**T.C.**
**SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# HCCI (HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ) BİR MOTORDA NAFTA KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

**DOKTORA TEZİ**

**Samet ÇELEBİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU**

**Temmuz 2021**

**T.C.**
**SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ**
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# HCCI (HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ) BİR MOTORDA NAFTA KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

**DOKTORA TEZİ**

**Samet ÇELEBİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 29/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.**

| JÜRİ | BAŞARI DURUMU |
|---|---|
| Jüri Başkanı: Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU | Başarılı |
| Üye: Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU | Başarılı |
| Üye: Prof. Dr. Ahmet KOLİP | Başarılı |
| Üye: Prof. Dr. H. Serhad SOYHAN | Başarılı |
| Üye: Prof. Dr. Can ÇINAR | Başarılı |

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Samet ÇELEBİ

29/07/2021

# TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği öğretim üyesi Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU'ya ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım hocalarım Doç. Dr. Emre YILMAZ, Doç. Dr. Hamit SOLMAZ ve Dr. Öğr. Üy. Üsame DEMİR'e teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında katkı sunan değerli hocalarım Öğr. Gör. Bekir DÜZCAN'a, Doç. Dr. Alper CALAM'a, Arş. Gör. Serdar HALİS'e ve değerli teknikerler Hasan GÜREL'e ve Mehmet ÖRKMEZ'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca her türlü sabır ve desteği gösteren değerli anneme, babama, aileme ve eşim Merve ÇELEBİ'ye teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**TEŞEKKÜR** ..... **i**
**İÇİNDEKİLER** ..... **ii**
**KISALTMALAR** ..... **iv**
**SİMGELER** ..... **vi**
**TABLOLAR LİSTESİ** ..... **viii**
**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **ix**
**ÖZET** ..... **xii**
**SUMMARY** ..... **xiii**
**BÖLÜM 1. GİRİŞ** ..... **1**
**BÖLÜM 2. İÇTEN YANMALI MOTORLAR ve HCCI'YA GEÇİŞ** ..... **5**
2.1. Buji Ateşlemeli (SI) Motorlar ..... 5
2.2. Sıkıştırma Ateşlemeli (CI) Motorlar ..... 5
2.2.1. Dizel motorlarda enjeksiyon çeşitleri ..... 6
2.2.1.1. Direkt enjeksiyon ..... 6
2.2.1.2. Endirekt enjeksiyon ..... 7
2.2.2. Dizel motorlarda kullanılan yakıtlardan istenen özellikler ..... 7
2.2.3. Konvansiyonel dizel yanması ..... 9
2.3. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI) Motorlar ..... 11
2.3.1. HCCI yanması ..... 16
2.3.2. HCCI yanmasını etkileyen faktörler ..... 19
2.3.2.1. Emme havası sıcaklığının HCCI yanmaya etkisi ..... 21
2.3.2.2. Supap zamanlamasının HCCI yanmaya etkisi ..... 22
2.3.2.3. EGR'nin HCCI yanmaya etkisi ..... 23
2.3.2.4. Yakıt özelliklerinin HCCI yanmaya etkisi ..... 26
2.3.2.5. Hava/yakıt oranının HCCI yanmaya etkisi ..... 28
2.3.2.6. Motor hızının HCCI yanmaya etkisi ..... 29
2.3.2.7. Sıkıştırma oranının HCCI yanmaya etkisi ..... 29
2.3.3. HCCI motorların emisyon karakteristikleri ..... 31

**BÖLÜM 3. LİTERATÜR ÖZETİ ..... 36**
**BÖLÜM 4. MATERYAL ve METOT ..... 44**
4.1. Deney Düzeneği ..... 44
4.1.1. Deney motoru ..... 44
4.1.2. Dinamometre ..... 45
4.1.3. Silindir içi basınç ölçüm sensörü ..... 47
4.1.4. Enjeksiyon sistemi ..... 47
4.1.5. Yakıt ölçüm düzenekleri ..... 50
4.1.6. Emisyon ölçümü ..... 51
4.2. Yakıt Özellikleri ..... 52
4.2.1. Dizel yakıtı ..... 52
4.2.2. Benzin yakıtı ..... 52
4.2.3. Hafif nafta yakıtı ..... 53
4.3. Belirsizlik Analizi ..... 55
4.4. Ölçüm Yöntemi ..... 59
4.5. Hesaplama Yöntemleri ..... 60
4.5.1. Döndürme momenti ..... 60
4.5.2. Efektif güç ..... 61
4.5.3. Özgül yakıt tüketimi ..... 61
**BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ..... 63**
**BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 121**
**KAYNAKLAR ..... 127**

# KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri |
| AÖN | : Alt ölü nokta |
| CFR | : Yakıt araştırma birliği |
| CI | : Sıkıştırma ile ateşleme |
| CO | : Karbon monoksit |
| $CO_2$ | : Karbon dioksit |
| CR | : Sıkıştırma oranı |
| DFC | : Çift yakıtlı yanma |
| DI | : Direkt enjeksiyon |
| DI-HCCI | : Direkt enjeksiyonlu homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli |
| DISI | : Direkt enjeksiyonlu buji ateşlemeli |
| DME | : Dimetil eter |
| DPC | : Dizel pilot yanma |
| DTBP | : Di tetra etil bütil peroksit |
| EGR | : Egzoz gazı resirkülasyonu |
| EHN | : Etil hekzil nitrat |
| GDI | : Direkt benzin enjeksiyonu |
| HC | : Hidrokarbon |
| HCCI | : Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli |
| HFK | : Hava fazlalık katsayısı |
| HRR | : Isı yayılım hızı |
| HTR | : Yüksek sıcaklık oranı |
| IC | : İçten yanmalı |
| IDI | : Endirekt enjeksiyon |
| IMEP | : Ortalama efektif basınç |
| KMA | : Krank mili açısı |
| LTC | : Düşük sıcaklıkta yanma |

| | |
|---|---|
| LTR | : Düşük sıcaklık reaksiyonu |
| MTBE | : Metil tetra bütil eter |
| NO | : Azot monoksit |
| $NO_x$ | : Azot oksit |
| NTC | : Negatif sıcaklık katsayısı |
| ÖYT | : Özgül yakıt tüketimi |
| PACI | : Pilot destekli sıkıştırma ile ateşleme |
| PCCI | : Önceden karıştırılmış dolgulu sıkıştırma ile ateşleme |
| PCI | : Önceden karıştırılmış sıkıştırma ile ateşleme |
| PDF | : Olasılık yoğunluk fonsiyonu |
| PM | : Partikül madde |
| PPC | : Kısmi ön karışımlı sıkıştırma |
| PPCI | : Önceden karıştırılmış sıkıştırma ile ateşleme |
| ppm | : Milyondaki partikül sayısı |
| RCCI | : Reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme |
| SA-HCCI | : Kıvılcım destekli homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme |
| SACI | : Kıvılcım destekli sıkıştırma ile ateşleme |
| SCCI | : Kademeli dolgu sıkıştırma ile ateşleme |
| SI | : Kıvılcım ateşlemeli |
| TÜİK | : Türkiye İstatistik Kurumu |
| UHC | : Yanmamış hidrokarbon |
| ÜÖN | : Üst ölü nokta |

# SİMGELER

| | |
|---|---|
| $b_e$ | : Özgül yakıt tüketimi |
| d | : Sapma |
| $d_i$ | : Ölçüme ait sapma |
| $dm_i$ | : Alev cephesindeki belirli bir miktardaki kütle |
| dP | : Basınç değişimi |
| $dq_i$ | : Kontrollü yanma aşamasında yanan karışımdan açığa çıkan ısı enerjisi değeri |
| dϴ | : Krank mili açısı değişimi |
| F | : Kuvvet |
| i | : Ölçüm sayısı |
| K | : Toplam ısı yayılım reaksiyonu sayısı |
| L | : Kuvvet kolu uzunluğu |
| m | : Dolgu kütlesi |
| M | : Moment |
| $m_j$ | : Kontrollü yanma aşamasında yanan karışımın kütlesi |
| $m_p$ | : Kontrolsüz yanma aşamasında yanan kütle miktarı |
| $\dot{m}_y$ | : Kütlesel yakıt debisi |
| N | : Reaksiyon bölge sayısı |
| n | : Motor hızı, devir sayısı |
| n | : Tekrar edilen ölçüm sayısı |
| P | : Güvenilirlik aralığı |
| $P_e$ | : Efektif güç |
| $P_x$ | : Toplam rastgele belirsizlik |
| Q | : Isı yayılımı |
| q | : Yakıt hava karışımının birim kütlesinin ısıl değeri |
| R | : Toplam belirsizliği içeren doğru ortalama değer |
| $\overline{R}$ | : Ölçümün ortalama değeri |

| | |
|---|---|
| $S_{\overline{x}}$ | : Ölçüm ortalamasının belirsizliğ |
| t | : ν' ye bağlı serbestlik derecesi |
| $T_x$ | : Sistematik belirsizlik |
| $u_R$ | : Sistematik ve rastgele belirsizlik arasındaki bağıntı |
| $x_i$ | : Ölçülen belirli sayıdaki verinin ortalaması |
| $x_m$ | : n tekrarlı ölçümün ortalaması |
| Δt | : Belirli bir hacimdeki yakıtın tüketim süresi |
| ΔV | : Yakıt hacmi |
| $\theta_i$ | : Duyarlılık indeksi |
| $\rho_y$ | : Yakıt yoğunluğu |
| σ | : Standart sapma |

# TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 : İçten yanmalı motorların karşılaştırılması. ..... 15
Tablo 2.2 : Yanma zamanlaması kontrol yöntemleri. ..... 16
Tablo 4.1 : Deney motoruna ait özellikler. ..... 45
Tablo 4.2 : Kontrol panelindeki diğer ölçümler için hassasiyet ve ölçüm aralığı bilgileri. ..... 46
Tablo 4.3 : Enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri. ..... 49
Tablo 4.4 : Hassas teraziye ait teknik özellikler. ..... 50
Tablo 4.5 : Kronometre teknik özellikleri. ..... 51
Tablo 4.6 : Emisyon cihazı teknik özellikleri. ..... 51
Tablo 4.7 : Dizel, benzin ve hafif nafta yakıtlarının özellikleri. ..... 52
Tablo 4.8 : Deneysel bulguların seçilmesi için Chauvenet kriteri. ..... 58
Tablo 4.9 : Belirsizlik değerleri. ..... 59

# ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : Dört zamanlı motor çevrimi. 5
Şekil 2.2 : Farklı direkt püskürtme sistemleri. 6
Şekil 2.3 : Konvansiyonel dizel yanmasının ısı yayılım oranı 9
Şekil 2.4 : Dizel, Benzinli ve HCCI motorda yanmanın gelişimi 13
Şekil 2.5 : HCCI yanmasında $NO_x$ ve is emisyonlarının eşzamanlı olarak azalması 15
Şekil 2.6 : HCCI yanma sürecinde dizel türü yakıtlarda meydana gelen iki aşamalı ısı yayılım profili 17
Şekil 2.7 : HCCI yanmasının kontrol algoritması 20
Şekil 2.8 : SI ve HCCI motorlarındaki supap kalkma miktarları 22
Şekil 2.9 : Farklı yakıtların uçuculuk özellikleri ve kendi kendine tutuşabilme kaliteleri 27
Şekil 2.10 : 95 oktan benzin, benzin muadili izooktan, n-heptan ve PRF95 yakıtlarının silindir içi basınç ve ısı yayılımı üzerindeki etkileri 27
Şekil 2.11 : Hava/yakıt oranının silindir basıncı ve ısı yayılım oranına etkileri 28
Şekil 2.12 : HCCI motorunda sıkıştırma oranının silindir içi basıncına ve ısı yayılım oranına etkisi 30
Şekil 2.13 : HCCI motorunda sıkıştırma oranının tutuşma gecikmesine etkisi (Emme havası giriş sıcaklığı: 70℃, eşdeğerlik oranı: 0,41, yakıt: n-heptan) 30
Şekil 2.14 : HCCI motorda eşdeğerlik oranı (Φ) ve silindir içi sıcaklık değerlerine göre is-NOx emisyonlarının değişimi 31
Şekil 2.15 : Konvansiyonel dizel motorda yanma gelişim evreleri 32
Şekil 2.16 : HCCI, DI dizel ve DI dizel + EGR uygulamalarının karşılaştırılması 32
Şekil 2.17 : Maksimum silindir içi gaz sıcaklığına bağlı olarak CO, $CO_2$ ve $NO_x$ emisyonlarının değişimi 34
Şekil 4.1 : Deney düzeneği. 44
Şekil 4.2 : Deney motoru. 45
Şekil 4.3 : Deney düzeneği. 46
Şekil 4.4 : Dinamometre control paneli 46
Şekil 4.5 : Enjeksiyon kontrol paneli 47
Şekil 4.6 : Silindir içi basınç ölçüm düzeneği. 47
Şekil 4.7 : Enjeksiyon sistemi. 48
Şekil 4.8 : Enjeksiyon sisteminin yapısı. 48
Şekil 4.9 : Mikro kontrol yazılımı. 49
Şekil 4.10 : Hassas terazi. 50
Şekil 4.11 : Kronometre. 50
Şekil 4.12 : Emisyon ölçüm cihazı. 51
Şekil 4.13 : Ham petrolün damıtılması. 54
Şekil 4.14 : Hafif naftanın tehlike sınıflandırma etiketleri. 55
Şekil 4.15 : Çözücü olarak kullanılan hafif aromatik petrol naftasının molekül bağları. 55
Şekil 5.1 : Dizel tam yük döndürme momenti karakteristiği. 63

Şekil 5.2 : Dizel tam yük efektif güç karakteristiği. ..... 64
Şekil 5.3 : Dizel tam yük özgül yakıt tüketimi karakteristiği. ..... 65
Şekil 5.4 : 1900 d/d motor hızındaki dizel kısmi yük özgül yakıt tüketimi karakteristiği. ..... 66
Şekil 5.5 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki döndürme momenti değişimi. ..... 67
Şekil 5.6 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki efektif güç değişimi..... 68
Şekil 5.7 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki ÖYT değişimi..... 69
Şekil 5.8 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki HFK değişimi..... 70
Şekil 5.9 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki HC değişimi. ..... 72
Şekil 5.10 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki CO değişimi. ..... 73
Şekil 5.11 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki NO değişimi. ..... 75
Şekil 5.12 : Standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki NO değişimi. ..... 76
Şekil 5.13 : Standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimi. ..... 77
Şekil 5.14 : HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deneylerde, farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimi. ..... 77
Şekil 5.15 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre döndürme momenti değişimi ..... 79
Şekil 5.16 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre efektif güç değişimi..... 82
Şekil 5.17 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi ..... 83
Şekil 5.18 : HCCI modda farklı yakıt karışımları ile yapılan testlerde motor hızlarına göre HFK değişimi. ..... 86
Şekil 5.19 : Dizel ve HCCI modlarında farklı motor hızı ve yüklerindeki HFK değerleri..... 86
Şekil 5.20 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre HC emisyonu değişimi..... 88
Şekil 5.21 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre CO emisyonu değişimi..... 90
Şekil 5.22 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre NO emisyonu değişimi. ..... 92
Şekil 5.23 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen döndürme momenti grafikleri. ..... 95
Şekil 5.24 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen efektif güç grafikleri..... 96
Şekil 5.25 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen ÖYT grafikleri..... 99
Şekil 5.26 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen HC emisyonu grafikleri..... 100

Şekil 5.27 : HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. ..... 102
Şekil 5.28 : HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi. ..... 104
Şekil 5.29 : HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. ..... 106
Şekil 5.30 : HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi. ..... 108
Şekil 5.31 : HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. ..... 110
Şekil 5.32 : HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi. ..... 112
Şekil 5.33 : HCCI modda %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. ..... 113
Şekil 5.34 : HCCI modda %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. ..... 115
Şekil 5.35 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı motor hızlarında yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri. .... 118

# HCCI (HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA ATEŞLEMELİ) BİR MOTORDA NAFTA KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSINA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Bu çalışmada, bir dizel motor, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) modda çalışır hale dönüştürülmüştür. HCCI modda çalışan motor ile yapılan deneylerde, farklı oranlarda hafif nafta ve benzin karışımları kullanılmıştır. HCCI modda yapılan deneylerde kullanılan yakıtlar; %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzindir. HCCI modda çalışan motor ile yapılan deneylerde, farklı enjeksiyon süreleri ve motor hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Motor hızları 1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d olarak seçilmiştir. Deneylerde, 7 ms ile 15 ms aralığında 0,5 ms artımla farklı yakıt enjeksiyon sürelerinde motordan veri alınabilmiştir. %100 dizel yakıtı, motorun standart dizel modunda çalıştığı şartlarda referans olarak yapılan deneylerde kullanılmıştır.

HCCI modda yapılan deneylerdeki en yüksek tork değeri, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı kullanılan deneyde, 1500 d/d motor hızında, 13,575 Nm olarak ölçülmüştür. Dizel modda, standart dizel yakıtı kullanılarak yapılan deneyler ile HCCI modda, %100 hafif nafta kullanılarak yapılan deneyler kıyaslandığında, 1500 d/d motor hızında, döndürme momentinin %28,52, efektif gücün %28,76, özgül yakıt tüketiminin %25,16, HC emisyonunun %31,27 oranında azaldığı, NO emisyonunun ise tamamen ortadan kalktığı görülmüştür.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre, maksimum torkun ölçüldüğü 1500 d/d motor hızında yapılan deneylerde, karışım içerisindeki benzin oranının artması torkun artmasına ve motorun çalışma aralığının azalmasına sebep olmuştur. Karışımlardaki benzin oranı artışının; düşük motor hızlarında HC emisyonunu azalttığı görülürken, yüksek motor hızlarında yanmada meydana gelen düzensizlik ve vuruntu sebebiyle HC emisyonunu yükselttiği görülmüştür. NO emisyonları ise HCCI yanmasının düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi sebebiyle tamamen ortadan kalkmıştır.

Anahtar kelimeler: Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar, motor performansı, egzoz emisyonları, alternatif yakıtlar

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NAPHTHA USE IN AN HCCI (HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITOIN) ENGINE ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS

## SUMMARY

In this study, a diesel engine was converted to operate homogeneous charge compression ignition (HCCI) mode. In the experiments with the engine operating in HCCI mode, light naphtha and gasoline mixtures in different proportions were used. Fuels used in experiments in HCCI mode; 100% light naphtha, 90% light naphtha + 10% gasoline, 80% light naphtha + 20% gasoline, 70% light naphtha + 30% gasoline, 50% light naphtha + 50% gasoline. In the experiments with the engine operating in HCCI mode, tests were carried out at different injection duration and engine speeds. Engine speeds were selected as 1100 rpm, 1300 rpm, 1500 rpm and 1700 rpm. In the experiments, data was obtained from the engine at different fuel injection duration with an increment of 0.5 ms in the range of 7 ms to 15 ms. 100% diesel fuel was used in the tests performed as a reference under the conditions of the engine operating in standard diesel mode.

The highest torque value in the experiments conducted in HCCI mode was measured as 13,575 Nm at 1500 rpm engine speed in the experiment using 80% light naphtha + 20% gasoline mixture. At 1500 rpm engine speed, comparing the experiments made using standard diesel fuel in diesel mode and using 100% light naphtha in HCCI mode, torque 28.52%, effective power 28.76%, specific fuel consumption 25.16%, HC emission 31.27% decreased and NO emission completely disappeared.

