

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ
MOTORLARDA OZON KULLANIMININ YANMA KONTROLÜ
VE EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Şafak Melih ŞENOCAK

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Taşıt Tahrik Ve Güç Sistemleri Bilim Dalı

HAZİRAN 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ
MOTORLARDA OZON KULLANIMININ YANMA KONTROLÜ VE
EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Tez Yazarı
Şafak Melih ŞENOCAK

Danışman
Prof. Dr. Yasin VAROL

İkinci Danışman
Doç. Dr. Müjdat FIRAT

HAZİRAN 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Ozon Kullanımının Yanma Kontrolü ve Egzoz Emisyonları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Yazarı: Şafak Melih ŞENOCAK

İlk Teslim Tarihi: 24.05.2021

Savunma Tarihi: 25.06.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Yasin VAROL Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
İkinci Danışman:	Doç. Dr. Müjdat FIRAT Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Şehmus ALTUN Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Ozon Kullanımının Yanma Kontrolü ve Egzoz Emisyonları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

25.06.2021

Şafak Melih ŞENOCAK



ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, tek silindirden oluşan bir dizel motor RCCI konseptine uygun şekilde dönüştürülmüş ve ozon gazı kullanımının RCCI motor üzerindeki etkilerinin deneysel olarak çalışılması konu edilmiştir. Yapmış olduğum çalışmalar neticesinde elde ettiğim bilgilerin, içten yanmalı motorlarda ozon kullanımının yaygınlaşmasına ve bundan sonra yapılacak olan çalışmalara ışık tutmasını umut ederim.

Çalışmalarım boyunca geçen bu zorlu süreçte hep yanımda olup çok kıymetli bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, her zaman başarıya ulaşmam için bana destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Yasin VAROL'a, yaptığım çalışmalarda her zaman bana yol gösteren, engin bilgi ve yetenekleriyle karşıma çıkan tüm problemleri çözmemde yardımcı olan, desteklerini bir an olsun esirgemeyen ve bana katmış olduğu birikimlerle ufkumu genişleten ikinci danışman hocam Doç. Dr. Müjdat FIRAT'a, akademik eğitimim boyunca her zaman yardımlarına başvurduğum, bilgi ve birikimleriyle her zaman bana destek olup motivasyon kaynağı olan, yaptığım çalışmalarda zorlukların üstesinden gelmemi sağlayan değerli hocam Arş. Gör. Dr. Mutlu OKCU'ya, son olarak çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarından dolayı yakın arkadaşım Öğr. Gör. Okan ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca her koşulda yanımda olup karşılaşmış olduğum zorlukların üstesinden gelmemi sağlayan, başta öğrenim ve mesleki hayatım olmak üzere her zaman bana doğru yolu gösteren ve her konuda bana destek olup çalışmalarım da bana yardımcı olan değerli abim Öğr. Gör. Nihat ŞENOCAK ve bana her zaman destek olup bugünlere gelirken sahip olduğum değerleri bana kazandıran değerli anne ve babama teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı'nın 118M650 numaralı projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağladığı maddi destek ve makine-teçhizat desteğinden dolayı TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Şafak Melih ŞENOCAK
ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. İçten Yanmalı Motorlar	15
1.2. Dizel Motorlar	15
1.3. Dizel Motorlarda Yanma	18
1.4. Dizel Motorlarda Emisyon	19
1.4.1. Karbon Monoksit.....	20
1.4.2. Azot Oksitler	20
1.4.3. İs (Duman) Emisyonları	20
1.4.4. Toplam Hidrokarbon	21
1.5. İçten Yanmalı Motorlarda Düşük Sıcaklıklı Yanma	22
1.5.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşleme (HCCI)	23
1.5.2. Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşleme (PCCI)	25
1.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşleme (RCCI).....	26
1.6. Ozon Hakkında Bilgiler ve Ozonun Kimyasal Reaksiyonları	29
1.6.1. Ozon	30
1.6.2. Ozonun Fiziksel Özellikleri.....	30
1.6.3. Ozonun Kimyasal Özellikleri	31
1.6.4. Ozonun Elde Edilmesi.....	31
1.6.5. Ozonun Kullanım Alanları	32
2. MATERYAL VE METOT	33
2.1. Deneysel Materyal.....	33
2.1.1. Deneysel Kurulum ve Deney Setinin Tanıtılması	33
2.1.2. Yakıt Enjeksiyon Sisteminin Kurulumu ve Tanıtılması	36
2.1.3. Ozon Üretilmesi ve Kullanımı	38
2.1.4. Ölçüm Ara Yüzü ve Emisyonların Ölçümünde Kullanılan Cihazların Tanıtılması	39
2.1.5. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar.....	42
2.2. Deneysel Metot ve Çalışma Parametreleri.....	44
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4. SONUÇLAR.....	70
ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Ozon Kullanımının Yanma Kontrolü ve Egzoz Emisyonları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Şafak Melih ŞENOCAK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2021, Sayfa: xi + 78

Hazırlanan bu çalışmada amaç, dizel motorlardan yayılan emisyonların verdiği zararları en aza indirmektir. Yapılan çalışmalar incelenip, RCCI konseptinin uygun olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında ozon gazının RCCI motorlarda kullanımının etkileri deneysel olarak çalışılmıştır. Deneylerde tek silindirli dizel motor kullanılmıştır. Düşük reaktiviteli yakıtın kullanılması için, RCCI konseptine uygun bir şekilde, emme manifolduna port tipi yakıt enjektörü yerleştirilmiştir. Çalışmalarda HRF olarak dizel, LRF olarak izooktan kullanılmıştır. Çalışmanın konusu olan ozon gazı bir ozon jeneratörü tarafından üretilip, emme portu üzerinden silindire gönderilmiştir. Aynı zamanda ozon jeneratörü bir oksijen tüpü tarafından saf oksijen ile beslenmiştir. Deneylerde motor devri 2400 d/d sabit tutulup, motor yükü ise %20, %40 ve %60 oranlarında gerçekleştirilmiştir. Her yük için ozon miktarı 0, 100, 200 ve 300 ppm olarak çalışılmıştır. Verilen tüm parametrelerde %15, %30 ve %45 RCCI oranlarında çalışılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, tüm yüklerde RCCI'nin kullanılmadığı deneylerde ozon miktarının artmasıyla CO emisyonunun azaldığı, LRF ve ozonun birlikte kullanılmasıyla arttığı, ancak %60 yükte hem RCCI hem de ozon kullanılmasıyla CO miktarında azalma olduğu görülmüştür. Yine yapılan çalışmalarda LRF kullanımında HC emisyonunun arttığını ancak artan ozon oranları neticesinde HC emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir. NO emisyonunun orta ve yüksek yüklerde hem ozon hem LRF kullanımıyla arttığı fakat %20 yükte LRF kullanımının NO emisyonunu azalttığı belirlenmiştir. Son olarak LRF oranının artmasıyla tüm yüklerde is emisyonunda azalma görülmüş olup, ozonun gerek LRF gerek ise LRF kullanımı olmadan is emisyonunu azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir. Son olarak RCCI konsepti kullanılarak, belirgin şekilde silindir içinde düşük sıcaklıklı yanma sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: RCCI motorlar; Ozon; Düşük sıcaklıklı yanma; Kirletici emisyonlar

ABSTRACT

Investigation of the Effects of Ozone Usage on Combustion Control and Exhaust Emissions in Reactivity Controlled Compression Ignition Engines

Şafak Melih ŞENOCAK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

June 2021, Pages: xi + 78

The purpose of the study prepared is to minimize the damages caused by the emissions from diesel engines. Studies have been examined and it has been seen that the RCCI concept is appropriate.

In this thesis, the effects of using ozone gas in RCCI engines have been experimentally studied. A single cylinder diesel engine was used in the experiments. In order to use low reactivity fuel, a port type fuel injector is placed in the intake manifold in accordance with the RCCI concept. In the studies, diesel was used as HRF and isooctane as LRF. Ozone gas, the subject of the study, was produced by an ozone generator and sent to the cylinder through the suction port. At the same time, the ozone generator was fed with pure oxygen by an oxygen cylinder. In the experiments, the engine speed was kept constant at 2400 rpm and the engine load was realized at 20%, 40% and 60%. The amount of ozone for each load has been studied as 0, 100, 200 and 300 ppm. In all parameters, 15%, 30% and 45% RCCI ratios were studied.

When the results are examined, it is seen that in the experiments where RCCI is not used in all loads, the CO emission decreases with the increase of the ozone amount, increases with the use of LRF and ozone together, but there is a decrease in the amount of CO with the use of both RCCI and ozone at 60% load. Again, in studies conducted, it was observed that HC emission increased in LRF use, but HC emissions decreased as a result of increasing ozone rates. It was determined that NO emission increased with the use of both ozone and LRF at medium and high loads, but the use of LRF at 20% load reduced NO emission. Finally, with the increase of LRF ratio, a decrease in soot emission was observed in all loads, and it was determined that ozone was effective in reducing soot emission without the use of LRF or LRF. Finally, by using the RCCI concept, low temperature combustion was achieved in the cylinder.

Keywords: RCCI engine; Ozone; Low-temperature combustion, Pollutant emissions

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Dizel Yanma Konsepti Genel Görünümü	15
Şekil 1.2.	Dört zamanlı bir dizel motorun p-V çevrim diyagramı.....	16
Şekil 1.3.	Dört zamanlı dizel bir motorun çalışma prensibi.....	17
Şekil 1.4.	Dizel motora ait basınç-krank açısı değişimi diyagramı	19
Şekil 1.5.	Eşdeğerlilik oranına bağlı olarak dizel motorlarda oluşan emisyonlardaki eğilimler	20
Şekil 1.6.	Partikül ve is oluşumu.....	21
Şekil 1.7.	Düşük sıcaklık yanma konseptinin alt gruplar halinde gösterimi	22
Şekil 1.8.	Sıkıştırma ateşlemeli, buji ateşlemeli ve HCCI motorlarda yanma gelişimi.....	24
Şekil 1.9.	HCCI yanma konsepti görünümü	24
Şekil 1.10.	Yanma Haritaları	26
Şekil 1.11.	RCCI ve dizel motorların sıcaklık dağılımı açısından karşılaştırılması	27
Şekil 1.12.	RCCI yanma konsepti genel görünümü	28
Şekil 1.13.	Dizel ve RCCI yanma konseptinin görünümü	28
Şekil 1.14.	Ozonun moleküler geometrisi ve bağ yapıları	30
Şekil 1.15.	Korona Akım Metodu Şeması	31
Şekil 2.1.	Deney setinin genel görünümü	34
Şekil 2.2.	Deneylerde kullanılan motora ait görsel	35
Şekil 2.3.	Deney setinin şematik olarak görünümü.....	36
Şekil 2.4.	HRF yakıt enjektörüne ait görsel	37
Şekil 2.5.	Ortak basınç hattı ve basınç pompası.....	37
Şekil 2.6.	HRF ve LRF sisteminin kontrol ünitesine ait arayüz.....	38
Şekil 2.7.	Yanma sisteminin ara yüzüne ait görsel	39
Şekil 2.8.	Sensör ayarlarına ait görsel.....	40
Şekil 2.9.	Ölçüm ekranına ait görsel	40
Şekil 3.1.	Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	47
Şekil 3.2.	Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	48
Şekil 3.3.	Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	49
Şekil 3.4.	Tutuşma gecikmesinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	51
Şekil 3.5.	Yanma süresinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	51
Şekil 3.6.	OİB değerinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	53
Şekil 3.7.	BTE değerinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	54
Şekil 3.8.	Vuruntu yoğunluğunun %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	56
Şekil 3.9.	Vuruntu yoğunluğunun %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	56
Şekil 3.10.	Vuruntu yoğunluğunun %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	57
Şekil 3.11.	Maksimum basıncın değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	57

Şekil 3.12.	Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	59
Şekil 3.13.	Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	60
Şekil 3.14.	Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi	61
Şekil 3.15.	CO emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	62
Şekil 3.16.	CO ₂ emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	64
Şekil 3.17.	HC emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	65
Şekil 3.18.	NO emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	67
Şekil 3.19.	Duman opaklığının değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi.....	68



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Otomobiller için Euro emisyon standartları.....	1
Tablo 1.2. LTC konseptleri	29
Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan motora ait teknik özellikler	35
Tablo 2.2. Saf haldeki ozonun özellikleri	39
Tablo 2.3. Egzoz emisyon cihazına ait teknik özellikler.....	41
Tablo 2.4. İis ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	42
Tablo 2.5. Egzoz emisyon için hata sınırlamaları	42
Tablo 2.6. Dizel yakıtıa ait özellikler	43
Tablo 2.7. İzooktana ait özellikle	43
Tablo 2.8. Deneyisel parametreler	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
C ₇ H ₁₆	: Heptan
C ₈ H ₁₈	: İzooktan
C ₁₀ H ₂₂	: Dekan
HC	: Hidrokarbon
H ₂ O	: Su
NO _x	: Azot oksitler
N ₂	: Nitrojen
O ₂	: Oksijen
O ₃	: Ozon

Kısaltmalar

AÖN	: Alt Ölü Nokta
CA	: Krank Açısı
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CLD	: Kemilüminesans Dedektörü
CNG	: Sıkıştırılmış Doğal Gaz
DISI	: Direkt Enjeksiyonlu Buji Ateşlemeli
EGR	: Egzoz Gazı Devridaimi
FID	: Alev İyonizasyon Dedektörü
IMEP	: İndike Ortalama Efektif Basınç
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HCCI	: Homojen Karışimli Sıkıştırma Ateşlemeli
HRF	: Yüksek Reaktiviteli Yakıt
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LRF	: Düşük Reaktiviteli Yakıt
LTC	: Düşük Sıcaklıklı Yanma
NDIR	: Dağıtıcı Olmayan Kızılötesi
NHE	: Normal Hidrojen Elektrot
OEB	: Ortalama Efektif Basınç
OİB	: Ortalama İndike Basınç
PCCI	: Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli
PM	: Partikül Madde
PPM	: Milyonda Parça
RCCI	: Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
TDAC	: Dinamik Uyarlanabilir Kimya Tablosu
TDC	: Üst Ölü Nokta
UV	: Ultraviyole
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
ÜÖNS	: Üst Ölü Noktadan Sonra
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Noktadan Önce

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar insanların artan üretim ve ulaşım ihtiyaçları neticesinde makinelere olan bağımlılığı giderek artmıştır. İnsanlık tarihinin gelişim süreci içerisinde; insanların bu tür ihtiyaçlarından dolayı, birçok endüstriyel motor ve ulaşım aracı geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı motorlu kara taşıtlarıdır. Motorlu kara taşıtlarında ise genel anlamda yaygın olarak kullanılan güç üretim sistemlerinden biri sıkıştırma ateşlemeli içten yanmalı motorlardır (Ebrahimi ve Jazeyeri, 2019). Sıkıştırma ateşlemeli içten yanmalı motorların geleneksel yakıtı motorindir, motorin ise petrol esaslı bir yakıttır. Sıkıştırma ateşlemeli içten yanmalı motorların yaygın kullanımı ik"i önemli dezavantajı meydana getirmiştir. Bunlar; kısıtlı rezerv ömrüne sahip olan petrolün giderek azalması ve içten yanmalı motorların, yanma sonucu ortaya çıkardığı egzoz emisyonu ve diğer partikül emisyonlar ile çevre kirliliğine neden olmasıdır. Tablo 1.1’de yıllara göre, bu emisyonlara ait belli standartlar verilmiştir.

Tablo 1.1. Otomobiller için Euro emisyon standartları (URL- 1).

Standart	Tarih	CO (g/km)	NO _x (g/km)	HC+NO _x (g/km)	PM (g/km)
Dizel					
Euro 1+	1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
Euro 2	1996	1	-	0.7	0.08
Euro 3	2000	0.66	0.50	0.56	0.05
Euro 4	2005	0.50	0.25	0.30	0.025
Euro 5a	2009	0.50	0.180	0.230	0.005
Euro 5b	2011	0.50	0.180	0.230	0.005
Euro 6	2014	0.50	0.80	0.170	0.005
Benzin					
Euro 1+	1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-
Euro 2	1996	2.2	-	0.5	-
Euro 3	2000	2.3	0.15	-	-
Euro 4	2005	1.0	0.08	-	-
Euro 5	2009	1.0	0.060	-	0.005
Euro 6	2014	1.0	0.060	-	0.005

Tablo 1.1 incelendiğinde 2014 yılında yürürlüğe giren Euro 6 standartları ile birlikte dizel motorlardan çevreye yayılan zararlı emisyonlar ile ilgili kısıtlamalar önemli derecede arttırılmıştır. Sıkıştırma ateşlemeli motorların yanma sonunda ortaya çıkarmış olduğu; CO, CO₂, HC, NO, ve is emisyonlarının, doğaya verdiği tüm bu negatif etkileri asgari düzeye indirmek veya yok etmek için alternatif yakıt arayışlarının ve çalışmaların sürdüğü bilinmektedir (Ebrahimi ve Jazeyeri, 2019). İçten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlara; LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı), CNG (sıkıştırılmış doğalgaz), LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) ve benzin ile birlikte yakılmak suretiyle hidrojen ve bazı alkol türevleri örnek olarak belirtilebilir (Thring, 1983). Yine içten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar konusunda; sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), hidrojen ve bazı alkol türevlerinin kullanılması ve geliştirilmesi için araştırmaların devam ettiği bilinmektedir (Bo vd. 2006; Rakopoulos, 2006).

Yanma sonu egzoz emisyonları bakımından, geleneksel petrol esaslı yakıtlara göre daha temiz olan alternatif yakıtların kullanımının yaygınlaşması istenilmektedir. Bunun nedeni; kısıtlı rezerv ömrüne sahip olan petrol esaslı yakıt temini sıkıntısını azaltmak, yanma verimini yükseltmek ve egzoz emisyonu değerlerinin olumlu yönde değişimine olanak sağlamaktır. Motorlarda daha iyi bir yanma sağlanması ve düşük emisyon elde etmek için alternatif enerji kaynakları kadar, yanma stratejileri ve motorların çalışma prensipleri de önem arz etmektedir. Bunun sonucu olarak içten yanmalı motorları geliştirmek ve çalışma şekilleri konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar son zamanlarda yönünü özellikle düşük sıcaklıklı yanma stratejisine çevirmiştir.

İçten yanmalı motorlarda düşük sıcaklıklı yanma stratejileri arasında yaygın olarak bilinenler üç başlık altında sıralanabilir. Bunlar; Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli (HCCI), Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli (PCCI) ve Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşlemeli (RCCI) olarak verilebilir. İçten yanmalı motorlarda düşük sıcaklıklı yanma stratejileri ile ilgili gerek deneysel gerek ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesi kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Bilindiği üzere motora giren yakıtın tutuşması için bir miktar havaya ihtiyaç vardır. Dolayısıyla hava içerisindeki gazları kontrol ederek daha iyi bir yanma ve sonucunda daha düşük emisyon sağlamak mümkündür, bu da son yıllarda gözleri ozon gazına çevirmiştir ve ozon gazının içten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu literatür çalışmalarından bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Suozhu vd. (2020), yaptıkları çalışmada RCCI uygulanmış bir dizel motorda izobutanol/dizel ve benzinli/dizel yakıt çiftlerini düşük yükler altında çalışmış ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre izobutanol/dizel RCCI'nin, benzinli/dizel RCCI'den daha iyi bir güç geri kazanım kabiliyetine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. İzobutanol/dizel, önceden karıştırılmış oran olarak %50-60 gönderildiğinde IMEP (indike ortalama efektif basınç) değeri yaklaşık %1-4 daha yüksek olarak gözlenmiştir. Ayrıca, oranlardaki artışla birlikte, CO, NO_x ve

PM (partikül madde) emisyonları azalmış olup, HC ise hem benzin/dizel hem de izobütanol/dizel yakıtlarının kullanımında artış göstermiştir. Benzinle karşılaştırıldığında, izobütanol daha düşük CO, HC, NO_x ve PM emisyonları ortaya koymuştur.

Ghazikhani vd. (2009), yaptığı çalışmada çift yakıt sistemine sahip bir HCCI-DI motorunda EGR (egzoz gazı devridaimi) kullanılmasının HC ve CO emisyonlarının değişimleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmalar tek silindirden oluşan, 17.5 sıkıştırma oranıyla çalışan bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Yakıt olarak benzin ve önceden birbiriyle karıştırılmış vaziyette içeri giren hava-yakıt oranını ayarlamak amacıyla bir ayar vidasıyla, emme manifolduna bağlı olan bir karbüratör ile uygulanıp, motorin ise 250 bar basınç altında enjektör kullanılarak direkt olarak yanma odasına gönderilmiştir. Karışım yaklaşık olarak 110-115 °C sıcaklıklarda homojen bir hal almıştır. Sonuç olarak artan motor hızı ile birlikte HC ve CO emisyonlarının arttığını, EGR’de meydana gelen artışın oksijen miktarındaki azalmaya neden olarak eksik bir yanmanın oluşmasına yol açtığı ve bu nedenden ötürü yanma sıcaklığındaki düşüşün sebebiyle CO ve HC gazlarında artış olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kokjohn (2011), yapmış olduğu çalışmada, bir dizel motora RCCI uygulaması yaparak bunun üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Bu deneyleri belirli yük koşullarında yaparak dizel motor sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalardan çıkarılan sonuçlarda; RCCI uygulanmış olan motorun verim, basınç artış hızı ve vuruntu şiddeti gibi parametrelerin daha makul seviyelerde olduğunu, egzoz gazı emisyonları açısından ise is ve NO_x emisyonlarının büyük ölçüde düştüğü ortaya koyulmuştur.

Zhou vd. (2015) çalışmalarında, yakıt olarak metanol ve biyodizel yakılarak silindir içi reaksiyonları, performans ve egzoz gazları bakımından özelliklerini bir simülasyon yoluyla oluşturulmuş RCCI motor üzerinde incelemiştir. Simülasyon oluşturulurken; metanol miktarı %20 ile %80 değerlerinde gönderilmiş, %10 yük şartlarında metanol miktarının yükseltilmesi sonuç olarak maksimum basınç ve ısı salınım hızında azalmayı meydana getirmiştir. CO gazlarında düşük yüklerde artış meydana geldiği gözlemlense de yük şartları arttırıldıkça önemli ölçüde düşüş görülmüştür, bunların yanında is emisyonunu azaltmak için RCCI’nin iyi bir yöntem olabileceğini vurgulamışlardır.

Paykani vd. (2015); yapmış oldukları çalışmalarda, yakıt olarak doğalgaz/dizel kullanılarak ve bazı modifikasyonlardan geçirilmiş büyük hacimli bir RCCI motor üzerinde, yanma üzerindeki etkilerini, motor performansına olan sonuçlarını ve yanma sonucunda oluşan egzoz emisyonlarının değişimi üzerindeki sonuçlarını incelemiştir. Reaksiyona girme kolaylığı açısından daha düşük seviyede olan doğalgaz motora emme girişi üzerinden gönderilirken, reaksiyona girme açısından daha yüksek olan dizel yakıt ise direkt olarak ikili enjeksiyon yöntemi kullanarak motor içerisine göndermişlerdir. Önceden karıştırılmış doğal gaz miktarı, birinci ve ikinci enjeksiyon zamanlamaları ve iki enjeksiyon arasında bölünmüş olarak enjekte edilen dizel

kütlesi dahil olmak üzere çeşitli parametreler çalışılmıştır. Sonuçlar, No_x ve is emisyonlarının miktarlarında azalma olduğunu ve motor verimi konusunda artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Fakat bunun yanında CO ve HC emisyonlarında kötüleşme olduğu belirtilmiştir.

Benajes vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada, sıkıştırma oranı 17.5:1 ve EURO 6 standartlarını karşılayan bir dizel motorun tüm çalışma aralıklarını içine alacak şekilde çift modlu bir RCCI dizel motorunun çalışma koşullarını ve yeteneklerini araştırmışlardır. Bu çalışma temel olarak RCCI ile standart bir dizel yanma şekilleri arasındaki tüm motor haritasını kapsamaya dayanmaktadır. Deneylerde kullanılmış olan motor, birden fazla silindire sahip bir motordan elde edilen tek silindire sahip bir motordur. Kullanılan yakıtlar ise; düşük reaktiviteli yakıt olarak hacimce %20 etanol ve %80 oktan karışımı olup, yüksek reaktiviteli yakıt olarak %7 biyodizel içeren bir dizel kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli yanmanın optimum veriminin %25 ile %35 yük arasında elde edildiğini göstermiştir. Bu yüklerde ise geleneksel dizel yanmasına göre yaklaşık %2 verim elde edilmiş olup daha düşük motor devirlerinde ise verim düşüşüne neden olmuştur.

Işık vd. (2016), yaptıkları çalışmalarda, RCCI uygulanmış olan dizel motorda, deneysel olarak; HRF (yüksek reaktiviteli yakıt) olarak aspir yağından üretilen biyodizel ve motorinden oluşan karışımların LRF (düşük reaktiviteli yakıt) yakıtlarla birlikte motora gönderilmesi sonucunda yapmış oldukları etkileri incelemişlerdir. LRF olarak %30 ve %60 oranlarında etanol ve benzin gönderilmiştir. Değişken şartlar altında motordaki egzoz gaz değerleri ve performans eğrileri incelenmiştir. Kullanılan etanol ve benzinin motora gönderilmesiyle birlikte performans ve yanma anlamında iyileşmeler görülmüştür. Tüm şartlar altında yakıt tüketiminde artış gözlenmiştir. Emisyon değerleri olarak ise NO_x büyük ölçüde düşüş göstermiş, HC ve CO gazlarında bir miktar artışların olduğu ortaya koyulmuştur.

Ma vd. (2013), yaptıkları çalışmalarda, dizel enjeksiyon stratejilerinin yanma, emisyonlar, yakıt ekonomisi üzerindeki etkilerini bazı modifikasyonlardan geçirilmiş tek silindire sahip dizel bir motorda, dizel/benzin çift yakıt kullanarak, verim olarak yüksek ve emisyon değerleri bakımından düşük olan çalışma koşullarını elde etmeye çalışmışlardır. Bu çift yakıtlı yanma modu temel olarak, benzinin port yakıt enjeksiyonunu ve hızlı silindir içi yakıt harmanlamasıyla ve dizel yakıtın doğrudan enjeksiyonuyla gerçekleşmiştir. Yapılmış olan deneylerde, 1500 d/d ve 50 mg/devir toplam eşdeğer dizel yakıt doldurma hızında tek ve çift enjeksiyon stratejileri kullanılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlarda ise bu yanma modunun, yüksek benzin oranı ve erken bir enjeksiyon zamanlamasını kullanarak NO_x ve kurum emisyonlarında düşüş ile yüksek verimde artış kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Benajes vd. (2014), yapmış oldukları çalışmada düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtlar olarak sırasıyla benzin ve dizel kullanarak, RCCI yanma koşullarında yakıtları karıştırma ve kendiliğinden tutuşma süreçlerini saptamak için hem deneysel hem de sayısal olarak

incelemişlerdir. Silindir içi yakıt harmanlama oranını değiştirebilmek için bir direk enjektör ve bir adet port yakıt enjektörü ile donatılmış, sıkıştırma ateşlemeli bir motor kullanarak üç parametrik çalışma geliştirmişlerdir. Yanma dizel enjeksiyonunun kendiliğinden tutuşmasıyla başlayıp, sonradan eklenen hava ve benzin karışımıyla devam ettirilmiştir. RCCI yanması, geleneksel saf dizel yanması ile karşılaştırıldığında, NO_x bakımından düşük miktarda bir azalma görülmüş olup is miktarında ise önemli bir miktarda düşüş olduğu belirlenmiştir.

Jeon ve diğerleri (2016), yapmış oldukları çalışmada, gözlenebilir tek silindire sahip bir dizel motorda, önceden karıştırılmış benzin ve dizel yakıtlarının yanması, farklı enjeksiyon zamanı ve farklı basınç şartlarında incelenmiştir. Saf dizel yakıt, ayrıca %20 ve %40 benzin kütle oranlarına sahip benzin ve dizel karışımları test edilmiştir. Karma yakıtlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, benzinin dahil edilmesinin yakıt/hava karışımını iyileştirip, daha büyük silindir alanlarında daha homojen karışımlar ortaya çıkardığını belirlemiştir. Benzinin sahip olduğu düşük setan indeksinin, karışık yakıtlarda uzun süren ateşleme gecikmelerine neden olduğu görülmüştür. Isı yoğunluğu, motor üzerinden yakalanan alevin rengi ve görüntülerinden yola çıkarak hesaplanmış olup kullanılan yakıtın türüne ve farklı enjeksiyon koşullarına göre oluşan değişimleri incelemişlerdir.

Can vd. (2012), yapmış oldukları çalışmalarda, kısmi ön karışimli yakıt dolgusunun, direkt enjeksiyonlu ve tek silindire sahip bir dizel motorda egzoz ve yanma üzerindeki sonuçlarını araştırmışlardır. Yakıt düşük basınçlı olarak bir enjeksiyon sistemi yardımıyla içeriye püskürtülmüştür. Burada ön karışimli yakıt olarak; uygunluğu göz önünde bulundurularak etanol kullanılmıştır. Yakıt karışımı homojen bir şekilde emme zamanı boyunca verilmekte ve ÜÖN'dan önce tutuşturulmaktadır. Bu yanma şekli HCCI-DI olarak tanımlanabilir. Deneyler; farklı giriş sıcaklıkları, farklı yakıt oranlarında, farklı EGR oranları, farklı motor hızı ve farklı yüklerde yapılmıştır. Bunlardan kısaca bahsetmek gerekirse; sıcaklık olarak 20 ile 40 °C, EGR %0 ile %30 oranlarında, 2200 d/d motor hızlarında ve 4, 8, 12, 16 Nm olmak üzere dört farklı yükte gerçekleştirilmiştir. Testlerden yola çıkarak ön karışimli yakıt oranının %90'a kadar çıkabildiği gözlenmiştir. Bunun sonucunda; tutuşma gecikmesi meydana gelmiş ve ısı yayılım oranı gitgide artmıştır. Bunun beraberinde, silindir basıncı da artış gösterip vuruntu eğiliminin artmasına yol açmıştır. Isı yayılım oranı, EGR ilavesi ile kontrol altına alınmıştır. Kısmi olarak verilen yüklerde is ve No_x emisyonlarında yükselme meydana gelmiştir. Tam yük dolaylarına çıkıldığında NO_x'te meydana gelen artışın devam ettiği gözlenmiştir. Bunun sonucunda; ön karışimli yakıtın, EGR ile beraber uygulanması neticesinde bu artış yönelimi engellenmiştir. Bunların sonucunda; ön karışimli yakıt miktarının arttırılması ile beraber tam yükteyken NO_x gazlarındaki artmanın devam ettiği belirtilmiştir. Sonuç olarak ön karışimli yakıt miktarı ve EGR miktarındaki artışla beraber HC ve CO gazlarında yükselme gözlenirken, dolgunun ön ısıtılması sonucunda düşüş ortaya çıkmıştır.

Wang vd. (2016), yaptıkları çalışmada giriş basıncı, egzoz gazı devridaim oranı, benzin oranı, dizel enjeksiyon zamanlaması gibi parametreleri önceden belirlenmiş olan farklı motor yüklerinde, yanma performansı ve emisyon değerleri üzerindeki sonuçlarının saptanıp incelenmesine odaklanan bir deneysel çalışmada bulunmuşlardır. Bu çalışmada; RCCI modifikasyonu geçirmiş bir dizel motor kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, NO_x ve kurum emisyonlarında önemli bir düşüşün meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun yanında, benzin/dizel çift yakıtlı RCCI yanmasında orta ve yüksek yüklerde yüksek ısı verimliliğinin elde edilebileceği görülmüştür.

İlhan (2007), yapmış olduğu çalışmalarda tek silindire sahip, dört zamanlı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda belli oranlarda dizel ve metanol yakıt çiftlerini kullanarak motor performansını ve egzoz emisyonlarını, enjeksiyon avansı üzerinden gözlemlemiştir. Çalışmalar 2200 d/d sabit ve farklı yüklerde 5, 10, 15, 20 Nm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Metanol miktarının, motor yükünün ve avans gibi parametrelerin artırılmasıyla birlikte; HC ve CO emisyonlarında azalma ve diğer taraftan NO_x emisyonunda azalma görülüp, sadece avansın azaltılması ile birlikte HC ve CO emisyonlarında artış olup, NO_x emisyonunda bir miktar azalma olduğu görülmüştür.

Salahi ve Gharehghani, (2019), yapmış oldukları çalışmada; kimyasal reaktivitesi çok yüksek olan ozon gazının PCCI yanma sisteminde yanma sürecinin iyileştirilmesinin motor üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada; birleştirilmiş kimyasal ve kinetik mekanizmalara sahip olan çok boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılmıştır. Düşük miktarda, yani 10 ppm (milyonda parça) ozonun bile motor performansı ve emisyonları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar; ozon ilavesinin motoru yağ oranı çok düşük ya da tamamen yağsız yakıt karışımlarıyla çalıştırma konusunda bile imkan sağladığını ortaya koymuştur. Sayısal sonuçlar, aşağıdaki verilere göre doğrulanmıştır. Bu veriler, PCCI modunda çalıştırılan tek silindirli Ricardo motorunu farklı giriş sıcaklığı ve ozon konsantrasyonu ile çalışma koşullarıyla açıklanabilir. Tüm deneyler için motor devri 800 rpm (dakikadaki devir sayısı), emme basıncı 2.7 bar ve 3 bar olarak belirlenmiş ve yakıt eşdeğerlik oranı 0.3 ve 0.25 sabit değerine ayarlanmış olup, deneyler 0 ile 1000 ppm ozon konsantrasyonları için yapılmıştır. Ozon ilavesinin yanma sürecine ve performansa etkilerini incelemek için, dört farklı ozon konsantrasyonu seçilmiştir. Bu konsantrasyonlar; ilavesiz 0 ppm, düşük konsantrasyon (10 ppm), orta konsantrasyon (100 ppm) ve yüksek miktarlarda (500 ve 1000 ppm) yapılmıştır. PCCI motorunda ozon ilavesinin yanma üzerine etkilerini araştırmak amacıyla, silindir içi için beş farklı sıcaklık değeri dikkate alınmıştır. Bunlar, 450 K temel sıcaklık ve aşamalı olarak düşen 430 K, 410 K, 390 K ve 370 K olarak belirlenmiş olup basınç ve eşdeğerlik oranı sırasıyla; 2,7 bar ve 0,3 olmuştur. Sonuç olarak ise; ozon ilavesi hem düşük sıcaklıkta hem de yüksek sıcaklıkta CH_2O ve OH oluşumunu hızlandırmıştır. Daha fazla miktarda ozon eklenmesi PCCI yanmasının daha

erken başlamasına yol açmış ve sonuç olarak, daha fazla yanma verimliliği sağlamıştır. 1000 ppm ozon ilavesinin, 80 K'ye kadar PCCI yanması için gerekli başlangıç sıcaklığının düşürülmesini mümkün kılmıştır. Ozon ilavesi ile gerekli başlangıç sıcaklığını düşürerek sonuçta NO emisyonunun azalması sağlanmış ve yanma aşamasını optimize ederek termal verimliliğin artması da mümkün kılınmıştır. Ozon ilavesinin daha eksiksiz bir yanmayı başlatarak, CO ve HC emisyonlarını azaltırken, NO emisyon seviyesini arttırdığı gözlenmiştir.

