



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ (RCCI) BİR  
MOTORDA DOĞALGAZ-HİDROJEN-DİZEL KULLANIMININ YANMA  
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA BERAT GÖRDÜK

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÜSAME DEMİR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA DENİZ ALTINKURT

BİLECİK, 2026

10776019

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**REAKTİVİTE KONTROLLÜ SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ (RCCI) BİR  
MOTORDA DOĞALGAZ-HİDROJEN-DİZEL KULLANIMININ YANMA  
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA BERAT GÖRDÜK

TEZ DANIŞMANI

DOĐ. DR. ÜSAME DEMİR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA DENİZ ALTINKURT

BİLECİK, 2026

10776019

## BEYAN

Reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşlemeli (RCCI) bir motorda doğalgaz-hidrojen-dizel kullanımının yanma karakteristiklerinin ve emisyonlara etkisinin sayısal olarak incelenmesi adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>		<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	X
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>			
<b>2- TÜBİTAK</b>			
<b>Diğer;.....</b> .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**MUSTAFA BERAT GÖRDÜK**

.././20..

**İmza:**

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Üsame DEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Deniz ALTINKURT 'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

Mustafa Berat GÖRDÜK

2026

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme (RCCI) prensibiyle çalışan bir motorda Doğalgaz, Hidrojen ve Dizel yakıt kombinasyonlarının yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, tek silindirli Lombardini 3 LD 510 dizel motoru referans alınarak CONVERGE CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı ile üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, 1800 d/d sabit motor devrinde ve 23.1 Nm tork yükü altında; %100 Dizel, %20 Doğalgaz (NG), %20 Hidrojen (H<sub>2</sub>) ve bu yakıtların farklı karışım oranlarını (%5 H<sub>2</sub>-%15 NG, %10 H<sub>2</sub>-%10 NG, %15 H<sub>2</sub>-%5 NG) içeren altı farklı senaryo için yürütülmüştür. Elde edilen simülasyon verilerine göre; porttan enjekte edilen hidrojen oranının artırılması, laminer alev hızını ve yanma verimini artırarak silindir içi tepe basıncını ve maksimum yanma sıcaklığını yükseltmiştir. Basınç analizlerinde, hidrojen katkılı senaryoların saf dizele kıyasla yanma fazlamasını öne çektiği ve yaklaşık 7 MPa tepe basınca ulaştığı görülmüştür. Emisyon sonuçları incelendiğinde; hidrojenin karbon içermeyen yapısı ve yüksek oksidasyon kabiliyeti sayesinde, %20 H<sub>2</sub> senaryosunda İs (Kurum), Karbonmonoksit (CO) ve Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarında referans dizel senaryosuna göre belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Özellikle İs emisyonlarındaki düşüş, RCCI stratejisinin dizel motorlardaki kurum problemini çözme potansiyelini doğrulamıştır. Buna karşılık, hidrojenin neden olduğu yüksek silindir içi sıcaklıklar (2000-2400 K aralığı), termal NO<sub>x</sub> (Azot Oksit) oluşum mekanizmasını tetikleyerek NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmıştır. %100 Dizel senaryosu en düşük NO<sub>x</sub> değerini verirken, en yüksek Türbülans Kinetik Enerjiyi ve CO emisyonunu üretmiştir. Doğalgaz (CNG) katkısı ise yanmayı nispeten yavaşlatarak sıcaklıkları kontrol altında tutmuş, ancak yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında kısmi artışlara neden olmuştur. Sonuç olarak bu çalışma, RCCI modunda hidrojen ve doğalgaz kullanımının motor verimini artırma ve karbon kökenli emisyonları düşürme potansiyelini ortaya koyarken, artan NO<sub>x</sub> emisyonları için EGR gibi ek kontrol stratejilerinin gerekliliğini sayısal verilerle kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Reaktif Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme; Verimlilik; Emisyon

## ABSTRACT

In this thesis study, the effects of Natural Gas, Hydrogen, and Diesel fuel combinations on combustion characteristics and exhaust emissions in an engine operating on the Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) principle were numerically investigated. In the study, three-dimensional analyses were performed using CONVERGE CFD (Computational Fluid Dynamics) software, referencing a single-cylinder Lombardini 3 LD 510 diesel engine. Simulations were conducted for six different scenarios containing 100% Diesel, 20% Natural Gas (NG), 20% Hydrogen (H<sub>2</sub>), and various mixture ratios of these fuels (5% H<sub>2</sub>-15% NG, 10% H<sub>2</sub>-10% NG, 15% H<sub>2</sub>-5% NG) at a constant engine speed of 1800 rpm and under a torque load of 23.1 Nm. According to the obtained simulation data, increasing the ratio of port-injected hydrogen increased the laminar flame speed and combustion efficiency, thereby raising the peak in-cylinder pressure and maximum combustion temperature. In the pressure analyses, it was observed that hydrogen-enriched scenarios advanced the combustion phasing compared to pure diesel and reached a peak pressure of approximately 7 MPa. When emission results were examined, thanks to hydrogen's carbon-free structure and high oxidation capability, a significant reduction was recorded in Soot, Carbon Monoxide (CO), and Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in the 20% H<sub>2</sub> scenario compared to the reference diesel scenario. In particular, the decrease in Soot emissions confirmed the potential of the RCCI strategy to solve the soot problem in diesel engines. Conversely, high in-cylinder temperatures (2000-2400 K range) caused by hydrogen triggered the thermal NO<sub>x</sub> (Nitrogen Oxide) formation mechanism, increasing NO<sub>x</sub> emissions. The 100% Diesel scenario yielded the lowest NO<sub>x</sub> value, while producing the highest Turbulent Kinetic Energy and CO emissions. Natural Gas (CNG) addition, on the other hand, relatively slowed down combustion, keeping temperatures under control, but caused partial increases in unburned hydrocarbon (HC) emissions. Consequently, this study numerically demonstrated the potential of using hydrogen and natural gas in RCCI mode to increase engine efficiency and reduce carbon-based emissions, while proving the necessity of additional control strategies such as EGR for increased NO<sub>x</sub> emissions with numerical data.

**Keywords:** Reactivity Controlled Compression Ignition; Efficiency; Emissions

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. İLK MOTORLARIN ORTAYA ÇIKIŞI.....	4
2.1. İçten Yanmalı Motorların Gelişim Süreci.....	4
2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Çevrimler .....	5
2.2.1. Otto Çevrimi ve Buji Ateşlemeli (SI) Motorlar .....	6
2.2.1.1. Buji Ateşlemeli Motorlarda Normal Yanma ve Mekanizmalar.....	6
2.2.1.2. Alev Hızını Etkileyen Faktörler .....	12
2.2.2. Dizel Çevrimi ve Sıkıştırma Ateşlemeli (CI) Motorlar .....	13
2.2.2.1. Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Normal Yanma ve Sistemler .....	13
2.2.2.2. Dizel Motorlarında Ateşleme Gecikmesi ve Etkileyen Faktörler .....	18
2.2.2.3. Ateşleme Zamanlamasının Önemi .....	19
2.3. Anormal Yanma (Vuruntu).....	20
2.3.1. Benzinli Motorlarda Vuruntu .....	21
2.3.2. Dizel Motorlarda Vuruntu .....	23
2.3.3. Benzinli ve Dizel Motorlarda Vuruntunun Karşılaştırılması .....	24
2.4. İlk Motorların Topluma ve Endüstriye Etkileri.....	26
2.5. İçten Yanmalı Motorların Yeri ve Önemi.....	27
2.5.1. İçten Yanmalı Motorların Eksiklikleri.....	28

2.5.2. İçten Yanmalı Motorların Evrimi ve Geleceği .....	28
2.6. Emisyon Azaltımı İçin Geliştirilen Teknolojiler ve Stratejiler .....	29
2.6.1. Sıkı Emisyon Normları ve Yakıt Sorunu.....	30
2.6.2. Petrol Rezervlerinin Azalması ve Alternatif Yakıtlar.....	31
3. DÜŞÜK SICAKLIKLI YANMA (LTC) .....	33
3.1. Düşük Sıcaklıklı Yanma Prensipleri .....	34
3.2. LTC'nin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri.....	35
3.3. LTC Kontrol Yöntemleri.....	36
3.4. Gelecek Çalışma Alanları ve Yol Haritası .....	36
3.5. LTC Stratejileri ve Çalışmalar .....	37
3.5.1. Homojen Şarj Sıkıştırılmalı Ateşleme (HCCI) .....	42
3.5.2. Ön Karışıklı Sıkıştırılmalı Ateşleme (PCCI) .....	46
3.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırılmalı Ateşleme (RCCI) .....	48
3.5.3.1. RCCI Motorlarda Doğalgaz-Hidrojen-Dizel Kullanımı.....	51
4. MATERYAL VE METOD.....	59
4.1. Deneysel Motor Test Sistemi .....	59
4.2. Sayısal Analizler için HAD Modelinin Hazırlanması .....	60
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	66
6. DEĞERLENDİRME.....	90
KAYNAKÇA .....	94

## TABLÖLAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 4.1.</b> Simülasyonda kullanılan motor özellikleri.....	59
<b>Tablo 4.2.</b> Simülasyonda kullanılan dizel enjektör özellikleri .....	65

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Dört zamanlı bir içten yanmalı motorun çalışma prensibi ve strokları.....	4
Şekil 2.2. SI motorda silindir içi basıncın krank açısına göre değişimi.....	7
Şekil 2.3. Silindir içi basınç ve gecikme döneminin krank mili konumuna göre değişimi .....	8
Şekil 2.4. Silindir içi basınç ve yanma döneminin krank mili konumuna göre değişimi .....	9
Şekil 2.5. CI motorda yanma evreleri ve silindir basıncının değişimi.....	14
Şekil 2.6. CI motorlarda net ısı salınımı ve yanma evrelerinin karakteristik değişimi.....	19
Şekil 2.7. Farklı ateşleme zamanlamalarının silindir içi basınç eğrisine etkisi .....	20
Şekil 2.8. Yanma odasında normal yanma ve basınç dalgalanmaları .....	22
Şekil 2.9. Yanma odasında anormal yanma ve basınç dalgalanmaları .....	22
Şekil 2.10. SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve vurutuların karşılaştırılması .....	24
Şekil 2.11. SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve tutuşmanın karşılaştırılması .....	25
Şekil 3.1. LTC stratejileri ve birbirleriyle olan ilişkileri.....	39
Şekil 3.2. Çeşitli yanma stratejilerinin karşılaştırılması .....	41
Şekil 3.3. HCCI motorda silindir içi basınç ve krank açısının değişimi.....	43
Şekil 3.4. Geleneksel motorlar ile HCCI motorunun yanma sistemleri.....	44
Şekil 4.1. Deneysel test sisteminin şematik gösterimi .....	60
Şekil 4.2. Silindir hesaplama hacmindeki çeşitli kısımlar .....	61
Şekil 4.3. Simülasyonda kullanılan silindir hacmi ve sınır koşulları .....	62
Şekil 4.4. HAD simülasyonları için kullanılan koşullar ve değerler.....	64
Şekil 5.1. Silindir basıncının krank açısına bağlı değişimi.....	68
Şekil 5.2. Motordaki ortalama sıcaklığın krank açısına bağlı değişimi .....	70
Şekil 5.3. Hidrokarbon emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi .....	72
Şekil 5.4. Azot oksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi .....	74
Şekil 5.5. İS emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi.....	75

<b>Şekil 5.6.</b> Karbonmonoksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi.....	77
<b>Şekil 5.7.</b> Karbondioksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi.....	78
<b>Şekil 5.8.</b> Sprey penetrasyonunun krank açısına bağlı değişimi .....	80
<b>Şekil 5.9.</b> Türbülans kinetik enerjinin krank açısına bağlı değişimi .....	81
<b>Şekil 5.10.</b> Brüt indike verimin yakıt türüne bağlı değişimi .....	83
<b>Şekil 5.11.</b> Akış hız profilinin krank açısına bağlı değişimi .....	85
<b>Şekil 5.12.</b> Sıcaklık profilinin krank açısına bağlı değişimi .....	86
<b>Şekil 5.13.</b> Azot oksit profilinin krank açısına bağlı değişimi .....	88
<b>Şekil 5.14.</b> Türbülans kinetik enerji profilinin krank açısına bağlı değişimi .....	89

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

°K	: Kelvin
°KA	: Krank Açısı
HP	: Beygir Gücü
MPa	: Megapascal
Nm	: Newton-Metre
Ppm	: Bir milyonda bir
Rpm	: Dakika başına devir
AC	: Alternatif Akım
AI	: Yapay Zeka
AMR	: Adaptif Ağ İyileştirme
AÖNÖ	: Alt Ölü Nokta Öncesi
AÖNS	: Alt Ölü Nokta Sonrası
CCS	: Karbon Yakalama ve Depolama
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CH <sub>4</sub>	: Metan
CI	: Sıkıştırma ile Ateşleme
CNG	: Sıkıştırılmış Doğalgaz
CO	: Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CRDI	: Ortak Hatlı Doğrudan Enjeksiyon
CRT	: Sürekli Rejenerasyonlu Tuzak
DI	: Doğrudan Enjeksiyon
DICI	: Doğrudan Enjeksiyonlu Sıkıştırma ile Ateşleme
DME	: Dimetil Eter

DOC	: Dizel Oksidasyon Katalizörü
DPF	: Dizel Partikül Filtresi
ECU	: Elektronik Kontrol Ünitesi
EGR	: Egzoz Gazı Devridaimi
GDI	: Benzinli Doğrudan Enjeksiyon
GTL	: Gazdan Sıvıya
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HC	: Hidrokarbon
HCCI	: Homojen Yük Sıkıştırılmalı Ateşlemeli
HCNG	: Sıkıştırılmış Doğalgaz ve Hidrojen Karışımı
HRR	: Isı Açığa Çıkış Hızı
IDI	: Dolaylı Enjeksiyon
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IoT	: Nesnelerin İnterneti
İYM	: İçten Yanmalı Motor
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğalgaz
LTC	: Düşük Sıcaklıklı Yanma
MPC	: Model Öngörülü Kontrol
MPFI	: Çok Noktadan Yakıt Enjeksiyonu
N <sub>2</sub>	: Azot
N <sub>2</sub> O	: Azot Protoksit
NG	: Doğalgaz
NO <sub>2</sub>	: Azot Dioksit
NO <sub>x</sub>	: Azot Oksit
NSR	: Azot Oksit Depolama ve İndirgeme

O <sub>2</sub>	: Oksijen
OBD	: Araç İçi Tanılama
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
PCCI	: Ön Karışımli Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme
PFI	: Porttan Yakıt Enjeksiyonu
PHEV	: Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç
PM	: Partikül Madde
PPC	: Kısmi Ön Karışımli Yanma
RCCI	: Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme
RNG	: Re-Normalizasyon Grubu
SCCI	: Buji Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme
SCR	: Seçici Katalitik İndirgeme
SI	: Buji Ateşlemeli
TKE	: Türbülans Kinetik Enerjisi
TWC	: Üç Yollu Katalitik Konvertör
UHC	: Yanmamış Hidrokarbon Emisyonları
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Nokta Öncesi
ÜÖNS	: Üst Ölü Nokta Sonrası
VGT	: Değişken Geometrili Turboşarj
VVT	: Değişken Valf Zamanlaması
YEKA	: Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları

## 1. GİRİŞ

Küresel ekonomi ve modern toplumun işleyişi, güvenilir ulaşım sistemlerinin varlığına büyük ölçüde bağımlıdır. Günümüzde sahip olduğumuz yaşam standartlarına özellikle fiziksel altyapı ve imkânlar açısından milyonlarca motorlu taşıtın sağladığı ulaşım olanakları olmadan ulaşmak mümkün olmazdı. Taşıtlarda, gemilerde, iş makinelerinde, tarım araçlarında ve jeneratörlerde temel güç kaynağı hâlen içten yanmalı motorlardır (Reitz vd., 2020). Bugün otomotiv sektörünü domine eden bu motorlar, fosil kökenli petrol türevli yakıtlarla çalışmaktadır. Yüksek performansları, kontrol edilebilirlikleri, dayanıklılıkları ve sağlamlıkları sayesinde, geçen yüzyıldan bu yana en çok kabul gören enerji kaynakları olmuşlardır. Ancak dünya genelinde artan makineleşme, fosil yakıtlara olan talebin ve motorlu araç sayısının keskin biçimde yükselmesine yol açmıştır. Uluslararası Enerji Görünümü verilerine göre, yakıt talebinin önümüzdeki otuz yıl boyunca artmaya devam edeceği ve 2040 yılında enerji tüketiminin %78'inin hâlâ fosil yakıtlardan karşılanacağı öngörülmektedir. (EIA, 2021)

Enerji, her ülkenin ekonomik kalkınmasının temel girdilerinden biridir. Gelişmekte olan ülkelerde hızla artan enerji tüketimi; daha fazla petrol ithalatına, dolayısıyla fosil yakıtlara olan bağımlılığın derinleşmesine neden olmaktadır. Bu durum, enerji arzını sürdürülebilir bir zemine oturtacak adımların gecikmeden atılmasını zorunlu kılmaktadır. Biyoyakıtlar, enerji güvenliğine katkı sağlayabilecek potansiyel seçenekler arasında yer alsa da, hangi kaynak ve teknolojilere öncelik verileceği konusunda net politik tercihler yapılmalıdır. Yakıt maliyetleri doğrudan ham petrol fiyatlarına bağlı olarak dalgalanmakta, ayrıca yakıtların dağıtım altyapısı ve kalitesi de önemli sorunlar teşkil etmektedir. CNG ve LPG gibi alternatif yakıtların dolun altyapısı ile elektrikli ve hibrit araçlar için şarj istasyonlarının yaygınlaştırılması; DME, metanol ve GTL (gazdan sıvıya) gibi sentetik yakıtların kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir (IEA, 2023).

Geleceğe yönelik tahminlere göre, elektrikli ve hibrit araçların pazar payı artsa da, bu teknolojiler 2035 yılında dahi küresel araç filosunun sınırlı bir kısmını oluşturacak ve içten yanmalı motorlar ulaşımdaki hakimiyetini sürdürecektir (OPEC, 2023). Modern bataryaların hacimsel ve kütleli enerji yoğunluğunun, fosil yakıtların çok altında kalması nedeniyle, elektrikli araçlar şimdilik kısa mesafe ve hafif hizmet sınıfı için uygundur. Bu nedenle içten yanmalı motorların, önümüzdeki onlarca yıl boyunca kullanılmaya devam edeceği

düşünülmektedir. Dolayısıyla, mevcut motorların yakıt dönüşüm verimini artırmaya ve zararlı emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalar, günümüz koşullarında hem gerekli hem de haklı bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Dünya, hem fosil yakıt rezervlerinin azalması hem de çevresel koşulların bozulması nedeniyle ciddi bir krizle yüz yüzedir. Çevre kirliliği, pek çok şehirde önemli bir halk sağlığı problemidir. Epidemiyolojik araştırmalar, hava kirliliğinin her yıl çok sayıda ölüme, yüksek sağlık harcamalarına ve verimlilik kaybına neden olduğunu göstermektedir. İçten yanmalı motorlar fosil yakıt yaktıkları için küresel ısınmanın temel nedeni olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) ve diazot monoksit (N<sub>2</sub>O) gibi sera gazlarını salmaktadır. Bu gazların yarattığı ısı enerji dengesizliği, iklim değişikliği tehdidini artırmaktadır (IPCC, 2023).

Bunun yanı sıra, güneş ışığı altında yanmamış hidrokarbonlar ile azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) tepkimeye girmesiyle oluşan fotokimyasal duman, şehirlerin üzerine çöken kahverengimsi gri bir sis tabakası yaratmaktadır. Araçlardan atmosfere salınan NO<sub>x</sub> ve hidrokarbonlar, yer seviyesinde ozon birikimine ve asit yağmurlarına yol açarak hem insan sağlığını hem de ekosistemi tehdit etmektedir. Ozon tabakasının incilmesi de ayrı bir çevresel tehdit olarak karşımıza çıkmakta; insanları, biyosferi ve modern altyapıyı koruyan bu kalkanın zarar görmesi riskleri artırmaktadır (WMO, 2022).

Özellikle dizel motorlardan yayılan katı parçacıklar (kurum), büyük ölçüde karbon esaslıdır ve üzerine çeşitli kanserojen maddeler tutunabilir. 2.5 mikrometreden küçük parçacıklar havada uzun süre asılı kalarak solunum sistemine ulaşabilirken, 1 mikrometreden küçük olanlar derin dokulara kadar ilerleyebilmektedir. Bu parçacıkların yüzeyine yapışan polisiklik aromatik hidrokarbonlar kanser riski oluşturur. Bu nedenle sadece partikül kütlesini azaltmak yeterli değildir; sayıca fazla olan ancak kütlesi düşük olan ultra ince parçacıkların da engellenmesi gerekir. (Pope ve Dockery, 2006)

Bu zararları azaltmak amacıyla dünya genelinde giderek daha katı emisyon limitleri yürürlüğe konmuştur. Emisyon standartları, genellikle NO<sub>x</sub>, hidrokarbonlar, CO ve partikül madde gibi "düzenlenmiş kirleticileri" kapsar. Ancak dizel motorlarda silindir içindeki heterojen yanma nedeniyle NO<sub>x</sub> ve kurum emisyonlarını aynı anda azaltmak oldukça zordur. Dizel çevriminde yakıt, sıcak ve sıkıştırılmış havaya püskürtüldüğünde heterojen bir karışım oluşur. NO<sub>x</sub>, alevin yüksek sıcaklıklı bölgelerinde oluşurken; yakıtın havayla iyi karışmadığı zengin bölgelerde kurum çekirdekleri meydana gelir. Bu "NO<sub>x</sub>-Kurum çelişkisi", üreticileri daha karmaşık ve maliyetli teknolojiler geliştirmeye zorlamaktadır (Reitz vd., 2020).

Mevcut sorunlara çözüm olarak, son yıllarda öne çıkan sistemlerden biri Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşlemeli (RCCI) motor teknolojisidir. RCCI motorlar, klasik buji ateşlemeli veya dizel motorlardan farklı olarak, birden fazla yakıtın reaktivite farkı üzerinden yanmayı kontrol eden bir stratejiye sahiptir. Genellikle düşük reaktiviteye sahip bir gaz yakıt (doğalgaz, metan veya hidrojen) emme zamanında silindire önceden karıştırılarak verilirken, yüksek reaktiviteye sahip dizel gibi bir yakıt sıkıştırma zamanının sonunda doğrudan enjekte edilir. (Kokjohn vd., 2011). Bu strateji sayesinde daha homojen bir yanma gerçekleşir, silindir içi sıcaklıklar düşük tutulur ve bu da özellikle NO<sub>x</sub> ve is partikül emisyonlarını önemli ölçüde azaltır. Düşük Sıcaklık Yanması (LTC) prensibine dayanan bu sistem, termal verimlilik açısından da klasik dizel motorlara kıyasla avantaj sunmaktadır.

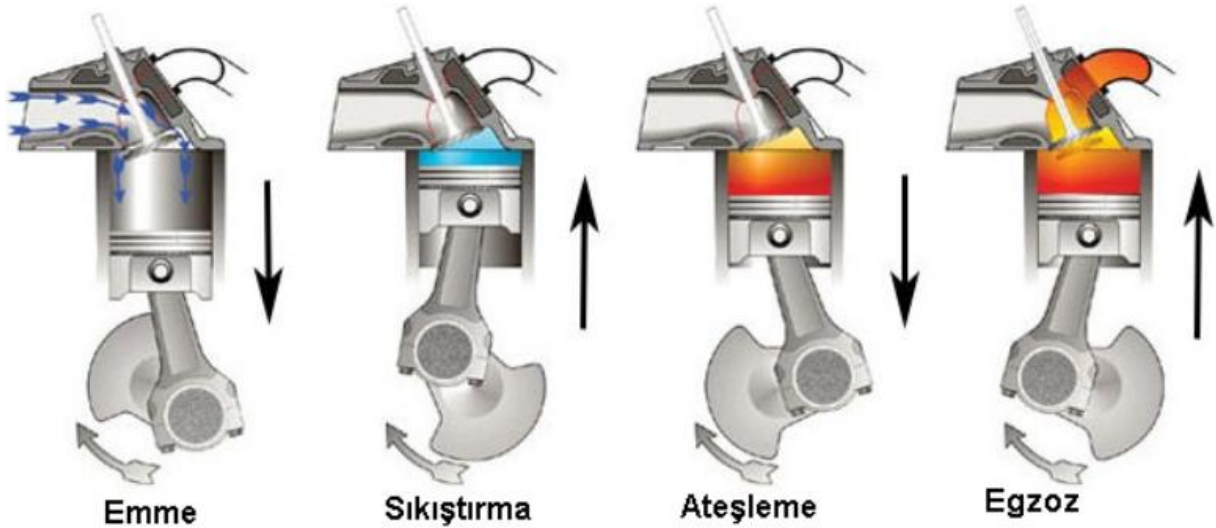
Bu çerçevede, doğalgaz ve hidrojen gibi gaz yakıtların RCCI sistemlerde düşük reaktif bileşen olarak birlikte değerlendirilmesi, literatürde henüz çok fazla çalışılmamış özgün bir yaklaşımı temsil etmektedir. Doğalgaz, düşük karbon içeriği nedeniyle geleneksel yakıtlara göre daha az CO<sub>2</sub> salınımı sağlarken; hidrojen, karbon içermemesi sebebiyle sıfır CO<sub>2</sub> emisyonu potansiyeline sahiptir. Ayrıca hidrojenin yüksek alev hızı ve geniş tutuşma sınırları motor verimini artırma fırsatı sunsa da, yüksek yanıcılığı motor tasarımında hassas kontrol önlemlerini gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında, RCCI prensibi ile çalışan bir motorda doğalgaz ve hidrojenin birlikte, dizel yakıtla kombine şekilde kullanılması sonucu oluşan yanma karakteristikleri ve emisyon değerleri sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal yöntemler ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) temelli simülasyon teknikleri, silindir içi yanma süreci hakkında yüksek çözünürlüklü veriler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemler sayesinde farklı yakıt karışım oranlarının motor performansı üzerindeki etkisi detaylı biçimde gözlemlenebilmekte ve deneysel maliyetler azaltılmaktadır.

Çalışma kapsamında, silindir içi basınç-zaman eğrileri, ısı yayılımı, ön ateşleme süresi ve ortalama efektif basınç gibi parametreler ile NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, is ve HC emisyonları analiz edilmiştir. Tezin özgün katkısı, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınan doğalgaz-hidrojen ikilisinin RCCI sistemine entegrasyonunun detaylı bir şekilde değerlendirilmiş olmasıdır. Sonuç olarak, bu çalışma, alternatif yakıtların çoklu kullanımı konusunda literatüre katkı sağlamakta; daha yeşil ve verimli motor sistemlerinin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge çalışmalarına ve hidrojenin karbon nötr enerji politikaları içindeki rolüne bilimsel bir zemin oluşturmaktadır.

## 2. İLK MOTORLARIN ORTAYA ÇIKIŞI

İçten yanmalı motorlar, yakıtın bünyesindeki kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren ısı makineleri olarak tanımlanır. Bu sistemlerde güç üretimi, silindir içerisine alınan iş akışkanının (karışımın) yakılması ve ortaya çıkan yanma ürünlerinin doğrudan pistonu hareket ettirmesiyle sağlanır. Günümüzde otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan içten yanmalı motor türleri; sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) dizel motorlar ve buji ile ateşlemeli (SI) benzinli motorlardır. Her iki motor tipi de ağırlıklı olarak dört zamanlı çalışma prensibine dayanır; bu döngü sırasıyla emme, sıkıştırma, genleşme (iş) ve egzoz evrelerinden oluşur. Söz konusu iki geleneksel yanma teknolojisi arasında karışımın hazırlanması ve yanma karakteristiği açısından belirgin farklar bulunsa da, dayandıkları temel çevrim esasları ortaktır. Şekil 2.1.'de dört zamanlı bir içten yanmalı motorun çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dört zamanlı bir içten yanmalı motorun çalışma prensibi ve strokları

Kaynak: (Pulkrabek, 2004)

### 2.1. İçten Yanmalı Motorların Gelişim Süreci

Alman mühendis Nikolaus Otto (1832-1891), 1876 yılında "Otto Sessiz Motoru" adını verdiği tasarımıyla, silindir içerisinde sıkıştırma işlemini gerçekleştiren ilk işlevsel dört zamanlı motoru imal etmiştir. Sıkıştırma oranı 2,5 olan bu makine, dakikada 160 devirle çalışarak 2 beygir güç üretmiş ve %14'lük bir verimlilik değerine ulaşmıştır. (Heywood, 1988). Modern içten yanmalı motorların mucidi ve bu endüstrinin kurucusu olarak kabul

edilen Otto, aslında resmi bir mühendislik eğitimi almamış, kendisini bu alanda yetiştirmiş bir isimdir. Dört zamanlı motor konsepti her ne kadar 1861 yılında A. de Rochas tarafından teorize edilip patentlense de, ticari başarıya ulaşan ilk alev ateşlemeli motoru inşa etme başarısı Otto'ya aittir. Kariyerini motor teknolojilerine adayan Otto, 1872'de ilk motor üretim firması olan N. A. Otto ve Cie'yi kurmuş; Gottlieb Daimler ve Wilhelm Maybach gibi önemli mühendisleri bünyesine katmıştır. Bu ekip daha sonra 1890'da Daimler Motor Company'yi kurarken, Otto'nun oğlu Gustav da ilerleyen yıllarda BMW markasının temellerini atmıştır (Pulkrabek, 2004).

1897 yılına gelindiğinde ise Alman mühendis Rudolph Diesel (1858-1913), doğrudan yakıt enjeksiyonu prensibine dayanan ilk pratik dört zamanlı motoru geliştirmiştir. Bu sistem, yüksek sıkıştırma oranlarından yararlanarak yakıt-hava karışımının kendiliğinden tutuşmasını ve yanmasını sağlamaktadır. 1880 yılında Münih Politeknik Okulu'ndan mezun olan Diesel, kariyerinin başında amonyaklı Rankine çevrimi üzerine çalışmış, ardından MAN şirketiyle iş birliği yaparak sıkıştırma ateşlemeli motorların öncüsü olmuştur. Tasarım sürecinde Carnot'un termodinamik ilkelerine sadık kalmayı hedefleyen Diesel, sabit sıcaklıkta yanmayı pratikte gerçekleştiremeyince, çözüm olarak sabit basınçta yanma sistemini benimsemiştir (Heywood, 1988).

İçten yanmalı motorlarda yaygın olarak kullanılan iki ana çevrim, Otto ve Dizel çevrimleridir. Bu çevrimler, isimlerini ilk defa geliştiren mühendislerden alır. Otto çevrimi, sabit hacimle gerçekleşen yanma ya da ateşleme çevrimi olarak adlandırılırken, Dizel çevrimi sabit basınçla yanma ya da sıkıştırma ateşlemesi çevrimi olarak tanımlanır. Her iki çevrim de, pistonun her aşağı hareketinde enerji üreten iki zamanlı ya da her iki aşağı hareketinde enerji üreten dört zamanlı olarak düzenlenebilir (Çengel ve Boles, 2019).

## **2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Çevrimler**

İçten yanmalı motorlarda en fazla kullanılan ve üzerinde en çok çalışma yapılan çevrimler Otto ve Dizel olup, bunların dışında başka çevrimler de bulunmaktadır.

- **Otto Çevrimi (Kıvılcım Ateşlemeli):** Benzinli motorlarda kullanılır. Sabit hacimde ısı alıp veren ideal çevrim.
- **Dizel Çevrimi (Sıkıştırma Ateşlemeli):** Dizel motorlarda kullanılır. Sabit basınçta ısı alımı varsayılır.

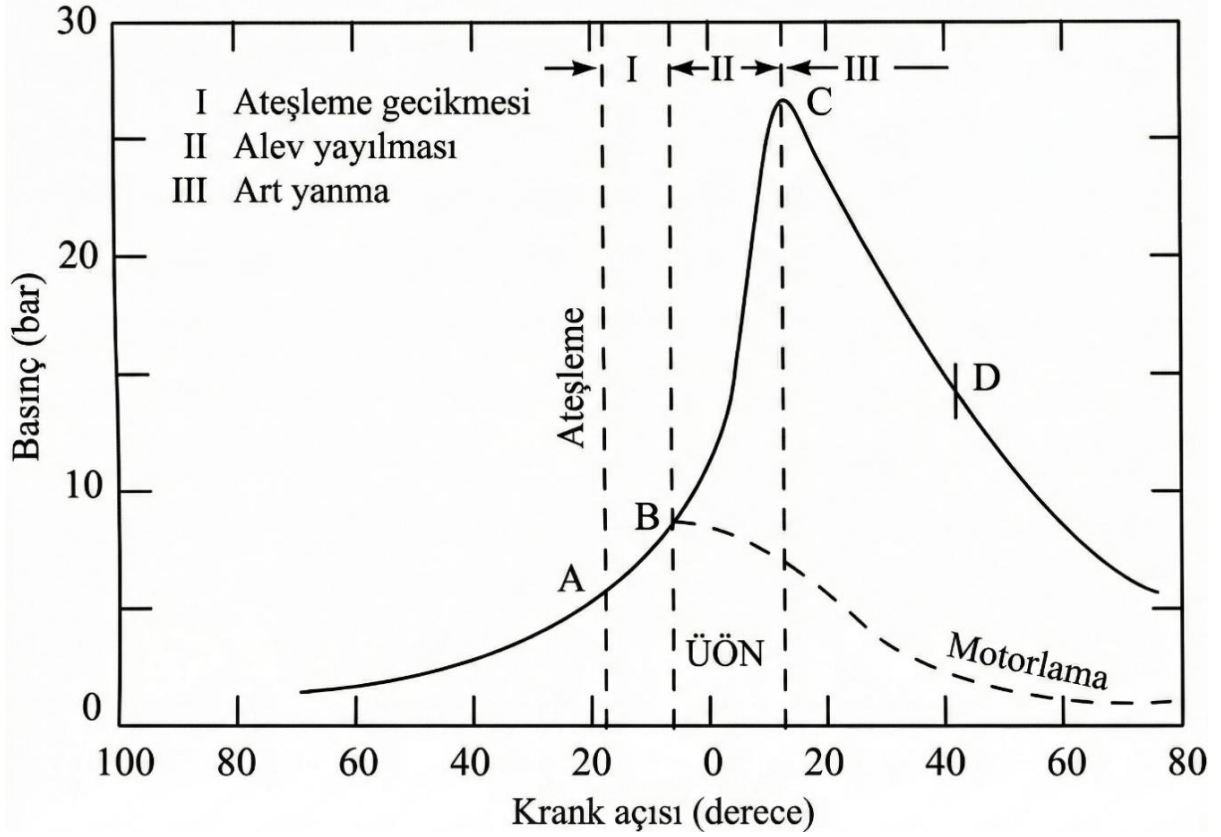
- Dual / Sabit Hacim–Sabit Basınç (Karma) Çevrim: Gerçek motorlara daha yakın; hem sabit hacim hem sabit basınç yanma içerir.
- Atkinson Çevrimi: Emme süresini uzatarak efektif sıkıştırmayı düşürür, verimi artırır. Hibritlerde yaygın.
- Miller Çevrimi: Atkinson'a benzer; valf zamanlamasıyla sıkıştırma azaltılır, turbo ile desteklenir.
- Brayton Çevrimi: Aslında gaz türbinlerine aittir ama bazı gelişmiş motorlarda benzer prensip kullanılır (sürekli yanma).

### **2.2.1. Otto Çevrimi ve Buji Ateşlemeli (SI) Motorlar**

Otto Çevriminin dört zamanlı çalışma döngüsü, Emme Zamanı ile başlar; bu aşamada pistonun aşağı yönlü hareketiyle oluşan vakum sayesinde hava ve yakıt karışımı açık olan emme valflerinden silindir içine doldurulur. Ardından gelen Sıkıştırma Zamanında, emme ve egzoz valfleri kapalı konumdadır ve pistonun yukarı hareketiyle karışım sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılır; bu evrenin sonunda ateşleme sistemi tarafından üretilen kıvılcım ile yanma başlatılır. Yanma ve Genişleme Zamanında, yanma reaksiyonu sonucu açığa çıkan yüksek basınç, pistonu güçlü bir şekilde aşağı iterek motorun ihtiyaç duyduğu mekanik enerjiyi üretir. Döngünün son aşaması olan Egzoz Zamanında ise, pistonun yukarı hareketiyle yanmış gazlar açılan egzoz valfinden dışarı atılarak çevrim tamamlanır ve yeni bir döngü için sistem hazır hale gelir (Heywood, 1988).

#### **2.2.1.1. Buji Ateşlemeli Motorlarda Normal Yanma ve Mekanizmalar**

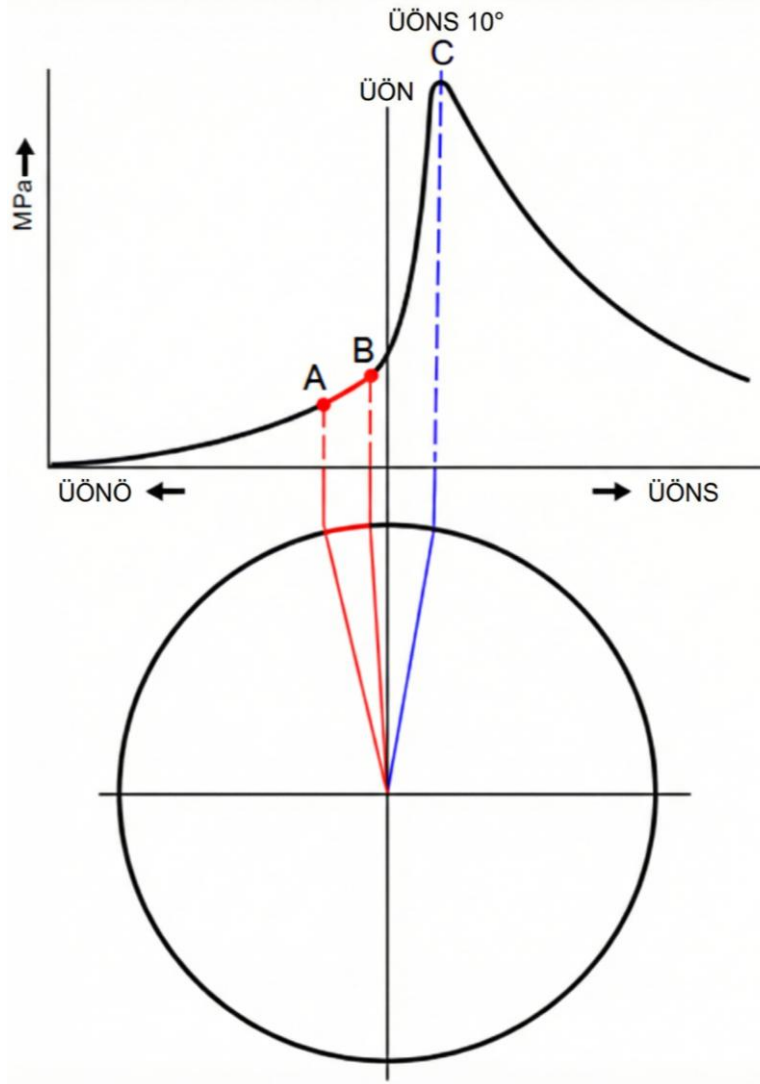
Kıvılcım ateşlemeli motorlarda normal yanma süreci, birbirini takip eden üç temel aşamadan oluşur. Bu aşamalar, basınç-krank açısı diyagramı üzerinde sırasıyla; Gecikme Dönemi (A–B), Alev Yayılma Dönemi (B–C) ve Duvar Sönümleme Dönemi (C–D) olarak tanımlanır. (Heywood, 1988). Süreçteki kritik noktalar ise şu şekildedir: A noktası kıvılcımın çıktığı anı (örneğin Üst Ölü Nokta'dan 20° önce), B noktası silindir içi basıncın sıkıştırma basıncından ayrılarak yükselmeye başladığı anı (örneğin Üst Ölü Nokta'dan 8° önce) ve C noktası ise en yüksek yanma basıncının oluştuğu anı temsil eder. Şekil 2.2.'de SI motorda silindir içi basıncın krank açısına göre değişimleri ve (A-B-C-D) bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2. SI motorda silindir içi basıncın krank açısına göre değişimi

Kaynak: (Stone, 2012)

- Gecikme Dönemi (A–B): Bu ilk safha, alev çekirdeğinin oluşup kendi kendine büyüyebilecek seviyeye gelmesini kapsayan hazırlık evresidir. Yakıt-hava karışımının buji tarafından ateşlendiği an ile gözle görülür bir yanma sürecine geçildiği an arasında geçen bu süreye "ateşleme gecikmesi" adı verilir. Tamamen kimyasal nitelikli olan bu süreç; karışımın sıcaklığı ve basıncı, yakıtın moleküler yapısı, silindir içinde kalan artık egzoz gazlarının oranı ve sıcaklık ile kimyasal reaksiyon hızı arasındaki ilişkiye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekil 2.3.'te Silindir içi basınç ve gecikme döneminin krank mili konumuna göre değişimi gösterilmiştir.