According to the results obtained from the research, in the experiments conducted at 1500 rpm engine speed where the maximum torque was measured, the increase in the gasoline ratio in the mixture caused the torque to increase and the working range of the engine to decrease. Increase of gasoline ratio in mixtures; It has been observed that it reduces HC emission at low engine speeds, while it has been observed to increase HC emission due to the irregularity and knocking occurring in the combustion at high engine speeds. NO emissions have been completely eliminated due to the low temperature combustion of HCCl.

Keywords: Homogeneous charge compression ignition engines, engine performance, exhaust emissions, alternative fuels

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelecekteki çevresel zorluklarla mücadele etmek için gelişmiş enerji teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fosil yakıtların yoğun kullanımı, tüm dünyanın yüzleşmek zorunda olduğu bir dizi ciddi sonuca yol açmaktadır. Bu etkilerden en önemlisi, halihazırda çevresel ve ekonomik etkileri olan küresel ısınmadır. Küresel ısınma, büyük ölçüde sera gazlarındaki artışın sebep olduğu bir durum olarak tanımlanmaktadır. Karbondioksit, su buharı ve metan gibi bu gazlar, güneşten gelen radyasyonu absorbe etmektedir, ısıyı dünya atmosferi içine hapsetmektedir ve dünyanın ortalama sıcaklığının yükselmesine sebep olmaktadır. Maalesef tam yanma sonucunda meydana gelen ürünlerden biri, bir sera gazı olan karbondioksit ($CO_2$)'dir. Bir yanma işleminin ürettiği net $CO_2$ miktarını azaltmanın tek yolu, tüketilen fosil yakıt miktarını azaltmak veya fosil yakıtı düşük karbonlu eşdeğeriyle değiştirmektir. Ek olarak, ülkemizde fosil yakıtların çoğu ithal edildiği için yakıt üreten ülkelere bağımlılık söz konusudur. Sonuç olarak, fosil yakıtların kullanımındaki azalma önemli kazanımları beraberinde getirmektedir. Bu sorunların çözümü için, verimliliği arttırmak veya alternatif düşük karbonlu yakıtlar kullanarak tüketilen yakıt miktarını azaltmak gerekmektedir [1].

Emisyon profilinde büyük paya sahip olan karbondioksit ($CO_2$) emisyonlarının en büyük nedeni enerji kaynaklı kullanımlardır. TÜİK verilerine göre 2016 yılında toplam $CO_2$ emisyonlarının %86,1'i enerjiden, %13,6'sı endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından, %0,3'ü ise tarımsal faaliyetler ve atıktan kaynaklanmıştır. 1990 yılı ile 2016 yılı verileri kıyaslandığında; enerji kaynaklı $CO_2$ emisyonlarının %177,9 oranında, endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı kaynaklı $CO_2$ emisyonlarının ise %157,7 oranında arttığı görülmektedir. Enerji sektörünün bir alt sektörü olan "yakıt yanması" diğer tüm alt sektörlere kıyasla en baskın $CO_2$ emisyon kaynağı olarak görülmektedir. Miktarı da 1990 yılına kıyasla çok yüksek değerlerde artış göstermiştir. "Yakıt yanması" alt sektörünü oluşturan daha alt sektörler de bulunmaktadır. "Çevrim ve enerji" sektörü, 2016 yılında yakıt yanması alt sektörünün sebep olduğu $CO_2$

emisyonlarının %41'inin kaynağını oluşturmaktadır. Bunu, ulaştırma (%23), diğer sektörler (%19), imalat sanayi ve inşaat (%17) takip etmektedir. Görüldüğü gibi ulaştırma kaynaklı $CO_2$ emisyonu en büyük paya sahiptir. Bu verilerden anlaşılacağı gibi, ülkemizdeki $CO_2$ emisyonlarının oluşumunda motorlu taşıtlar önemli bir paya sahiptir. Hem buji ateşlemeli (SI) hem de sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorların gelişimi devam etmektedir. Ancak, her iki motor teknolojisi de gelişmiş olduğundan, iyileştirme alanları sınırlı kalmaktadır. Verimliliği önemli ölçüde arttırma ve motorlu taşıt emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip alternatif bir içten yanmalı motor teknolojisi olan, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar (HCCI) geliştirilmektedir [2].

Çevre problemlerinden dolayı ülkeler motorlu taşıtların çevreye verdiği zararı kısıtlayıcı kanunlar çıkarmaktadır. Bu kanunlara uyum sağlayabilmek için motorlu taşıt üreticileri emisyon önleyici teknolojiler üzerine çalışmalar yapmak zorunda kalmaktadır. Geleneksel SI (Spark Ignition – Buji Ateşlemeli) ve CI (Compression Ignition – Sıkıştırma Ateşlemeli) motorlar üzerinde sürekli iyileştirme yapılmaktadır. Bu gelişmeler sayesinde motorların yakıt tüketiminde ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler sağlanmaktadır.

Sıkıştırma oranlarının vuruntudan kaynaklı olarak arttırılamaması, SI motorların gelişimlerini sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı SI motorların ısıl verimleri düşüktür. CI motorlarının gelişimlerinin önünde ise karakteristik olarak aşılamayan, yüksek $NO_x$ emisyonu sorunu bulunmaktadır. CI motorları, silindir içine bol miktarda hava alabilmekte ve sıkıştırma ile ateşleme yapılmasından dolayı çok yüksek sıkıştırma oranlarına ulaşabilmektedir. Bu nedenle ısıl verimleri yüksektir. CI motorlarda, silindire alınan bol miktardaki hava ile yanma sonunda ulaşılan yüksek sıcaklıklar $NO_x$ emisyonu oluşumlarını beraberinde getirmektedir.

SI ve CI motorların avantajlarını aynı anda sağlayacak yeni bir yaklaşım olan HCCI motorlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. HCCI motorların çalışması için yanmanın kısmi homojen veya tam homojen şartlarda oluşturulması gerekmektedir. HCCI motorlarda homojen karışım sıkıştırma ile ateşlenmektedir. Yanma her ne kadar dizel prensibine benzer şekilde sıkıştırma ile başlatılsa da HCCI motorlarda yanma şekli dizel yanmasından tamamen farklıdır. HCCI prensibinde yanma odası içindeki karışımın homojen bir şekilde dağılması ve yanmanın tüm bölgelerde aynı anda başlaması hedeflenmektedir. Dizel motorlarda, yanma odasına sonradan püskürtülen

yakıtın heterojen bir yapı oluşturduğu bilinmektedir ve yanma belirli bir bölgeden başlayarak difüzyon alevi şeklinde yanma odasına yayılmaktadır. HCCI modda çalışmanın sağlanabilmesi için yakıtın özelliklerine göre silindir içi şartların oluşturulması gerekmektedir.

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli – Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) motorlar üzerine çalışılmasının nedenleri arasında, düşük $NO_x$ emisyonu ve yüksek ısıl verim elde edilebilmesi sayılabilmektedir. Fakat uygulamadaki zorluklardan dolayı günümüzdeki taşıtlarda kullanımı yaygınlaşamamıştır. HCCI motorların başlıca dezavantajları; yanma safhalarının doğrudan kontrol altına alınamaması, çalışma aralığının dar olması ve yanma sıcaklığının düşük olmasından dolayı HC emisyonlarındaki artışlardır.

Günümüzde içten yanmalı motor olarak kullanılan iki yaygın teknoloji bulunmaktadır. Bunlar, buji ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli motor teknolojileridir. Bu motor teknolojileri üzerinde yapılan çalışmalar ile yakıt tüketimi ve emisyon miktarlarında azalmalar sağlanabilmiştir. İçten yanmalı motorların çalışmasına yeni bir yaklaşım olarak geliştirilen homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli çalışma, son zamanlarda bilim insanlarının üzerinde çalıştığı bir konudur. HCCI motor teknolojilerinin geliştirilmesi kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, benzin benzeri yakıtların homojen karışımlı olarak yanma odasına gönderildiği ve yüksek sıkıştırma oranlarında sıkıştırma ateşlemeli olarak yakıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların amaçları; içten yanmalı motorlardan elde edilen ısıl verimin yükseltilmesi, yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının azaltılmasıdır.

Artan hava kirliliği ve yakıt maliyetleri nedeniyle, alternatif yakıtlara ve yeni motor teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, yüksek ısıl verim ve düşük egzoz emisyonları için alternatifler üzerine çalışılmaktadır. Buji ateşlemeli motorların (SI) vuruntu problemi, sıkıştırma oranını sınırlar. Öte yandan, yüksek sıkıştırma oranına (CR) sahip sıkıştırma ateşlemeli motorlarda (CI) partikül madde ve azot oksit ($NO_x$) emisyonları yüksek çıkmaktadır. Farklı bir yanma modeli olan homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlar (HCCI), ısıl verimi arttırmakta, partikül madde ve $NO_x$ emisyonlarını da aynı anda azaltmaktadır [3].