Alam ve ark. (2018), yapılan çalışmada bireysel olarak ve dışarıya izole edilmiş halde bulunan milimetreden küçük boyutlardaki n-heptan ($n-C_7H_{16}$) ve n-dekan ($n-C_{10}H_{22}$) damlacıklarının motorda soğuk alevle yakılması, atmosfer şartlarında hava emişine sahip ve daha yüksek çalışma basıncı (25atm) koşullarında, çevredeki değişen ozon oranları için hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan yanma modeli, yakıt türleri ve eklenen ozon reaksiyon altkütlesi için, ayrıntılı kimyasal modellerin indirgenmiş versiyonlarını kullanan bir sfero-simetrik, tek boyutlu, damlacık şeklinde model kullanılmıştır. Kapsamlı hesaplamalar ve yapılan çalışma, soğuk alevdeki yanma modu rejiminin ve soğuk alevden sıcak alevlere doğru geçişin; O_3 yüküne, basınca, ateşleme kaynağının gücü ve yakıt buharı basıncının ortam koşullarındaki etkisine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Hem yakıtlar hem de ortamdaki çeşitli O_3 konsantrasyonları için, milimetreden küçük boyutlardaki damlacıklar için bile sürekli soğuk alev şeklinde yanma üretebilmişlerdir. Bazı O_3 konsantrasyonları aralığında; çalışma basıncı ve damla çapı, sıcak alev geçişi yapmadan kendi kendine devam eden, sürekli bir soğuk alev yanması üretebilmişlerdir. Yeterince yüksek O_3 karışımlarında ise, yanmanın başlamasını daima sıcak alev geçişinin takip ettiği görülmüştür. Sonuç olarak, soğuk alev veya sıcak alev geçişi oluşturmak için ilk geçen süre, yüksek parlama noktasına sahip yakıtlar için önemli ölçüde daha uzun olmuştur. Aynı zamanda ortam sıcaklığına göre düşük ve yüksek parlama noktası yakıt damlacıklarını tutuşturmak için gereken başlatma enerjisi, düşük parlama noktası durumunda bulunan kısmen önceden karıştırılmış yanıcı buharın yanması sonucu farklılık göstermiştir. Düşük parlama noktasına sahip olan yakıtların, ozon kullanılmadan yanmasını başlatmak için gereken yakıt/buhar sıcaklığı damlacıkların buharlaşma hızını ve süresini etkilemiş olup sıcak alev koşullarına geçişini önlemeyi zorlaştırmıştır. Yüksek parlama noktasına sahip yakıtlarının ise ozon olmadan, başlatma alevi, sıcak alev koşullarına maruz kalmadan soğuk alev yanma oranına ve süresine göre kontrol edilebilmiştir. Ozonun eklenmesi, yanıcı hava/gaz karışımlarının gaz fazındaki reaksiyonlarını başlatmak için sıcaklığı azaltma ve dolayısıyla gerekli başlatma enerjisini kabiliyeti sunmuştur. Bunun sonucunda da ozon eklenme miktarı reaksiyon başlangıcında ve sonrasında ortaya çıkan enerji salınım oranını da doğrudan etkilediği gözlenmiştir.

Schönborn vd. (2010), bu çalışmada homojen şarjlı sıkıştırmaya sahip bir motorda tutuşma süresini ve zamanlamasını kontrol etme yöntemini incelemişlerdir. Yapılan deneylerdeki sonuçlar, ateşleme zamanlamasının kontrolleri, HCCI yanması, yakıt moleküler yapısının

kimyasal bir reaksiyon kullanılarak değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Yakıtın yanma odasına gönderilmesinden önce, ozon eklenmiş olan yakıtın; ateşlemeyi kontrol etme, yüksek termal verimlilik ve daha düşük emisyon elde etmek için HCCI motor çalışmasında zamanlama esas parametre alınmıştır. Bu amaçla ateşlemede; pistonun üst ölü noktası (TDC) yakınında, maksimum noktadaki yakıt/hava yükünün sıkıştırılması istenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda, zamanın kontrol edilmesi için de bir yöntem ortaya koymuştur. Bu yöntemde; yakıtın tutuşabilirliğini, önceden kimyasal reaksiyonu ile uyarlayarak, yakıt ile ozonun yakıt/hava yükünün ateşlenmesi kontrol edilmiştir. Ozon, hava kullanılarak kolayca üretilir ozonizör olup enjeksiyondan önce bir reaksiyon odasında yakıtla temas ettirilebilir. Deneyler ile uyarlanan bir asetal yakıtın, HCCI yanmasındaki motor çevrimi sırasında geçirilmemiş yakıtla göre daha erken tutuştuğu görülmüştür, bu da yanmadan önce moleküler yapıdaki değişikliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Gözlemlenen moleküler yapıdaki değişikliklerden kaynaklı esas olarak yakıt içinde peroksitlerin oluşumundan meydana geldiği belirlenmiştir. Bu bir nokta üzerindeki kontrol ile HCCI yanma modunda bir motoru çalıştırma konusunda yöntem olarak kullanılabilir. Deneyler ateşleme süresinin kontrol edilebilirken, motorun yükü, hızı, basıncı ve sıcaklığı gibi diğer parametrelerde değişken rol oynayabildiğini ortaya koymuştur. Yakıtın, kimyasal ve ozon içeren hava ile oksidasyonundan önce ve sonraki yapısal analizleri, bu reaksiyon sırasında, asetal yakıtın bir peroksit dönüştürülmesi sağlanmıştır. Peroksit daha düşük sıcaklıklarda yakıtın kendiliğinden tutuşmasını sağlamaya yardımcı olmuştur. Ölçüme dayanan bir geri bildirim kontrol sistemi içindeki bir basınç sensörü yardımıyla, ateşleme zamanlamasının yanma odası oksidasyon derecesini yönetmek için kullanılmıştır.

Contino vd. (2014), HCCI motorlarının daha iyi verimlilik ve daha düşük emisyon gibi birçok avantajı olmasına rağmen, bu motorların kontrolünün hala karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, ozon gibi oksitleyici türlerin kullanıldığı döngü kontrolü bu anlamda iyi bir avantaj sunduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada Dinamik Uyarlanabilir Kimya Tablosu (TDAC) yöntemi ve 1000'den fazla kimyasal tür içeren bir mekanizma ile CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyonlarını kullanarak, ozon eklenmesinin bir HCCI motorunda izooktan yanması üzerindeki etkileri düşünülmüş ve incelenmiştir. Eşdeğerlik oranı, giriş basıncı ve motor devri sırasıyla 0.3, 1.0 bar ve 1500 rpm'de sabit tutulmuştur. Yapılan çalışma 20.000 hücreye sahip mesh kullanarak oluşturulmuştur. 1000 tür üzerinde inceleme yapılmıştır. Yanma odası içinde yanma kinetiği hakkında bilgiler alınmıştır. Yapılan çalışmada çok çeşitli ozon konsantrasyonu ve başlangıç sıcaklığı ile CFD simülasyonlarının validasyonu sunulmuştur. TDAC yöntemi, gerçek bir geometride ısı transferi ve kimyasal reaksiyonları açıklayan bu tür karmaşık kimyasal olayları doğru bir şekilde üretebildiğini gösteren bir sistemdir. Bu çalışma ozon eklenmesinin izooktanın kendiliğinden tutuşması üzerindeki önemli etkilerini göstermektedir. Ve tüm bunlar üzerinde ayrıntılı analiz de yapılmıştır.

Zhang vd. (2016), ozonun eklenmesinin yakıtın tutuşabilirlik sınırını ve sınıra yakın yanması üzerindeki etkisini, N_2 , CO_2 ve H_2O seyreltmeleri ile $(H_2/CO)/O_2$ alevleri sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada sistematik 1-B planya laminar premiks, alevlerin premiks kullanılarak limitlere yakın koşullar altında simülasyonları kimyasal kinetik ve moleküler taşınımın detaylı tanımını göz önünde bulundurarak kodlamalar oluşturulmuş ve tek ısı kaybı mekanizması olarak radyasyonun olduğu gözlemlenmiştir. Tutuşabilirlik sınırları ayrı ayrı çözülerek belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki O_3 'ün varlığı, O_3 alt yanıcılık sınırını azalttığından sentetik gazların yanıcılık sınırını genişletmiştir ve üst yanıcılık sınırını artırmıştır. Artan O_3 ile $H_2/CO/O_2$ alevleri sürdürülebilir daha yüksek N_2 , CO_2 ve H_2O seyreltme oranlarında, laminar alev hızı ayrıca O_3 ve O_3 'ün laminar alev hızı üzerindeki artırıcı etkisi alt limit altında çok daha düşük, yakın stokiometrik şartlara göre de 4-11 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıntılı, yakın sınır alev yapısı ve kinetik çalışmalar O_3 'ün nispeten düşük sıcaklıklarda tüketildiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar O_3 ilavesinin yanıcılık sınırını genişlettiğini, alev hızını ve laminar alevi artırdığını ortaya koymuştur. O_3 ilavesinin laminar alev hızı üzerindeki etkisinin sınıra yakın koşullar altında çok daha etkili olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışmalar limit seviyelerinde eklenen ozon ilavesinin %90'ının tüketildiğini ortaya koymuştur.

Masurier vd. (2015^a), bu araştırma, bir HCCI motorunun ozon eklenmesi ile çalışması üzerindeki etkilerini incelemektedir. Ozon yakıtının yanmasında en oksitleyici kimyasal türleri: metanol, etanol ve n-butanol olarak sıralamışlardır. Araştırmadaki motor deneyleri sabit hacim hesaplamaları yoluyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ozon konsantrasyonunun bir yanma avansı ile artırılmasının yanma birleşiminde bir iyileşmeye yol açtığını göstermiştir. Seçilen her yakıt için sonuçları karşılaştıracak olunursa, n-butanolün en az ozondan ve en az metanolden etkilenmesidir. Diğer analizler ve deneysel sonuçlar, alkol kökenli yakıtların yanmasının ozon ile kontrol edilebildiğini göstermiştir. Son olarak, hesaplama sonuçları gözlemlenen deney sonuçlarını doğrulamıştır. Bu çalışma ozonun yanma üzerindeki etkisine de odaklanmıştır. Alkol yakıtı olarak metanol, etanol ve n-butanol kullanılmıştır. Çalışma tek bir deney kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sabit bir devirde çalışan tek silindirli HCCI motoru ve 1500 rpm ve 0.3 sabit eşdeğerlik oranında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucuna genel olarak, ozonun HCCI yanma sürecini iyileştirdiği ve konsantrasyonunun artırıldığı takdirde yanma aşamasının ilerlemesiyle sonuçlanmıştır. Bu nedenle böyle bir motorun yanmasının kontrolünü sağlamak mümkün kılınmıştır. Yine yapılan deney sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar, yakıtın kendi kendine tutuşması konusunda n-bütanolün en iyi olduğunu göstermiştir. Bunu sırasıyla metanol ve son olarak etanol takip etmiştir. Bu değişimler yakıtların oktan sayısı ile doğrudan alakalıdır. Yine çalışma boyunca emme sıcaklığını artırarak, yakıt hassasiyetlerinden dolayı yanma aşaması gözlenmiştir. Ayrıca 100 ppm'den düşük konsantrasyonlar için referans yakıtlar üzerindeki nitrik oksit etkisini araştırılmış ve hem soğuk hem de sıcak alevler üzerinde tetikleyici bir etki

gözlemlenmiştir. Daha yüksek konsantrasyonlar için, sıcak alev sabitken soğuk alev fazının azaldığı görülmüştür. Tüm deneyler 0 ppm'den yaklaşık 130 ppm'e kadar ozon oranlarında yapılmıştır. Araştırılan üç yakıtın yakınsaması nedeniyle koşullar: 1 bar giriş basıncı ve giriş 443 K sıcaklıkta yapılmıştır. Sonuçlar yanmanın her alkol yakıtı için ozon eklenmesi ile geliştirilmiş olup ve enjekte edilen ozonun arttırılması, yanma aşamasını değiştirmiştir. En yüksek ozon etkisi n-bütanol için gözlenirken, en düşük etki metanol için gözlenmiştir.

Starik vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada, yanmanın iyileştirilmesi ve NO ile CO emisyonlarını azaltmanın olasılığının kapsamlı analizi üzerinde çalışan HCCI motor için hava/gaz karışımı alımında, sentetik gaz/hava gibi yüksek derecede reaktif türlerin etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada eklenme O_2 ($a^1 \Delta g$) veya O_3 molekülleri gerçekleştirilmiştir. Bunların detaylı kullanımı ile hesaplamalar yükteki O_2 ($a^1 \Delta g$) veya O_3 moleküllerinin arttırılması ateşlemeyi hızlandırmış ve kütleye özgü enerjiyi biraz artırmayı mümkün kılmıştır. Deneyler ozon enjeksiyonunun yanmayı iyileştirebileceğini doğrulamıştır. HCCI yanması sırasında salınan NO ve CO emisyonlarını hem nominal hem de düşük yük rejimlerinde azaltmıştır. SDO ilavesinin etkisinin karşılaştırmalı analizi veya ozonun enerjik ve emisyon özellikleri üzerinde ozon sentetik gaz/hava karışımı üzerinde çalışan HCCI motoru gerçekleştirilmiştir. SDO veya O_3 moleküllerinin arttırılması yükte esas olarak ateşlemeyi hızlandırmıştır.

Gong vd. (2018), bu çalışmada plazma kaynaklı üretilen ozon destekli karışımın etkisini daha iyi değerlendirmek için yanma üzerine sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Ozon (O_3) ilavesinin, emme manifoldundaki, 0 ila 7000 ppm aralığındaki değerlerin silindir üzerindeki etkileri, basınç, ateşleme gecikmesi, silindir sıcaklığı gibi sonuçları, formaldehit, yanmamış metanol, soğuk çalıştırma ve sabit durum sırasında DISI (direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ateşlemeli) metanol motor emisyonu koşullarını, metanol kimyasalını birleştirmek için tüm hesaplamalar ve kinetik reaksiyon mekanizmaları akışkan dinamiği kullanılarak simüle edilmiştir. Model sonuçları soğuk çalıştırma ve sabit durum modları için artan O_3 ilavesi ile maksimum silindir basıncının arttığını göstermektedir. O_3 ilavesi aynı zamanda önemli ölçüde ateşleme gecikmesini de azaltmıştır. Soğuk çalıştırma için O_3 ilavesi ile maksimum ısı salım hızı tepe noktaya çıkmıştır. O_3 ilavesinin DISI metanol motorlarının yanma süreçleri üzerindeki etkisi özellikle yüksek O_3 konsantrasyonlarında daha iyi olduğu görülmüştür. Sonuç olarak; O_3 arttıkça maksimum silindir basıncının arttığı gözlemlenmiştir. O_3 ile hem soğuk başlatma hem de kararlı durum modları sırasında iki maksimum ısı yayma hızı piki meydana geldiği görülmüştür. Bunlardan ilki ateşleme başlangıcında, ikincisi ateşin ana yanma zamanında olmuştur. Sonuç olarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak metanol kullanımının kimyasal ve kinetik reaksiyon mekanizmasının etkilerini incelemek adına emme manifoldunda O_3 ilavesinin 0 ppm ila 7000 ppm arasında gönderilip, silindir basınç geçmişi, ateşleme gecikmesi, silindir sıcaklığı gibi

parametrelerin ölçümü yapılmıştır. Bunlardan yola çıkarak, O₃ oranı arttıkça maksimum silindir basıncı hem soğuk çalıştırma hem de kararlı durum modları için artmıştır. Bu artış oranları sırasıyla %33.3 ve %21.1 olarak belirlenmiş ve O₃ ilavesi olmadan karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda O₃ ilavesiyle maksimum silindir sıcaklığının da arttığı gözlenmiştir. Soğuk çalıştırma koşullarında, maksimum silindir sıcaklığı 7000 ppm oranında O₃ ilave edilmesiyle; O₃ ilave edilmemiş haline göre %28.6 daha yüksek çıkmıştır.

Foucher vd. (2013), yaptıkları çalışmada homojen dolgu yüksek sıkıştırma ateşleme (HCCI) deneylerini tek silindirli motorda gerçekleştirilmişlerdir. 0.3 sabit eşdeğerlik oranında n-heptan ile doldurulmuş dizel motor, 300 K emme sıcaklığı ve 1500 d/d motor hızında çalıştırılmıştır. Emme manifoldu bir dielektrik bariyer tarafından üretilen ozon tarafından desteklenmiştir. Deneysel sonuçlar düşük ozon konsantrasyonlarının yani 50 ppm altındaki, motordaki soğuk ve ana alevin fazlanması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu göstermiştir. Motor sonuçlarını yorumlamak için, 20 ve 40 barda sabit hacimli yanmanın modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıntılı bir kimyasal kinetik reaksiyon mekanizması kullanarak kinetik modelleme oluşturulmuştur. Burada yakıt; ozon ayrışımı ile üretilen O atomları ile reaksiyon yoluyla oksitlenmeye başlamıştır ve bu da ozonla hızlanan OH üretiminin hem serin hem de ana alevi hızlandırmasını meydana getirmiştir. Belirtilen Ortalama Etkili Basınç 2.7 ila 3.6 bar arasında değişiklik göstermiştir. Eklenen ozon ilavesi 0 ile 54 ppm arasındaki değerlerde test edilmiştir. Mevcut deneysel sonuçlar dakikada 50 ppm'den ozonun alev üzerinde önemli etkisinin olduğunu göstermiştir. Sabit hacimli yanma modellemesini yorumlamak için testler 20 ve 40 barda yapılmıştır.

Masurier vd. (2015^b), konvansiyonel motorların kirletici emisyonları düşürmek ve yakıt tüketimini azaltmak için alternatif olarak; Homojen şarj sıkıştırma ateşleme (HCCI) motoru alternatif bir motor olarak bilindiğini vurgulamışlardır. Ancak, bu tür motorlarda yanmayı kontrol etmenin kolay olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada ki deneyler tek silindirli bir HCCI motoru üzerinde gerçekleştirilmiştir ve izooktan yakıt olarak kullanılmıştır, sabit motor parametreleri ve değişen oksit konsantrasyonları için 0 ila 100 ppm arasında yapılmıştır. Bu deneysel sonuçlar, homojen bir sabitte kinetik analizlerle birleştirilebilir hacimli, reaktör ayrıntılı, kinetik bir mekanizma ile gerçekleştirilmiştir. Ozon, nitrik oksit ve başlangıçta azot dioksit incelenmiş ve motora alımını ayrı olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, tüm moleküllerin HCCI izooktan yanmasını geliştirdiğini göstermiştir. Motor üzerindeki en yüksek etki CA50 (krank açısı) fazlaması ozon için gözlenirken en düşük etki ise diğerlerine nazaran nitrojen dioksit için gözlenmiştir. Bu sonuçlar doğrulanmıştır ve kinetik bir yorumla açıklanmıştır. HCCI deneyleri daha sonra motora ozon alımıyla birlikte enjekte edilen nitrik oksit karışımıyla test edilmiştir. Deneysel sonuçlarda bir yanma artışı gözlenmiştir. Bu iki molekül mevcut karıştırıldığında ancak ve ancak düşük ozon konsantrasyonları için CA50 fazında bir gecikme gözlenmiş ve ozon

konsantrasyonu yükselene kadar sabit bir nitrik oksit konsantrasyonu verilmiştir. Bir iki aşamalı hesaplamalar sonucunda, nitrik oksit ve ozon'dan oluşan azot dioksit'in güçlü bir oksitleyici reaksiyon olduğunu göstermiştir.

Tachibana vd. (1991), yapmış olduğu çalışmada, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda emme kanalından giren havaya ozon ilavesinin motor üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde yakıt olarak motorin kullanılan dizel bir CFR motoru kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ozon ilavesinin yanma özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Örnek verilecek olunursa, 500 ppm ozon ilavesi, setan sayısını 2 ile 4 arttırmış ve sıkıştırma oranını düşürmüştür. Bunun ateşleme limiti kullanılan yakıtın türüne ve çalışma koşullarına bağlı olarak 1 ile 2 arasındadır. Egzoz sonuçları ile ilgili emisyonlar ise, CO'da küçük miktarda bir azalma, hidrokarbonlar, partiküller ve NO_x'te ise küçük bir artış gözlemlenmiş olup tüm bu sonuçlar sabit çalışma koşulları altında ve ozon ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler yapılırken üç farklı setan sayısına sahip yakıt kullanılmıştır. Ozon, giriş portundan havayla birlikte içeriye sürülmüştür. Deneyde kullanılan aparat sayesinde eklenen ozonun girdisi tarafından ozon jeneratörünün gücü veya akış hızı kontrol edilmiştir. Bu deneyde, NO_x'in zararlı etkilerini önlemek için kaynak taşıyıcı gaz olarak saf oksijen kullanılmıştır. Normal çalışma koşulları altında 1 emme havası akışı yaklaşık 250 litre/dakika'dır. Bu nedenle 1000 ppm ozon üretimi için gerekli enerji, denklem ile yaklaşık 25 W'dır. En yüksek ozon konsantrasyonu mevcut deneyde 1000 ppm olarak yapılmıştır. Yapılan çalışmada, ozon ilavesinin ateşleme üzerindeki etkileri farklı setan sayısına sahip olan yakıtlarla (26, 40, 50) çalışılmıştır. Farklı setan sayısına sahip yakıtlarda ozon ilavesinde aynı eğilimleri göstermiştir. Yine de ozon miktarının artışına bağlı olarak, setan sayısında da artmalar gözlenmiştir. Ozon ilavesinin ateşlemeyi azalttığı görülmüştür. Deney düşük sıkıştırmada başlatılıp mükemmel bir yanma sağlanana kadar yükseltilmiştir. Egzoz gazı emisyonları, yani karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC) ve azot oksitler (NO); NDIR (dağıtıcı olmayan kızılötesi), FID (alev iyonizasyon dedektörü) ve CLD (kemilüminesans dedektörü) ile ölçülmüştür. Partiküller egzozun içine yerleştirilmiş filtre kağıdı ile hapsedilmiş olup, filtreden geçen ışık yoğunluğu ile kontaminasyon seviyesi değerlendirilmiştir. CO, HC emisyonları, ve partiküllerde ozon ilavesiyle birlikte az da olsa düşüş gözlenmiştir. Bu çalışmaların sonucunda genellikle ozon ilavesinin daha temiz egzoz emisyonlarına neden olduğu ortaya koyulmuştur. Egzoz emisyonlarındaki değişikliklere ilişkin ozon ilavesiyle, CO, HC ve kurum azaldığı sonucuna varılmış ve NO_x az da olsa arttığı görülmüştür. Kullanılan ozon miktarı ise; 250, 500, 750 ve 1000 ppm oranlarında verilmiş olup, bu oranlar farklı krank açılarında, farklı setan sayısına sahip yakıtlarla test edilmiştir.

Alipour vd. (2020); tek silindire sahip bir motorda, ozon kullanılmasının enerji ve ekserji fraksiyonları üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada Ricardo marka E/6 modelinde motor kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan motor su

soğutmalı, maksimum sıkıştırma oranı 22 ve silindir hacmi 507 cc'dir. Ayrıca 22 kW gücünde 420V'luk bir elektrik dinamometresine bağlanmıştır. Deneylerde 50 Hz ve 0,42 kV güç sağlayan bir ozon jeneratörü kullanılmıştır. Bu da maksimum 400 ppm'e kadar ozon konsantrasyonu olmasını sağlamış, buna rağmen 50, 100, 200, 250 ve 300 ppm gibi farklı ozon konsantrasyonları ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Egzoz emisyonları olarak ise CO, NO_x, HC, CO₂, ve O₂ gazları bir AVL DIGAS 4000 gaz analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Yakıt gönderimi emme manifolduna CNG enjeksiyonu ile sağlanmıştır. RCCI karışımını elde etmek için dizel yakıt homojen olarak ve ön hazneye doğrudan enjekte edilmesiyle yanma sağlanmıştır. Bu çalışmada yakıt olarak, önceden karıştırılmış düşük reaktiviteli yakıt olarak CNG'yi ve yüksek reaktiviteli yakıt olarak dizel kullanılmıştır. Sabit CNG-dizel enerji oranı 4 ve lambda sayısı 3.5 olarak verilmiştir. Sonuçlarda ozon oranı arttıkça enerji ve ekserji verimliliğinin de yükseldiği gözlenmiştir. Enerjide sırasıyla % 0.26, % 1.85, % 3.00 ve % 5.63 seviyelerinde büyüme oranı elde edilmiş olup ve yine bunlara karşılık gelen ekserji verimliliği artışları sırasıyla % 0.09, % 0.78, % 2.82 ve % 5.36 olarak bulunmuştur. Silindir içi ozon ilavesi ile birlikte uygulanan yakıtlarda yanmada iyileşme gözlemlenmiş ve motorun daha yüksek termal verimliliğini tetiklediği belirlenmiştir. Sonuç olarak ozon kullanımında NO_x artmasına rağmen kullanım CO ve HC emisyonlarının bir miktar da olsa azaldığını göstermiştir. Mevcut deneysel sonuçlara göre, çıkış gücünde ozon ilavesiyle artma görülmüş ve bu artış daha yüksek ozon miktarı için daha önemli hale gelmiştir. Eklenen ozon ile sonuçlarına göre, sadece 50 ppm ozon oranında güç olarak % 8.3 artış ve 400 ppm için % 17.88'e ulaştığı gözlenmiştir. Benzer şekilde, ozon ile yapılan işlemlerde termal verim ise 0 ppm ile 400 ppm için % 43.26'dan % 48.88'e yükselmiştir. Ozonun yanma odasında varlığı nedeniyle arttırılmış bir yanma süreci ve bu yüzden daha yüksek yanma ve egzoz sıcaklığı meydana gelmiştir. Motorun genel ekserji dağılımı aynı şekilde enerji dağılımı ile tutarlı olmuştur. Ekserji verimliliği olarak ise 0 ve 400 ppm ozon için 40.86'dan % 46.22'ye yükselmiştir. Gönderilen ozonun arttırılmasıyla birlikte soğutma ve egzoz kayıplarında sürekli artış olduğu saptanmıştır. CNG ve dizel kullanımı ile mukayese edilecek olursa ozonun ilave edilmesiyle birlikte CO ve HC emisyonlarında düşüş olmuştur fakat bunun tersine, NO_x emisyonları ise ozon oranının artması ile yükselmeye başladığı görülmüştür. Ancak, NO_x üretim hızı CO ve HC değerlerine rağmen kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasına rağmen Euro VI emisyon standartlarını karşılamamaktadır.

Seignour vd. (2019); yaptıkları çalışmada, CA05, CA50'nin duyarlılıkları, giriş basıncı, yakıt yoğunluğu ve sıcaklık gibi faktörleri ozon ve her iki yakıt için de araştırmışlardır. Sonuçlar; hidrojenin yüksek oktan sayısına sahip olmasına rağmen kendi kendine tutuşma noktası olarak izooktan'dan düşük olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada ozon eklenmesinin asıl nedeni izooktan'ın yanma sınırını değiştirmek olmuştur. Yakıtlar arasında hidrojenin izooktan'dan daha fazla hassasiyet gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu üçünün arasında ozonun en güçlü etkiye sahip

olduğu görülmüştür. Hidrojenin gürültü seviyesi, yüksek reaktivitesi nedeniyle çok yüksek seviyelere çıkmıştır. Deneyler dört zamanlı bir PSA DW10 motoru kullanılarak yapılmıştır. Dizel motor, tek silindirli olup, homojen şarj sıkıştırma ateşleme (HCCI) olarak çalışacak şekilde değiştirilmiştir. Motor sabit dönüş hızına sahip bir elektrik motoruna doğrudan bağlanmıştır. Bu çalışmada esas olarak kullanılan yakıtlar hidrojen (H_2) ve izooktan (C_8H_{18}) ve haricen eklenen ozon'dur. Motora hava alımı anseros marka jeneratör kullanılarak ozon eklemeli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, hidrojen ve izooktan ile yapılan tüm deneyler, 1500 rpm sabit bir devir hızında ve 0.3 eşdeğerlilik oranıyla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, HCCI koşulları altında hidrojen ve izooktan karşılaştırılmıştır. İkincisi ise, üç parametre üzerinden ele alınmış olup bunlar; giriş basıncı, giriş sıcaklığı ve eklenen ozon konsantrasyonudur. Yapılan deneylerde giriş kanalından ozon eklenmesinin etkileri, hidrojen ve izooktan açısından araştırılmıştır. Silindir içi basınç ve ısı salım hızı ozon eklenmesine göre test edilmiştir. Şunu belirtmek gerekir ki izooktan deneyleri 15 ppm daha yüksek yapılmıştır. Ozon miktarı 0 ile 60 ppm arasında değişik oranlarda test edilmiştir. Ozon hidrojen yanması üzerinde, aynı artış oranında izooktandan daha fazla etki göstermiştir. Hidrojen, yüksek ozon konsantrasyonlarında ateşleme gecikmeleri üzerinde daha az etki göstermiştir. Buna rağmen izooktan'a kıyasla hala daha fazla etki göstermektedir. Sonuç olarak ozon yanmayı olumlu yönde teşvik etmiştir. Buna ilave olarak izooktan ile yapılan sonuçlar, ozonun daha düşük silindir içi sıcaklıklarına doğru yanmayı değiştirebileceğini göstermiştir.

Literatür araştırmalarında görülmüştür ki dizel motorlardan çevreye yayılan gazlardan, esas olarak NO ve PM'lerin azaltılması amaçlanmıştır. Bunun için de, düşük sıcaklıklı yanma stratejileri arasından; RCCI konseptinin genellikle motor verimliliğini artırırken aynı zamanda NO ve is emisyonlarını azaltması gibi avantajlarından ötürü uygun görülmüştür. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu yanma stratejileri arasında RCCI yanma stratejisi önemli yer tutmaktadır. RCCI motorlar temel olarak, kullanacağı yüksek reaktiviteli ve düşük reaktiviteli yakıtların farklı zamanlarda silindir içerisine gönderilmesiyle çalışmaktadır.

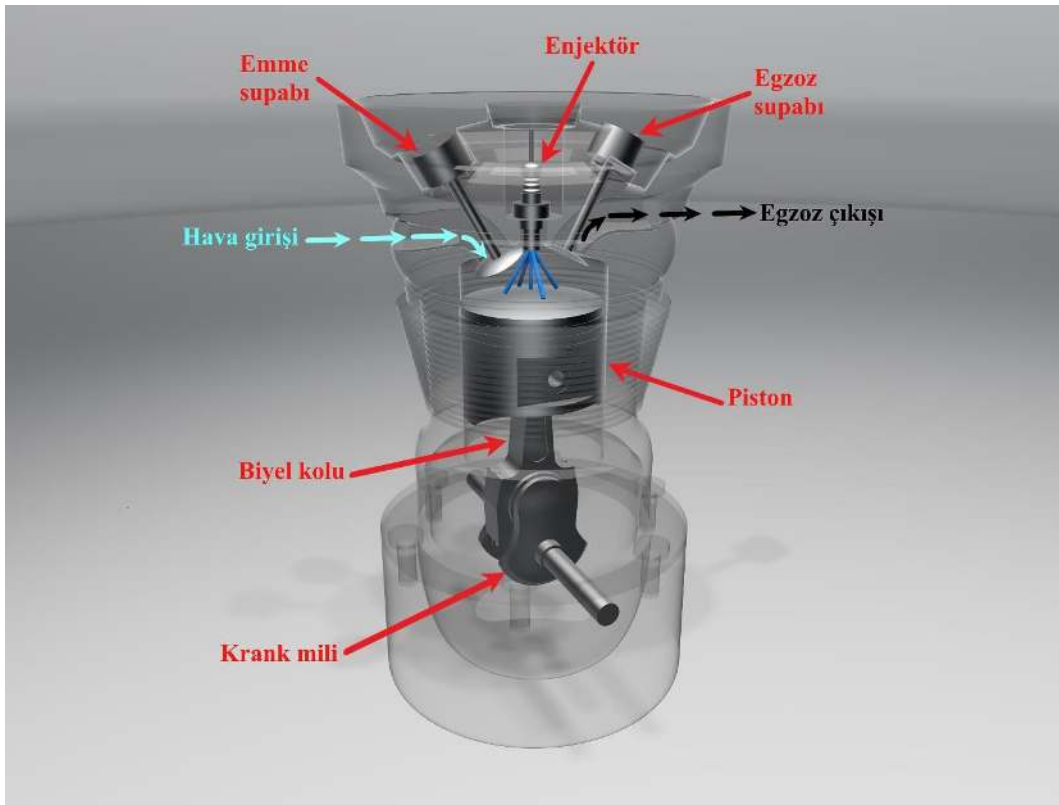
Yukarıdaki bölümde yapılan literatür araştırmaları açıklanmıştır. Buradan yola çıkarak yapılacak olan çalışmanın, hali hazırdaki çalışmalara fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada RCCI stratejisine göre modifiye edilmiş dizel ve tek silindirden oluşan bir motorda hava girişinde farklı oranlarda ozon, yakıt olarak ise dizel ve izooktan karışımları kullanılacaktır. Çalışmanın amacını ve çalışmayı daha açık hale getirmek amacıyla; içten yanmalı motorlar, dizel motor çalışma şekilleri, düşük sıcaklı yanma (LTC) konseptleri ve ozon ile beraber kullanılacak olan yakıtlarla ilgili birtakım bilgiler bundan sonraki bölümlerde sunulmuştur.

1.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar günümüzde kullanım olarak en yaygın olan ve en çok tercih edilen makinelerdir. İçten yanmalı motorlarda, yakıtta ihtiva olan kimyasal enerjinin, hava ile bir takım reaksiyonları neticesinde ortaya çıkan termal enerji, motor içerisindeki gazların sıcaklık ve basınç değerlerini artırır. Bu gaz basıncının etkisi sonucunda pistonun harekete geçmesiyle, oluşan termal enerji mekanik hareketin başlamasıyla birlikte yerini mekanik enerjiye bırakmış olur. Bu şekilde genişlemiş olan gazların silindirden atılıp aynı işlemin yeniden başlamasına kadar olan harekete bir çevrim denir. Bu hareketlere devam eden piston, gücünü biyel kolu aracılığıyla krank miline aktarır ve krank mili de gücü istenilen yere iletmesi için güç aktarma oranına bağlıdır.

1.2. Dizel Motorlar

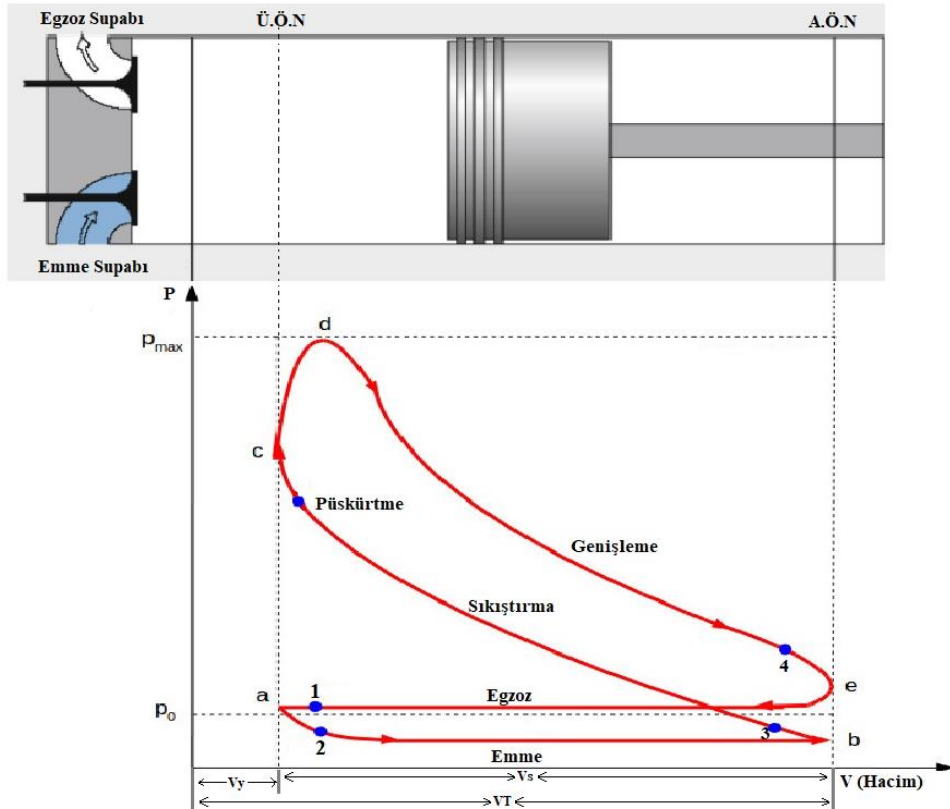
Ateşleme tipine göre sınıflandırıldığında dizel motorlar sıkıştırma ateşlemeli motorlar olarak adlandırılmaktadır. Bu motorlarda geleneksel yakıt motoridir. Bu motorlarda içeri alınan havanın sıkıştırılmasının ardından, pistonun yukarı doğru hareketini takriben üst ölü noktaya gelmeden hemen önce yakıt püskürtülmekte ve yanma sabit basınçta meydana gelmektedir. Yanmanın ardından gaz kütlesi genişlemekte ve piston alt ölü noktaya doğru hareketine başlamaktadır.



