviyede elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklı yanma konseptinin en önemli çıktılarından olan düşük NO_x emisyonu benzin yakıtının kullanıldığı durumda orta çıkmıştır.

İs emisyonu benzin ve ALY yakıtları için benzer püskürtme zamanlarında en düşük seviyelerde elde edilmiştir. Genel olarak her iki yakıt türü için düşük çıkan is emisyonu değerleri özellikle benzin yakıtının kullanıldığı durumda RCCI konseptine uygun olarak daha düşük çıkmıştır.

Kullanılan her iki düşük reaktiviteli yakıtın genel olarak tüm püskürtme zamanlarında benzer egzoz gazı sıcaklıkları oluşturduğu, ayrıca benzin kullanımı durumunda ALY'ye göre daha düşük sıcaklıklar oluştuğu görülmüştür.

Silindir içi basınçların tüm yüklerde, düşük ve yüksek RCCI oranlarındaki durumlarla karşılaştırıldığında en yüksek basıncın geleneksel dizel yanmasına göre dizel yakıtı ile elde edildiği görülmüştür. RCCI30 ve RCCI60 durumları incelendiğinde düşük reaktiviteli yakıtların kullanımı sonucunda tüm yük durumlarında oluşan basınç eğrilerinin geleneksel dizel yanmasına yaklaştığı gözlemlenmiştir. Her iki RCCI durumları için düşük yüklerde maksimum basıncın ÜÖN civarında oluştuğu, yük artışının olduğu durumda ise maksimum basıncın ÜÖN'den sonra gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Isı salınımının RCCI oranına bağlı olarak ciddi seviyede değişmediği, ancak motor yükünün arttığı durumlarda arttığı tespit edilmiştir. Yüksüz ve düşük RCCI'lı durumlarda benzin yakıtı kullanımı sonucunda ısı salınımı genel olarak dizel ve ALY'den düşük çıkmıştır. Yüksek yüklerde ise benzin yakıtının ısı salınımı diğer yakıtlara göre daha yüksek çıkmıştır.

Tüm RCCI oranları için düşük motor yüklerinde vuruğu yoğunluğunun azaldığı yüksek motor yüklerinde ise arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek RCCI oranında düşük motor yüklerinde vuruğu yoğunluğunun özellikle benzin yakıtı için geleneksel dizel yanmasına göre düşük çıkmasının RCCI modu için ümit edici bir sonuç olduğu görülmüştür.

2500 d/d sabit motor devrinde, farklı motor yükü ve RCCI durumlarında düşük reaktiviteli yakıt olan benzin için CO emisyonunun düşük yüklerde yüksek olduğu, motor yükünün artışıyla birlikte ise azalma göstermesinin diğer yakıtlar arasındaki en dikkat çekici sonuç olduğu tespit edilmiştir.

CO₂ emisyonunun yukarıda belirtilen şartlar altında düşük motor yüklerinde düşük olduğu, en düşük emisyon seviyesinin ise benzin yakıtında oluştuğu gözlemlenmiştir. Motor yükünün artışına bağlı olarak ise CO₂ emisyonlarında artış görülmüştür.

HC emisyonunun benzin ve ALY'nin kullanıldığı RCCI'lı durumun geleneksel dizel yanmasına göre tüm yük ve RCCI oranlarında yüksek çıktığı ancak yük artışına bağlı olarak düşük ve yüksek RCCI'lı durumlarda benzin ve ALY için azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle her iki RCCI durumundaki %60 yük durumu için benzin ve ALY'nin oluşturdukları HC emisyonu dizele yaklaşmıştır.

NOx emisyonunun yüksüz ve düşük yüklerde, düşük reaktiviteli yakıtların kullanıldığı durumlarda ciddi seviyelerde düştüğü ve bu sonuçla birlikte RCCI modunun sağlandığı görülmüştür.

İs emisyonu, düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılan benzin için, düşük ve yüksek RCCI'lı durumlarda ve tüm yük aralıklarında diğer yakıtlara göre daha düşük çıkmıştır. ALY için ise is emisyonu sadece yüksüz durumda düşükken diğer tüm durumlarda daha yüksek çıkmıştır.