Gelişmiş, düşük sıcaklıkta yanma (LTC), hem $NO_x$ hem de PM'yi sıfır seviyelerine indirebilmektedir. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) motordaki LTC,

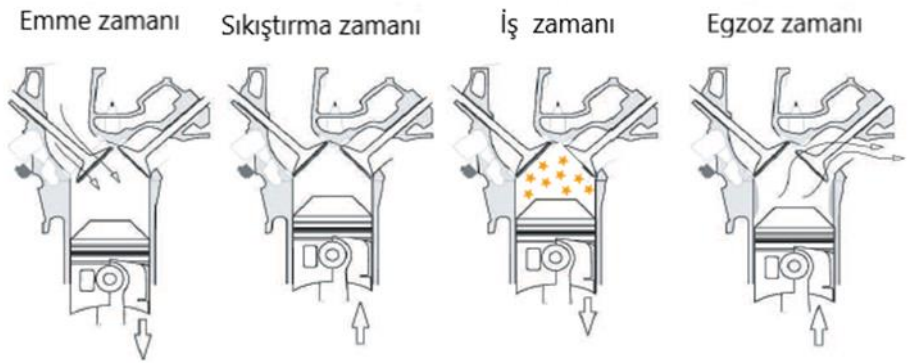
yüksek ısıl verime paralel olarak temiz yanma sağlayan bir teknolojidir. $NO_x$ oluşumunu önleyen düşük sıcaklık, aynı zamanda partikül maddeden arındırılmış dumansız bir egzoz gazı veren, yüksek oranda seyreltilmiş bir karışımın hacimsel yanması ile elde edilmektedir [4].

Bu çalışmada, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) bir motorda hafif nafta&benzin karışımlarının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, 1100 d/d ile 1700 d/d arasında 100 d/d artımla farklı motor hızlarında, 7 ms ile 15 ms aralığında 0,5 ms artımla farklı püskürtme sürelerinde ve %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin ve %50 hafif nafta + %50 benzin olmak üzere farklı yakıtlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayı gerçekleştirebilmek için tek silindirli, dört zamanlı, sıkıştırma ateşlemeli, hava soğutmalı bir dizel motor, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli modda çalışacak şekilde dönüştürülmüştür. Bunun için, bir püskürtme sistemi tasarlanmıştır. Bu püskürtme sistemi ile emme manifolduna istenen süre ve miktarlarda yakıt püskürterek homojen karışım oluşturulmuştur.

# BÖLÜM 2. İÇTEN YANMALI MOTORLAR ve HCCI'YA GEÇİŞ

## 2.1. Buji Ateşlemeli (SI) Motorlar

HCCI motorları açıklamadan önce, HCCI için bir temel ve bağlam oluşturmak için buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorların çalışması açıklanmıştır. Şekil 2.1; SI, CI ve HCCI için dört zamanlı bir çevrimi göstermektedir. SI motorunda, emme zamanı sırasında silindire homojen bir yakıt-hava karışımı gönderilir. Bu yakıt-hava karışımı sıkıştırma zamanında sıkıştırılır. Daha sonra karışımın tutuşmasını tetikleyen bir kıvılcım oluşturulur. Bu yanma işlemi sırasında, yanma odasındaki gazlar genişler ve pistonu alt ölü noktaya doğru iterek hareket ettirir. Piston daha sonra üst ölü noktaya hareket ederek egzoz gazlarını egzoz valfi üzerinden silindirin dışına iter [1].




Şekil 2.1 : Dört zamanlı motor çevrimi [1].

## 2.2. Sıkıştırma Ateşlemeli (CI) Motorlar

Taşıtlarda içten yanmalı motor olarak, buji ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli motorlar olmak üzere iki farklı prensipte çalışan motorlar kullanılmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorları 1892 yılında Rudolf Diesel keşfetmiştir. Bu motorlar, emme manifoldundan silindire alınan havanın sıkıştırılarak, sıcaklığın yakıtı tutuşturacak kadar arttırılması prensibi ile çalışmaktadır. Bu motorlar mucidinin ismi olan dizel adını almıştır. Isıl verimlerinin yüksek olması, egzoz emisyonlarının ve yakıt

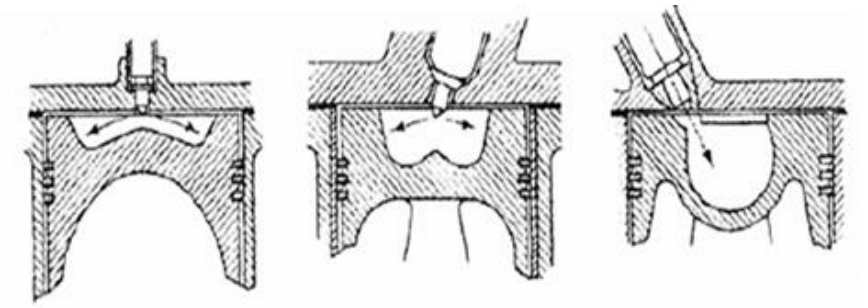
sarfiyatlarının düşük olması gibi avantajları sebebiyle, günümüzde otomobil, otobüs, kamyon, traktör, iş makinesi, lokomotif, gemi ve jeneratörün de aralarında sayılabileceği geniş bir alanda kullanılmaktadır [5, 6].

### 2.2.1. Dizel motorlarda enjeksiyon çeşitleri

Maksimum güç ve minimum egzoz emisyonlarına sahip bir dizel motorun tasarlanabilmesi için; enjeksiyon karakteristiğinin, yanma odasındaki hava hareketlerinin ve yanma odası geometrisinin idealize edilmesi gerekmektedir. Dizel motorlarda temel olarak iki farklı yöntemle karışım oluşturulmaktadır. Bu yöntemler; direkt enjeksiyon (DI) ve endirekt enjeksiyon (IDI) yöntemleridir. Direkt enjeksiyonda yakıt doğrudan silindir içine püskürtülür. Endirekt enjeksiyonda ise yakıt silindire bağlı ayrı yanma odasına püskürtülmektedir [5, 7].

#### 2.2.1.1. Direkt enjeksiyon

Bu enjeksiyon sistemi ile çalışan motorlarda karışım, enjeksiyon sisteminin kinetik enerjisinden etkilenmektedir. Bundan dolayı en iyi yanmanın elde edilebilmesi için enjeksiyon sistemi tasarımı çok önemlidir. Yanmanın kalitesini etkileyen bir diğer parametre ise silindir içindeki havanın hareketidir. Direkt enjeksiyonlu motorlarda yanma odası piston tepesinde bir oyuk şeklinde tasarlanmaktadır. Yakıt bu hacme püskürtülmektedir [5, 8].



Şekil 2.2 : Farklı direkt püskürtme sistemleri [8].

Silindir içindeki hava akımının türbülansı piston tepesindeki oyuklar yardımıyla arttırılmaktadır. Yanma odasındaki havanın türbülansı arttıkça karışımın daha iyi oluşması ve emisyonların azaltılması mümkün olmaktadır. Ancak bu durum karışımın daha iyi yanması sonucu artan sıcaklıklar sebebiyle azot oksit emisyonlarının artışına sebep olmaktadır. Silindir başına bir emme ve bir egzoz supabı bulunan motorlarda

enjektör, silindir tepesine eğik şekilde yerleştirilmektedir. Silindir başına iki emme ve iki egzoz supabı bulunan motorlarda pompalama kayıpları düşüktür ve enjektör tam silindirin merkezine yerleştirilmektedir. Silindir çapı küçük olan motorlarda püskürtme basıncı düşüktür ve yakıt karışımı silindir içindeki türbülans ile sağlanmaktadır. Silindir çapı büyük olan motorlarda püskürtme basıncı yüksek olurken silindir içindeki hava hareketi daha yavaş olmaktadır. Direkt enjeksiyonlu motorlarda yakıt ve havanın daha iyi karışabilmesi için enjektörler çok delikli olarak yapılmaktadır. Direkt enjeksiyonlu motorların endirekt enjeksiyonlu motorlara göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir; ısı transfer yüzeyinin küçük olmasından dolayı ısıl kayıplar daha azdır, ilk çalışma daha kolaydır, sıkıştırma oranı daha düşük olduğu için mekanik sürtünme kayıpları daha azdır, performansı daha yüksektir, yakıt tüketimi daha düşüktür [5, 7, 9, 10].

#### 2.2.1.2. Endirekt enjeksiyon

Bu sistemde yakıt, yanma odasına bağlı ayrı bir hacme püskürtülmektedir. Yanma, yakıtın püskürtüldüğü ön yanma odasında başlamaktadır. Yanma başladığında yükselen basınç ve sıcaklıklar ile yanmaya devam eden karışım ana yanma odasına hareket etmektedir [9].

Endirekt enjeksiyonlu motorlarda sıkıştırma oranları direkt enjeksiyonlu motorlara göre daha yüksektir [6,11]. Bu sistemde yanma başlangıcında tutuşan karışımın ana yanma odasına geçişi basınç kuvvetiyle gerçekleştiği için enjeksiyon basıncı ve karakteristiği büyük önem taşımaktadır. Isı kayıplarının bu sistemde fazla olmasından dolayı ilk çalışma direkt enjeksiyonlu sistemlere göre daha zor olmaktadır. Bu sorunun çözümü için kızdırma bujileri kullanılmaktadır [5].

Direkt enjeksiyonlu motorlara göre endirekt enjeksiyonlu motorlar yüksek sıkıştırma oranı ile çalıştıkları için daha gürültüsüzdür, mekanik ve ısıl gerilmeleri daha düşüktür. Ayrıca yakıt tüketimleri daha yüksektir [9, 10, 12].

### 2.2.2. Dizel motorlarda kullanılan yakıtlardan istenen özellikler

İçten yanmalı motorlarda enerjinin açığa çıkabilmesi için yakıtın silindir içinde hava ile reaksiyona girmesi gerekmektedir. Bu sebeple reaksiyon tamamlanana kadar karışımın yanma odasında kalabilmesi gerekmektedir. Ancak bu süre milisaniyeler

seviyesindeki çok kısa bir zaman dilimi olduğu için bir anda yanabilen ve enerjisini açığa çıkarabilen özellikteki yakıtların kullanılması gerekmektedir. Hidrokarbonların uçucu olanlarının tutuşma sıcaklıkları yüksektir. Dizel motorlarda kullanım için ham petrolün damıtılması ile orta seviyelerde elde edilen, düşük uçuculuğa sahip, kaynama sıcaklığı 250-370℃ arasında olan yakıtlar daha uygun olmaktadır. Dizel yakıtlarında parafinler, naftenler, olefinler ve aromatikler hidrokarbon içeriği olarak bulunmaktadır ve karbon sayıları 8 ile 18 arasındadır [5, 9, 10, 12, 13].