Şekil 1.1. Dizel Yanma Konsepti Genel Görünümü (Çelik O., 2019)

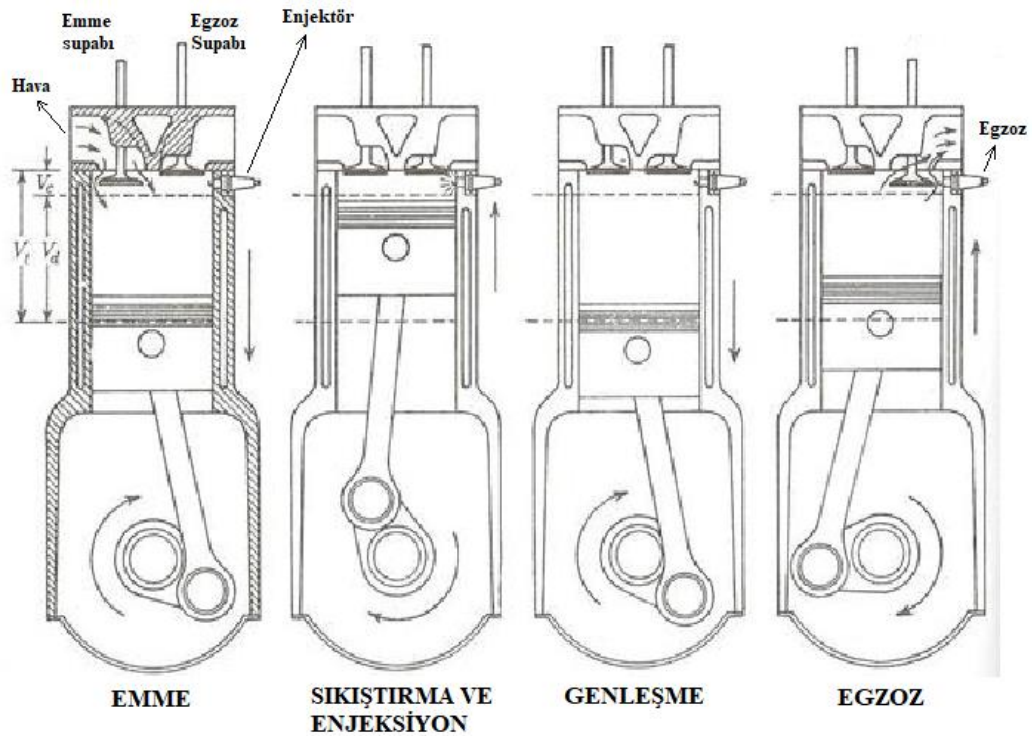
Dizel motorların çalışma prensibi görsel olarak şekil 1.1’de verilmiştir. Aşağıda çalışma prensibi detaylı olarak ele alınıp incelenecektir.

Dizel çevrimine sahip bu tür sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, çevrim dört zamandan ibarettir. Bu zamanlar şu şekilde ifade edilebilir; emme zamanı, sıkıştırma zamanı, yanma zamanı, egzoz zamanıdır. Emme zamanına gelindiğinde; piston aşağı yönlü hareketine başlar ve emme supabı açılıp ardından hava silindir içerisine emilmek suretiyle alınır. Piston bu hareketin bitmesiyle alt ölü noktaya vardığında emme supabı kapanmış olur ve daha sonra sıkıştırma zamanı başlar. Sıkıştırma zamanında ise; piston üst ölü noktaya doğru yükseldiğinde, silindir içindeki hava sıkıştırılır. Ardından sabit basınç altında, enjektör vasıtasıyla yakıt püskürtülür ve yanma meydana gelmiş olur. İçeride oluşan bu yanma sonucu olarak yüksek basınca sahip gazlar meydana gelir ve piston bu gazların basıncının vermiş olduğu itme kuvveti neticesinde alt ölü noktaya doğru itilir. Piston alt ölü noktaya vardığı anda egzoz supabı açılır. Bunun sonucunda piston üst ölü noktaya doğru hareketinde silindir içinde oluşan bu yanma sonu gazlarını egzoz supabı vasıtasıyla silindir dışına tahliye eder ve üst ölü noktaya gelindiğinde çevrim bitmiş olur.



Şekil 1.2. Dört zamanlı bir dizel motorun p-V çevrim diyagramı

Şekil 1.2’de dizel çevrimiyle çalışan dört zamana sahip bir dizel motorun diyagramı gösterilmiştir. Çevrim başlangıcı olarak “a” noktasında emme zamanı ile oluşmaktadır. Emme supabı açık bir vaziyette, egzoz supabı ise kapalı haldeyken Ü.Ö.N (üst ölü nokta)’dan A.Ö.N (alt ölü nokta)’ya konumlanması boyunca harcanan süredir. Yanma odasının hacminde ki artış ile birlikte bir vakum etkisi ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu vakumla birlikte havanın içeri girişi sağlanır. Sıkıştırma zamanına geçildiğinde ise piston A.Ö.N’ya vardığında emme supabı kapalı konuma geçer ve piston bütün supaplar kapalı haldeyken Ü.Ö.N’ya yol alır. Bu durum içeri alınan havayı sıkıştırır, silindir içindeki basıncın ve sıcaklığın yükselmesine sebep olur. Bu noktada sıkışmış olan havanın basınç değeri yaklaşık olarak 30 ile 40 bar, sıcaklık olarak ise 450-650 °C civarında olur. Ardından piston Ü.Ö.N’ya yaklaştığı zaman kullanılan enjektör vasıtasıyla yanma odasına yakıt püskürtülür. Yanma, yakıtın püskürtülmesinin ardından, buharlaşıp silindir içinde sıkıştırılmış halde bulunan hava ile yanmanın gerçekleşmesi için belirlenen miktar ve oranda karıştığı zaman, tutuşmaya başlayıp kendi kendine başlar. Bu olayların sonucunda basınç yaklaşık olarak 40 ile 80 bar aralığında ve sıcaklık yaklaşık olarak 1400 ile 2000 °C değerine çıkar. Daha sonra güç zamanı başlar ve yanma sonlanana kadar devam edip ardından piston A.Ö.N’ya hareket eder. Bu zamanda hacim arttığı için basınç ve sıcaklık düşer. Bu zamanın bitmesine doğru egzoz supabı açılır ve birikmiş gazlar dışarıya atılır. Şekil 1.3’te de dört zamanlı dizel motora ait çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 1.3. Dört zamanlı dizel bir motorun çalışma prensibi (Heywood, 1988).

1.3. Dizel Motorlarda Yanma

Yakıtların oksijen ile birleşip tepkimeye girerek ortaya karbondioksit ve su meydana getirmesine yanma denilir. Bu olayın neticesinde ise ısı ve enerji meydana çıkar. Dizel motorlarda yanma hadisesinin gerçekleşmesi için gerekli aşamalardan yukarıda bahsedilmiştir. Genel olarak yanma olayı 4 adımda gerçekleşir. Bunlar; tutuşma gecikmesi, ani yanma, kontrollü yanma ve gecikmiş yanma olarak adlandırılır ve aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.

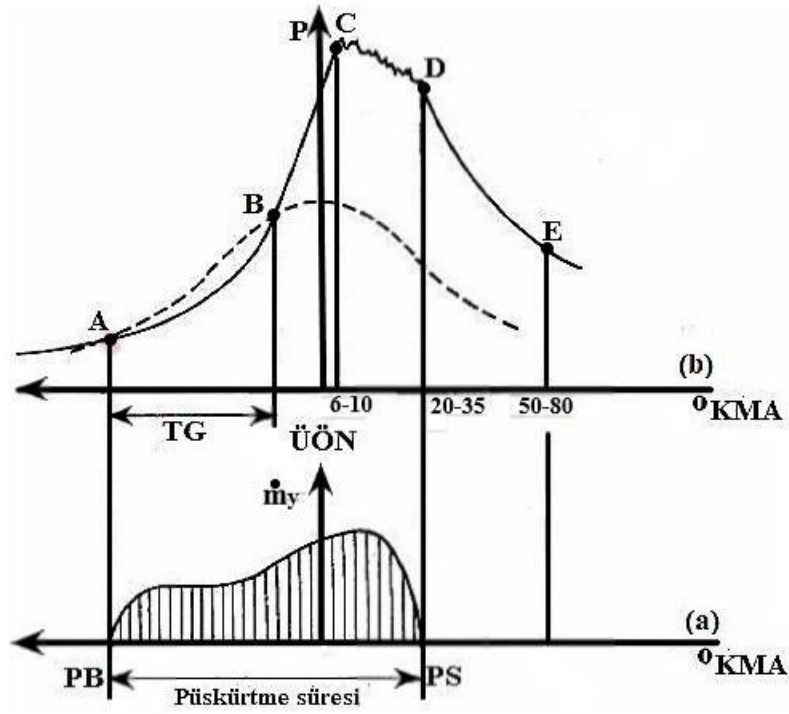
1) Tutuşma gecikmesi: Sıkıştırma zamanının sonunda silindire enjekte edilen yakıt anında tutuşmaz. Tutuşma gecikmesi yakıtın, buharlaşmaya başlaması ve ardından tutuşmanın gerçekleştiği ana dek meydana gelen ön reaksiyonların olduğu adımlardan ibarettir. İçeriye püskürtülen yakıt zerreciklerinin buharlaşmasının biraz vakit aldığı bilinmektedir. Fakat bu yakıt zerreciklerinin etrafında yakıtın enjekte edilmesinden hemen sonra buhardan meydana gelen bir tabaka oluşmakta ve ilk yanma bu buhar tabakasında meydana gelmektedir. Kısacası yakıtın tutuşabilmesi için oksijen ile birlikte karışıp, yüksek sıcaklıklara çıkması gerekmektedir. Bu sebepten ötürü, enjektörün yakıtı silindir içerisine göndermesinden, ilk alev oluşumunun başladığı ana dek geçen zamana tutuşma gecikmesi denir. Bu süre yaklaşık olarak 2000 d/d ile çalışan bir motorda 0.0009 saniyedir.

2) Ani yanma: Tutuşma gecikmesinin gerçekleşmiş olduğu zaman içinde silindir içerisine enjekte edilen yakıtın sıcaklığı artar, oksijen ile karışıp ve buharlaşmaya başlar. Yine bu süreçte yakıt damlacıkları küçük parçalara bölünmek suretiyle atomize bir hale gelip hava ile daha iyi bir şekilde karışmaktadırlar. İlk yanma olduğu anda, oksijenle temas halinde olan yakıtın tamamı yanmaya katılır ve hızlı bir yanma oluşur. Gerçekleşen bu yanma hızı silindirdeki dp/dt basınç yükselme hızlarını da belirler. Gerçekleşen bu ani yanma silindir içerisindeki basıncın hızla artmasına ve motor içerisindeki parçaların arasında bulunan boşlukların birden alınmasından ötürü, motorda yüksek vuruntu ve sert çalışma meydana gelir. Meydana gelen bu olaya ise dizel vuruntusu adı verilir.

3) Kontrollü yanma: Kontrolsüz yanmanın bitiminde silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık, enjekte edilen yakıtı direkt olarak yakabilecek bir seviyeye erişir bu sebeple enjektörden gönderilmeye devam eden yakıt herhangi bir gecikme meydana gelmeden yanar. Silindir içi basınç maksimum noktaya varıncaya dek artar. Arda kalan püskürme ve yanma esnasında basınç aynı kalır.

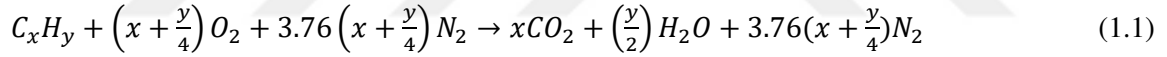
4) Gecikmiş yanma: Yakıtın silindir içerisine gönderilme aşaması tamamlanmış ve piston alt ölü noktaya doğru yol almaktadır. Önceden gönderilmiş fakat yanması gerçekleşmemiş olarak kalan yakıt genişleme zamanı boyunca oksijenle temas ettikçe yanmaya devam eder. Bu reaksiyona ise gecikmiş yanma denir.

Şekil 1.4'te dizel motorların basınç ve krank açısının değişimine göre oluşturulan diyagram verilmiştir.



Şekil 1.4. Dizel motora ait basınç-krank açısı değişimi diyagramı (Borat, 1995)

Dizel için yanma denklemi aşağıda verilmiştir.

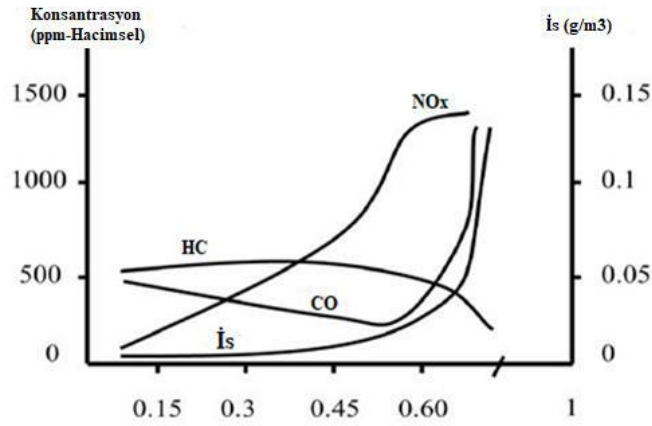


Yine yanma sonu ürünlerine göre dört grupta incelenmektedir. Bunlar tam yanma, eksik yanma, teorik yanma ve kısmi eksik yanma olarak ele alınmaktadır.

Teorik yanma O_2 bulunmayan yanma biçimidir ve yanma sonu ürünleri arasında CO_2 , H_2O , N_2 bulunur. Tam yanma şeklinde ise çıkan ürünlerde eksik bulunmaz ve bunlar; CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 ve N_2 'dir. Eksik yanma ürünleri olarak C, CO ve H_2 verilebilir. Son olarak ise Kısmi eksik yanma şeklinde CO, H ve OH gibi eksik yanma ürünlerinin çıktığı yanma şeklidir.

1.4. Dizel Motorlarda Emisyon

Dizel motorlarda yanma sonucunda ortaya çıkan başlıca gazlar; CO, NO_x , is ve HC'ler olarak verilebilir. Dizel motorlardan çevreye yayılan birincil egzoz gazları NO_x 'ler, PM, CO ve HC olarak gösterilebilir. Şekil 1.5'te dizel motorlardaki yanmanın ardından ortaya çıkan egzoz gazlarındaki eğilimler gösterilmiştir. Ortaya çıkan bu gazlara ilişkin ayrıntılar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.



Şekil 1.5. Eşdeğerlik oranına bağlı olarak dizel motorlarda oluşan emisyonlardaki eğilimler (Castillo, 2014)

1.4.1. Karbon Monoksit

Kısaca yakıtın içerisinde bulunan hidrokarbonun tepkimeye girdikten sonra tamamlanmasını takriben karbon monoksit meydana gelmektedir. CO gazlarının CO_2 'ye dönüşmesi için ortamda yeteri kadar sıcaklık ve oksijen bulunması gerekmektedir. Yakıt oranı olarak zengin olan alanlarda, ilk aşamada meydana çıkan CO gazları yüksek sıcaklık ile bulunduğu takdirde ortamdaki oksijen miktarının da yüksek olması ile beraber ortamdaki oksijen ile oksitlenmektedir. Buna karşın CO gazları, düşük sıcaklıkta meydana gelen yanmalarda, is ve NO_x gazlarında düşüşü sağlayıp, oksitlenme eğilimi daha düşük olmaktadır (Altun, 2009).

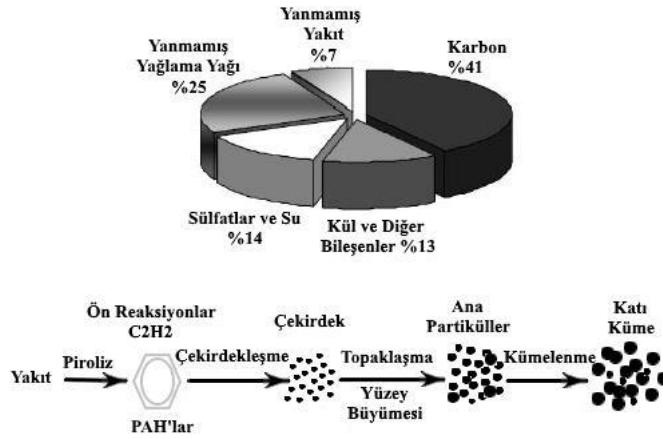
1.4.2. Azot Oksitler

Motordaki yanma sırasında meydana çıkan NO_x çoğunlukla sıcaklığa bağlı olarak gelişir. Yanma meydana gelirken motordaki sıcaklıkların artmasıyla beraber havanın içinde bulunan azot ile oksijenlerin birleşmesip tepkimeye girmesi neticesinde azot oksitler ortaya çıkmaktadır. Bunun önemli ölçüdeki sebebi kontrolsüz yanmalardır. NO_x içerisindeki ana elementi azot ihtiva etmektedir. Oksijen oranı arttıkça NO_x 'in meydana gelme hızı da yükselir. Temel anlamda NO_x oluşumuna neden olan iki parametre yanma odasındaki sıcaklık ve motora giren hava/yakıt oranıdır (Çıtak, 2014). NO oluşumunda kabul görmüş en önemli model zeldowich mekanizmasıdır (Han ve ark. 2012).

1.4.3. Is (Duman) Emisyonları

Motorda yanma sonucu açığa çıkan zararlı gazlardan biriside partikül madde olarak ta adlandırılan is yada duman emisyonlarıdır. Partikül maddelerin özellikle dizel motorlarda yüksek miktarda ortaya çıkmasının sebebi hem karışım hem de kullanılan yakıtın cinsidir. Motorda

oksijence fakir ortamda kalan yakıt parçacıklarının, ısı olarak parçalanması ve en önemlisi hidrojen moleküllerinin rahatlıkla oksidasyona uğraması, karbonların oksitlenmeye uğramadan ortamda artması neticesinde is diye tabir edilen partikül maddeler oluşur. Motorun çevre şartlarına, kullanılan yakıtın özelliklerine ve yük durumuna göre değişen is aynı zamanda motorun gücünde de negatif etkileri olan bir durumdur. Motorda ilk andan itibaren oluşmaya başlayan karbonun yüksek orandaki miktarı tekrar yanar. Motorda partikül madde oluşumu, motordaki bir takım yerlerin karbonlarla tıkanarak zarar görmesine ve aynı zamanda silindir duvarının aşınmasına da neden olmaktadır. Yanma odasında uygun şartlar oluşmazsa bu partikül maddeler is emisyonu olarak egzozdan dışarı atılır.



Şekil 1.6. Partikül ve is oluşumu (Çelik, 2019).

Şekil 1.6 incelenirse hidrojenlerin birbirinden ayrıldığı ve karbon oranı olarak fazla olan iri boyuttaki moleküller birleşme eğilimindedirler, bu birleşmelerin devam etmesi partikül maddeleri daha da belirginleştirmektedir. Eğer ortaya çıkan bu is tanecikleri hava ile uygun bir sıcaklık ve zaman beraberinde temas edebilirlerse yanma eğilimi gösterebilmektedirler (Borat ve ark. 1995).

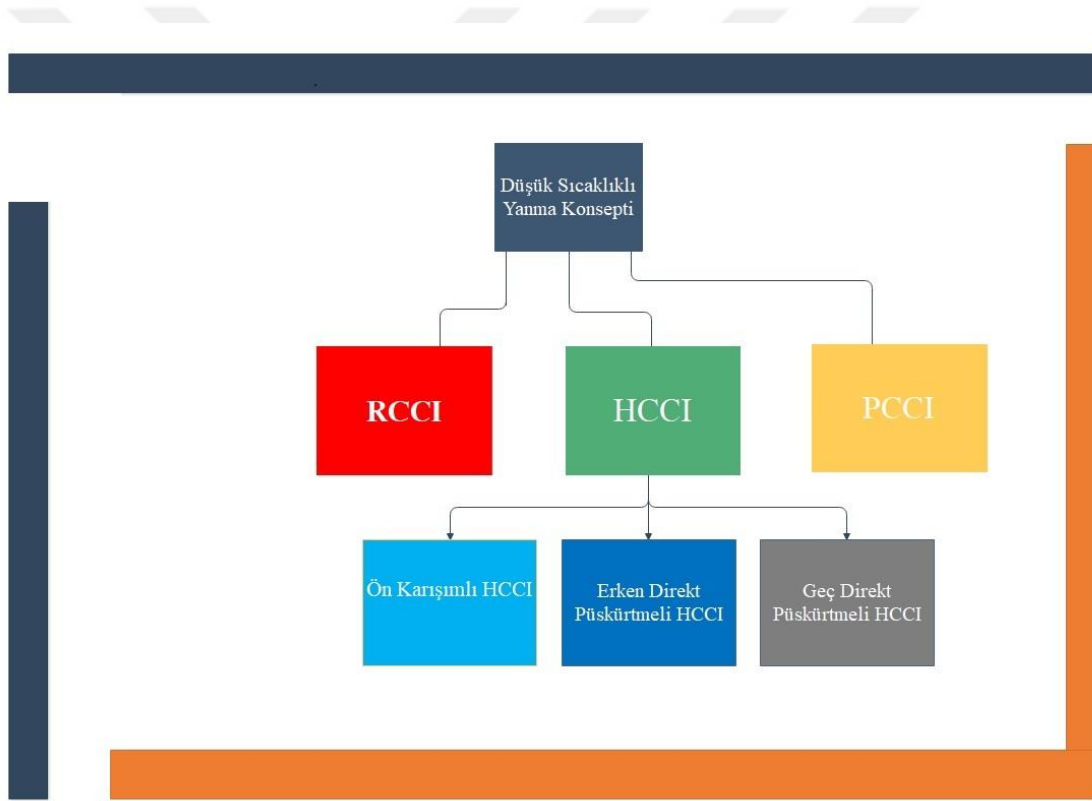
1.4.4. Toplam Hidrokarbon

Bu gazların büyük ölçüde yanmamış yakıtlar ve hafif hidrokarbonlar meydana getirmektedirler. Toplam hidrokarbon gazlarının önemli ölçüdeki kısmı, motor içerisinde yağlama amacıyla kullanılan yağların buharlaşması ve oksidasyona uğraması sonucunda meydana gelmektedir. Dizel motorlar genel olarak yakıtsız yanma, yanma sıcaklığının yüksek olması ve sıkıştırma oranının fazla olması nedeniyle üretilmektedir. Bununla birlikte yüksek toplam hidrokarbon emisyonlarının meydana gelmesi uzun süren ateşleme gecikmelerinde ve düşük sıcaklıklı yanma modlarında ortaya çıkmaktadır (Gao, 2017).

1.5. İçten Yanmalı Motorlarda Düşük Sıcaklıklı Yanma

İçten yanmalı motorlarda düşük sıcaklıklı yanma şekillerini kapsayan üç adet konsept bulunmaktadır. Bunlar; homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme, reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme ve ön karışım dolgulu sıkıştırma ile ateşleme olarak adlandırılmaktadır.

Bu yanma biçimleri şekil 1.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Düşük sıcaklıklı yanma şekilleri, çok düşük NO_x ve partikül madde üretmelerine rağmen literatür çalışmaları kontrol edildiğinde CO ve HC gazlarında artış gözlenmiştir. Bu yanma türlerinde motorun performansı kullanılan yakıtın cinsine bağlıdır. Düşük sıcaklıklı yanmaya sahip motorlar daha dar bir çalışma aralıklarına sahip olmakla birlikte daha kompleks bir yanma kontrolüne ihtiyaç duyarlar (Solouk ve ark. 2017).



Şekil 1.7. Düşük sıcaklık yanma konseptinin alt gruplar halinde gösterimi

Motorlarda yanma sisteminde değişime gidilmesindeki temel amaç NO_x ve is emisyonlarını düşürmektir. Bu sistemler geçmişte HCCI adı verilirken, zamanla ortaya çıkan sistemlerin çoğunu tam olarak ifade edip tanımlayamadığından bunun yerini zamanla LTC terimi almıştır. Bu ismi almasındaki temel faktör bahsi geçen emisyonları azaltmak için, yanma sıcaklıklarını düşürmektir.

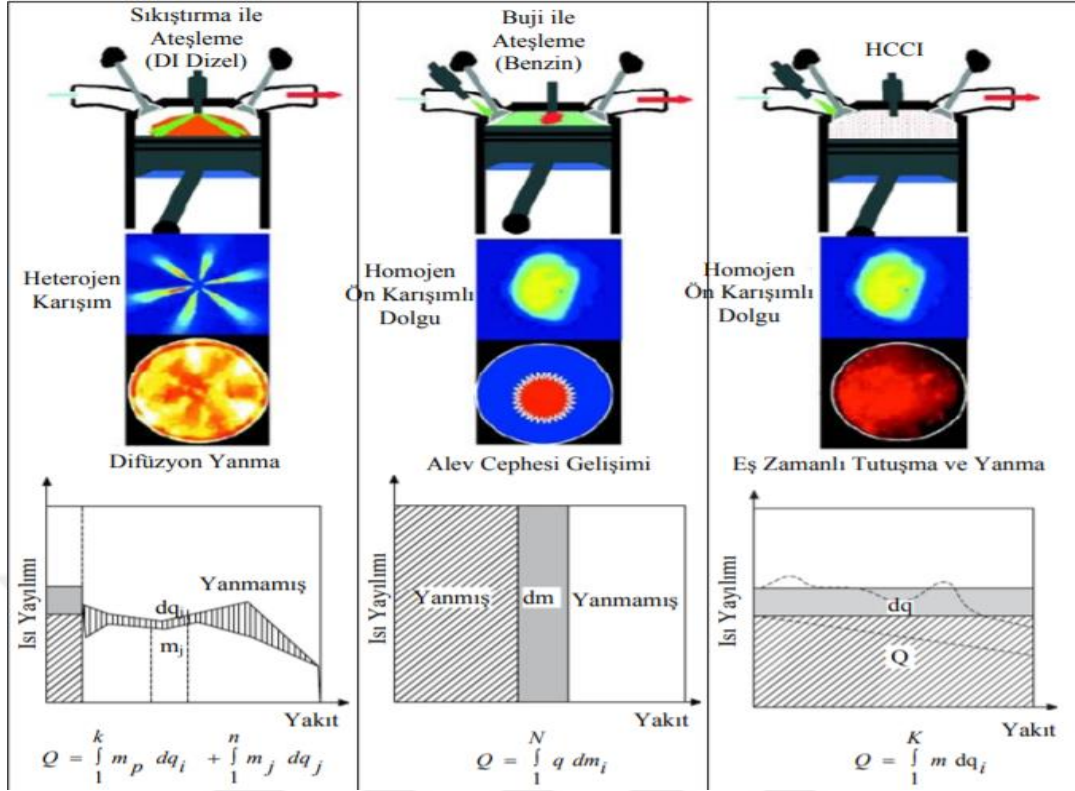
1.5.1. Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşleme (HCCI)

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, temel anlamda içeri giren karışımın homojen bir şekilde sıkıştırılmak suretiyle kendi kendisine tutuşmasına denir (Özden, 2005).

Bu sistem dizel ve benzinli motorların ortak özelliklerini bir araya getirerek ikisinin de artı yönlerini bir araya getirmiştir. Bu sistem kendi arasında da üç gruba ayrılmaktadır. Ayrılan gruplarda kendi aralarında gruplara ayrılmıştır. Temel olarak üç gruptan bahsetmek gerekirse; erken direkt püskürtmeli, ön karışım ve geç direkt püskürtmeli olarak açıklanabilir. Bu motorlar dizellerin avantajı olan yüksek termik verim ve buji ateşlemeli motorların avantajı olan düşük NO_x emisyonunu bir arada sunmaktadır. Bu sebeplerden ötürüdür ki son yıllarda üstünde çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. HCCI sistemine ait görsel Şekil 1.9'da verilmiştir.

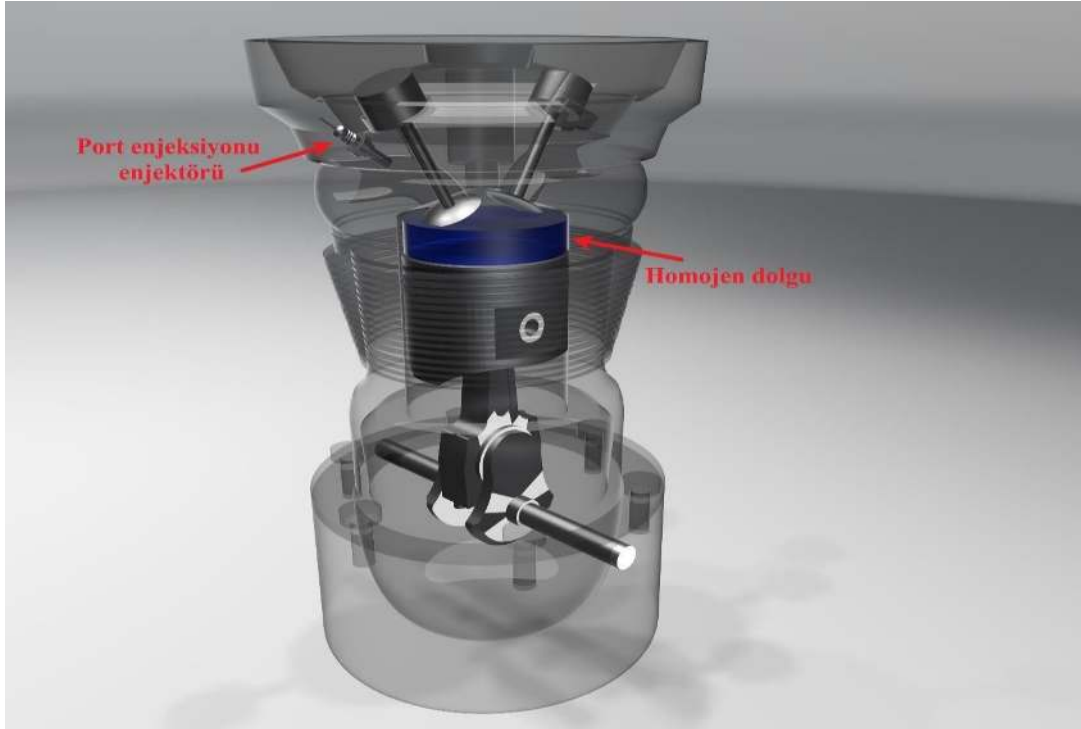
HCCI motorlarda yanma kontrolündeki zorluk ve daha dar bir çalışma olması sebebiyle birlikte düşük sıcaklıklarda meydana gelen HC ve CO emisyonları ilk etapta göze çarpan dezavantajlarıdır (Türkcan, 2013). HCCI motorlarda yapılan çalışmalarda hedef, ateşleme başlamadan önce daha fazla homojen yapıya sahip hava ile birlikte yakıt karışımını oluşturmaktır, bu da buji ateşlemeli motorlarda olduğu gibidir. İşlemin gerçekleşmesi ise imkan varsa silindirin içine doğrudan olarak yakıtı enjekte ederek veya emme portu vasıtasıyla göndererek, içeri giden yakıtın bütünüyle birbirine karışmasını sağlayarak olur. Daha sonra içerideki karışım sıkıştırılmış gazlar yoluyla ısıtıldığı için ateşleme kendiliğinden gerçekleşir, burada buji gibi ateşleme yöntemleri kullanılmaz. HCCI sistemi, geleneksel sıkıştırma ateşlemeli yahut direkt enjeksiyonlu motorlara göre yüksek verimlilikle beraber daha düşük NO_x ve is emisyonu arz etmektedir (Ganesh ve ark. 2008). Daha basit bir şekilde açıklanacak olursa yakıt verimliliği aynı şekilde korunurken emisyonları da azalttığı için alternatif bir çalışma konseptidir (Wu ve ark. 2011).

Şematik olarak Şekil 1.8'de DI dizel, benzin ve HCCI yanmaları verilmiştir. Şekil 1.8'in alt kısmında da ısı yayılımı karakteristikleri verilmiştir. Buji ile ateşlemeli motorlarda yanma sırasında silindir içerisindeki dolgu yanmış ve yanmamış bir şekilde alev cephesi ile iki bölgeye ayrılmaktadır. Burada da yanmanın kontrolü alev cephesinin gelişimi ile sağlanmaktadır. Biriken ısı yayılımı, alev cephesindeki belli bir kütlenin yanması ile ortaya çıkan ısının toplamı olarak açıklanmaktadır (Johansson, 2007). Direkt enjeksiyonlu dizel bir motordaki yanma, homojen olmayan bir dolgu içerisinde bölgesel bir şekilde tutuşma şartlarının optimum olduğu yerlerde başlamaktadır (Şekil 1.8). Bu bölgelerde yüksek sıcaklıklarda oksitlenme ile oldukça hızlı bir biçimde ısı açığa çıkarak diğer bölgelerinde tutuşmasına neden olmaktadır. Tutuşmanın gerçekleşmenin ardından, yakıt miktarının belli bir kısmı HCCI yanmasına yakın bir biçimde ön karışım yanma safhasına katılmaktadır. Arda kalan yanmasını tamamlayamamış yada yanmaya hiç başlamamış yakıt, havadaki türbülans karışımının hızına göre oluşan difüzyon yanma aşamasına katılmaktadır (Zhao, 2007).



Şekil 1.8. Sıkıştırma ateşlemeli, buji ateşlemeli ve HCCI motorlarda yanma gelişimi (Can ve diğ., 2012).

Şekil 1.9’da ise HCCI konseptine ait yanma görünümü verilmiştir.



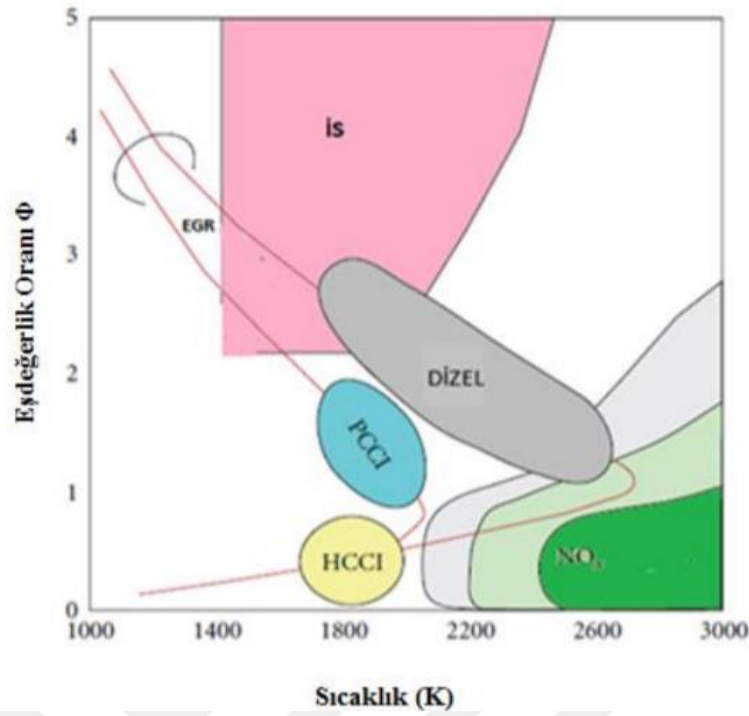
Şekil 1.9. HCCI yanma konsepti görünümü (Çelik, 2019).