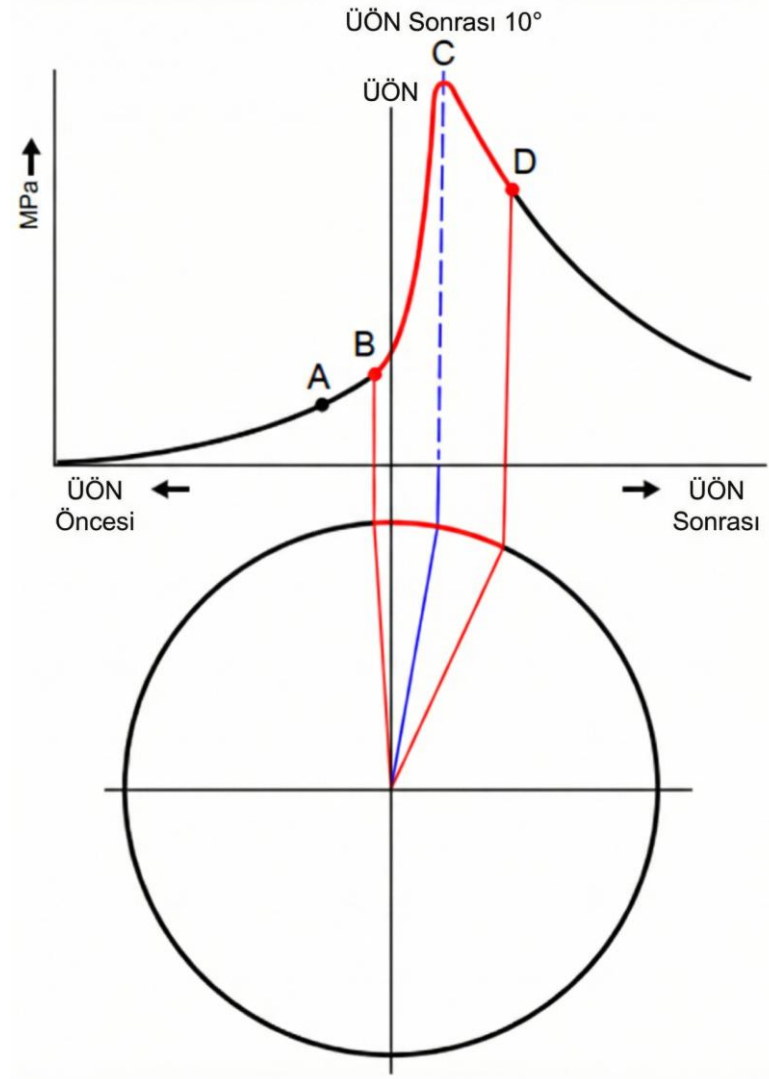


Şekil 2.3. Silindir içi basınç ve gecikme döneminin krank mili konumuna göre değişimi

**Kaynak:** (Pulkrabek, 2004)

- Alev Yayılması (B–C): Bu aşama fiziksel bir süreçtir ve oluşan alev cephesinin yanma odasının tamamına yayılmasını içerir. Alev çekirdeği oluştuğundan sonra, yanma bölgesi yavaş yavaş dışa doğru genişlemeye başlar. Bu genişleme hızına "alev yayılma hızı", bu sürecin gerçekleştiği zaman aralığına ise "alev yayılma dönemi" denir. Silindire daha fazla hava girdiğinde, hava–yakıt karışımı daha yoğun bir yapı kazanır ve moleküller arasındaki mesafe azaldığı için alevin karışım içinde ilerlemesi hızlanır. Aynı şekilde karışım içinde oluşturulan girdap hareketi (türbülans) arttıkça, alev cephesi daha hızlı yayılır. Alev yayılmasının başladığı an, basınç eğrisinin sıkıştırma eğrisinden ayrıldığı noktadır. Bu dönemde alev, neredeyse sabit bir hızla ilerler. Yanmakta olan karışımın yalnızca küçük bir kısmı silindir duvarlarıyla temas

ettiğinden, bu sırada duvarlara ısı transferi düşüktür. Isı açığa çıkış hızı, büyük oranda türbülans seviyesine ve karışım oranının kimyasal tepkime hızına etkisine bağlıdır. Silindir hacminin bu süreçte neredeyse sabit kalması nedeniyle, basınç artış hızı da ısı açığa çıkış hızına paralel olarak değişir. Şekil 2.4.'te Silindir içi basınç ve yanma döneminin krank mili konumuna göre değişimi gösterilmiştir



Şekil 2.4. Silindir içi basınç ve yanma döneminin krank mili konumuna göre değişimi

**Kaynak:** (Pulkrabek, 2004)

- Yanma Sonrası (C–D): Bu aşamada alev hızı düşmeye başlar. Alev cephesinin alanı, yanma odası duvarlarına yaklaştıkça küçüldüğünden yanma hızı da azalır. Genişleme strokunun bu evreden önce başlaması nedeniyle, piston Üst Ölü Nokta'dan uzaklaşırken silindir hacmi artar ve yanma devam etse bile basınç yükselmez.

Hava, emme manifoldu aracılığıyla motora girer ve her silindire eşit bir şekilde dağıtılır. Bu hava, genellikle benzin ile karışır ve bu karışım ya emme manifoldunda, emme portunda ya da doğrudan silindire enjeksiyon yoluyla oluşturulur. Karışım ateşlendiğinde, oluşan alev dalgası hızla yayılarak silindirin iç sıcaklık ve basıncını artırır. Alev, silindirin duvarlarına ulaştığında söner. Ancak, iç basınç çok yüksek olursa, ateşin önündeki sıkıştırılmış gazlar kendiliğinden ateşlenebilir ve bu da "detonasyon" olarak adlandırılan soruna neden olabilir. Bu durum, Otto çevrimli motorlarda sıkıştırma oranını ve dolayısıyla motor verimliliğini sınırlar.

Egzoz gazları, egzoz valflerinden çıkarak egzoz manifoldu aracılığıyla ana egzoz borusuna yönlendirilir. Otto çevriminde, gaz kelebeği hava miktarını kontrol eder. Gaz kelebeği kapandığında, silindire giren hava miktarı azalır ve bu da silindirin içindeki basıncı düşürür. Yakıt akışı, hava akışına orantılı olarak düzenlendiği için, gaz kelebeği motorun gücünü belirleyen temel unsurdur.

Klasik buji ateşlemeli motorlarda yakıt beslemesi, geçmişte karbüratörler veya emme manifoldundaki enjektörler aracılığıyla yapılırdı. Bu sistemlerde yakıt, manifold içinde parçalanıp buharlaşarak taze havayla karışır. Günümüz modern motorlarında ise genellikle 2 ila 5 bar gibi düşük basınçlarda çalışan manifolda püskürtme (PFI) sistemleri kullanılır. (Stone, 2012). Emme zamanında silindire alınan bu karışım, içeride kalan artık gazlarla birleşmeye devam eder ve sıkıştırma işlemi başladığında silindir içinde neredeyse tamamen homojen bir yapı oluşur.

Buharlaşmış yakıt, hava ve egzoz artıklarından oluşan bu karışım sıkıştırılır ve piston tam üst ölü noktaya ulaşmadan hemen önce buji kıvılcımıyla ateşlenir. Bu kıvılcım, yanmayı başlatacak olan alev çekirdeğini meydana getirir. Ateşleme anında buji çevresindeki gaz hareketleri ve karışım oranı, alevin gelişimi açısından kritik bir role sahiptir; bu nedenle her çevrimde yanmanın hızı ve yayılma şekli farklılık gösterebilir. Oluşan alev, türbülansın etkisiyle tüm odaya yayılarak silindir duvarlarına kadar ilerler ve orada sönmülenir (Heywood, 1988).

Gelişmiş direkt enjeksiyonlu (DI) motorlar, hem homojen hem de tabakalı (heterojen) yanma stratejilerini kullanabildikleri için büyük avantaj sağlarlar. Yüksek güç talebinde, yakıt emme zamanında püskürtülerek tıpkı PFI sistemlerindeki gibi homojen bir karışım hazırlanır. Düşük yüklerde ise "tabakalı karışım" modu devreye girer. Bu modda, pompalama kayıplarını azaltmak amacıyla gaz kelebeği neredeyse tam açık tutulur ve yakıt, ateşleme anında sadece

buji çevresinde yanabilir bir yoğunluk oluşturacak şekilde kademeli olarak püskürtülür (Zhao, 2003)

Normal bir yanma sürecinde alev, bujiden başlayarak düzenli bir şekilde ilerler. Ancak bazı durumlarda, alevin henüz ulaşmadığı uç bölgelerdeki gaz karışımı, artan basınç ve sıcaklık nedeniyle kendiliğinden tutuşabilir. "Vuruntu" adı verilen bu olay, silindir içinde ani basınç dalgalanmalarına ve motor parçalarında yapısal hasara yol açabilir. Vuruntu riski, buji ateşlemeli motorlarda sıkıştırma oranının, dolayısıyla da motor veriminin artırılmasını sınırlayan en temel faktördür.

Buna karşılık bu motorların en önemli avantajı, hafif yapıları sayesinde yüksek devirlere çıkabilmeleri ve birim hacimden yüksek güç üretebilmeleridir. Güç kontrolü, "gaz kelebeği" aracılığıyla silindire giren hava miktarının değiştirilmesiyle sağlanır. Ancak kelebeğin kısılması, emme sırasında motora direnç göstererek pompalama kayıplarına neden olur. Günlük araç kullanımının büyük kısmı düşük ve orta yüklerde gerçekleştiğinden, bu kayıplar yakıt verimliliğini olumsuz etkileyen önemli bir unsurdur.

Emisyon oluşumu ise doğrudan yanma karakteristiğine bağlıdır. Alevin devamlılığı için gereken 1900 K üzerindeki sıcaklıklar, kaçınılmaz olarak yüksek miktarda azot oksit ( $NO_x$ ) üretimine neden olur. (Heywood, 1988). Karbonmonoksit (CO) ise genellikle ortamda yeterli oksijen bulunmadığında, yani yakıt tam yanmadığında ortaya çıkar. Yanmamış hidrokarbonlar (HC) ise alevin sönümlendiği soğuk silindir duvarları, segman boşlukları gibi ölü hacimler ve yağ filmindeki yakıt emilimi nedeniyle oluşur. Motor tasarım parametreleri  $NO_x$  ve HC emisyonlarını doğrudan etkilerken, CO oluşumu daha çok hava-yakıt oranına bağlıdır.

1965 öncesinde büyük ölçüde mekanik olan motor kontrol sistemleri, zamanla yerini elektronik enjeksiyon sistemlerine bırakmıştır. Çevre yasalarının sıkılaşması, bu teknolojilerin gelişiminde itici güç olmuştur. Günümüzde egzoz emisyonlarını yasal sınırlara çekmek için kullanılan üç yollu katalitik konvertörler, CO ve HC'yi temizlerken aynı anda  $NO_x$ 'i de indirger. Ancak bu sistemin verimli çalışabilmesi için motorun çok hassas bir hava-yakıt oranında (stokiyometrik) çalışması gerekir; bu denge de egzoz hattındaki oksijen sensörleri yardımıyla sürekli kontrol altında tutulur.

### 2.2.1.2. Alev Hızını Etkileyen Faktörler

Alev hızının büyüklüğü, silindir içindeki basınç artışını doğrudan etkiler ve özellikle kıvılcım ateşlemeli motorlarda görülen bazı anormal yanma türleriyle yakından ilişkilidir. Alev hızını belirleyen başlıca unsurlar şunlardır: (Pulkrabek, 2004).

- **Türbülans:** Karışımda türbülans yoksa alev hızı oldukça düşüktür; türbülans arttıkça alev daha hızlı yayılır. Silindir kapağının ve piston tepesinin geometrisi, sıkıştırma sırasında türbülansı artıracak şekilde tasarlanabilir. Türbülansın artması, daha yüksek alev hızı, yanma süresinin kısalması ve anormal yanma olasılığının azalması gibi olumlu etkiler yaratır. Ancak aşırı türbülans, alevin sönmesine ve motorun düzensiz, gürültülü çalışmasına neden olabilir.
- **Yakıt–Hava Oranı:** Alev hızına çok fazla etki eder. Alevin en hızlı olduğu durum, karışımın stokiyometrik değerinden biraz zengin olduğu (Eşdeğerlik oranı  $\approx 1.1 - 1.2$ ) aralıktır. (Glassman ve Yetter, 2008). Karışım daha fakir olduğunda yanma sıcaklığı düştüğü için, aşırı zengin olduğunda ise yanma tamamlanamadığı için alev hızı düşer.
- **Sıcaklık ve Basınç:** Emme havası sıcaklığı ve basıncı arttıkça alev hızı da yükselir. Bunun temel nedeni, başlangıç yoğunluğundaki artıştır. Yüksek yoğunluk; daha iyi yakıt buharlaşması, daha homojen karışım ve daha hızlı kimyasal reaksiyonlar sağlar.
- **Sıkıştırma Oranı:** Sıkıştırma oranı yükseldikçe karışımın basıncı ve sıcaklığı artar. Bu durum, hazırlık evresinin (gecikme dönemi) kısalmasına ve ikinci aşamadaki yanmanın hızlanmasına yol açarak genel alev hızını artırır. Ayrıca artan sıkıştırma oranı, yanma odasındaki artık gaz miktarını azaltarak toplam yanma süresini kısaltır.
- **Motor Yükü:** Motor yüksek yükte çalışırken silindire daha yoğun bir karışım dolar, bu da döngü basıncını artırarak alev hızını yükseltir. Düşük yükte ise sıkıştırma basıncı azalır ve karışım daha fazla egzoz gazı içerir, bu da alev oluşumunu kararsızlaştırır. Bu nedenle kıvılcım ateşlemeli motorlarda düşük yükte verim düşüktür ve kararlı yanma için karışımı zenginleştirmek gerekir.
- **Motor Boyutu:** Motor boyutları büyüdükçe alevin kat etmesi gereken yol uzar. Bu nedenle büyük motorlarda tam yanma için daha fazla krank açısı süresine ihtiyaç duyulur ve genellikle daha düşük devirler tercih edilir.
- **Basınç Artış Hızı:** Silindirdeki basınç artış hızı; zirve basıncı, güç üretimi ve motorun düzgün çalışma karakteri üzerinde etkilidir. Basınç artış hızı tamamen yanma hızına

bağlıdır. Yanma hızı düşük olduğunda yanma süresi uzar ve ateşleme daha erken yapılmak zorunda kalınır. Yanma hızı çok yüksek olduğunda ise Üst Ölü Nokta'ya yakın aşırı bir basınç tepe noktası oluşur; bu durum motorun daha güçlü çalışmasını sağlasa da titreşimleri ve vuruntu ihtimalini artırır.

## **2.2.2. Dizel Çevrimi ve Sıkıştırma Ateşlemeli (CI) Motorlar**

Dizel Çevriminin dört zamanlı çalışma döngüsü, Emme Aşaması ile başlar; bu süreçte emme valfleri vasıtasıyla silindir içerisine sadece taze hava doldurulur. Ardından gelen Sıkıştırma Aşamasında, pistonun hareketiyle sıkıştırılan havanın sıcaklığı, dizel yakıtının tutuşma eşiğini aşacak şekilde artırılır ve bu evrenin sonunda silindire yakıt püskürtülür. Üçüncü evre olan Karışım, Yanma ve Genişleme Aşamasında; püskürtülen yakıtın buharlaşması, hava ile karışması ve yüksek sıcaklık etkisiyle kendiliğinden tutuşması gerçekleşir; sıkıştırma sonundan genişleme stroku boyunca devam eden bu yanma süreci, pistonu iterek güç üretir. Son olarak Egzoz Aşamasında, yanmış gazlar egzoz valfleri üzerinden silindiri terk ederek çevrim tamamlanır.

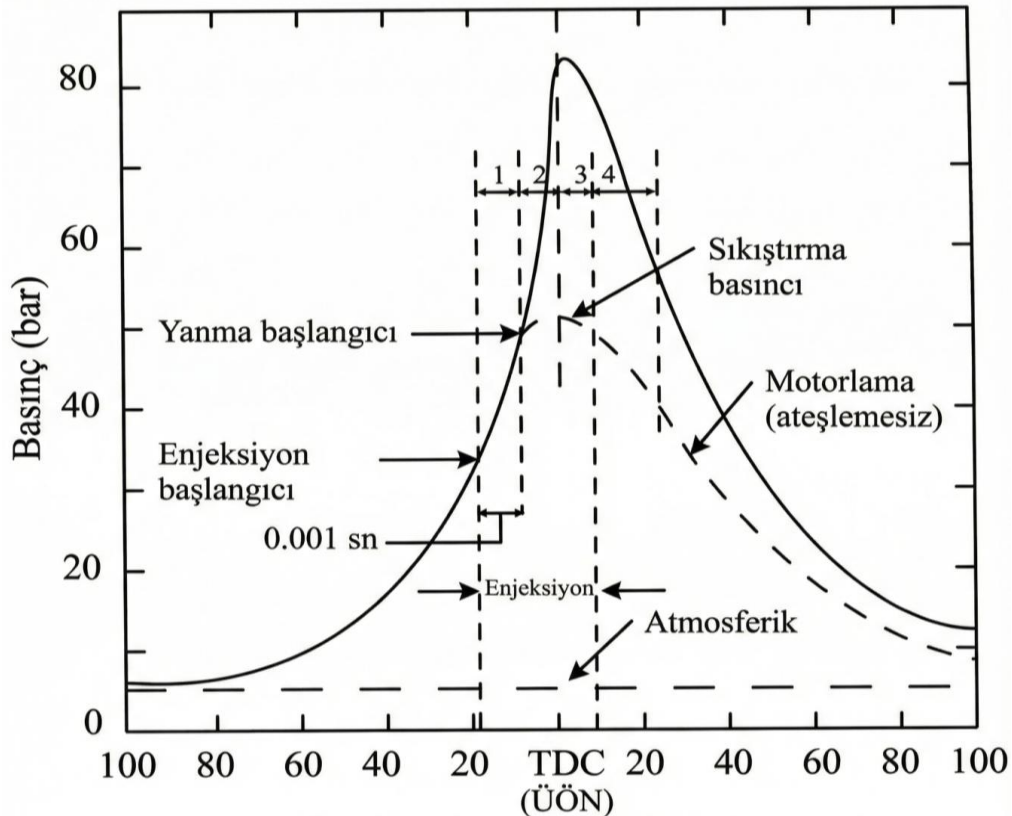
### **2.2.2.1. Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Normal Yanma ve Sistemler**

Dizel motorlarında yanma süreci dört temel aşamadan oluşur: Gecikme Dönemi, Hızlı Yanma, Kontrollü Yanma ve Son Yanma (Art Yanma). (Heywood, 1988). Şekil 2.5.'te CI motorda yanma evreleri numaralı olarak gösterilmiştir.

- Ateşleme Gecikmesi Evresi: Sıkıştırma strokunun sonuna doğru yakıt doğrudan silindire püskürtülür. Püskürtülen sıvı yakıt, ince damlacıklara ayrılarak (atomize olarak) yanma odasına doğru ilerler. Bu zerrecikler, yüksek sıcaklık ve basınçtaki hava ile karşılaştıklarında buharlaşır ve hızla karışıma dâhil olur. Eğer bu süre uzarsa, silindirde çok miktarda yanmaya hazır yakıt birikir ve bu durum bir sonraki aşamada şiddetli basınç yükselişine neden olur.
- Ön Karışım (Hızlı) Yanma Evresi: Ateşleme gecikmesi boyunca hava ile yanabilir oranlarda karışmış olan yakıt, tutuşma başladığında yalnızca birkaç krank açısı içinde çok hızlı bir şekilde yanar. Bu faz, yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleşen yoğun bir ısı salımıyla karakterizedir. Bu aşamanın şiddeti, gecikme süresine bağlıdır; gecikme ne kadar uzun olursa o kadar fazla yakıt birikir ve yanma o kadar şiddetli olur. Bu ani

ve yüksek basınç darbesi, dizel motorlarında görülen vuruntunun başlıca sebebidir.

- Karışım Kontrollü Yanma Evresi: Ön karışım bölgesi tükendikten sonra yanmanın ilerleme hızı, yakıt ile havanın ne kadar hızlı karışabildiğine bağlı hale gelir. Bu aşamada yanma üzerindeki belirleyici etken, enjektörden püskürtülen yakıtın hava ile karışma sürecidir. Basınç artışı enjeksiyon hızı tarafından belirlenir, yani yanma artık motor kontrolü altındadır. Bu evre, silindirde maksimum çevrim sıcaklığına ulaşılmasıyla sona erer.
- Geç Yanma Evresi: Bu evrede yeni yakıt enjekte edilmez; ancak ısının bir kısmı genişleme strokunun ilerleyen bölümüne kadar düşük bir hızla açığa çıkmaya devam eder. Bunun nedeni, yanmamış yakıt parçacıklarının ve kurumun silindirdeki kalan oksijenle reaksiyona girerek yanmayı sürdürmesidir. Bu dönem, dizel motorlarında duman oluşumu ve verim kaybıyla doğrudan ilişkilidir.



Şekil 2.5. CI motorda yanma evreleri ve silindir basıncının değişimi

Kaynak: (Heywood, 1988)

Dizel motorlarında, doğrudan enjeksiyon ve dolaylı enjeksiyon olmak üzere iki temel yakıt enjeksiyon sistemi kullanılır. Dolaylı enjeksiyon sisteminde, hava önce bir ön odacığa sıkıştırılır. Ön odacık içten yanmalı motorlarda (özellikle eski nesil dizel motorlarda ve yeni nesil yüksek verimli benzinli/gazlı motorlarda) ana silindirin tepesinde bulunan, ana yanma odasına dar bir kanalla veya deliklerle bağlanmış küçük, yardımcı bir hacimdir. Bu süreç, yüksek türbülans yaratarak, Dizel yakıtının sıkıştırma zamanının sonlarında ön odacık içerisine püskürtülmesini sağlar. Burada meydana gelen yanma süreci, ön odacık'taki basıncı artırarak, yakıt ve hava karışımının ana silindire geri itmesini sağlar ve bu da hızla yayılan güçlü bir alev dalgasına yol açar. Bu tür motorlar, genellikle geniş bir hız ve yük aralığında çalışabilen araçlarda kullanılırken, doğrudan enjeksiyonlu motorlar daha sabit çalışma koşullarına sahip gemiler, kamyonlar ve elektrik santrallerinde tercih edilir.

Dizel motorları, gaz keleşbeği olmaksızın hava alır ve yakıt-hava karışımı zayıf olur. Motor gücü, püskürtülen yakıt miktarına ve yakıt ile havanın ne kadar karıştığına bağlı olarak kontrol edilir. Enjeksiyon süresi, motorun yük seviyesine orantılıdır. Dizel motorları, ateşleme için daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalışmak zorundadır. Bu oranlar genellikle 15 ile 20 arasında olup, bu da motor verimliliğini arttıran bir faktördür. Dizel yakıtı, yanma süreci başlamadan hemen önce silindire püskürtüldüğü için, bu tür motorlarda benzinli motorlardaki detonasyon problemleri büyük ölçüde ortadan kalkar (Pulkrabek, 2004).

Dizel motorlarının verimliliği, yakıt ve havanın karışma süresine bağlıdır. Eğer karışım düzgün gerçekleşmezse, güç kaybı, artan yanmamış hidrokarbon emisyonları ve duman oluşumu gözlemlenebilir. Bu sebeple, Dizel motorları için farklı yanma odası tasarımları geliştirilmiştir. Karışım süresi, motor hızına ters orantılıdır, bu nedenle Dizel motorları hızlarına göre üç farklı sınıfa ayırılır: yüksek hız, orta hız ve düşük hız motorları. Yüksek hızlı Dizel motorları, 1000 rpm ve üzeri hızlarda çalışacak şekilde tasarlanır ve 300 mm'ye kadar delik çaplarına sahip olabilirler. Orta hızdaki Dizel motorları, 375 rpm ile 1000 rpm arasında çalışırken, çapları genellikle 200 ile 600 mm arasındadır. (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010). Düşük hızlı Dizel motorları ise, 375 rpm'den daha düşük hızlarla çalışır, genellikle büyük çaplı (>600 mm) iki zamanlı motorlar olup, kalıntı yakıt kullanır. (Woodyard, 2009). Her motor üreticisi, motorları özel bir uygulamaya en uygun şekilde tasarlamak için çalışır ve bu da her üreticinin motorlarının farklı özellikler taşımasına yol açar.

Sıkıştırma ile ateşlemeli (CI) motorlardaki yanma süreci, çalışma prensibi bakımından buji ile ateşlemeli (SI) motorlardan belirgin şekilde ayrılır. Dizel motorlarda emme zamanı

boyunca silindire sadece hava alınır; bu sebeple motorun hava girişini kontrol eden bir gaz kelebeğine gerek duyulmaz. Silindir içerisine alınan hava sıkıştırılır ve sıkıştırma zamanının sonuna doğru, piston henüz üst ölü noktaya (ÜÖN) ulaşmadan, yakıt yüksek basınç altında yanma odasına püskürtülür. Yakıt, silindir hacmine bağlı olarak genellikle beş ila sekiz adet jet huzmesi şeklinde silindire girer. Püskürtülen yakıt atomize olur, buharlaşır ve ortamdaki sıcak, sıkıştırılmış hava ile karışarak kendiliğinden tutuşur.

SI motorlarının aksine, dizel motorlarda yakıt ve havanın karışımı için ayrılan süre oldukça kısıtlıdır. Bu kısıtlı sürede homojen ve verimli bir karışım elde edebilmek için enjeksiyon işleminin hızlı, atomizasyon kalitesinin ise mümkün olan en üst seviyede olması şarttır. Enjeksiyon başladığında yakıtın bir bölümü hızla atomize olup buharlaşır ve tutuşma gecikmesi süresince havayla kısmi bir karışım oluşturur. Kendiliğinden tutuşma gerçekleştiğinde, ön karışımli olan bu bölge ani bir şekilde yanar; yanmanın geri kalan kısmı ise difüzyon kontrollü (karışım kontrollü) bir süreç olarak devam eder. Literatürde dizel alevleri genellikle "zamana bağlı türbülanslı difüzyon alevleri" olarak tanımlanmaktadır (Dec, 2009).

Ön karışımli yanma fazının ardından süreç, yakıt huzmesinin dış çeperlerinde gerçekleşen türbülanslı yakıt-hava karışımı tarafından kontrol edilir. Bu evre, enjeksiyon işlemi bitene kadar sürer. Enjeksiyonun sona ermesinden sonra ise ortamda kalan yakıt ve ara ürünler, "geç safha difüzyon alevi" olarak adlandırılan süreçte yanmaya devam eder. Bu aşamada yakıt spreyi artık karışımı belirleyen ana faktör değildir. Püskürtme kaynaklı türbülansın sönümlenmesiyle birlikte ısı açığa çıkma hızı (HRR) düşer ve sifıra yaklaşır. Pistonun aşağı hareketiyle silindir hacminin genişlemesi ve karışımın soğuması, özellikle geç çevrimde karışım kalitesinin yetersiz olduğu durumlarda yanma verimini düşürebilir (Heywood, 1988).

Dizel enjeksiyon sistemleri, 2000 bar gibi çok yüksek basınçlarda dahi yakıtı hassas bir şekilde püskürtebilecek teknolojilerle donatılmıştır. 1989 yılı civarında, mikroişlemci kontrollü direkt enjeksiyon ve wastegate mekanizmalı turboşarjlar kullanılmaya başlanmış; takip eden yıllarda ise Egzoz Gazı Geri Dolaşımı (EGR), oksidasyon katalizörleri ve değişken geometri turboşarj (VGT) sistemleri geliştirilmiştir. Günümüz modern dizel motorlarında; yüksek basınçlı common-rail sistemleri, piezo-elektrik enjektörler, yüksek oranlı EGR uygulamaları, çift turbo veya VGT üniteleri standart hale gelmiştir. Ayrıca emisyon kontrolü için Dizel Partikül Filtresi (DPF) ve Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) gibi gelişmiş egzoz arıtma teknolojileri kullanılmaktadır. (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010)

Dizel yanması, birden fazla fiziksel ve kimyasal olayın iç içe geçtiği karmaşık bir süreçtir. Yakıtın püskürtülmesi, atomizasyonu, buharlaşması, hava ile karışması ve yanması eş zamanlı olarak gerçekleşir. Bu süreçler arasında en yavaş ilerleyenler karışma ve buharlaşma olduğu için, yanma hızını belirleyen temel faktörler de bunlardır. Dolayısıyla yanmanın başlama anı ve hızı, enjeksiyon zamanlaması üzerinden kontrol edilebilir. Ancak, yakıtın silindir içindeki havayla karışma hızının sınırlı olması, dizel motorların ulaşabileceği maksimum devir sayısını kısıtlayan en önemli etkidir (Heywood, 1988).

CI motorlarında güç çıkışı (motor yükü), silindire gönderilen yakıt miktarının ayarlanmasıyla kontrol edilir; bu nedenle doğal emişli motorlarda hava debisi yükten bağımsız olarak neredeyse sabittir. Yanma, karışım kontrollü gerçekleştiği için bu motorlarda vuruntu riski pratikte yoktur. Bu durum, sıkıştırma oranının SI motorlardaki gibi vuruntu sınırı gözetilerek limitlenmesini gerektirmez (Stone, 2012). Yüksek sıkıştırma oranı ve düşük pompalama kayıpları sayesinde dizel motorlar, özellikle kısmi yüklerde benzinli motorlara kıyasla daha yüksek verim sunar. Ayrıca fakir karışımla çalışma prensibi, silindir içi sıcaklıkları düşürerek soğutma ve egzoz yoluyla atılan ısı enerjisini azaltır. Buna ek olarak, fakir karışımlarda özgül ısı oranının ( $\gamma$ ) yüksek olması, yanma enerjisinin CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O gibi üç atomlu moleküllerin uyarılmasına harcanmasını azaltarak işe dönüşen ısı enerji miktarını artırır. Tüm bu faktörler, dizel motorların yakıt dönüşüm verimliliğini artıran unsurlardır (Heywood, 1988).

Dizel motorlardan kaynaklanan temel kirleticiler Hidrokarbon (HC), Azot Oksitler (NO<sub>x</sub>) ve Partikül Madde (PM) emisyonlarıdır. HC emisyonları oksidasyon katalizörleri ile nispeten kolay kontrol altına alınabilse de, asıl zorluk NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarının aynı anda düşürülmesidir. Motor tasarımında bu iki kirletici arasında ters bir ilişki (soot-NO<sub>x</sub> trade-off) bulunur; yani birini azaltmaya yönelik stratejiler genellikle diğersinin artmasına neden olur. (Stone, 1999). Üstelik NO<sub>x</sub> seviyelerini düşürmeye yönelik önlemler, çoğunlukla yakıt tüketiminde artışa yol açmaktadır.

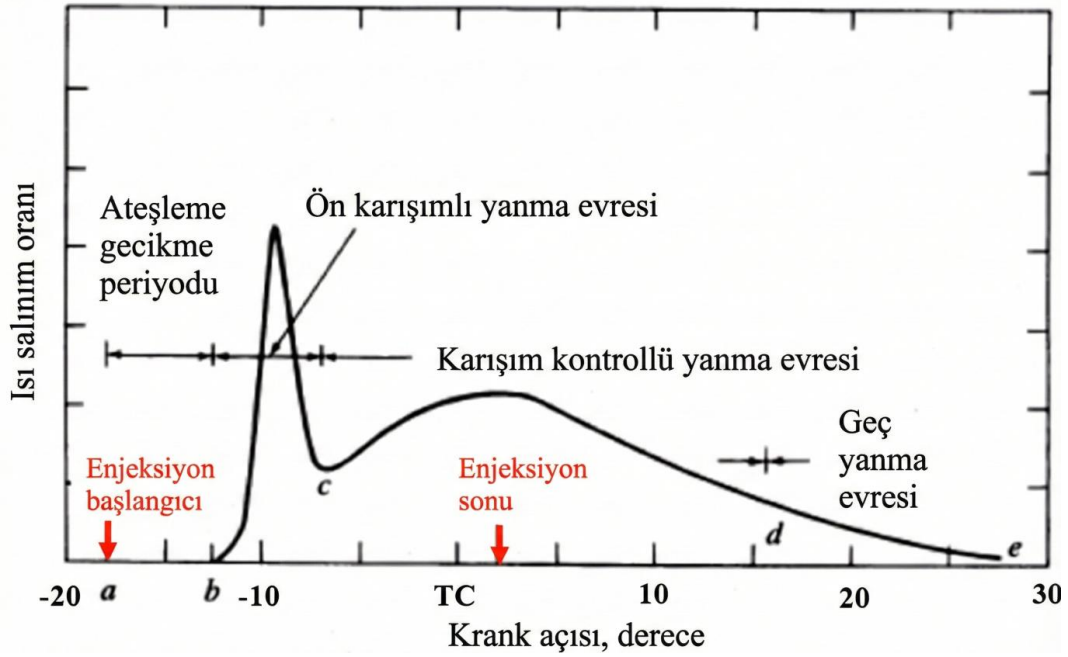
Günümüzde katılaştıran emisyon standartlarını karşılayabilmek adına egzoz art arıtma sistemleri zorunlu hale gelmiştir. NO<sub>x</sub> Depolama ve İndirgeme (NSR), Seçici Katalitik İndirgeme (SCR), Dizel Partikül Filtresi (DPF) ve Sürekli Yenilenen Tutucu (CRT) gibi teknolojiler bu amaçla geliştirilmiş olup, dizel motorların çevresel uyumluluğunu sürdürürebilmek için bu sistemler üzerindeki iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

### 2.2.2.2. Dizel Motorlarında Ateşleme Gecikmesi ve Etkileyen Faktörler

Dizel motorunda ateşleme gecikmesi, yakıtın ilk püskürtüldüğü an ile gerçek yanmanın başladığı an arasında geçen kritik süredir. Bu süre boyunca yakıt fiziksel olarak atomize olur, buharlaşır, hava ile karışır ve kimyasal olarak oto-ateşleme sıcaklığına ulaşarak reaksiyonları başlatır. Gecikme süresi uzun olduğunda, silindirde büyük miktarda yakıt birikir ve yanma başladığında kontrolsüz, hızlı bir basınç artışı gerçekleşerek motorun vuruntulu çalışmasına neden olur. Şekil 2.6.'da CI motorlarda net ısı salınım oranı ve yanma evreleri gösterilmiştir (Heywood, 1988).

Ateşleme gecikmesini etkileyen faktörler şunlardır: (Stone, 1999).

- Sıkıştırma oranı arttıkça sıkıştırma sonu sıcaklığı yükselir ve oto-ateşleme sıcaklığına daha hızlı ulaşılır ve bu da gecikmeyi kısaltır.
- Motor devir sayısı arttıkça sıkıştırma ısısı kayıpları azalır ve sıcaklık artar, bu da milisaniye cinsinden gecikmeyi azaltır. Ancak yüksek devirde aynı süre daha fazla krank açısına denk geldiği için, krank açısı cinsinden gecikme artar.
- Motor yükü arttıkça yanma odası sıcaklığı yükselir ve gecikme kısalır.
- Enjeksiyon basıncı artarsa yakıt daha iyi atomize olur ve daha hızlı buharlaşma sağlanır, bu da fiziksel gecikmeyi azaltır.
- Enjeksiyon avansı artırılırsa yakıt daha düşük sıcaklık ve basınçtaki bir ortama püskürtülür, bu da gecikmeyi uzatır.
- Yakıt kalitesi iyi olan yani yüksek setan sayısına sahip yakıtlar daha kısa gecikme süresi ve daha düzgün yanma sağlar. Yakıtın uçuculuğu ve viskozitesi de bu süreci etkiler.
- Emme sıcaklığı ve basıncın artması oto-ateşleme koşullarını iyileştirerek gecikmeyi azaltır.



Şekil 2.6. CI motorlarda net ısı salınımı ve yanma evrelerinin karakteristik değişimi

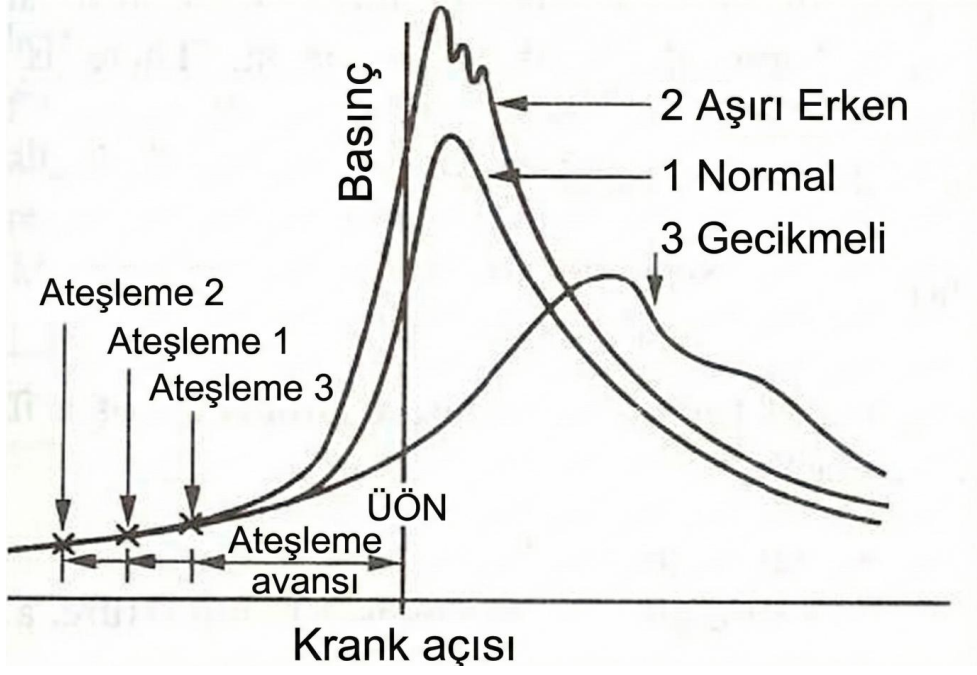
Kaynak: (Heywood, 1988)

### 2.2.2.3. Ateşleme Zamanlamasının Önemi

Ateşleme gecikmesi nedeniyle, silindirdeki karışımın tutuşması için kıvılcımın veya enjeksiyonun piston Üst Ölü Nokta'ya (ÜÖN) ulaşmadan belirli bir açı önce gerçekleşmesi gerekir; buna "ateşleme avansı" denir. En uygun avans açısı, yanmanın Üst Ölü Nokta'dan hemen sonra tamamlanmasını ve genişleme strokunun başında en yüksek silindir basıncının elde edilmesini sağlayacak şekilde ayarlanır. Bu doğru zamanlama, düzgün ve kararlı bir motor çalışması sağlar (Pulkrabek, 2004).

Ateşleme zamanlaması gereğinden fazla erken olduğunda, yanma çok erken başlar. Silindir basıncı hızla yükselirken piston hâlâ sıkıştırma strokunu tamamlamaya çalıştığı için harekete karşı bir direnç oluşur. Bu durum, silindir içinde aşırı yüksek basınçlara, vuruntuya, motorun sarsıntılı çalışmasına, aşırı ısınmaya ve güç kaybına yol açar (Heywood, 1988).

Ateşleme zamanlaması geç ayarlandığında ise yanma olması gerekenden geç başlar ve piston güç strokunu gerçekleştirirken devam eder. Bu durumda, zirve basınç daha geç ve daha düşük seviyede oluşur, bu da motorun güç kaybetmesine neden olur. Ayrıca yanmanın piston aşağı inerken sürmesi, motorun aşırı ısınmasına ve egzoz supaplarında termal hasar riskinin artmasına yol açar (Pulkrabek, 2004). Şekil 2.7.'de farklı ateşleme zamanlamalarının silindir içi basınç eğrisine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Farklı ateşleme zamanlamalarının silindir içi basınç eğrisine etkisi

Kaynak: (Stone, 2012)

### 2.3. Anormal Yanma (Vuruntu)

Buji ile ateşlemeli motorlarda vuruntu, yanma sürecinin sonlarına doğru gerçekleşen ve alev cephesinin henüz ulaşmadığı uç bölgelerdeki karışımın kontrolsüzce kendiliğinden tutuşmasıyla ortaya çıkan bir sorundur. Normalde buji kıvılcımıyla başlayan alevin düzenli bir şekilde ilerlemesi beklenirken, silindir içindeki artan basınç ve sıcaklık nedeniyle alevin henüz ulaşmadığı bölge dayanamayarak aniden patlar ve bu durum genellikle düşük oktanlı yakıt kullanımı veya aşırı ateşleme avansı nedeniyle motor parçalarına zarar veren şok dalgaları yaratır (Heywood, 1988).

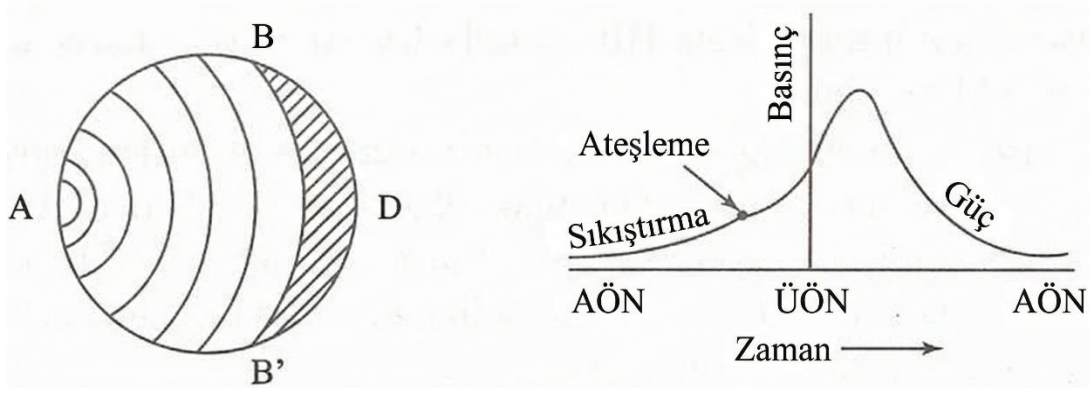
Dizel motorlarında vuruntu ise benzinli motorların aksine yanma sürecinin en başında meydana gelir ve temel sebebi silindire püskürtülen yakıtın tutuşma gecikmesinin aşırı uzamasıdır (Stone, 2012). Püskürtülen yakıtın hemen tutuşmayıp içeride birikmesi ve ardından bu biriken yakıt kütesinin aniden ve toplu halde alev almasıyla oluşan sert basınç artışı vuruntuya neden olur; bu durum genellikle yakıtın setan sayısının düşüklüğünden veya yanma odası sıcaklığının yetersizliğinden kaynaklanır (Heywood, 1988).

### 2.3.1. Benzinli Motorlarda Vuruntu

İçten yanmalı motorlarda normal yanma süreci, bujinin oluşturduğu kıvılcım ile başlar ve meydana gelen alev cephesinin yanma odasının bir ucundan diğer ucuna düzenli bir şekilde ilerlemesiyle devam eder. Ancak bazı çalışma koşullarında bu düzen bozulur ve yanma, olağan seyrinden sapar. Bu durum, motor performansının düşmesine yol açabileceği gibi motor bileşenlerinde ciddi hasarlara da neden olabilir. Bu düzensiz yanma türü, "anormal yanma" veya "vuruntu yanması" olarak adlandırılır. Anormal yanmanın başlıca sonuçları arasında güç kaybı, tekrarlayan erken ateşleme eğilimleri, mekanik bileşenlerde hasar, aşırı ısınma ve şiddetli titreşim yer almaktadır. Şekil 2.8.'de yanma odasında normal yanma ve basınç değişimi gösterilmiştir.

Buji ateşlemeli bir motorda yanma, alevin elektrotlar arasında başlaması ve yakıt-hava karışımı boyunca ilerlemesiyle gerçekleşir. Alev cephesinin ilerlemesi ve yanmış bölgede ısının açığa çıkması, silindir içindeki yanmış karışımın sıcaklığını ve basıncını yükseltir. Bu basınç artışı, yanmış gazların genişlemesine ve henüz yanmamış olan karışımın adyabatik olarak sıkıştırılmasına neden olur. Bu sıkışma neticesinde yanmamış karışımın sıcaklığı da artış gösterir. Eğer bu uç karışımın sıcaklığı, yakıtın kendi kendine tutuşma (oto-ateşleme) sıcaklığını aşar ve belirli bir süre bu seviyede kalırsa, karışım alev cephesi henüz oraya ulaşmadan farklı noktalarda kendiliğinden tutuşur. "Oto-ateşleme" adı verilen bu olay gerçekleştiğinde motor vuruntusu meydana gelir.