Egzoz gaz sıcaklığı RCCI30 ve RCCI60 durumlarında tüm yakıtlar için yük artışıyla birlikte artış göstermiş ancak benzin ve ALY yakıtı için dizel yakıtındaki artışa göre nispeten daha düşük seviyelerde kalmış, benzin yakıtı içinse en düşük seviyede bu artış gerçekleşmiştir.

Özgül yakıt tüketiminin 2500 d/d sabit motor devrinde ve farklı motor yükü ve farklı RCCI oranlarında elde edilen sonuçlarda düşük reaktiviteli yakıt olarak benzin yakıtının kullanıldığı durumda genel olarak en düşük değerlerde, ALY yakıtının ise tüm durumlar için en yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.

Fren termal veriminin 2500 d/d sabit motor devrinde ve farklı motor yükü ve farklı RCCI oranlarında elde edilen verilerde, benzin yakıtı için düşük yük ve düşük RCCI durumlarında en yüksek, yüksek yük ve yüksek RCCI durumlarında ise en düşük fren termal verimin elde edildiği görülmüştür. ALY yakıtı içinse genel olarak fren termal verimde diğer yakıtlara göre belirgin bir düşüş gözlemlenmezken düşük RCCI, yüksek yük durumunda dizele göre yüksek çıkmıştır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan reaktivite kontrollü dizel motorda atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın yanma ve emisyon karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi sonucunda elde edilen bilgiler ışığında bazı öneriler yapılmıştır. Atık taşıt lastiklerinin alternatif bir yakıt kaynağına dönüştürülerek bertaraf edilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi ve doğal kaynakların ekonomik kullanılması bakımından önem arz etmektedir.

Düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanılan ALY'nin farklı yakıt türleri ile farklı oranlarda, karıştırılarak reaktivitesi daha düşük bir yakıt oluşturulabilir ve bu yakıtın performans değerleri incelenebilir. Aynı şekilde yüksek reaktiviteli yakıt olarak saf dizel yerine farklı oran ve karışımlarda yakıtlarda kullanılabilir.

Motorun tüm yük ve devir aralıklarında püskürtme zamanlamaları değiştirilerek farklı düşük reaktiviteli yakıtlar ile motor performansı ve emisyon parametreleri açısından motordaki davranışları araştırılabilir.

Düşük reaktiviteli yakıtı farklı basınç ve sıcaklıklarda port enjeksiyonu ile emme manifolduna gönderebilir. Böylece değişken şart ve parametrelerde RCCI motoru incelenmiş olur.

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

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, O.M.**, 2005. Yeraltı termal enerji depolamada kullanılan farklı dolgu maddelerinin termal özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [2] <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/documents/dizel%20emisyon%20kontrol%20yontemleri2011.pdf> Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Emisyon Yönetmelikleri, 01 Ocak 2018.
- [3] **Doğan, O.**, 2012. Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması, *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [4] **Ma, S., Zheng, Z., Liu, H., Zhang, Q., Yao, M.**, 2013. Experimental investigation of the effects of diesel injection strategy on gasoline/diesel dual-fuel combustion, *Applied Energy*, **109**, 202-212.
- [5] **Benajes, J., Molina, S., García, A., Belarte, E., Vanvolsem, M.**, 2014. An investigation on RCCI combustion in a heavy duty diesel engine using in-cylinder blending of diesel and gasoline fuels, *Applied Thermal Engineering*, **63**, 66-76.
- [6] **Benajes, J., Pastor, J., Garcia, A., Boronat, V.**, 2016. A RCCI operational limits assessment in a medium duty compression ignition engine using an adapted compression ratio, *Energy Conversion and Management*, **126**, 497-508.
- [7] **Jeon, J., Lee, J. T., Kwon, S., Park, S.**, 2016. Combustion performance, flame, and soot characteristics of gasoline–diesel pre-blended fuel in an optical compression-ignition engine, *Energy Conversion and Management*, **116**, 174-183.
- [8] **Park, S.H. and Yoon, S.Y.**, 2016. Effect of dual-fuel combustion strategies on combustion and emission characteristics in reactivity controlled compression ignition (RCCI) engine, *Fuel*, **181**, 310-318.
- [9] **Martin, J., Novella, R., Garcia, A., Carreno, R., Heuser, B., Kremer, F., Pischinger, S.**, 2016. Thermal analysis of a light-duty CI engine operating with diesel-gasoline dual-fuel combustion mode, *Energy*, **115**, 1305-1319.