1.5.2. Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşleme (PCCI)

PCCI ateşleme konsepti, geleneksel buji ateşlemeye sahip bir motorun emisyon seviyesiyle, geleneksel bir dizel sıkıştırma ateşlemeli motorun da verimliliği ile eşdeğer oranda birleştirmeyi amaçlayan yakıtın önceden karışmış bir biçimde yandığı, erken enjeksiyonla yapılan bir yanma şeklidir (Leermakers ve ark., 2011). Genel olarak bakıldığında is ve emisyonları geleneksel dizel yanmasına kıyasla daha düşüktür. Kendi kendine tutuşmadan önce yakıt, hava ve egzoz gazı karıştırılarak bu düşüş sağlanmaktadır. Bu sistem temel olarak HCCI sisteminde yanma başlangıcında oluşan sorunlara çözüm olarak daha iyi bir kontrol için geliştirilmiştir. Ön karışımli dolgulu sıkıştırma ile ateşleme konsepti, hava ile yakıttan oluşan karışımın ateşlenmesi gerçekleşirken bir kısmının tabakalaştırıldığı HCCI yanmasının daha genel halidir (Aceves ve ark., 2004). HCCI sisteminde yanma aşamalarını kontrol etmek çok zordur, PCCI sistemi bu sorunları ortadan kaldırmak için eklenir ve bununla birlikte HCCI kadar homojen değildir. Dolgu hareketinin daha iyi olması, enjeksiyondaki yüksek basınç ve sıkıştırma oranının azaltılmasıyla kontrolü sağlamak için istenilen tutuşma gecikmesine ulaşılır (Imtenan ve ark., 2014). Diğer yanma sistemlerinde ki gibi PCCI yanmasında da HC ve CO emisyonları sorun teşkil etmektedir. Buna neden olan şey ise yakıt enjekte edilirken bir kısmının silindir duvarlarına çarpması ve eksik yakıt buharlaşmasıdır. Buna çözüm olarak ta dar açılı enjektörler kullanılması kısmen de olsa pozitif etki sağlamaktadır. PCCI yanmasında enjeksiyon stratejisi ile, yanmadaki kontrol aynı şekilde korunurken, geleneksel yanmaya göre önceden karıştırılmış olan dolgu, artan oranlarda kullanılır. PCCI yanma stratejisi is ve emisyonları azaltmak amacıyla erken silindir yakıt enjeksiyonunu kullanır. Dizel yakıtın uçucu ve yüksek tutuşabilirlik gibi özellikleri yanma kontrolünü zorlaştırmaktadır ve bu yanma stratejisinin yaygınlaştırılması için üzerinde çalışmak gereklidir (Manimaran ve ark., 2013).

Şekil 1.10'da PCCI, HCCI ve dizel motor haritası eşdeğerlilik oranı ve yanma sıcaklığına bağlı olarak verilmiştir. Şekilde yeşil kısım yüksek NO_x bölgesi ve pembe renk ile belirtilen kısmı yüksek is alanıdır. Şekilde de görüldüğü üzere farklı yanma şekilleri farklı oranlarda NO_x ve kurum emisyonlarına yol açmıştır. PCCI yanma kıyaslanacak olursa; NO_x ve is emisyonlarının geleneksel dizel yanmaya göre düşük, HCCI konseptine göre az miktarda yüksek olduğu söylenebilir. EGR, NO_x gazlarını azaltma konusunda pozitif bir etki yapmaktadır. Ayrıca soğutmalı EGR kullanılarak, tutuşma gecikmesindeki süreyi arttıran, önceden karıştırılmış yanma fayda sağlamaktadır (Miao ve ark., 2011).

Bütün bunların yanında PCCI yanma sisteminin dezavantajlarına değinilecek olunursa (Gözen, 2015); uzun süreli kullanım durumlarında motorda ve silindir içerisinde kalıcı olarak belirecek hasarlar, termal verimliliğin daha düşük olması, yüksek yük dolaylarına çıkıldığında ateşleme zamanının kontrolünün kaybedilmesi ve bunu takriben basıncın hızlı bir şekilde yükselmesi söylenebilir.



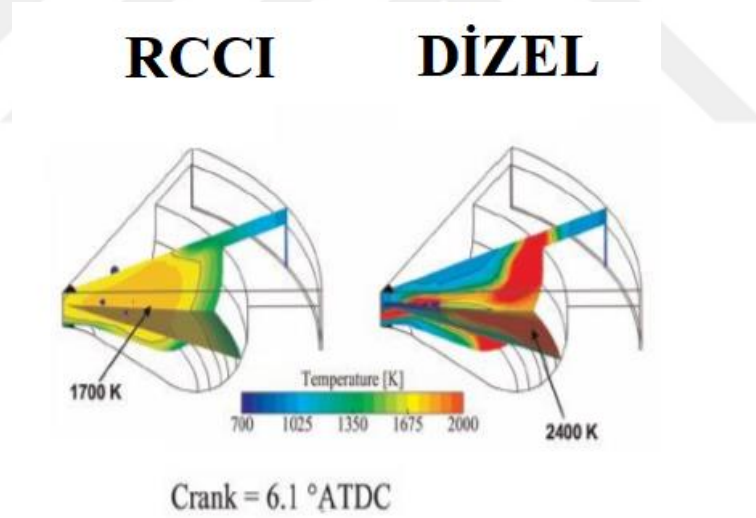
Şekil 1.10. Yanma Haritaları (Işık, 2016).

1.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma İle Ateşleme (RCCI)

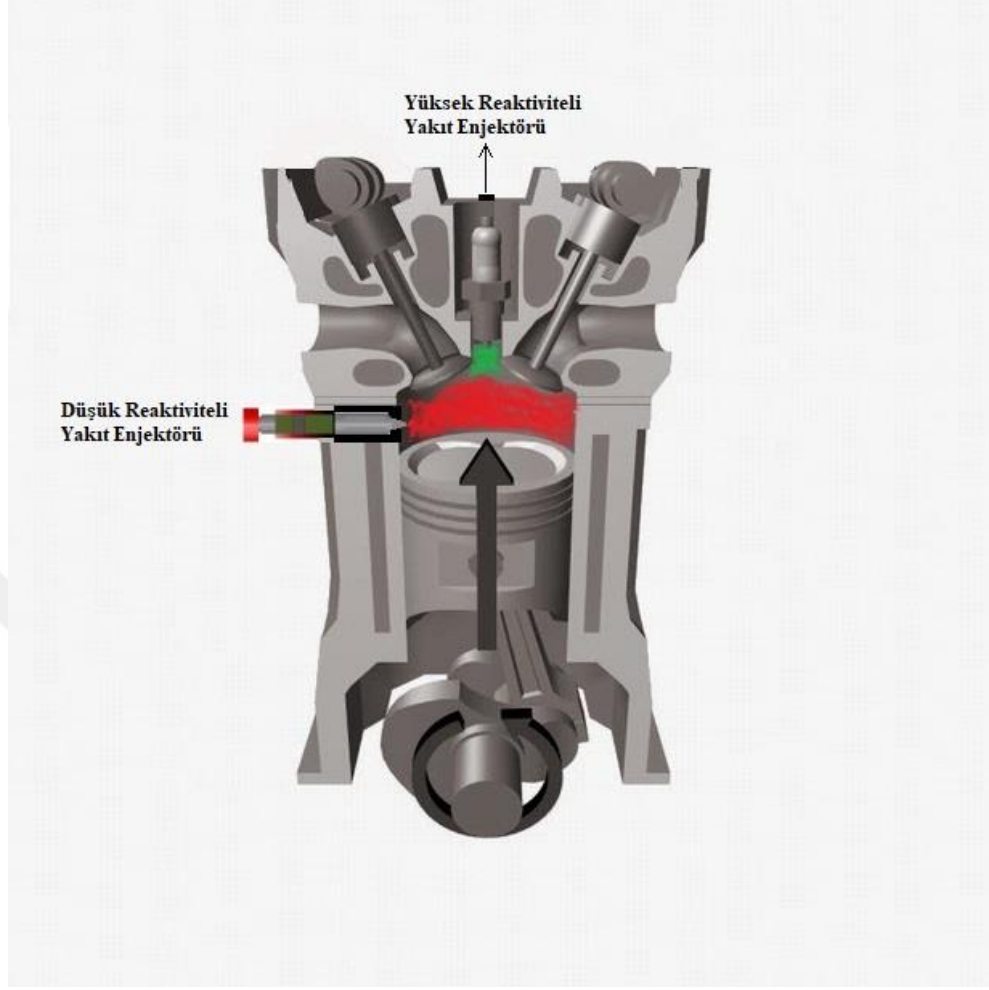
RCCI yanma sistemi iki farklı yakıt kullanıp, bunların karışımıyla birlikte yanmanın gerçekleştiği düşük sıcaklıklı yanma stratejisidir. RCCI yanma sistemi ilk olarak Wisconsin Üniversitesi Madison Motor Araştırma Merkezi laboratuvarlarında oluşturulan, çift yakıt kullanan bir yanma konseptidir. Reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme, yanma prosesleri ve süreci ile ilgili daha fazla kontrol imkanı sunan yakıt tüketiminde pozitif etkilerin yanı sıra, verimliliği arttırıp, emisyonları büyük oranda düşürecek seviyeye eriştiren tıpkı PCCI'de olduğu gibi homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme konseptinin bir versiyonudur. RCCI konseptine ait görsel Şekil 1.12'de verilmiştir. RCCI sisteminde, benzin ve benzeri yani LRF, ile dizel ve benzeri yani HRF yakıtlar çift enjeksiyon vasıtasıyla silindir içerisine karıştırılıp alınmasıyla gerçekleşir. Yakıtın oranı ve tutuşma zamanı gibi parametrelerin ayarlanması kontrol merkeziyle sağlanır. Bu şekilde LRF ve HRF'nin oranları değiştirilerek yanmayı kontrol edilebilir bir şekilde sürdürmek sağlanmaktadır. RCCI yanma konsepti HCCI'de denk gelen ve daha geniş yelpazedeki yük aralıklarında çalışmasına engel olan yanma zamanlaması ve vuruntu sıkıntısını ortadan kaldırmayı amaçlamıştır (Splitter ve ark., 2012; Kokjohn ve ark., 2011). Yüksek ve düşük reaktiviteli enjeksiyon yakıt oranlarıyla çalışma şartları ayarlanıp yanmanın kontrolünü gerçekleştirmesi neticesinde yakıt reaktivitesi seviyelendirilmesi ile çalışma koşulları, aralıkları ve ısı verim yükselir (Imtenan ve ark., 2014).

Dizel motorlardan çevreye yayılan NO_x ve is emisyonlarının etkisi azımsanmayacak kadar fazladır. NO_x yüksek sıcaklıklarda, sıkıştırma oranının yüksek olması sebebiyle meydana çıkan oksijenin atmosferde serbest halde bulunan azot ile birleşip azot oksit oluşturmasıyla ortaya çıkmaktadır. Benzinli motorların zıttına dizel motorlardan daha yüksek verim elde edilmesine rağmen, emisyon salınımlarını düşürmek bir hayli daha maliyetli ve zordur (Ciatti, 2012). RCCI konsepti motorun tüm yük ve hız aralıklarında teknik olarak verimli ve güvenlidir. Emisyon olarak oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Fakat negatif olarak uygulanacak olan araçta iki ayrı yakıt deposu ve bazı sistemlerin iki yakıt için ayrı ayrı oluşturulması gerektiği için karmaşık ve daha pahalı gereçlere yatırım yapılmasını doğurmaktadır (Ciatti, 2012).

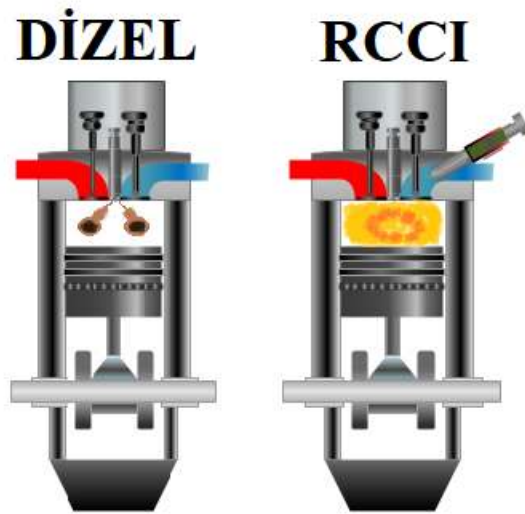
Şekil 1.11'deki görselde dizel ve RCCI motor için %50 yanma oranlarında motordaki sıcaklık seviyeleri gösterilmiş, dizel yanmasında yanma odasında RCCI'ye kıyasla daha yüksek sıcaklık bölgeleri olduğu ve özellikle bu bölgelerin daha çok piston kafası yakınında olduğu için bu bölge ısı transferini artırarak verimi düşüreceğini ortaya koymuştur (Kokjohn ve ark. 2011). Son olarak Şekil 1.13'te ise RCCI konsepti ve geleneksel dizel yanmasına ait görünüm verilmiştir.



Şekil 1.11. RCCI ve dizel motorların sıcaklık dağılımı açısından karşılaştırılması (Kokjohn ve ark., 2011).



Şekil 1.12. RCCI yanma konsepti genel görünümü



Şekil 1.13. Dizel ve RCCI yanma konseptinin görünümü

RCCI yanması diğer düşük sıcaklıklı yanma tiplerinde olduğu gibi düşük sıcaklıkta gerçekleştiği için NO_x ve partikül madde olarak daha az emisyon salınımını sağlar. RCCI yanmasıyla birlikte is ve NO_x oluşumu oldukça düşük seviyelere indirilmiştir. Tablo 1.2’de LTC konseptleri verilmiştir.

Tablo 1.2. LTC konseptleri

Yanma konsepti	Yakıt alma biçimi	Yanma aşamaları kontrolü	Yakıt alma 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 enjeksiyonu	Enjeksiyon zamanlaması	Kısmen ön karışmış yanma

Bahsi geçen tüm çalışmalardan yola çıkarak bütün LTC teknikleri araştırılmış ve RCCI konseptinin avantajları göz önünde bulundurularak bu çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılmasına sebep olan temel faktörler ve bu faktörleri ortaya çıkaran avantajlardan bahsetmek gerekirse; düşük sıcaklıklarda çalıştığı için NO_x ve PM emisyonlarını düşürmesi, yine aynı sebepten ötürü ısı transferi kayıplarını azaltması, yakıt verimliliğini arttırması gibi örnekler verilebilir. Yapılacak olan çalışmalarda daha gerçekçi sonuçların alınabilmesi için deneysel yöntemler kullanılmıştır.

1.6. Ozon Hakkında Bilgiler ve Ozonun Kimyasal Reaksiyonları

Motor performansını etkileyen ve emisyonlar üzerinde etkisi olan diğer bir unsur da, motora gönderilen yakıt kadar önem arz eden, yakıt ile birlikte yakılmak için içeriye giren havadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; motora giren hava içerisindeki oksijen oranını arttırmanın daha iyi bir yanma sağladığı ve emisyon değerlerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür Buradan yola çıkarak; motor içerisine hava ile birlikte ozon gönderilerek, daha iyi bir yanma ve neticesinde emisyon değerlerini düşürmek hedef alınmıştır.

Motorların hava girişinde, yalnız hava yerine ozon ve hava birlikte kullanıldığında oksitleyici bir etki yaratması nedeniyle bu oksidasyon sonucunda bir miktar oksitlenmiş olan yakıtın daha hızlı ve yüksek verimle yanmasını sağlayabilmektedir (McAllister, 1985).

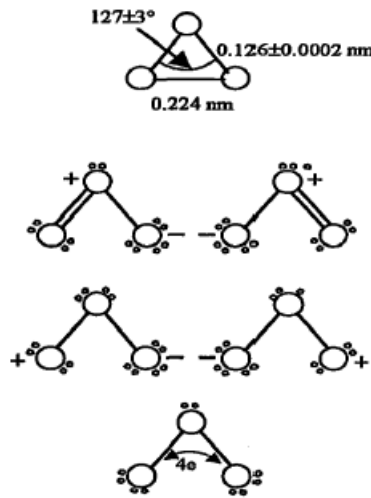
1.6.1. Ozon

Ozon, üç tane oksijen atomunun birleşmesiyle oluşan bir gazdır. Doğal olarak atmosferin en üst kısımlarında bulunur ve herhangi bir renge sahip değildir. Ozon doğada, UV (ultraviyole) ışınlar yada gökyüzünde oluşan yıldırım olayı sonrasında meydana gelen elektriksel patlamanın etkisiyle oksijen moleküllerinin parçalanıp ardından bir oksijen molekülünün üçüncü bir diğer oksijen atomuyla birleşmesinden meydana gelir (Tendero ve ark., 2006). Bilinen pozitif özellikleri arasında mikrop öldürücülüğü, koku gidericiliği, hava temizleyiciliği ve radyasyonlara karşı dünyayı koruması da bulunmaktadır.

Son senelerde popüleritesi artan ozonun yaşamımıza katıldığı alanlar gitgide fazlalaşmış ve buna örnek olarak; suların içerisinde bulunan kokunun giderilmesi (Xu, 1999), kağıt ve kumaş endüstrilerinde renk değişimi ve arıtmada (Rice ve ark., 1982) kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ise özellikle gıda endüstrisinde, ekipman ve su dezenfektasyonlarında da kullanılmaktadır (Ekici, 2006; Öztekin ve ark., 2006).

1.6.2. Ozonun Fiziksel Özellikleri

Oksijen molekülünün allotropu olan ozon aynı zamanda seyreltik halde oksijen ve hava ile karışık vaziyette de bulunabilir. Olağan sıcaklıklarda mavi renkte olmasına rağmen çoğu durumlarda rengi ayırt edilemez. Keskin ve kendine özgü bir kokuya sahip olan ozon, az da olsa kükürt gazını anımsatmaktadır. Doğal şartlarda 0.1 ppm değerlerinden yukarıya çıkmasıyla birlikte insan sağlığına zararı baş göstermektedir (Palou ve ark., 2002). Şekil 1.14'te ozona ait moleküler geometrik yapı ve bağ yapıları verilmiştir.



Şekil 1.14. Ozonun moleküler geometrisi ve bağ yapıları (Horvath, 1985)

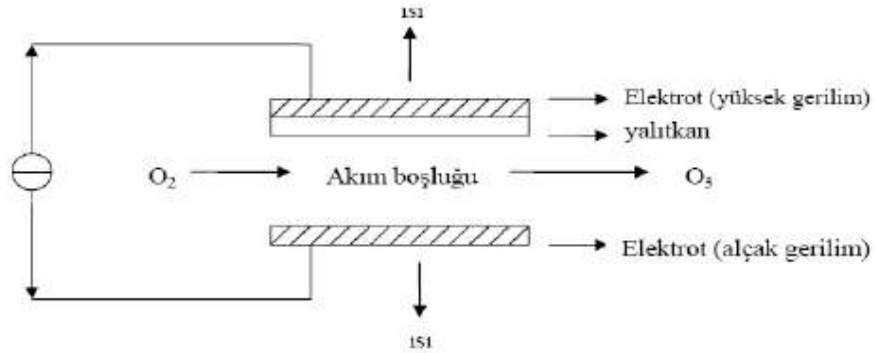
Ozonun doğal olarak oluşumu güneş ışığı, UV ve yıldırımlardır. Bunun yanı sıra birçok yöntemle elde edilebilmektedir. Bunlara elektroliz, fotokimyasal ve radyo-kimyasal tepkimeler ya da oksijenin olduğu ortama elektrik verilmesi örnek olabilir.

1.6.3. Ozonun Kimyasal Özellikleri

Ozon kararlı olmayan bir yapıya sahiptir. Normal basınç ve sıcaklıkta gaz fazında bulunur. Oksijene dönüşme eğilimi yüksek olan ozon 270 °C sıcaklıklarda bu dönüşümünü gerçekleştirmiş olur. Oksijene kıyasla 1.5 kat daha fazla bir yoğunluğa sahip olan ozon, suda çözünürlük konusunda ise oksijene kıyasla 10 kat daha dirençlidir (Eden, 1973). Ozonun kimyasal tepkimeleri moleküler yapısıyla doğru orantılıdır. Ozonun sahip olduğu bir oksijen atomu kolaylıkla ayrılabilir, ancak bu oksijen atomu kararlı yapıda bulunmaz. Bu da ozona oksitleyici bir yetenek kazandırır. Ozon sahip olduğu 2.07 Volt/NHE (normal hidrojen elektrot) değerindeki oksidasyon potansiyeli ile en güçlü oksidasyonlardan biridir.

1.6.4. Ozonun Elde Edilmesi

Ozon şekil 1.15'te gösterilen korona akım metodu adı verilen yöntem ile O₂ moleküllerinin elektrik akımı bulunan bir boşluktan geçirilmesi suretiyle elde edilmektedir.



Şekil 1.15. Korona Akım Metodu Şeması (Rice ve ark., 1981)

Bu ozon üretim tekniğinde, seramik yapıda yalıtkan bir alan ve küçük bir geçiş aralığı ile tamamen ayrı yüksek ve düşük akım elektrotlarından faydalanılmaktadır. Bu Elektronlar gerekli hareket enerjisi seviyesine çıktıklarında ayrılan oksijen moleküllerinin her birinden birer ozon molekülleri oluşur. Eğer jeneratörden hava geçiriliyor ise %1-3 (v/v) ozon üretilirken, saf oksijen kullanımında bu değer %6'lara kadar çıkmaktadır.

1.6.5. Ozonun Kullanım Alanları

Ozon gıda, tekstil, kimya sanayi ve temizlik alanında birçok sektörde kullanılmaktadır. Kararsız yapıya sahip olması ve yüksek okdidasyonluğu sebebiyle dezenfektasyon ve maddelerin ayrıştırılması alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra oksijene dönüşerek arkasında kalıntı bırakmadığı için yan ürün oluşumu bakımından oldukça düşüktür. Aynı zamanda renk açıcı olma özelliğinden ötürü, tekstil sanayisinde ağartma ve beyazlatma gibi işlemlerde kullanılmaktadır (Ölmez vd., 2003). Ozonun gıda sektöründe kullanılması ise özellikle meyve ve sebzelerin muhafaza edildiği kapların sterilizasyonunda karşılaşılmaktadır. Bunu yanı sıra bir bitki hormonu olarak bilinen etileni oksidasyon işlemine tabi tutarak muhafaza süresini uzatmakla birlikte, depolamadan önce soğutma işleminin yapılmasındaki suyun dezenfektasyonunu da gerçekleştirmesinde kullanılacağını (Langlais vd., 1991) belirtmişlerdir. Bunun yanında düşük sıcaklıklı ortamlarda depolamada etkilerinden diğeri de sebze ve meyvelerin olgunlaşma süresinin azaltmış olduğu belirtilmektedir. (Rice ve ark., 1982). Bir diğeryandan ozonun, kirli ve atık sularda yüksek oranlarda renk ve koku giderici özelliği vardır, maliyet bakımından diğeryaşeneklere göre atık arıtma maliyeti daha uygundur (Yüksel, 2010).

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında, geleneksel dizel motorların çevreye verdiği zararı en aza indirmek ve daha verimli bir yanma sağlamak amacıyla RCCI yanma konsepti kullanılmıştır. RCCI konseptinin bunları mümkün kılması temel olarak yanmanın daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlamasıyla açıklanabilir. Önceki bölümlerde verilen bilgiler ve incelenmiş olan literatür çalışmalarından yola çıkarak; çalışmada kullanılan teknikler, kurulum aşamaları ve çalışma şekilleri alt başlıklar halinde verilecektir. Öncelikli olarak kurulum aşamaları, kullanılan materyal ve cihazlar anlatılacak olup daha sonra deneyin işlenmesi ayrıntılı olarak aktarılacaktır. Elde edilen motor parametreleri silindir içerisine yerleştirilen bir basınç sensörü ve bu sensörle senkronize bir şekilde çalışan motor krank mili çıkışına bağlanan enkoder vasıtasıyla alınacak olup, bu veriler bilgisayara aktarılıp bilgisayar içerisinde yanma analiz programında işlenip, işlenen bu veriler grafiklerle sunulacaktır. Motorda, RCCI sisteminin getirmiş olduğu ikinci enjektör ve bunu kontrol etmek amacıyla kullanılan diğer enkoder ise yine krank miline bağlanmış olup, yakıt kontrol sistemi aracılığıyla kontrolü sağlamaktadır.

Çalışmadaki asıl amaç, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda dizel ve izooktanın, ozon ile birlikte kullanılması sonucunda elde edilecek olan motor çalışma bilgileri, performans test verileri ve egzoz emisyonu ölçüm sonuçlarını karşılaştırmaktır.

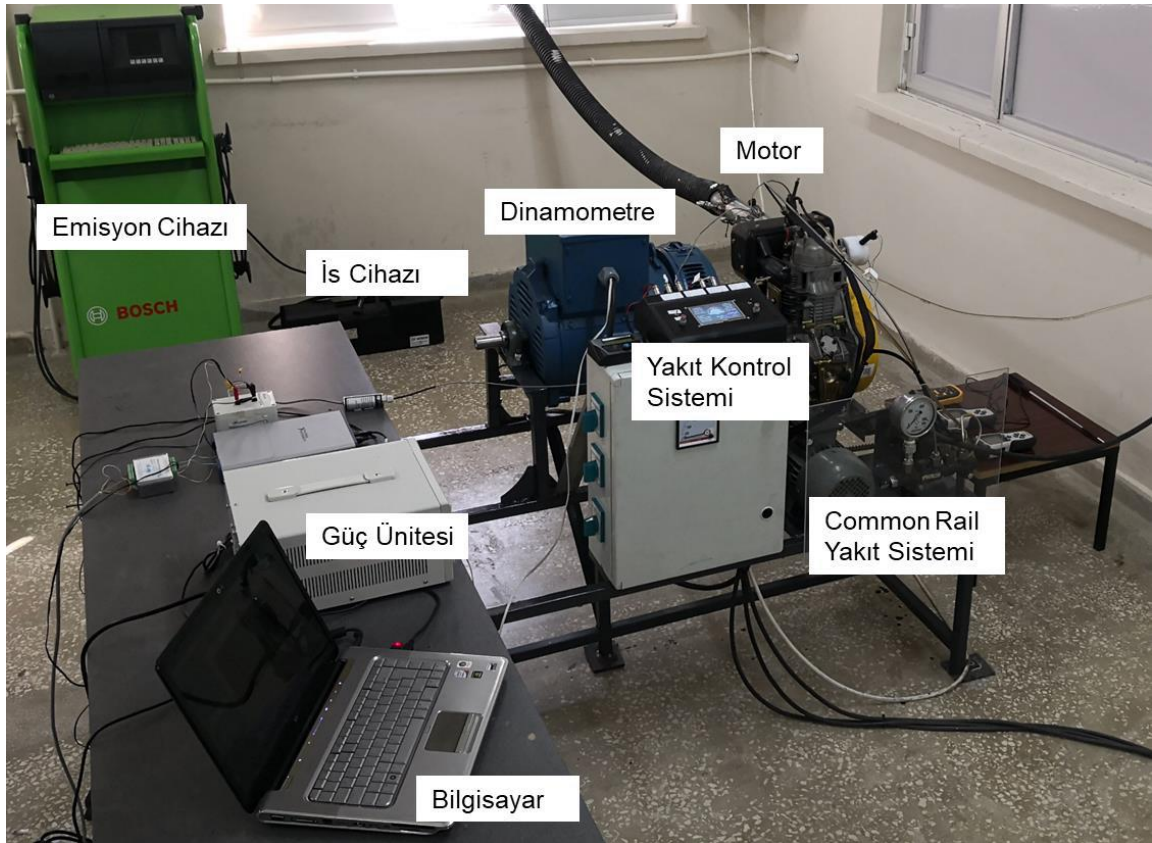
2.1. Deneysel Materyal

Yapılan çalışmalar Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünde bulunan motor test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda LRF olarak izooktan kullanılmış ve motora hava girişi ozon ile desteklenmiş olup, reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda, ozon ilavesi ile birlikte çalışması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan materyaller, test donanımları, cihazlar ve bu cihazların sahip olduğu yazılımlar bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu bölümde kurulum aşamaları ve kullanılan materyaller anlatılacaktır.

2.1.1. Deneysel Kurulum ve Deney Setinin Tanıtılması

Deney seti oluşturulurken ilk olarak kullanılacak olan motorun kurulumu yapılmış olup ardından bu motora bir elektrikli dinamometre bağlanmıştır. Deneyler yapılırken gerekli yük bu şekilde verilmiştir. Bunu takriben gerekli hesaplamalar yapıp, emme portu üzerinde modifikasyon yapılarak yanma odasına en yakın olacak şekilde LRF enjektörü ve ardından da HRF yakıtının motora gönderilmesi için kullanılacak olan dizel enjektörü motora monte edilmiştir. Bu enjektörleri kontrol etmek ve oranlarını belirlemek için bir sürücü tasarlanmıştır.

HRF yakıtının; gerek motor verimine gerek ise yanma sonu emisyonlarına etkileri düşünülerek common rail sisteminin deney seti üzerine kurulumu sağlanmıştır. Böylece depodan gelen yakıt önce bu sisteme girip daha sonra istenilen yüksek basınçta silindir içerisine gönderilmiştir. Motor krank miline bir enkoder ve motor üst kapağına bir basınç sensörü yerleştirilerek, motordan verilerin alınması sağlanmıştır. Bu veriler bilgisayarda yanma analiz programı kullanılarak derlenmiştir. En iyi ve en gerçekçi sonuçları elde etmek için olabildiğince ayrıntılı ve spesifik bir deney seti kurulmuştur. Deney setinin genel görünümü şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Deney setinin genel görünümü

Yapılan deneylerde tek silindire sahip KIPOR marka KDP40E model, yaklaşık olarak 0.406 litre silindir hacminde dört zamanlı bir dizel, hava soğutmalı motor kullanılmıştır. Motora ait görsel şekil 2.2’de verilmiştir.



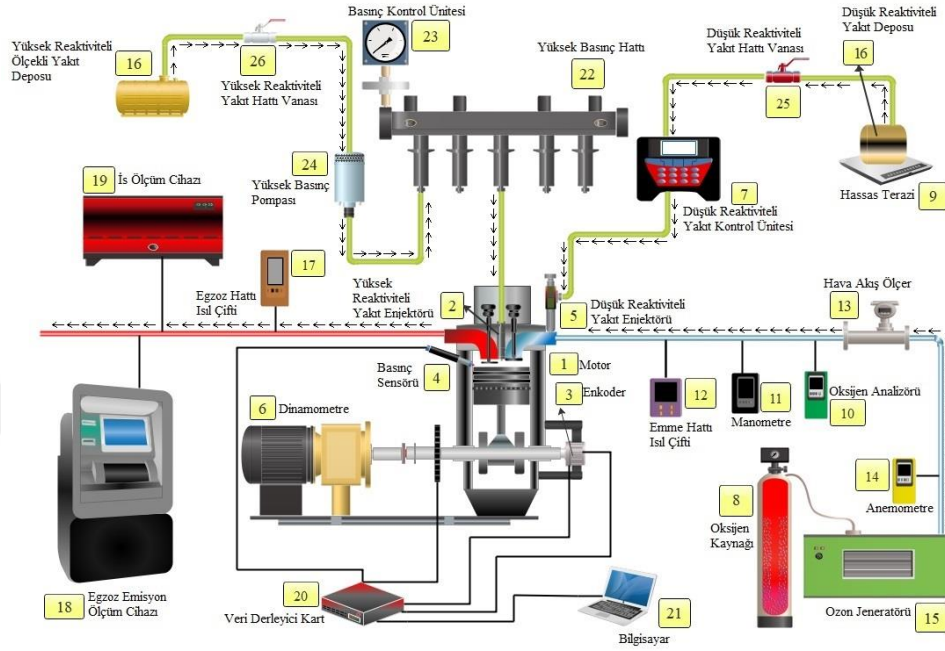
Şekil 2.2. Deneylerde kullanılan motora ait görsel

Motora ait teknik özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan motora ait teknik özellikler

	Teknik Özellikler
Motor Tipi	Sıkıştırma Ateşlemeli
Yakıt Tipi	Direkt Enjeksiyon
Marka	Kipor
Silindir Hacmi	406 cc
Silindir Sayısı	Tek Silindir
Çap	86 mm
Strok	70 mm
Sıkıştırma Oranı	18:1
Enjektördeki Nozul Sayısı	6
Enjektör Sistemi	Common rail direkt püskürtme
Soğutma Tipi	Hava
Maksimum Devir (d/d)	3600
Maksimum Tork (Nm)	25.7
Maksimum Güç	10 BG
Maksimum Tork Devri (d/d)	2400

Motorun sisteme adaptasyonun sağlanmasının ardından sistemdeki diğer cihazların uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deney setine ait şematik gösterin şekil 2.3'te görülmektedir.



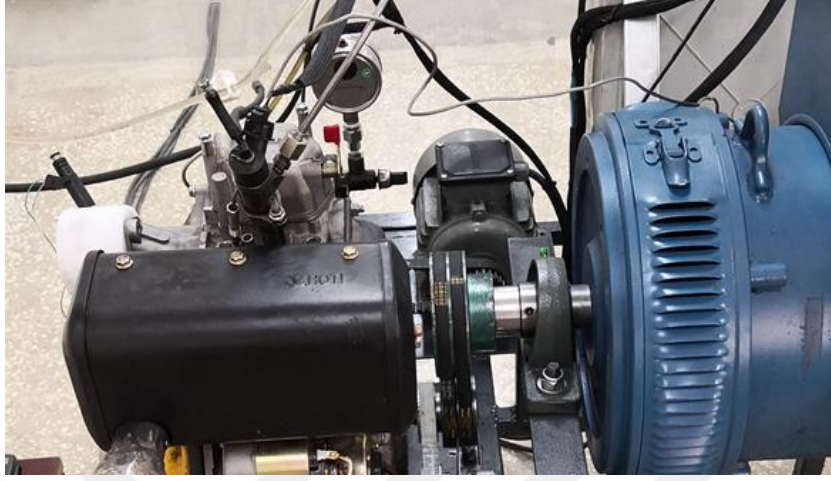
Şekil 2.3. Deney setinin şematik olarak görünümü

Ölçümlerin ve anlık olarak motora ait verilerin alınmasını sağlamak için basınç sensörü, krank açısı sensörü ve yanma analiz sistemine ait donanımsal parçaların motora bağlantısı yapılmıştır. Kullanılan krank açısı sensörü Kübler marka ve 8.5000.8344.0360 üretici ürün numarasına sahip, 360 sinyal sıklığıyla çalışan bir enkoderdir. Bu enkoder bir kayış kaynak sistemi kullanılarak, motorun krank mili çıkışına bağlanmıştır. Kullanılan basınç sensörü Optrand marka D33288-GPA koduna sahiptir. Bu motor üst kapağının bir takım modifiyelerden geçirilmesinin ardından motora uygulanmıştır. Bu sensör yardımıyla motordan 200 çevrim boyunca veri alınıp bu verilerin ortalamasıyla motor performansına ait grafikler çıkartılmıştır. Elde edilen veriler bir bilgi toplama kartı vasıtasıyla bilgisayara aktarılıp kaydedilmiştir.