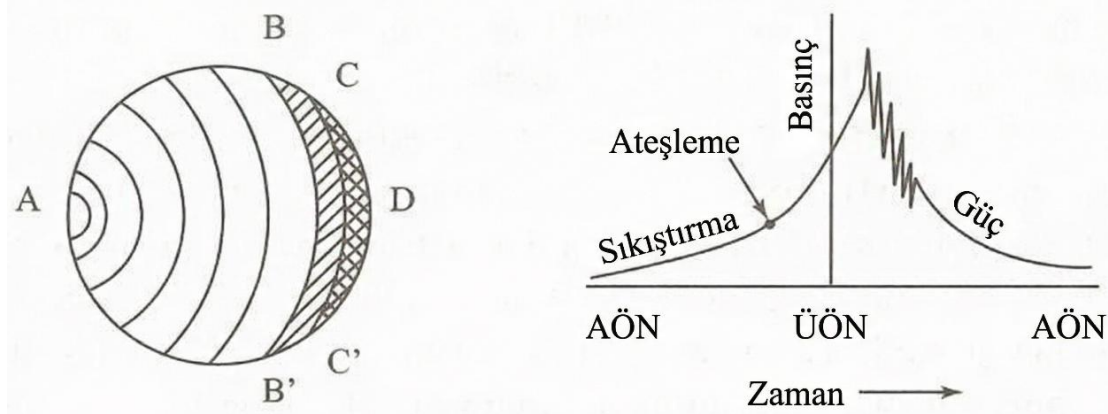
Normal yanma sürecinde alev, başlangıç noktasından (A noktası) yanma odasının diğer ucuna (D noktası) doğru düzenli bir şekilde ilerler. Alev cephesi uç karışımı sıkıştırarak sıcaklığını artırırsa da, uç karışım kendi kendine tutuşacak kritik sıcaklığa ulaşmaz ve yanma düzenli bir şekilde tamamlanır.



Şekil 2.8. Yanma odasında normal yanma ve basınç dalgalanmaları

**Kaynak:** (Heywood, 1988)

Buna karşılık anormal yanmada, alev cephesi belirli bir noktaya ulaştığında uç karışım kritik oto-ateşleme sıcaklığına erişmiş olur. Eğer ana alev cephesi bu bölgeyi yeterince hızlı bir şekilde yakamazsa, uç karışım kendiliğinden tutuşur. Bu noktada ikinci bir alev cephesi oluşur ve iki alev cephesinin çarpışmasıyla büyük ve ani bir basınç darbesi meydana gelir. Bu şok dalgası, duyulan yüksek frekanslı vuruntu sesini oluşturur (Heywood, 1988). Şekil 2.9.'da yanma odasında anormal yanma ve basınç değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yanma odasında anormal yanma ve basınç dalgalanmaları

**Kaynak:** (Heywood, 1988)

Vuruntunun meydana gelip gelmemesinde yakıtın özellikleri belirleyici bir rol oynar. Eğer uç karışım kritik sıcaklığa ulaşmışsa, bu sıcaklık korunuyorsa ve oto-ateşleme için

gereken kimyasal gecikme süresi, alev cephesinin o bölgeyi yakmasından daha kısa ise karışım patlamalı bir şekilde yanar ve vuruğu kaçınılmaz olur.

### **2.3.2. Dizel Motorlarda Vuruğu**

Dizel motorlarında vuruğu, temel olarak ateşleme gecikme süresinin gereğinden fazla olması sonucu meydana gelir. Dizel motorlarında vuruğu olgusunu karmaşık hale getiren unsurlardan biri, fiziksel gecikme süresinin birçok farklı etmeden etkilenmesidir. Bu gecikme; silindir içindeki havanın sıcaklığı ve yoğunluğundan, püskürtülen yakıtın damlacıklara ayrılma düzeyinden, yakıt jetinin ilerleme mesafesi ve geometrisinden önemli ölçüde etkilenir. Bunun yanı sıra yakıtın uçuculuk ve viskozite gibi özellikleri de püskürtme formunu doğrudan değiştirerek sürece katkıda bulunur. (Stone, 1999). Silindir içindeki hava türbülansı ise karışımı hızlandırdığı için gecikme süresi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

Dizel motorlarında vuruğu riskini azaltmak için, silindirdeki yakıt–hava karışımının belirli özelliklere sahip olması gerekir. Karışımın sıcaklığının yüksek olması, yoğunluğunun fazla olması ve ateşleme gecikmesinin kısa tutulması vuruğuyü önlemede etkilidir. Ayrıca tepkimeye hızlı girebilen bir karışım yapısı da yanmanın daha kararlı ve sorunsuz gerçekleşmesini sağlar. Başlangıçta oluşan yakıt–hava karışımının sıcaklığının çeşitli yöntemlerle düşürülmesi, dizel motorunda vuruğu ihtimalini artırır. Bu sıcaklık düşüşü; sıkıştırma oranının azaltılması, emilen hava sıcaklığının düşürülmesi, motor soğutma suyunun daha soğuk tutulması veya silindir duvarlarının sıcaklığının azaltılmasıyla ortaya çıkabilir. Ayrıca enjeksiyon zamanının değiştirilmesi de karışım sıcaklığını etkileyerek vuruğu eğilimini yükseltebilir. Yakıtın Üst Ölü Noktadan sonra püskürtülmesi, genişleme stroku sırasında basınç etkisini hafifleterek vuruğuyü azaltsa da motorun üretebileceği gücü bir miktar düşürür (Heywood, 1988).

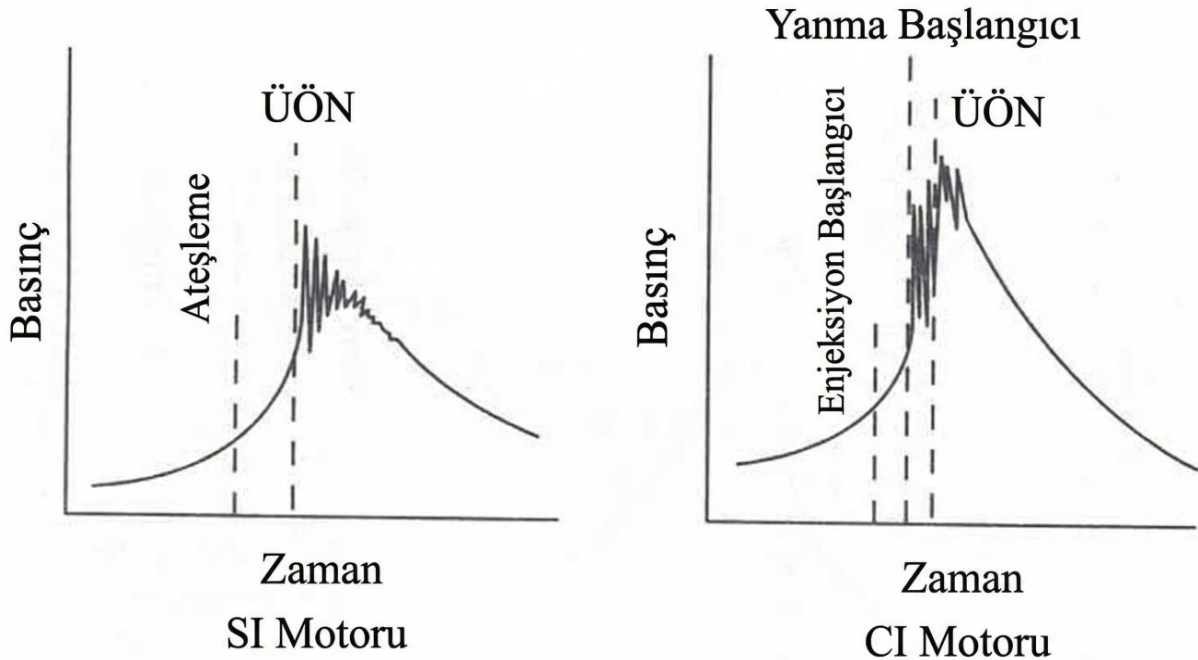
Başlangıçta oluşan karışım içinde yanabilir durumda bulunan yakıt miktarının artması ya da bu karışımın daha homojen hale gelmesi için geçen sürenin uzaması, dizel motorunda vuruğu ihtimalini yükseltir. Sıkıştırılmış havadaki türbülansın azalması, motor devrinin yükselmesi, enjeksiyon basıncının düşürülmesi ya da püskürtme hızının artırılması gibi durumlar buna sebep olur. Bu değişkenlerin her biri, karışımın tutuşma anındaki davranışını etkileyerek vuruğu riskini güçlendirir (Heywood, 1988). Buna karşılık, dizel motorlarında vuruğu eğilimini azaltan bazı önemli etkenler de vardır. Yakıtın setan sayısının yükseltilmesi kimyasal gecikmeyi kısaltırken, uçuculuk özelliğinin artırılması fiziksel gecikmeyi azaltır.

Ayrıca yakıtın viskozitesinin düşürülmesi, püskürtme sırasında karışımın daha iyi dağılmasına yardımcı olarak vuruntu ihtimalini belirgin şekilde düşürür (Stone, 2012).

Ateşleme gecikmesi kısa olduğunda, püskürtülen ilk yakıt damlaları çok kısa sürede tutuşur. Yanma başladığında silindirde birikmiş yakıt miktarı az olduğundan basınç artışı yumuşak ve düzenli gerçekleşir, böylece motor sessiz çalışır. Ancak gecikme uzun olduğunda, çok miktarda yakıt silindire püskürtülmüş olmasına rağmen henüz tutuşmamıştır. Oto-ateşleme başladığında ise birikmiş olan bu büyük yakıt kütlesi aynı anda yanar. Bu durum, çok hızlı ve yüksek bir basınç artışına neden olur. Bu ani basınç artışı, piston üzerinde sert bir kuvvet oluşturur ve motorun vuruntulu çalışmasına sebebiyet verir (Pulkrabek, 2004).

### 2.3.3. Benzinli ve Dizel Motorlarda Vuruntunun Karşılaştırılması

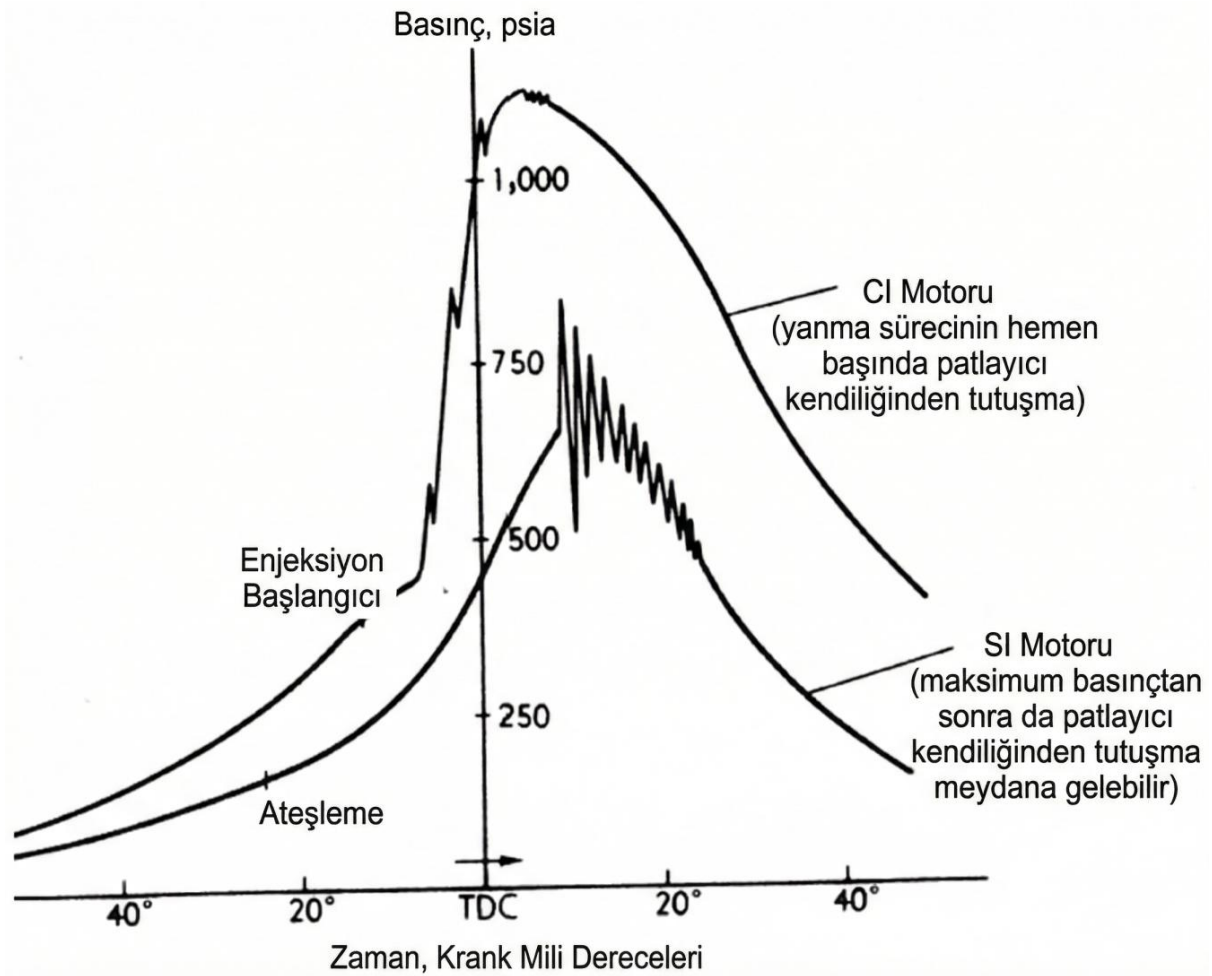
Temel bir karşılaştırma yapıldığında; benzinli motorlarda vuruntu yanma sürecinin sonuna doğru ortaya çıkarken, dizel motorlarında vuruntu yanmanın daha başlangıç aşamasında kendini gösterir (Stone, 2012). Dizel yanması doğası gereği yüksek sıkıştırma ve yüksek basınç altında gerçekleştiği için, bu motorlarda oluşan vuruntu çok daha şiddetli ve sert hissedilir (Heywood, 1988). Şekil 2.10.'da SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve vuruntular karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.10. SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve vuruntuların karşılaştırılması

Kaynak: (Stone, 2012)

Grafikte, CI motorlarında (üst eğri) vuruntunun, enjeksiyon sonrası tutuşma gecikmesi nedeniyle biriken yakıtın aniden parlamasıyla yanma sürecinin hemen başında dik bir basınç artışı olarak gerçekleştiği görülmektedir; buna karşın SI motorlarında (alt eğri) vuruntu, alev cephesinin henüz ulaşmadığı uç gaz bölgesinin kendiliğinden tutuşması sonucu, maksimum basınçtan sonraki genişleme evresinde yüksek frekanslı basınç dalgalanmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır (Stone, 2012). Şekil 2.11.'de SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve kendiliğinden tutuşma karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.11. SI ve CI motorlarda basınç değişimi ve tutuşmanın karşılaştırılması

Kaynak: (Obert, 1973)

## 2.4. İlk Motorların Topluma ve Endüstriye Etkileri

Motor teknolojisinin gelişimi, insanlık tarihindeki en büyük dönüşümlerden birine yol açmıştır. Geleneksel kas gücü ve hayvan gücüne dayalı üretim sistemleri yerini makine gücüyle çalışan sanayiye bırakmıştır. Buhar motorları, sanayi devrimini tetikleyerek fabrikalar, trenler ve gemilerde yaygın olarak kullanılmıştır.

İçten yanmalı motorlar, 20. yüzyılın başlarında otomobillerin yaygınlaşmasına olanak tanımış ve kişisel ulaşım devrimini başlatmıştır. Dizel motorlar, ağır sanayi ve taşımacılık alanında önemli bir rol oynamış, ticari ve endüstriyel faaliyetleri dönüştürmüştür. Elektrik motorları, modern sanayinin temel taşlarından biri haline gelmiş ve günümüzde elektrikli araçlar ile enerji dönüşümünde kritik bir rol üstlenmiştir.

Bu gelişmeler, motor teknolojisinin sadece mekanik sistemler üzerinde değil, çevresel ve ekonomik boyutta da büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Günümüzde, daha verimli ve çevre dostu motor sistemleri geliştirilerek enerji tüketimi ve emisyonlar azaltılmaya çalışılmaktadır.

Ulaşım, bireyleri birbirine bağlamanın çok ötesinde, ekonomik kalkınmayı ve toplumsal ilerlemeyi mümkün kılan en temel yapı taşlarından biridir. Artan dünya nüfusu, hızlanan kentleşme süreci ve gün geçtikçe büyüyen mobilite ihtiyacı; güvenli, çevre dostu, ekonomik ve verimli ulaşım sistemlerine olan talebi sürekli artırmaktadır. Bu bağlamda, araçların tasarımından prototip aşamasına kadar olan tüm süreçleri kapsayan "otomotiv teknolojisi", hem mevcut araçların geliştirilmesi hem de yeni nesil araçların hayata geçirilmesi adına kritik bir önem kazanmıştır.

Tüketicilerin artan güvenlik beklentileri ve karbon ayak izini düşürme talepleri, sertleşen yakıt ekonomisi standartları ve sıkılaştıran emisyon yasalarıyla birleşerek sektörü düşük karbonlu bir geleceğe doğru zorlamaktadır. Ayrıca petrol rezervlerinin hızla tükenmesi, otomotiv endüstrisi için bir diğer hayati sorundur. Bu nedenlerle akademik ve endüstriyel araştırmalar; biyoyakıtlar, güneş enerjisi ve hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının araçlara entegrasyonu üzerine yoğunlaşmıştır (Reitz vd., 2020).

Günümüzde otomotiv sektörüne hakim olan iki temel motor teknolojisi bulunmaktadır: Doğrudan enjeksiyonlu, sıkıştırma ile ateşlemeli (DICI) dizel motorlar ve buji ateşlemeli (SI) benzinli motorlar. Ancak günümüz dünyasında sadece yüksek motor performansı yeterli değildir. İnsan sağlığını ve ekosistemi korumak adına Azot Oksitler (NO<sub>x</sub>), Partikül Madde (PM/is), Karbon Monoksit (CO) ve Hidrokarbonlar (HC) gibi zararlı

emisyonların kontrol altında tutulması zorunludur. Özellikle dizel motorlar, içeriğinde polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), iz metaller ve sülfatlar barındıran partikül maddelerin (PM) başlıca kaynağıdır. (Johnson, 2009). Bu partiküller solunum yoluyla insan sağlığını tehdit etmekte, çevresel kirliliğe yol açmakta, görüş mesafesini azaltmakta ve siyah karbon emisyonları nedeniyle küresel iklim değişikliğini tetiklemektedir.

## 2.5. İçten Yanmalı Motorların Yeri ve Önemi

İçten yanmalı motorlar, 150 yılı aşkın süredir hayatımızda kritik bir rol oynamaktadır. Otomobiller, kamyonlar, gemiler, uçaklar gibi çeşitli araç ve ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Heywood, 1988). İçten yanmalı motorların yeri ve önemi şu şekilde özetlenebilir:

- İçten yanmalı motorlar, modern karayolu taşımacılığının temel yapı taşlarını oluşturan teknolojilerdir. Otomobillerden kamyonlara, otobüslerden motosikletlere kadar geniş bir yelpazede kullanılan içten yanmalı motorlar, sadece günlük ulaşım ihtiyaçlarını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda lojistik ve taşımacılık sektörlerinde de kritik bir rol oynar. Bu motorlar, ticaretin sürekliliğini sağlamada ve küresel ekonomilerin işleminde hayati öneme sahiptir (Kalghatgi, 2014).
- Tarım makineleri (traktörler, biçerdöverler) ve inşaat ekipmanları (ekskavatörler, buldozerler) gibi endüstriyel araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tarımsal üretim ve inşaat sektörlerinde verimliliği ve birim zamandaki üretim hızını artırarak ekonomik kalkınmaya katkıda bulunur. Tarımsal faaliyetlerin mekanizasyonunu sağlayarak üretim kapasitesini ve etkinliğini artırır (Reitz vd., 2020).
- İçten yanmalı motorlar, jeneratörlerde ve bazı elektrik santrallerinde enerji üretimi için kullanılmaktadır. Acil durum güç kaynakları ve uzak bölgelerde elektrik sağlamada kritik bir rol oynar. Elektrik kesintileri sırasında enerji arzının devamlılığını sağlamak için kullanılır (Pulkrabek, 2004).
- Askeri araçlar, denizaltılar, savaş gemileri ve uçaklar gibi askeri teçhizatı yaygın olarak kullanılmaktadır. Savunma sanayisinde operasyonel kabiliyeti ve stratejik hareketliliği artırır. Askeri operasyonların güvenilirliğini ve etkinliğini sağlar (Heywood, 1988).

### 2.5.1. İçten Yanmalı Motorların Eksiklikleri

İçten yanmalı motorlar, sağladıkları faydalara rağmen, bazı geliştirilmesi gereken eksikliklere ve zorluklara sahiptir. Bu eksiklikler, çevresel, ekonomik ve teknolojik açılardan değerlendirilebilir:

- İçten yanmalı motorlar, hava kirliliğine ve küresel ısınmaya katkıda bulunan karbondioksit (CO<sub>2</sub>), karbonmonoksit (CO), Azot Oksit (NO<sub>x</sub>) ve partikül madde (PM) gibi zararlı emisyonlar üretir. Fosil yakıt tüketimi, sera gazı emisyonlarına ve çevresel kirliliğe neden olur (Heywood, 1988).
- İçten yanmalı motorlarda, yakıt verimliliği düşüktür ve bu da yüksek işletme maliyetlerine yol açar. Fosil yakıtlar, fiyat dalgalanmalarına ve tedarik kesintilerine karşı savunmasızlığı artırır. Bakım ve onarım maliyetleri yüksektir (Kalghatgi, 2014).
- İçten yanmalı motorların verimliliğini artırmak ve emisyonlarını azaltmak için teknolojik geliştirmelere ihtiyaç vardır. Elektrikli araçlar ve diğer alternatif yakıt teknolojileri, içten yanmalı motorların yerini alma potansiyeline sahiptir. Gürültü ve titreşim, özellikle yoğun nüfuslu alanlarda sorunlara neden olabilir (Reitz vd., 2020).

### 2.5.2. İçten Yanmalı Motorların Evrimi ve Geleceği

Benzinli (SI) motorlarda geçmişte yaygın olan iki zamanlı çevrimler, basit yapıları ve düşük maliyetlerine rağmen, yakıt ekonomisi ve emisyon dezavantajları nedeniyle yerlerini büyük ölçüde dört zamanlı motorlara bırakmıştır. İki tekerlekli araçlarda da karbüratörlü sistemlerden elektronik kontrollü yakıt enjeksiyonuna geçiş süreci devam etmektedir. Yakıtın elektronik olarak enjekte edilmesi; dozajın daha hassas kontrolüne, dolayısıyla daha iyi yakıt ekonomisine, daha yüksek güç ve tork üretimine ve daha düşük emisyonla imkan tanır (Heywood, 1988).

Binek otomobillerde karbüratörlü sistemler neredeyse tamamen terk edilmiş, Çok Noktadan Enjeksiyon (MPFI) sistemleri yaygınlaşmıştır. Gelecekte bu eğilimin Benzinli Direkt Enjeksiyon (GDI) motorlara doğru evrilmesi beklenmektedir (Zhao, 2010). Ayrıca EGR sistemleri, CNG–LPG çift yakıt çözümleri ve gelişmiş katalitik konvertörler yakıt ekonomisini iyileştirip emisyonları daha da düşürecektir. Ağır vasıtalar için dizel teknolojisi ise zamanla dolaylı enjeksiyondan (IDI) doğrudan enjeksiyona (DI) kaymış, bunu Ortak Hatlı Direkt Enjeksiyon (CRDI) sistemleri takip etmiştir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).

Gelecekte daha yüksek enjeksiyon basınçlarına sahip CRDI sistemlerinin yaygınlaşması ve buna ek olarak EGR, turboşarj ve gelişmiş egzoz arıtma sistemlerinin (DOC, DPF) zorunlu hale gelmesi beklenmektedir. (Reitz, 2013). Modern hafif ve ağır ticari araç motorları, yüksek özgül güç, hızlı gaz tepkisi, düşük tüketim ve düşük emisyon taleplerini aynı anda karşılamak zorundadır.

Yakın ve orta vadede karayolu taşımacılığının temelini benzin ve dizel oluşturmaya devam edecek, elektrikli araçlara geçiş kademeli olacaktır. Bu geçiş sürecinde çift yakıtlı sistemler, CNG ve hidrojen gibi alternatif gaz yakıtlar önemli bir çözüm olabilir. Ayrıca, dizel motorlardaki heterojen yanma yapısını ortadan kaldıran Düşük Sıcaklıklı Yanma (LTC) gibi stratejiler de potansiyel taşımaktadır. (Agarwal vd., 2017).

## **2.6. Emisyon Azaltımı İçin Geliştirilen Teknolojiler ve Stratejiler**

Gelecekte motorların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerini hayata geçirmek amacıyla, emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesi kritik bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu süreç, yalnızca motor teknolojilerindeki iyileştirmelerle sınırlı kalmayıp, küresel ölçekte çevresel stratejileri de kapsamaktadır. Enerji üretimi ve sanayiden kaynaklanan karbondioksit gazının atmosfere salınmadan yakalanıp yer altında depolanmasını sağlayan Karbon Yakalama ve Depolama teknolojileri ile emisyonları dengelemek için oluşturulan Karbon Ticareti ve Kredilendirme Sistemleri bu stratejilerin makro düzeydeki örnekleridir. Ayrıca, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, akıllı şebekelerle enerji yönetiminin optimize edilmesi ve tarımsal faaliyetlerdeki sera gazı salınımının azaltılması, genel karbon ayak izini düşürmeye yönelik bütüncül yaklaşımlardır.

Ulaşım sektöründe ise sıkılaştıran emisyon standartları, yalnızca egzoz gazının arıtılmasını değil, henüz silindir içindeyken yanma olayının iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda emisyon azaltım stratejileri, kirliliğin kaynağında oluşmasını engelleyen "Aktif Emisyon Azaltımı" ve oluşan kirliliğin egzoz hattında temizlenmesini sağlayan "Pasif Emisyon Azaltımı" olmak üzere iki ana başlıkta toplanır. (Johnson, 2009).

Aktif emisyon azaltımı, yanma sürecini optimize ederek kirliletiçi oluşumunu en aza indirmeyi hedefler. Bu süreçte silindire yeterli hava sağlamak ve güç yoğunluğunu artırmak için kullanılan turboşarj sistemleri ve besleme basıncı kontrolü hayati öneme sahiptir. Özellikle güncel emisyon normlarına turboşarj desteği olmadan ulaşmak neredeyse

imkansızdır. Yanma kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri de yakıt enjeksiyon sistemleridir. Modern araçlarda kullanılan Ortak Hatlı Doğrudan Püskürtme sistemleri, yakıtı 2500 bar seviyelerine varan yüksek basınçlarda silindire gönderir. Bu yüksek basınç, yakıtın çok daha ince atomize olmasını ve hızlı buharlaşmasını sağlayarak is ve duman oluşumunu engeller. Buna ek olarak, silindir kapağı ve emme portları, havanın silindir içinde dönmesini (swirl hareketi) sağlayacak şekilde tasarlanarak hava-yakıt karışımının homojenliği artırılır. Azot oksit emisyonlarını kontrol altında tutmak için ise yanma sıcaklığını düşüren Egzoz Gazı Geri Devri sistemleri kullanılır. Yüksek ve düşük basınçlı olarak ikiye ayrılan bu sistemlerde, partikül madde oluşumunu tetiklememek adına geri döndürülen gaz oranının hassas bir şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir. (Heywood, 1988).

Pasif emisyon azaltımı ise yanma sonucu oluşan kirleticilerin egzoz hattında kimyasal veya fiziksel yöntemlerle temizlenmesini kapsar. Egzoz hattında yer alan Dizel Oksidasyon Katalizörü, yanmamış hidrokarbonları ve karbonmonoksiti zararsız karbondioksit ve suya dönüştürür. Seramik gövdeli bir yapıya sahip olan Dizel Partikül Filtresi, kurum partiküllerini fiziksel olarak tutar; ancak biriken kurumun temizlenmesi için sistemin belirli aralıklarla yüksek sıcaklıklara ulaşarak rejenerasyon yapması gereklidir. Azot oksit emisyonlarını gidermek için kullanılan Seçici Katalitik İndirgeme sistemleri ise egzoz hattına püskürtülen üre çözültisi ile zararlı gazları zararsız azota indirger. (Johnson, 2009).

Mevcut teknolojiler emisyonları önemli ölçüde düşürse de, egzoz arıtma sistemlerinin yüksek maliyetleri ve karmaşık yapıları, otomotiv endüstrisini farklı arayışlara itmiştir. İçten yanmalı motor ile elektrik motorunu kombine eden hibrit araçlar yakıt ekonomisi ve düşük emisyon sunsa da, batarya maliyetleri ve tedarik sorunları nedeniyle pazar payları sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, hem konvansiyonel hem de alternatif yakıtları kullanabilen, azot oksit ve partikül madde emisyonlarını eş zamanlı olarak çok düşük seviyelere indirme potansiyeli taşıyan Düşük Sıcaklıklı Yanma teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır. (Reitz, 2013). Geleceğin motorlarında, yanma olayının hassas kontrolüne dayanan bu ileri konseptlerin belirleyici rol oynaması beklenmektedir.

### **2.6.1. Sıkı Emisyon Normları ve Yakıt Sorunu**

Ticari araçlardan kaynaklanan emisyonların azaltılması için düşük kükürlü temiz dizel yakıt kullanımı bir zorunluluktur. Emisyon sınırları giderek düşerken, bu seviyelere ulaşmak için gerekli mühendislik çözümleri daha karmaşık hale gelmiştir. Gerçek yol koşullarında

emisyon kontrolü için mevcut denetimin güçlendirilmesi gerekmektedir. Yakıt kalitesi egzoz emisyonlarını doğrudan etkilediğinden, ulusal düzeyde etkili yakıt kalite politikaları yürürlüğe konmalı; emisyon kontrol sistemlerinin kullanımı zorunlu hale getirilmelidir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010). Ayrıca CO<sub>2</sub> emisyonlarını sınırlamak için yakıt ekonomisi standartları getirilmeli ve araçların ömürleri boyunca performanslarının denetlendiği bir sistem kurulmalıdır.

Otomotiv motorları ve yakıtları; yerel hava kalitesini iyileştirmek ve küresel ısınma riskini azaltmak gibi hedeflerle karşı karşıyadır. Ulaşım sektörü dünya petrol tüketiminin büyük bir kısmından sorumludur ve bu durum ciddi CO<sub>2</sub> salımına yol açmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı, 2030 yılına kadar yeni araçların yakıt tüketiminin %30–50 azaltılmasını hedeflemektedir. (IEA, 2021). Bu amaçla dört temel yaklaşım benimsenmiştir: Mevcut motorların geliştirilmesi, konvansiyonel yakıtların iyileştirilmesi, alternatif motor teknolojilerinin geliştirilmesi ve alternatif yakıtların kullanımı. İçten yanmalı motorlardaki yanma süreci oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu alanda yapılacak keşifler ile LTC (**Düşük sıcaklıkta yanma**) gibi yeni yöntemler, motor verimliliğini artırmada önemli rol oynayacaktır (Reitz vd., 2020).

### 2.6.2. Petrol Rezervlerinin Azalması ve Alternatif Yakıtlar

Karayolu taşımacılığının fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve bu yakıtların çevreye verdiği zararlar, araştırmacıları mevcut motorlarda büyük değişiklik gerektirmeyen alternatif yakıtlara yöneltmiştir. Özellikle düşük karbon içeriğine sahip yakıtlar, sera gazı salımlarını azaltmak açısından dikkat çekmektedir (Kalghatgi, 2014).

- Doğal gaz türevleri, düşük karbon ve yüksek hidrojen oranları sayesinde sera gazı ve partikül emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. PAH ve kükürt içermedikleri için daha temizdirler, ayrıca araçlarda titreşim ve koku seviyelerini düşürürler. Ancak yüksek ilk yatırım maliyeti, sınırlı menzil ve depolama/dağıtım altyapısının karmaşıklığı bu araçların yaygınlaşmasını engellemektedir (Khan vd., 2016).
- Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyoyakıtlar, petrol kökenli yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunar. Birinci nesil biyoyakıtlar (şeker pancarı, kolza vb.) gıda ürünleriyle rekabet ettikleri için geniş ölçekli ticarileşmede engel teşkil eder. İkinci nesil biyoyakıtlar ise bitkilerin yenmeyen kısımlarından üretilir ve gıda ile rekabet etmezler; ancak maliyet ve verimlilik sorunları mevcuttur. Bu noktada üçüncü

nesil biyoyakıt kaynağı olan mikroalgler öne çıkmaktadır. Mikroalgler çok hızlı büyür, yüksek oranda CO<sub>2</sub> bağlar, yüksek lipid üretir ve tarıma elverişsiz arazilerde yetiştirilebilir. Bu özellikleriyle uzun vadede fosil yakıtlara gerçekçi bir alternatif oluştururlar. (Demirbas, 2009).

- Biyokütle veya kömür gazlaştırma ile elde edilen Syngas (Sentez Gazı), temel olarak CO ve H<sub>2</sub> karışımıdır. Enerji yoğunluğu doğal gazın yarısı kadar olsa da uygun tasarımı motorlarda kullanılabilir. Hidrojen içeriği yanmayı hızlandırır da tepe basınç ve sıcaklıkları artırarak NO<sub>x</sub> oluşumunu yükseltebilir (Hagos vd., 2014).

Ayrıca; Benzinli (SI) motorlar, vuruş direnci yüksek olan yani oktan sayısı yüksek yakıtlara ihtiyaç duyar; bu nedenle yüksek setanlı (dizel) yakıtlar bu motorlarda aşırı vuruşta neden olur. Dizel (CI) motorlar ise çabuk oto-ateşleme sağlayan yani setan sayısı yüksek yakıtlara ihtiyaç duyar; oktan sayısı yüksek yakıtlar tutuşma gecikmesini uzatarak dizel motorlarda şiddetli vuruş yaratır. Özetle; benzin SI motorları için, dizel ise CI motorları için uygundur. (Heywood, 1988).

### 3. DÜŞÜK SICAKLIKLI YANMA (LTC)

Fosil yakıtlara olan talebin hızla artması ve hava kalitesinin giderek bozulması, otomotiv araştırmacıları ve üretici firmalar üzerinde daha verimli, aynı zamanda çevreye daha az zarar veren içten yanmalı motorların geliştirilmesi konusunda büyük bir baskı oluşturmuştur. Düşük Sıcaklıklı Yanma (LTC) yaklaşımları, motor performansından ödün vermeden azot oksit ( $\text{NO}_x$ ) ve partikül madde (PM) emisyonlarını eş zamanlı olarak azaltma potansiyeli sunmaktadır. (Agarwal vd., 2017). Geleneksel dizel motorlarda büyük bir ikilem (trade-off) vardır; yanma sıcaklığı yükseltirse verim artar ve kurum (is) azalır ama zehirli  $\text{NO}_x$  gazları artar, Yanma sıcaklığı azaltılırsa  $\text{NO}_x$  azalır ama bu sefer de kurum (Soot) artar (Heywood, 1988). LTC'nin amacı; yanma sıcaklığını kritik bir seviyenin (yaklaşık 2000-2200 Kelvin) altında tutarak  $\text{NO}_x$  oluşumunu engellemek, aynı zamanda yakıtı hava ile çok iyi karıştırarak kurum oluşumunu da azaltmaktır (Maurya, 2018). LTC uygulanırken genellikle aşırı EGR kullanımı (Silindire çok yüksek oranda bazen %50-60 oranında egzoz gazı geri basılır. Bu, yanma sıcaklığını aşağı çeker) ve erken püskürtme (Piston daha en tepeye ÜÖN'e gelmeden çok önce yakıt püskürtülür. Böylece yakıt ve hava iyice karışır ve homojenleşir, alev damlacıklarının etrafında oluşan isli bölgeler engellenir) uygulanır (Srivastava vd., 2018)

Geleneksel dizel yanması, yakıt ve havanın tam olarak karışmadığı heterojen bir yapıya sahiptir. Bu durum, silindir içinde  $\text{NO}_x$  oluşumunun temel nedeni olan yüksek sıcaklık bölgelerine ve PM oluşumunun kaynağı olan yakıtça zengin bölgelere yol açar. LTC stratejileri,  $\text{NO}_x$  ve partikül madde arasında yıllardır süregelen bu ödünleşim (trade-off) sorununu aynı anda çözme potansiyeli nedeniyle büyük ilgi görmektedir. LTC, gelişmiş yanma yöntemlerini kapsayan genel bir çatı kavram olup; Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemesi (HCCI), Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemesi (RCCI) ve Ön-Karışım Sıkıştırma Ateşlemesi (PCCI) gibi çeşitli alt yöntemleri barındırır.

Yakıt-hava karışımının fakir olduğu ve sıcaklığın 2200 Kelvin'in üzerine çıktığı bölgelerde yüksek miktarda  $\text{NO}_x$  oluşurken; karışımın zengin olduğu ve sıcaklığın 1800 Kelvin'i aştığı bölgelerde partikül oluşumu baskın hale gelmektedir (Dec, 2009). Araştırmacılar,  $\text{NO}_x$  ve PM emisyonlarının aynı anda düşürülebilmesi için yakıt-hava karışımına yeterli zaman tanınmasının ve yanma sırasındaki tepe sıcaklıkların düşük tutulmasının iki temel gereklilik olduğunu vurgulamaktadır. Çalışmalar, LTC'nin  $\text{NO}_x$  oluşum sıcaklık aralığının oldukça altında gerçekleşebildiğini ve yerel eşdeğerlik oranlarının kurum

oluşum sınırlarının belirgin biçimde altında tutulabildiğini göstermiştir.

Dizel yakıtlı LTC uygulamalarında Egzoz Gazı Geri Devrinin (EGR) oluşturduğu seyreltme etkileri de incelenmiştir. Araştırmalar, karışımın seyreltilmesinin alev sıcaklığını düşürdüğünü ve oksijen miktarındaki azalmaya bağlı olarak ateşleme gecikmesinin uzamasıyla yerel eşdeğerlik oranlarını değiştirdiğini ortaya koymuştur. Deneysel bulgular, bu işlemin  $\text{NO}_x$  ve partikül oluşumunu azaltmada etkili olduğunu doğrulamaktadır. Ancak aynı koşullar, eksik yanma eğilimini artırarak Karbon Monoksit (CO) ve Hidrokarbon (HC) gibi yanmamış ürünlerin miktarında yükselmeye yol açmaktadır.

### **3.1. Düşük Sıcaklıklı Yanma Prensibi**

Günümüzde sıkılaştıran emisyon mevzuatı, üreticileri silindir içi önlemler ve egzoz sonrası arıtım sistemlerini birlikte kullanmaya zorlamaktadır. LTC motorları,  $\text{NO}_x$  ve kurum emisyonlarını son derece düşük seviyelere indirme potansiyeliyle, egzoz sonrası arıtım sistemlerine olan ağır bağımlılığı azaltabilir.

Temiz yanma için yerel yanma sıcaklığının 1400–2000 Kelvin aralığında tutulması ve yerel eşdeğerlik oranının 2'nin altında olması önerilmektedir. (Dec, 2009). LTC motorlarında yanma sıcaklığı EGR veya fazladan hava ile düşürülürken, yerel eşdeğerlik oranı yakıtın iyi karışmasıyla sınırlandırılır.

LTC yaklaşımında, küresel olarak seyreltilmiş bir ortamda difüzyon alevini önlemek için yakıt ile hava arasında yeterli ön karışım sağlanır. Fakir yakıt–hava karışımının yanması, silindir içi sıcaklıkların düşmesine neden olur. Yakıt–hava karışımına ön karışım için daha uzun süre tanınması, yerel eşdeğerlik oranını düşürerek kurum oluşumunu bastırır. Ancak aşırı karışım, yanma sıcaklığının çok düşmesine ve dolayısıyla CO ve HC emisyonlarının artmasına yol açabilir.

Kurum kontrolü için üç temel yöntem kullanılır:

- Yanma sıcaklığının seyreltme (dilüsyon) yoluyla düşürülmesi,
- Tutuşma gecikmesinin uzatılarak ön karışımın artırılması,
- Karışımın reaktivitesinin yakıt bileşimiyle değiştirilmesi.

### 3.2. LTC'nin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri

LTC için temel şart, yanma başlangıcından önce homojen bir yakıt-hava karışımının mevcut olmasıdır. Karışma süreci; yakıt özellikleri, enjeksiyon stratejisi, silindir içi basınç, sıcaklık ve "swirl" (silindir eksenine etrafındaki dönme hareketi) gibi akış yapılarına bağlıdır. Sprey karakteristikleri ve atomizasyon, homojenliği sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Akışkanlar dinamiği açısından LTC yanması üç ana evreye ayrılır:

- Ön-yanma: Akış etkisi baskındır, tür bileşiminde küçük değişimler olur.
- Yanma: Kimyasal reaksiyonlar baskındır; ısı salımı çok hızlı ve hacimsel gerçekleşir.
- Son-yanma: Kimya ve türbülans etkileşim halindedir ancak artık ısı salımı gerçekleşmez.

Düşük Sıcaklıklı Yanma (LTC) stratejileri, silindir içi termodinamik koşulları ve kimyasal reaksiyon kinetiğini değiştirerek, geleneksel difüzyon yanmalı motorlarda karşılaşılan emisyon oluşum mekanizmalarından belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu yanma konsepti, temel olarak yanma sıcaklıklarını düşürerek ve yakıt-hava karışım homojenliğini artırarak çalışır. Bu yapısal değişim, bazı kirletici türlerinde dramatik düşüşler sağlayarak çevresel standartlara uyumu kolaylaştırırken, yanma verimi ve oksidasyon süreçleriyle ilişkili diğer emisyon türlerinde farklı zorlukları beraberinde getirmektedir. LTC modunda elde edilen emisyon davranışları ve bu stratejinin yanma ürünleri üzerindeki spesifik etkileri aşağıda detaylandırılmıştır: (Zhao, 2003)

- LTC'nin en büyük avantajı, klasik "NO<sub>x</sub>-PM karşıtlığı" ortadan kaldırarak her ikisini de çok düşük seviyelere indirmesidir. Düşük yanma sıcaklığı NO<sub>x</sub> oluşumunu engellerken, homojen karışım is oluşumunu önler (Reitz vd., 2020).
- Düşük silindir içi sıcaklıklar, özellikle silindir duvarlarına yakın bölgelerde yanmanın tam tamamlanamamasına neden olur. Bu durum, yüksek HC ve CO emisyonları ile sonuçlanır (Saxena ve Bedoya, 2013).
- PAH'lar ve oksijenli hidrokarbonlar gibi türlerin oluşum mekanizmaları henüz tam aydınlatılmamıştır.
- Kütle bazında partikül emisyonu düşük olsa da, sayısal bazda özellikle nanopartikül seviyesinde emisyonlar dikkate değerdir (Agarwal vd., 2017).