Dizel motorlarda tutuşmanın başlaması için, silindir içindeki hava sıkıştırılarak sıcaklık değeri 500-700℃ ve basınç değeri 30-45 bar arasında değişen şartlara ulaştırılmalıdır. Silindir içerisinde bu şartlar sağlandıktan sonra piston üst ölü noktaya gelmeden önce yakıt enjeksiyonu başlatılmalıdır [6]. Böylece yakıt hava karışımı kendi kendine tutuşmaktadır. Yakıt püskürtüldükten sonra tutuşma için belirli bir süre geçmektedir. Bu süreye tutuşma gecikmesi denilir ve dizel motorlarda yanma karakteristiğini belirleyen en önemli parametredir. Dizel motorlarda yakıt enjeksiyonu sıvı olarak gerçekleştirildiği için elde edilen yakıt-hava karışımı buji ateşlemeli motorlardaki kadar homojen olamamaktadır. Buharlaşma için belirli bir zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zaman, tutuşma gecikmesi süresine eşit veya bu süreden daha kısa olduğunda dizel vuruntusu meydana gelmektedir. Bu durumda dizel motorlarda vuruntunun azaltılabilmesi için, yakıtın enjeksiyon şartlarında silindir içinde kolay buharlaşması ve kendi kendine tutuşma yeteneğinin iyi olması gerekmektedir [9, 12, 14-17].

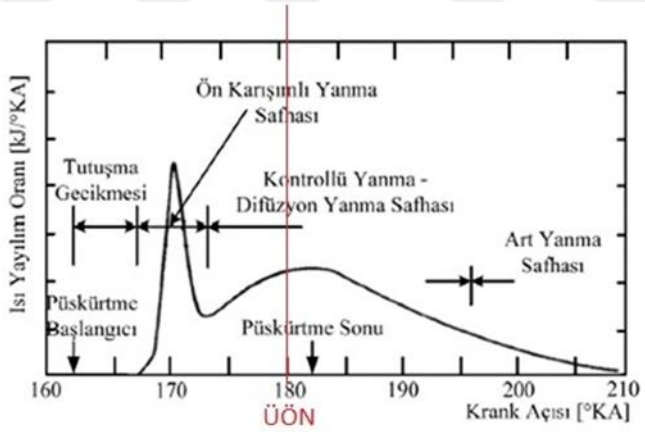
Viskozite ve akma noktası, dizel motorlarda kullanılan yakıtlardan istenen önemli özelliklerdir. Viskozite; akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Viskozite yüksek olduğunda akış zor olmaktadır. Bu durumda yakıtın enjeksiyon sistemindeki hareketi güçleşecektir ve püskürtülen yakıtın ortalama damlacık çapı artacaktır. Viskozite düşük olduğunda ise yakıt kolay akacak ve püskürtme sırasında daha küçük ortalama damlacık çapına sahip yakıt püskürtülecektir. Ancak bu durum, yakıt sisteminde sızıntı ve aşınma gibi problemlere sebep olacaktır. Akma noktası; akışkanın akma özelliğinin kaybolmaya başladığı noktayı ifade etmektedir. Dizel yakıtının çalışma koşullarında donmaması ve akma özelliğinin kaybolmaması büyük önem arz etmektedir [9, 15].

Yakıtlar bir bakımdan iyi performans verirken diğer bakımdan kötü özelliklere sahip olabilmektedir. Her yakıtın kendi karakteristik özelliği bulunmaktadır. Örnek olarak; yakıt içindeki parafin oranı yüksek olduğunda düşük sıcaklık performansı kötüleşirken

yanma yeteneğinde iyileşme görülmektedir. Aynı durum aromatikler için de geçerlidir. Aromatik yüzdesi artan yakıtın ısıl değeri yükselirken, aynı zamanda duman miktarı artmaktadır [9, 14, 17].

### 2.2.3. Konvansiyonel dizel yanması

Yanma süreci konvansiyonel dizel motorlarda zaman ve hacim bakımından heterojendir. Konvansiyonel dizel yanmasının safhaları Şekil 2.3'te görülmektedir. Sıkıştırma zamanı sonuna doğru sıcaklığı ve basıncı arttırılan havanın içerisine yakıt sıvı damlacıklar halinde püskürtülür, parçalanır ve sıvı fazdan gaz fazına geçiş süreci hızlanır. Bu aşamada yanma odasına püskürtülen yakıtın hareketi karışım oluşumunda önemlidir. Sıvı olarak püskürtülen yakıt bu süreçte buharlaşmaya başlar. Henüz kimyasal reaksiyon gerçekleşmemiştir. Ortam sıcaklığı 750 K gibi düşük bir seviyede iken buharlaşan yakıtın kendi kendine tutuşma süreci başlar. Bu aşamada silindir içi basınç bir miktar yükselir. Sıcak hava ile karışmaya devam eden yakıtın sıcaklığı da artmaktadır. Püskürtmenin başladığı ilk an ile bu süre arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılmaktadır [8, 18, 19].




Şekil 2.3 : Konvansiyonel dizel yanmasının ısı yayılım oranı [7, 8, 19, 20].

Bu safhadan sonra kendi kendine tutuşma safhasına geçilir. Bu süreç ön karışımlı yanma olarak da isimlendirilmektedir. Tutuşma gecikmesi süresi içinde püskürtülmüş olan yakıt bu safhada yanmaktadır. Bu nedenle tutuşma gecikmesi süresinin uzunluğu bu süreci etkilemektedir. Şekil 2.3'te tutuşma gecikmesi safhasında yanma odasında biriken yakıtın çok kısa bir sürede aniden yandığı görülmektedir. Şekil 2.3'te yanmanın devam ettiği ortama yanmaya hazır halde katılan yakıtın hızlı bir şekilde yanması ile birlikte ısı yayılım oranının en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir.

Yanma odasında biriken yakıtın yanıp bitmesi ile birlikte ısı yayılım oranının düştüğü Şekil 2.3'te görülmektedir [7, 8, 19, 20].

Yanma odasında birikmiş olan yakıtın ani bir şekilde yanması ile ön karışımlı yanma süreci sona ermekte ve bu süreçten sonra püskürtülen yakıt doğrudan yanmaya katılmaktadır. Püskürtülen yakıtın gecikmeye uğramadan doğrudan yanmaya katıldığı bu sürece kontrollü yanma veya difüzyon yanma adı verilir. Silindir içi sıcaklık bu süreçte çok yüksek değerlere çıkmaktadır. Ortamdaki bu yüksek sıcaklıklar sebebiyle yakıtın oksidasyonu için gerekli olan buharlaşma, ayrışma ve havaya karışma için yeterli süre kalmamaktadır. Bu da sonuç olarak is emisyonlarının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Oluşan bu is partikülleri uygun koşullarda oksijen ile yanma eğilimindedir ancak oluşan tüm is partikülleri yanmaya fırsat bulamadığı için bu süreç sonunda bir miktar is partikülü kalmaktadır [21, 22].

Bu süreçlerden sonra son aşama olan art yanma safhasına geçilir. Bu aşamada enjektörden püskürtme bitmiştir ve silindirde kontrollü yanma safhasından geriye kalan is partikülleri ve bu aşamaya kadar yanmaya fırsat bulamamış olan silindir cidarlarına yapışmış yakıtlar yanmaktadır. Bu süreçte piston alt ölü noktaya hareket ettiği için silindir içi basınç ve sıcaklığında azalma meydana gelmektedir. Sıcaklık belirli bir seviyeye kadar düştüğünde is emisyonlarının açığa çıkma hızı düşer ve $NO_x$ emisyonlarının üretimi tamamen durur. İş zamanı sonunda egzoz supabı açılana kadar HC ve CO seviyelerinde bir değişiklik olmaz [19-22].

Sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorlar buji ateşlemeli (SI) motorlara göre, giriş "dolgusunun" (emme zamanı sırasında motora alınan akışkan) yalnızca havadan oluşması bakımından farklılık göstermektedir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda silindire alınan hava daha sonra sıkıştırılır ve yanma, silindire yakıt enjeksiyonu yapılması ile başlatılır. Sıkıştırılan hava, yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşır ve bu şartlarda iken püskürtülen yakıt ile reaksiyona girerek yanmayı meydana getirir. CI motorların verimlerinin yüksek olmasının sebebi yüksek sıkıştırma oranlarıdır. Bunun aksine SI motorlarda vuruntu nedeniyle yüksek sıkıştırma oranlarına çıkılamadığı için verimleri CI motorları kadar yüksek değildir. Vuruntu sırasında, karışımın bir kısmı aynı anda reaksiyona girerek kısa sürede büyük miktarda enerji açığa çıkarır ve motora potansiyel olarak zarar verebilecek çok yüksek basınçlara neden olur. Emisyonlarla ilgili olarak, CI motorları, önceden karıştırılmamış alev nedeniyle SI motorlarından çok daha fazla is emisyonları üretir. Ek olarak, bu

motorların her ikisindeki alev sıcaklığı adyabatik alev sıcaklığına çok yakındır ve yüksek azot oksit ($NO_x$) üretimine neden olur. Son işlem, SI motorlarında $NO_x$'i etkili bir şekilde azaltır, ancak CI motorlarında henüz istenen seviyede değildir [1].