2.1.2. Yakıt Enjeksiyon Sisteminin Kurulumu ve Tanıtılması

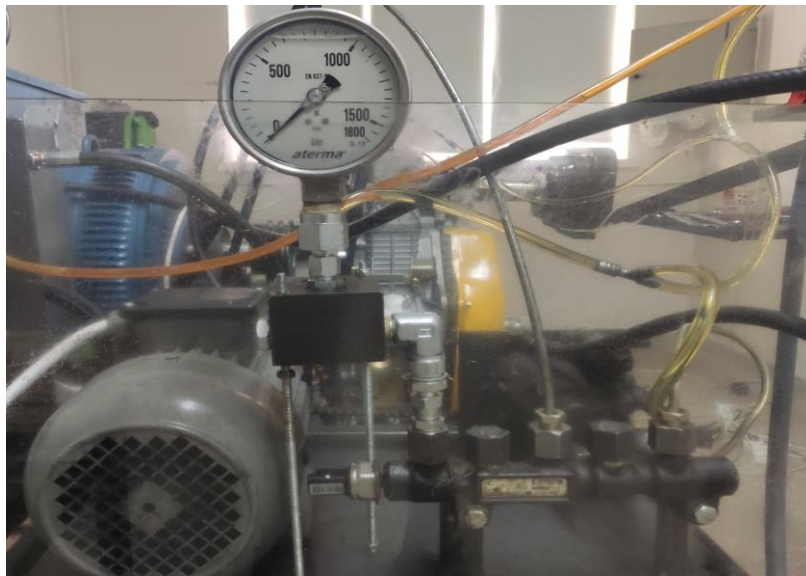
Bu bölümde; motor üzerindeki gerekli modifiyeler ve sensörlerin uygulanması bittikten sonra, yapılan çalışmanın temelini oluşturan yakıt sistemi ve bu sistemini oluşturan donanımlar ile bu donanımları kontrol edecek yazılımlar anlatılacaktır. Yakıt sistemini oluşturan ana elemanlar ve bu tez çalışmasının özgün olmasında önemli rol oynayan HRF ve LRF enjektörleri, common rail sistemi, ortak basınç hattı ve tüm bunları kontrol edecek yazılım ile yazılıma ait

kontrol ünitesidir. Şekil 2.4, 2.5 ve 2.6’da yakıt sistemine ait bazı elemanların görselleri verilmiştir.



Şekil 2.4. HRF yakıt enjektörüne ait görsel

Motorda yapılan tüm çalışmalar gerçekleşirken daha spesifik ve özgün olması açısından bir takım değişiklikler yapılmıştır. Başlıca olarak common rail sistemi deney motoruna uyarlanıp bağlantısı sağlanmıştır. Common rail sistemi doğrudan kontrol ünitesine bağlıdır. Yakıt depodan gelerek önce yüksek basınç hattına girip ardından yaklaşık 300 bar basınçla enjektörler üzerinden silindir içerisine püskürtülmüştür. Bu hat üzerinde bulunan 2 pompadan birisi yakıtı depodan çekerken diğeri de istenilen basınçta silindire göndermektedir. Common rail sistemine ait görsel şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5. Ortak basınç hattı ve basınç pompası

Daha öncede anlatıldığı gibi direk motor üzerine yerleştirilen enjektör sayesinde yüksek reaktiviteli yakıt gönderilirken, emme portuna yerleştirilen enjektör sayesinde silindir içerisine düşük reaktiviteli yakıt gönderilmektedir. Bu enjektörlerden gönderilen yakıtı kontrol etmek için kontrol ünitesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ünitenin yazılımı sıfırdan yapılmıştır. Bu kontrol ünitesi motora bağlanan enkoderden almış olduğu verilere göre, düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtları, enjektörler vasıtasıyla silindir içerisine; istenilen süre, devir sayısı ve enjeksiyon zamanında yakıt gönderilmesini sağlamaktadır. Tüm bunların kontrolü şekil 2.6'da verildiği üzere bir dokunmatik LCD ekran aracılığıyla yapılmaktadır. Bu ekran sayesinde kontrol sistemi daha anlaşılabilir ve kullanıma uygun hale gelmiştir.



Şekil 2.6. HRF ve LRF sisteminin kontrol ünitesine ait arayüz

2.1.3. Ozon Üretilmesi ve Kullanımı

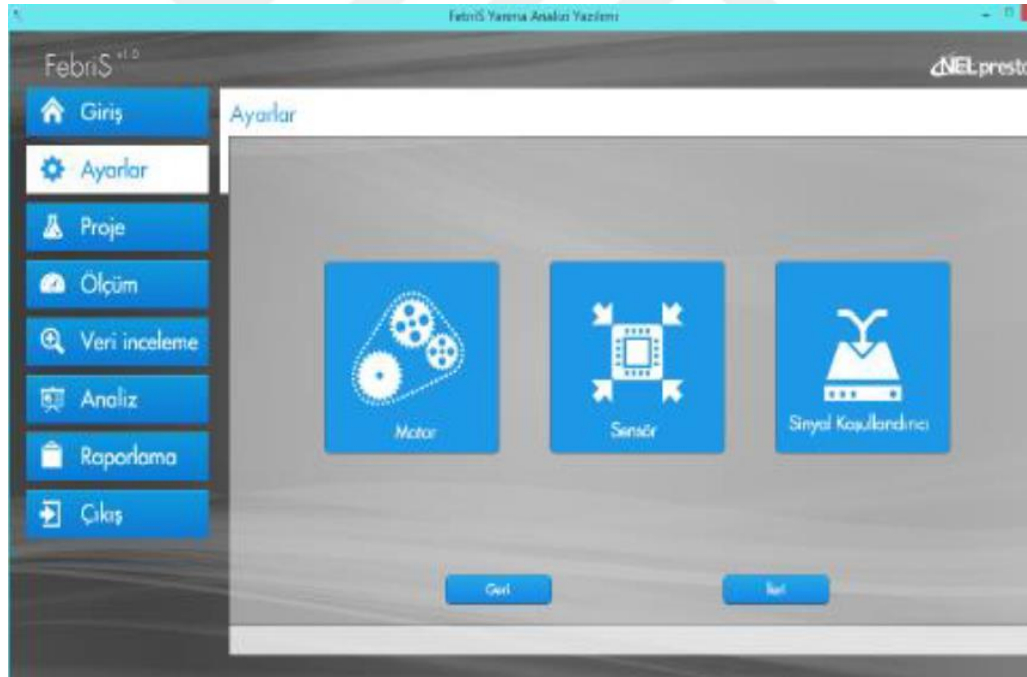
Deneyler yapılırken üretilecek ozon için kuru havadan 6 gram/saat ozon üretme kapasitesine sahip ozon jeneratör sistemi kullanılmıştır. Kullanılan bu jeneratör sistemi temel olarak; bir zamanlayıcıya sahip, endüstriyel olarak tasarlanmış bir ozon üretim reaktörü ve soğutma sistemi, frekansı ve akımı belirli aralıklarda ayarlanabilen bir güç kaynağından oluşmaktadır. Deneyler yapılırken silindir içerisine gönderilen ozon, 6 gr/saat kapasiteye sahip ozon jeneratörü tarafından üretilmektedir. 6 gr/saat deney planında istenilen değerler için düşük kalmaktadır. Bu yüzden cihaz, çıkış miktarı ayarlanabilir bir oksijen tüpü kullanılarak saf oksijen ile beslenmiştir. Bu aşamalar daha detaylı olarak metot kısmında anlatılacaktır. Kısaca ozon cihazının hava giriş portuna, tüp vasıtasıyla saf oksijen verilmiştir. Jeneratörün çıkışından alınan hava bağlantı borusunun diğer ucunun motor emme portunun iç kısmına montajlanmasıyla, ozonun kayıpsız olarak direkt olarak motorun silindir içerisine gönderilmesi sağlanmıştır. Tablo 2.2'de saf haldeki ozona ait özellikler verilmiştir.

Tablo 2.2. Saf haldeki ozonun özellikleri (EPA, 1986).

Moleküler Ağırlık	48 g
Erime Noktası	-192,5 °C
Kaynama Noktası	-112 °C
Kritik Sıcaklık	-12.1 °C
Kritik Basınç	54.6 atm
Kritik Hacim	111 cm ³ /mol

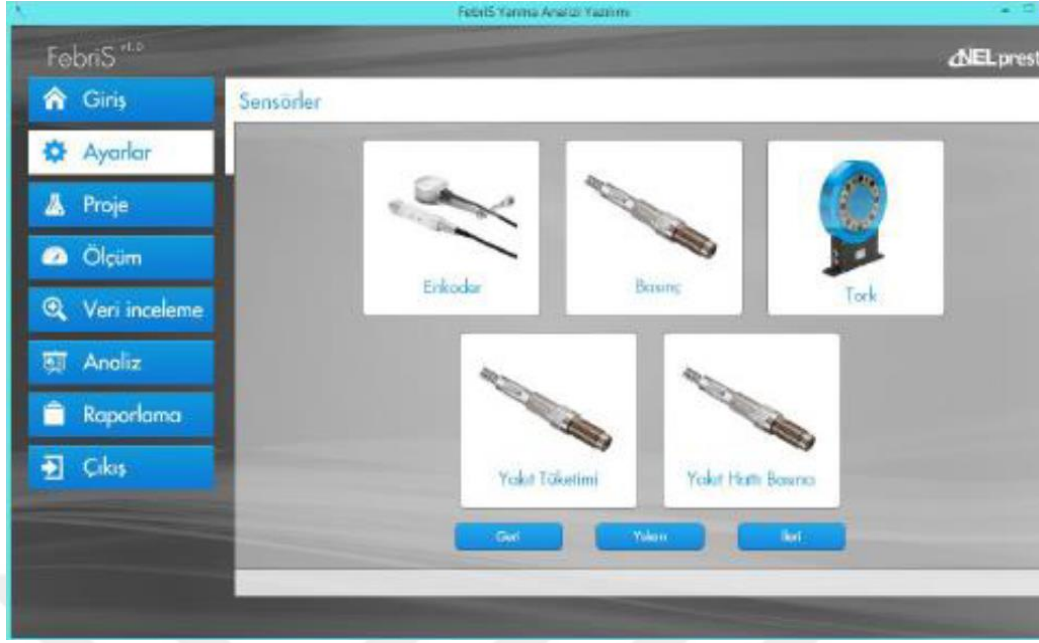
2.1.4. Ölçüm Ara Yüzü ve Emisyonların Ölçümünde Kullanılan Cihazların Tanıtılması

Motora ait ölçümlerin yapılabilmesi için krank ve basınç sensörlerinin motora montajının ardından, deney esnasında toplanan veriler kart yardımıyla anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılır. Tüm çalışmalarda yanma analizini gerçekleştirmek için Febris marka yazılım sistemi kullanılmıştır. Bu yazılıma ait görseller şekil 2.7-2.9 aralığında verilmiştir.



Şekil 2.7. Yanma sisteminin ara yüzüne ait görsel

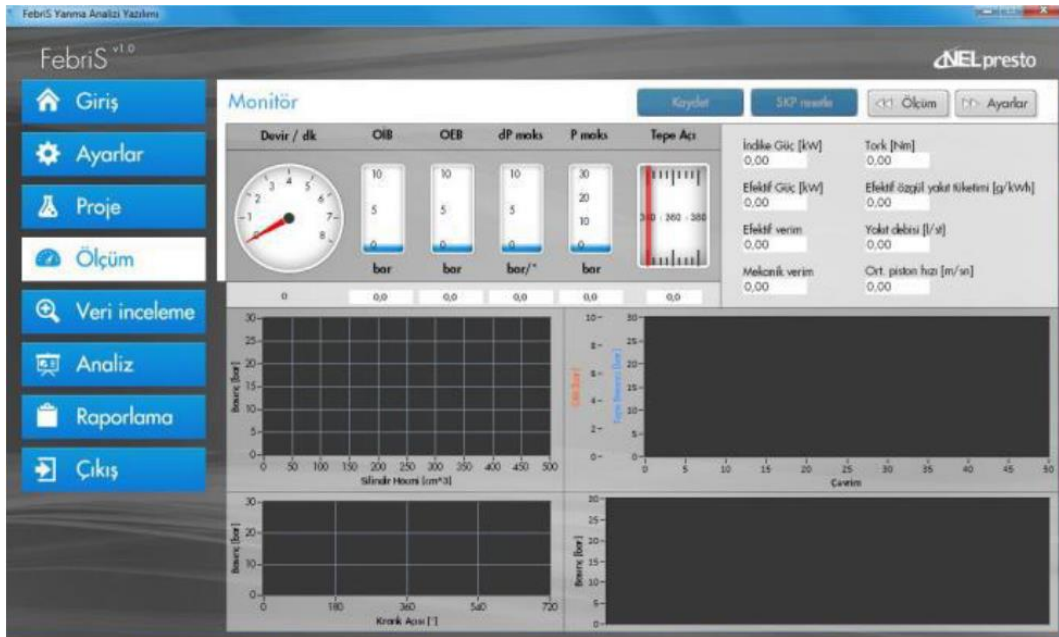
Programa giriş yapılmasının ardından sol kısımda menüler bulunmaktadır. Çalışmaya başlanmadan önce ayarlar kısmına girilip daha sonra motora ait teknik bilgiler girilmiştir. Yazılım, girilen bu teknik bilgiler ışığında motorun silindir hacmini hesaplamıştır. Bu ayarlar yapıldıktan sonra verilerin doğru bir şekilde aktarılması için sensörlerin kalibrasyonu Şekil 2.8'deki ekran üzerinden yapılmıştır.



Şekil 2.8. Sensör ayarlarına ait görsel

Ölçümlerin yapılabilmesi için, kendi menüsü üzerinden her sensör yazılıma ayrı ayrı tanıtılmıştır. Bilgilerin aktarılmasında kullanılan veri derleyici kart içerisinde, hangi kanala bağlı olacağı yazılıma aktarılmıştır. Daha sonra silindirin üst ölü noktası bulunup bu noktaya göre yazılım üzerinden enkodere sıfır noktası atanmıştır.

Proje ekranından sensörler aktif hale getirildikten sonra ölçüm ekranına geçilmiş ve motor çalıştırılıp parametreler kontrol edilmiştir. Şekil 2.9'da ölçüm ekranı görülmektedir.



Şekil 2.9. Ölçüm ekranına ait görsel

Deney esnasında ölçümlerin alındığı sırada kullanılan ekran Şekil 2.9’da verilmiştir. Şekil 2.9 incelendiğinde silindir hacmi ve krank mili açısına göre basınç değişimleri, OİB (ortalama indike basınç) ve OEB (ortalama efektif basınç)’ler, devir sayısı ve güç değerleri anlık olarak görülmektedir. Ölçümler periyotlar halinde yapılmış olup yüzlerce çevrim tekrarlandıktan sonra, alınan veriler kaydedilmiştir.

Bu ekrana yansıyan veriler temel olarak yanma esnasında, silindir içerisinde gerçekleşen olay örgüsünün neticesinde ortaya çıkan gazların neden olduğu silindir içi basıncı ve hacmi kullanarak hesaplanmasıyla oluşur. Buradan; Termodinamiğin birinci yasası kullanılarak ısı salınım oranı denklem 2.1’de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{y}{y-1} \rho \frac{dV}{dQ} + \frac{1}{y-1} V \frac{d\rho}{d\theta} \quad (2.1)$$

Yanma analiz sistemine ait yazılımda vuruntu yoğunluğunu tespit etmek için 3. Türev denklemi kullanılmıştır (Checkel, 1986).

$$\frac{dp(\theta)}{1118d\theta} = \frac{[86(p_{i-4} - p_{i+4}) + 142(p_{i+3} - p_{i-3}) + 193(p_{i+2} - p_{i-2}) + 126(p_{i+1} - p_{i-1})]}{1118d\theta} \quad (2.2)$$

Deneyler gerçekleştirilirken anlık olarak yakıt sıcaklıkları, emme portundan giren havanın sıcaklığı ve dışarıya atılan egzoz gazı sıcaklığı bir K tipi ısıl çift ile ölçülmüştür. Tüm deneylerde egzoz emisyonları ve is olarak adlandırılan duman opaklığı ölçümü Bosch markasına ait BEA 350 model egzoz emisyon cihazında gerçekleştirilmiştir. Emisyon değerleri her deney için beşer dakika boyunca ölçülmüş, daha sonra bu değerlerin bir ortalaması alınarak motor emisyonuna ait veriler elde edilmiştir. Bu cihazlara ait özellikler tablo 2.3 ve 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.3. Egzoz emisyon cihazına ait teknik özellikler

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

Literatür çalışmaları incelendiğinde; is emisyonu olarak partikül madde, duman opaklığı ve kurum gibi kelimelerin kullandığı görülmektedir. Bilgi vermesi açısından is emisyon cihazı üzerinde duman opaklığı ölçümü yapılmış olup Tablo 2.4'te bu cihaza ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.4. İs ölçüm cihazının teknik özellikleri

Ölçüm Parametreler	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

Tablo 2.5'te ise egzoz emisyon cihazları için bakanlığın belirlemiş olduğu maksimum hata oranı verilmiştir.

Tablo 2.5. Egzoz emisyon için hata sınırlamaları (Çelik, 2019)

Parametre	O Sınıfı	I Sınıfı
CO Oranı	± %0.03 hacim ± %5	± %0.06 hacim ± %5
CO₂ Oranı	± %0.5 hacim ± %5	± %0.5 hacim ± %5
HC Oranı	± 10 ppm hacim ± %5	± 12 ppm hacim ± %5

2.1.5. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar

Deneylerde iki farklı yakıt kullanılmıştır. Literatür çalışmaları incelenip gerek kimyasal özelliği, gerek yanma özellikleri, gerek ise yanma sonu emisyonları bakımından düşük reaktiviteli yakıt olarak izooktan kullanılması uygun görülmüştür. Yüksek reaktiviteli yakıt olarak ise dizel kullanılmıştır. Bu iki yakıtta ait özellikler tablolar halinde verilmiştir.

Deneylerde kullanılan dizel yakıtın kimyasal özellikleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6. Dizel yakıtı ait özellikler

Özellikler	Dizel
Kimyasal formül	C ₁₃ H ₂₈
Yoğunluk (kg/m ³ , 15 °C)	829.4
Parlama noktası (°C)	67
Kinematik viskozite (mm ² /sn, 40 °C)	2.889
Yakıt alt ısı değeri (MJ/kg)	43.14
Setan sayısı	56
Adyabatik alev sıcaklığı (K)	2327
Karbon kalıntısı (% , m/m)	0.3
Kül (% , m/m)	0.001
Kükürt (mg/kg)	0.05
Stokiyometrik H/Y oranı	14.7
Kaynama noktası (°C)	180-350
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250
Karbon oranı (%)	80.13
Azot oranı (%)	0.61
Oksijen oranı (%)	12.86
Hidrojen oranı (%)	6.35

Deneylerde LRF olarak kullanılan izooktan’a ait teknik özellikler Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. İzooktana ait özellikler (^aÇınar, 2015; ^bTang, 2020)

Özellikler	İzooktan
Yoğunluk (kg/m ³)	693
Kaynama noktası (°C)	99
Parlama noktası (°C)	-12
Kinematik viskozite (mm ² /sn)	0.72
Yakıt alt ısı değeri (MJ/kg)	44.31 ^b -44.8 ^a
Gizli buharlaşma ısı (kJ/kg)	283
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	415
Setan sayısı	11-17
Oktan sayısı	100 ^b

2.2. Deneysel Metot ve Çalışma Parametreleri

Bu tez çalışması yapılırken; direkt enjeksiyon ve common rail sistemine sahip, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda, yüksek reaktiviteli yakıt olarak dizel kullanılmış olup, düşük reaktiviteli yakıt olarak izooktan kullanılmıştır. Motor emme portu üzerinden kademeli olarak farklı oranlarda ozon verilmek suretiyle beslenmiştir. Deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan parametreler tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Deneysel parametreler

Parametre	RCCI	Dizel
Motor yükü	20, 40, 60	20, 40, 60
Sabit Motor Devri	2400	2400
E _{toplam} (J/çevrim)	190@0yük, 310@20yük, 440@40yük, 590@60yük	190@0yük, 310@20yük, 440@40yük, 590@60yük
Dizel enjeksiyon basıncı (bar)	300	300
HRF enjeksiyon zamanı (°KA ÜÖNÖ)	21KA	21KA
RCCI oranı % (karışım oranı)	15, 30, 45	--
LRF enjeksiyon basıncı (bar)	5	--
LRF enjeksiyon zamanlaması (°KA ÜÖNS)	15	--
Kullanılan HRF	Dizel	Dizel
Kullanılan LRF	İzooktan	-----
Kullanılan Ozon Oranları (ppm)	100, 200, 300	100, 200, 300

Deneyler yapılırken; maksimum tork devri olan 2400 d/d sabit tutularak, belirli yüklerde gerçekleştirilmiştir. Bu yükler %20 motor yükünden başlayıp %40 ve %60 motor yüküne kadar yapılmıştır. Yapılan tüm deneylerde %20, %40 ve %60 yükleri sabit olarak verilmiştir. Burada yüzdelik olarak verilen yük değerleri, motorun sahip olduğu maksimum torkun; yani 25.7 Nm’nin yüzdesel oranları ile hesaplanıp bulunmuştur. Örnek verilecek olunursa; %40 motor yük değeri yaklaşık 10.3 Nm’ye denk gelmektedir. Enjeksiyon zamanlamaları tüm deneylerde sabit tutulmuştur.

Deneylerde; maksimum torku 25.7 Nm olan motorda, %100 dizel ve ozon, dizel-izooktan ve ozon olarak, farklı RCCI oranlarında ve farklı yükleme koşullarında çalışılmıştır. Yapılan her deney; motor sabit yükte tutulmak kaydıyla, yakıt oranlarının belirlenip, ozon oranlarının kademeli olarak arttırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler yapılırken HRF enjeksiyon zamanı 21 °KA’da gerçekleştirilmiştir. Ozon miktarı, her bir deneyde; 0, 100, 200 ve 300 ppm halinde kademeli artırılarak seçilmiştir. Çalışmada, yanma odasına gönderilecek olan ozon oranlarına

ilişkin parametreler belirlenirken; mevcut deney seti ekipmanlarının optimum çalışma kapasitelerine bağlı kalmak kaydıyla, literatürde yer alan çalışmalar referans alınmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında; ozon kontstrasyonun artmasıyla birlikte yanma başlangıcındaki alev hızının ve silindir içi sıcaklığın arttığı görülmektedir (Gong vd., 2018; Masurier vd., 2015). Bilinmektedir ki silindir içi sıcaklığın artışı NO_x emisyonlarının artışına sebep olmaktadır. Yüksek ozon konsantrasyonlarında silindir içi sıcaklık artışının yükselmesiyle, NO_x emisyonlarının artışın daha da yükselmesine neden olduğu; literatürdeki çalışmalarda da görülmektedir (Alipour vd., 2020; Tachibana vd., 1991, Salahi vd., 2019). Düşük ozon konsantrasyonlarında (50ppm ve altı) ise beklenen etkiler görülememiş ve yetersiz kalmıştır. Tüm bu parametre sınırlamaları göz önünde bulundurularak, bu çalışmadaki deneysel prosesler 0-300 ppm aralığında ozon konsantrasyonlarıyla gerçekleştirilmiş olup; sırasıyla 0 ppm'den başlanarak, 100 ppm, 200 ppm ve 300 ppm miktarlarında ozon gazı yanma odasına gönderilmiştir.

Kapasitesi 6gr/h olan ozon cihazına hava alma portu üzerinden bir oksijen tüpü bağlanarak saf oksijen ile besleme yapılmıştır. Daha sonra istenilen kademeler cihaza ait olan, ozon çıkış miktarını kontrol eden ayar saatinden yürütülmüştür. Burada verilen ozon miktarları; 0 ppm, 100 ppm, 200 ppm ve 300 ppm olarak belirlenmiştir. İlk olarak motor sadece dizel yakıt ile çalıştırılarak, %20 yük sabit tutulup ozon oranları 0, 100, 200 ve 300 ppm değerleri ölçülmüştür. Daha sonra yine sadece dizel yakıt kullanılarak aynı oranlar %40 ve %60 yükte gerçekleştirilmiştir. Ardından RCCI enjektörü aktif hale getirilip, ilk aşamada %15 LRF ve %85 HRF gönderilerek; 0, 100, 200, ve 300 ppm ozon oranları; %20, %40 ve %60 yüklerde ölçülüp sonuçlar alınmıştır. Ardından %30 LRF ve %70 HRF gönderilerek, 20, 40 ve 60 yüklerde, ozon oranları aynı şekilde kademeli olarak silindire gönderilmiştir. Son olarak %45 LRF ve %55 HRF gönderilerek aynı şartlar altında deneyler yapılmış ve sonuçlar alınmıştır.

Düşük reaktiviteli yakıt motora gönderilmeden önce karışım oranlarının belirlenmesinde çevrim başına enerji metodu kullanılmıştır. Tablo 2.8'de de görüleceği üzere E_{toplam} enerji içeriğini göstermektedir. Burada toplam enerji miktarı, her motor yükünde farklı olacağı için LRF karışım oranı her yüke ait enerji miktarına göre belirlenmiştir. Örnek verilecek olunursa, %60 motor yükünde sadece dizel kullanımında motora 590 (J/çevrim) değerinde bir enerji verildiği belirlenmiştir. Bu yük değerinde %30 LRF karışım oranıyla çalıştırılması planlanmaktadır. Bu sebeple, motor normal haliyle %60 yükte motora verilen 590 (J/çevrim) toplam enerji değerinin, %30'luk kısmı LRF ve %70'lik kısmı HRF olarak motora gönderilmesi istenmiştir. Buna istinaden %60 motor yükünde, RCCI karışım oranında %30 LRF ve %70 HRF deneylerinin yapıldığı belirtilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde hacimsel veya kütsel oranlarla hesaplanan oranlar yerine bu yöntemin daha fazla kullanıldığı görülmüştür. Kullanılan yakıtlar farklı olduğundan dolayı bunlara ait özelliklerinde farklılık göstermesi olağandır. Bu yüzden hata

oranı daha düşüktür. Bu yüzden her çevrim için verilen enerji sabit alınıp, karışım oranı bunun üzerinden hesaplanmıştır.

Denklem 2.3'te buna ait hesaplama verilmiştir (Okçu, 2021).

$$KO = \frac{M_L + Hu_L}{M_L x Hu_L + M_H x Hu_H} \quad (2.3)$$

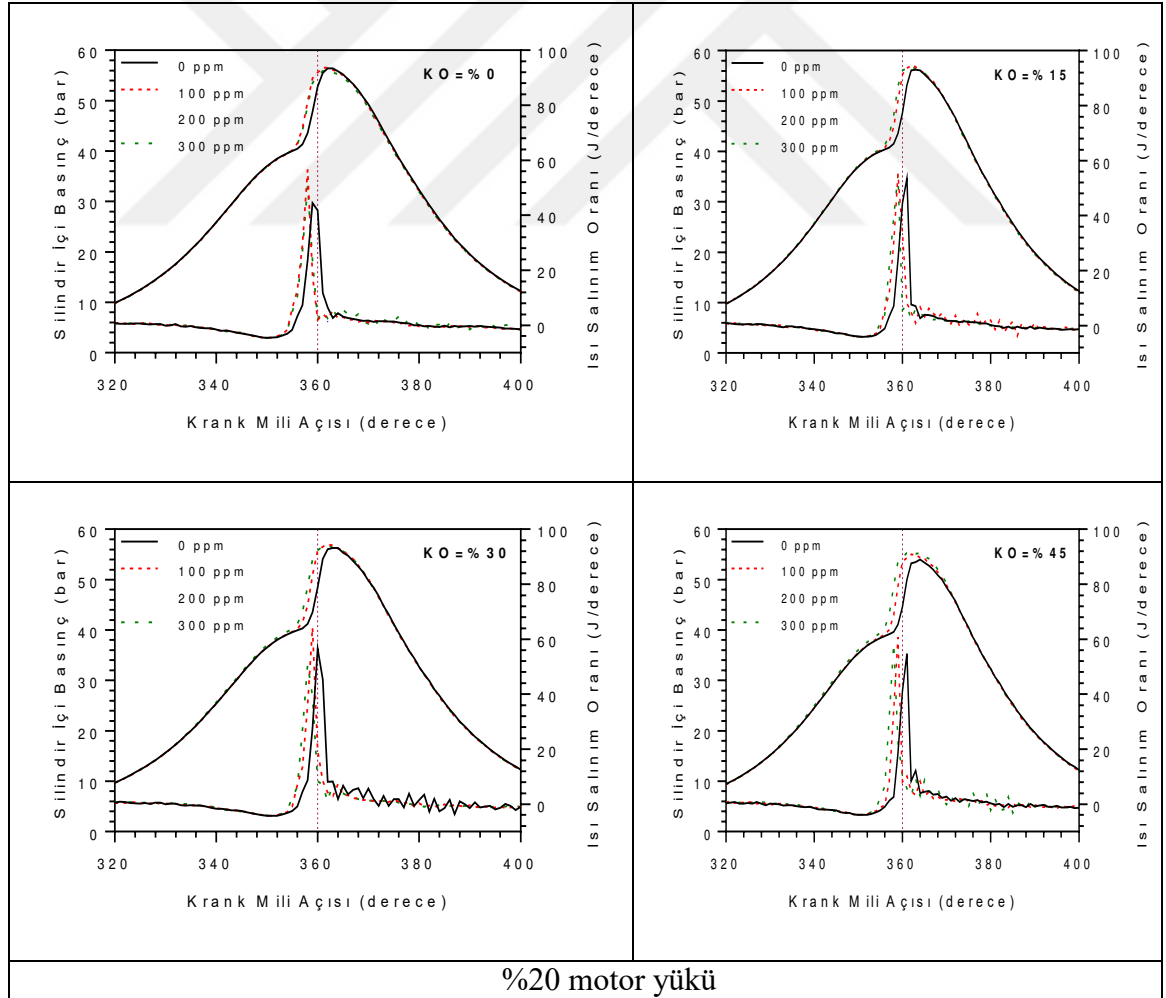
Burada KO karışım oranını, M yakıtların kütesini, H_u yakıtların alt ısı değerlerini, alt indislerdeki L ve H ise sırasıyla LRF ile HRF'yi yani düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtları ifade etmektedir.

Son olarak deneyler yapılırken sıralama şu şekilde olmuştur. Örnek verilecek olunursa; motor %20 yük durumunda, %15 RCCI oranında ve 100 ppm ozon oranında motorun bir deneye karşılık gelmektedir. İlk etapta kullanılacak yakıtlar ait olduğu depolara doldurulmuş ve hazır hale getirilmiştir. Daha sonra sistem güvenlik amaçlı kontrol edilip gerekli tüm bağlantılar yapılmıştır. Ardından hem HRF hem LRF yakıt pompaları çalıştırılarak yakıtın belli bir süre ideal ısıya gelmesi sağlanmıştır. Yakıtların bir miktar ısınmasının ardından motor çalıştırılıp, bir süre yüksüz şekilde rölanti devrine yakın bir şekilde çalıştırılıp, gerek ideal çalışma sıcaklığına gelmesi gerekse de tüm parçalarının sağlıklı bir şekilde yağlanması için beklenmiştir. Ardından deney planına bakılıp yapılacak olan deneye göre, dinamometreye bağlı güç kaynağı üzerinden gerekli yüklemeler ve yakıt sisteminin ekranı üzerinden her iki yakıt içinde istenilen oranlarda motora gönderilmiştir. Daha sonra dijital kronometrede süre başlatılıp aynı anda HRF deposunda bulunan yakıt miktarı mililitre cinsinden % 0.1 hassasiyetle not edilmiştir. Anlık olarak motora giren ve çıkan hava debileri ölçülüp; emme, egzoz ve ortam sıcaklıkları ölçülmüştür. Deney başlandığı andan itibaren, emisyon ve ısı ölçüm cihazlarının problemleri, egzoz borusundaki kendine ait olan yerlerine takılıp ölçülmüş, değerler aralıklarla devamlı not edilerek bu değerlerin ortalaması alınıp daha sağlıklı ve gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bunlar olurken aynı şekilde Febris yazılımı kullanılarak, bütün parametreler üzerinden değerler alınıp kaydedilmiştir. Yapılan her deney arasında motorun soğuması, ve yine sonraki deneyin de aynı şartlarda gerçekleşmesi için motor kapatılmış ve beklenmiştir. Her deney başlangıcında motor, egzoz ve yakıt sıcaklıkları kontrol edilip aynı veya çok yakın sıcaklıklarda başlanmıştır. Bu işlemler aynı sırayla tekrarlanmış olup, deneyler sırasında herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

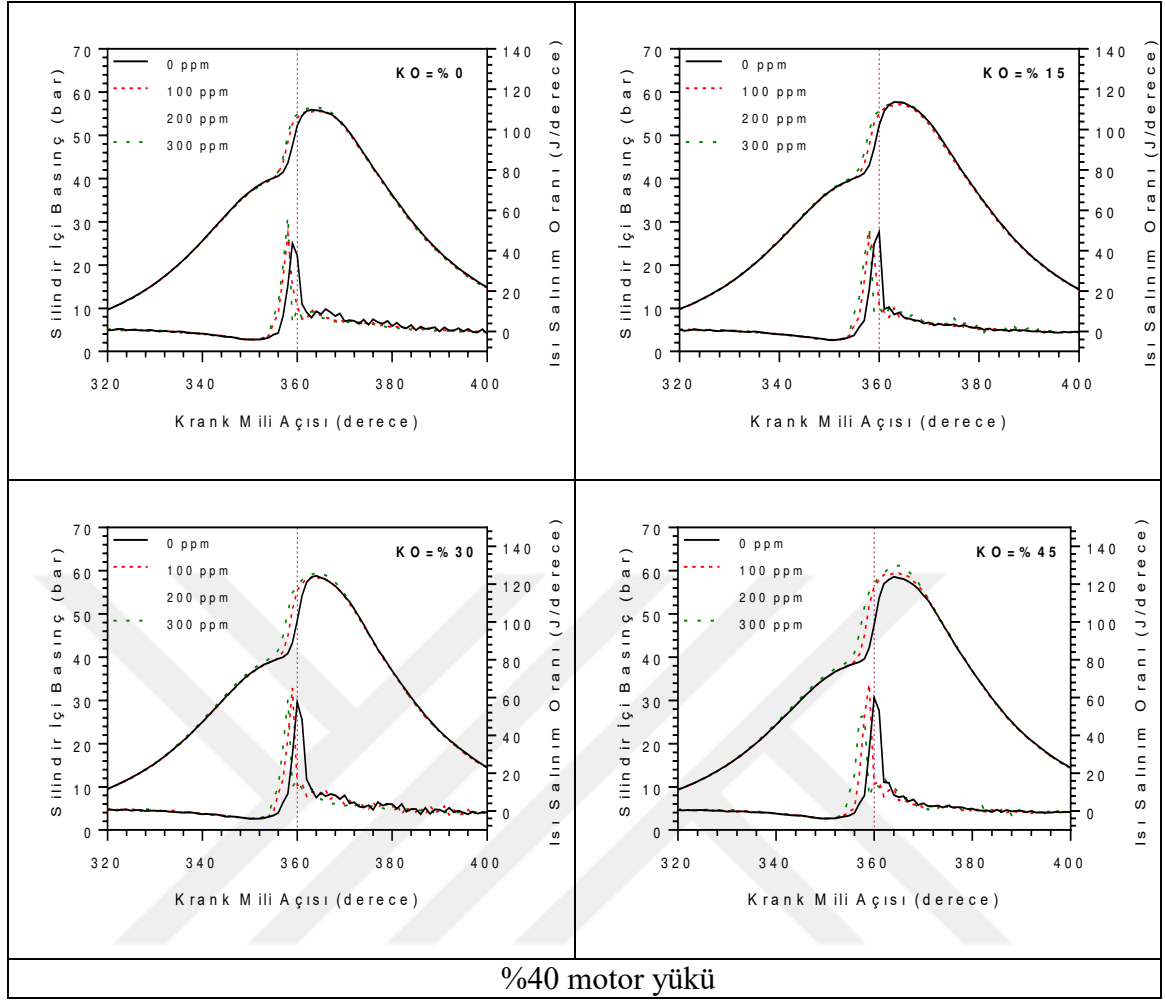
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması hazırlanırken reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda ozon kullanımının araştırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada izooktanın LRF, dizelin de HRF olarak kullanılıp motor içerisine hava ile birlikte ozon gönderilmesiyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular sunulmuştur.