### 3.3. LTC Kontrol Yöntemleri

LTC motorlarında doğrudan bir ateşleme tetikleyicisi (buji gibi) bulunmadığından, yanmanın çok hassas kontrol edilmesi gerekir. Erken yanma motor hasarına, geç yanma ise emisyon artışına veya motorun durmasına neden olabilir. (Reitz, 2013).

- Farklı reaktiviteye sahip iki yakıtın (örneğin benzin ve dizel) oranları değiştirilerek tutuşma eğilimi anlık olarak ayarlanır.
- Egzoz Gazı Devridaimi (EGR) egzoz gazının belirli bir oranını emme hattına geri göndererek silindir içindeki yanma sıcaklığını düşürmeyi amaçlayan bir sistemdir. EGR valfini açtığınızda içeriye taze hava (Oksijen) yerine, yanmış egzoz gazı (CO ve HC) girer gazların içeri girmesiyle oksijen konsantrasyonu azalır. NO<sub>x</sub> oluşumu, Zeldovich Mekanizması'na göre büyük oranda sıcaklığa bağlıdır. Kritik eşik yaklaşık 2200 Kelvin'dir (Srivastava vd., 2018). İçeri giren EGR gazı, yanma odasında bir ısı süngeri görevi görür. Yanma ısısını emer ve yerel alev sıcaklığının 2200 K üzerine çıkmasını engeller. Yüksek oranda EGR, silindirdeki O<sub>2</sub> konsantrasyonunu düşürür. Ortamda daha az oksijen olduğu için kimyasal reaksiyon hızı yavaşlar. Bu yavaşlama, yakıtın püskürtüldüğü an ile alev alacağı an arasındaki süreyi (Tutuşma Gecikmesi) uzatır. Bu ekstra süre, yakıt damlacıklarının hava ile tamamen karışmasına (homojenleşmesine) fırsat verir ve böylece PM azaltılmış olur (Agarwal vd., 2017).
- Yakıtın setan ve oktan sayısı gibi kimyasal özellikleri, oto-ateşleme zamanını doğrudan etkiler. Düşük setan sayılı yakıtlar, daha uzun karışma süresi sağladığı için LTC'ye daha uygundur.

### 3.4. Gelecek Çalışma Alanları ve Yol Haritası

Düşük Sıcaklıklı Yanma (LTC) teknolojisinin laboratuvar ortamından seri üretime taşınabilmesi bir dizi kritik mühendislik probleminin aşılmasına bağlıdır. Bu süreçte öncelikle silindir içi basınç sensörleri ve gelişmiş geri besleme mekanizmalarıyla yanma kararlılığı sağlanmalı ve teknolojinin halihazırda sınırlı olan çalışma aralığı genişletilmelidir. Buna ek olarak, dinamik sürüş koşullarında LTC ile geleneksel yanma modları arasındaki geçişlerin pürüzsüz bir şekilde yönetilmesi ve düşük egzoz sıcaklıklarında dahi etkin çalışan yeni nesil egzoz arıtma sistemlerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır. (Agarwal vd., 2017). Tüm bu donanım ve kontrol stratejileri gelecekteki Ar-Ge çalışmalarının temel odağı olacaktır.

- Mevcut durumda dar olan çalışma aralığını, özellikle yüksek yüklere doğru genişletmek için enjeksiyon stratejileri ve "boost" sistemleri optimize edilmelidir (Saxena ve Bedoya, 2013).
- Turboşarj verimi, değişken supap zamanlaması ve manifold tasarımları, LTC'nin hassas emiş koşullarını sağlayacak şekilde geliştirilmelidir.
- Motorun soğukken çalıştırılması ve ani hızlanma gibi geçici rejimlerde kararlı çalışması için kontrol algoritmaları geliştirilmelidir. Genellikle soğuk çalıştırma için klasik mod, ısındıktan sonra LTC moduna geçiş önerilir (Reitz vd., 2020).
- Sayıca yüksek olan ancak kütlesi düşük olan ultra ince partiküllerin yapısı ve oluşum mekanizmaları daha detaylı incelenmelidir (Agarwal vd., 2017).
- Yüksek HC ve CO emisyonlarını gidermek için, düşük egzoz sıcaklıklarında çalışabilen (düşük light-off sıcaklığına sahip) oksidasyon katalizörlerine ihtiyaç vardır (Johnson, 2009).
- Seri üretimde güvenilirlik için, silindir basınç sensörleri ve model öngörülü kontrol (MPC) gibi gelişmiş geri besleme sistemleri kullanılmalıdır.
- Motorun düşük yükte LTC, yüksek yükte klasik modda çalıştığı hibrit stratejiler ve elektrikli güç sistemleriyle entegrasyon, ticarileşme için en gerçekçi senaryodur (Reitz vd., 2020).

### 3.5. LTC Stratejileri ve Çalışmalar

Petrol fiyatlarındaki artış, fosil kaynakların tükenme riski ve giderek sıkılaştıran emisyon mevzuatları, alternatif yakıtlı motorlara veya gelişmiş yanma stratejilerine olan ihtiyacı artırmıştır. HCCI, bu stratejiler arasında en yoğun araştırılan yöntemlerden biridir. HCCI motorlar, aynı hacimdeki geleneksel motorlara kıyasla daha yüksek termal verime ulaşırken, emisyonları mevcut normların oldukça altında tutabilmektedir. Buna karşılık, yanma odası sıcaklığı görece düşük olduğu için yanmamış HC ve CO emisyonları yüksek olma eğilimindedir. HCCI'de silindire alınan iyi karışmış yakıt-hava karışımı, sıkıştırma sırasında belirli bir sıcaklık ve basınca ulaştığında kendi kendine tutuşur. Karışımın büyük bölümü aynı anda yandığı için ısı açığa çıkma hızı çok yüksektir ve yanma süresi konvansiyonel motorlara göre çok kısadır; bu da tepe basınç yükselme hızının (PPRR) büyük olmasına neden olur.

HCCI konseptinin temel zorluğu, ateşleme zamanının doğrudan kontrol edilememesidir. Klasik Buji Ateşlemeli (SI) motorda ateşleme bujiyle, dizel motorda ise enjeksiyon zamanlamasıyla tetiklenirken; HCCI'de yanma yalnızca kimyasal kinetik ve silindir içi termodinamik şartlarla belirlenir. Bu nedenle yanma fazı; EGR oranı, emme havası basıncı, sıcaklığı ve değişken supap zamanlaması gibi dolaylı yollarla kontrol edilir. Yüksek yük ve zengin karışım koşullarında, basınç yükselme hızı çok arttığı için "çınlama" (ringing) şiddetlenir; bu durum gürültü ve mekanik zorlanma açısından üst sınırı belirler.

Fosil yakıtların yarattığı sorunlara karşı biyoyakıtlar önemli bir alternatiftir. HCCI yanma stratejisinin en güçlü avantajlarından biri yakıt esnekliğidir. Uygun kontrol stratejileriyle benzin benzeri veya dizel benzeri pek çok yakıt HCCI modunda yakılabilir. Literatürde etanol, bütanol, metanol ve hidrojen gibi yakıtların başarıyla kullanıldığı gösterilmiştir. (Verhelst ve Wallner, 2009). Özellikle alkoller, yüksek oktan sayıları ve oksijen içerikleri sayesinde gecikmiş oto-ateşleme ve daha geniş kontrol imkanı sunmaları nedeniyle HCCI için caziptir.

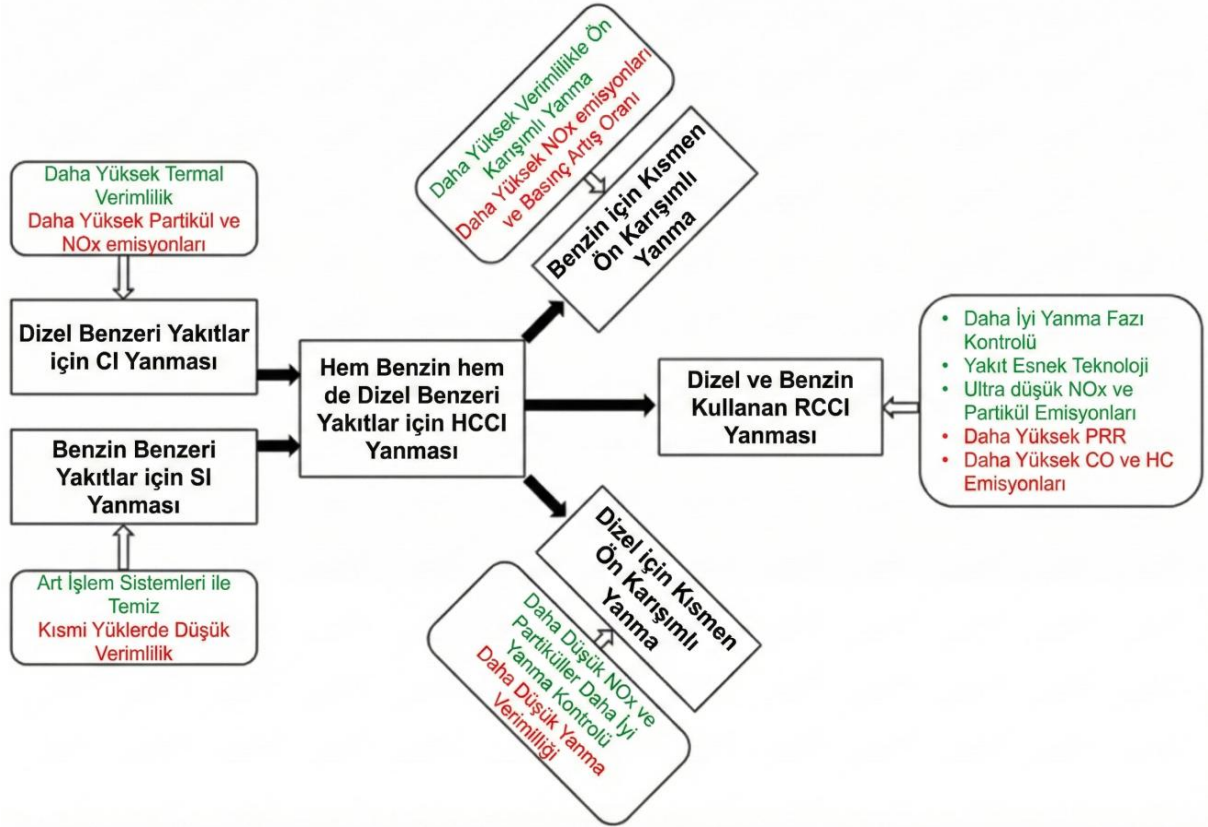
Konvansiyonel SI motorları, homojen stokiyometrik karışım ve gaz kelebeği zorunluluğu nedeniyle yakıt verimi açısından dezavantajlıdır. Sıkıştırma oranının vuru riskiyle sınırlı olması termal verimi kısıtlar. Bu dezavantajları gidermek için geliştirilen fakir yanmalı motorlar ve tabakalı karışım (SCCI) stratejileri, NO<sub>x</sub> arıtma zorlukları ve kısmi zengin bölgelerde kurum oluşumu gibi sorunlar barındırır.

Konvansiyonel CI motorları ise yüksek verim sunsalar da heterojen yanma nedeniyle NO<sub>x</sub> ve kurum oluştururlar. İdeal senaryo, bir motorun homojen ve fakir karışımla yüksek sıkıştırma oranında çalıştırılmasıdır; HCCI tam olarak bu prensibi uygular. Ancak HCCI'nin güç yoğunluğunun düşük kalması ve kontrol zorluğu, araştırmacıları PCCI ve PPC gibi ara formlara yöneltmiştir.

En güncel stratejilerden biri olan Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemesi (RCCI), çift yakıt kullanarak yanma kontrolünü sağlar. RCCI yanmasında, düşük reaktiviteye sahip bir yakıt (örneğin benzin) ile yüksek reaktiviteye sahip bir yakıt (örneğin dizel) karıştırılarak silindir içi reaktivite dağılımı kontrol edilir. Bu sayede yanma süresi ve fazlaması daha hassas yönetilebilir.

Gelecekteki enerji talebini karşılamak ve dizel motorların emisyon sorunlarını aşmak için klasik difüzyon tipi dizel yanması yerine ön karışimli (premix) LTC stratejilerini uygulamak temel yaklaşımdır. Son yıllarda; Homojen Yük Sıkıştırımlı Ateşlemeli (HCCI),

Ön Karışimli Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme (PCCI), Kısmen Ön Karışimli Yanma (PPC) ve Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme (RCCI) gibi konseptler önerilmiştir. Bu stratejilerin ortak özelliği, yakıtın önemli bir bölümünün ön karışimli halde yanması ve difüzyon kontrollü bölgenin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılmasıdır. Şekil 3.1.'de LTC stratejileri ve olan ilişkileri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. LTC stratejileri ve birbirleriyle olan ilişkileri

**Kaynak:** (Reitz & Duraisamy, 2015)

Düşük sıcaklıklı yanma stratejileri, dizel motorların verimliliğini artırırken emisyonlarını azaltmak için geliştirilmiş yeni yanma yöntemleridir. Her biri, farklı yakıt karışımları ve sıkıştırma oranları kullanarak daha temiz ve verimli bir yanma sağlamayı hedefler. Özellikle  $NO_x$  ve partikül madde emisyonlarını azaltmaya çalışan bu sistemler, çevresel etkileri minimize etmeyi amaçlar. Bu stratejiler üç ana kategoriye ayrılabilir:

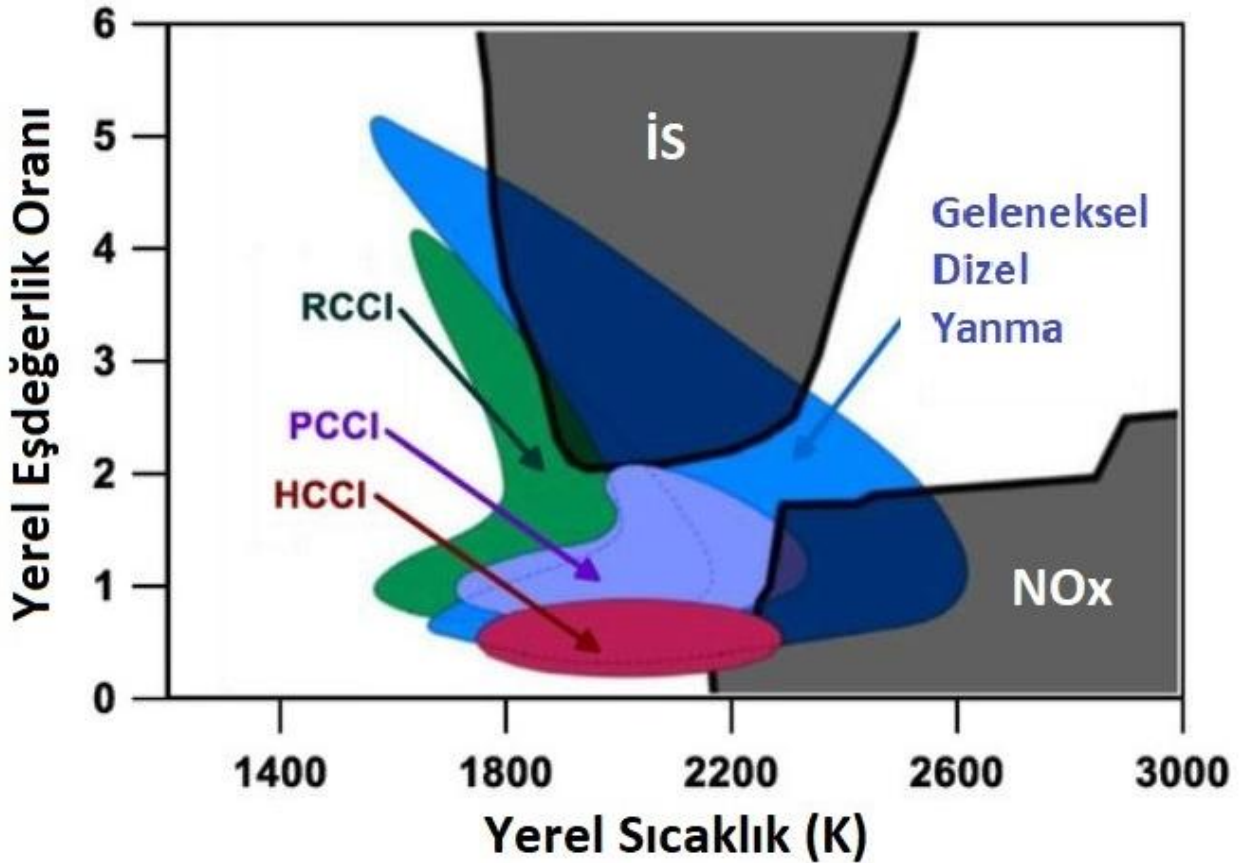
- Homojen Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme (HCCI): Tam anlamıyla homojen karışım ve kimyasal kinetik kontrollü bir LTC konseptidir; silindire tamamen karışmış bir yakıt–hava karışımı alınır
- Ön Karışımli Yük Sıkıştırılmalı Ateşleme (PCCI): yakıt, sıkıştırma zamanının erken kısmında püskürtülür; bu sayede silindir içinde nispeten iyi karışmış bir ön karışım oluşur. Yanma fazı EGR miktarıyla kontrol edilir.
- Reaktivite Kontrollü Sıkıştırılmalı Ateşleme (RCCI): kimyasal reaktivitesi farklı iki yakıt (düşük reaktivite + yüksek reaktivite) birlikte kullanılarak, karışımın reaktivitesi ve dolayısıyla ateşleme davranışı kontrol edilir.

Şekil 3.2.'deki grafik, silindir içerisindeki Yerel Eşdeğerlik Oranı (Yakıt/Hava oranı) ile Yerel Sıcaklık (T) arasındaki ilişkiyi ve bu ilişkinin emisyonlar (İs ve NO<sub>x</sub>) üzerindeki etkisini gösterir. Motorun hangi yanma stratejisiyle (Dizel, HCCI, PCCI, RCCI) çalıştığına bağlı olarak emisyon bölgelerine girip girmediğini kanıtlar. Yaklaşık 2200 K'in üzerindeki sıcaklıklarda (sağ alt gri bölge) NO<sub>x</sub> (Azot Oksit) oluşumu başlar (Zeldovich mekanizması). Yerel Eşdeğerlik Oranı ise karışımın ne kadar zengin olduğunu gösterir. Eğer 1'den büyükse zengin karışım, düşükse fakir karışım demektir. Yaklaşık 2'nin üzerindeki zengin karışımlarda ve orta sıcaklıklarda (üst orta gri bölge) İs (Soot) oluşumu gerçekleşir.

- Geleneksel Dizel Yanma (Mavi Alan - CDC), grafikte en geniş alana sahiptir. Yanma süreci sırasında sıcaklık ve eşdeğerlik oranı çok değişkendir. Mavi alan, hem İs adasının (yukarıda) hem de NO<sub>x</sub> adasının (sağda) içinden geçer. Bu durum, dizel motorlardaki meşhur NO<sub>x</sub>-İs ikilemini (trade-off) açıklar. Dizele müdahale edip birini düşürürseniz genellikle diğeri artar.
- HCCI (Kırmızı Alan), grafiğin en altında ve solunda yer alır. Çok fakir karışım ve düşük sıcaklık söz konusudur. Hem İs hem de NO<sub>x</sub> adalarından tamamen uzaktır. Sıfıra yakın NO<sub>x</sub> ve İs emisyonu sağlar ancak yük kapasitesi sınırlıdır (alan çok küçüktür).
- PCCI (Mor Alan), grafikte HCCI (Kırmızı) ve RCCI (Yeşil) arasında bir geçiş formu gibi duran bölgedir. HCCI'dan biraz daha yüksek Yerel Eşdeğerlik Oranlarına sahiptir. Yani HCCI kadar aşırı fakir karışımla çalışmak zorunda değildir, ancak Geleneksel Dizel (Mavi) kadar zengin bölgelere de çıkmaz. PCCI bölgesi, yukarıdaki siyah İs adasının hemen altına kadar uzanır ancak içine girmez. Bu, PCCI'nin dizeldeki

is oluşumunu engellemek için tasarlandığını gösterir. Sıcaklık ekseninde (yatay eksen) genellikle  $\text{NO}_x$  oluşum sınırı olan 2200 K'in solunda kalmaya çalışır, ancak yüksek yüklerde bu sınıra yaklaşabilir.

- RCCI (Yeşil Alan), HCCI ile Dizel arasında, ancak emisyon adalarına girmeden genişleyen bir bölgededir. RCCI, düşük reaktiviteli yakıt (Doğalgaz/Hidrojen) sayesinde sıcaklığı 2200 K sınırının altında tutarak  $\text{NO}_x$  oluşumunu engeller. Aynı zamanda, karışımın homojenliğini artırarak yerel eşdeğerlik oranını  $\text{Is}$  oluşum sınırının altında tutmayı başarır. HCCI'a göre daha geniş bir çalışma aralığına (daha yüksek yüklerle) sahiptir ama Dizel gibi kirli değildir.



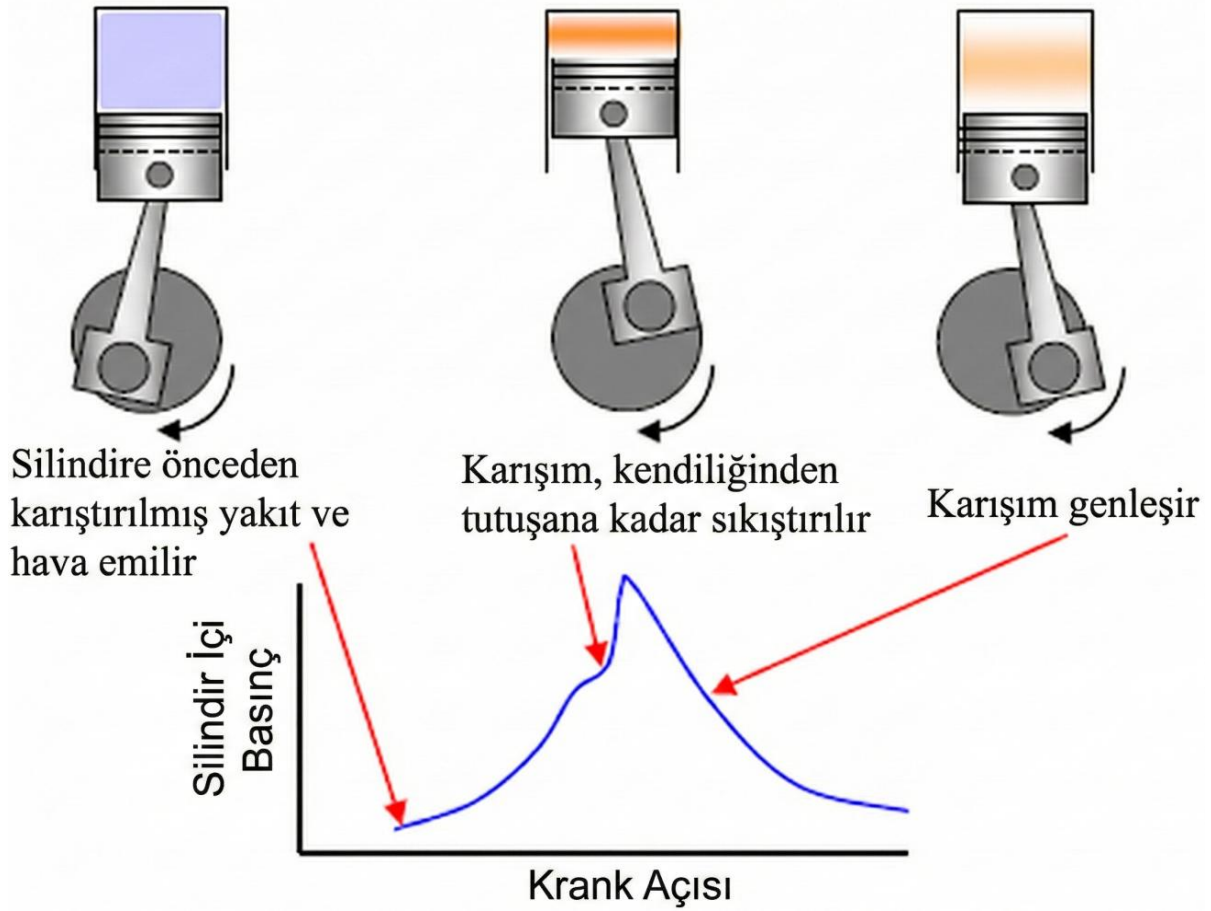
Şekil 3.2. Çeşitli yanma stratejilerinin karşılaştırılması

Kaynak: (Reitz & Duraisamy, 2015)

### 3.5.1. Homojen Şarj Sıkıştırılmalı Ateşleme (HCCI)

Tarihsel Gelişim ve Ortaya Çıkış Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli yanma yöntemi, ilk olarak 1979 yılında Onishi ve ekibi tarafından keşfedilmiş ve bu süreç "Aktif Termo-Atmosfer Yanması" adıyla iki zamanlı benzinli motorlara uyarlanmıştır. (Onishi vd., 1979). Yapılan bu ilk çalışmalarda, motorun kısmi yükler altında kararlı bir yanma sergilediği, aynı zamanda düşük emisyon, gürültü ve titreşim seviyelerine ulaşıldığı rapor edilmiştir. İlerleyen süreçte, 1989 yılında Lund Üniversitesi'nde dört zamanlı dizel motorlar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, Egzoz Gazı Geri Devri tekniği geliştirilmiş ve bu yöntemin azot oksit emisyonlarını azaltmadaki başarısı kanıtlanmıştır (Christensen vd., 1998). 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü sonrasında küresel karbondioksit seviyelerinin tehlikeli boyutlara ulaşması, otomotiv endüstrisinin odağını sera gazlarını ve özellikle azot oksit emisyonlarını azaltmaya yöneltmiştir. Bu gereklilik, geleneksel motor tasarımlarından farklı bir yaklaşım sunan ve çevre dostu bir çözüm vadeden Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli yanma teknolojisine olan ilgiyi artırmıştır (Epping vd., 2002). Şekil 3.3.'te HCCI motorda Silindir içi basınç ve Krank açısının değişimi gösterilmiştir.

Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli yanma, tek başına yeni bir motor tasarımı olmaktan ziyade, mevcut motor konseptlerine entegre edilen özel bir yanma stratejisidir. Bu teknoloji, temel olarak buji ateşlemeli (benzinli) motorlar ile sıkıştırma ateşlemeli (dizel) motorların avantajlarını tek bir yapıda birleştirir (Zhao, 2003). Sistem, buji ateşlemeli motorlar gibi hava ve yakıtın homojen bir karışım haline getirilerek silindire alınmasını sağlarken; dizel motorlar gibi bu karışımı yüksek basınç altında sıkıştırarak kendi kendine tutuşturma prensibine dayanır. Geleneksel içten yanmalı motorlardan farklı olarak bu motorlarda yanmayı başlatmak için bir bujiye ihtiyaç duyulmaz (Saxena ve Bedoya, 2013).



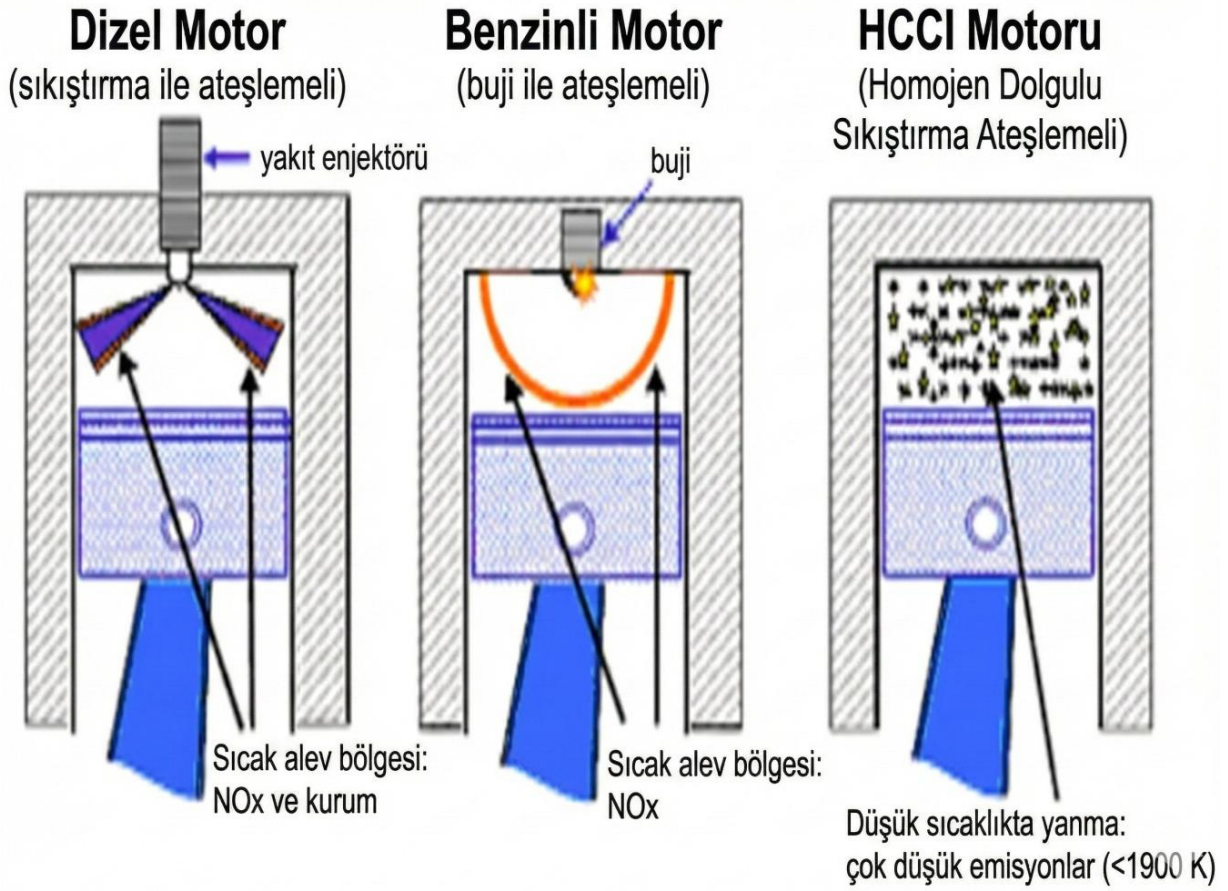
Şekil 3.3. HCCI motorda silindir içi basınç ve krank açısının değişimi

**Kaynak:** (Zhao, 2003)

Bu yöntemde yakıt, yanma başlamadan çok önce, genellikle emme zamanında silindire veya emme manifolduna püskürtülür. Bu erken püskürtme ve hazırlık aşaması, yakıtın hava ile moleküler düzeyde tamamen karışarak homojen bir yapı kazanmasına olanak tanır. Silindir içindeki sıkıştırma işlemi sırasında basınç ve sıcaklık artar. Karışım sıcaklığı yakıtın kendiliğinden tutuşma eşiğini aştığında, yanma odasının tek bir noktasında değil, tamamında aynı anda kimyasal reaksiyonlar başlar. Klasik motorlardaki gibi belirli bir noktadan ilerleyen bir alev cephesi veya yerel zengin yanma bölgeleri oluşmaz; bunun yerine eş zamanlı ve hacimsel bir yanma gerçekleşir. Bu duruma literatürde "alevsiz yanma" adı da verilmektedir. (Zhao, 2003).

Yanma işlemi tüm hacimde eş zamanlı gerçekleştiği için süreç oldukça hızlıdır ve yanma sıcaklıkları 700 santigrat derecenin altında tutulabilir. Teorik olarak "homojen" kabul edilse de pratikte silindir duvarlarına olan ısı transferi ve türbülans nedeniyle silindir içinde

sıcaklık farklılıkları, yani ısıl tabakalaşma oluşur. Yanma, "sıcak noktalar" olarak adlandırılan en sıcak bölgelerden başlar ve daha soğuk bölgelere doğru yayılır. Süreç; yerel bölgelerde düşük sıcaklık reaksiyonlarının başladığı başlangıç fazı, ısı veren reaksiyonların ortamı ısıtarak yanmayı hızlandırdığı geri besleme fazı ve artan basınçla diğer bölgelerin de tutuştuğu tamamlanma fazı olmak üzere üç aşamada gerçekleşir. Şekil 3.4.'te geleneksel motorlar ile HCCI motorunun yanma mekanizmaları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4. Geleneksel motorlar ile HCCI motorunun yanma sistemleri

Kaynak: (Epping vd., 2002)

**Sistemin Avantajları:** Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli motorlar, sundukları yüksek ısıl verim ve düşük emisyon değerleriyle dikkat çekmektedir.

- Bu motorlar, dizel motorlara benzer şekilde yüksek sıkıştırma oranlarıyla çalışır ve genellikle fakir karışım (bol hava) kullanırlar. Yüksek sıkıştırma oranı sayesinde yakıt

daha verimli yanar, bu da motorun daha az yakıtla daha fazla güç üretmesini sağlar. Ayrıca gaz keleşi kullanılmadığı için pompalama kayıpları düşüktür, bu da yakıt ekonomisine doğrudan katkı sağlar.

- Düşük yanma sıcaklıkları sayesinde azot oksit emisyonları, homojen karışım yapısı sayesinde ise partikül madde ve is oluşumu ultra düşük seviyelere iner. Bu özellik, Euro 5 ve üzeri katı emisyon standartlarını karşılamada, egzoz arıtma sistemlerine olan yükü azaltarak büyük avantaj sağlar.
- Sistem yalnızca fosil yakıtlarla sınırlı değildir. Hem yüksek oktanlı benzin benzeri yakıtlarla hem de yüksek setanlı dizel benzeri yakıtlarla çalışabilme esnekliğine sahiptir. Ayrıca biyodizel, etanol ve diğer alternatif yakıtlarla da çalışabilmesi, sürdürülebilir ulaşım çözümleri için önemli bir potansiyel sunar.

**Karşılaşılan Zorluklar:** Bu teknolojinin ticari olarak yaygınlaşmasının önünde bazı ciddi mühendislik engelleri bulunmaktadır.

- Yanma sürecinin ve tutuşma zamanlamasının hassas bir şekilde kontrol edilmesidir. Geleneksel motorlarda buji veya enjektör yanma anını belirlerken, bu sistemde yanma anı tamamen silindir içindeki kimyasal kinetik reaksiyonlara bağlıdır. Bu nedenle, yakıt karışımının homojenliği ve sıcaklık seviyelerinin korunması kritik önem taşır. Motor yükü arttıkça yanma karakteristikleri değişebilir; bu da dinamik ve gelişmiş kontrol sistemlerine duyulan ihtiyacı artırır.
- Düşük yüklerde yanma sıcaklığı yetersiz kalarak yanmamış hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonlarını artırabilir. Yüksek yüklerde ise yanma çok hızlı gerçekleştiğinden, aşırı basınç artış hızı motor gürültüsüne (vuruntu) ve mekanik hasarlara yol açabilir. Ayrıca motor soğukken silindir içi sıcaklıklar, karışımın kendiliğinden tutuşması için yeterli seviyeye ulaşamayabilir, bu da ilk çalıştırma anında zorluklara neden olur.

Bu zorlukları aşmak ve yanma zamanlamasını kontrol etmek için çeşitli parametreler kullanılır. Emme havasına egzoz gazı karıştırılarak (Egzoz Gazı Geri Devri) yanma sıcaklığı düşürülür ve reaksiyon hızı yavaşlatılır. Emme havasının ısıtılması tutuşmayı erkene çekebilirken; değişken sıkıştırma oranı ve supap zamanlaması gibi yöntemlerle silindir içi koşullar mekanik olarak değiştirilebilir. Ayrıca, motorun gücünü belirleyen yakıt-hava oranı (eşdeğerlik oranı) da kritik bir parametredir; çok zengin karışımlar vuruntuya neden

olabileceğinden genellikle fakir karışımlar tercih edilir.

Homojen dolgulu motorların kısıtlarını aşmak için hibrit yanma stratejileri geliştirilmiştir. Buji Destekli Sıkıştırma ile Ateşleme (SACI) yönteminde, yanmayı başlatmak için yardımcı bir buji kullanılır ve bu sayede özellikle motor yükü değişimlerinde geçiş kolaylaşır. Bir diğer yöntem olan "Isıl Tabakalı Sıkıştırma Ateşleme" ise silindir içine su püskürterek sıcaklık dağılımını ve yanma hızını yönetmeyi amaçlar.

Otomotiv endüstrisinde, özellikle Mazda gibi üreticiler bu teknolojiyi geliştirmek için aktif Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli motorlar, içten yanmalı motorların verimliliğini artırıp emisyonlarını düşürerek çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Gelecekteki geliştirme potansiyeline bağlı olarak, bu motorların fosil yakıt kullanımını en aza indirerek daha sürdürülebilir bir ulaşım çözümü sunacağı öngörülmektedir.

### **3.5.2. Ön Karışimli Sıkıştırmalı Ateşleme (PCCI)**

İçten yanmalı motor teknolojilerinde yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkan Kısmi Önden Karışimli Sıkıştırma ile Ateşleme ya da diğer adıyla Ön Karışimli Sıkıştırma Ateşlemeli Yanma stratejisi; geleneksel dizel yanması ile homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme tekniği arasında yer alan bir ara geçiş modu olarak tanımlanmaktadır. Bu gelişmiş yanma teknolojisinin temel amacı, yakıt ile havanın sıkıştırma işlemi öncesinde veya sıkıştırmanın erken evrelerinde önemli ölçüde karışmasını sağlayarak, dizel motorlarında sıkça karşılaşılan yüksek sıcaklıklı yanma bölgelerinin ve yakıt açısından aşırı zengin alanların oluşumunu engellemektir. Böylece hem azot oksit hem de is ve partikül madde emisyonlarının eş zamanlı olarak düşürülmesi hedeflenmektedir.

Bu sistemin çalışma prensibi, yakıtın geleneksel dizel motorlarına kıyasla silindire çok daha erken püskürtülmesine dayanır. Enjeksiyon işleminin bitişi ile tutuşmanın gerçekleşmesi arasında bırakılan pozitif bekleme süresi, yakıtın hava ile karışarak kısmen homojenleşmesine olanak tanır. (Agarwal vd., 2017). Elde edilen bu nispeten homojen ve fakir karışım, sıkıştırma zamanının ileri aşamalarında buji gibi harici bir ateşleyiciye ihtiyaç duymadan, sıcaklık ve basınç etkisiyle kendiliğinden tutuşur. Ancak bu tutuşma, silindir içinde tek bir noktadan başlayıp yayılan bir alev cephesi şeklinde değil, yanma odasının birçok farklı noktasında eş zamanlı gerçekleşen çok noktalı bir yanma karakteristiği gösterir. Bu sayede yanma sıcaklıkları düşürülerek azot oksit emisyonları azaltılırken, zengin karışım bölgelerinin

ortadan kalkmasıyla is oluşumu da belirgin biçimde engellenir.

Homojen dolgulu sistemlerde yanma zamanlaması büyük oranda kontrolü zor olan kimyasal reaksiyon kinetiğine bağlıyken, kısmi önden karışımli yöntemde denetim, büyük ölçüde enjeksiyon stratejisi ile sağlanır. Bu sistemde tutuşma gecikmesi ve yanma süresi gibi kritik parametreler; silindir içi hava hareketleri, sıkıştırma oranı, yakıt enjeksiyon zamanlaması ve egzoz gazı geri devri uygulamalarıyla yönetilebilir. Özellikle egzoz gazı geri devri, yanma sıcaklığını azot oksit oluşum eşiğinin altına çekerek emisyonları düşürmede kilit bir rol oynar. Ayrıca yüksek motor yüklerinde kullanılan aşırı doldurma sistemleri, yakıtın oksitlenmesini kolaylaştırarak karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlar.

İstenilen karışımın hazırlanması için emme manifolduna püskürtme veya doğrudan silindir içine püskürtme gibi çeşitli yöntemler kullanılır. Ancak çok erken yapılan püskürtmelerde yakıt damlacıklarının silindir duvarlarına çarparak yağ filmini inceltmesi ve karter yağını seyreltmesi riski bulunmaktadır. Bu sorunu aşmak ve yanma fazlamasını kontrol altında tutmak adına daha dar açılı enjektörler ve bölünmüş enjeksiyon stratejileri tercih edilmektedir. (Reitz, 2013). Özellikle pilot enjeksiyon uygulamaları, ana enjeksiyonun tutuşma gecikmesini kısaltarak basınç artış hızını ve yanma gürültüsünü kontrol altına alır. Çoklu püskürtme teknikleri ise karışım homojenliğini artırarak partikül oluşumunu düşürür.

Bu teknoloji, dizel ve benzin gibi farklı yakıt türleriyle uyumlu çalışabilmektedir. Dizel yakıtlı uygulamalarda, yakıtın düşük uçuculuğu nedeniyle ön karışım sağlamak için genellikle yüksek basınçlı doğrudan püskürtme tercih edilir. Burada "erken doğrudan püskürtme" ve "geç doğrudan püskürtme" olmak üzere iki temel yaklaşım öne çıkar. Benzin benzeri yakıtların kullanıldığı uygulamalarda ise silindir içindeki yakıt tabakalanma derecesine göre stratejiler belirlenir. Bu stratejiler; yakıtın büyük kısmının homojen karıştığı "kısmi yakıt tabakalanması", ön karışım miktarının azaltıldığı "orta düzey yakıt tabakalanması" ve üst ölü noktaya yakın çoklu enjeksiyonlarla sağlanan "yoğun yakıt tabakalanması" şeklinde sınıflandırılır.