### 2.3. Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI) Motorlar

İlk HCCI yanması ile ilgili araştırmalar 1979'da Noguchi ve Onishi tarafından yapılmıştır. Benzinli iki zamanlı bir motorda yanma sürecini kontrol etmek için yapılan bir çalışmadır. Art egzoz gazlarının enerjisinden faydalanarak HCCI yanmasını gerçekleştirmeye çalışmışlardır [23-26]. Dört zamanlı motorlarda ilk HCCI çalışması Foster ve Najt tarafından 1983'te yapılmıştır [27]. Çeşitli yakıtlarla farklı motor hızlarında yaptıkları çalışmalarda, dört zamanlı motorlarda iki zamanlı motorlara göre art egzoz gazlarından kalan enerji miktarının düşük olmasından dolayı bunun yerine emme havası sıcaklığının yükseltilmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. 1992'de Stockinger'in yaptığı bir çalışmada, emme havası sıcaklığının ve sıkıştırma oranının yükseltilmesi ile benzinli bir motor HCCI modunda çalışacak şekilde dönüştürülmüştür. Bu çalışmada, 1,6 litrelik bir motor HCCI yanmasının testi için dönüştürülmüş ve motor veriminin kısmi yükte %14'ten %34'e yükseldiği gözlemlenmiştir [23, 27-30]. Tüm çalışmalarda, HCCI yanmasının $NO_x$ ve is emisyonlarını belirgin bir şekilde azalttığı ve CO ve HC emisyonlarında ise düşük sıcaklık yanması sebebiyle artış olduğu görülmektedir. HCCI yanması uygun motor hızı ve yüklerde kullanılabilmektedir. Motor hızı yüksek olduğunda ve motor yükü çok düşük seviyelerde olduğunda kısmi yanmaların meydana gelmesi ve yüksek yüklerde meydana gelen ani erken yanmadan kaynaklı vuruntunun oluşması buna sebep olarak gösterilmektedir. Bu nedenle, çok yüksek yüklerde sıkıştırma ateşlemeli veya buji ateşlemeli yanma sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu sayede çift kullanım moduna sahip motorlar hem düşük yüklerde hem de tam yükte ihtiyacını karşılayacak geniş bir aralıkta çalışabilmektedir. Günümüzde HCCI yanmasını kontrol edebilmek ve farklı yakıtların HCCI modunda kullanılabilirliğini tespit edebilmek için araştırmalar yapılmaktadır [19, 23-30].

HCCI tekniği ile çalışan motorlarda, silindir içerisinde homojen bir karışım oluşturulmakta ve bu oluşturulan homojen karışım sıkıştırma sonu şartlarında ısınan hava ile kendi kendine tutuşturulmaktadır. HCCI motorların çalışması için kullanılan bu iki temel prensip ile is ve $NO_x$ emisyonları sıfır düzeyine düşürülebilmektedir.

Fakat bu şartları sağlamak pratikte bazı sorunları beraberinde getirmektedir. HCCI çalışması için karışımın tam homojen oluşturulması gerekmektedir. Bu sayede geleneksel dizel yanmasından farklı olarak, sıkıştırma sürecinde artan basınç ve sıcaklıklar ile homojen karışımın kendi kendine tutuşması sağlanmakta ve silindirin her yerindeki homojen dolgu aynı anda yanmaktadır. Sonuç olarak, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi HCCI tekniği ile çalışan motorlarda silindirin her yerinde başlayan yanma sayesinde, buji ateşlemeli motorlardaki alev cephesi sebebiyle oluşan yüksek sıcaklıklar meydana gelmeyecektir. Düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen bu yanma ile birlikte $NO_x$ emisyonları çok önemsiz seviyelerde kalacaktır. Ancak homojen karışımın fakir olmasından dolayı is emisyonlarında artış görülecektir [18, 19].

Şekil 2.4'te buji ateşlemeli, HCCI ve sıkıştırma ateşlemeli motorlar ısı yayılım oranı açısından karşılaştırılmıştır. Buji ateşlemeli motorlarda meydana gelen yanma incelendiğinde, silindirdeki dolgunun bir alev cephesi ile yanmamış ve yanmış bölgelere ayrıldığı görülmektedir. Bu sebeple ısı yayılımı reaksiyon bölgesi ile sınırlı kalmaktadır. Yanma sonucunda ortaya çıkan toplam ısı yayılımı (kümülatif ısı yayılımı), aşağıda gösterildiği gibi alev cephesinde belirli bir miktardaki kütlenin ($dm_i$) yanması ile oluşan ısı olarak tanımlanmaktadır [19].

$$Q = \int_0^N q.dm_i \tag{2.1}$$

q: yakıt hava karışımının birim kütlesinin ısıl değerini,

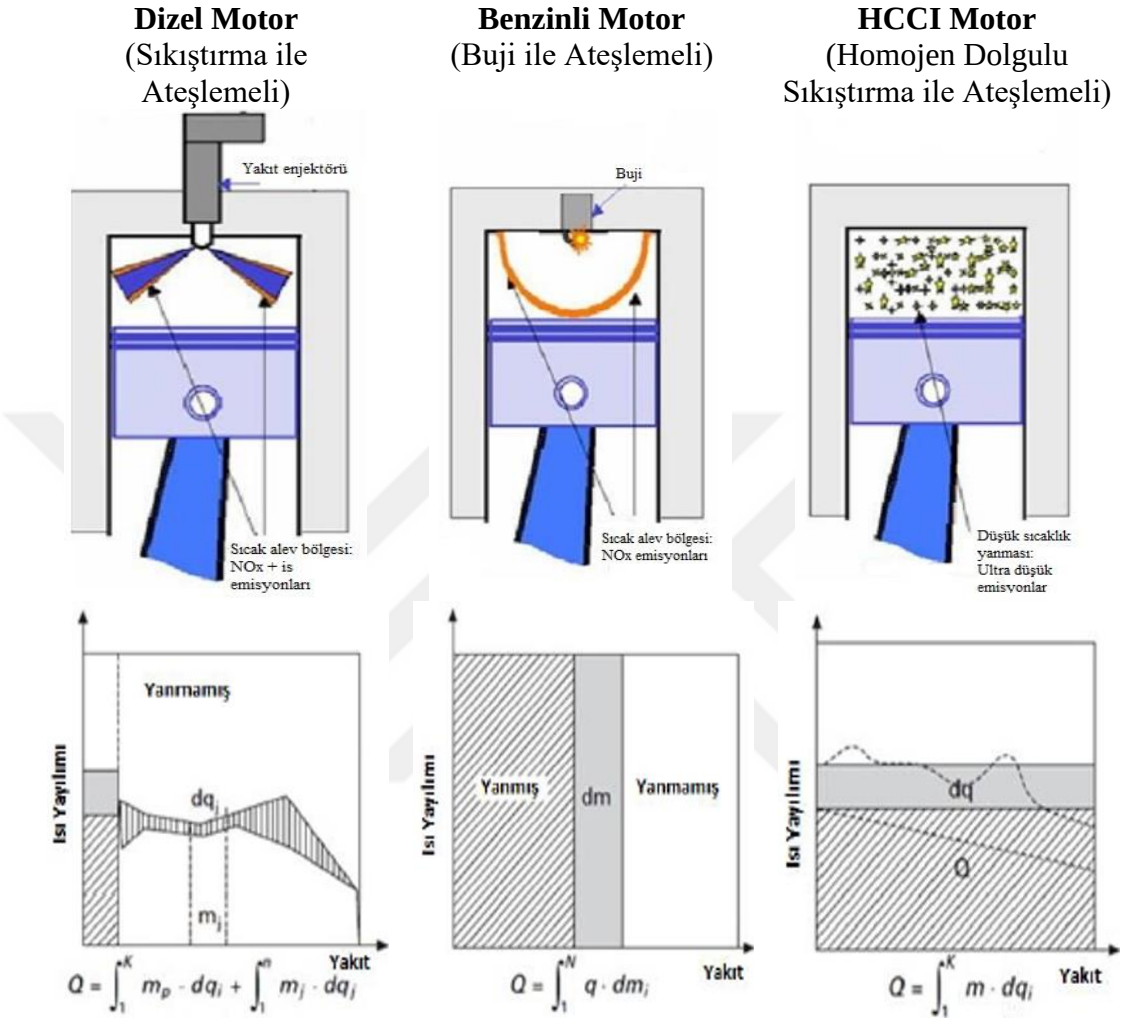
N: reaksiyon bölge sayısını ifade etmektedir.

HCCI yanmasının ideal olduğunu söyleyebilmek için, yanmanın silindirde aynı anda başlaması ve ısı yayılım sürecindeki yanmaya karışımın tamamının katılması gerekmektedir. İdeal yanmanın gerçekleştiği motorda, toplam ısı yayılımı tüm dolgunun (m) yanmasıyla meydana gelen reaksiyondan ($dq_i$) oluşan toplam ısı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [19].

$$Q = \int_1^K m.dq_i \tag{2.2}$$

K: Toplam ısı yayılım reaksiyonu sayısı

$q_i$: Karışımın kütlesine bağlı olarak 'i'ninci reaksiyonda açığa çıkan ısı enerjisi miktarıdır.




Şekil 2.4 : Dizel, Benzinli ve HCCI motorda yanmanın gelişimi [18, 19].

İdeal yanmaya sahip bir HCCI motorda, ısı yayılımı dolgunun tamamında dengeli bir şekilde dağılmaktadır. Buji ateşlemeli bir motorda ise ısı yayılımı yanma bölgesinde belirli bir süreliğine görülür. Fakat pratikte, dolgunun ve sıcaklık dağılımının homojenliği tam olarak tesis edilemediğinden ısı yayılım süreci de karışım boyunca eşit bir şekilde gerçekleşemez. Yüksek sıcaklıktaki karışım bölgelerinde veya az seyreltilen bölgelerde, ısı yayılımı daha çabuk meydana gelebilir. Bu olay Şekil 2.4'te düzgün olmayan bir ısı yayılımını ifade eden kesikli çizgilerle gösterilmiştir [19].