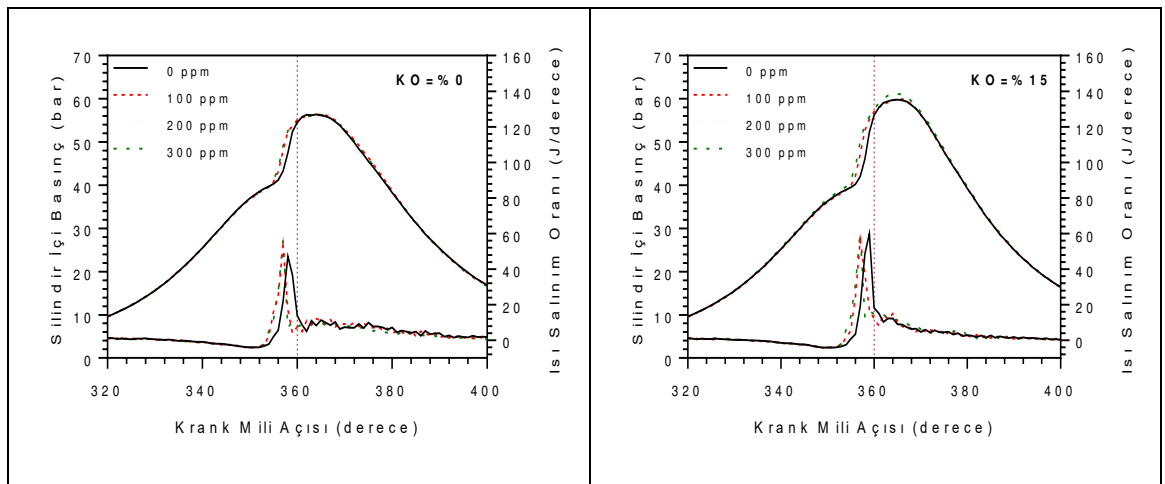
Çalışmanın bu bölümünde, maksimum motor torkunun elde edildiği devir olan 2400 d/d sabit tutulup; %20, %40, %60 yüklerde çalışılmıştır. Düşük reaktiviteli yakıt olarak %15, %30 ve %45 RCCI oranlarında motora izooktan gönderilerek gerçekleştirilmiştir. Ozon ise 0, 100, 200, 300 ppm oranlarında silindir içerisine gönderilmiştir. Yanma sonucunda açığa çıkan NO, HC, CO, CO₂ ve is emisyonlarının değişimi incelenip grafiklerle desteklenerek yorumlanmıştır. Aynı zamanda yanma anında motor içerisinde meydana gelen değişimlerin analizi grafikler halinde sunulmuştur.



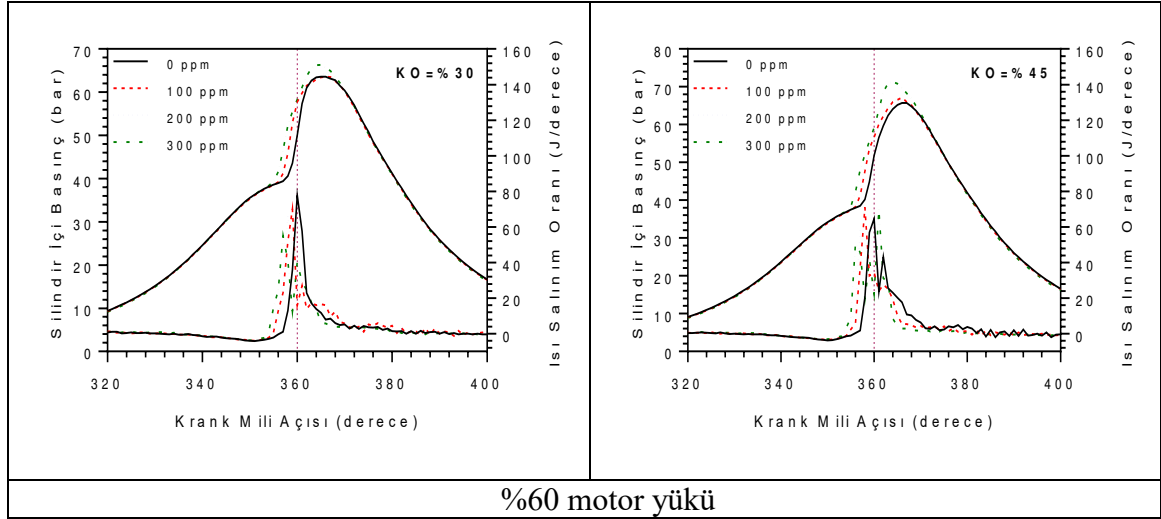
Şekil 3.1. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



Şekil 3.2. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



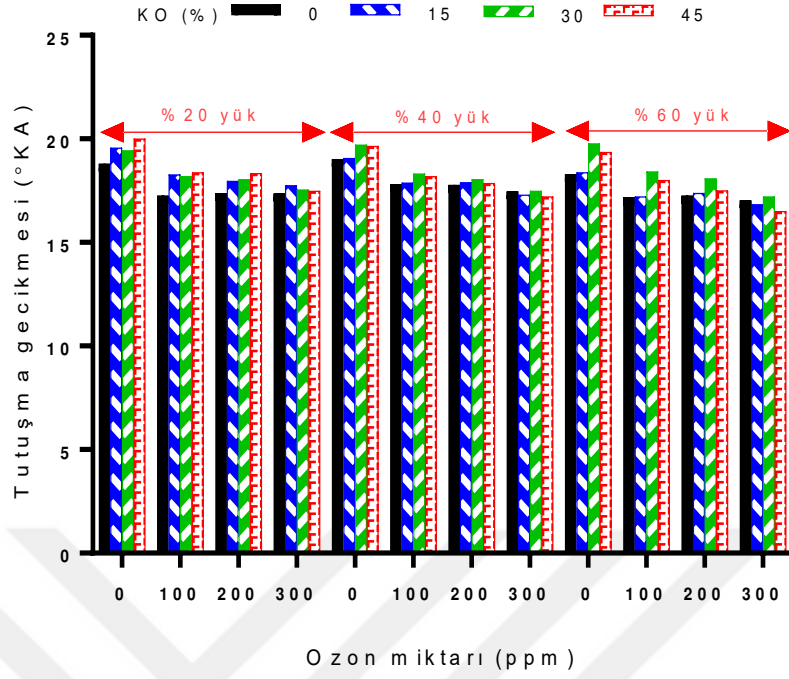
Şekil 3.3. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi (Devamı)



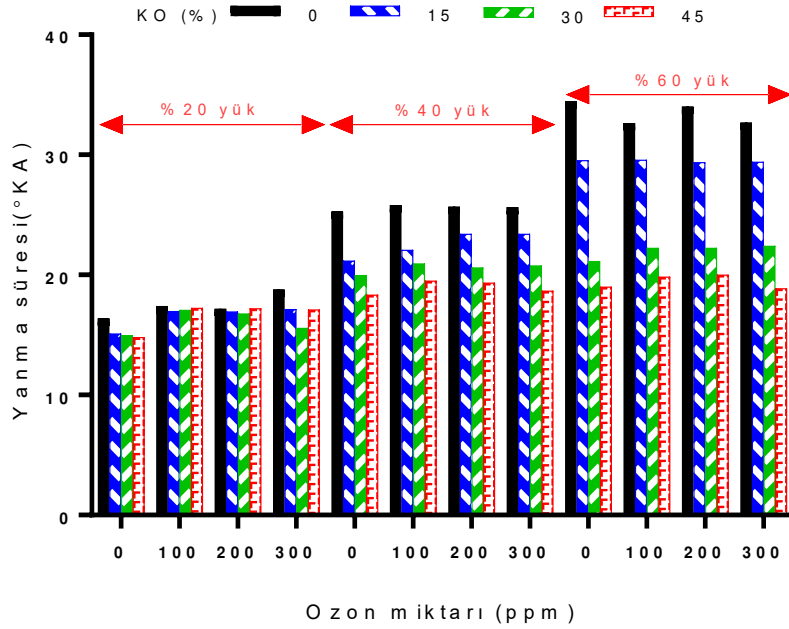
Şekil 3.4. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.1- Şekil 3.3 aralığında değişen motor yüklerinde, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranı değişiminin silindir içi basınç ve ısı salınım oranı üzerinde meydana getirdiği değişim görülmektedir. Tüm motor yüklerinde, RCCI'li ve RCCI'siz tüm deneylerde motora ozon gönderilmesinin, tutuşma gecikmesini kısalttığı görülmüştür. Ancak, kullanılan RCCI konsepti ile emme portuna gönderilen izooktan'ın, tüm sıkıştırma zamanı boyunca hava ile homojenlik seviyesinin yüksek olduğu bir dolgu oluşturduğu, oluşan bu dolgunun yüksek oktan içeriği ile tutuşma gecikmesinin özellikle yüksek karışım oranlarında ozonsuz deneylere kıyasla artmasını sağladığı görülmüştür. Yapılan çalışmada özellikle %20 yük durumunda LRF oranına göre değişen tutuşma gecikmesinin silindir içerisinde yerel zengin karışım bölgelerinin azaltılmasına ve sonuç olarak basınç ve ısı salınım oranı değişiminin kontrollü olmasına sebep olduğu saptanmıştır. Bu yükte ozon ilavesi ile tutuşma gecikmesinin kısaldığı ve bu kısalmanın basınçta kısmen azalmaya ısı salınımında ise kontrollü bir artışa sebep olduğu görülmüştür (Tachibana ve ark. 1991). Düşük yükte oluşan bu duruma karşın özellikle %60 yükte LRF karışım oranının ve ozon ilavesinin artmasının silindir içi basınç değerini ani olarak artırdığı görülmüştür. Öte yandan, RCCI konseptli ve ozonun kullanıldığı deneylerde %20 yükte büyük oranda sağlanan dengeli değişimin yerine %40 ve %60 motor yüklerinde, hem ısı salınımında hem de basınçta artışlar-azalışlar olduğu görülmüştür. Basınç ve ısı salınım değerinde meydana gelen bu değişimler, ozonsuz duruma göre 1-3 krank açısı sonra oluşmuştur. Yani ozon ilavesi ile tutuşma gecikmesinin kısaldığı belirlenmiştir. Bu durum Schönborn vd. tarafından da bildirilen verilerle uyum içerisinde (Schönborn vd. 2010). Yüksek yüklerde silindir içine alınan yüksek miktarda dolgu miktarı neticesinde silindir içi basıncının yükselmesi beklenen bir durumdur. Fakat %60 yükte ani basınç ve ısı salınım oranı yükselmelerinin yanma sürecinin kontrolsüz olarak gelişmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Özellikle %60 yük için, LRF karışım

oranı artması ile %30 karışım oranından itibaren silindir içinde zengin karışım bölgelerinin oluştuğu, tutuşma gecikmesinin uzaması ve yanma reaksiyonlarının silindirin farklı noktalarında aniden başladığı ve basınç ve ısı salınımda ani yükselmeler oluştuğu görülmüştür. Bilindiği gibi ozon gazı, bulunduğu ortamın sıcaklık değerinin 550-600 K değerine ulaşması ile birlikte kararsızlığı artan, yapısından ayrılan O radikalinin hızlı bir şekilde O₂'ye dönüşmesini isteyen bir gazdır (Kobashia vd. 2019). Ek olarak, ozonun çok iyi bir parçalayıcı gaz olduğu da bilinmektedir (Öztürk ve Eren, 2010). Bu durum da göz önüne alındığında, özellikle yanma reaksiyon sıcaklığının oldukça arttığı %40 ve %60 yük deneylerinde emme zamanında silindire gönderilen izooktan'ın tüm sıkıştırma zamanı boyunca, ortam sıcaklığının 550-600 K değerine ulaşmaya kadar ozonla temas etmesinin, izooktanın yapısında kısmen de olsa etki oluşturduğu düşünülmektedir. Böylece, ozonun parçalanma şartlarına gelen ortamda, ozondan ayrılan O atomunun O₂ molekülüne dönüşmesi hızlanmıştır. Artan O₂'nin, yanma reaksiyonlarını hızlandırması ile de yanma sürecinin ozon kullanılmayan deneylere göre kısaldığı değerlendirilmiştir. Grafik detaylı olarak incelendiğinde, yük temelinde yapılan değerlendirmeye göre, %20 yükte RCCI'nin kullanılmadığı ve ozon miktarının 100 ve 200 ppm olduğu durumlarda silindir içi maksimum basınç ve ısı salınım oranı değerinin arttığı, 300 ppm durumunda ise basıncın bir miktar azaldığı, ısı salınımının ise artmaya devam ettiği görülmüştür. %40 ve %60 yük deneylerinde ise basınç ve ısı salınım değerlerinde makul seviyede sayılacak artışlar ve azalışlar olduğu daha önce ifade edilmişti. Bu yüklerde, artan dolgu sıcaklığının ozonun kararsızlık karakterini arttırdığı ve silindir içinde farklı noktalarda farklı özellikte karışımların oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bu durumda ozon uygulamalarında basınç ve ısı salınım değerlerinde dalgalı bir değişime sebep olduğu belirlenmiştir. RCCI konseptli ozon uygulamasında özellikle %60 yük ve %30-45 karışım oranının kullanıldığı deneylerde basınç artışında ani yükselişler olduğu, bu yükselişlerin artan ozon miktarına bağlı olarak artış gösterdiği saptanmıştır. Tüm deneyler göz önüne alındığında silindir içi basıncın pik değerinin %60 yük ve %45 karışım oranı kullanımında oluştuğu görülmüştür. Burada RCCI'siz ve ozonun kullanılmadığı duruma göre yaklaşık olarak %8.55 oranında gerçekleştiği görülürken, en büyük azalmanın ise RCCI uygulamasının yapılmadığı %40 yükte ozonun 100 ppm olarak kullanıldığı deneyde yaklaşık olarak %1 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Özet olarak, veriler incelendiğinde, tüm yüklerde RCCI konseptinin kullanılmadığı deneylerde ozon ilavesinin etkisinin sınırlı kaldığı, RCCI konseptli deneylerde ise ozon ilavesinin basınç ve ısı salınım üzerindeki etkisinin, ozon miktarına bağlı doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde Gong ve arkadaşlarının da yapmış olduğu çalışma ile de uyumaktadır (Gong vd., 2018). Elde edilen bu verilerin RCCI konseptli ozon ilavesi adına önemi olduğu değerlendirilmiştir.



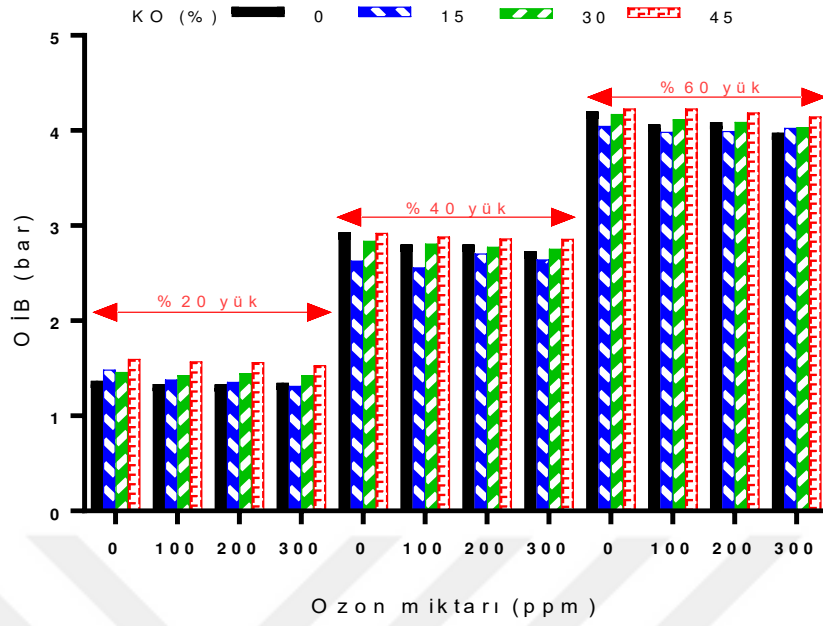
Şekil 3.5. Tutuşma gecikmesinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



Şekil 3.6. Yanma süresinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.4 ve 3.5'te tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin değişen motor yüklerinde, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur.

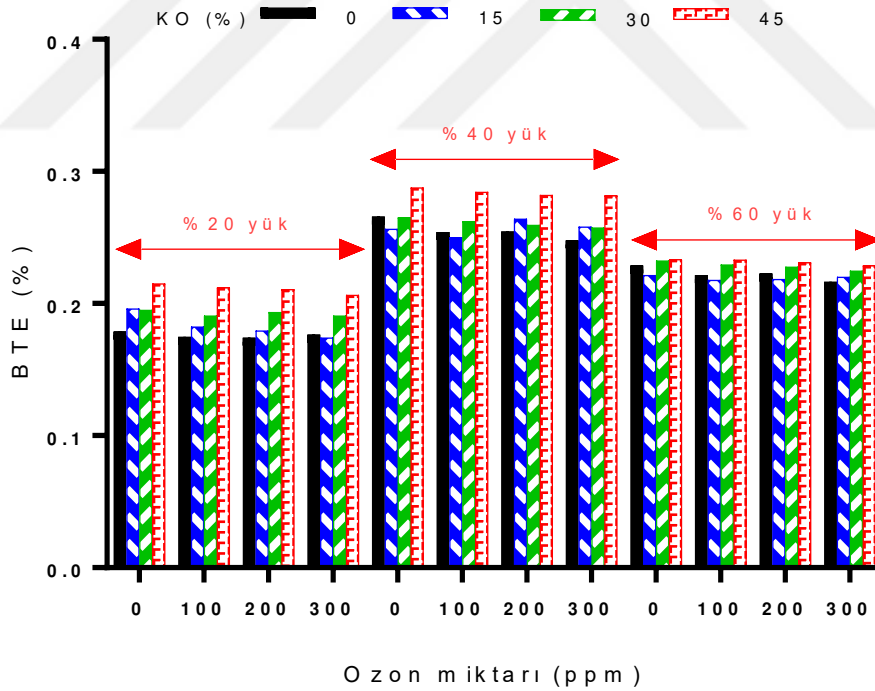
Grafikler incelendiğinde, tüm yüklerde RCCI konsepti olmadan tutuşma gecikmesinin ozon miktarı arttıkça kısaldığı belirlenmiştir. Bu durumun Masurier ve arkadaşlarının bildirdiği veriler ile de uyumlu olduğu belirlenmiştir (Masurier vd. 2015^b) Ozon ilavesi ile kısalan tutuşma gecikmesinin, LRF karışım oranı artışı ile birlikte arttığı da yine grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir. Tutuşma gecikmesinde, %20 motor yükü altında maksimum kısalma %45 karışım oranı kullanımında 300 ppm ozon ilavesi ile yaklaşık olarak %12.6, maksimum uzama ise ozonsuz deneyde LRF karışım oranının %45 olduğu durumda %6.34 olarak gerçekleşmiştir. Motorun %40 şartları altında maksimum kısalma %45 karışım oranı kullanımında 300 ppm ozon ilavesi ile yaklaşık olarak %12.4, maksimum uzama ise ozonsuz deneyde LRF karışım oranının %30 olduğu durumda %3.65 olarak gerçekleşirken, %60 motor yükünde maksimum kısalma %45 karışım oranı kullanımında 300 ppm ozon ilavesi ile yaklaşık olarak %14.8, maksimum uzama ise ozonsuz deneyde LRF karışım oranının %30 olduğu durumda %8 olarak gerçekleşmiştir. Yine ozon miktarına bağlı olarak maksimum kısaltmalar, %20 motor yükü 300 ppm ozon miktarında %12.6, %40 motor yükü 300 ppm ozon miktarında %12.4 ve %60 motor yükü 300 ppm ozon miktarında %14.8 olarak belirlenmiştir. Grafikteki bir diğer veri de yanma süresidir. Tüm yüklerde ve tüm ozon ilavelerinde LRF karışım oranı artmasının kademeli olarak yanma süresinin kısaltmasını sağladığı belirlenmiştir. Düşük yükte yanma süresinde meydana gelen kısaltmanın, yük ve LRF karışım oranı arttıkça arttığı, özellikle %60 yükte ozon miktarının artmasının da yanma süresinin kısaltmasına katkı verdiği saptanmıştır. Bu yükte %20-40 yüklerinde olduğu gibi tutuşma gecikmesindeki azalmanın çok büyük oranlarda olmamasına rağmen yanma süresindeki kısaltmanın LRF oranı artması ile büyük oranda artmasının, pistonun silindirdeki konumuna bağlı olduğu düşünülmektedir. Yani, %60 yük şartlarında, LRF oranı artması ile uzayan tutuşma gecikmesinin, dolgu içindeki ozon miktarının artması ile kısmen azalması ve ortamdaki ozonun ortam şartlarına bağlı olarak oksijene dönüşme hızının artması ile hızla başlayan yanma reaksiyonlarının, pistonun ÜÖN'yı geçtikten sonra başlamasının yanma için gereken sürenin azalmasına sebep olduğu, böylece de yanma süresinin kısaldığı değerlendirilmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde Schönborn ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki sonuçlar ile paralellik sağladığı görülmektedir (Schönborn vd., 2010). Bu bağlamda, yanma süresinin en fazla kısaldığı yük olan %60 yük deneyinde, ozonun kullanılmadığı RCCI konseptli deneyde, %45 LRF karışım oranı kullanımı ile yanma süresinin yaklaşık olarak %44.8 oranında, ozonun 300 ppm seviyesinde ilavesi ile yine aynı LRF karışım oranında %45.3 oranında azaldığı saptanmıştır. Sonuç olarak, yapılan deneyde tüm yüklerde RCCI konsepti kullanılmadan ozon seviyesinin artmasının tutuşma gecikmesini, %60 yükte yanma süresini kısalttığı, tüm yüklerde RCCI konsepti kullanımı ile tutuşma gecikmesinin arttığı, yanma süresinin kısaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. OİB değerinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.6’da motor yükünün %20’den %60’a değiştiği, ozon miktarı ve RCCI konsepti uygulamasının OİB değeri üzerinde oluşturduğu değişimi gösteren grafikler verilmiştir. Veriler incelendiğinde, motora uygulanan yük arttıkça içeriye alınan dolgunun artması ile OİB’nin de arttığı belirlenmiştir. Grafığe göre tüm yüklerde, RCCI konsepti kullanılmadan ozon miktarının artmasının, OİB’yi azalttığı saptanmıştır. Buna karşın, %20 yükte eşit miktardaki ozon durumunda RCCI konsepti uygulamasının OİB’yi arttığı belirlenmiştir. Bu yükte OİB’de meydana gelen en büyük artış, ozon miktarının 200 ppm olarak uygulandığı ve LRF ön karışım oranının %45 olduğu deneyde yaklaşık olarak %17.7 oranında meydana gelmiştir. Bu artış oranının aynı zamanda tüm deneylerde OİB’de meydana gelen en büyük artış oranı olduğu görülmüştür. %40 ve %60 yük deneyinde ise %15 ve %30 karışım oranı, 100 ppm ve 200 ppm seviyesinde ozon kullanımının büyük oranda OİB’yi azalttığı, ancak %45 karışım oranı kullanımının tüm yüklerde ve tüm ozon miktarı artışlarında OİB’yi artırdığı belirlenmiştir. %20 motor yükü altında maksimum azalış %15 LRF karışım oranı kullanımında 300 ppm ozon ilavesinde yaklaşık olarak %11.4, maksimum artış 100 ppm ozon ilavesinde %45 LRF karışım oranı kullanımında yaklaşık olarak %17.6 olarak gerçekleşmiştir. Motorun %40 şartları altında maksimum azalış ozonsuz deneyde %15 LRF karışım oranı kullanımında %10.23, maksimum artış ise 300 ppm ozon ilavesinde %45 LRF karışım oranı kullanımında yaklaşık olarak %4.8 gerçekleşirken, %60 motor yükünde maksimum azalış RCCI’siz deneyde ozon ilavesinin 300 ppm olarak uygulanmasında %5.24, maksimum artış ise ozonun 300 ppm olarak kullanıldığı ve LRF karışım oranının %45 çıkarılması durumunda %4.3 olarak gerçekleşmiştir. OİB, silindirden elde edilen iş ve silindir hacmine bağlı bir büyüklüktür (Ansys Forte 17.0, 2015). Burada elde

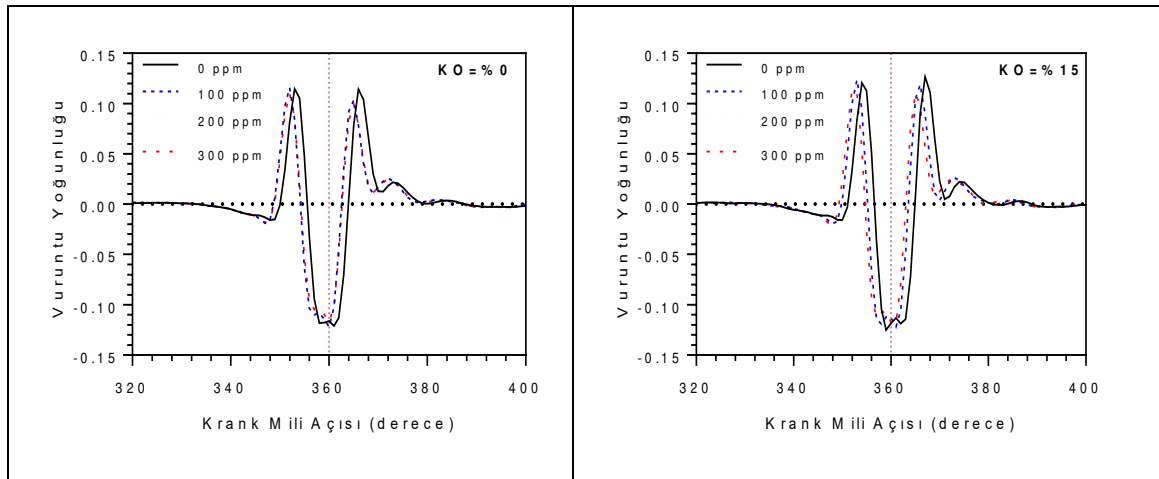
edilen iş miktarının, silindir içi maksimum basınç değeri ve bu basıncın oluştuğu krank açısına bağlı değişen bir büyüklük olduğu bilinmektedir. Yani, silindirde oluşan pozitif işin büyümesini sağlayan her değişimin aynı zamanda OİB değerini de artırdığı görülmüştür. Tüm bu veriler göz önüne alındığında, ozon ilavesi ile kısalan tutuşma gecikmesinin, RCCI konsepti uygulaması ile bir miktar uzaması optimum seviyede oluşan basınç pik değerinin ÜÖN'ye olan uzaklığının pozitif işi artırmasının özellikle %20 yükte RCCI uygulaması ile OİB'yi artırdığı düşünülmektedir. Özetle, RCCI konseptli dizel motora uygulanan ozon ilavesinin büyük oranda OİB'de azalmaya sebep olduğu, ancak bu azalma seviyesinin yüksek yüklerde daha az oranda gerçekleştiği ve hatta %40 yükte %15 karışım oranı kullanımında ozon miktarı artışının OİB'yi artırdığı görülmüş, bu durumun RCCI konsepti ve ozon ilavesinin yüksek yük koşullarında OİB'nin korunması adına umut verici olduğu değerlendirilmiştir. Son olarak, eşit miktardaki ozon ilavesinin olduğu durumda, %20 yükte tüm LRF karışım oranları kullanımı ve tüm deneylerde %45 karışım oranı kullanımının OİB'yi artırmasının RCCI konsepti adına önemli olduğu düşünülmektedir.



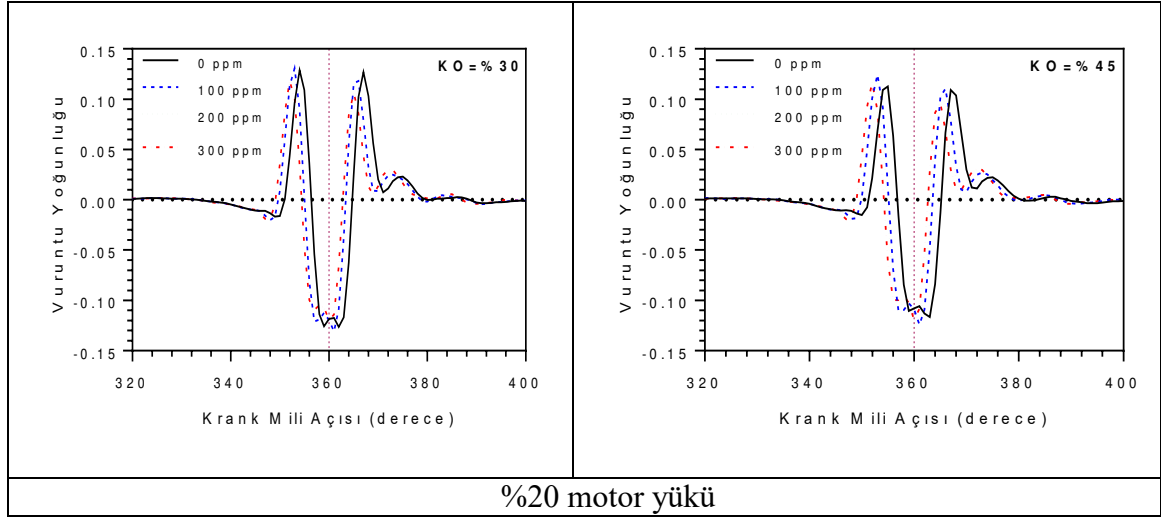
Şekil 3.8. BTE değerinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.7’de, BTE değerinin değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, deney motoruna RCCI konsepti kullanılmadan ozon ilave edilmesinin tüm yüklerde BTE değerini

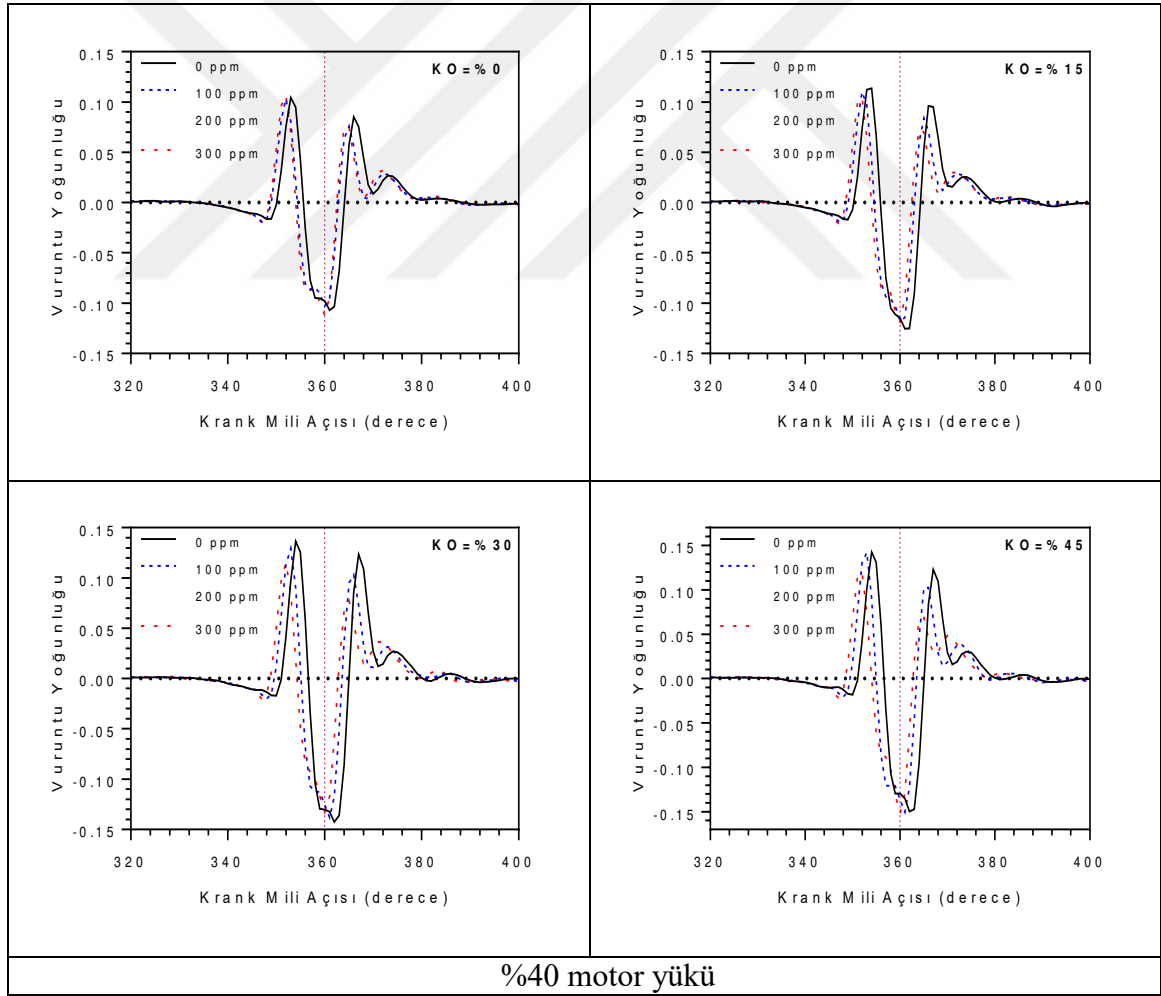
azalttığı, bu azalmanın %20 ve %60 yükte kısmen gerçekleştiği %40 yükte ise bu oranının bir miktar daha arttığı belirlenmiştir. Ancak, tüm deneylerde RCCI konsepti uygulaması ile BTE değerinin arttığı tespit edilmiştir. Tüm deneylerde en yüksek BTE değeri %45 LRF karışım oranı kullanımında gerçekleşmiştir. BTE değerindeki en büyük artış oranı %20 yükte ortaya çıkmıştır. Bu yükte 300 ppm ozon uygulaması ile RCCI'siz duruma göre %1.7 oranında azalan BTE, LRF karışım oranı ile artmaya başlamış ve %45 LRF karışım oranını uygulanması ile %17 oranında bir artış göstermiş ve aynı yükteki ozonsuz ve RCCI'siz duruma göre de yaklaşık olarak %15 oranında artış sağlamıştır. %40 yükte ozonsuz ve 100 ppm ozon miktarı uygulamasında %15 LRF karışım oranı uygulaması ile azalan BTE değeri, LRF karışım oranı artışı ile tekrar artmaya başlamıştır. Bu yükte 300 ppm ozon uygulaması ile RCCI'siz duruma göre %6.76 oranında azalan BTE, LRF karışım oranı ile artmaya başlamış ve %45 LRF karışım oranını uygulanması ile %13.7 oranında bir artış göstermiş ve aynı yükteki ozonsuz ve RCCI'siz duruma göre de yaklaşık olarak %6 oranında artış sağlamıştır. %60 yükte eşit ozon miktarı uygulamasında LRF oranının %15 olduğu deneyde kısmen azalan BTE değerinin %30-45 LRF karışım oranı kullanımı tekrar arttığı belirlenmiştir. Tüm deneylerde %45 karışım oranı kullanımı ile BTE'nin arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, BTE'nin tüm yüklerde ozon ilavesi ile çok az oranda azalsa da, RCCI konsepti kullanımı ile arttığı, oluşan bu artışta en büyük oranın %20 yük deneylerinde %45 LRF karışım oranı kullanımı ile sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, özellikle %60 yükte ozon kullanımı ile kısmen azalan BTE'nin, LRF uygulaması ile artmasının, çalışmanın da genel amaçlarından biri olan motor performansında kayıp olmadan emisyon değerlerinin iyileştirilmesine katkı vermesi bakımından önemli olduğu düşünülmektedir.