- [10] **Li, Y., Jia, M., Chang, Y., Xie, M., Reitz, D.R.,** 2016. Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine, *Energy*, **99**, 69-82.
- [11] **Imtenan, S., Varman, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Sajjad, H., Arbab, M.I., Rizwanul Fattah, I.M.,** 2014. Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review, *Energy Conversion and Management*, **80**, 329-356.
- [12] **Li, J., Yang, W, M., An, H., Zhao, D.,** 2015. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study, *Applied Energy*, 155, 59-67.
- [13] **Li, J., Yang, W.M., Goh, T.N., An, H., Maghbouli, A.,** 2014. Study on RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine by means of statistical experimental design, *Energy*, **78**, 777-787.
- [14] **Paykani, A., Kakaee, A, H., Rahnama, P., Reitz, D.R.,** 2015. Effects of diesel injection strategy on natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition combustion, *Energy*, **90**, 814-826.
- [15] **Kakaee, A.H., Rahnama, P., Paykani, A.,** 2015. Influence of fuel composition on combustion and emissions characteristics of natural gas/diesel RCCI engine, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **25**, 58-65.
- [16] **Rahnama, P., Paykani, A., Reitz, D.R.,** 2017. numerical study of the effects of using hydrogen, reformer gas and nitrogen on combustion, emissions and load limits of a heavy duty natural gas/diesel RCCI engine, *Applied Energy*, **193**, 182-198.
- [17] **Poorghasemi, K., Saray, R.K., Ansari, E., Irdmoussa, P.M., Shahbakhti, M., Naber, J.D.,** 2017. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine, *Applied Energy*, **199**, 430-446.
- [18] **Vávra, J., Bortel, I., Takáts, M., Diviš, M.,** 2017. Emissions and performance of diesel–natural gas dual-fuel engine operated with stoichiometric mixture, *Fuel*, **208**, 722-733.
- [19] **Yang, B., Ning, L., Chen, W., Wang, B., Zeng, K., Dong, W.,** 2017. Parametric investigation the particle number and mass distributions characteristics in a

- diesel/natural gas dual-fuel engine, *Applied Thermal Engineering*, **1359-4311**.
- [20] **Mikulski, M. and Bekdemir, C.**, 2017. Understanding the role of low reactivity fuel stratification in a dual fuel RCCI engine – A simulation study, *Applied Energy*, **191**, 689-708.
- [21] **Li, Y., Jia, M., Chang, Y., Liu, Y., Xie, M., Wang, T., Zhou, L.**, 2014. Parametric study and optimization of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine fueled with methanol and diesel, *Energy*, **65**, 319-332.
- [22] **Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., Balloul, I., Pradel, G.**, 2016. An assessment of the dual-mode reactivity controlled compression ignition/conventional diesel combustion capabilities in a EURO VI medium-duty diesel engine fueled with an intermediate ethanol-gasoline blend and biodiesel, *Energy Conversion and Management*, **123**, 381-391.
- [23] **Gross, W. C., Reitz, D. R.**, 2017. Transient “Single-Fuel” RCCI Operation With Customized Pistons in a Light-Duty Multicylinder Engine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139.
- [24] **Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M.**, 2012. Numerical study of hydrogen Addition to DME/CH₄ dual fuel RCCI engine, *International Journal of Energy*, **37**, 8688-8697.
- [25] **Liu, H., Wang, X., Zheng, Z., Gu, J., Wang, H., Yao, M.**, 2014. Experimental and simulation investigation of the combustion characteristics and emissions using n-butanol/ biodiesel dual-fuel injection on a diesel engine, *Energy*, in-press, 1-12.
- [26] **E, J., Phama, M., Zhao, D., Deng, Y., Lea, D., Zuoa, W., Zhua, H., Liua, T., Penga, Q., Zhanga, Z.**, 2017. Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **80**, 620-647.
- [27] **Gharehghani, A., Hosseini, R., Mirsalim, M., Jazayeri, S.A., Yusaf, T.**, 2015. An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas, *Energy*, **89**, 558-567.
- [28] **Reitz, D.R. and 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.
- [29] **Kalsi, S.S. and Subramanian, K.A.**, 2017. Experimental investigations of effects of hydrogen blended CNG on performance, combustion and emissions characteristics of a biodiesel fueled reactivity controlled compression ignition engine (RCCI), *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 4548-4560.
- [30] **Costa, M., Villetta, M.L., Massarotti, N., Piazzullo, D., Rocco, V.**, 2017. Numerical analysis of a compression ignition engine powered in the dual-fuel mode with syngas and biodiesel, *Energy*, 1-11.
- [31] **Işık, Z.M. and Aydın, H.**, 2016. Analysis of ethanol RCCI application with safflower biodiesel blends in a high load diesel power generator, *Fuel*, **184**, 248-260.
- [32] **Molina, S., García, A., Pastor, J.M., Belarte, E., Balloul, I.**, 2015. Operating range extension of RCCI combustion concept from low to full load in a heavy-duty engine, *Applied Energy*, **143**, 211-227.
- [33] **Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., Boronat, V.**, 2017. Achieving clean and efficient engine operation up to full load by combining optimized RCCI and dual-fuel diesel-gasoline combustion strategies, *Energy Conversion and Management*, **136**, 142-151.
- [34] **Lee, J., Chu, S., Min, K., Kim, M., Jung, K., Kim, H., Chi, Y.**, 2017. Classification of diesel and gasoline dual-fuel combustion modes by the analysis of heat release rate shapes in a compression ignition engine, *Fuel*, **209**, 587-597.
- [35] **Kavuri, C. and Kokjohn, S.L.**, 2017. Computational optimization of a reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion system considering performance at multiple modes simultaneously, *Fuel*, **207**, 702-718.
- [36] **Kavuri, C., Paz, J., Kokjohn, S.L.**, 2016. A comparison of Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) and Gasoline Compression Ignition (GCI) strategies at high load, low speed conditions, *Energy Conversion and Management*, **127**, 324-341.
- [37] **Dempsey, A., Walker, N., Gingrich, E., Reitz, D.R.**, 2014. Comparison of low temperature combustion strategies for advanced compression ignition