Dizel motorlardaki yanma ise daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Geleneksel direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda yanma, sıkıştırma zamanı sonunda silindirdeki dolguya

yakıt püskürtülerek başlar ve ısının büyük kısmı difüzyon yanma olarak adlandırılan kontrollü yanma sürecinde açığa çıkar. Bu yanmadaki kümülatif ısı yayılımı aşağıdaki gibi iki safhanın toplamı ile ifade edilmektedir.

$$Q = \int_{1}^{K} m_p . dq_i + \int_{1}^{N} m_j . dq_j \tag{2.3}$$

İfadedeki ilk kısım ön karışımlı yanma (kontrolsüz yanma), ikinci kısım ise difüzyon yanma (kontrollü yanma) safhasıdır.

$m_p$: Kontrolsüz yanma aşamasında yanan kütle miktarı,

$m_j$: Kontrollü yanma aşamasında yanan karışımın kütlesi,

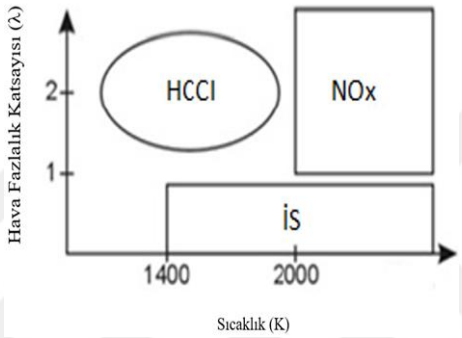
$dq_j$: Kontrollü yanma aşamasında yanan karışımdan açığa çıkan ısı enerjisi değeridir.

Geleneksel buji ateşlemeli ve dizel motorlar son yüzyılda teknolojik olarak çok ilerleme göstermesine rağmen halen bazı dezavantajlara sahiptir. HCCI motorlar, bu dezavantajları aşabilmek için çözüm sunabilecek bir potansiyele sahip olarak görülmektedir. HCCI motorlar geleneksel motorlara kıyasla daha düşük yakıt tüketimi ve egzoz emisyonu değerleri sunmaktadır. Hem buji ateşlemeli hem de sıkıştırma ateşlemeli motorlar HCCI tekniği ile çalışacak şekilde dönüştürülebilmektedir. Dönüştürülen HCCI motorlarda yanma; fakir karışım oluşturacak şekilde silindire gönderilen homojen dolgunun, karışımın her yerinde aynı anda kendi kendine tutuşturulması ile gerçekleşmektedir.

Geleneksel buji ateşlemeli motorları sınırlandıran en önemli parametre, vuruntu sebebiyle belirli bir sınırı aşamayan sıkıştırma oranıdır. Bu sebeple ısıl verimleri dizel motorlara göre daha düşüktür. HCCI motorlarda ise dolgu sıkıştırma ile ateşlendiği için sıkıştırma oranının arttırılmasına imkân vermektedir. Bu sayede HCCI motorlar dizel motorlarda olduğu gibi yüksek sıkıştırma oranları ile yüksek ısıl verim sağlamaktadır. HCCI motorlarda yük kontrolü karışım kalitesiyle sağlanmaktadır. Bu sebeple HCCI motorlar pompalama kayıplarına uğramadan çalışırlar ve düşük yüklerde oluşturulan çok fakir karışımlarda bile homojenlik sağlanabilmektedir.

Geleneksel dizel yanmasında yanma periyodunda fakir ve zengin karışım bölgelerinin varlığı $NO_x$ ve is emisyonlarına sebep olmaktadır. Mevcut dizel yanması işlemi ile $NO_x$ ve is emisyonlarını aynı anda kabul edilebilir oranda azaltmak imkansızdır.

Çünkü dizel yanması için bu iki emisyonu oluşturan durumlar birbirinin tersidir. HCCI yanmasında ise oluşturulan fakir homojen karışım sayesinde bu durum farklılık göstermektedir. Bu sayede ani heterojen yanma engellenmektedir. Yanma sırasında zengin karışım bölgeleri bulunmadığından ve güçlü bir alev olmadığından is emisyonları oluşmamaktadır. Ayrıca Şekil 2.5'te gösterildiği gibi hava fazlalık katsayısının yüksek seviyelerde olması sıcaklıkları düşürmekte ve böylece $NO_x$ oluşumları engellenmektedir. HCCI yanması için belirli bir yakıt türü sınırlandırması yoktur. Benzin, dizel, doğalgaz, metanol, hidrojen gibi birçok yakıt HCCI yanmasında kullanılabilir [19, 31].




Şekil 2.5 : HCCI yanmasında $NO_x$ ve is emisyonlarının eşzamanlı olarak azalması [19,31].

Tablo 2.1 : İçten yanmalı motorların karşılaştırılması.

| **Motor** | **Verimlilik** | **Emisyonlar** | **Yanma zamanlaması** |
|---|---|---|---|
| Buji ateşlemeli (SI) | Vuruntu sınırı | Düşük | Buji kıvılcımı |
| Sıkıştırma ateşlemeli (CI) | Yüksek | Yüksek $NO_x$ ve partiküller | Yakıt enjeksiyonu |
| Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (HCCI) | Yüksek | Yüksek CO ve HC | Dolaylı olarak; ısı ve basınç gelişim süreci |

HCCI kendiliğinden tutuşma süreci SI motorlarındaki vuruntuya çok benzemektedir. Tek fark, HCCI yanmasının bir alev cephesi önünde değil, yanma odasının tamamında homojen olarak gerçekleşmesidir [32]. Karışımı kendiliğinden tutuşturmak için gereken yüksek sıkıştırma oranları, dolaylı olarak kontrol edilen ateşlemenin doğru zamanda başlaması koşuluyla, CI motorları kadar yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Ek olarak HCCI motorları, emme havasının tam yanma için gerekenden önemli ölçüde daha fazla olduğu şartlarda çok fakir karışımlar ile

çalıştırılabilmektedir. Bu aşırı hava seyreltmesi alev sıcaklığını düşürerek $NO_x$ emisyonunun azalmasına yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla HCCI motorları, SI ve CI motorlarının arzu edilen özelliklerine sahiptir. Ancak, yanmanın başlamasını kontrol etme zorluğunun üstesinden gelmek gerekmektedir. Tablo 2.1, SI, CI ve HCCI motorlarıyla ilgili özellikleri ve sorunları özetlemektedir [1].

### 2.3.1. HCCI yanması

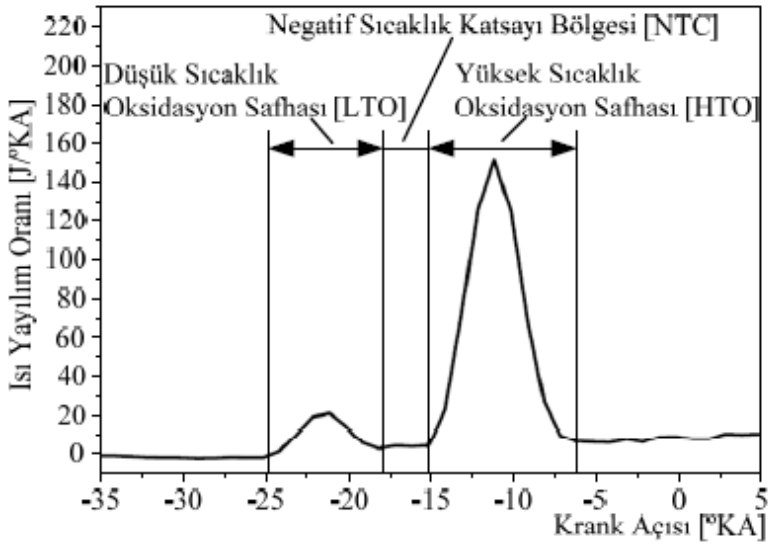
Yanma zamanlamasını dolaylı olarak kontrol etmek için diğer motor parametrelerini kullanmak gerekmektedir. Kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği hızlar, karışımın ne zaman kendiliğinden tutuşacağını belirlemektedir. Yanma başlangıcı; yakıt, hava ve yeniden yanma odasına gönderilen egzoz gazı (EGR) oranlarına, karışımın sıcaklığına, basıncına ve bileşimine bağlıdır. Yanmayı başlatan uygun motor parametrelerini belirlemek için birçok araştırma yapılmıştır. Kimyasal kinetiği ve dolayısıyla yanmanın başlangıcını etkileyen dört etken sıralanabilir; gaz basıncı, gaz sıcaklığı, gaz bileşimi ve karışım homojenliği [1, 33]. Tablo 2.2'de HCCI motorların yanma zamanlamasını etkinleştirmek için kullanılan farklı yöntemler görülmektedir.

Tablo 2.2 : Yanma zamanlaması kontrol yöntemleri [1].

| Metot | Kontrol Yöntemi | Referanslar |
|---|---|---|
| Emme havası giriş sıcaklığı | Elektrikli hava ısıtıcısı- egzoz ısı eşanjörü | [1, 33-36] |
| Egzoz gazının yeniden yanma odasına gönderilmesi | EGR valfi ile egzoz gazının emme hattına geri döndürülmesi, | [37-39] |
| | Egzoz valfinin kalkış yüksekliklerinin ve zamanlamasının değiştirilmesi, | |
| Değişken sıkıştırma oranı | Geometrik, değişken sıkıştırma oranlı motor (VCR), Değişken supap zamanlaması (VVT) | [38, 40, 41] |
| Karışım reaktivitesi | Eşdeğerlik oranı, | [42-44] |
| | Çift yakıt, | |
| | Yakıt dönüştürücü, | |
| Sıkıştırma sırasındaki sıcaklık | Pilot enjeksiyon, | [45] |
| | Su / buhar enjeksiyonu, | |
| | Duvar sıcaklığı, | |
| Giriş basıncı | Turboşarj/Süperşarj | |

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi konvansiyonel dizel motorlarda difüzyon yanmayla, buji ateşlemeli motorlarda alev cephesi ilerleyişi ile yanma kontrolü sağlanmaktadır [18, 46]. Buji ateşlemeli motorlarda, yanma aşamasındaki dolgu iki kısma ayrılmaktadır. Bu kısımlar; yanmamış ve yanmış karışım kısımlarıdır. Alev cephesi ilerleyişi ile yanma kontrolü sağlanmaktadır. Kümülatif ısı yayılımı; alev cephesi içerisindeki belirli bir miktar karışımın ($dm_i$) yanması sonucu ortaya çıkan ısının toplamı olarak tanımlanmaktadır [18, 25, 30, 46]. Burada N; alev cephesindeki yanma olan bölge sayısı, q; homojen dolgunun birim kütlesinin ısıl enerji miktarıdır.