Kısmi Önden Karışımli Sıkıştırma ile Ateşleme motorlarının sunduğu yüksek termal verimlilik ve düşük emisyon avantajlarına rağmen, çalışma prensipleri geleneksel motorlara göre daha karmaşıktır. Yanma sürecinin düzgün ve verimli bir şekilde kontrol edilmesi, motorun dinamik koşullarına göre hassas ayarlamalar yapılmasını gerektirir. Özellikle motor yükü değıştikçe yanma karakteristiklerinin farklılaşması, gelişmiş kontrol mekanizmalarına

duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Otomotiv sektörü ve araştırma kuruluşları, bu teknolojinin kontrol zorluklarını aşmak, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve biyodizel ya da etanol gibi sürdürülebilir yakıtlarla uyumunu artırmak amacıyla çalışmalarını sürdürmektedir. Sonuç olarak bu teknoloji, tam homojen karışımli sistemlerin kontrol zorluklarını aşan ve geleneksel motorların emisyon dezavantajlarını gideren, yüksek verim potansiyeline sahip çevre dostu bir hibrit yanma teknolojisi olarak değerlendirilmektedir.

### **3.5.3. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırılmalı Ateşleme (RCCI)**

Reaktivite Kontrollü Sıkıştırılma ile Ateşleme teknolojisi, içten yanmalı motorların evriminde dizel ve benzinli motorların en üstün özelliklerini birleştiren hibrit bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu yenilikçi yanma tekniği, ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde Wisconsin Üniversitesi Motor Araştırma Merkezi'nde ortaya konmuş ve geliştirilmiştir. (Kokjohn vd., 2011). Teknolojinin gelişimi incelendiğinde, 2000'li yılların başında daha çok akademik çevrelerde ve laboratuvar ortamlarında deneysel motor testleri ile araştırıldığı görülmektedir. İlerleyen süreçte General Motors ve Cummins gibi büyük motor üreticileri bu sistemi ticari motorlara entegre etme çalışmaları yürütmüştür. 2010'lu yıllarda otomotiv endüstrisinde daha fazla ilgi gören bu teknoloji, motor verimliliği ve emisyon optimizasyonu hedefleyen prototiplerle geliştirilmeye devam etmiştir (Reitz ve Duraisamy, 2015). 2020'li yıllar ve sonrasında ise özellikle çevre dostu araçlar, elektrikli sistemlerle birleşmiş hibrit yapılar ve enerji üretim tesisleri için potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Reitz vd., 2020).

Bu yöntemin temel çalışma prensibi, silindir içerisinde reaktiviteleri, yani tepkimeye girme eğilimleri birbirinden farklı iki ayrı yakıtın stratejik bir şekilde kullanılmasına dayanır. Sistem, benzinli motorlar gibi buji kullanmaz; bunun yerine dizel motorlarda olduğu gibi sıkıştırma ısıyla tutuşma sağlar. Süreç, benzin, alkol veya doğal gaz gibi düşük reaktiviteye sahip bir yakıtın emme kanalına püskürtülmesiyle başlar. Bu yakıt, hava ile karışarak silindire alınır ve homojen bir karışım oluşturur. Ardından, yanma odasına dizel veya biyodizel gibi yüksek reaktiviteye sahip ikinci bir yakıt, sıkıştırma zamanı içerisinde doğrudan ve optimize edilmiş bir zamanlamayla enjekte edilir (Kokjohn vd., 2011).

Yanma olayı, yüksek reaktiviteye sahip yakıtın yoğun olduğu bölgelerde başlar ve kademeli olarak düşük reaktiviteli bölgelere doğru ilerler. Bu iki aşamalı yanma stratejisi, yanma başlangıcının ve süresinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır.

Yakıtların uzaysal dağılımı ve oluşturulan reaktivite farkları sayesinde, basınç artış hızı ve yanma sıcaklığı yönetilebilir. Yüksek reaktiviteli yakıt miktarının artırılması yanmayı öne çekerken, reaktivite farkının ayarlanması yanma süresini belirler (Splitter vd., 2010).

Reaktivite kontrollü sistemlerde yakıt yönetimi genellikle iki ana grupta toplanır. En yaygın yöntem, iki ayrı yakıt deposu gerektiren "çift yakıt stratejisi"dir. Burada reaktivite farkı, benzin ve dizel gibi iki farklı yakıtın fiziksel olarak ayrı ayrı kullanılmasıyla sağlanır. Doğal gaz, metanol, etanol ve bütanol gibi alternatif yakıtlar da bu sistemde başarıyla kullanılabilir. Diğer yöntem olan "tek yakıt ve katkı stratejisi"nde ise, ana yakıtta küçük miktarlarda setan artırıcı katkı maddesi eklenerek yapay bir reaktivite farkı oluşturulur (Dempsey vd., 2013).

Motorun yük durumuna göre enjeksiyon rejimleri değişkenlik gösterir. Düşük yüklerde, yanma başlamadan önce yakıtın iyice karışmasını sağlamak için "Tam Ön Karışım Yanma" uygulanır. Orta yüklerde, reaktiviteyi artırmak ve tutuşmayı tetiklemek için kademeli püskürtme yapılan "Yüksek Oranda Ön Karışım Yanma" tercih edilir. Tam yüke yakın durumlarda ise güç ihtiyacını karşılamak adına geleneksel dizel motorlarına benzer şekilde "Difüzyon Yanması" na geçilir (Hanson vd., 2010).

Reaktivite kontrollü strateji, diğer düşük sıcaklıklı yanma yöntemlerinden belirli alanlarda tamamen farklılaşır. Bu teknoloji, Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşleme ve Kısmi Önden Karışım Sıkıştırma ile Ateşleme gibi önceki düşük sıcaklıklı yanma tekniklerine kıyasla daha geniş bir çalışma aralığı ve esneklik sunar. En belirgin avantajı, %50'nin üzerine çıkabilen yüksek termal verimliliğidir. (Reitz ve Duraisamy, 2015). Sistem, yanma sıcaklıklarını düşük tutarak azot oksit ve partikül madde (is) emisyonlarını eş zamanlı olarak çok düşük seviyelere indirir. Bu sayede, karmaşık ve maliyetli egzoz gazı ardıl işlem sistemlerine duyulan ihtiyaç azalır ve EURO VI gibi sıkı emisyon standartları daha kolay karşılanabilir. Ayrıca hem benzin hem de dizel karakterli yakıtların avantajlarını kullandığı için yakıt esnekliği konusunda önemli bir üstünlüğe sahiptir.

Yapılan birçok bilimsel çalışma, reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme stratejisinin, geleneksel dizel yanmasına kıyasla çok daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Ağır hizmet tipi bir motorda gerçekleştirilen kapsamlı bir araştırmada, sabit bir dizel enjeksiyon stratejisi temel alınmış ve benzin ile dizel oranları değiştirilerek geniş bir yük aralığı boyunca incelemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu yeni strateji; azot oksit emisyonlarını geleneksel sisteme kıyasla neredeyse bin kat, is emisyonlarını ise yaklaşık

altı kat azaltmayı başarmıştır. Ayrıca, egzoz gazı geri devri kullanılmayan geleneksel dizel yanmasına göre, brüt gösterge verimini yüzde 16,4 oranında artırmıştır. (Splitter vd., 2010).

Motor yükü, devri, aşırı doldurma basıncı ve yanma fazlamasının sabit tutulduğu bir başka karşılaştırma çalışmasında ise; reaktivite kontrollü motorda piston üzerinden gerçekleşen bütünleşik ısı transferinin geleneksel dizel yanmasına göre yüzde 24 daha düşük olduğu, ortalama piston yüzey sıcaklığının ise 25 santigrat derece daha az olduğu rapor edilmiştir. (Kokjohn vd., 2011). Geleneksel dizel yanmasında püskürtme başlangıç zamanı ısı akısını güçlü bir şekilde etkilerken; reaktivite kontrollü sistemde yüksek reaktiviteli yakıt üst ölü noktaya çok yakın püskürtülse dahi ısı akısı üzerindeki etkinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı belirtilmiştir. Bu gözlemler, yüksek reaktiviteli yakıt enjeksiyonunun silindir içindeki ısı ortamını ciddi biçimde bozmadığını, yani ısı transferini aşırı artırmadığını göstermektedir.

Bununla birlikte, hem homojen dolgulu hem de reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme sistemlerinde ortak bir sorun mevcuttur. Özellikle silindir duvarına yakın bölgelerde ve sızdırmazlık boşluklarında (ölü hacimlerde) bulunan yakıt buharı, düşük sıcaklıklar nedeniyle tamamen yanmadan kalabilir. Bu durum, yanmamış hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonlarının yüksek çıkmasına neden olmaktadır.

Reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme stratejisi üzerine yapılan incelemelerde öne çıkan diğer bulgular şu şekildedir:

- Yanma süresi (ısı açığa çıkma süresi); homojen dolgulu ve kısmi önden karışımli yöntemlere göre daha uzundur.
- Buna bağlı olarak maksimum basınç artış oranı, diğer iki yöntemle göre daha düşüktür.
- Üç yöntem arasında en yüksek gösterge termal verimine sahip olan strateji budur.
- Ancak yanma verimi, homojen dolgulu ve kısmi önden karışımli yöntemlere kıyasla daha düşüktür.

Elde edilen yüksek termal verimin, temel olarak daha düşük maksimum basınç artış oranına bağlı olarak azalan ısı transferi sayesinde sağlandığı belirtilmektedir.

Aynı çalışmada, emme sıcaklığı ve basıncı gibi koşulların değiştirilmesiyle sistemin kontrol kabiliyeti de test edilmiştir. RCCI stratejisi, silindir içerisindeki yakıt reaktivitesinin kademelendirilmesi prensibine dayanır. Bu sayede yanma fazlamasının kontrol altına alınarak küçük ayarlamalarla kolayca tekrar hedeflenen noktaya getirilebildiği görülmüştür (Maurya, 2018). Buna karşılık kısmi önden karışımli yanma yönteminde; emme koşullarındaki değişim

sonucu yanma fazlaması çok ilerlerse (erken yanma oluşursa), yakıt tabakalanma seviyesini değiştirerek bile temel fazlamaya geri dönmek mümkün olmamıştır. Ancak fazlama geciktiğinde, yakıt tabakalanma düzeyi artırılarak kontrol yeniden sağlanabilmiştir.

Sonuç olarak; hem çift yakıtlı reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme hem de tek yakıtlı kısmi önden karışimli yanma stratejilerinin her ikisi de, yüksek termal verim sunarken aynı zamanda azot oksit ve is emisyonlarını çok düşük seviyelere indirebilme potansiyeline sahiptir.

### **3.5.3.1. RCCI Motorlarda Doğalgaz-Hidrojen-Dizel Kullanımı**

Reaktif Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli motorlar, düşük emisyon ve yüksek verimlilik potansiyeline sahip, gelişmiş içten yanmalı motor teknolojilerinden biridir. Bu motorlarda, doğalgaz, hidrojen ve dizel gibi alternatif yakıtların kullanımı, yanma özelliklerini, motor performansını ve emisyonları önemli ölçüde etkiler. Bu yüzden uygun yakıt birlikteliği hayati önem taşır ve bununla ilgili geçmişte birçok çalışma yapılmış ve gelecekte de yapılacaktır. Bu bölümde, RCCI motorlarında alternatif yakıt kullanımı için yapılmış önceki önemli çalışmalar incelenecektir.

#### **Doğalgaz ve Dizel Yakıtlarının RCCI Motorlarındaki Kullanımı**

Doğalgaz ve dizel yakıtları, RCCI motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Doğalgaz düşük emisyonlu ve çevreci bir yakıtken, dizel yakıt yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu nedenle, doğalgaz ve dizel yakıtlarının birlikte kullanılması, yüksek verimlilik ve düşük emisyon hedeflerine ulaşmada önemli bir potansiyel sunabilir.

- Derek E. Nieman ve ekibi ağır hizmet tipi bir motorda RCCI yanma yöntemiyle doğalgaz ve dizel yakıtın emisyon ile verim üzerindeki etkilerini araştırdı. Metan oranı, dizel enjeksiyon zamanlaması, miktarı, basıncı ve EGR gibi parametreler kullanılarak motor koşulları optimize edildi. Hedef; is, NO<sub>x</sub>, CO, UHC emisyonlarını, yakıt tüketimini ve gürültüyü azaltmaktı ve sonuç olarak yüksek verim ve düşük emisyon sağlandı. Yüksek yüklerde enjeksiyonun hassas kontrolü gerektiği vurgulandı. (Nieman vd., 2012)
- Kakaee ve ekibi doğalgaz ve dizel yakıt karışımları kullanılarak gerçekleştirilen RCCI yanmasını ve bu süreçteki emisyon özelliklerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Wobbe indeksi ve motor devrinin, RCCI yanma süreci ile emisyonlar üzerinde önemli

bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Daha yüksek Wobbe değerlerinin, silindir içindeki maksimum basınç ve sıcaklığı artırdığı, buna bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarında yükselme, HC ve CO emisyonlarında ise azalma sağladığı gözlemlenmiştir. (Kakaee vd., 2015)

- Chaudhari ve Deshmukh, RCCI motorunda düşük reaktiviteli yakıtlar olarak benzin, etanol, metanol ve doğalgaz kullanırken, yüksek reaktiviteli yakıtlar olarak biyodizel ve dizeli tercih etmişlerdir. Araştırmalarında, NO<sub>x</sub> ve partikül madde (is) emisyonlarını neredeyse sifira indirmeyi ve motor performansını artırmayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak emisyonlarda azalma görüldü. (Chaudhari ve Deshmukh, 2022)
- Olsen ve ekibi, Doğalgaz/Dizel RCCI motorunda doğalgaz enerji oranının (substitüsyon oranı) yanma ve emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen bulgular, silindir içindeki doğalgaz oranı artırıldığında, düşük reaktiviteye sahip yakıtın (doğalgaz) özellikle kısmi yüklerde ve fakir karışım bölgelerinde tam yanamaması nedeniyle UHC ve CO emisyonlarının arttığını göstermiştir. Buna karşılık, doğalgaz oranının artmasıyla birlikte yanma sıcaklıklarının daha homojen dağılması sayesinde NO<sub>x</sub> emisyonlarında belirgin bir düşüş elde edildiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, RCCI stratejisinde reaktivite farkının emisyon takası (trade-off) üzerindeki kritik rolünü ortaya koyması açısından önemlidir. (Olsen vd., 2007)

### **Hidrojen ve Dizel Yakıtlarının RCCI Motorlarındaki Kullanımı**

Hidrojenin RCCI motorlarında dizel yakıtına katkı olarak kullanılması, motor performansını ve emisyonları iyileştirme potansiyeline sahiptir. Hidrojenin yüksek alev yayılma hızı ve temiz yanma özellikleri, yanma verimliliğini artırır ve emisyonları azaltır. Bununla birlikte, dizel yakıtın yüksek enerji kapasitesi verime olumlu etki sağlar.

- Saravanan ve ekibi, Dizel ve hidrojenin birlikte kullanıldığı çift yakıtlı motorlar üzerinde çalıştılar ve geleneksel dizel motorlara kıyasla daha düşük yakıt tüketimiyle çalıştırılabileceğini gördüler. Bu sistemde, hidrojenin yanma sürecine katkıda bulunması sayesinde, motora sağlanan dizel yakıt miktarı azalırken yanma verimliliği artmaktadır. Bunun sonucunda, egzoz gazlarındaki duman oluşumu önemli ölçüde düşerken, motorun fren termal verimliliğinde belirgin bir artış gözlemlenir. Ayrıca, hidrojenin temiz yanma özelliği nedeniyle, NO<sub>x</sub> emisyonlarında genel bir azalma sağlanmaktadır. (Saravanan vd., 2008)

- Liu ve ekibi, çift yakıtlı bir RCCI motoruna hidrojen ( $H_2$ ) eklenmesinin etkilerini, simülasyonlar yoluyla incelemiştir. Bulgulara göre, hidrojen eklenmesiyle ateşleme süresi uzamış ve silindir içindeki en yüksek basınç değeri yükselmiştir. Hidrojenin, yanma sürecinin ilk evrelerinde sonraki aşamalara kıyasla daha belirgin bir etkisi olduğu gözlenmiştir. CO emisyonları kayda değer ölçüde azalmış ve bununla birlikte, hidrojenin dahil edilmesi  $NO_x$  emisyonlarında bir artışa yol açmıştır. (Liu vd., 2012)
- Kumar ve ekibi, RCCI bir motorda %10'dan yüksek hidrojen konsantrasyonları kullanıldığında, yanma sıcaklıklarının artması nedeniyle Azot Oksit emisyonlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir.  $NO_x$  emisyonlarını azaltmak için EGR sistemi gibi çözümler önerilmiştir. (Kumar vd., 2015)

### **Doğalgaz ve Hidrojen Yakıtlarının RCCI Motorlarında Kullanımı**

Doğalgaz ve hidrojenin birlikte kullanılması, yanma reaksiyonu boyunca daha fazla homojenlik sağlamıştır ve bu sayede  $NO_x$  ve PM emisyonları önemli ölçüde azaltılmıştır. Dolayısıyla emisyonun azalması sonucu çevreye daha duyarlı bir sistem haline gelmiştir. Aynı zamanda hidrojenin yüksek enerjiye sahip olmasından dolayı motor verimliliğinde artış görülmüştür.

- Jamil ve ekibi, doğalgaza %20 oranında hidrojen eklenmesinin etkilerini ve fakir yanma koşullarında motor modifikasyonlarını deneysel olarak araştırmıştır. Araştırma, Bu yakıt bileşiminin ısı verimi önemli ölçüde artırdığını, aynı zamanda karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon (UHC) emisyonlarını azalttığını ortaya koymuştur. (Jamil vd., 1993)
- Wallace ve ekibi, yaptıkları deneylerde elde ettikleri sonuçlara göre, doğalgaz ve hidrojen karışımının özgül yakıt tüketimi, saf doğalgazdan daha düşük bulunmuştur. Ancak, doğalgazdan elde edilen yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları, hidrojen karışımı kullanıldığında daha düşük olmuştur. Diğer taraftan, hidrojen karışımının  $NO_x$  emisyon değerleri, saf doğalgazdan daha yüksek çıkmıştır. (Wallace vd., 1994)
- Larsen ve ekibi, hidrojen ilave edilmiş doğalgaz ile saf doğalgazın emisyon ve verim değerlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, belirli bir eşdeğerlik oranında doğalgaz kullanıldığında enerji tüketiminin azaldığını, toplam HC, CO ve  $CO_2$  emisyonlarının düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, doğalgazın motor verimliliğini artırdığı belirlenmiştir. (Larsen vd., 1997)

- Sierens ve ekibi, motor verimini artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla farklı oranlardaki doğalgaz ve hidrojen karışımlarını incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, doğalgaza hidrojen eklenmesiyle fakir yanma sınırlarında son derece düşük emisyon seviyelerine ulaşılmış ve emisyonun düşürülebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, düşük emisyon koşulları altında tüm yük oranlarında maksimum motor veriminin elde edildiği tespit edilmiştir. (Sierens vd., 2000)
- Akansu ve ekibi, içten yanmalı motorlarda doğalgaz-hidrojen karışımının kullanımını incelemiş ve hidrojen oranının artmasıyla HC, CO<sub>2</sub> ve CO emisyonlarının azaldığını belirlemiştir. Ancak, buna karşılık NO<sub>x</sub> emisyonlarının genel olarak hafif bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. (Akansu vd., 2004)
- Huang ve ekibi, çalışmalarında doğalgaz ve hidrojen karışımlarının motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel ve simülasyonlara dayalı olarak incelemiştir. Elde ettikleri bulgulara göre, hidrojen oranı %20'nin üzerine çıktığında, motor çıkış gücü ve ısı veriminde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, doğalgaza hidrojen eklenmesiyle HC ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma sağlanırken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında bir artış tespit edilmiştir. Çalışmalarında, fakir karışimli doğalgaz-hidrojen kullanımıyla daha yüksek ısı verim ve daha düşük emisyonların elde edildiğini bulmuşlardır. (Huang vd., 2006)
- Bysveen ve ekibi, yaptığı çalışmada, yakıt olarak saf doğalgaz ile doğalgaza %29 oranında hidrojen eklenmiş Sıkıştırılmış Doğalgaz ve Hidrojen Karışımı (HCNG) karışımı kullanmıştır. Sonuçlara göre, hidrojen ilavesi ile yanmamış hidrokarbon emisyonları azalmıştır ve dolayısıyla daha çevreci bir sistem oluşmuştur. Alev hızı ve sıcaklığındaki yükselme nedeniyle, HCNG ile elde edilen NO<sub>x</sub> emisyonları, doğalgaz kullanımına göre %14 daha fazla olmuştur. Bununla birlikte, aynı hava fazlalık katsayısında HCNG ile elde edilen yanma veriminin, doğalgazdan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. (Bysveen vd., 2007)
- Huang ve ekibi, doğalgaz-hidrojen karışımlarının yanma karakteristiklerini farklı ateşleme zamanlarında ve fakir karışım koşullarında incelemiştir. Ateşleme zamanının ilerlemesiyle birlikte HC emisyonlarında azalma görülürken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış tespit edilmiştir. Öte yandan, CO emisyonu neredeyse değişmemiştir. Ayrıca, hidrojen oranının artmasıyla belirli bir ateşleme avansında ortalama efektif basınç ve ısı verimin yükseldiği, ancak yanma süresinin kısaldığı belirlenmiştir. (Huang vd., 2007)

- Öztürk ve ekibi, doğalgaz ile hidrojen karışımının emisyonlar ve yanma verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüştür. Deneysel sonuçlarına göre, hidrojen oranının artmasıyla yanma verimliliği artmıştır. Karışımda hidrojen miktarının yükselmesiyle CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları azalırken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında ise değişiklikler gözlemlenmiştir. (Ozturk vd., 2023)

### **Doğalgaz-Hidrojen-Dizel Yakıtlarının RCCI Motorlarında Kullanımı**

Doğalgaz, hidrojen ve dizel yakıtlarının RCCI motorlarda üçlü kombinasyonu, motor verimliliğini ve performansını artırma ve aynı zamanda emisyonları azaltma konusunda önemli bir sinerji yaratmaktadır. Hidrojen ve doğalgazın birlikte kullanılması, dizelin yüksek reaktivitesini dengelemekte ve yanma sürecini daha homojen hale getirmektedir.

- Nanthagopal ve ekibi, HCNG'nin motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırma, HCNG'nin daha temiz bir yakıt olabileceğini, ancak modern emisyon kontrol teknolojileriyle avantajlarının sınırlı olabileceğini göstermiştir. Ayrıca, altyapı geliştirme ve maliyet gibi zorluklar ele alınmıştır. (Nanthagopal vd., 2011)
- Mohammed ve ekibi, yakıt enjeksiyon zamanlamasının, az miktarda hidrojenle karıştırılmış CNG ile çalışan dizel motorundaki performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. (Mohammed vd., 2011)
- Arat ve ekibi, HNG-dizel Üçlü yakıt modunda çalışmalar yaptılar. Doğalgazın hidrojenle harmanlanması sonucu; gelişmiş yakıt verimliliği, azaltılmış CO, HC ve CO<sub>2</sub> emisyonları ve zayıf yanma elde edilmiştir. Bu üçlü yanmada, NO<sub>x</sub> emisyonlarında fazla bir değişiklik görülmezken daha kısa yanma süreleri elde edilmiştir. (Arat vd., 2013)
- Zhao ve ekibi, Araştırmalarında sıkıştırılmış doğalgaz ve hidrojen kullanan bir motorun sıkıştırma oranının yanma ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Daha yüksek sıkıştırma oranının, toplam hidrokarbon ve Azot Oksit emisyonlarını artırdığı görülmüştür. (Zhao vd., 2013)
- Ajmeri ve ekibi, HCNG'nin dizel motorlarda kullanımıyla oluşacak, performans ve emisyon değişimlerini incelemiştir. HCNG'nin; motorun çalışma koşullarına ve yakıt karışım oranına bağlı olarak HC emisyonlarını azaltabileceği, ancak NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırdığı görülmüştür. (Ajmeri vd., 2020)

- Moradi ve ekibi, Doğalgaz/Dizel yakıtlı bir RCCI motoruna hidrojen eklenmesinin yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, karışıma hidrojen ilave edilmesinin, doğalgazın düşük alev hızını iyileştirdiği ve yanma verimini artırdığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, hidrojen oranının artmasıyla birlikte yanmamış hidrokarbon (UHC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını, ancak silindir içi sıcaklıkların yükselmesi nedeniyle NOx emisyonlarında bir miktar artış meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca hidrojen ilavesi, motorun fren ısı verimini (BTE) iyileştirirken, maksimum silindir basıncını ise artırmıştır. (Moradi vd., 2020)

RCCI motorlarında doğalgaz, hidrojen ve dizel yakıtlarının eş zamanlı kullanımı, verimliliği artırma ve emisyonları azaltma potansiyeli göstermiştir. Dolayısıyla potansiyeli büyüktür (Reitz ve Duraisamy, 2015). Ancak, sistemin sunduğu avantajlara rağmen, ticarileşme sürecinde aşılması gereken bazı zorluklar bulunmaktadır. Yanma kontrolü, iki farklı yakıtın ve reaksiyon kinetiğinin yönetilmesini gerektirdiği için oldukça karmaşıktır. Özellikle çok silindirli motorlarda, her silindirin hava, yakıt ve sıcaklık koşullarının birebir dengelenmesi hassas bir kontrol sistemi gerektirir (Li vd., 2014). Düşük yanma sıcaklıkları nedeniyle azot oksit emisyonları azalırken, tam yanmanın sağlanamadığı bölgelerde karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonları artabilir; bu durumun katalitik konvertörlerle kontrol altına alınması gerekir (Kokjohn vd., 2011).

Ayrıca, çok yüksek motor yüklerinde vuruş riski ve çok düşük yüklerde yanma kararsızlığı yaşanabilir. Bu dar çalışma aralığı sorununu aşmak için "mod değiştirme tekniği" geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda motor, kısmi yüklerde reaktivite kontrollü moda çalışırken, yüksek güç gerektiren durumlarda geleneksel dizel yanması moduna geçiş yapar (Hanson vd., 2010). Yüksek yüklerde basınç artış hızını sınırlamak ve emisyonları düşürmek için egzoz gazı geri devri sistemine ihtiyaç duyulsa da, bu sistemin motor verimi üzerindeki olumsuz etkilerinin de optimize edilmesi gerekmektedir (Splitter vd., 2010). Sonuç olarak Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme, yüksek verim ve düşük emisyon potansiyeli ile geleceğin temiz motor teknolojileri arasında güçlü bir adaydır.

### **Mevcut Boşluklar**

- Farklı yakıtların enjeksiyon zamanlaması ve stratejilerinin yanma özellikleri ve emisyonlar üzerindeki etkileri yeterince anlaşılmamıştır. Bu konudaki araştırmalar, verimliliğinin artırılması ve emisyonların daha azaltılması için kritik öneme sahiptir.

- Doğalgaz ve hidrojen gibi düşük reaktiviteli yakıtların homojen bir şekilde karışması ve bu karışımın dizel yakıtı ile uyumu tam olarak incelenmemiştir. Yakıt-hava karışımının homojenliğini artıracak teknolojilerin geliştirilmesi, RCCI motorlarında daha verimli ve temiz bir yanma sağlayabilir.
- Farklı yakıt kombinasyonlarının ve karışım oranlarının motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkileri tam olarak araştırılmamıştır. Doğalgaz, hidrojen ve dizel yakıtlarının en uygun karışım oranlarının belirlenmesi, RCCI motorlarının performansını ve çevresel faydalarını maksimize edebilir.
- RCCI motorlarının uzun vadeli performansı ve dayanıklılığı üzerine yeterli veri bulunmamaktadır. Uzun süreli testler ve dayanıklılık çalışmaları, RCCI motorlarının pratik uygulamadaki güvenilirliğini ve ekonomik verimliliğini değerlendirmek için gereklidir.
- Hidrojen ve doğalgazın güvenli ve verimli bir şekilde depolanması ve dağıtılması konusunda teknik zorluklar devam etmektedir. Yeni depolama ve dağıtım teknolojilerinin geliştirilmesi, RCCI motorlarının daha geniş bir ölçekte uygulanabilirliğini artırabilir.
- RCCI motorlarında emisyon kontrol teknolojilerinin entegrasyonu ve optimizasyonu konusunda daha fazla araştırma gereklidir. İleri emisyon kontrol sistemleri ve katalitik konvertörlerin RCCI motorları ile uyumu üzerine çalışmalar, zararlı emisyonları daha da azaltabilir.

### **Araştırma Olanakları**

- Gelişmiş sayısal simülasyon ve modelleme teknikleri, RCCI motorlarının yanma süreçlerini daha derinlemesine anlamamıza ve optimize etmemize olanak tanır. Bu teknikler, çeşitli yakıt karışımları ve enjeksiyon stratejilerinin motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini hassas bir şekilde incelemek için kullanılabilir.
- RCCI motorlarında alternatif yakıtlar ve biyoyakıtlar kullanma potansiyeli, sürdürülebilir enerji çözümleri arayışında önemli fırsatlar sunmaktadır. Günümüzde içten yanmalı motor araştırmaları, katılaştan emisyon normlarını karşılamak ve ısı verimi artırmak amacıyla gelişmiş yanma stratejilerine odaklanmıştır (Srivastava vd., 2018)
- RCCI motorlarını hibrit ve elektrikli araçlar gibi diğer enerji üretim sistemleriyle

entegre etme olanakları, sistem verimliliğini artırma ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Bu senaryoların araştırılması, geleceğin sürdürülebilir ulaşım çözümlerini şekillendirmemize yardımcı olabilir.

- İleri malzeme bilimi ve yenilikçi motor tasarımı yaklaşımları, RCCI motorlarının performans sınırlarını zorlamamıza olanak tanır. Motor bileşenlerinin yüksek sıcaklık ve basınçlara dayanıklılığını artıran yeni malzemeler ve tasarımlar, motor verimliliğini önemli ölçüde artırabilir.
- RCCI motorlarının çevresel ve ekonomik etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek, bu teknolojinin yaygınlaşması için gerekli politikaları ve teşvikleri belirlememize yardımcı olur. Bu çalışmalar, RCCI motorlarının sera gazı emisyonlarını azaltma ve yakıt tasarrufu sağlama potansiyelini ortaya çıkaracaktır.
- RCCI motorlarını gerçek dünya koşullarında test eden pilot projeler ve saha çalışmaları, bu teknolojinin ticarileştirilmesi için kritik öneme sahiptir.

## 4.MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme (RCCI) stratejisinin incelenmesi amacıyla yürütülen çalışmanın deneysel ve sayısal altyapısı detaylandırılmıştır.

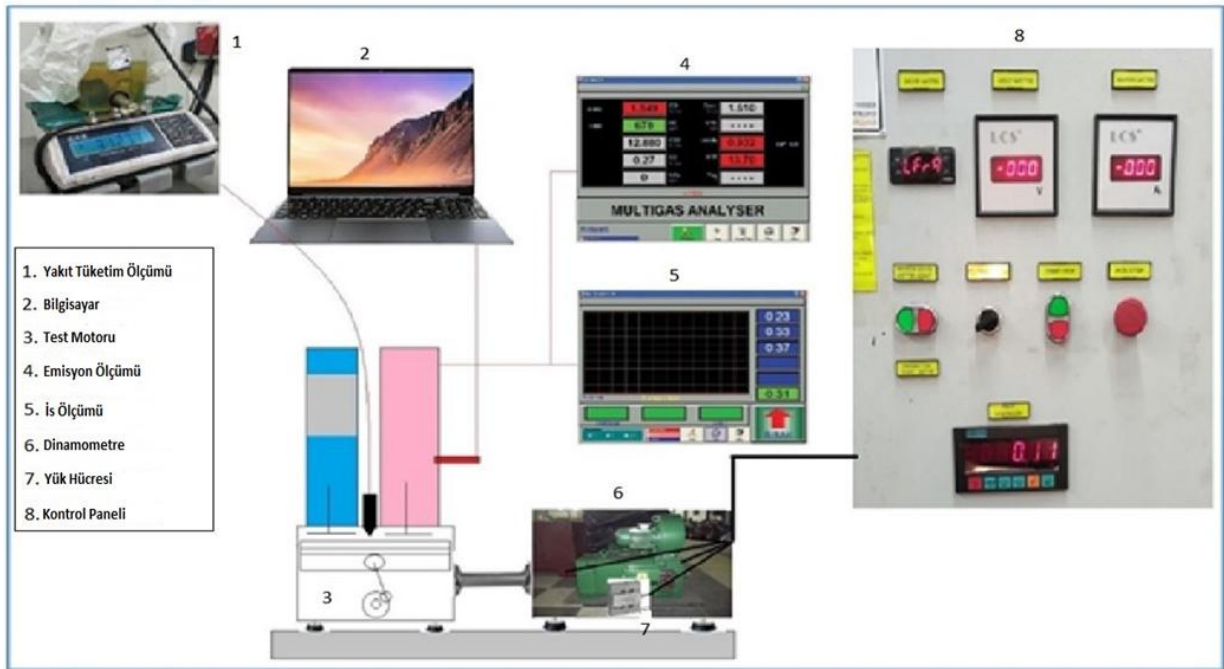
### 4.1.Deneysel Motor Test Sistemi

Bu çalışmanın deneysel kısmı tek silindirli, hava soğutmalı, 4 zamanlı direkt enjeksiyonlu dizel motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Motor çevriminin kapalı olduğu aralık, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımında modellenmiş ve simüle edilmiştir; bu, emme valfinin kapatıldığı 40° AÖNS ile egzoz valfinin açıldığı 40° AÖNÖ arasındaki süreci kapsamaktadır. Motor özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Simülasyonda kullanılan motor özellikleri

<b>Motor Adı</b>	Lombardini 3 LD 510
<b>Strok hacmi (cm<sup>3</sup>)</b>	510
<b>Çap x Strok (mm x mm)</b>	85 x 90
<b>Biyel uzunluğu (mm)</b>	144.5
<b>Sıkıştırma oranı</b>	17.5:1
<b>Motor gücü [HP]</b>	12
<b>Maksimum tork [Nm @1800 rpm]</b>	32.85
<b>Emme valfi açıklığı</b>	16° ÜÖNÖ
<b>Emme valfinin kapatılması</b>	40° AÖNS
<b>Egzoz valfi açıklığı</b>	40° AÖNÖ
<b>Egzoz valfinin kapatılması</b>	16° ÜÖNS

Deneyel test sisteminin şeması aşağıdaki Şekil 4.1'de verilmiştir. Motor testleri sabit 1800 devir/dakikada ve yüksek motor torkunda gerçekleştirilmiştir. HAD analiz çalışmaları için tüm sonuçlar ise 23,1 Nm'de gerçekleştirilen HAD simülasyonlarından alınmıştır. Deneyel test sistemi, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirliği sağlamak için modern ve hassas ölçüm cihazlarıyla donatılmıştır. Testler içten yanmalı bir dizel motor üzerinde gerçekleştirildi. Motor, standart dizel yakıtın yanı sıra hidrojen ve doğal gaz enjeksiyonuyla da çalışabilir. Hidrojen veya doğal gaz, motorun emme manifolduna kontrollü bir şekilde enjekte edilerek çift yakıtlı çalışma sağlandı. Motor performansı ve emisyon ölçümleri için bir dizi sensör ve analizör kullanıldı. Motor torku ve hızı dinamometre ile ölçülürken, emisyon analizleri egzoz gazı analizörleri ile yapıldı.



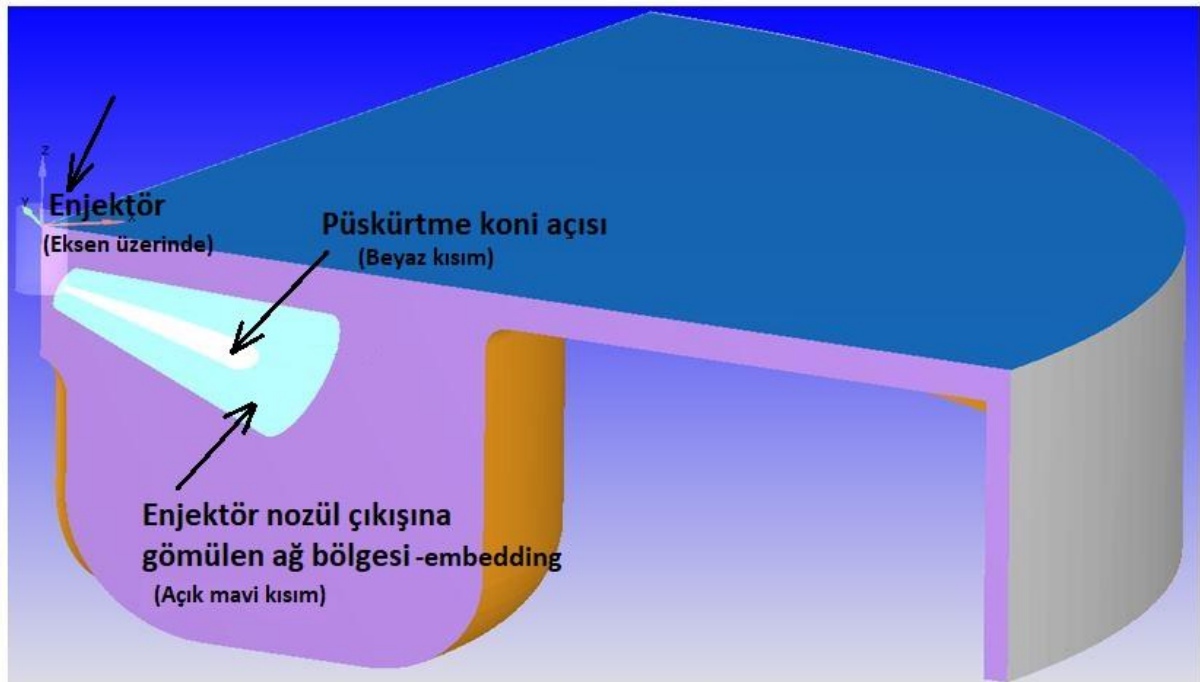
Şekil 4.1. Deneyel test sisteminin şematik gösterimi

#### 4.2.Sayısal Analizler için HAD Modelinin Hazırlanması

Bu çalışmada Converge 3.0 yazılımında HAD modelleme ve yanma analizleri yapılmıştır. Motorda kullanılan enjektörün delik sayısı 4 olduğundan  $\frac{1}{4}$ , yani  $90^\circ$  silindir hesap hacmi Şekil 4.2'deki gibi oluşturulmuştur. Silindir içi ağ yapısının sonlu hacimler yöntemiyle oluşturulması için Converge yazılımında temel hücre büyüklüğü 2,8 mm olarak seçilmiş ve silindir içi hız ve sıcaklığın değişimine bağlı olarak hız gradyanlarına 3. dereceden, sıcaklık gradyanlarına ise 2. dereceden AMR (adaptif ağ iyileştirme)

uygulanmıştır. AMR ayarlarında girilen seviyelere bağlı olarak komşu hücreler arasında hız gradyanı 2 m/s'yi, sıcaklık gradyanları ise 5 Kelvin'i aştığında, yakıt püskürtmesi, yanma reaksiyonları ve emisyon oluşumu süreçlerinin gerçekleştiği kısımlarda hesaplamanın doğruluk seviyesini artırmak için hücre boyutları hız gradyanları sınır değeri aştığında  $2,8/23=0,35$  mm'ye, sıcaklık gradyanlarına bağlı olarak da  $2,8/22=0,7$  mm'ye kadar azaltılmıştır. AMR'ye ek olarak Şekil 4.2'de görüldüğü gibi enjektör nozül deliği etrafına püskürtme başlangıcından sonuna kadar 3 seviyeli ağ gömme (embedding) uygulandı. Şekil 4.2, yazılımda kullanılan hesaplama hacmini, dizel yakıt püskürtmesini ve kullanılan sınır şartlarını farklı renklerde ve 3 boyutta göstermektedir. Deney motorunda kullanılan dizel enjektör özellikleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

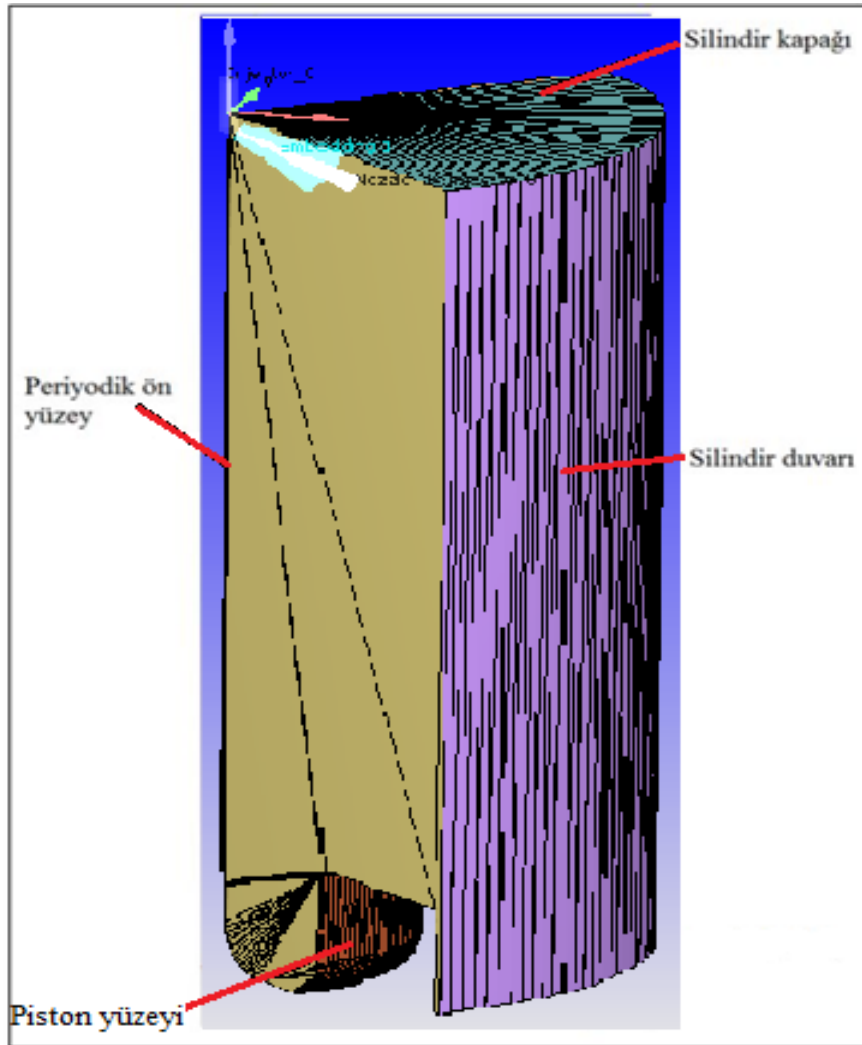
$$\text{AMR hücre boyutu} = \text{Temel hücre boyutu} / (2^{\text{küçültme seviyesi}}) \quad (\text{F.1})$$



Şekil 4.2. Silindir hesaplama hacmindeki çeşitli kısımlar

İçten yanmalı motorlarda silindir içi akış ve yanma süreçlerini analiz ederken, sıkıştırma evresinde silindirin hacmi azalırken, yakıt-hava dolgusunun hem basıncı hem de sıcaklığı yükselir. Bu artış, silindir içindeki karışımın tutuşma için gerekli olan aktivasyon enerjisine ulaşmasını sağlayarak tutuşma ve yanma sürecini başlatır. Bu çalışmada, yanma

olayı kimyasal bir reaksiyon mekanizması temel alınarak modellenmiş olup, mekanizma ile ilgili detaylı açıklamalar benzer bir doktora tezinde bulunabilir (Altinkurt, 2023). Yakıtın önemli kısmı yanana kadar yanma reaksiyonları devam ederken, pistonun genişleme zamanında alt ölü nokta'ya (AÖN) doğru ilerlemesiyle birlikte silindir içi sıcaklık ve basınç düşer ve belirli bir krank açısı geçtikten sonra yanma tepkimeleri yavaşlayarak durur. Akış ve yanma analizleri için bu bağlamda uygun sayısal çözüm metotları tercih edilmiştir. HAD analizlerinde çözüme başlayabilmek için hesaplama hacmini çevreleyen yüzeyler üzerinde (piston, silindir duvarı ve silindir kapağı) sınır şartlarının verilmesi gerekir. Sınır şartlarının verildiği bu yüzeyler Şekil 4.3'te verildiği gibi tanımlanmış ve bu yüzeylerdeki sıcaklık değerleri, Kelvin (K) cinsinden girilmiştir. Bu doğrultuda sınır yüzey sıcaklıkları; motor yüküne uygun şekilde silindir duvarı için 475 K, piston için 585 K ve silindir kapağı için 575 K olarak girilmiştir.