engines with a focus on controllability, *Combust Sci Technol* , **86(2)**, 210-41.

- [38] **Uyumaz, A. ve Solmaz, H.**, 2016. RCCI Bir Motorda Enjeksiyon Zamanlaması ve Lambdanın Yanma ve Performans Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Tasarım ve Teknoloji GU J Sci Part:C **4(4)**, 299-308.
- [39] **Tang, Q., Liu, H., Li, M., Geng, C., Yao, M.**, 2017. Multiple optical diagnostics on effect of fuel stratification degree on reactivity controlled compression ignition, *Fuel*, **202**, 688-698.
- [40] **Gözen, E.**, 2015. Investigation Of Rcci Engine Emission And Performance, *M.Sc. Thesis*, I.T.U. Institute of Science and Technology, İstanbul.
- [41] **Wang, Y., Yao, M., Li, T., Zhang, W., Zheng, Z.**, 2016. A parametric study for enabling reactivity controlled compression ignition (RCCI) operation in diesel engines at various engine loads, *Applied Energy*, **175**, 389-402.
- [42] **Nazemi, M. and Shahbakhti, M.**, 2016. Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an RCCI engine, *Applied Energy*, **165**, 135-150.
- [43] **Wang, Y., Zhu, Z., Yao, M., Li, T., Zhang, W., Zheng, Z.**, 2016. An investigation into the RCCI engine operation under low load and its achievable operational range at different engine speeds, *Energy Conversion and Management*, **124**, 399-413.
- [44] **Benajes, J., Pastor, J.V., García, A., Monsalve-Serrano, J.**, 2015. An experimental investigation on the influence of piston bowl geometry on RCCI performance and emissions in a heavy-duty engine, *Energy Conversion and Management*, **103**, 1019-1030.
- [45] **Kakaee, A.H., Nasiri-Toosi, A., Partovi, B., Paykani, A.**, 2016. Effects of piston bowl geometry on combustion and emissions characteristics of a natural gas/diesel RCCI engine, *Applied Thermal Engineering*, **102**, 1462-1472.
- [46] **Li, J., Yang, W.M., Zhou, D.Z.**, 2016. Modeling study on the effect of piston bowl geometries in a gasoline/biodiesel fueled RCCI engine at high speed, *Energy Conversion and Management*, **112**, 359-368.
- [47] **Lee, S., Jeon, J., Park, S.**, 2016. Optimization of combustion chamber geometry and operating conditions for compression ignition engine fueled with