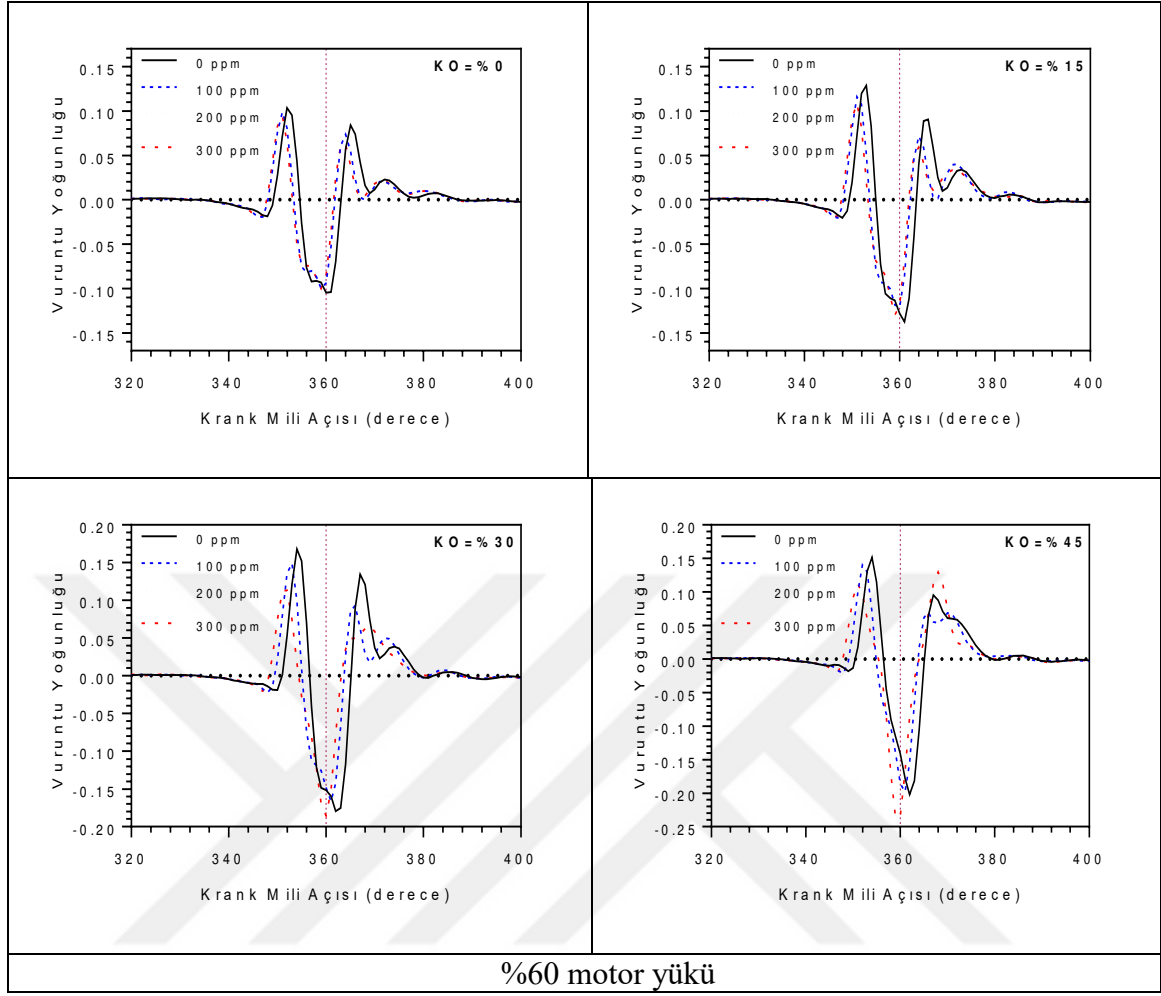
Şekil 3.9. Vuruntu yoğunluğunun %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi (Devamı)



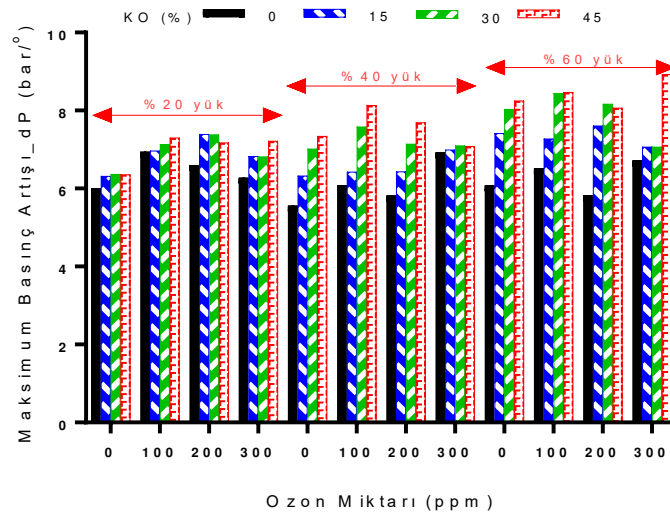
Şekil 3.10. Vuruntu yoğunluğunun %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



Şekil 3.11. Vuruntu yoğunluğunun %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



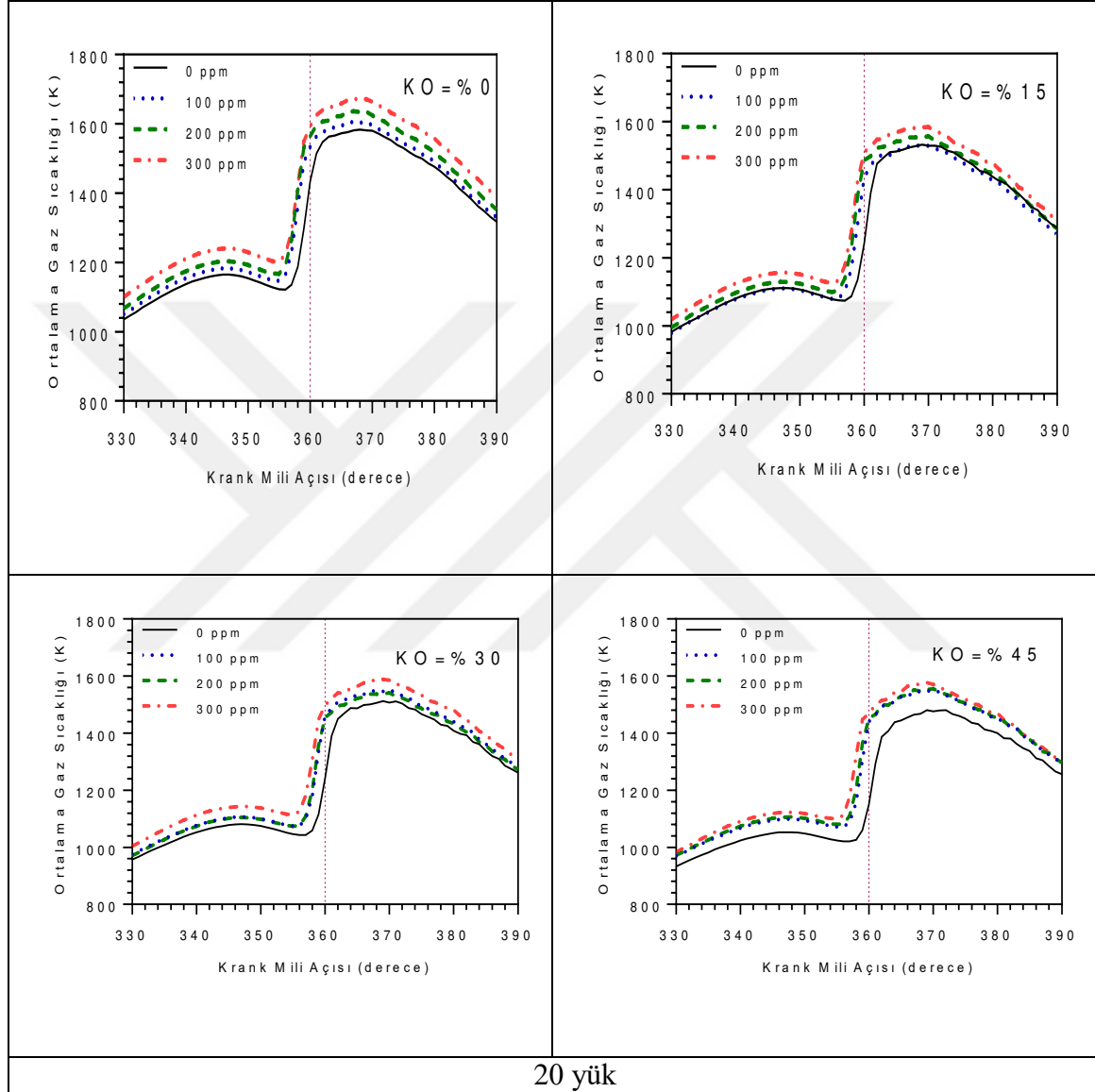
Şekil 3.12. Vuruntu yoğunluğunun %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



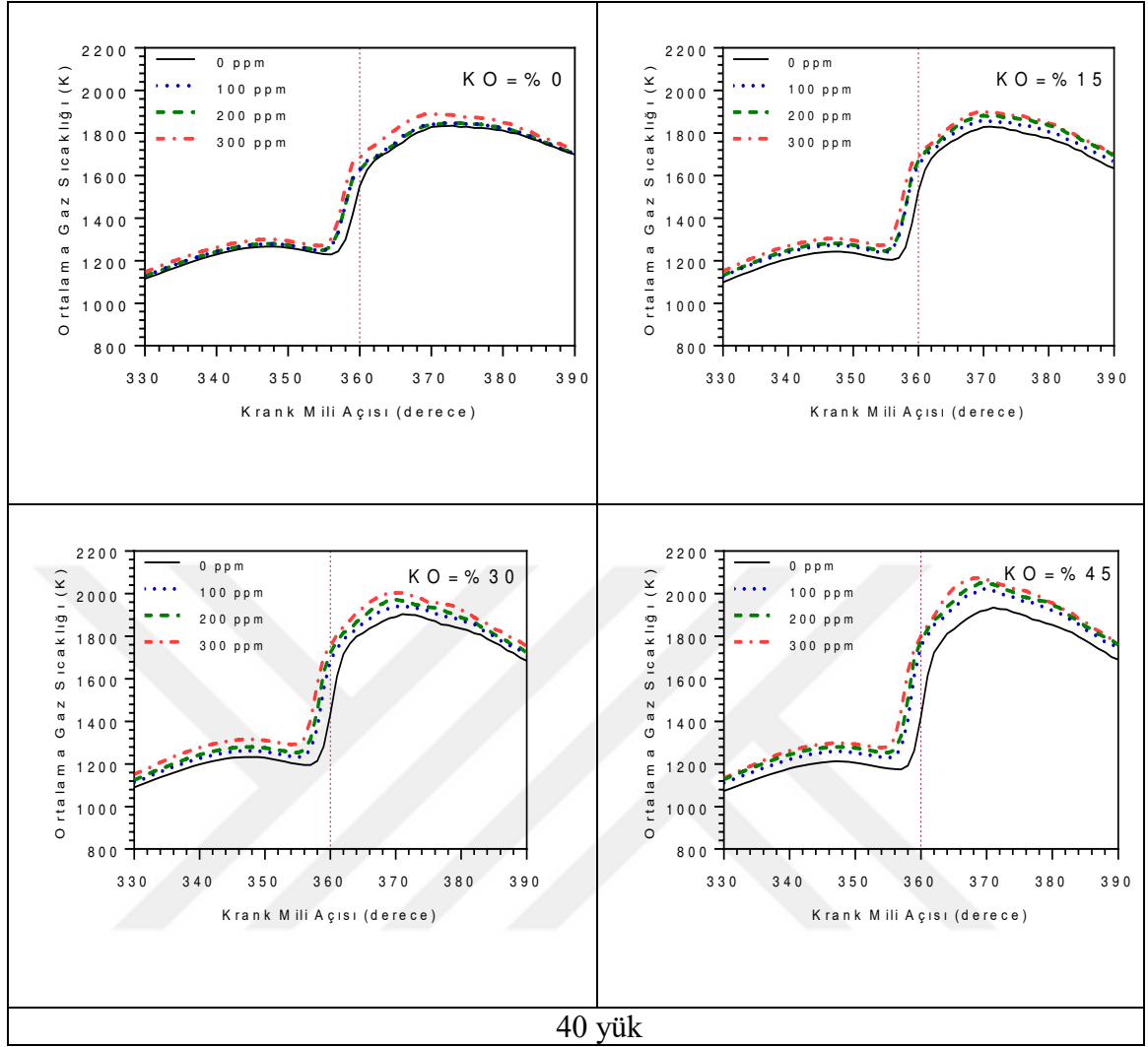
Şekil 3.13. Maksimum basıncın değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.8- Şekil 3.10 aralığında motor vuruntu yoğunluğunun; motor yükü, ozon oranı ve izooktan karışım oranına bağlı değişimini gösteren grafikler gösterilmektedir. Şekil 3.11’de ise maksimum basınç artışının; motor yükü, ozon oranı ve izooktan karışım oranına bağlı değişimini gösteren grafik yer almıştır. Veriler incelendiğinde, ozon kullanımı ile tüm deneylerde vuruntu yoğunluğunun oluşmaya başladığı krank açısının ozon kullanılmayan duruma göre 1-3 krank açısı önce oluşmaya başladığı görülmektedir. LRF olarak kullanılan izooktanın yüksek oktan içeriği ve düşük setan sayısı ile tutuşma gecikmesini uzatması ve bununda vuruntu yoğunluğunun artmaya başladığı açığı öne çekmesi beklenen bir durumdur. Bu durum tüm yüklerde geçerli olmakla birlikte yük ve LRF karışım oranı arttıkça tutuşma gecikmesinin de oluşan bu etkinin arttığı tespit edilmiştir. Tutuşma gecikmesinde oluşan bu etkinin sonucu olarak, özellikle yüksek yük ve yüksek karışım oranı deneylerinde vuruntu yoğunluğundaki artış oranının arttığı belirlenmiştir. Tutuşma gecikmesinin RCCI konsepti kullanımıyla uzamasının etkisi ile yanma reaksiyonlarının geç ve aniden başlamasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda da silindir içinde farklı noktalarda aniden başlayan reaksiyonlarda özellikle yüksek yük ve yüksek karışım oranı kullanımında dolgu ısı salınımını daha kısa krank açıları ve hızla oluşmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada vuruntu yoğunluğunun incelenmesi 3 kısımda gerçekleştirilmiştir. Vuruntunun ilk olarak pozitif değere yükseldiği ana 1. bölüm, negatif değere düştüğü ana 2. bölüm ve tekrar pozitif değere çıktığı bölüme de 3. bölüm denmiştir. %20 yükte eşit LRF karışım oranı deneylerinde ve bu 3 bölümde de ozonun 100 ppm olarak kullanılması vuruntunun pik değerini ilk olarak artırmış, daha sonra ozon miktarının artması ile vuruntu değeri azalmıştır. %40 ve %60 yükte ise ozon artışı ile bir artış bu artış aynı deneydeki ozonsuz değerden daha az olmuştur. Bu durum sadece %60 durumunda 2. bölümde ve LRF karışım oranının %30-45 olarak kullanıldığı deneylerde farklılık göstermiştir. Burada vuruntunun ozonun 300 ppm olarak kullanılmasının sonucunda diğer deneylere göre oldukça hızla arttığı görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi, bu deney şartlarına ozonun kararsızlığının ve tutuşma gecikmesinin LRF oranı ile birlikte artmasının sonucunda, dolgu enerjisini çok kısa krank açıları açığa çıktığı ve bununda benzer şekilde vuruntu yoğunluğunu aniden arttırdığı değerlendirilmiştir. Vuruntu yoğunluğunun oluşmasında maksimum basınç artışı değerinin etkisi önemlidir (Febris, 2014). Bu bağlamda maksimum basınç artışı değişimi de Şekil 5’te gösterilmiştir. Maksimum basınç artışı değişiminde, %20 motor yükü altında maksimum artış 300 ppm ozon ilavesinde %45 LRF karışım oranı kullanımında yaklaşık olarak %15 olarak gerçekleşmiştir. Motorun %40 şartları altında maksimum artış 100 ppm ozon ilavesinde %45 LRF karışım oranı kullanımında yaklaşık olarak %33.7 gerçekleşirken, %60 motor yükünde maksimum azalış ozonsuz deneyde LRF karışım oranının %30 olarak uygulanmasında ozon miktarının 300 ppm’e yükselmesinde %12.24, maksimum artış ise ozonsuz deneyde LRF karışım oranının %45’e çıkarılması durumunda %35.6 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, %60 yük,

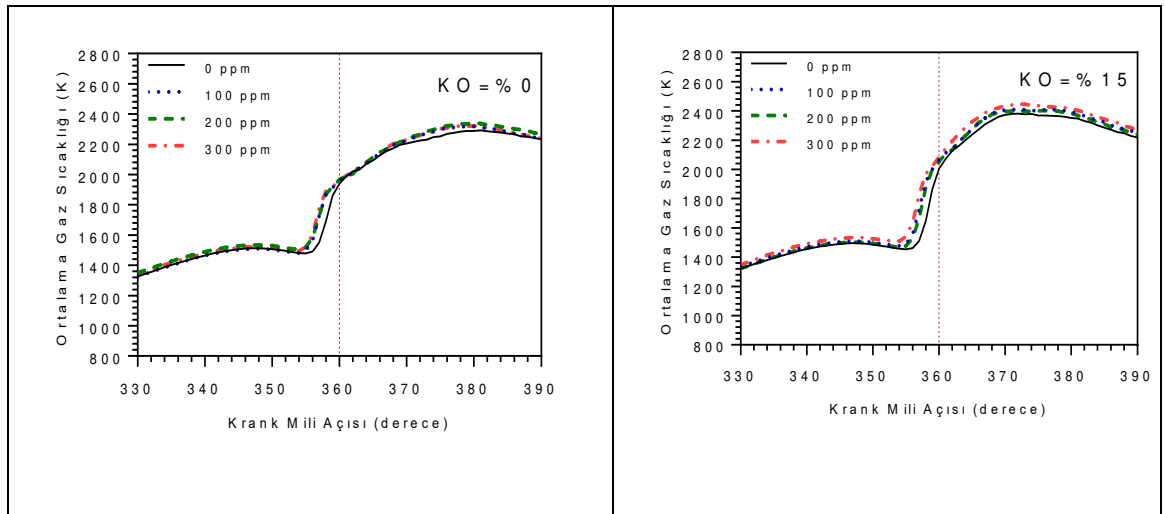
%30-45 karışım oranı ve 300 ppm dışındaki diğer deneylerde vuruntu yoğunluğunun ozon miktarı ve LRF karışım oranı artışı etkisi altındaki değişiminin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu, kullanılan yöntemin vuruntu yoğunluğunu kontrol etmede başarılı olduğu düşünülmektedir.



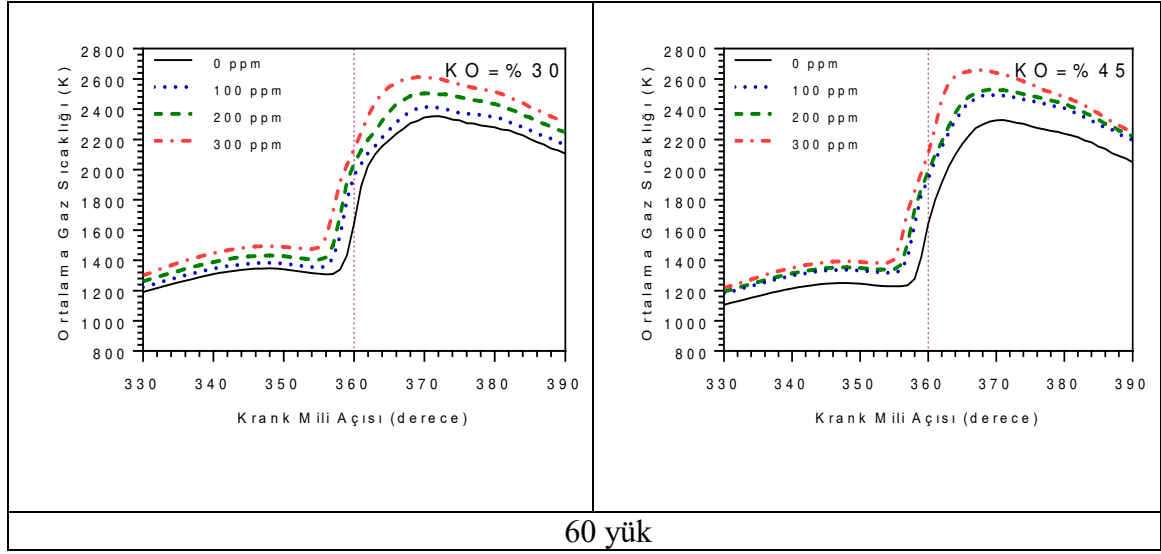
Şekil 3.14. Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %20 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



Şekil 3.15. Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %40 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi



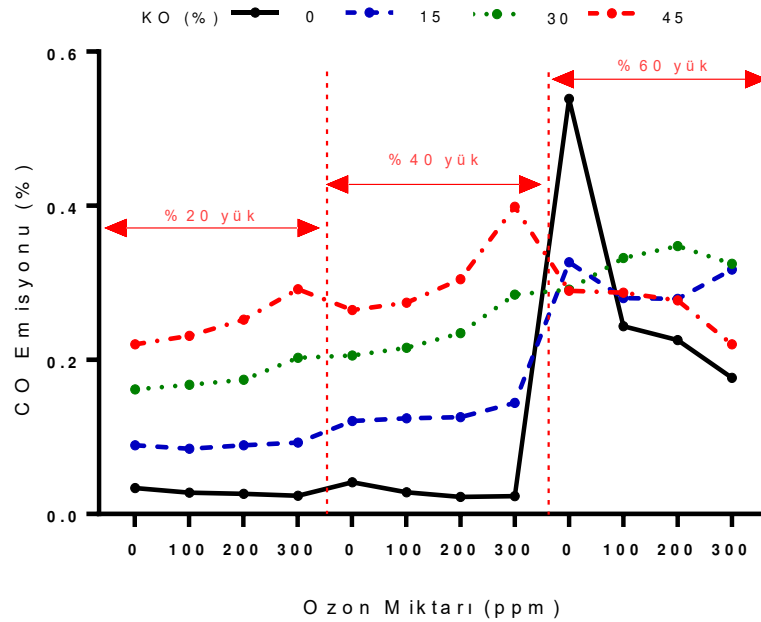
Şekil 3.16. Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi (Devamı)



Şekil 3.17. Silindir içi ortalama gaz sıcaklığının %60 motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

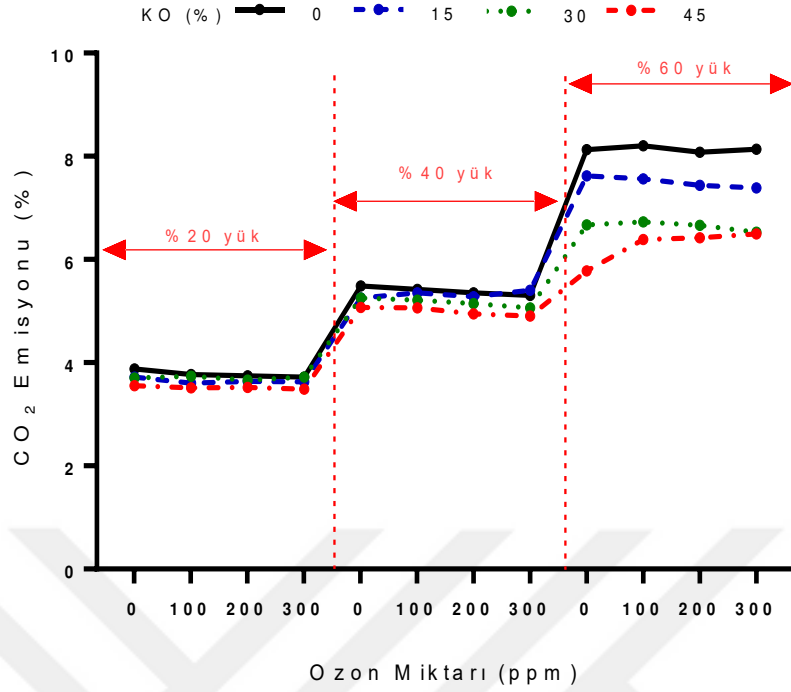
Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 incelendiğinde, silindir içi ortalama gaz sıcaklığının değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Yapılan incelemede, tüm yük deneylerinde deney motoruna verilen ozon ilavesinin silindir içi sıcaklık değerinin artırdığı belirlenmiştir. Bu durum, ozon ilavesinin yanmayı hızlandırması ve ozon miktarı artışının da bu hızlanma oranını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alipour ve arkadaşlarının 507 cc hacminde tek silindirli bir dizel motorda; 50, 100, 200, 250 ve 300 ppm gibi farklı ozon konsantrasyonlarında yaptığı çalışmalarda RCCI konseptine sahip olan motorda; ozon ilavesinin enerji ve ekserji analizi konulu çalışmasında ozon ile yapılan işlemlerde termal verimin 0 ppm ile 400 ppm için % 43.26'dan % 48.88'e yükseldiğini belirtmiş olup ozonun yanma odasında varlığı nedeniyle artırılmış bir yanma süreci ve bu yüzden daha yüksek yanma ve egzoz sıcaklığı meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Bu sonuçlar, elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Bu benzerliğin önemli olduğu düşünülmektedir (Alipour vd. 2020). Çalışmada kullanılan ozonun etkisinin, ozon miktarı, motor yükü ve LRF karışım oranı arttıkça arttığı da belirlenmiştir. Örneğin, %60 yükte RCCI'siz deneyde ozon miktarının 0'dan 300 ppm'e artırılmasının sıcaklık değerini %1.3, %45 LRF karışım oranının kullanıldığı deneyde ozonun 0'dan 300 ppm'e artırılmasının ise %14.3 oranında artırdığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda %20-%40 motor yükünde RCCI konsepti kullanılırken ilave edilen ozon miktarı artışının, yanma sıcaklıklarını değiştirmede %60 yüke nazaran çok daha başarılı olduğu görülmüştür. %60 yükte gerek LRF kullanımı ile tutuşma gecikmesinin uzaması gerekse içeriye alınan dolgu miktarının artması ve silindirde yerel zengin karışım bölgelerinin artması sonucunda yanma reaksiyonlarının ve dolgu enerjisinin hızla açığa çıkması sonucunda özellikle %45 LRF karışım oranı kullanılan deneyde

ozon oranının artışının ani sıcaklık değişimlerine sebep olduğu görülmüştür. Bunun da birkaç derecede maksimum seviyeye çıkan sıcaklığın yeniden hızla düşüşe geçerek kontrolsüzlük seviyesini arttırdığı saptanmıştır. Sonuç olarak, kullanılan RCCI konsepti ile tüm yüklerde silindir içinde oluşan dolgu sıcaklığının aynı LRF karışım oranı kullanımındaki ozonsuz duruma göre azaldığı, ozon miktarı arttıkça artan yanma reaksiyonları sayesinde silindir içi ortalama gaz sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Ozon ilavesi ile silindir içi ortalama gaz sıcaklığındaki en büyük artış %60 yükte %45 LRF karışım oranı kullanımında 300 ppm ozon kullanılan deneyde yaklaşık olarak %14.5 oranında meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca ortalama gaz sıcaklıklarının %20 yük altında ozonsuz RCCI konsepti kullanımı ile %15, %30 ve %45 LRF oranlarında sırasıyla %3.22, %4.48 ve %6.5 azaldığı, %40 yükte kısmen artış oluşsa da, RCCI konsepti ile ateşlemeden önce dolgunun daha homojenliğini sağlamak için yeterli süre sağlandığından, yanma işlemi sırasında yerel eşdeğerlik oranının kontrol altında olması ve çok yüksek olmaması sebebiyle, düşük sıcaklıkta yanmanın sağlandığı düşünülmektedir (Reitz ve Duraisamy, 2015). %60 yükte ise RCCI konsepti kullanımı ile sıcaklık değerinin arttığı belirlenmiştir. Ozon kullanımına bağlı olarak ise, 300ppm ozon ilavesi durumunda ortalama gaz sıcaklığında meydana gelen maksimum artış %20, %40 ve %60 motor yüklerinde sırasıyla %5.62, %6.55 ve %14.5 olmuştur. Bu değişimler özellikle düşük motor yüklerinde RCCI konsepti ile birlikte ozon kullanımının, düşük sıcaklıklı yanma konsepti yanında daha iyi ve temiz bir yanma sağladığını göstermiştir. Bu sonuç gelecek çalışmalar açısından umut verici olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.18. CO emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

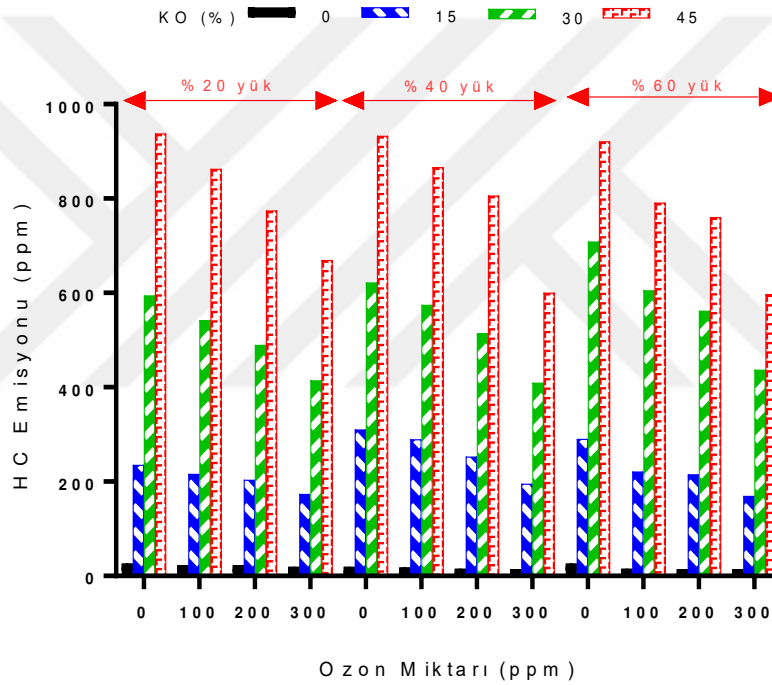
Şekil 3.15'te CO emisyonunun motor yükü, ozon miktarı ve LRF karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, tüm yüklerde RCCI'nin kullanılmadığı deneylerde ozon miktarının artmasının CO emisyonunu azalttığı saptanmıştır. Bu durum Salahi ve Gharehghani'nin bildirdiği sonuçlar ile de uyum içindedir (Salahi ve Gharehghani, 2019). %20 ve %40 yükte, ozonun eşit miktarda kullanıldığı deneylerde LRF karışım oranının artmasının CO emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. %60 yük ve eşit LRF arışım oranı deneylerinde ozon miktarının artmasının ve yine aynı yükte ozonun kullanılmadığı deneyde LRF karışım oranının artmasının CO emisyonunu azalttığı görülmüştür. RCCI'siz durumda CO emisyonunda %20, %40 ve %60 yüklerde sırasıyla %30 , %46 ve %123 oranında maksimum azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, %60 yük ve %45 LRF karışım oranı kullanımında, CO emisyonunu yaklaşık olarak %46 oranında azalttığı, bunun devamında bu deneyde ozon miktarının artmasının ve 300 ppm olarak uygulanmasının bu oranı daha da artırdığı ve CO emisyonunun yaklaşık olarak %60 oranında azalttığı belirlenmiştir. CO emisyonunun yanma sıcaklığı ve dolgu homojenliğine doğrudan bağlı olduğu bilinen bir durumdur (Pan ve ark. 2020). Bu bağlamda, %20 ve %40 yüklerde silindir içi sıcaklığının RCCI konsepti kullanılarak nispeten düştüğü ve bununla CO emsiyonu oluşumuna katkı verdiği değerlendirilmektedir. Ayrıca, sisteme ilave edilen ozonun da bu şartlarda yapısından ayrılan O atomu ve oksijen molekülünün karbon atomu ile CO emisyonu oluşturma isteği sebebiyle CO emisyonunun RCCI kullanımına artı ozon ilavesiyle arttığı görülmüştür. Ancak, tüm bunlara rağmen %60 yükte hem RCCI hem de ozon kullanımı ile CO emisyonunda oluşan azalmanın, kıymetli bir sonuç olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar Tachibana ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile de uyumluluk göstermektedir (Tachibana vd., 1991). Bu bağlamda %60 yükte kullanılan yöntem ile CO emisyonunda oluşan bu azalmanın, yüksek yükte RCCI konsepti ve ozon kullanımı adına önemli bir gelişme olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.19. CO₂ emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.16’da CO₂ emisyonunun motor yükü, ozon miktarı ve LRF karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Grafiğe göre, tüm yüklerde RCCI konsepti kullanımının CO₂ emisyonunu azalttığı belirlenmiştir. CO₂ emisyonunda oluşan bu azalmanın oranının motor yükü ve LRF karışım oranı arttıkça arttığı, buna bağlı olarak ta en büyük azalmanın ozonun kullanılmadığı %60 yük ve %45 karışım oranı kullanımında yaklaşık olarak %29 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Eşit LRF karışım oranının kullanıldığı deneylerde ozon oranının artması %20-40 yükte CO₂ emisyonunun azalmasını, %60 yükte ise genel olarak artırdığı belirlenmiştir. Veriler incelendiğinde %20 motor yükünde ozonsuz deneyde RCCI konsepti ile %45 LRF oranında maksimum azalma %8.1 kadar olmuştur. Aynı şartlarda ozon miktarının 300ppm kullanıldığı durumunda LRF kullanımına ek olarak CO₂ emisyonlarını %2 daha azaltmıştır. Bu şekilde %20 motor yükünde toplam %10 CO₂ emisyonu azalması olmuştur. %40 yükte de benzer durum oluşmuştur. %40 yükte ozonsuz deneyde RCCI konsepti ile %45 LRF oranında maksimum azalma %7.65 kadar olmuştur. Aynı şartlarda ozon miktarının 300ppm kullanıldığı durumunda LRF kullanımına ek olarak CO₂ emisyonlarını %3.35 daha azaltmıştır. Bu şekilde %40 motor yükünde toplamda %10.75 CO₂ emisyonu azalması olmuştur. %60 yükte eşit LRF oranında ozon ilave edilmesinin CO₂ emisyonunda çok küçük oranlarda etki ettiği görülmüşken, RCCI konsepti kullanımı ile CO₂ emisyonundaki azalma oranının arttığı