Şekil 4.3. Simülasyonda kullanılan silindir hacmi ve sınır koşulları

Sınır koşulları, yanma odasında bulunan hava-yakıt karışımının yüzeylerle ısı alışverişinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu koşullar, motorun termal performansını doğru bir şekilde simüle etmek için gerekli sıcaklık değerlerini sağlar. Ancak, motor test sistemlerinde bu sıcaklıkların doğrudan ölçülmesi, sensörler ve diğer ölçüm ekipmanları kullanılarak yapılması oldukça maliyetlidir. Bu nedenle, benzer motorlar ve çalışma koşullarında daha önce elde edilmiş ve önerilen sıcaklık değerleri, daha hızlı sonuca ulaşmak için genellikle kullanılır. Bu yaklaşım, yüksek maliyetleri ve teknik zorlukları ortadan kaldırırken, güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar (Pulkrabek, 2004)

HAD simülasyonlarında Navier-Stokes denklemlerine her bir ağ hücresinde iteratif olarak çözebilmek için başlangıç koşullarını girmek gerekmektedir. Bu kapsamda, Converge yazılımında silindir içindeki hava-yakıt karışımına ait sıcaklık, basınç ve karışımdaki türlerin kütle oranları tanımlanmıştır. Ölçümlerdeki küçük farklar ve sensörlerin ölçüm hassasiyeti dikkate alınarak, silindir gaz basıncı basınç değeri 1,027 bar, silindir içi sıcaklık değeri  $373 \pm 2$  K olarak belirlenmiştir. Kimyasal reaksiyonları çözmek ve sonucunda açığa çıkan enerjiyi de hesaplayabilmek için silindir dolgusundaki farklı türlerin (bileşiklerin) kütle oranları, karışım içerisindeki bileşenlerin oranına uygun olarak hesaplanarak Şekil 4.4'te (%15 H<sub>2</sub>-%5 Doğal gaz şartı için) girilmiştir. Tüm analiz koşulları için başlangıç koşulları değerleri (sıcaklık, basınç, türbülans parametreleri ve kütle oranları) Şekil 4.4'te görülmektedir. Başlangıç koşulunda homojen karışım ve her yerinde aynı (uniform) koşullarda olduğu kabul edilmiş ve hız değerleri sıfır olarak girilmiştir. Başlangıç koşullarında verilmesi gereken türbülans kinetik enerji (TKE) ve türbülans harcanım oranı niceliklerinin deneysel sistemlerde ölçülmesi oldukça zor olduğundan test yapılan şartlara uygun, literatürden de bakılarak değerler girilmiştir. TKE  $62 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , harcanım oranı da 17183  $\text{m}^2/\text{s}^3$  olarak girilmiştir. Converge 3.0 yazılımında kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerini çözüm aşamaları, ayrıca kullanılan kimyasal mekanizma ve mekanizma çözücü modülü SAGE ile ilgili ayrıntılı açıklamalar ilgili doktora tez çalışmasında (Altınkurt, 2023) bulunabilir.

HAD çalışması sırasında dizel yakıtı temsil etmek üzere n-heptan seçilmiştir. Doğal gaz için ise içerisinde büyük oranda bulunan metan (CH<sub>4</sub>) seçilmiştir. HAD simülasyonlarında hidrojen ve doğal gazın yanma reaksiyonlarını çözmek için Converge içinde verilen 76 bileşik ve 464 tepkime içeren n-heptan ve doğal gaz kimyasal mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma oluşturulurken, n-heptan ve doğal gaz yanması için geliştirilmiş iki ayrı mekanizma birleştirilerek çift yakıtlı yanma koşulları için ideal şartlarda iyileştirilmiştir (Rahimi vd., 2010)

Incyylinder region

Stream ID: 0  Solid

Velocity:    m/s  From boundary

Temperature:    From boundary

Pressure:    From boundary

Value  Viscosity ratio/Length scale

Turbulent Kinetic Energy:  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>  From boundary

Turbulent Dissipation:  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>  From boundary

Species    From boundary

Species Name	Mass Fraction	Sum = 1.00000
CH4	0.0018494255	
H2	0.002179333	
N2	0.7639099	
O2	0.2320613	

Şekil 4.4. HAD simülasyonları için kullanılan koşullar ve değerler

Hidrojen&Doğalgaz-Dizel RCCI yanma simülasyonları için H<sub>2</sub> ve doğal gaz kütle oranı toplam enerji girdisine göre hesaplandı. Hidrojen ve doğal gaz toplam enerji giriş oranı %20 (kalan %80'i dizel yakıt) olarak belirlendi. Analiz şartına göre iki yakıt (hidrojen ve doğal gaz) arasındaki oran %5-15, %10-10 ve %15-5 olarak değiştirildi. Bu oranlara ek olarak yakıtların tek başına manifolda püskürtmesini analiz etmek için iki yakıtın da %20 oranında seçildiği 2 adet analiz ve 1 adet konvansiyonel dizel yanma koşulu da dahil olmak üzere toplam 6 farklı koşulda analizler gerçekleştirilmiştir.

Dizel yakıtının püskürtmesi için kullanılan enjektör özellikleri üretici firmadan alınmış ve Tablo 4.2'deki gibi girilmiştir. Yakıt parçalanma ve atomizasyon süreçleri için birincil ve ikincil parçalanma mekanizmaları sırasıyla KH ve RT modelleri ile modellenmiştir. KH ve RT modelleri için yakıt parçalanma süresi sabitleri sırasıyla 7 ve 1 olarak seçilmiştir. Enjektör nozülü için boşaltma katsayısı 0,7 olarak seçildi. Yakıt damlacıklarının buharlaşmasını simüle etmek için Frossling modeli kullanıldı. Türbülans modeli olarak içten yanmalı motor simülasyonları için en uygun RANS modellerinden biri olan RNG (Re-Normalizasyon Grubu)

k-ε modeli seçilmiştir. Kullanılan emisyon modellerine gelince; NO<sub>x</sub> emisyonları için Extended Zeldovich mekanizması, is emisyonları için ise Hiroyasu-NSC modeli kullanılmıştır. İçten yanmalı motorlarda, özellikle dizel ve gaz yakıtlı motorların yüksek sıcaklıklı yanma bölgelerinde oluşan Azot Oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarının temel kaynağı termal NO oluşumudur. Bu çalışmada gerçekleştirilen HAD analizlerinde, NO<sub>x</sub> emisyonlarının tahmini için literatürde en yaygın kabul gören ve Converge yazılımı tarafından da esas alınan Genişletilmiş Zeldovich Mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma, yüksek sıcaklık altında havadaki azotun (N<sub>2</sub>) oksijenle (O<sub>2</sub>) tepkimeye girerek NO oluşturmasını modellemektedir. Tüm analizler dört zamanlı motor çevriminin kapalı döngü aralığında, yani emme supabı kapanmasından egzoz supabı açılması aralığında koşturulmuştur.

Grafik olarak gösterilen; Silindir İçindeki Basınç (MPa), Ortalama Sıcaklık (K), HC (ppm), NO<sub>x</sub> (ppm), İs (kg). CO (%), CO<sub>2</sub> (%), Sprey Penetrasyonu (m), Türbülans Kinetik Enerji (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) ve profil görseli olarak gösterilen; Silindir İçi Hız (m/s), Sıcaklık (K), NO<sub>x</sub> (ppm), Türbülans Kinetik Enerji (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) analiz edilmiştir. Bu nicelikler püskürtme ve yanmanın başladığı ve sona erdiği aralığı kapsayacak şekilde krank açısına bağlı olarak verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Simülasyonlarda kullanılan dizel enjektör özellikleri

<b>Delik sayısı</b>	4
<b>Püskürtme Açısı</b>	126°
<b>Delik Çapı</b>	0.28 mm
<b>Enjeksiyonun Başlangıcı</b>	-15 °KA
<b>Yakıt Sıcaklığı</b>	330.15 °K

## 5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Analiz edilen yanma olayı ise krank açısına bağlı olarak, motorun çalışma prensibine göre 4 kritik evrede özetlenebilir.

- **1.Evre: Enjeksiyon Başlangıcı ve Fiziksel Karışım (-15° KA)**

Yanma olaylarının tetiklendiği ilk nokta -15 derece civarı krank açısıdır. Dizel Enjeksiyon Başlangıcı bu noktadadır. Tam bu anda Sprey Penetrasyonu grafiğinde (Şekil 5.8) sıfırdan yukarı doğru ani bir hareket başlar. Aynı anda Türbülans Kinetik Enerjisi grafiğinde (Şekil 5.9) gördüğümüz ilk sıçrama gerçekleşir. Çünkü yüksek basınçlı yakıt jeti, durgun havayı yırtarak içeri girer ve fiziksel karışımı başlatır.

- **2. Evre: Ateşleme Gecikmesi ve Hazırlık (-15° ile 0° Arası)**

Enjeksiyonun başladığı -15 dereceden, pistonun en tepeye çıktığı 0 dereceye kadar geçen süre 'Ateşleme Gecikmesi' süresidir. Bu aralıkta Basınç (Şekil 5.1) ve Sıcaklık (Şekil 5.2) sadece pistonun sıkıştırmasıyla mekanik olarak artar, henüz kimyasal bir patlama yoktur. Yakıt buharlaşır ve havayla homojen bir karışım oluşturmaya çalışır. Hidrojen eklenen senaryolarda bu hazırlık evresinin daha reaktif geçtiği görülür.

- **3. Evre: Yanma Patlaması ve Pik Değerler (0° ile 10° Arası)**

Piston Üst Ölü Noktayı geçer geçmez, hazırlanan karışım aniden tutuşur. Buna 'Ön Karışımli Yanma Fazı' denir. Grafiklerde görüldüğü üzere, 0 ile 10 derece arasında eğriler dimdik yukarı çıkar ve maksimum değerlerine ulaşır. Özellikle %20 Hidrojen senaryosunda bu artış çok daha serttir. Sıcaklığın pik yaptığı bu 5-10 derece aralığında, NO<sub>x</sub> emisyonu (Şekil 5.4) aniden oluşur ve grafikteki maksimum seviyesine oturur. Yanma patlamasıyla birlikte gazlar genişlediği için Türbülans Enerjisi de bu aralıkta ikinci ve en büyük zirvesini yapar.

- **4. Evre: Genişleme, Oksidasyon ve Stabilizasyon (10° ile 40° ve Sonrası)**

10 dereceden sonra ana yanma biter ve 'Difüzyon Yanması' ile genişleme başlar. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi İs oluşumu 20 dereceye kadar artar, ancak 20 dereceden sonra piston aşağı inip oksijenle temas arttıkça 'Oksidasyon' başlar ve eğri aşağı döner veya sabitlenir. Yanma ürünleri olan Karbonmonoksit ve Karbondioksit (Şekil 5.6 ve 5.7), bu genişleme sürecinde nihai halini alır ve 30-40 dereceden sonra grafiklerde gördüğümüz gibi sabit bir çizgiye dönüşür. 40 dereceden sonra artık tepkimeler büyük oranda durur ve egzoz süreci başlar.

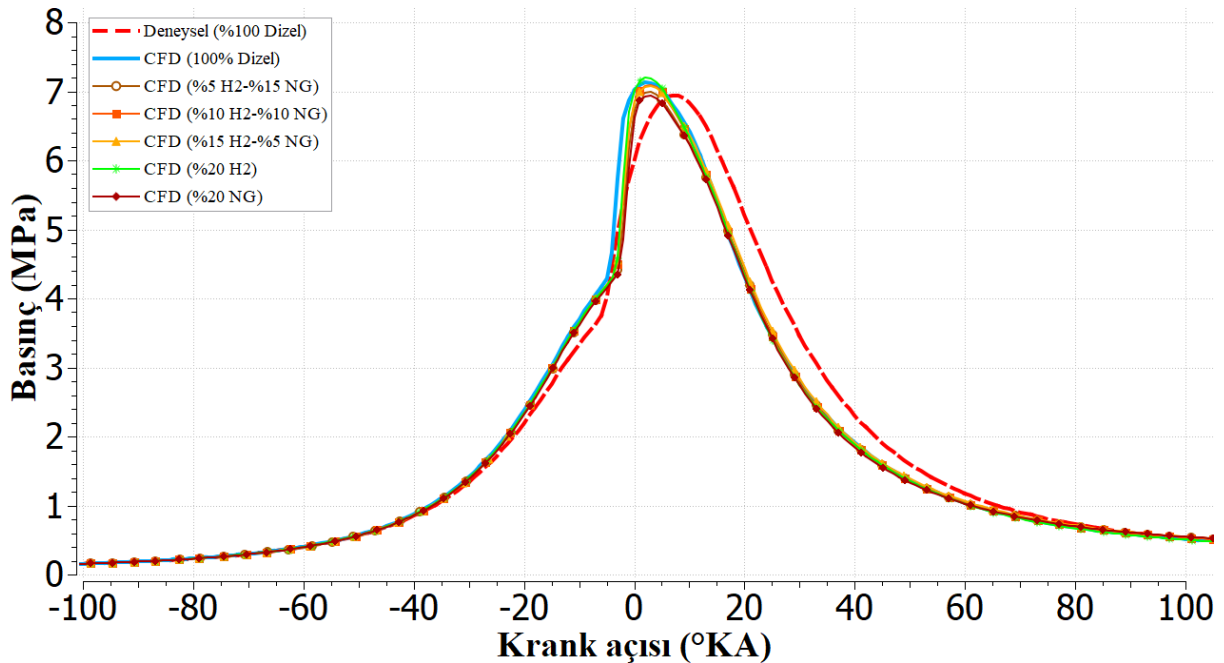
Şekil 5.1.'deki grafik sabit tork altında motor içindeki silindir basıncının krank açısına göre nasıl değiştiğini ve farklı yakıt karışımları kullanılarak yapılan simülasyonların sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Deneysel veriler ve HAD simülasyonları arasında yapılan karşılaştırma, dizel ve alternatif yakıtların motor içindeki basınç profilleri üzerindeki etkilerini incelemektedir.

Grafikte dikkat çeken ilk özellik, tüm yakıt senaryolarında sıkıştırma süreci sonunda hızlı bir basınç artışının başlaması ve bu artışın tepe noktaya ulaşmasıdır. Deneysel %100 dizel verileri (kırmızı kesikli çizgi), tepe basıncının krank açısına göre daha geç bir noktada ortaya çıktığını ve HAD simülasyonlarına göre biraz daha düşük bir maksimum basınç (~6.8 MPa) sağladığını göstermektedir. Bu fark, gerçek motor koşullarında yanma başlangıcının ve hızının simülasyona göre daha geç gerçekleşmesinin bir göstergesi olabilir. Hidrojen ve CNG (NG) ilavelerinin etkileri de grafik üzerinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu senaryolarda, basınç artış profili saf dizel senaryosuna oldukça yakın kalmaktadır. Basınç yükselme hızı, tepe basınç değeri (~7 MPa) ve yanma zamanlamasında çok sınırlı sapmalar gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük hidrojen ve CNG ilavelerinin motorun temel yanma karakteristiğini önemli ölçüde değiştirmediğini gösteriyor (Boretti, 2011). Yanma süreci çoğunlukla dizel yakıtın kontrolüne dayalı olarak devam etmektedir. Hidrojen oranı arttıkça, yanma daha erken başlamakta ve basınç artışı daha dik bir eğriyle gerçekleşmektedir. Bu, hidrojenin yüksek laminer yanma hızından kaynaklanmaktadır ve premixed yanma payını artırarak erken ateşlemeyi güçlendirmektedir. Bu etkiyle birlikte, basınç zirvesi krank açısı ekseninde biraz ileri kaymakta, ancak maksimum basınç değeri korunmaktadır. Doğalgaz (NG) 'nin varlığı, aşırı erken yanmayı engelleyerek bu artışı dengelemektedir. %20 hidrojen içeren senaryoda, basınç artışı hızlanmakta ve yanma tepe noktası krank açısına göre daha erken bir konumda görülmektedir. Bu, hidrojenin yanma hızını önemli ölçüde artırdığını ve dizel yakıtın difüzyon kontrollü yanma fazını daha çok premixed karaktere dönüştürdüğünü göstermektedir (Saravanan vd., 2020). Bu durum, yanmanın başlangıcını daha erken ve kontrolsüz bir faza itebilir. Öte yandan, %20 NG içeren senaryoda basınç artışı daha yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir. Tepe basınç değeri ve krank açısındaki konumu, dizel referansına oldukça yakın kalmaktadır. NG'nin metan bazlı yapısı, daha düşük laminer yanma hızına sahip olup, bu da yanmayı daha yavaş ve kontrollü hale getirir. Sonuç olarak, CNG katkısı yanma zamanlamasını ileri çekmez, aksine hafifçe geciktirebilir (Aslam vd., 2006).

Grafikteki silindir içi basınç eğrileri incelendiğinde, karışımdaki hidrojen oranının artmasıyla birlikte maksimum silindir basıncının yükseldiği ve yanma başlangıcının öne

çekildiği görülmektedir. Bu durum, literatürde (Kakae vd., 2014) tarafından yapılan çalışma ile tam bir uyum içindedir. Yazarlar, yakıt karışımındaki hidrojen ilavesinin yanma hızını (alev hızını) artırdığını, bunun da tutuşma gecikmesini kısaltarak tepe basıncını yükselttiğini rapor etmiştir. Hidrojenin yüksek yanma hızı, basınç eğrisini öne çekerek (avans etkisi) sıkıştırma işini bir miktar artırsa da, ÜÖN'dan hemen sonraki genişleme strokunda elde edilen yüksek basınç bu kaybı telafi ederek toplam işi artırmıştır.

Sonuç olarak, Hidrojen ilavesinin motor içindeki basınç profilini daha belirgin şekilde etkilediği ve katkı oranı arttıkça yanmayı hızlandırarak erken basınç artışı eğilimini güçlendirdiği görülmektedir. Hidrojen içeren karışımların tepe basıncı saf Dizele göre daha yüksektir. Bunun temel sebebi Hidrojenin yüksek laminer yanma hızıdır. Hidrojen, dizel yakıtına kıyasla çok daha hızlı alevlenir ve yanar. Bu durum, 'Ön Karışımli Yanma fazını güçlendirir. Yanma odasında biriken enerji, hidrojenin etkisiyle çok daha kısa sürede açığa çıkar (Verhelst, 2014). Bu da grafikteki eğrinin (yeşil çizgi) daha dik yükselmesine ve tepe basıncının daha yukarıda oluşmasına neden olur. Dizel ise difüzyon kontrollü yandığı için basınç artışı daha yayvan ve düşüktür. CNG katkısı ise yanmayı kontrol altında tutarak dizel yanma karakterine daha yakın bir basınç-zaman profili sağlamaktadır.



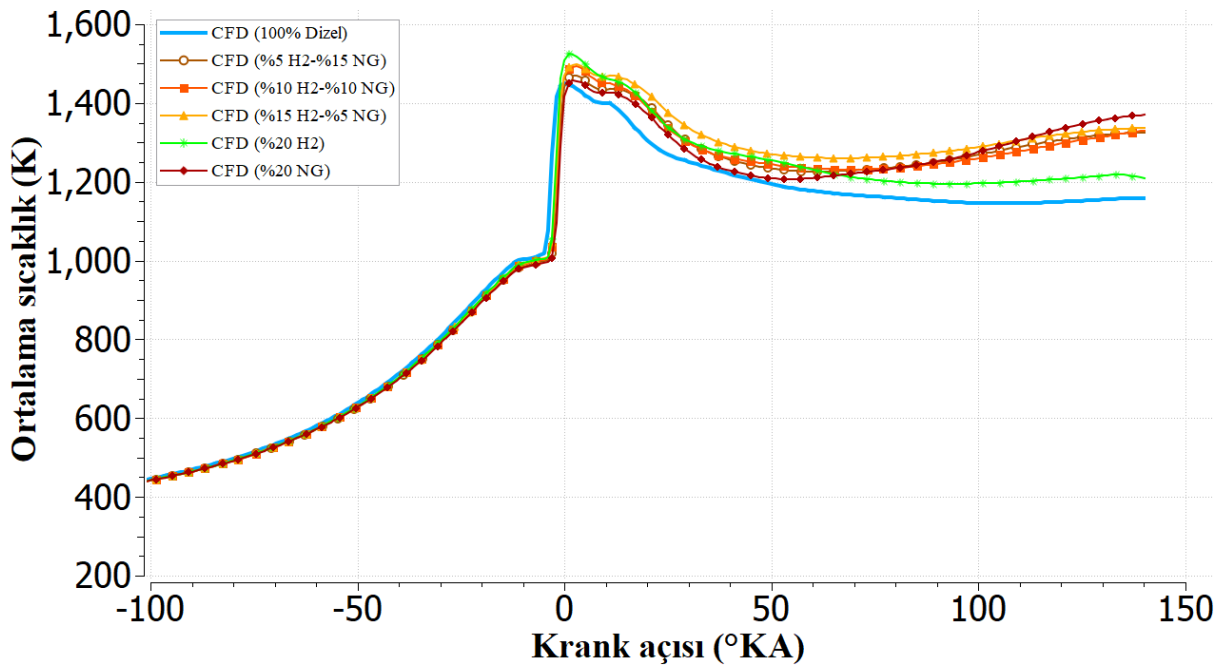
Şekil 5.1. Silindir basıncının krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.2.'deki grafik krank açısına bağlı olarak motor içindeki ortalama sıcaklık değişimini göstermektedir. Çeşitli yakıt karışımları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar, dizel ve farklı H<sub>2</sub> ile CNG (NG) karışımlarının etkilerini incelemektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile yapılmış ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılmıştır.

Grafikte dikkate değer bir ilk gözlem, tüm senaryoların, sıkıştırma süreci sırasında ortalama sıcaklıkta benzer bir artış gösterdiğiidir. Özellikle %100 dizel senaryosu, tüm yakıt karışımlarından önceki dönemde daha düşük sıcaklıklar sergilemekte, ancak sıkıştırma ve yanma başlangıcında hızlı bir sıcaklık artışı gözlemlenmektedir. Bu durum, dizel yakıtın daha yavaş yanma karakteristiğini ve yanma başlangıcındaki daha düşük sıcaklık seviyelerini yansıtmaktadır. Hidrojen ve CNG katkılarının etkileri ise daha belirgin bir şekilde görülmektedir. %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG karışımlarında, ortalama sıcaklıkların dizel senaryosuna göre daha yüksek ve daha yakın seviyelerde seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu, CNG'nin ve düşük seviyedeki hidrojenin, yanma sıcaklıklarını yükseltme etkisiyle açıklanabilir. Ancak, hidrojen oranı arttıkça, özellikle %15 H<sub>2</sub>-%5 NG ve %20 H<sub>2</sub> senaryolarında en yüksek sıcaklık artışı olduğu daha belirgin görülmektedir. Bu artış, hidrojenin yüksek laminer yanma hızından ve düşük ateşleme sıcaklığından kaynaklanmaktadır (Verhelst, 2014). Yüksek hidrojen oranları, yanma sürecinde daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olmaktadır. Öte yandan, %20 NG senaryosu, hidrojene göre daha düşük sıcaklıklar ile dizel referansına daha yakın bir profil sergilemektedir. CNG'nin düşük laminer yanma hızı, yanma sürecinin daha yavaş gerçekleşmesine ve bu nedenle daha düşük ortalama sıcaklıkların oluşmasına neden olmaktadır (Korakianitis vd., 2011).

Simülasyon sonuçlarına göre, yakıt karışımındaki hidrojen oranı arttıkça maksimum silindir içi sıcaklığın yükseldiği görülmektedir. Hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığına ve hızlı yanma karakteristiğine sahip olması, silindir içerisindeki ısı açığa çıkış oranını artırarak tepe sıcaklıklarının yükselmesine neden olmuştur. Bu durum, literatürde (Saravanan vd., 2008) tarafından yapılan çalışma ile tam bir uyum içindedir. Araştırmacılar, doğalgaz-dizel karışımlarına hidrojen ilave edilmesinin yanma sıcaklıklarını belirgin şekilde artırdığını rapor etmiştir. Yanma sonu sıcaklıklarının artması, CO ve HC gibi eksik yanma ürünlerinin oksitlenerek (yanarak) giderilmesi açısından olumlu bir mekanizma yaratmaktadır. Ancak, bu durumun trade-off sonucu olarak; 1800 K üzerindeki sıcaklıklarda aktifleşen termal NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmasını tetiklemesi ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırması olumsuz sonuç olarak ortaya çıkmaktadır (Heywood, 1988).

Sonuç olarak, hidrojen katkısının motor içindeki sıcaklık profiline belirgin bir etkisi olduğu ve hidrojen oranı arttıkça sıcaklıkların hızla yükseldiği gözlemlenmektedir. Hidrojenin yanma entalpisi yüksektir ve alev hızı fazladır. Bu özellik, yanma başlangıcında silindir içi sıcaklığın aniden yükselmesine sebep olur. Saf dizel senaryosunda (Mavi çizgi), yanma daha yavaş gerçekleştiği ve ısı açığa çıkışı zamana yayıldığı için anlık ortalama sıcaklıklar, hidrojenli karışımlara göre daha düşük kalmaktadır. Doğalgaz (Kırmızı çizgi), metan bazlı olduğu için hidrojene göre daha yavaş yanar, bu yüzden sıcaklığı hidrojene kıyasla biraz daha aşağı çeker ama yine de dizelin üzerindedir.



Şekil 5.2. Motordaki ortalama sıcaklığın krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.3.'teki grafik krank açısına bağlı olarak HC (ppm) emisyonlarının saf dizel ile farklı oranlarda CNG ve hidrojen katkılı yakıt karışımları için karşılaştırmalı sonuçlarını göstermektedir. Bu simülasyonlar CONVERGE HAD programında Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılarak yapılmıştır. Gaz yakıtlar, emme portundan enjeksiyonla motora verilmiş ve çift yakıt modunda çalıştırılmıştır.

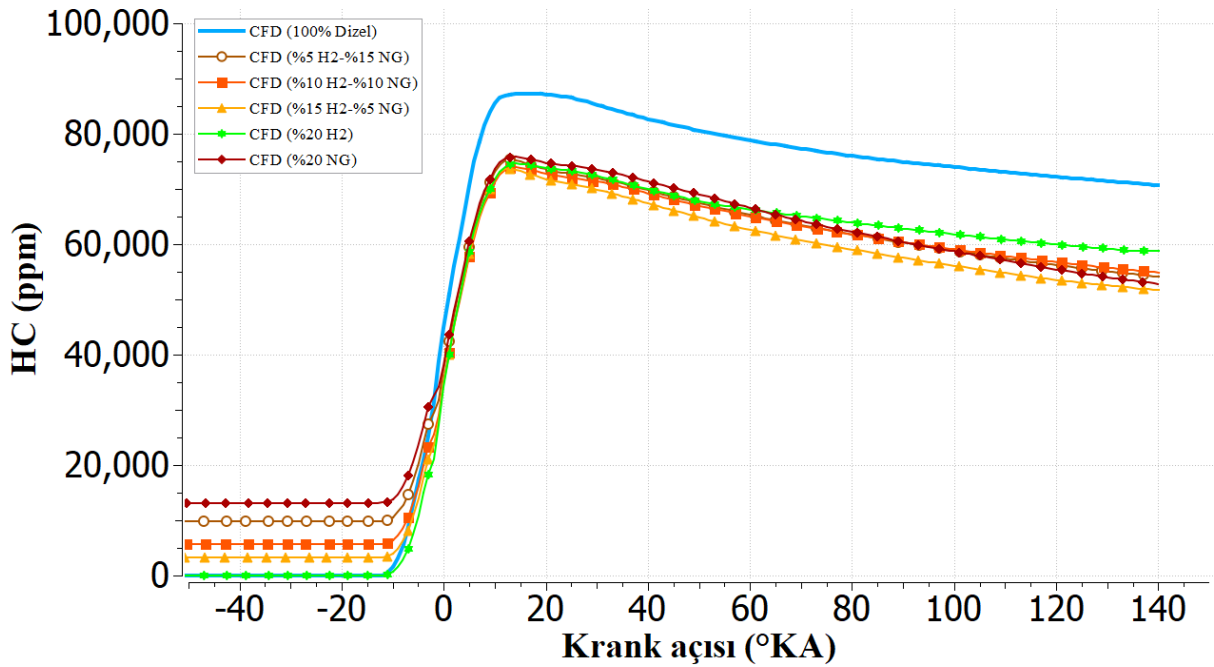
Grafikte ilk göze çarpan durum, saf dizel senaryosunun en yüksek HC emisyon değerlerine sahip olmasıdır. Tüm çift yakıtlı senaryolar ise belirgin biçimde daha düşük HC seviyeleri göstermektedir. Bunun temel nedeni, gaz yakıtların porttan enjeksiyonuyla sağlanan daha homojen karışım yapısının, dizelin difüzyon kontrollü yanma rejimine göre daha yüksek

bir yanma verimi sunmasıdır. Bu sayede silindir içinde yer yer oluşabilen zengin karışım bölgeleri azalmakta, duvar filmi ve lokal eksik yanma kaynaklı HC oluşumu sınırlandırılmaktadır. Ancak gaz fazındaki yakıtların porttan enjeksiyonuyla oluşan volumetrik verim kaybı, katkı oranları arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle CNG'nin yoğun gaz yapısı, silindire giren hava miktarını azaltarak oksijen seviyesini sınırlamakta ve yer yer tam yanmanın gerçekleşmediği (incomplete combustion) bölgeler oluşturabilmektedir. Bu durum, %20 NG senaryosunda HC emisyonlarının diğer gaz katkılı senaryolara kıyasla görece yüksek kalmasına neden olmaktadır. Yine de saf dizel senaryosundan daha düşük seviyelerde kalmayı başarmaktadır. Hidrojen katkısının etkileri daha farklı ve olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Hidrojen, yüksek laminer yanma hızı ve düşük ateşleme sıcaklığı gibi özellikleri sayesinde, volumetrik verim kaybının yol açtığı oksijen fakirliğine rağmen yanma verimliliğini yükseltebilmektedir. Ayrıca karbon içermediğinden doğrudan HC oluşumuna sebep olmaz. Bu nedenle, hidrojen katkılı karışımlarda HC emisyonlarının çok daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Özellikle %20 hidrojen içeren senaryoda HC seviyeleri, grafikteki en düşük değerlerden birini oluşturmaktadır. Hidrojen, silindir içindeki yanma sıcaklığını artırarak soğuk bölgelerdeki yanmamış yakıt miktarını azaltmakta ve HC emisyonlarını sınırlamaktadır. %15 H<sub>2</sub>-%5 NG gibi karma yakıt senaryoları da, HC emisyonlarını azaltmada başarılı olmuştur. Bu karışımlarda hidrojen, CNG'nin oluşturduğu soğuk ve yavaş yanma bölgelerini ısı ve reaktivite artışıyla destekleyerek, eksik yanmanın olumsuz etkilerini hafifletmiştir. Sonuçta karma gaz katkılı karışımlar, saf CNG'ye göre daha düşük HC seviyelerine ulaşmıştır.

Hidrojen ve doğal gaz ilavesi, yanma sürecinin iyileşmesine bağlı olarak yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır. Hidrojenin yüksek alev hızı ve geniş tutuşma sınırları sayesinde yanma daha homojen gerçekleşmekte ve silindir içerisinde yakıtın daha büyük bir kısmı etkin şekilde oksitlenmektedir. Hidrojen–doğal gaz karışımlarında hidrojen oranının artması, yanma verimini artırarak HC emisyonlarının dizel yakıtla çalışan duruma kıyasla daha düşük seviyelerde oluşmasına yol açmaktadır. Bu sonuçlar (Kakaee vd., 2014) tarafından yapılan sayısal analiz sonuçlarıyla örtüşmektedir. Yanma sonrası krank açısı ilerledikçe HC konsantrasyonunun azalması, yanma sürecinin tamamlanması ve artık gazlarda oksidasyonun devam etmesi ile ilişkilidir.

Sonuç olarak, porttan enjeksiyonlu çift yakıt kullanımında hidrojen ve CNG oranlarının doğru seçiminin HC emisyonlarını kontrol etmekte kritik bir öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Saf dizel senaryosunda (Mavi çizgi), yakıt sıvı olarak silindire püskürtülür.

Püskürtme sırasında bazı damlacıklar havayla tam karışmaz (lokal zengin bölgeler oluşur) veya silindir duvarlarına çarpıp sönmülenir. Bu bölgelerde oksijen yakıtı ulaşmadığı için yakıt yanmadan (HC olarak) egzozdan atılır (Heywood, 1988). Diğer senaryolarda, Doğalgaz ve Hidrojen emme manifoldundan gaz fazında veriliyor. Gaz, havayla sıvıya göre çok daha mükemmel karışır. İçeride yanmayan yakıt çok daha az kalır. Özellikle %20 H<sub>2</sub> (Yeşil çizgi) en düşüktür. Çünkü Hidrojen, yanma sıcaklığını artırarak, kıyıda köşede kalmış son yanmamış yakıt parçacıklarını bile yakıp yok eder (oksidasyonu artırır). Ayrıca hidrojenin kendisinde Karbon yoktur, bu da HC kaynağını azaltır (Saravanan vd., 2020). Özellikle hidrojen ilavesi, volumetrik verim kaybını kısmen dengeleyerek HC emisyonlarını belirgin biçimde azaltma potansiyeline sahiptir (Dimitriou ve Tsujimura, 2017).



Şekil 5.3. Hidrokarbon emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi

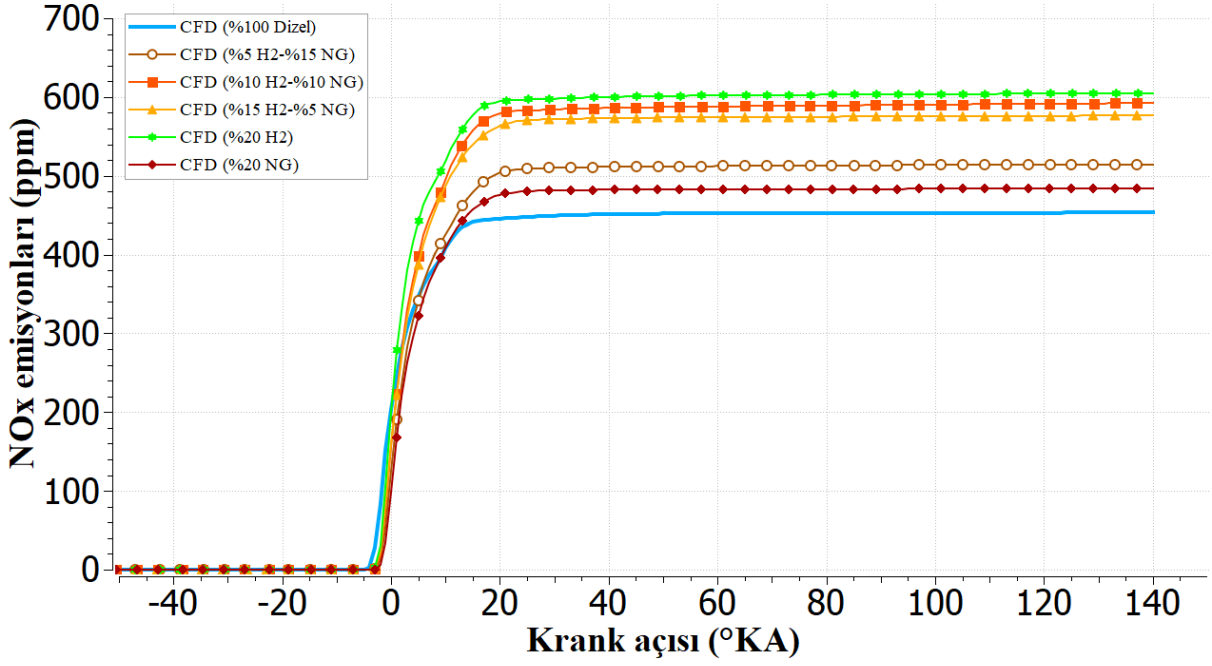
Şekil 5.4.'teki grafik krank açısına bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonlarının (ppm cinsinden) farklı yakıt karışımları için nasıl değiştiğini göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılarak H<sub>2</sub> ve CNG (NG) katkılarının etkisi incelenmiştir.

Grafikte dikkat çeken ilk özellik, %100 dizel senaryosunun en düşük NO<sub>x</sub> emisyonlarına sahip olduğudur. Bu, dizel yakıtının yüksek reaktivite ve oksijen tüketimi ile birlikte, yanma sürecinde daha fazla NO<sub>x</sub> üretmesine yol açmadığını ve belirli bir krank

açısında düşük  $\text{NO}_x$  emisyonlarını ortaya çıkardığını göstermektedir. Bu, dizel motorlarının daha kontrollü ve verimli çalışması sonucu gerçekleşen düşük emisyon seviyesinin bir göstergesidir. Hidrojen ve CNG katkılarının etkisi ise farklı sonuçlar doğurmuştur. Özellikle, %5  $\text{H}_2$ -%15 NG ve %10  $\text{H}_2$ -%10 NG gibi karışımlar, dizel yakıtına göre daha yüksek  $\text{NO}_x$  emisyonları üretmektedir. Bu durum, hidrojenin yüksek yanma hızından ve CNG'nin metan bazlı yapısından kaynaklanmaktadır. Bu karışımlar, daha fazla oksijenin yanma sürecine dahil olmasına ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasına neden olmakta, bu da  $\text{NO}_x$  emisyonlarını artırmaktadır. Özellikle %20  $\text{H}_2$  senaryosunda,  $\text{NO}_x$  emisyonları en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Bu artış, hidrojenin daha yüksek yanma hızına sahip olması ve oksijen açısından zengin ortam yaratma etkisiyle açıklanabilir. %20 NG senaryosunda ise,  $\text{NO}_x$  emisyonları saf dizelden sonraki en düşük seviyelerde kalmaktadır. CNG'nin daha düşük laminer yanma hızı ve daha kontrollü bir yanma süreci,  $\text{NO}_x$  oluşumunu sınırlamaktadır. Bu, CNG'nin dizel yakıtına benzer şekilde  $\text{NO}_x$  emisyonlarını etkili bir şekilde düşürdüğünü göstermektedir.

Simülasyon sonuçlarında, yakıt karışımına hidrojen ilave edildiğinde  $\text{NO}_x$  emisyonlarının artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, literatürde (Saravanan vd., 2008) tarafından yapılan çalışmayla tam bir uyum içindedir. Araştırmacılar, hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığının silindir içi yanma sıcaklıklarını yükselttiğini, bunun da termal  $\text{NO}_x$  (Zeldovich mekanizması) oluşumunu tetikleyerek  $\text{NO}_x$  emisyonlarını artırdığını rapor etmiştir. Burada motor performansını iyileştiren yüksek yanma hızı ve yüksek sıcaklık faktörleri, emisyon açısından ters bir etki yaratarak  $\text{NO}_x$  üretimini artırmıştır. Literatürdeki klasik  $\text{NO}_x$ -Verim çelişkisi (trade-off) burada da geçerli olup; yanma verimindeki artış aynı zamanda yükselen  $\text{NO}_x$  emisyonları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak,  $\text{NO}_x$  oluşumu Zeldovich Mekanizması ile açıklanır ve doğrudan sıcaklığa bağlıdır (Heywood, 1988). Hidrojen ilavesi silindir içi yanma sıcaklığını artırmaktadır. Yanma sıcaklığı arttığında (özellikle 1800K üzeri), havadaki Azot ( $\text{N}_2$ ) ve Oksijen ( $\text{O}_2$ ) reaksiyona girerek  $\text{NO}_x$  oluşturur. %20  $\text{H}_2$  senaryosu en yüksek sıcaklığa ulaştığı için en yüksek  $\text{NO}_x$ 'i üretmiştir. Dizel ise daha düşük sıcaklıkta yandığı için en düşük  $\text{NO}_x$  seviyesinde kalmıştır (Saravanan vd., 2020). Dolayısıyla %100 dizel, en düşük  $\text{NO}_x$  emisyonlarını üreten yakıt karışımıdır. Diğer yakıt karışımları, özellikle hidrojen katkısı ile birlikte  $\text{NO}_x$  emisyonlarını artırmaktadır. CNG ise bir miktar düşük  $\text{NO}_x$  emisyonları sağlamakta ve dizel yakıtına yakın bir profil çizmektedir (Korakianitis vd., 2011).