- pre-blended gasoline-diesel fuel, *Energy Conversion and Management*, **126**, 638-648.
- [48] **Li, J., Yang, W., Zhou, D.**, 2017. Review on the management of RCCI engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **69**, 65-79.
- [49] **Salahi, M.M., Esfahanian, V., Gharehghani, A., Mirsalim, M.**, 2017. Investigating the reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion strategy in a natural gas/diesel fueled engine with a pre-chamber, *Energy Conversion and Management*, **132**, 40-53.
- [50] **Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., Boronat, V.**, 2017. An investigation on the particulate number and size distributions over the whole engine map from an optimized combustion strategy combining RCCI and dual-fuel diesel-gasoline, *Energy Conversion and Management*, **140**, 98-108.
- [51] **Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., Boronat, V.**, 2017. Gaseous emissions and particle size distribution of dual-mode dual-fuel diesel-gasoline concept from low to full load, *Applied Thermal Engineering*, **120**, 138-149.
- [52] **García, A., Monsalve-Serrano, J., Roso, V.R., Martins, M., E.S.**, 2017. Evaluating the emissions and performance of two dual-mode RCCI combustion strategies under the World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC), *Energy Conversion and Management*, **149**, 263-274.
- [53] **Jo, S., Park, S., Kim, H.J., Lee, J.T.**, 2019. Combustion improvement and emission reduction through control of ethanol ratio and intake air temperature in reactivity controlled compression ignition combustion engine, *Applied Energy*, **250**, 1418-1431.
- [54] **Charitha, V., Thirumalini, S., Prasad, M., Srihari, S.**, 2019. Investigation on performance and emissions of RCCI dual fuel combustion on diesel - bio diesel in a light duty engine, *Renewable Energy*, **134**, 1081-1088.
- [55] **Zhong, W., Pachiannan, T., Li, Z., Qian, Y., Zhang, Y., Wang, Q., He, Z., Lu, X.**, 2019. Combustion and emission characteristics of gasoline/hydrogenated catalytic biodiesel blends in gasoline compression ignition engines under different loads of double injection strategies, *Applied Energy*, **251**, 113296.

- [56] **Wang, W.C., Bai, C.J., Lin, C.T., Prakash S.,** 2016. Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine, *Applied Thermal Engineering*, **93**, 330–338.
- [57] **Öztop, H.F., Varol, Y., Altun Ş., Firat, M.,** 2014. Using Gasoline-like Fuel Obtained from Waste Automobile Tires in a Sparkignited Engine, *Energy Sources, Part A*, **36**, 1468-1475.
- [58] **Tudu, K., Murugan, S., Patel, S.K.,** 2016. Effect of diethyl ether in a DI diesel engine run on a tyre derived fuel-diesel blend, *Journal of the Energy Institute*, **89**, 525-535.
- [59] **Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G.,** 2008. The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines, *Waste Management*, **28**, 2743–2749.
- [60] **Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan G.,** 2008. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends, *Fuel Processing Technology*, **89**, 152-159.
- [61] **Aydın, H.,** 2011. Atık Taşıt Lastiklerinden Yakıt Üretimi ve Dizel Motorlarında Kullanımının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [62] <https://www.britannica.com/technology/internal-combustion-engine> 01 Şubat 2018.
- [63] **Küçükşahin, F.,** 1990. *Teknik okullar için dizel motorları*. Sermet Matbaası, Kırklareli.
- [64] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/pressure-volume-pv-diagram-work-ice/> 03 Şubat 2018.
- [65] **U.S. Department Of Energy,** 1993. *Mechanical Science Fundamentals Handbook* Volume 1 of 2, Publication Number: 1018/1-93, Washington.
- [66] **Yontar, A.A.,** 2016. Buji Ateşlemeli Motorda Saf ve Karışımli Alternatif Yakıtların Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkilerinin Sayısal ve Deneysel İncelemesi, *Doktora Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [67] **Çengel, Y.A., ve Boles, M.A.,** 1996. *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik*. Güven Bilimsel Matbaası, İstanbul.
- [68] **Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A.,** 1995. *İçten Yanmalı Motorlar*. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Matbaası, Ankara.