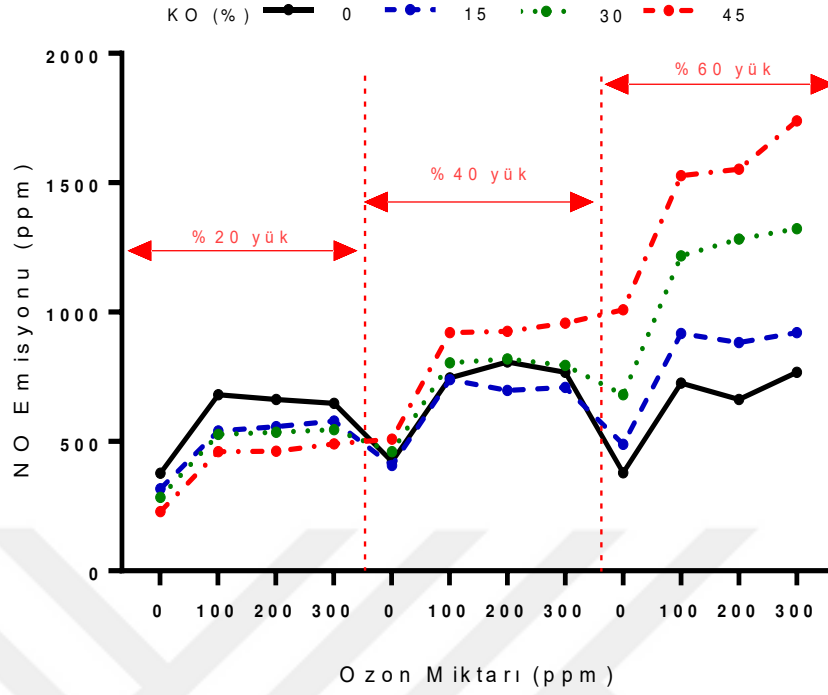
belirlenmiştir. Bu yükte en büyük azalmanın ozonsuz deneyde LRF oranının %45 olarak kullanılmasında yaklaşık olarak %29 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Gelişen bu durumun yanma sıcaklığı ve ozonun ayrışması sonucu oluşan O atomu ve oksijene doğrudan bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, sıcaklığa bağlı olarak artan ozon yarılanma ömrünün CO₂ emisyonunu oluşturan oksijen atomunun yanma reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak farklı reaksiyonlara katılmasıyla CO₂ emisyonundaki azalmayı çok az etkilediği tespit edilmiştir. Özet olarak, RCCI konsepti kullanımı ile eşit ozon miktarında LRF oranı artışının tüm yüklerde CO₂ emisyonunu azalttığı, eşit LRF karışım oranı kullanımında ozon artışının %20-40 yükte CO₂ emisyonunu azalttığı, %60 yükte ise çok küçük oranlarda etki ettiği artırıldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.20. HC emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.17’de HC emisyonunun motor yükü, ozon miktarı ve LRF karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Yapılan çalışmada, RCCI konsepti kullanılmadan dizel motora gönderilen ozon miktarının artmasının tüm yüklerde HC emisyonunu azalttığı belirlenmiştir (Starik vd. 2017). Buna karşın, deney motoruna uygulanan RCCI konsepti ile tüm yüklerde artan LRF karışım oranının HC emisyonunu artırdığı görülmüştür. Ancak RCCI konsepti ile birlikte ozon miktarının artmasının HC emisyonunu kademeli olarak azalttığı belirlenmiştir. RCCI ve ozon ilave yönteminin birlikte kullanımı ile yük arttıkça HC emisyonunda görülen azalma oranının da arttığı belirlenmiştir. Bu durum Salahi’nin yapmış

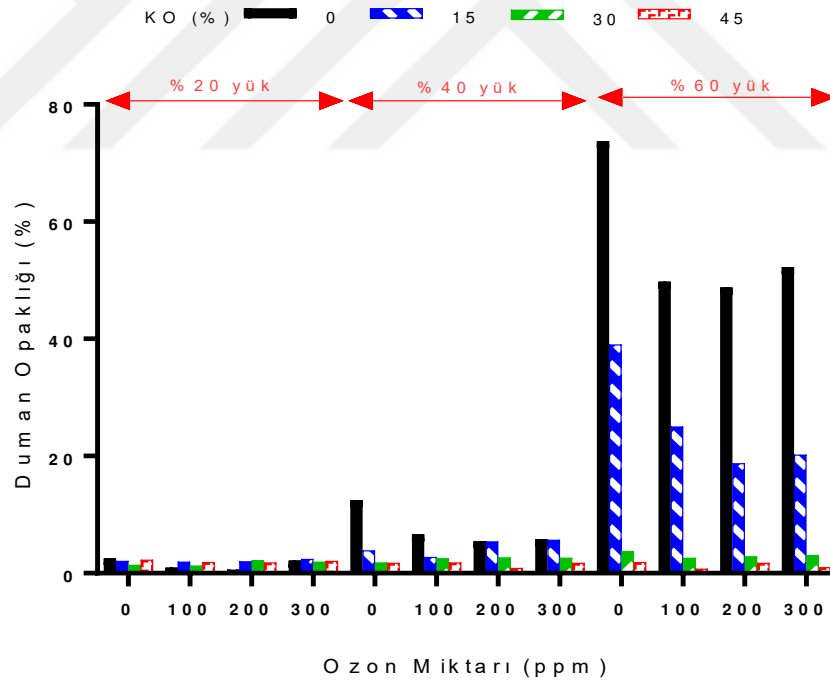
olduğu çalışmalarla da uyushmaktadır (Salahi vd., 2019). %20 yük ve %45 karışım oranı kullanımında HC emisyonu artmış devamında ozon miktarının 300 ppm olarak kullanımı ile HC emisyonunda yaklaşık olarak %29 oranında bir azalma görülürken, %40 yük ve %45 karışım oranı kullanımında HC emisyonu artmış devamında ozon miktarının 300 ppm olarak kullanımı ile HC emisyonunda yaklaşık olarak %36 oranında bir azalma oluşmuş, %60 yükte bu oran artmış ve yine %45 karışım oranı kullanımında ozon miktarının 300 ppm olarak kullanımı ile HC emisyonunda yaklaşık olarak %36 oranında bir azalma meydana geldiği saptanmıştır. Tachibana ve arkadaşları da yaptığı çalışmalarda ozon kullanımının HC emisyonunu azalttığını belirtmişlerdir (Tachibana vd., 1991). HC emisyon oluşumunun dolgu sıcaklığı, dolgu içindeki oksijen miktarı, yakıt atomizasyonu gibi birden çok sebebe bağlı olduğu bilinmektedir. HC emisyonunun RCCI konsepti ile birlikte artmasının, RCCI konseptinin genel bir problemi olduğu bilinmektedir (Benajes vd. 2014). Yapılan çalışma kapsamında silindire gönderilen ozonun, ortam şartlarına bağlı olarak oksijene dönüşme oranına paralel olarak HC emisyonunun temelini oluşturan karbon parçalarının farklı reaksiyonlar olduğu ve HC emisyonunda azalmalara sebep olduğu düşünülmektedir. Şahin de yaptığı çalışmalarda sıkıştırma ateşlemeli motorlarda ozon kullanımının HC emisyonunu azaltmaya yardımcı olduğunu ortaya koymuştur (Şahin, 2011). Özellikle yanma sıcaklığının arttığı yüksek yük ve yüksek karışım oranı kullanımında ozon miktarının artmasının HC emisyonunu azaltmasının bu sonuçta en etkin parametre olduğu değerlendirilmektedir. Alipour ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda ozon kullanımıyla HC emisyonunda düşüş meydana geldiği belirlenmiş olup bulunan sonuçlarla paralellik göstermektedir (Alipour vd., 2020). Özet olarak, birçok araştırmacı tarafından ifade edilen RCCI konseptli motorlarda oluşan yüksek HC emisyonu oluşumu göz önüne alındığına (Imtenan vd. 2014; Park ve Soon 2016; Sarjovaara ve Larmi, 2015) Yapılan çalışmanın özellikle yüksek yüklerde ozon ilavesi ile HC emisyonunda önemli azalmalar sağlamanın RCCI konsepti adına önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.21. NO emisyonunun değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.18’de NO emisyonunun, değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimini gösteren grafiklere yer verilmiştir. Veriler incelendiğinde, %20 yükte eşit ozon miktarı deneyinde LRF oranının artmasının NO emisyonunu azalttığı belirlenmiştir. Aynı yükte aynı LRF karışım oranında ozon miktarının artmasının NO emisyonunu artırdığı görülmüştür. %40 yükte %15 karışım oranının kullanımında NO emisyonunu azalttığı, bu yükte LRF oranının artmasının ve %60 yük deneylerinin tamamında RCCI konsepti kullanımının NO emisyonunu artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yine tüm yük deneylerinde LRF oranının eşit olduğu deneylerde ozon oranının artmasının NO emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. Salahi ve arkadaşları da ozon kullanımının NO seviyesinde yükselişlere neden olduğunu yaptıkları çalışmada ortaya koymuşlardır (Salahi vd., 2019). NO emisyonu, bulunduğu ortam şartlarının sıcaklık değerinin artması neticesinde azot ve oksijenin birleşiminden oluşan bir emisyon türüdür. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin uzaması-kısalması, oksijen oranı, silindir içindeki yerel zengin karışım bölgelerinin ve yanma sıcaklığının doğrudan etkilendiği bir parametredir (Starik vd. 2017; Seignour vd. 2019). Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, yapılan çalışmada, ozonlu-ozonsuz RCCI konsepti kullanımı ile %20 yükte dolgunun silindirde homojen olarak dağıldığı ve yanma sıcaklığı değişiminin büyük oranda kontrol altında tutulduğu görülmüştür. Bu şartlarda gelişen yanmanın NO oluşumuna katkı vermediği, aksine azalma

yönünde etki ettiği belirlenmiştir. %40-60 yüklerde içeriye alınan dolgu buna bağlı olarak ta yanma reaksiyon sıcaklığında artış oluştuğu, bunun da ozonun yarılanma ömrünü kısalttığı O atomu ve oksijene dönme hızının artması ile ortamdaki azotun özellikle O atomu ile buluşması neticesinde %40 yükte %45 karışım oranı ve %60 yükte NO emisyonunun arttığı düşünülmektedir (URL- 2; Tong vd. 2016; Alam vd. 2018). Bahsedilen bu durumlar ile birlikte, ozon ilavesinin tüm yüklerde NO emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. Bu artışta %20 yükte kullanılan RCCI konsepti sayesinde azalma meydana gelirken, %40 ve %60 yüklerde RCCI konsepti kullanımının da yetersiz kaldığı ve ozon miktarı artışının NO emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. Tachibana’ da yaptığı çalışmada ozon kullanımının NO emisyonlarını az da olsa artmasına sebebiyet verdiğini ortaya koymuşlardır ve yine bu sonuçlar yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir (Tachibana vd., 1991). Özetle, RCCI konsepti kullanımı ile ozonlu-ozonsuz deneylerde %20 yükte NO emisyonu oluşumunun kontrol altında tutulduğu ve azalmasını sağladığı, %40-60 yüklerde ise hem RCCI hem de ozon artışının NO emisyonunu artırdığı saptanmıştır.



Şekil 3.22. Duman opaklığının değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişimi

Şekil 3.19’da duman opaklığının değişen motor yükü, ozon miktarı ve izooktan ön karışım oranına bağlı değişiminin gösterildiği grafikler sunulmuştur. Grafiğe göre, tüm yüklerde ozonun kullanılmadığı (0 ppm) ve LRF karışım oranının arttığı tüm deneylerde duman opaklığının

azaldığı belirlenmiştir. Burada meydana gelen azalma oranı motor yükü ve LRF karışım oranı arttıkça artmıştır. Ek olarak, yine tüm motor yüklerinde RCCI konseptinin uygulanmadığı deneylerde, ozon miktarının artmasının da duman opaklığını azalttığı görülmüştür. %20-40 motor yük deneylerinde duman opaklığındaki değişimin ozon kullanımı ile kararsızlık yaşadığı ve anlık olarak düşüşler ve artışlar olduğu, buna karşın %60 karışım oranında ise hem ozon oranı artışının hem de LRF karışım oranı artışının kararlı bir şekilde duman opaklığını azalttığı saptanmıştır. Düşük ve orta yükte ozonsuz ve RCCI konsepti kullanılmadan düşük seviyelerde duman opaklığı olduğu gözlenmiştir. Bu yüklerde özellikle duman opaklığının daha düşük olduğu deneylerde oluşan bu kararsızlık durumunun ortam şartlarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu yüklerde ortamda bulunan dolgunun homojenliği, yanma sıcaklığı tutuşma gecikmesi gibi parametrelerin, ozonun oksijene dönüşme kararsızlığına etki ettiği ve buradan oluşan oksijen seviyesinin de duman opaklığının temelini oluşturan karbonun farklı reaksiyonlara uğramasını sağladığı, bununda duman opaklığında genel olarak azalmalara sebep olduğu belirlenmiştir (Zehni vd. 2017). %60 yükte çok daha kararlı bir biçimde dönüşüm geçiren ozonun özellikle yapısındaki kararsız O atomunun karbon atomu ile birleşmedeki isteğinin duman opaklığını çok daha etkili olarak azalttığı, bu yükte uygulanan LRF karışım oranı ile de bu etkinin arttığı belirlenmiştir. Veriler incelendiğinde %20 motor yükünde RCCI konsepti ile %30 LRF oranında maksimum azalma meydana gelmiştir. Aynı şartlarda 300 ppm ozon kullanım durumunda LRF kullanımına ek olarak duman opaklığını az bir miktar da olsa azaltmıştır. Bu bağlamda tüm deney boyunca duman opaklığında en büyük azalma %60 yük deneyinde gerçekleşmiştir. Bu yükte LRF karışım oranının %45 olduğu ozonsuz deneyde duman opaklığında %97.47 oranında, aynı LRF karışım oranında ozonun 300 ppm miktarında ilavesi ile bu oranın arttığı ve yaklaşık olarak %98.75 oranında azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, RCCI konsepti kapsamında motora verilen ozon miktarının %20-40 yük durumunda yüksek LRF karışım oranında, %60 yükte ise tüm LRF karışım oranlarında duman opaklığını azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, RCCI konseptine dönüştürülen dizel bir motorda, emme portuna gönderilen ozonun, motor performans ve emisyonlar üzerinde oluşturduğu etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen en önemli bulgular aşağıda sunulmuştur.

- RCCI olmadan ozon ilave edilmesinin tutuşma gecikmesini kısalttığı belirlenmiştir. RCCI konsepti kullanımı ile birlikte tutuşma gecikmesinin uzadığı, ozon ilavesi ile tekrar kısaltıldığı belirlenmiştir. Ayrıca hem ozon ilavesi hem de LRF karışım oranı artışının yanma süresinin yük arttıkça azaldığı ve %60 yük, %45 LRF karışım oranı ve 300 ppm ozon kullanımında en kısa yanma süresinin olduğu gözlenmiştir. %60 yükte oluşan bu durumun, kullanılan yöntemin yüksek yük şartlarında OİB'deki değişimi kontrol ederek başarı elde edilmesini sağladığı değerlendirilmektedir.
- Vuruntu yoğunluğunun tüm deneylerde (%60 yük, %45 LRF karışım oranı ve 300 ppm ozonun kullanıldığı deney hariç) hem LRF hem de ozon miktarı artışı karşısında dışında çok büyük değişimlere uğramamasının, motor dengeli çalışması adına önemli olduğu düşünülmektedir.
- RCCI konseptinin kullanılmadığı tüm yük deneylerinde ozon kullanımı ile CO emisyonunun azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, %60 yük ve %45 LRF karışım oranı kullanımında, CO emisyonunu yaklaşık olarak %46 oranında azalttığı, bunun devamında bu deneyde ozon miktarının artmasının ve 300 ppm olarak uygulanmasının bu oranı daha da artırdığı ve CO emisyonunun yaklaşık olarak %60 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bu durum yüksek yük şartlarına RCCI konseptinin kullanımı adına önemli bir sonuçtur.
- RCCI uyumlu motorlarda kontrol edilmesi en zor emisyon türünden biri de HC emisyonudur. Çalışmada, RCCI konsepti kullanılmadan dizel motora gönderilen ozon miktarının artmasının tüm yüklerde HC emisyonunu azalttığı belirlenmiştir. Buna karşın, deney motoruna uygulanan RCCI konsepti ile tüm yüklerde artan LRF karışım oranının HC emisyonunu artırdığı görülmüştür. Ancak RCCI konsepti ile birlikte ozon miktarının artmasının HC emisyonunu kademeli olarak azalttığı belirlenmiştir. Motora uygulanan yük arttıkça ozon ilavesinin etkisinin de arttığı ve özellikle %60 yükte ozon kullanımının RCCI kaynaklı artış gösteren HC emisyonunda önemli azalmalar sağladığı belirlenmiştir. %60 yükte %45 LRF karışım oranı kullanımında ozon miktarının 300 ppm olarak kullanımı ile HC emisyonunda yaklaşık olarak %36 oranında bir azalma meydana geldiği saptanmıştır. Kullanılan yöntem ile yüksek yüklerde ozon ilavesi ile HC emisyonunda önemli azalmalar sağlamanın RCCI konsepti adına önemli olduğu düşünülmektedir.
- Veriler incelendiğinde, %20 yükte eşit ozon miktarı deneyinde LRF oranının artmasının NO emisyonunu azalttığı belirlenmiştir. Aynı yükte aynı LRF karışım oranında ozon

miktarının artmasının NO emisyonunu artırdığı görülmüştür. %40 yükte %15 karışım oranı kullanımında NO emisyonunun azaldığı, bu yükte LRF oranının artmasının ve %60 yük deneylerinin tamamında RCCI konsepti kullanımının NO emisyonunu artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yine tüm yük deneylerinde LRF oranının eşit olduğu deneylerde ozon oranının artmasının NO emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. RCCI konsepti kullanımı ile ozonlu-ozonsuz deneylerde %20 yükte NO emisyonu oluşumunun kontrol altında tutulduğu ve azalmasını sağladığı, %40-60 yüklerde ise hem RCCI hem de ozon artışının NO emisyonunu artırdığı saptanmıştır.

- RCCI konsepti kapsamında motora verilen ozon miktarının %20-40 yük durumunda yüksek LRF karışım oranında, %60 yükte ise tüm LRF karışım oranlarında duman opaklığını azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir. Tüm deney boyunca duman opaklığında en büyük azalma %60 yük deneyinde gerçekleşmiştir. Bu yükte LRF karışım oranının %45 olduğu ozonsuz deneyde duman opaklığında %97.47 oranında, aynı LRF karışım oranında ozonun 300 ppm miktarında ilavesi ile bu oranın arttığı ve yaklaşık olarak %98.75 oranında azaldığı görülmüştür.

ÖNERİLER

Bu çalışmada, reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlarda ozon kullanımının yanma kontrolü ve egzoz emisyonları üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışma vasıtasıyla oldukça dikkat çekici sonuçlar elde edilmiş ve hem RCCI konsepti adına hem de içten yanmalı motorlarda ozon gazının kullanılması adına elde edilen sonuçlar daha detaylı olarak verilmiştir. Bu bağlamda, bütün bunlar göz önüne alınarak RCCI konseptinin daha verimli kullanılıp ve tez konusunun gelecek çalışmalara yol göstermesi adına bazı öneriler sunulmuştur.

- Yapılan çalışmalarda LRF olarak izooktan kullanılmıştır. Buradan ortaya çıkarılan verilerden yola çıkarak LRF oranı, motor devri, LRF enjeksiyon açısı ve basıncı gibi bazı parametreler ile ilgili bir takım değişiklikler yapmak suretiyle motor performansı, verimi ve emisyonları üzerindeki sonuçları incelenebilir.
- Çalışmalarda kullanılan ozon oranları daha farklı parametrelerde ve daha yüksek ppm' e sahip ozon oranlarında kullanılabilir ve bunun yanma kontrolü ile emisyon sonuçlarına etkileri incelenebilir.
- Yapılan çalışmalarda bilhassa yakıtların enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon zamanlamalarında bir takım değişiklikler yapılarak hem motor performansı hem de egzoz emisyonlarına ait sonuçların daha farklı bir biçimde ortaya çıkacağı sezilip, daha sonra yapılacak olan çalışmalar için bu iki parametrenin araştırmalara açık olduğu önerilmektedir.
- Çalışmalarda kullanılan izooktanın daha farklı oranlarda kullanılması denenebilir. Bunun da sonuçlar üzerinde farklı etkiler oluşturacağı düşünülmektedir.
- Yüksek reaktiviteli ve düşük reaktiviteli yakıt sıcaklıklarının düşürülüp veya arttırılmasıyla emisyon ve motor performansı üzerindeki etkileri üzerine bazı incelemeler gerçekleştirilebilir.
- Çalışmada kullanılan izooktan yakıtı ve ozon gazının diğer çift yakıtlı sistemlere uygulanmasının hem motor performans hem de emisyonlar üzerindeki etkisinin neticeleri incelenebilir.
- Yapılan çalışmaların daha da geliştirilerek dört silindirli motora uyarlanması önemli sonuçlar doğurabilir.
- Tez çalışmasının sonuçlarından yola çıkarak ozon kullanıldığı durumlarda yakıtın kontrollü bir şekilde yanması gerçekleştirilerek yanma reaksiyon hareketinin gözlemlenip belirlenmesi, ozonun yanma süresi ve yanma olayına olan tesirlerinin ileri analiz yazılımları kullanılarak çalışılması önerilmektedir.

- RCCI motorlarda ozon gazının kullanılmasının etkileri daha geniş yelpazelerde sayısal olarak incelenebilir.

Yukarıda bahsedilen önerilerin kullanılan konseptin geliştirilmesine katkı vereceği düşünülmektedir. Bu tez kapsamında, literatürde oldukça az bulunan; ozonun RCCI motorlarda yanma analizi, yakıt tüketimi ve emisyon analizlerini içeren ve sonuçları net bir şekilde ortaya koyarak gerçek verilerle oluşturulan bir çalışma hazırlanmıştır. Bu çalışma, ozonun bilhassa dizel ve RCCI motorlarda meydana gelen yanma olaylarının anlaşılmasına katkı sağlayıp hacimsel olarak daha büyük ve çoklu silindire sahip motorlara uygulanması açısından da ilham olabilecek bir özellik taşıması bakımından literatüre fayda sağlamayı hedeflemiştir. Sonuç olarak, dünyamızın gelmiş olduğu durumda, iklimsel değişiklikler göz önüne alınarak özellikle hava kirliliği sorunu açısından bakıldığında, bu tez çalışmasının umut verici sonuçlar ortaya koyduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- 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
- Alam E., F., Sang Hee Won, Frederick L. Dryer, Tanvir I. Farouk. (2018). Ozone Assisted Cool Flame Combustion of Sub-Millimeter Sized N-Alkane Droplets at Atmospheric and Higher Pressure, *Combustion and Flame* 195: 220–231
- Alipour, M., Ehghaghi, M.B., Mirsalim, M., Ranjbar, F. (2020). Energy and Exergy Analysis of the Dual-fuel RCCI Engine By Ozone-Assisted Combustion of a Lean Mixture, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 143:3677–3686
- Altun, Ş. (2009). *Hayvansal Yağlarda Biyo-Yakıt Üretimi Ve Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Deneyisel Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- ANSYS Forte 17.0, ANSYS: San Diego, 2015
- 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
- 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
- Bo, Z., Fu, W., Gong, J. (2006). Study of Fuel Consumption When Introducing DME or Ethanol into Diesel Engine, *Fuel* 85(5-6): 778-782
- Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A. (1995). *İçten Yanmalı Motorlar*, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Matbaası
- Can, Ö. (2012). *Bir Di Dizel Motorda Etanol Ön Karışımli Kısmi-Hccı Uygulamasının Yanma ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi
- 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
- Checkel, M., Dale, J. (1986). Computerized Knock Detection From Engine Pressure Records, *SAE Technical Paper* 860028, doi:10.4271/860028
- Contino, F., Masurier, J-B., Foucher, F., Lucchini, T., D'Errico G., Dagaut, P. (2014). CFD Simulations Using The TDAC Method to Model İso-Octane Combustion for a Large Range of Ozone Seeding and Temperature Conditions in a Single Cylinder HCCI Engine, *Fuel*, 137:179–184
- Çelik, O. (2019). *Atık Taşıt Lastiklerinden Elde Edilen Pirolitik Yağın Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Kullanımının Deneyisel Olarak Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ
- Çınar C., Uyumaz A., Solmaz H., Şahin F., Polat S., Yılmaz E. (2015). Effects of İntake Air Temperature on Combustion, Performance and Emission Characteristics of a HCCI Engine Fuelled Withtheblends of 20% N-Heptaneand 80% İsooctane Fuels. *Fuel Processing Technology* 130: 275–281

- Çıtak, M. (2014). *Bir Dizel Motorunda Mtbe Katkılı Biyodizel Kullanımının Deneyisel Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ebrahimi, M., Jazayeri, S.A. (2019). Effect of Hydrogen Addition on RCCI Combustion of a Heavy Duty Diesel Engine Fueled With Landfill Gas and Diesel Oil. *International Journal of Hydrogen Energy* 44; 7607- 7615
- Eden, G. E., (1973). Ozone in water and wastewater treatment. *Environmental Pollution* (1970) 4(4): 314-315
- Ekici, L., Sağdıç, O., Kesmen, Z. (2006). Gıda endüstrisinde alternatif bir dezenfektan: Ozon, *Gıda teknolojileri elektronik dergisi*, 47-57
- FEBRIS user guide, 2014
- Foucher, F., Higelin, P., Mounaim-Rousselle, C., Dagaut, P. (2013). Influence of Ozone on the Combustion of N-Heptane in a HCCI Engine, *Proceedings of the Combustion Institute* 34:3005–3012
- 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; 3497–3500
- 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
- Ghazikhani, M., Kalateh, M., Kashi Toroghi, Y., Dehnavi, M. (2009). An Experimental Study on the Effect of EGR and Engine Speed on CO and HC Emissions of Dual Fuel HCCI Engine, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 52
- Gong, C., Yu, J., Wang, K., Liu, J., Huang, W., Si, X., Wei, F., Liu, F., Han, Y. (2018). Numerical Study of Plasma Produced Ozone Assisted Combustion in a Direct Injection Spark Ignition Methanol Engine. *Energy* 153:1028-1037
- Gözen E. (2015). *Investigation of Rcci Engine Emission and Performance*. Master Science Thesis. Istanbul Technical University
- 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.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company
- 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, *Energy Conversion and Management*, 80, 329–356
- Işık, M.Z. (2016). *Çift Yakıtlı Reaktivite Kontrollü Bir Dizel Motorda Biyodizel Yakıtların Düşük Sıcaklıklı Yanma Performans ve Emisyon Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- İlhan, M. (2007). *Çift Yakıtlı (Dizel Metanol) Bir Dizel Motorda Püskürtme Avansının Motor Performansına ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneyisel Olarak Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- 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

- Johansson, B. (2007). Homogeneous Charge Compression Ignition: the Future of IC Engines, *International Journal of Vehicle Design*, 44 (1/2): 1-19
- Kobashia, Y., Wang, Y., Shibata, G., Ogawa, H., Naganuma, K. (2019). Ignition control in a gasoline compression ignition engine with ozone addition combined with a two-stage direct-injection strategy, *Fuel*. 249: 154-160.
- Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A., and Reitz, R. D. (2011). Fuel Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI): a Pathway to Controlled High-Efficiency Clean Combustion, *International Journal of Engine Research* , 12: 209
- Langlais, B., Reckhow, D. A. and Brink, D. R., (1991). Ozone in Water Treatment Application and Engineering, Lewis publisher
- 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
- 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
- Manimaran, R., Thundil Karuppa Raj, R., Senthil Kumar, K. (2013). Premixed Charge Compression Ignition in a Direct Injection Diesel Engine using Computational Fluid Dynamics, *Wseas Transactions On Heat And Mass Transfer* -ISSN: 2224- 3461
- Masurier, J-B., Foucher, F., Dayma, G., Dagaut, P. (2015^a). Ozone Applied to the Homogeneous Charge Compression Ignition Engine to Control Alcohol Fuels Combustion. *Applied Energy* 160:566–580
- Masurier, J-B., Foucher, F., Dayma, G., Dagaut, P. (2015^b). Investigation of Iso-Octane Combustion in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Seeded by Ozone, Nitric Oxide and Nitrogen Dioxide, *Proceedings of the Combustion Institute* 35: 3125–3132
- McAllister, D.M. (1985). Air Ionizer, *Internal Combustion Engines*, 4519357
- Miao, J., Zhang, G., Ju, Y., Wang, X., Hong, J., Zheng, J., Qiao, X., Huang, Z. (2011). Study on Premixed Combustion in A Diesel Engine With Ultra Multihole Nozzle, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Combustion*, 471648, 16 Pages Doi:10.1155/2011/471648
- Okçu, M., (2021). *Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Düşük Sıcaklıklı Yanmanın Yanma Karakteristiklerini ve Kirlenici Emisyonlara Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ölmez, T., Kabdaşlı, I. and Tünay, O. (2003). Tekstil endüstrisi reaktif boya banyolarında ozon ile renk giderimine etki eden faktörlerin belirlenmesi, *SKKD* 13(1): 19-24
- Özden, C., M. (2005). *Homojen Karışımli İçten Yanmalı Motorlar*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Öztekin, S., Zorlugenç, B., Zorlugenç, F.K. (2006). Effects of Ozone Treatment on Microflora of Dried Figs, *Journal of Food Engineering* 75(3): 396-399
- Öztürk, D., Eren, H.A. (2010). Tekstil Terbiyesinde Ozon Kullanımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 5(2).
- Palou, L., Crisosto, C.H., Smilanick, J.L., Adaskaveg, J.E. and Zoffoli, J.P. (2002). Effects of Continuous 0.3 Ppm Ozone Exposure on Decay Development and Physiological Responses of Peaches and Table Grapes in Cold Storage, *Postharvest Biology and Technology* 24(1): 39-48
- Pan, S., Liu, X., Cai, K., Li, X., Han, W., Li, B. 2020. Experimental Study on Combustion and Emission Characteristics of Isobutanol/Diesel and Gasoline/Diesel RCCI in a Deavy-Duty Engine Under Low Loads, *Fuel* 261:116434.

- Park, S.H., Yoon, S.H. (2016). Effect of Dual-Fuel Combustion Strategies on Combustion and Emission Characteristics in Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Engine, *Fuel* 181: 310-318.
- 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
- Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A., (2006). Multi-Zone Modeling of Diesel Engine Fuel Spray Development With Vegetable Oil, Bio-Diesel or Diesel Fuels, *Energy Conversion and Management* 42(11-12): 1550-1573
- Reitz, R.D., Duraisamy, G. (2015). Review of High Efficiency and Clean Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) Combustion in Internal Combustion Engines, *Progress in Energy and Combustion Science* 46: 12-71.
- Rice, R. G., Robson, C. M., Miller, G. W. and Hill, A. G. (1981). Uses of Ozone in Drinking Water Treatment, *Journal of The American Water Works Association* 73(1): 44-57
- Rice, R. G., Farguhar, J. W. and Bollyky, L. J. (1982). Review of The Applications of Ozone for Increasing Storage Times of Perishable Foods. *Ozone: Science and Engineering* 4: 147-163
- Salahi, M. M., Gharehghani, A., (2019). Control of Combustion Phasing and Operating Range Extension of Natural Gas PCCI Engines Using Ozone Species. *Energy Conversion and Management*, 199, 112000
- Sarjovaara, T., Larmi, M. (2015). Dual Fuel Diesel Combustion With E85 Ethanol/Gasoline Blend, *Fuel* 139: 704-714.
- Schönborn, A., Hellier, P., Aliev, A.E., Ladommatos, N. (2010). Ignition Control of Homogeneous-Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Through Adaptation of The Fuel Molecular Structure by Reaction With Ozone, *Fuel* 89:3178–3184
- Seignour, N., Masurier, J-B., Johansson, B., Dayma, G., Dagaut, P., Foucher, F. (2019). Ozone-Assisted Combustion of Hydrogen: A Comparison with Isooctane, *International Journal of Hydrogen Energy* 44:13953– 13963
- 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
- Starik, A.M., Korobov, A.N., Titova, N.S. (2017). Combustion Improvement in HCCI Engine Operating on Synthesis Gas Via Addition of Ozone or Excited Oxygen Molecules to The Charge: Modeling Study, *International Journal of Hydrogen Energy* 42: 10475-0484
- Suozhu, P., Xingwen, L., Kai, C., Xin, L., Weiqiang, H., Bolun, L. (2020). Experimental Study on Combustion and Emission Characteristics of Iso-Butanol/Diesel and Gasoline/Diesel RCCI in A Heavy-Duty Engine Under Low Loads, *Fuel* 261: 116434
- Şahin, S. (2011). Ozon Gazının Dört Zamanlı Motorlarda Güç ve Yanma Verimine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
- Tachibana, T., Hirata, K., Nishida, H., Osada, H. (1991). Effect of Ozone on Combustion of Compression Ignition Engines, *Combustion and Flame* 85:515-519
- Tang, Q., Liu H., Ran X., Li M., Yao M. (2020). Effects of Direct Injection Fuel Types and Proportion on Late-Injection Reactivity Controlled Compression Ignition, *Combustion and Flame* 211: 445–455
- Tendero, Claire, Tixier, Christelle, Tristant, Pascal, Desmaison, Jean and Leprince, Philippe. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 61(1): 2-30
- Thring, R. (1983). Alternative Fuels for Spark-Ignition Engines. *SAE Technical Paper* 831685;4715–25

- Tong, L., Wang, H., Zheng, Z., Reitz, R., Yao, M. (2016). Experimental Study of RCCI Combustion and Load Extension in a Compression Ignition Engine Fueled with Gasoline and PODE, *Fuel* 181: 878-886.
- Türkcan, A. (2013). *Direkt Püskürtmeli HCCI Bir Motorda Püskürtme Parametrelerinin Yanma Ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- URL- 1: www.fleeteurope.com/fr/new-energies-fiscalite-et-legislation/europe/features/do-you-know-your-euro-6-your-6c-and-6d-temp?a=DQU04&t%5B0%5D=Diesel&t%5B1%5D=RDE&t%5B2%5D=Euro%206d&t%5B3%5D=WLTP&t%5B4%5D=Euro%206d%20TEMP&t%5B5%5D=EVAP&t%5B6%5D=Taxation%20Guide&curl=1
- URL- 2: <https://www.lenntech.com/library/ozone/decomposition/ozonedecomposition.htm>.
- 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
- 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
- Yüksel, Ö. (2010). *Atmosferik Basınçta Çalışan Endüstriyel AC Corona/DBD Plazma Reaktörlerin Tasarımı ve Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü
- Zehni, A., Saray, R.K., Poorghasemi, K. (2017). Numerical Comparison of PCCI Combustion and Emission of Diesel and Biodiesel Fuels at Low Load Conditions Using 3D-CFD Models Coupled with Chemical Kinetics, *Applied Thermal Engineering* 110: 1483- 1499.
- Zhang, Y., Zhu, M., Zhang, Z., Shang, R., Zhang, D. (2016). Ozone Effect on The Flammability Limit and Near-Limit Combustion of Syngas/Air Flames With N₂, CO₂, And H₂O Dilutions, *Fuel* 186-414–421
- Zhao H. (2007). HCCI and CAI Engines for The Automotive Industry. *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, 7-16, 29-37, 141-146, 241-246, 252-255, 323- 334, 374-376
- Zhou, D. Z., Yang, W. M., An, H., Li, J., Shu, C. (2015). A Numerical Study on RCCI Engine Fueled by Biodiesel/Methanol, *Energy Conversion and Management*, 89, 798-807

ÖZGEÇMİŞ

Şafak Melih ŞENOCAK

[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Bildiğiniz bilgisayar programlama dilleri: (C++, MATLAB, C#)
- ✓ Kullanılan bilgisayar programları: AVL (Boost), Ansys Mechanic, Ansys Fluent, CFX 14.5, Autocad 2020, Catia V5R20, Solid Works.