Şekil 5.4. Azot oksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi

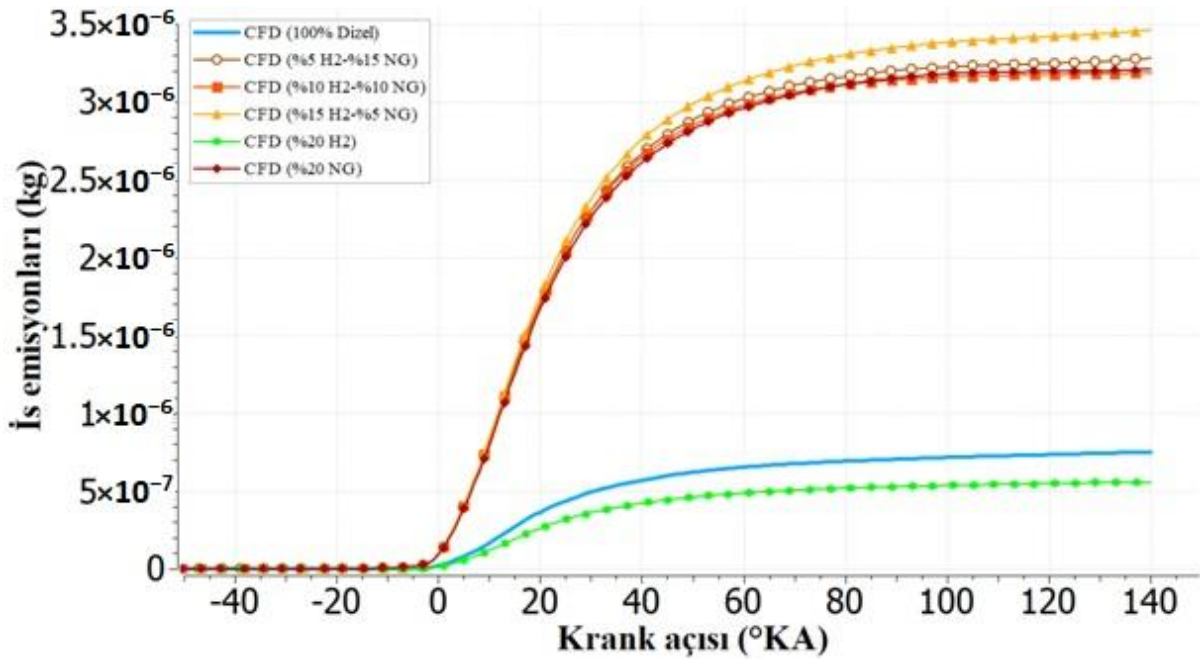
Şekil 5.5.'teki grafik krank açısına bağlı olarak is emisyonlarını (kg cinsinden) farklı yakıt karışımları için göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması ile çeşitli H<sub>2</sub> ve CNG (NG) katkılarının etkisi incelenmiştir. Çeşitli senaryolara göre kullanılan yakıtların etkileri analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir.

%20 H<sub>2</sub> senaryosu, is emisyonlarının en düşük seviyeye indiği yakıt karışımını göstermektedir. Bu, hidrojenin karbon içermemesi ve yüksek yanma hızından kaynaklanmaktadır. Hidrojen, motorun daha verimli çalışmasını sağlar ve bu da is emisyonlarının minimum seviyede tutulmasına yardımcı olur. %100 dizel senaryosu ise, is emisyonlarını hidrojene oranla daha yüksek seviyelere çıkaran yakıt karışımıdır. Dizel yakıtı, yüksek sıcaklıklar ve oksijen fazlalığı ile yanar, bu da motorun daha fazla is emisyonu üretmesine neden olur. Dizel, özellikle başlangıçta daha yüksek is emisyonları üretir. %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG gibi karışımlar, birbirlerine yakın sonuçlar vermiş ve is miktarları yüksek çıkmıştır. %15 H<sub>2</sub>-%5 NG senaryosunda is emisyonları en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bununla birlikte, hidrojenin yanma hızı ve sıcaklık etkisiyle, bazı emisyon artışları gözlemlenebilmektedir. %20 NG (CNG) katkısında ise yüksek is emisyonları görülmüştür.

Şekil incelendiğinde, yakıt karışımındaki hidrojen oranı arttıkça is (kurum) emisyonlarında belirgin bir düşüş kaydedildiği görülmektedir. Bu sonuç, literatürde (Saravanan vd., 2008) tarafından elde edilen deneysel bulgularla tam bir örtüşme

göstermektedir. Araştırmacılar, hidrojenin karbon içermeyen kimyasal yapısının kurum oluşumunu kaynağından engellediğini, ayrıca artan yanma sıcaklıklarının var olan kurumun oksidasyonunun yanıp yok olmasını kolaylaştırdığını rapor etmiştir. Silindir içi sıcaklıkların artması  $\text{NO}_x$ 'i artırırken , aynı sıcaklık artışı oluşan is parçacıklarının yanmasını sağlayarak is emisyonlarını düşürmüştür. Dolayısıyla dizel motorlar için bilinen  $\text{NO}_x$ -İs (trade-off) mekanizması net bir şekilde gözlemlenmiş ve is emisyonu lehine iyileşme sağlanmıştır.

Sonuç olarak, Doğalgaz ve Hidrojen karışımlarını (Sarı/Turuncu çizgiler) porttan verdiğimizde, bu gazlar silindirdeki temiz havanın yerini işgal eder. Bu da içeriye daha az oksijen girmesine neden olur (Korakianitis vd., 2011). İçerideki dizel yakıtı yanmak için yeterli oksijeni bulmakta zorlanır ve bu da is (kurum) oluşumunu artırır. Ancak saf %20 Hidrojen (Yeşil) durumunda, hidrojenin karbon içermemesi ve çok yüksek sıcaklık yaratması, oluşan isin de yanıp yok olmasını sağlar, bu yüzden en düşüktür. Belirli oranlarda birlikteliği ile motorun daha verimli çalışması ve is miktarının azalması sağlanabilir (Saravanan vd., 2020).



Şekil 5.5. İS emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi

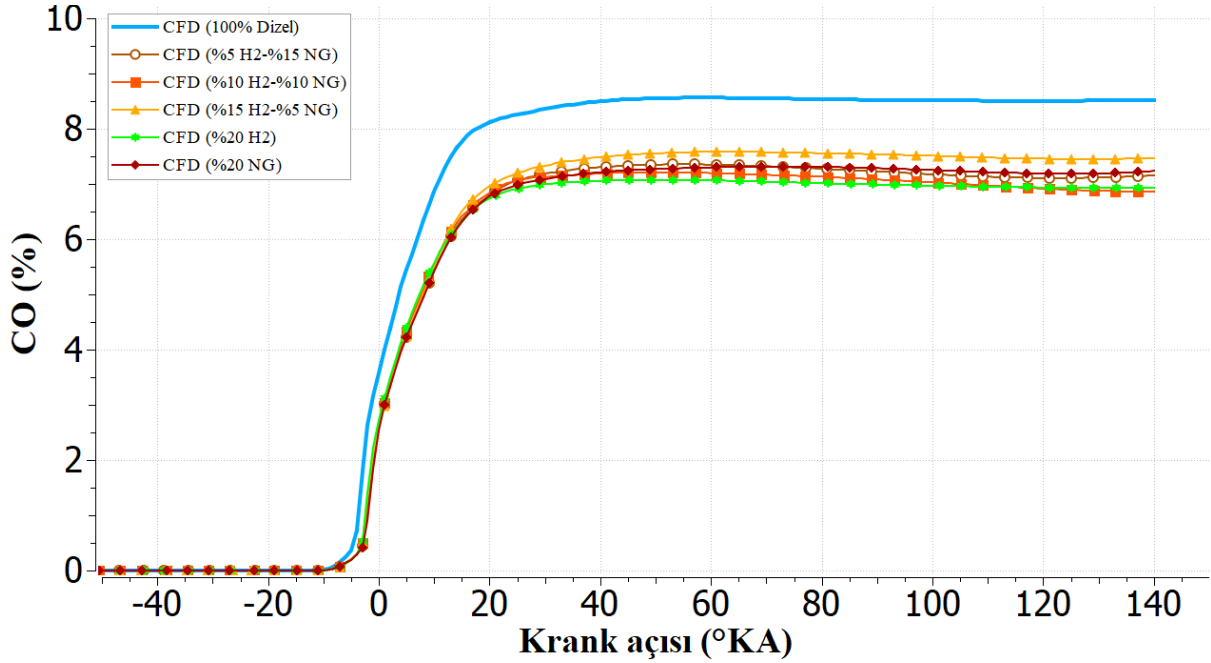
Şekil 5.6.'daki grafik krank açısına bağlı olarak CO emisyonlarının farklı yakıt karışımları için nasıl değiştiğini göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılmıştır.

Grafikte görülen ilk dikkat çekici özellik, %100 dizel senaryosunun CO emisyonlarının başlangıçta hızlı bir artış göstererek yüksek seviyelere ulaşmasıdır. Bu, dizel yakıtının yanma sürecinde tamamlanmamış yanma nedeniyle daha yüksek CO üretmesine neden olmaktadır. Dizel yakıt, oksijenin sınırlı olduğu ve yanmanın yeterince hızlı gerçekleşmediği bölgelerde daha fazla karbonmonoksit salınımına yol açmaktadır. Hidrojen ve CNG katkılarının etkileri ise daha ilginçtir. %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG gibi karışımlar, CO emisyonlarını belirgin bir şekilde azaltmaktadır. Bu, hidrojenin düşük karbon içeriği ve yüksek yanma hızı sayesinde daha verimli yanma sağladığı için CO üretiminin sınırlı kalmasına yardımcı olmaktadır. Bu yakıt karışımları, yanma sürecini daha temiz ve verimli hale getirmektedir. Ancak, hidrojen katkısı arttıkça, özellikle %15 H<sub>2</sub>-%5 NG senaryosunda, CO emisyonlarında çok hafif bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış, hidrojenin yanma sürecindeki hızının daha yüksek olmasıyla, yanmanın başlangıcında daha fazla CO üretimiyle sonuçlanabilmektedir. Ancak bu artış, dizel referansına göre yine çok daha düşük seviyelerde kalmaktadır. %20 hidrojen katkılı senaryoda, CO emisyonları en düşük seviyelerde kalmakta ve hidrojenin etkisiyle daha verimli bir yanma sağlanmaktadır. CNG katkısının ise CO emisyonlarını oldukça az da olsa biraz daha artırdığı gözlemlenmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, yakıt karışımındaki hidrojen miktarı arttıkça CO (Karbonmonoksit) emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Bu iyileşme, literatürde (Sierens vd., 2000) tarafından rapor edilen bulgularla örtüşmektedir. Araştırmacılar, hidrojenin yüksek alev hızının ve artan silindir içi sıcaklıkların yanma reaksiyonlarını hızlandırdığını, bu sayede CO'nun CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm (oksidasyon) sürecinin daha verimli gerçekleşerek egzozdan atılan CO miktarının düştüğünü belirtmiştir. Gelecekte, hidrojen ve CNG gibi alternatif yakıtların daha yaygın kullanımı, çevre dostu ulaşım çözümleri sunma yolunda önemli olacaktır.

Sonuç olarak, CO tam yanmanın gerçekleşmediği (oksijen yetersizliği olan) durumlarda oluşur (Heywood, 1988). Saf dizel senaryosunda (Mavi), lokal zengin bölgelerde oksijen yetersiz kaldığı için karbon, CO<sub>2</sub>'ye dönüşmeden CO olarak kalır. Hidrojen (Yeşil) eklediğimizde yanma hızı ve sıcaklığı artar. Bu yüksek sıcaklık, karbonun Oksijenle birleşip CO<sub>2</sub>'ye dönüşmesini kolaylaştırır (oksidasyonu hızlandırır). Ayrıca hidrojenin kendisinde karbon yoktur. Bu yüzden Hidrojen katkısı CO'yu düşürür. Dolayısıyla Hidrojenin katkısı, CO emisyonlarını düşürme açısından en etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır (Saravanan vd., 2020). Yüksek hidrojen oranları, yanma hızını artırarak daha verimli ve temiz bir yanma süreci sağlar (Dimitriou ve Tsujimura, 2017). CNG katkısı ise daha sınırlı bir etkiye sahip olup, CO emisyonlarını kontrol altında tutmaktadır. Ancak, hidrojen kadar etkili

olamamaktadır. CNG'nin avantajı, mevcut motor sistemlerinde uygulanabilir olması ve doğal gazın daha çevre dostu bir alternatif sunmasıdır. Bununla birlikte, hidrojenin daha verimli ve temiz bir yakıt olarak gelecekte daha fazla ön plana çıkması beklenmektedir (Boretti, 2012).



Şekil 5.6. Karbonmonoksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi

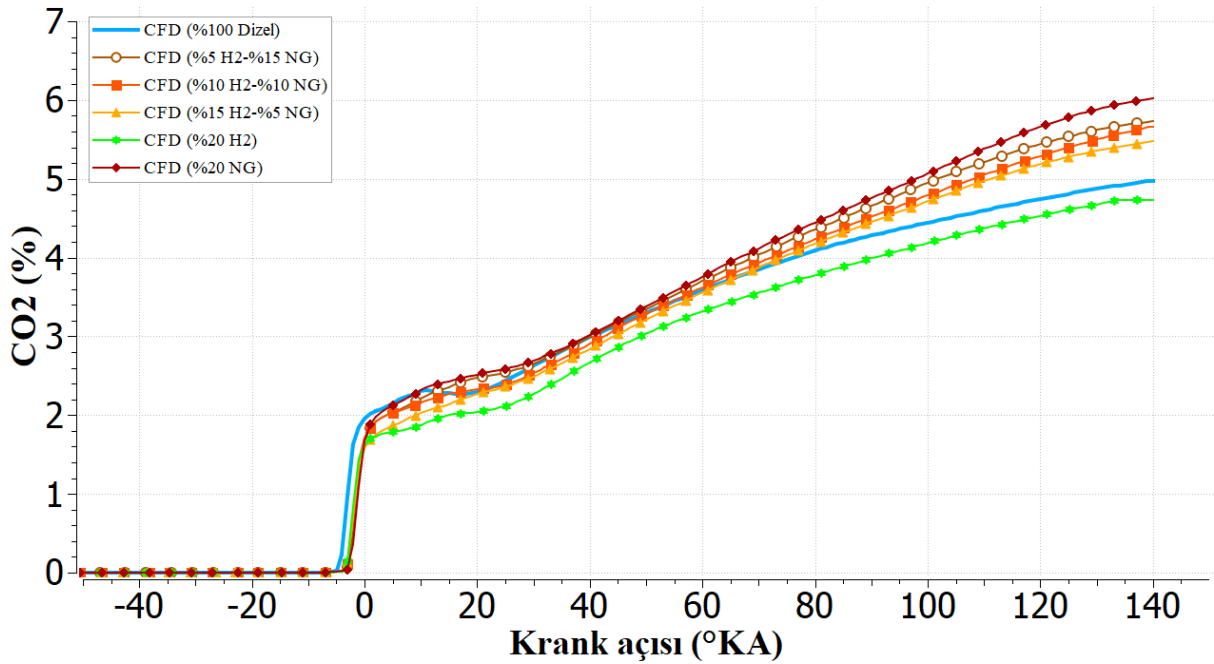
Şekil 5.7.'deki grafik krank açısına bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarının farklı yakıt karışımları için nasıl değiştiğini göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılmıştır.

Grafikteki ilk dikkat çeken özellik, Hidrojen oranı arttıkça özellikle %15 H<sub>2</sub>-%5 NG ve %20 H<sub>2</sub> senaryolarında, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azalmasıdır. Çünkü hidrojenin düşük karbon içeriği bu senaryolarda CO<sub>2</sub> salınımını sınırlamaktadır. %20 hidrojen içeren senaryoda, CO<sub>2</sub> emisyonları en düşük seviyede olmaktadır. CNG katkılarının etkilerine baktığımızda, CO<sub>2</sub> emisyonlarının dizel senaryosuna kıyasla daha yüksek seviyelerde kaldığı görülmektedir. %20 NG katkılı senaryoda ise, CO<sub>2</sub> emisyonları en yüksek seviyede oluşmuştur. CNG'nin metan bazlı yapısı, dizel yakıtının yerine kullanıldığında, özellikle CO<sub>2</sub> emisyonlarını çok fazla düşürme etkisine sahip olmamaktadır. Bu nedenle, CNG katkısı CO<sub>2</sub> emisyonlarını sınırlama açısından hidrojen kadar etkili değildir. %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG gibi karışımlar, CO<sub>2</sub> emisyonlarının dizel senaryosuna göre belirgin bir şekilde daha yüksek seviyelere çekilmesine neden olmaktadır. Bu durum, hidrojenin karbon içermeyen bir yakıt olması ve

CNG'nin düşük karbon emisyonlu bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Simülasyon sonuçlarında, yakıt karışımındaki hidrojen oranı arttıkça CO<sub>2</sub> (Karbondioksit) emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Bu durum, literatürde (Heywood, 1988) tarafından yapılan çalışmayla tam bir uyum içindedir. Araştırmacılar, hidrojenin karbon içermeyen kimyasal yapısının, toplam yakıt karışımındaki Karbon/Hidrojen oranını düşürdüğünü ve bu sayede yanma sonucu açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarının azaldığını belirtmiştir. Yanma veriminin artması normalde daha fazla yakıtın yandığı anlamına gelir ve CO<sub>2</sub>'yi artırması beklenir, fakat şekilde hidrojen ilavesiyle CO<sub>2</sub>'nin azaldığı görülmektedir.

Sonuç olarak, Bu emisyonlarda yakıtın kimyasal yapısı (C/H Oranı) etkilidir. Doğalgazın yapısındaki Metan (CH<sub>4</sub>) iyi yandığında ortaya su ve CO<sub>2</sub> çıkar. Grafikte NG'nin yüksek olması, yanmanın verimli olduğunu ancak yakıtın doğası gereği CO<sub>2</sub> ürettiğini gösterir (Korakianitis vd., 2011). Hidrojen (Yeşil çizgi) karbon (C) atomu içermez. Yanma ürünü sadece sudur (H<sub>2</sub>O). Dolayısıyla karışımdaki hidrojen oranı arttıkça, toplam karbon miktarı azalır ve CO<sub>2</sub> emisyonu en düşük seviyeye iner (Verhelst, 2014). Dolayısıyla Hidrojen katkısı, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmada en etkili strateji olarak öne çıkmaktadır. Yüksek hidrojen oranları, yanma sürecinde karbon içermeyen bir bileşen olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını sınırlamaktadır. CNG katkısı ise CO<sub>2</sub> emisyonlarını çok fazla etkilemeden düşük seviyelerde CO<sub>2</sub> üretmektedir (Dimitriou ve Tsujimura, 2017).



Şekil 5.7. Karbondioksit emisyonlarının krank açısına bağlı değişimi

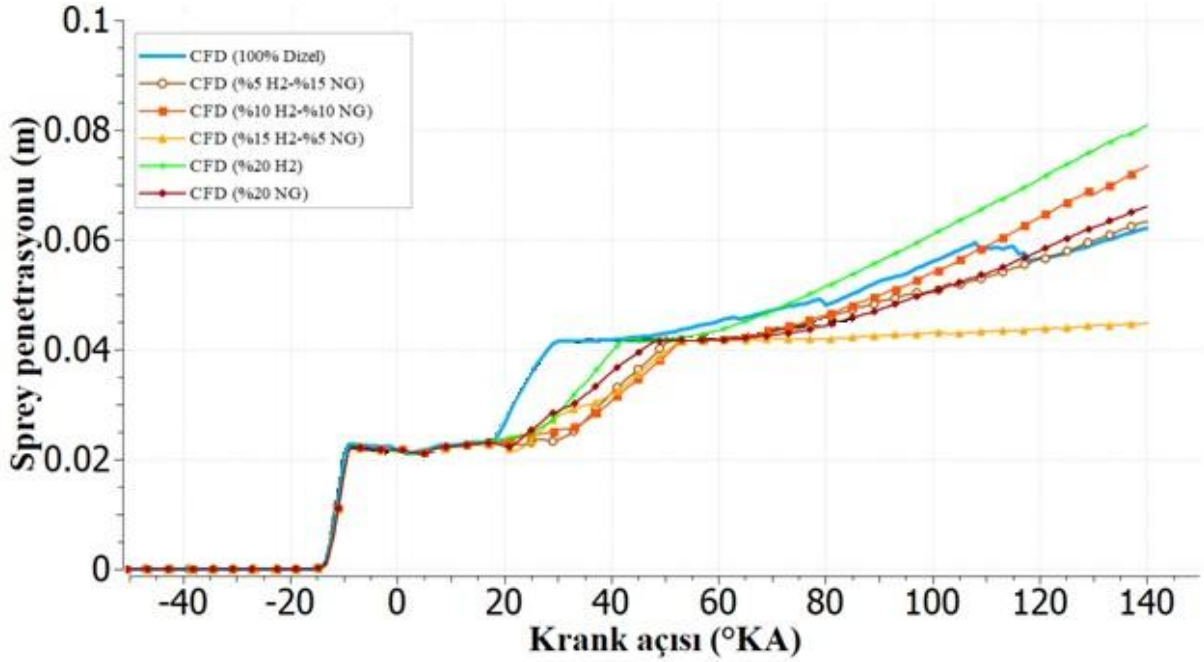
Şekil 5.8.'deki grafik, krank açısına bağlı olarak sprej penetrasyonunu (m) farklı yakıt karışımları için göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılarak çeşitli H<sub>2</sub> ve CNG (NG) katkılarının etkisi incelenmiştir.

Grafikte dikkat çeken ilk özellik, saf dizelin ilk etapta sprej penetrasyonunun diğer tüm yakıt karışımlarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, dizel yakıtının daha yoğun ve daha yüksek viskoziteye sahip olmasıyla, sprejin silindire daha derinlemesine girmesini sağlamaktadır. Bu durum, dizel yanma karakteristiğiyle ilişkilidir; dizel, genellikle daha yoğun bir sprej desenine ve daha fazla penetrasyona yol açan özelliklere sahiptir. Hidrojen ve CNG katkılarının etkilerine baktığımızda, sprej penetrasyonunun genel olarak dizelden daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG gibi karışımlar, sprej penetrasyonunu belirgin şekilde azaltmaktadır. Bu, hidrojenin düşük yoğunluklu ve düşük viskoziteli bir yakıt olmasıyla açıklanabilir; bu özellikler, sprejin silindire daha az derinlemesine girmesine yol açmaktadır. Hidrojen oranı arttıkça, özellikle %15 H<sub>2</sub>-%5 NG ve %20 H<sub>2</sub> senaryolarında, sprej penetrasyonu biraz daha artmakta, ancak bu artış dizel referansına göre hala sınırlıdır. Yüksek hidrojen oranları, yakıtın daha hızlı buharlaşmasını ve daha ince bir sprejin oluşmasını sağlayarak penetrasyonu artırabilmektedir. Ancak bu etki, dizel yakıtına göre daha az belirgin kalmaktadır. %20 NG içeren senaryoda ise, sprej penetrasyonu bir kısım açılar arasında dizel senaryosuna oldukça yakın seviyelerde kalmakta veya yer yer düşmektedir, bu da CNG'nin metan bazlı yapısının, dizel yakıtının özelliklerine benzer bir sprej penetrasyonu sağladığını göstermektedir.

Elde edilen sprej penetrasyon (yakıt huzmesi ilerleme) verileri incelendiğinde, püskürtme başlangıcından itibaren sıvı yakıtın yanma odası içerisinde ilerlediği ve aerodinamik direnç ile buharlaşma etkileriyle belirli bir mesafede dengelendiği görülmektedir. Bu davranış, dizel sprej mekaniği üzerine literatürdeki en temel çalışma olan (Hiroyasu vd., 1990) tarafından geliştirilen sprej kırılma ve penetrasyon modelleriyle tam bir uyum içerisinde. Penetrasyon mesafesinin artması, yakıtın silindir içindeki havayla daha iyi buluşmasını sağlayarak karışım kalitesini artırır. Ancak penetrasyonun gereğinden fazla artması, yakıtın silindir cidarına çarpmasına neden olabilir. Dolayısıyla duvara çarpan yakıt, burada film tabakası oluşturarak tam yanamaz ve HC emisyonlarının artmasına yol açar.

Sonuç olarak, Hidrojen (H<sub>2</sub>), havadan çok daha hafif bir gazdır. Silindir içerisine hava yerine %20 oranında Hidrojen doldurduğumuzda, silindir içi gaz karışımının yoğunluğu düşer. Enjektörden çıkan dizel yakıtı, daha düşük yoğunluklu (daha az direnç gösteren) bir

ortamla karşılaştığı için daha ileriye gidebilir. Saf dizel senaryosunda ortamda sadece hava vardır, yoğunluk daha yüksektir ve sprej daha fazla dirençle karşılaşır, bu yüzden penetrasyonu hidrojene göre biraz daha düşük kalabilir (Heywood, 1988). CNG katkısı ise sprej penetrasyonunu bir kısım açılar arasında dizel yakıtına yakın tutmakta veya yer yer düşürmekte fakat bu konuda hidrojen kadar belirgin bir fark yaratmamaktadır (Dimitriou ve Tsujimura, 2017).



Şekil 5.8. Sprej penetrasyonunun krank açısına bağlı değişimi

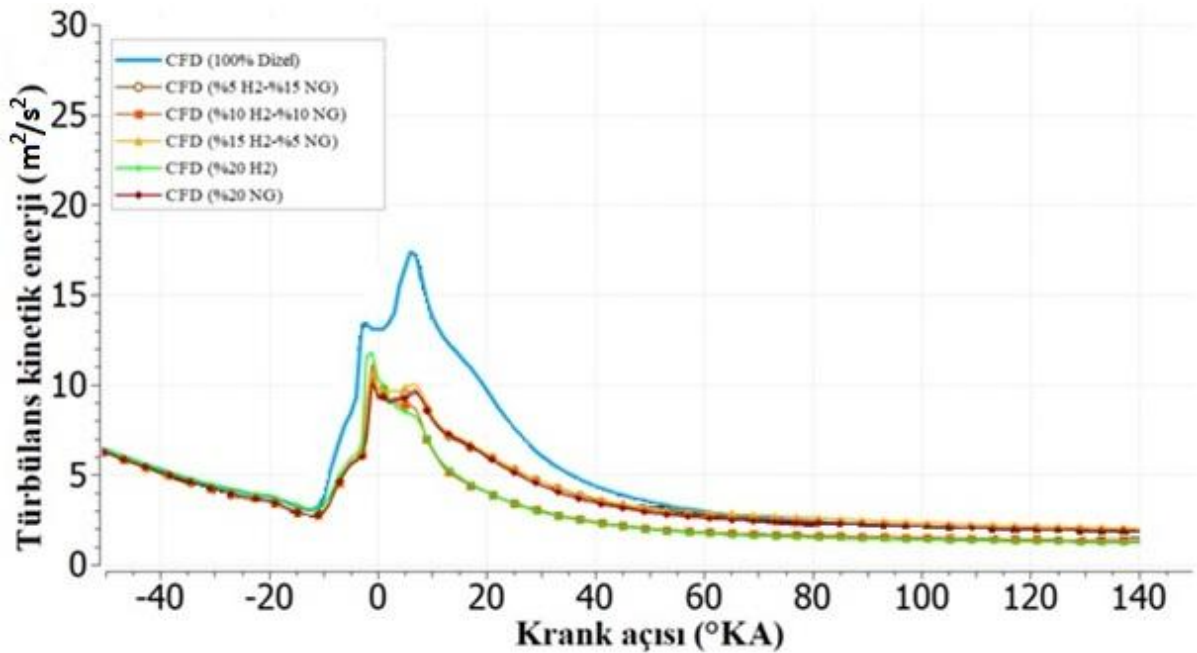
Şekil 5.9.'daki grafik, krank açısına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisinin ( $m^2/s^2$  cinsinden) farklı yakıt karışımları için nasıl değiştiğini göstermektedir. Simülasyonlar, CONVERGE HAD yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve Rahimi'nin NG-Dizel kinetik mekanizması kullanılmıştır.

Grafikte dikkat çeken ilk özellik, %100 dizel yakıtının türbülans kinetik enerjisinin, diğer yakıt karışımlarına göre daha yüksek olduğu ve özellikle yanma sürecinin başında keskin bir artış gösterdiğidir. Hidrojen ve CNG katkılarının etkilerine bakıldığında, türbülans kinetik enerjisinin dizel senaryosuna göre biraz daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Özellikle %5 H<sub>2</sub>-%15 NG ve %10 H<sub>2</sub>-%10 NG gibi karışımlar, türbülans enerjisinin daha az arttığını göstermektedir. Bu, hidrojenin ve CNG'nin daha düşük reaktiviteye sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Hidrojen ve CNG'nin düşük yoğunluğu, yanma sürecinde

daha az türbülans enerjisi üretmelerine neden olabilir. Hidrojen oranı arttıkça, özellikle %15 H<sub>2</sub>-%5 NG türbülans kinetik enerjisinde belirgin düşüş gözlemlenmektedir. %20 H<sub>2</sub> senaryosunda ise diğerlerinden farklı olarak bazı açılar arasında yükseliş görülmüştür. %20 NG içeren senaryoda ise, türbülans kinetik enerjisi dizele göre daha düşük kalmaktadır.

Elde edilen Türbülans Kinetik Enerjisi grafiği incelendiğinde, özellikle yakıt püskürtme periyodunda ve yanma başlangıcında türbülans şiddetinin maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu davranış, içten yanmalı motorlar literatüründe (Heywood, 1988) tarafından ortaya konan temel prensiplerle tam bir uyum içindedir. Türbülansın artması, hava ve yakıtın moleküler düzeyde karışmasını hızlandırarak yanma verimini iyileştirir. Ancak aşırı yüksek türbülans, yanma gazlarından silindir duvarlarına olan konvektif ısı transferini artırır. Bu durum, silindir içindeki ısının işe dönüşmeden duvarlardan dışarı kaçmasına ve ısı veriminin potansiyel artışının sınırlanmasına neden olmaktadır.

Sonuç olarak, saf dizel senaryosunda yakıtın tamamı yüksek basınçla silindire püskürtülür. Bu sıvı jeti, çok yüksek bir türbülans yaratır. Diğer senaryolarda yakıtın bir kısmı porttan gaz olarak karışmış halde geldiği için, püskürtülen dizel miktarı azdır. Bu türbülans şiddetinin daha düşük olmasına neden olur. CNG katkılı yakıt karışımlarının türbülans kinetik enerjisi üzerindeki etkileri, dizele kıyasla daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Sadece belirli açılar arasında, %20 H<sub>2</sub> oranıyla bir artış görülmüştür.

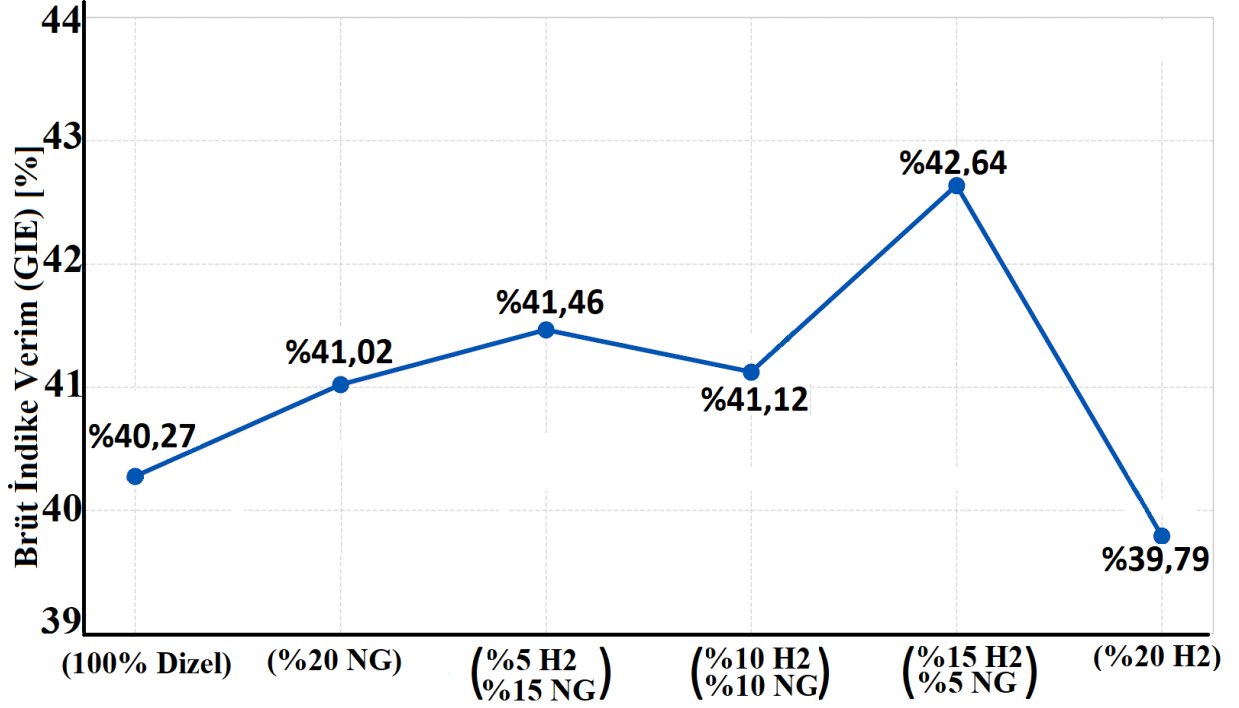


Şekil 5.9. Türbülans kinetik enerjinin krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.10.'daki grafik, yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen Brüt İndike Verim (GIE) değerlerinin yakıt türüne bağlı olarak değişimini göstermektedir. Bu veriler Converge CFD yazılımında bulunan motor parametreleri hesaplama aracıyla (engine calculator tool) silindir basıncı verisi üzerinden hesaplanmıştır. Grafik incelendiğinde, RCCI yanma modunda kullanılan yakıt karışımlarının ısı verim üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle düşük reaktiviteli yakıt olan doğalgazın içerisine hacimsel olarak hidrojen ilave edilmesi, indike verimde artış eğilimi sağlamıştır (Boretti, 2012).

Bu artışın temel mekanizması, hidrojenin yanma kinetiği ile açıklanabilir. Doğalgazın (metan) nispeten yavaş olan alev yayılma hızı, hidrojenin yüksek alev hızı ve geniş yanma limitleri sayesinde iyileştirilmiştir. Hidrojen ilavesi, yanma süresini kısaltarak, ısı açığa çıkışının Üst Ölü Nokta (TDC) civarında daha yoğunlaşmasını sağlamıştır. Termodinamik açıdan bakıldığında, yanmanın sabit hacim sürecine yaklaşması, sistemin termal verimini artırmıştır (Heywood, 1988).

Ayrıca, RCCI modunun karakteristiği olan düşük sıcaklıklı yanma (LTC), silindir duvarlarına olan ısı transferi kayıplarını minimize ederek, yakıt enerjisinin daha büyük bir kısmının mekanik işe dönüşmesine olanak tanımıştır (Reitz ve Duraisamy, 2015). Sonuç olarak, doğalgaz-dizel ikili yakıtına kıyasla, hidrojenle zenginleştirilmiş üçlü yakıt (NG-H<sub>2</sub>-Dizel) kombinasyonları, en yüksek brüt indike verim değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır. En yüksek verim grafikte de görüldüğü gibi; %42,64 ile (%15 H<sub>2</sub> -%5 NG ve Dizel) üçlü karışımından elde edilmiştir.

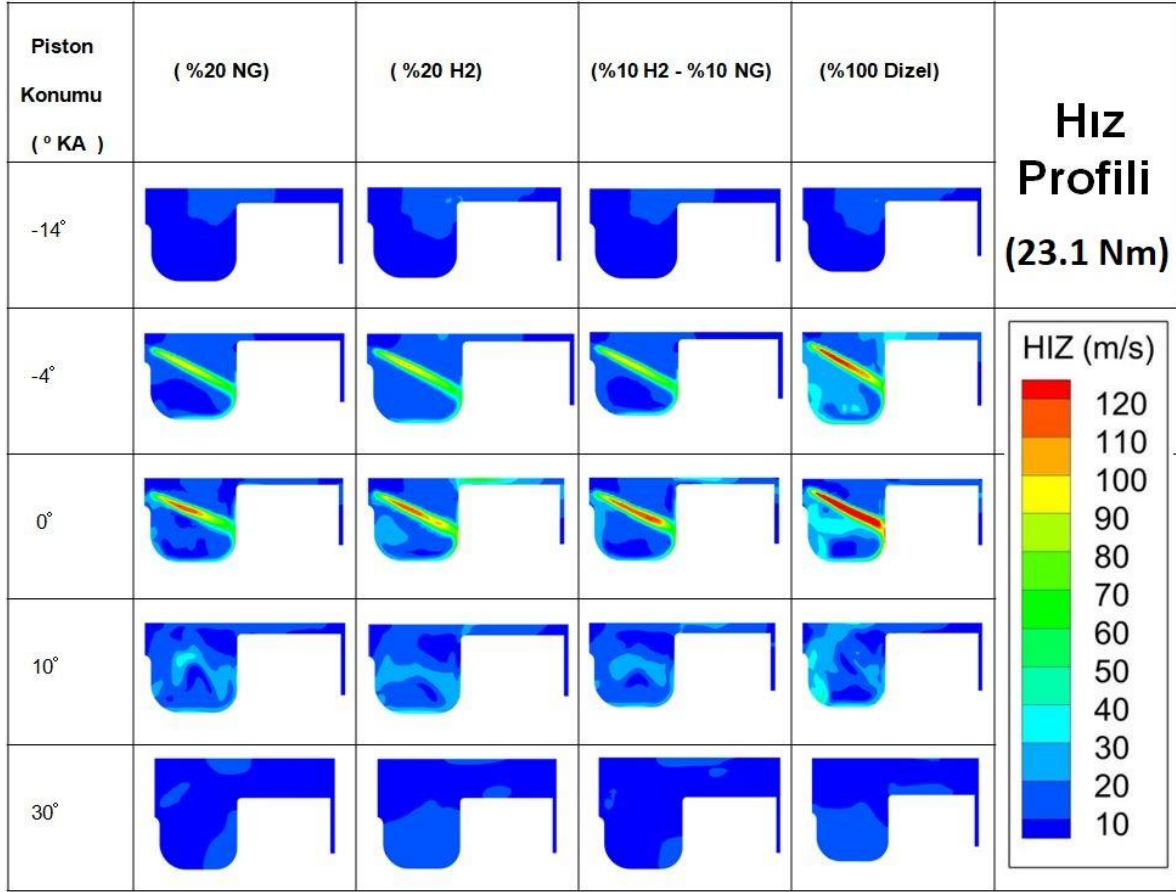


Şekil 5.10. Brüt indike verimin yakıt türüne bağlı değişimi

Şekil 5.11.'deki grafik içten yanmalı motorlarda farklı yakıt karışımlarının, piston hareketiyle ilişkili akış hızları üzerindeki etkilerini görsel olarak gösteren bir hız profili sunmaktadır. Grafik, motorun iç mekanizmasını ve akış dinamiklerini analiz etmek amacıyla kullanılır. Her bir hücre, belirli bir piston açısı (pistonun silindire uyguladığı konum) ve yakıt karışımı altında silindir içindeki akış hızını (m/s cinsinden) temsil etmektedir. Grafik, her bir piston açısındaki akış hızını renk skalasıyla gösterir. Kırmızı ve sarı renkler, yüksek hızları (yaklaşık 120 m/s) gösterirken, mavi ve yeşil renkler düşük hızları ifade eder. Piston çukurunun farklı açılarındaki hız profilleri, her bir açıda yakıtın ve havanın silindire nasıl girdiğini ve ne kadar hızla hareket ettiğini görsel olarak izlemeyi sağlar. Yüksek hızlar, genellikle daha homojen ve güçlü bir yanma süreciyle ilişkilendirilirken, düşük hızlar daha stabil ve verimli bir yanma koşuluna işaret edebilir. Bu, motorun yanma sürecinin hızına ve etkinliğine bağlı olarak farklı performans seviyeleri ortaya çıkarır. Grafik, pistonun farklı açılardaki konumlarını (-14°, -4°, 0°, 10°, 30°) gösteriyor. Bu açılar, pistonun silindirin içinde farklı aşamalarda hareket ettiği noktalar ve motorun silindir hacmindeki değişiklikleri temsil eder. Her bir açı, motorun çalışması sırasında pistonun silindire uyguladığı basınç ve hacim değişikliklerini belirleyerek, yanma sürecinin nasıl ilerlediğine dair bilgi verir. Pistonun her hareketi, yanma odasındaki hava-yakıt karışımının sıkıştırılması veya

genişlemesi ile ilişkili olarak farklı enerji salınımı yaratır. Bu, motorun genel verimliliği ve emisyon seviyeleri üzerinde doğrudan etkili olabilir.

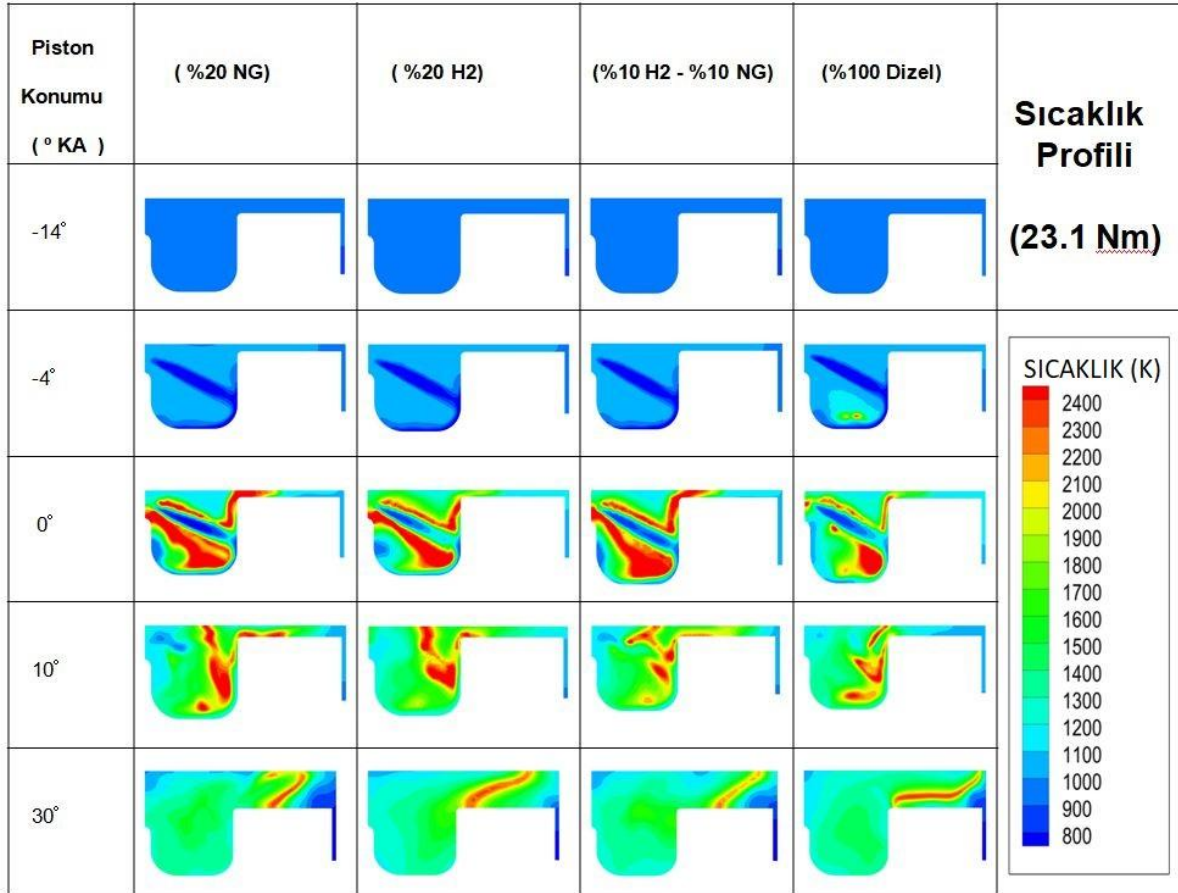
Piston konumunun değişmesiyle birlikte, silindire giren hava ve yakıt karışımının hız profili de değişir. Piston, silindire daha yakın veya daha uzak olduğunda, akışın yönü ve hızının şiddeti de farklılık gösterebilir. Enjektör püskürtmesiyle oluşan yüksek momentumlu jet, dizel çukurunun eğimli geometrisi sayesinde duvar boyunca yönlendirilmekte ve bu da çukur içerisinde yüksek hızlı akış bölgeleri ile güçlü türbülans oluşmasına neden olmaktadır (Heywood, 1988). Çukur geometrisi, püskürtülen jetin kinetik enerjisini rastgele dağıtmak yerine kontrollü şekilde yönlendirerek karışımı ve yanma verimini artırmaktadır (Stone, 2012). %20 NG yakıt karışımında, doğalgaz kullanımı, genellikle daha düşük sıcaklıklarla ve daha düzgün bir yanma ile karakterizedir. Grafik, bu karışımda daha düşük hızları (mavi tonlarında) gösteriyor, bu da genellikle daha verimli ve kontrollü bir yanma sürecine işaret eder (Korakianitis vd., 2011). %20 H<sub>2</sub>'in kullanıldığı bu karışımda, hidrojenin daha hızlı bir yanma sağladığı ve silindir içindeki akış hızının arttığı gözlemlenebilir. Bu durumda, daha yüksek hızlar (yeşil ve sarı tonları) belirgin hale gelir (White vd., 2006). %10 H<sub>2</sub> - %10 NG karışımında, her iki yakıtın özelliklerini dengeler. Yanma daha verimli olabilir ve akış hızında bir artış görülebilir. Yine, grafik üzerinde farklı renk tonları bu durumu yansıtır. %100 Dizel yakıt kullanıldığında genellikle daha yüksek akış hızları gösterir. Bu karışımda, özellikle pistonun hareket ettiği açığa göre, daha yüksek hızlar (kırmızı ve turuncu tonları) gözlemlenmektedir. Dizel yakıtı, yüksek basınç altında daha iyi performans gösterir dolayısıyla bu da dizeli diğer yakıtlardan farklı bir noktaya taşır.