- [69] **Altun, Ş.**, 2009. Hayvansal Yağlarda Biyo-Yakıt Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması, *Doktora Tezi*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [70] **Castillo, M.S.J.**, 2014. Technological Approaches To Improve The Engine Efficiency And To Reduce Pollutant Emissions Of Automotive Diesel Engines, *Ph.D. Thesis*, Politecnico di Torino, Department of Applied Science and Technology, Italy.
- [71] **Han, X., Gao, T., Asad, U., Xie, K., Zheng, M.**, 2012. "Empirical Study of Simultaneously Low NO_x and Soot Combustion With Diesel and Ethanol Fuels in Diesel Engine," *Proceedings of the ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference*, ICES2012, Torino, Piemonte, Italy.
- [72] **Gao, T.**, 2017. Mixing and reactivity control with butanol and etanol in compression ignition engines, *Ph.D. Thesis*, Windsor University, Graduate School of Natural and Engineering Sciences, Ontario, Canada.
- [73] **Rakopoulos, C.D. and Giakoumis, E.G.**, 2009. "Diesel engine transient operation principles of operation and simulation analysis", *Springer-Verlag London Limited*, Tempere, Finland, 141-178.
- [74] **Heywood, J.**, 1988. "Internal combustion engine fundamentals", *Mcgraw-Hill Book Company*, New York, 491-566.
- [75] https://www.dieselnet.com/tech/engine_ltc.php 1 Nisan 2018.
- [76] **Solouk, A., Tripp, J., Shakiba-Herfeh, M.**, 2017. Fuel consumption assessment of a multi-mode low temperature combustion engine as range extender for an electric vehicle, *Energy Conversion and Management*, **148**, 1478-1496.
- [77] **Özden, C.M.**, 2005. Homojen Karışımli İçten Yanmalı Motorlar, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [78] **Dönmez, A.F.**, 2010. Homojen Karışımli Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorun (HCCI) Tek Bölge Modelleme Yöntemi Kullanılarak Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [79] **Türkcan, A.**, 2013. Direkt Püskürtmeli HCCI Bir Motorda Püskürtme Parametrelerinin Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- [80] **Ganesh, D., Nagarajan, G., Mohamed, I.M.,** 2008. Study of performance, combustion and emission characteristics of diesel homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion with external mixture formation, *Fuel*, **87**, 3497–3503.
- [81] **Wu, H., Wang, R., Ou, D., Chen, Y., Chen, T.,** 2011. Reduction of smoke and nitrogen oxides of a partial HCCI engine using premixed gasoline and ethanol with air, *Applied Energy*, **88**, 3882–3890.
- [82] **Leermakers, C.A.J., Luijten, C.C.M., Somers, L.M.T., Kalghatgi, G.T.,** 2011. Experimental Study of Fuel Composition Impact on PCCI Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine, *SAE international Technical Papers*, Eindhoven University of Technology, 1351.
- [83] **Aceves, S.M., Flowers, D.L., Espinosa-Loza, F., Babajimopoulos, A., Assanis, D.N.,** 2004. Analysis of Premixed Charge Compression Ignition Combustion with a Sequential Fluid Mechanics-Multizone Chemical Kinetics Model, *SAE World Congress*, Lawrence Livermore National Laboratory, 206978.
- [84] **Shaik, A.S., and Nataraj, T.S.C.,** 2016. Effect Of Modified Design On Engine Fuel Efficiency, *Int. Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 6, Issue 9, (Part -2) pp.19-27.
- [85] **Curran, S., Gao, Z., Szybist, J., Wagner, R.,** 2014. Fuel Effects on RCCI Combustion: Performance and Drive Cycle Considerations. <https://crcao.org/workshops/2014AFEE/Final%20Presentations/Day%20%20Session%205%20Adv%20Combustion%20Presentations/54%20Curran,%20Scott%20%20%20CRC%20Workshop%20-%20RCCI%20-%20Wed.pdf>, 15 Şubat 2018.
- [86] **Dezhi, Z.,** 2017. Numerical Investigation Of Combustion Process In Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Engine, *Ph.D. Thesis*, Department Of Mechanical Engineering, National University Of Singapore, China.
- [87] **Sadabadi, K.K.,** 2015. Modelling And Control Of Combustion Phasing of An RCCI Engine, *M.Sc.Thesis*. Department Of Mechanical Engineering, Michigan Technological University, United State Of America.
- [88] **Kokjohn, S.L., Reitz, R., Splitter, D.,** 2012. Investigation of Fuel Reactivity Stratification for Controlling PCI Heat-Release Rates Using High-Speed

Chemiluminescence Imaging and Fuel Tracer Fluorescence, *SAE Int. J. Engines*, **5(2)**, 248-269.