Şekil 5.11. Akış hız profiline krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.12.'deki grafik içten yanmalı motorlarda kullanılan farklı yakıt karışımlarının, piston hareketiyle ilişkili sıcaklık profillerini görsel olarak göstermektedir. Grafik, her bir piston konumunda (pistonun silindire uyguladığı açı) ve farklı yakıt karışımlarında, silindir içindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sıcaklıklar, her noktadaki yakıtın ve havanın yanma süreci sırasında oluşturduğu ısıyı temsil eder. Grafik, her bir piston açısındaki sıcaklık dağılımını renk skalasıyla gösteriyor. Kırmızı ve sarı renkler, yüksek sıcaklıkları (yaklaşık 2400 K) belirtirken, mavi ve yeşil renkler düşük sıcaklıkları (yaklaşık 800-1000 K) ifade eder. Yüksek sıcaklıklar, genellikle daha güçlü bir yanma ve motor gücüyle ilişkilendirilirken, düşük sıcaklıklar, daha verimli ve dengeli bir yanma süreciyle ilişkilidir. Bu sıcaklık profilleri, motorun tasarımına ve verimliliğine doğrudan etki eder. Grafik, pistonun farklı açılardaki konumlarını (-14°, -4°, 0°, 10°, 30°) gösteriyor. Bu açılar, pistonun silindirin içinde farklı aşamalarda hareket ettiği noktaları ifade eder ve motorun içindeki hacim değişikliklerini yansıtır. Bu hacim değişiklikleri, yanma sürecinin etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlayarak, motorun gücünü ve emisyon seviyelerini optimize eder.

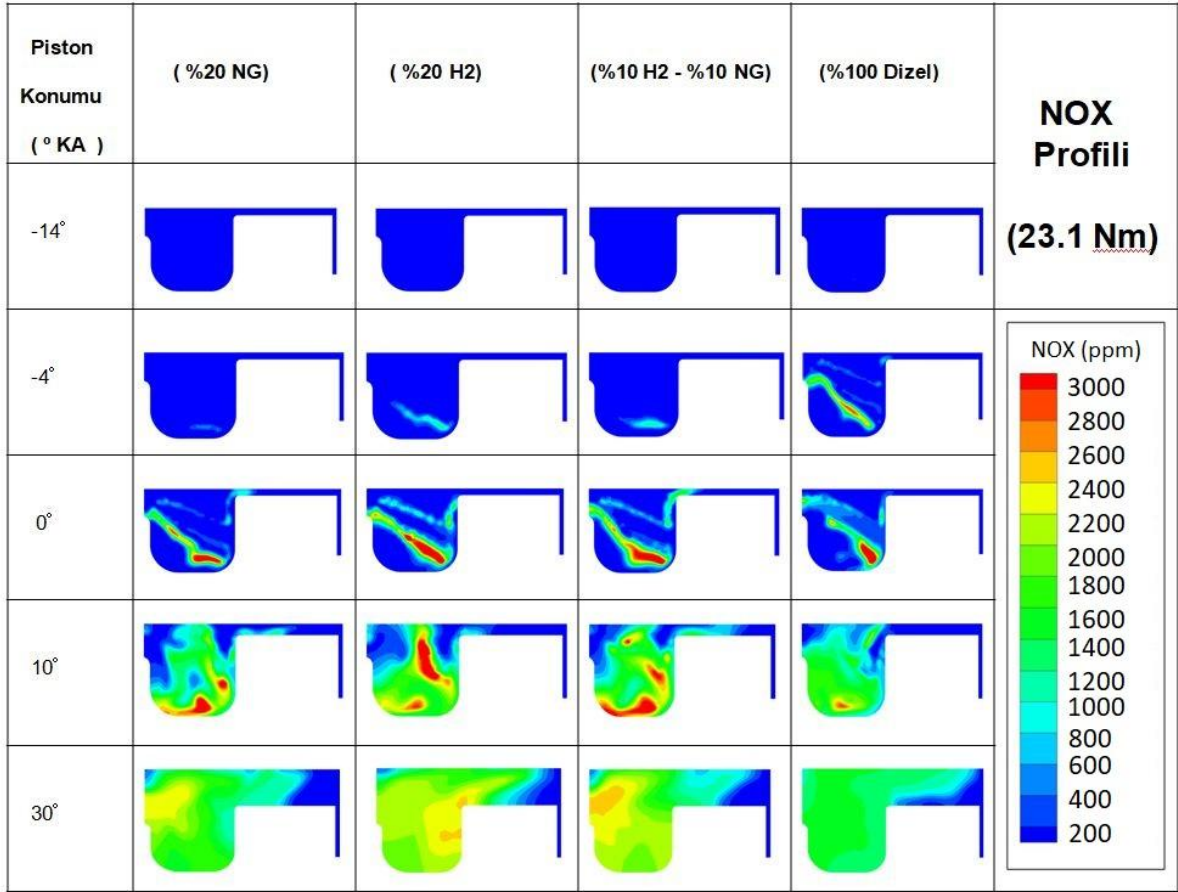
Pistonun bu hareketleriyle birlikte silindire giren hava ve yakıt karışımının sıcaklık profili de değişir. Pistonun silindire daha yakın veya daha uzak olduğu konumlar, içeri giren karışımın ısınımsını etkileyebilir (Heywood, 1988). %20 NG karışımında doğalgazın kullanılması, genellikle dizele oranla daha düşük sıcaklıklara yol açar. Bu da dizele kıyasla daha düşük sıcaklıkların ve daha stabil bir yanma sürecinin işaretidir (Korakianitis vd., 2011). %20 H<sub>2</sub> kullanımı, yanma sürecinde daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olabilir. Grafikte hidrojenin daha yüksek sıcaklıkları (sarı ve kırmızı tonları) gösterdiği gözlemleniyor. Bu da hidrojenin daha hızlı bir yanma sağladığını ve daha yüksek ısılara yol açtığını gösterir (Verhelst, 2014). %10 H<sub>2</sub> - %10 NG karışımında her iki yakıtın özellikleri bir araya gelir. Grafik, bu karışımında sıcaklıkların biraz daha yüksek olduğunu gösteriyor. Bu, karışımın her iki yakıtın özelliklerini dengeleme çabasını yansıtır. %100 Dizele; profilin yüksek sıcaklıkları (yaklaşık 2000-2400 K arası) daha belirgin şekilde gösterdiğini, kırmızı ve sarı tonlarının hakim olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, dizelin yüksek basınç altında yanma sağladığını ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklıklar ürettiğini gösterir (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).



Şekil 5.12. Sıcaklık profilinin krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.13.'teki grafik içten yanmalı motorlarda kullanılan farklı yakıt karışımlarının, piston hareketiyle ilişkili  $\text{NO}_x$  emisyonlarını görsel olarak göstermektedir.  $\text{NO}_x$  emisyonları, genellikle yanma sıcaklıkları ve oksijen miktarına bağlı olarak değişir ve motor performansını etkileyen önemli bir çevresel parametredir. Grafik, her bir piston konumunda (pistonun silindire uyguladığı açı) ve farklı yakıt karışımlarında, silindir içindeki  $\text{NO}_x$  emisyonlarının dağılımını göstermektedir.  $\text{NO}_x$ , genellikle yüksek sıcaklıklarda oluşur ve çevreye zarar verebilen gazlardır. Grafik, her bir piston açısındaki  $\text{NO}_x$  emisyonlarını renk skalasıyla gösterir. Kırmızı ve sarı renkler, yüksek  $\text{NO}_x$  seviyelerini (yaklaşık 2400-3000 ppm) belirtirken, mavi ve yeşil renkler düşük  $\text{NO}_x$  seviyelerini (yaklaşık 200-600 ppm) ifade eder. Yüksek  $\text{NO}_x$  emisyonları, genellikle yüksek sıcaklıklar ve basınçlarla ilişkilidir ve bu da motorun çevresel etkilerini artırabilir. Bu veriler,  $\text{NO}_x$  emisyonlarının kontrol altına alınması ve çevreye zarar veren gazların azaltılması için önemlidir. Emisyonların optimize edilmesi, daha çevre dostu motor teknolojilerinin geliştirilmesine yardımcı olur. Grafik, pistonun farklı açılardaki konumlarını ( $-14^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ) gösteriyor. Bu açılar, pistonun silindirin içinde hareket ettiği noktaları temsil eder ve motorun iç hacmindeki değişiklikleri yansıtır. Her bir açı, motorun yanma odasındaki basınç ve hacim değişikliklerine göre farklı yanma koşulları yaratır. Bu değişiklikler,  $\text{NO}_x$  ve diğer emisyon seviyelerinin nasıl etkilendiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

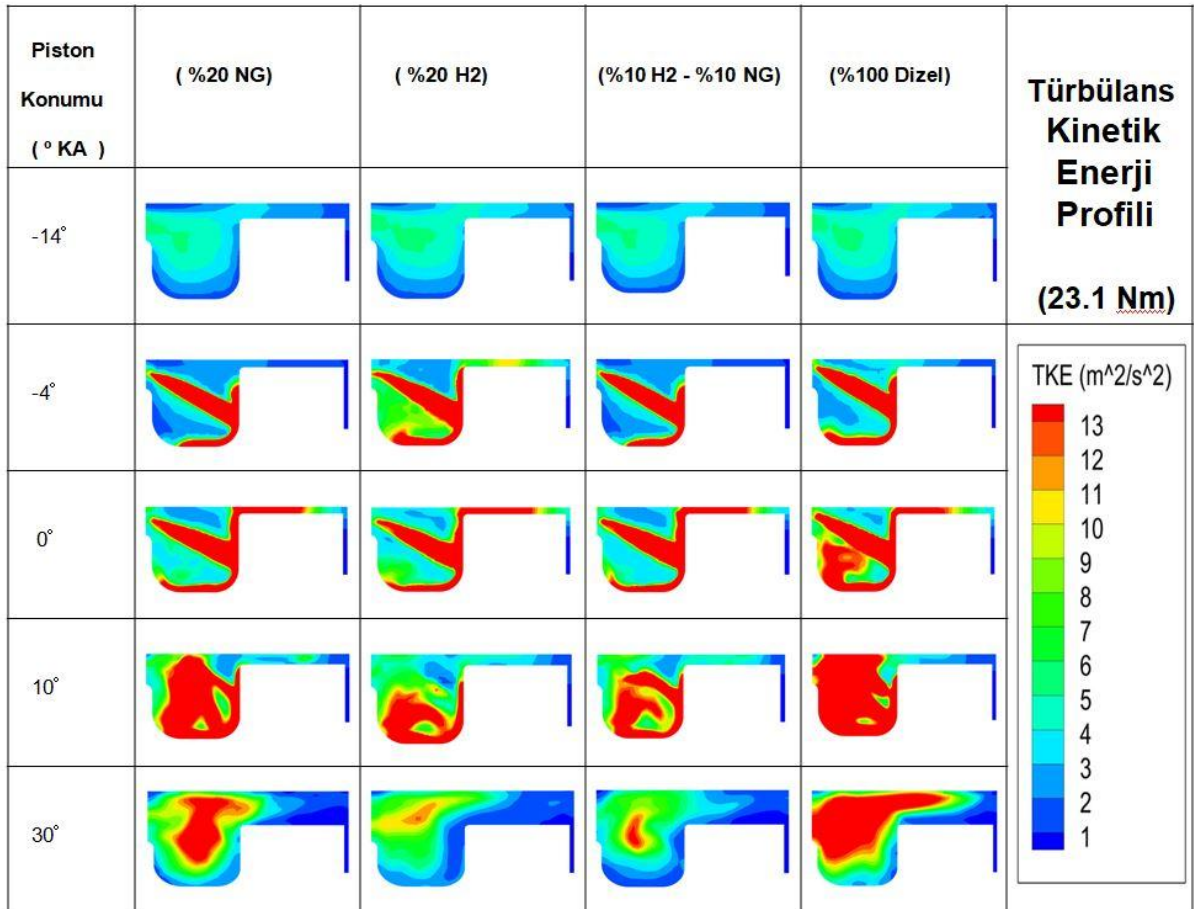
Pistonun bu farklı pozisyonları, yakıtın ve havanın yanma odasında nasıl karıştığını, bu karışımın nasıl yanacağını ve buna bağlı olarak  $\text{NO}_x$  emisyonlarının ne şekilde dağıldığını gösterir. %20 NG karışımında düşük  $\text{NO}_x$  seviyeleri (mavi tonlarında) gösteriliyor, bu da doğalgazın daha düşük sıcaklıklarda ve daha temiz bir yanma sağladığına işaret eder. Doğalgaz, genellikle daha düşük  $\text{NO}_x$  emisyonlarına sahip bir yakıttır (Korakianitis vd., 2011).  $\text{NO}_x$  emisyonlarının az olması, çevresel etkilerin azaltılması açısından önemlidir. %20  $\text{H}_2$  karışımında hidrojenin etkisiyle daha yüksek  $\text{NO}_x$  seviyeleri (sarı ve kırmızı tonları, yaklaşık 2000-2800 ppm) gözlemleniyor. Hidrojenin yanması daha hızlı gerçekleştiği için, yüksek sıcaklıklar ve dolayısıyla yüksek  $\text{NO}_x$  üretimi meydana gelebilir (Saravanan vd., 2020). %10  $\text{H}_2$  - %10 NG karışımında her iki yakıtın etkileri birleştirilmiştir. Grafik, karışımın  $\text{NO}_x$  emisyonlarını her iki yakıtın özelliklerini dengeliyor gibi gösteriyor. %100 Dizel yakıtı kullanıldığında, grafikte yüksek  $\text{NO}_x$  seviyeleri (kırmızı ve turuncu tonları, yaklaşık 2400-3000 ppm) görülüyor. Dizel motorları genellikle yüksek sıcaklıklarla çalışır ve bu da diğerleri kadar olmasa da  $\text{NO}_x$  emisyonlarına yol açar. Dizelin yüksek basınç altında yanması fazla  $\text{NO}_x$  üretimiyle sonuçlanır ve ek önlemlere ihtiyaç duyulur (Mollenhauer ve Tschoeke, 2010).



Şekil 5.13. Azot oksit profilinin krank açısına bağlı değişimi

Şekil 5.14.'teki grafik, içten yanmalı motorlarda kullanılan farklı yakıt karışımlarının piston hareketiyle ilişkili türbülans kinetik enerjisi (TKE) profillerini göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi, motor silindirindeki hava ve yakıt karışımının akışkan hareketinin enerjisini ifade eder. Yüksek türbülans kinetik enerjisi, akışın daha karışık ve karmaşık olduğu, düşük TKE ise daha düzenli ve sakin bir akış olduğunu gösterir. Grafik, pistonun farklı açılardaki ve yakıt karışımlarındaki türbülans seviyelerini görsel olarak sunmaktadır. Grafik, her bir piston açısındaki türbülans kinetik enerjisini renk skalasıyla gösteriyor. Kırmızı ve turuncu renkler yüksek TKE seviyelerini (yaklaşık 12-13 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>), mavi ve yeşil renkler ise düşük TKE seviyelerini (yaklaşık 1-3 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) gösterir. Yüksek türbülans kinetik enerjisi, genellikle daha güçlü ve karmaşık bir yanma süreciyle ilişkilidir, bu da daha verimli bir güç üretimi sağlasa da yakıt verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Düşük türbülans ise daha düzenli bir yanma süreciyle ilişkilidir, ancak motorun verimliliğini sınırlayabilir. Grafik, pistonun farklı açılardaki konumlarını (-14°, -4°, 0°, 10°, 30°) gösteriyor. Bu açılar, pistonun silindirdeki hareketini ve silindire uyguladığı basınç ve hacim değişikliklerini temsil eder.

Pistonun farklı konumları, türbülansın dağılımını etkiler. Piston çukuru, akışın düzenini ve yoğunluğunu doğrudan etkileyebilir. Akışkanın silindire girdiği ve pistonun hareket ettiği bu konumlar, türbülansın seviyesinin arttığı ya da azaldığı bölgeleri işaret eder. %20 NG kullanımı, genellikle dizele göre daha düzenli bir akışa yol açar ve bu da türbülans seviyelerinin dizele göre daha düşük çıkmasına sebep olur. %20 H<sub>2</sub> oranlı yakıt karışımının yanması sırasında genellikle yüksek türbülans seviyeleri gözlemlenir. Hidrojenin daha hızlı bir şekilde yanması, yanma sürecinde daha fazla karışım ve hareket sağlar, bu da özellikle bazı açılar arasında daha yüksek TKE (kırmızı ve turuncu tonlarında) ve  $13 \text{ m}^2/\text{s}^2$  -  $11 \text{ m}^2/\text{s}^2$  arasında enerji üretir. Hidrojen kullanımı, motorun içinde yüksek hız ve türbülans oluşturur. %10 H<sub>2</sub> - %10 NG karışımında, her iki yakıtın etkileri birleşmiştir. Grafik, bu karışımında türbülans seviyelerinin ortalama ölçülerde (sarı ve kırmızı tonları) ve  $13 \text{ m}^2/\text{s}^2$  -  $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$  arasında olduğuna işaret eder. %100 Dizel yakıtı kullanıldığında yüksek basınç altında çalıştığı için yüksek tork ile hızlı akış üretilmesiyle piston hareketi sırasında yoğun türbülans (kırmızı ve turuncu renkler) ve  $13 \text{ m}^2/\text{s}^2$  -  $11 \text{ m}^2/\text{s}^2$  arasında enerji üretildiği gözlemlenir



Şekil 5.14. Türbülans kinetik enerji profilinin krank açısına bağlı değişimi

## 6. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında, tek silindirli bir dizel motorun Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma ile Ateşleme (RCCI) modunda çalıştırılması sayısal olarak modellenmiş; Doğalgaz (NG), Hidrojen ( $H_2$ ) ve Dizel yakıtlarının farklı kombinasyonlarının yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sonuçları; silindir içi basınç, sıcaklık dağılımları, ısı açığa çıkış oranları, indike verim, sprey penetrasyonu, türbülans kinetik enerji ve emisyon oluşum mekanizmaları ( $NO_x$ ,  $İs$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HC$ ) açısından aşağıda alt başlıklar halinde değerlendirilmiştir.

### Basınç değerleri

Yapılan analizlerde, referans yakıt olarak kullanılan %100 Dizel ile kıyaslandığında, porttan enjekte edilen gaz yakıtların (Doğalgaz ve Hidrojen) yanma fazlamasını ve tepe basınç değerlerini doğrudan değiştirdiği gözlemlenmiştir. Saf dizel senaryosunda tepe basınç değeri yaklaşık 6.8 MPa seviyelerinde gerçekleşirken, karışıma hidrojen ilave edilen senaryolarda bu değer 7 MPa seviyelerine yükseldiği tespit edilmiştir. Özellikle %20 Hidrojen içeren senaryoda, hidrojenin yüksek laminer alev hızı ve geniş yanma sınırlarına sahip olması, yanma süresini kısaltmış ve silindir içi basınç artış hızını (PPRR) yükseltmiştir. Basınç eğrileri incelendiğinde, hidrojen oranının artmasıyla birlikte yanma başlangıcının ve yanma ağırlık merkezinin Üst Ölü Nokta'ya (ÜÖN) daha yakın bir konuma, hatta daha erkene kaydığı görülmüştür. Bu durum, hidrojenin "ön karışımli yanma" (premixed combustion) fazını güçlendirdiğini ve silindir içindeki reaktiviteyi artırarak tutuşma gecikmesini kısalttığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, %20 Doğalgaz (NG) kullanılan senaryoda, metanın düşük reaktivitesi ve yavaş alev yayılma hızı nedeniyle basınç artışı daha yumuşak ve kontrollü gerçekleşmiş, tepe basınç noktası dizele kıyasla bir miktar gecikmiştir. Dolayısıyla, RCCI stratejisinde hidrojenin "hızlandırıcı", doğalgazın ise "yavaşlatıcı" bir etki yarattığı, bu iki yakıtın belirli oranlarda (örneğin %10  $H_2$  - %10 NG) karıştırılmasının yanma kontrolü açısından en dengeli basınç profilini sunduğu sonucuna varılmıştır.

### Ortalama sıcaklık değerleri

Silindir içi ortalama sıcaklık grafikleri değerlendirildiğinde, yakıt bileşimindeki hidrojen oranının artışına paralel olarak maksimum çevrim sıcaklıklarının ciddi oranda yükseldiği saptanmıştır. %20 Hidrojen senaryosu, analiz edilen tüm durumlar arasında en

yüksek tepe sıcaklığına ulaşmıştır. Bunun temel nedeni, hidrojenin adyabatik alev sıcaklığının yüksek olması ve yanma enerjisini çok kısa sürede açığa çıkarmasıdır. Yüksek sıcaklıklar, termodinamik verim açısından avantaj sağlasa da, silindir duvarlarına olan ısı transferini artırma riski taşımaktadır. Öte yandan %100 Dizel ve %20 Doğalgaz senaryolarında, yanmanın daha çok difüzyon kontrollü ve zamana yayılmış karakteri nedeniyle, ortalama sıcaklıklar daha düşük seviyelerde kalmıştır. Doğalgazın yüksek özgül ısı, yanma odası sıcaklığını baskılayarak daha soğuk bir yanma (LTC - Düşük Sıcaklık Yanması) ortamı sağlamış, bu da motorun termal dayanımı açısından olumlu bir sonuç doğurmuştur. Ancak hidrojenin dahil olduğu karışımlarda, silindir içinde yerel olarak 2200-2400 Kelvin seviyelerini aşan sıcaklık adacıklarının oluştuğu, sıcaklık kontur analizlerinde net bir şekilde görülmüştür.

### **Emisyon değerleri**

Simülasyon sonuçları, NO<sub>x</sub> oluşumunun doğrudan silindir içi sıcaklıkla ilişkili olduğunu teyit etmiştir (Termal NO<sub>x</sub> mekanizması). %100 Dizel ve yüksek Doğalgaz oranlı senaryolarda, sıcaklıkların nispeten düşük kalması sayesinde NO<sub>x</sub> emisyonları minimum seviyede ölçülmüştür. Ancak, karışıma hidrojen eklendiğinde ve hidrojen oranı %5'ten %20'ye doğru artırıldığında, NO<sub>x</sub> emisyonlarında dramatik bir artış kaydedilmiştir. %20 Hidrojen senaryosu, en yüksek yanma sıcaklığını ürettiği için en yüksek NO<sub>x</sub> emisyonuna (yaklaşık 2800 ppm seviyelerine kadar) neden olmuştur. Bu sonuç, RCCI motorlarında hidrojen kullanımının en büyük dezavantajının NO<sub>x</sub> kontrolü olduğunu ve bu yakıtla çalışırken EGR (Egzoz Gazı Geri Devri) gibi sıcaklık düşürücü stratejilerin zorunlu olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın en çarpıcı bulgularından biri İS emisyonlarında görülmüştür. Referans alınan %100 Dizel senaryosu, en düşük İS emisyonlarından birisini vermiştir. Buna karşılık, %20 Hidrojen kullanılan senaryoda İS emisyonları neredeyse sifıra yakın seviyelere inmiştir. Bu durumun iki temel sebebi belirlenmiştir: Birincisi, hidrojenin yapısında karbon (C) atomu bulunmamasıdır. İkincisi ise, hidrojenin yarattığı yüksek sıcaklık ortamının oluşan az miktardaki kurum partiküllerini de oksitleyerek (yakarak) yok etmesidir. Doğalgaz katkılı senaryolarda da belirgin bir iyileşme sağlanmış olsa da, hidrojenin "karbonsuz" yapısının sağladığı İS azaltma performansı en üstün sonuç olarak kayıtlara geçmiştir.

CO emisyonları incelendiğinde, %100 Dizel senaryosunda, özellikle yanmanın ilk evrelerinde ve lokal oksijen yetersizliği olan bölgelerde yüksek CO oluşumu gözlemlenmiştir.

Hidrojen katkılı senaryolarda ise CO seviyeleri belirgin şekilde düşmüştür. Hidrojenin yanma ortamını ısıtması, CO'nun CO<sub>2</sub>'ye dönüşüm reaksiyonlarını hızlandırmış ve yanma verimini artırmıştır. Ancak, HC (Yanmamış Hidrokarbon) emisyonlarında durum farklılaşmaktadır. Porttan enjekte edilen gaz yakıtlar (Doğalgaz ve Hidrojen), özellikle silindir duvarına yakın sönümlenme bölgelerinde tam yanmadan kalabilmektedir. Simülasyonlarda, Doğalgaz oranının yüksek olduğu durumlarda HC emisyonlarının arttığı, ancak hidrojen eklendiğinde bu artışın sınırlandırıldığı görülmüştür. Hidrojenin alev sönümlenme mesafesinin kısa olması, duvar kenarlarındaki yakıtın dahi yanmasını sağlayarak HC emisyonlarını düşürme potansiyeli sergilemiştir.

Yakıtın kimyasal bileşimi gereği, hidrojen ilavesi toplam karışımdaki Karbon/Hidrojen (C/H) oranını düşürmektedir. Analiz sonuçları, hidrojen oranının arttığı senaryolarda CO<sub>2</sub> emisyonlarının lineer olarak azaldığını göstermiştir. %20 Hidrojen senaryosu, birim enerji başına en düşük karbon ayak izine sahip senaryo olmuştur. Doğalgaz katkısı ise emisyonda yükselmeye sebep olmuştur.

### **Sprey penetrasyonu ve Türbülans kinetik enerji değerleri**

Sprey penetrasyonu ve Türbülans kinetik enerjisi (TKE) analizlerinde, yakıtların fiziksel özelliklerinin (yoğunluk, viskozite) etkisi net bir şekilde görülmüştür. %100 Dizel yakıtı, yüksek yoğunluğu ve momentumu sayesinde silindir içinde en uzun sprej penetrasyon mesafesine ulaşmıştır. Buna karşılık, gaz fazında verilen Hidrojen ve Doğalgaz, silindir içi gaz yoğunluğunu değiştirerek dizel sprejinin dağılımını etkilemiştir. Hidrojenin düşük yoğunluğu, silindir içindeki ortam direncini azaltmış ancak TKE grafiklerinde görüldüğü üzere, hidrojenin hızlı yanması sonucu oluşan ani gaz genleşmeleri silindir içi türbülansı artırmıştır. Yüksek türbülans, yakıt-hava karışımının kalitesini artırarak is oluşumunu azaltan bir diğer faktör olarak değerlendirilmiştir.

### **Brüt indike verim değerleri**

Bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçları, RCCI motorunda hidrojen ve doğalgaz kullanımının yanma performansı ve emisyonlar üzerindeki zıt etkilerini (trade-off) ortaya koymuştur. Hidrojen ilavesi, yanma hızını ve silindir içi basıncı artırarak ısıl verimi %42,64 seviyelerine kadar yükseltmiş ve karbon içermeyen yapısı sayesinde İS ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını minimize etmiştir. Buna karşılık, hidrojenin neden olduğu yüksek yanma sıcaklıkları termal NO<sub>x</sub> oluşumunu tetiklerken; doğalgaz kullanımı daha düşük sıcaklıklarla NO<sub>x</sub> emisyonlarını baskılamış ancak verim artışında sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, %15 Hidrojen ve %5

Doğalgaz içeren optimize edilmiş karışım, hem yüksek motor performansı hem de dengeli emisyon profili sunarak en verimli strateji olarak belirlenmiştir.

### **Genel Yorum ve Sonuç**

Bu tez çalışmasında elde edilen simülasyon verileri bütüncül olarak değerlendirildiğinde; RCCI motorlarında Doğalgaz ve Hidrojenin Dizel ile birlikte kullanımının, motor performansını ve çevresel etkilerini optimize etme potansiyeli taşıdığı, ancak her yakıtın kendine has avantaj ve dezavantajları (trade-off) olduğu sonucuna varılmıştır.

Hidrojen, yanma hızını ve verimini artıran,  $\dot{Q}$  ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını minimize eden etkili yakıttır. Ancak yarattığı yüksek sıcaklıklar nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmakta ve kontrolsüz yanma (yüksek basınç artış hızı) riski taşımaktadır.

Doğalgaz, yanmayı yavaşlatarak sıcaklıkları ve NO<sub>x</sub> oluşumunu baskılayan, daha stabil bir yanma sağlayan, ancak CO<sub>2</sub> emisyonlarını artırma eğiliminde olan bir yakıttır.

Dizel ise, tutuşmayı başlatan pilot yakıt olarak sistemin garantisidir; ancak tek başına kullanıldığında yüksek CO ve HC üretimiyle çevresel açıdan en dezavantajlı seçenektir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, %15 Hidrojen - %5 Doğalgaz - %80 Dizel veya %5 Hidrojen - %15 Doğalgaz - %80 Dizel gibi optimize edilmiş oranların, tek bir yakıtla bağımlı kalmaktan çok daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu kombinasyonlar, hidrojenin temiz yanma özelliğini doğalgazın termal kontrol yeteneğiyle birleştirilerek; düşük  $\dot{Q}$ , kabul edilebilir NO<sub>x</sub> ve yüksek termal verim hedeflerine aynı anda ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda, hidrojenin neden olduğu NO<sub>x</sub> artışını dengelemek için EGR oranlarının optimize edilmesi, RCCI teknolojisinin ticarileşmesi önündeki engelleri kaldıracaktır.

## KAYNAKÇA

- Abro, M. A. J.** (2020). *Modelling and design of shutter valves for camless engines* (Yüksek Lisans Tezi). Mehran University of Engineering & Technology, Jamshoro.
- Agarwal, A. K., Singh, A. P., Maurya, R. K., Shukla, P. C., Dhar, A. & Gupta, J. G.** (2017). *Combustion, emissions and flow control in CI engines*. Springer, Singapore.
- Ajmeri, K. H., Sharma, S., Shishodia, D., Sharma, S., Singh, S., & Molvi, I.** (2020). Review on possibility to run the diesel engine on hcng fuel. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 7, 79–87.
- Akansu, S. O., Dülger, Z., Kahraman, N., & Veziroğlu, T. N.** (2004). Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 1527–1539.
- Altinkurt, M. D.** (2023). Doğalgaz - dizel çift yakıtlı yanma konseptinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. (Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Arat, H. T., Aydın, K., Baltacıoğlu, E., Yaşar, E., Baltacıoğlu, M. K., Conker, Ç., & Burgaç, A.** (2013). A review of hydrogen-enriched compressed natural gas (hcng)-fuel in diesel engines. *Journal of MacroTrends in Energy and Sustainability*, 1, 115–122.
- Aslam, M. U., Masjuki, H. H., & Kalam, M. A.** (2006). An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle. *Fuel*, 85(5-6), 717-724.
- Boretti, A.** (2011). Advantages and Disadvantages of Diesel-Hydrogen Dual Fuel Engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(15), 9096-9101.
- Boretti, A.** (2012). Advantages of converting diesel engines to run as dual fuel ethanol-diesel. *Applied Thermal Engineering*, 47, 1-9
- Bysveen, M.** (2007). Engine characteristics of emissions and performance using mixtures of natural gas and hydrogen. *Energy*, 32, 482–489.
- Chaudhari, V. D., & Deshmukh, D.** (2022). Fuel flexibility study of various fuels with charge dilution and high compression ratio for medium-load operating rcci engine. *Fuel*, 310, 122163.
- Christensen, M., Johansson, B., & Einewall, P.** (1998). Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) using isooctane, ethanol and natural gas—A comparison with spark ignition operation. *SAE Transactions*, 106, 2221-2234. (SAE Paper 972874).
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A.** (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

- De Bellis, V., Malfi, E., Lanotte, A., & De Felice, M.** (2022). A tabulated chemistry multi-zone combustion model of HCCI engines supplied with pure fuel and fuel blends. *Energies*, 16(1), 265
- Dec, J. E.** (2009). Advanced compression-ignition engines: understanding the in-cylinder processes. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 2727-2742.
- Demirbas, A.** (2009). *Biohydrogen: for future engine fuel demands*. Springer, London.
- Dempsey, A. B., Walker, N. R., Gingrich, E., & Reitz, R. D.** (2013). Comparison of low temperature combustion strategies for advanced compression ignition engines with a focus on double injection. *International Journal of Engine Research*, 15(1), 74-88.
- Dimitriou, P., & Tsujimura, T.** (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24470-24486.
- EIA, U.S. Energy Information Administration** (2021). *International Energy Outlook 2021*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R., et al.** (2002). The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions. *SAE Transactions*, 111, 1431-1447. (SAE Paper 2002-01-1923).
- Glassman, I., & Yetter, R. A.** (2008). *Combustion* (4th ed.). Burlington, MA: Academic Press.
- Hagos, F. Y., Aziz, A. R. A., & Sulaiman, S. A.** (2014). Syngas fuel production, characterization and application in internal combustion engines: A review. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 9, 1664-1677.
- Hanson, R. M., Kokjohn, S. L., Splitter, D. A., & Reitz, R. D.** (2010). An experimental investigation of fuel reactivity controlled PCCI combustion in a heavy-duty engine. *SAE International Journal of Engines*, 3(1), 700-716.
- Heywood, J. B.** (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, New York
- Hiroyasu, H., & Arai, M.** (1990). Structures of fuel sprays in diesel engines. *SAE Transactions*, 99, 1050-1061.
- Huang, Z., Liu, B., Zeng, K., Huang, Y., Jiang, D., Wang, X., & Miao, H.** (2006). Experimental study on engine performance and emissions for an engine fueled with natural gas-hydrogen mixtures. *Energy and Fuels*, 20, 2131-2136.
- Huang, Z., Wang, J., Liu, B., Zeng, K., Yu, J., & Jiang, D.** (2007). Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under different ignition timings. *Fuel*, 86, 381-387.
- IEA.** (2023). *The Role of E-fuels in Decarbonising Transport*. International Energy Agency, Paris.

- IEA, International Energy Agency** (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA
- IPCC.** (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Johnson, T. V.** (2009). Vehicle emissions in review. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2(1), 1-29.
- Kakae, A. H., Paykani, A., & Ghajar, M.** (2014). The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of a natural gas fueled diesel engine. *Fuel*, 138, 316-326.
- Kakae, A.-H., Rahnam, P., & Paykani, A.** (2015). Influence of fuel composition on combustion and emissions characteristics of natural gas/diesel rcci engine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 25, 58-65.
- Kalghatgi, G.** (2014). The outlook for fuels and internal combustion engines. *International Journal of Engine Research*, 15(3), 383-398.
- Khan, M. I., Yasmin, T., & Shakoor, A.** (2016). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785-797.
- Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A. & Reitz, R. D.** (2011). Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to high-efficiency clean combustion. *International Journal of Engine Research*, 12(3), 209-226.
- Kokjohn, S. L., Splitter, D. A., Hanson, R. M., & Reitz, R. D.** (2011). Modeling the impact of combustion phasing and fuel distribution on RCCI engine efficiency and emissions. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 246-268.
- Korakianitis, T., Namasivayam, A. M., & Crookes, R. J.** (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 89-112.
- Kumar, V., Gupta, D., & Kumar, N.** (2015). Hydrogen use in internal combustion engine: a review. *International Journal of Advanced Culture Technology*, 3(2), 87-99.
- Larsen, J. F., & Wallace, J. S.** (1997). Comparison of emissions and efficiency of a turbocharged lean-burn natural gas and hythane-fueled engine. *Transactions of the ASME*, 119, January.
- Li, J., Yang, W., & Zhou, D.** (2014). Review on the management of HCCI engines control. *Energy Conversion and Management*, 87, 279-295.
- Liu, J., Yang, F., Wang, H., & Ouyang, M.** (2012). Numerical study of hydrogen addition to dme/ch4 dual fuel rcci engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(37), 8688-8697.

- Maurya, R. K.** (2018). *Characteristics and control of low temperature combustion engines: Employing gasoline, ethanol and methanol*. Springer.
- Mirza Jamil, Y.** (1993). Lean burn natural gas fueled engines: engine modification versus hydrogen blending. *Dissertation Thesis*, University of Miami.
- Mohammed, S. E., Baharom, M., & Aziz, A. R. A.** (2011). The effects of fuel-injection timing at medium injection pressure on the engine characteristics and emissions of a cng-di engine fueled by a small amount of hydrogen in cng. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 11997–12006.
- Mollenhauer, K., & Tschoeke, K. G.** (2010). *Handbook of diesel engines*. Berlin, Germany: Springer.
- Moradi, J., Gharehghani, A., & Mirsalim, M.** (2020). Hydrogen addition influences on a NG/diesel RCCI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34261-34275
- Nanthagopal, K., Subbarao, R., Elango, T., Baskar, P., & Annamalai, K.** (2011). Hydrogen enriched compressed natural gas (hcng): A futuristic fuel for internal combustion engines. *Thermodynamics Science*, 15, 1145–1154.
- Nieman, D. E., Dempsey, A. B. & Reitz, R. D.** (2012). Heavy-duty RCCI operation using natural gas and diesel. *SAE International Journal of Engines*, 5(2), 270-285.
- Olsen, D. B., Willson, B. D., & Haggander, C.** (2007). Effects of NG percentages on combustion characteristics and exhaust emission on a NG/Diesel RCCI engine. *SAE Technical Paper*, No. 2007-01-0021.
- Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D. & Kato, S.** (1979). Active thermo-atmosphere combustion (ATAC): a new combustion process for internal combustion engines. *SAE Transactions*, 88, 1851-1860.
- OPEC.** (2023). *World Oil Outlook 2045*. Organization of the Petroleum Exporting Countries, Vienna.
- Ozturk, M., Sorgulu, F., Javani, N., & Dincer, I.** (2023). An experimental study on the environmental impact of hydrogen and natural gas blend burning. *Chemosphere*, 329, 138671.
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W.** (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
- Pulkrabek, W. W.** (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Pearson Prentice Hall, New Jersey.

- Rahimi, A., Fatehifar, E., Saray, R.K.** (2010). Development of an Optimized Chemical Kinetic Mechanism for Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion of a Fuel Blend of N-Heptane and Natural Gas Using a Genetic Algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(9), 1141-1159
- Reitz, R. D.** (2013). Directions in internal combustion engine research. *Combustion and Flame*, 160(1), 1-8.
- Reitz, R. D. & Duraisamy, G.** (2015). Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 12-71.
- Reitz, R. D., Ogawa, H., Payri, R., et al.** (2020). *The future of the internal combustion engine*. *International Journal of Engine Research*, 21(1), 3-10.
- Saravanan, N., & Nagarajan, G.** (2008). An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 1769-1775.
- Saravanan, N., Nagarajan, G., & Sanjay, G.** (2020). Impact of hydrogen enrichment on performance and emission characteristics of a CI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8965-8975.
- Saxena, S., & Bedoya, I. D.** (2013). Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(5), 457-488.
- Sierens, R., & Rosseel, E.** (2000). Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122-135, January.
- Splitter, D. A., Hanson, R. M., Kokjohn, S. L., & Reitz, R. D.** (2010). *Reactivity controlled compression ignition (RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels* (SAE Technical Paper No. 2010-01-2266). SAE International.
- Srivastava, D. K., Agarwal, A. K., Datta, A., & Maurya, R. K.** (2018). *Advances in internal combustion engine research*. Springer.
- Stone, R.** (1999). *Introduction to internal combustion engines*. Palgrave, London.
- Stone, R.** (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4th ed.). London, UK: Palgrave Macmillan.
- Verhelst, S.** (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), 1071-1085.
- Verhelst, S. & Wallner, T.** (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490-527.

- Wallace, J. S., & Cattelan, A. I.** (1994). Hythane and cng fueled engine exhaust emission comparison. *Proceedings of the 10th World Hydrogen Energy Conference*, Cocoa Beach, USA, June 20–24, 1761–1770.
- White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E.** (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12), 1292-1305.
- WMO.** (2022). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*. World Meteorological Organization, Geneva. (GAW Report No. 278).
- Woodyard, D.** (2009). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines* (9th ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Zhao, H.** (2003). *HCCI and CAI engines for the automotive industry*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Zhao, H.** (2010). *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines* (Vol. 1). Elsevier.
- Zhao, J., Ma, F., Xiong, X., Deng, J., Wang, L., Naeve, N., & Zhao, S.** (2013). Effects of compression ratio on the combustion and emission of a hydrogen enriched natural gas engine under different excess air ratio. *Energy*, 59, 658–665.