- [89] **Kızıltan, E.**, 1988. Motor Yakıtlarına Alkol Katılmasının Motor Performansına Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [90] **Das, L.M., and Reddy, Y.V.R.**, 1996. Evaluation of alternative fuels for internal combustion engines, *Proceeding of the First Trabzon International Energy and Environment Symposium*, 951-958.
- [91] **Mitzlaff, K.V.**, 1988. Engines for Biogas, Vieweg, ISBN 3-528-02032-6, Eschborn, 131.
- [92] **Usta, N., Can, O. ve Öztürk, E.**, 2005. Alternatif Dizel Motor Yakıtı Olarak Biyodizel ve Etanolün Karşılaştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **11**, 3, 325-334.
- [93] **Hoçur, A.**, 2015. Yenilenebilir Alternatif Yakıtların Dizel Motorlarda Kullanımının Performans ve Emisyonlar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- [94] **Sugözü, İ., ve Mutlu, İ.**, 2009. Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1(1)**, 35-46.
- [95] **Demirci, Y., Dere, T., Gönüllü, M.T.**, 2014. Adıyaman İlinde Piroliz Teknolojisini Kullanarak Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden Aktif Karbon Üretimi: Fizibilite Çalışması, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **1(1)**, 31-41.
- [96] <https://www.belfasttelegraph.co.uk/news/northern-ireland/tyres-to-replace-coal-as-plant-fuel-31043000.html>, 3 Nisan 2018.
- [97] **Uzun, B.B., ve Yaman, E.**, 2014. Atık Lastiklerin Katalitik Pirolizi Üzerine Bir İnceleme, *International Symposium On Environment And Morality*, 995-1004.
- [98] **Williams, P.T., and Brindle, A.J.**, 2003. Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **67**, 143-164.
- [99] **Ertas, T.** 1997. Zararlı Atıkların Ozon ile Oksidasyonu, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [100] **Harper, R.J., and Stone, R.L.**, 1986. Cationic cotton plus easy care, *Textile Chemist and Colorist*, **11**, 33-35.
- [101] **Clipson, J.A., and Roberts, G.A.F.**, 1989. Differential dyeing cotton, *1-Preparation and evaluation of differential dyeing cotton yarn*, J.S.D.C, **105**, 158-162.
- [102] **Lewis, D.M., and McIlroy, K.A.**, 1997. The Chemical Modification of Cellulosic Fibres to Enhance Dyeability, *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, **27**, 5-17.
- [103] <https://www.sanayi.gov.tr/legislation.html?lang=tr#>, 28 Haziran 2019.
- [104] **Fırat, M.**, 2014. İçten Yanmalı Motorlarda Farklı Yanma Odaları ve Püskürtme Modellerinde Püskürtme Dinamiği ve Yanmanın İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [105] **Stone, R.**, 1999. Introduction to Internal Combustion Engines, *Macmillan Press Limited*.
- [106] **Checkel, M., and Dale, J.**, 1986. Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records, *SAE Technical Paper 860028*, doi:10.4271/860028.
- [107] **Uçar, M.**, 2017. Dizel Motorlarda Atık Taşıt Lastiklerinden Elde Edilen Pirolitik Yağın Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

Okan ÇELİK, 10 Eylül 1993 yılında Ardahan’da doğmuştur. İlköğrenimini İstanbul’da tamamlamıştır. Orta Öğrenimini İstanbul Esenyurt Anadolu Lisesinde gördükten sonra, 2012 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği bölümüne kayıt yapmıştır. Ayrıca 2013 yılında aynı fakültenin Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazanarak çift ana dal eğitime başlamıştır. Otomotiv Mühendisliğinden 2016 yılının Haziran ayında Bölüm 2’ncisi, Fakülte 3’ncüsü olarak mezun olduktan sonra aynı yılın Eylül ayında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri alanında lisansüstü eğitime başlamıştır. Ardından 2017 yılı Mayıs ayında Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.