HCCI yanması herhangi bir ateşleme sistemi olmaksızın başlatıldığı için karışım oranı çok fakir olabilmektedir. Buji ateşlemeli ve dizel motorlardaki yanma işlemleri ile karşılaştırıldığında HCCI yanmada oluşan sıcaklıkların daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Teorik olarak HCCI yanmasının geleneksel motorlara göre ısı yayılımı sürecinin daha düzenli olması, çevrimler arasında meydana gelen farkları azaltacak gibi görünmektedir. Ancak gerçek çalışma koşullarında, silindir içindeki dolgunun oluşumu ve sıcaklık dağılımının tam dengeli oluşması çok zor olduğundan, ısı yayılımı dengeli bir şekilde gelişmeyebilmektedir. Şekil 2.4'ün altında kesik çizgiler ile belirtilen düzensiz ısı yayılımına sebep olan zengin karışım veya yüksek sıcaklık alanları, basınç artış oranının ($dP/d\theta$), yükselmesine sebep olabilmektedir. Bu durum ise vuruntu kaynaklı sesin artmasına ve silindirde oluşan maksimum basınç seviyesinin yükselmesine sebep olmaktadır [18, 46].




Şekil 2.6 : HCCI yanma sürecinde dizel türü yakıtlarda meydana gelen iki aşamalı ısı yayılım profili [12].

HCCI yanma kimyası, yanma başlangıcını (kendi kendine tutuşma), ısı yayılım hızını, yanma esnasındaki ara reaksiyonları ve yanma sonucu oluşan ürünleri belirlemektedir [31, 46]. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi dizel benzeri yakıtların ısı yayılımı HCCI yanma sürecinde kademeli olarak gerçekleşmektedir. Yüksek oktan sayılı benzin benzeri yakıtların ise tek aşamalı şekilde oluşan bir ısı yayılım oranı profili bulunmaktadır. Yanmanın birinci kademesindeki ısı yayılımı soğuk alev bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Bir sonraki kademede daha güçlü bir ısı yayılımı süreci başlamakta ve yüksek sıcaklıkta asıl reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Bu kademelerde meydana gelen ısı yayılımı arasındaki süre negatif sıcaklık katsayısı rejimi olarak adlandırılmaktadır. Kademeli meydana gelen ısı yayılımında enerjinin %7-10 kadarı ilk kademede açığa çıkarken, %90-93 kadarı ise ikinci kademede açığa çıkmaktadır [31, 46- 48].

Geleneksel dizel yanması ile karşılaştırıldığında HCCI yanmanın en belirgin farkı, yanma anındaki karışımın homojenliğidir. Geleneksel dizel yanması, yanma odasındaki heterojen bir dolgu içeriği ile yanma şartlarının sağlandığı yerlerde bölgesel olarak başlayan bir yanma şeklinde gerçekleşmektedir. Böylece yanma süreci başlamış olur ve diğer kısımların yanması sağlanır. Yakıtın püskürtülmeye başlamasından difüzyon yanma olarak isimlendirilen kontrollü yanma sürecine gelinceye kadar püskürtülen yakıt ile hava yanma odasında bir ön karışım oluşturmaktadır. İlk aşamada bu ön karışımlı dolgu hızlı ve kontrolsüz şekilde yanmaya başlar. Asıl ısı yayılımı ise bu kontrolsüz yanmadan sonraki safha olan püskürtülen yakıtın doğrudan yanmaya katılacağı difüzyon yanması ile meydana gelmektedir. Ön karışımlı yanmada pistonun üst ölü noktaya yaklaştığı bir bölgede en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Daha sonra difüzyon yanma sürecinde ısı yayılımı dengeli ve düzgün şekilde seyretmektedir [21, 31, 46].

HCCI yanmasında durum dizel yanmasına göre farklılık göstermektedir. Bu fark, HCCI motorlarda tüm karışımın eş zamanlı olarak yanma sürecine girmesinden kaynaklanmaktadır. Başlangıçta karışım soğuk yanma safhasına göre yanma reaksiyonu geliştirmektedir. Daha sonra negatif sıcaklık katsayısı alanında yüksek sıcaklık yanmasına geçiş yapılmaktadır. Dahili homojen karışım oluşumunda, HCCI karışımının sağlanabilmesi için zaman gerekli olduğundan yakıtın püskürtme avansının arttırılması gerekmektedir. HCCI motorlarda homojen karışımın aynı anda çok kısa bir sürede yanması ile birlikte geleneksel dizel motorlara göre silindirde

oluşan en yüksek basınç değeri daha büyük olmaktadır. Bu karakteristik özelliklere ek olarak; HCCI yanması için gerekli homojen karışımın oluşturulabilmesi, zamanından önce yanmanın engellenmesi ve ısı yayılım hızının çok fazla artmasının önlenmesi için HCCI motorların kısmi yüklerde çalıştırılması bir gereklilik haline gelmektedir [31, 46].

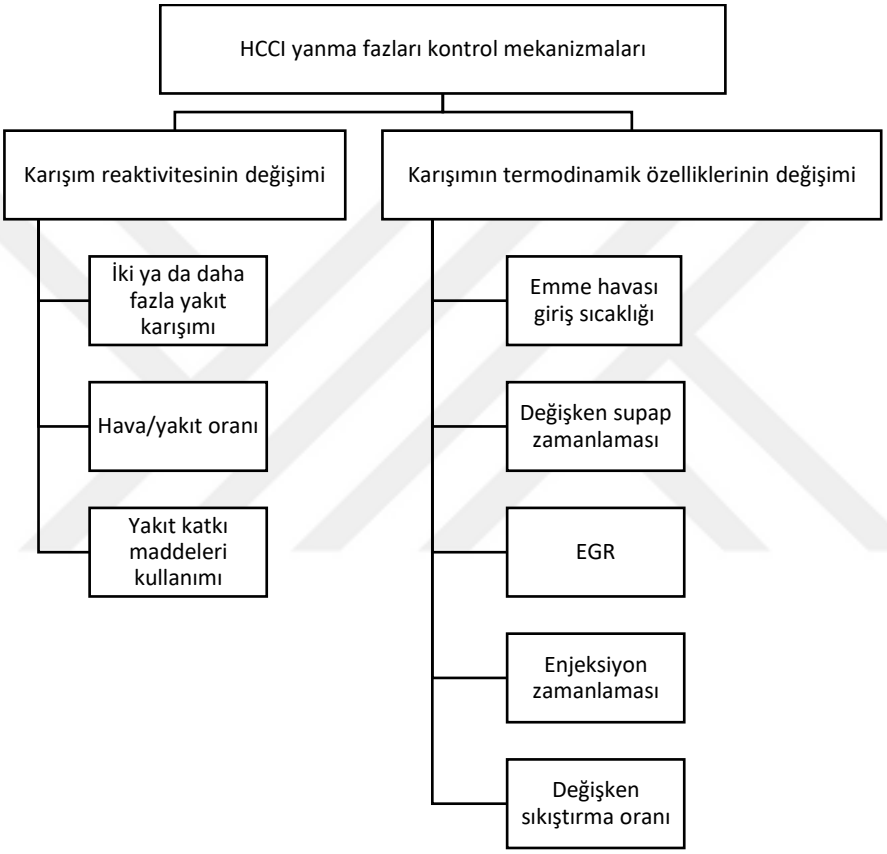
HCCI yanmasını açıklayabilmek için iki temel teoriden faydalanılmaktadır. Isıl yanma teorisi; uygun şartlar altında molekül çarpışmaları sonucu yanma başlangıcını ifade etmektedir. Kimyasal yanma başlangıcı teorisi; kimyasal zincir reaksiyonların oluşumunu içerir ve yanmanın kimyasal aktiflerde başladığını ifade etmektedir. Reaksiyonu biten zincir sayısı, başlayanların sayısından geriye düştüğü anda tutuşma gerçekleşmektedir [31, 46].

### 2.3.2. HCCI yanmasını etkileyen faktörler

HCCI yanmada kontrol altına alınması gereken iki durum bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yanma başlangıcının kontrol altına alınması, ikinci durum ise yanma sürecinin faz uyumunun kontrol altına alınmasıdır. Bu durumlar doğrudan motorun ısıl verimini ve motorun düzgün çalıştığı devir aralığını etkilemektedir. Yanmada faz kontrolü sağlanmazsa, istenmeyen bir durum olan erken süreçte başlayan yanmaların vuruntuya sebep olduğu görülmektedir. Bununla beraber faz kontrolünün sağlanamadığı bir diğer durum olarak, yanmanın gecikmesinden dolayı iş zamanına sarkan yanma ısıl verimi düşürmekte ve düzenli çalışmayı olumsuz etkilemektedir. Yanma kontrolü için düşük ve kısmi motor yüklerinde yüksek EGR oranı ve fakir karışım uygulamaları ile yanma kararlılığı sağlanabilmektedir. Motor yükü arttıkça karışım stokiyometrik orana yaklaşmaktadır. Bu durumda ısı yayılım oranı yükselmektedir ve yanma esnasında vuruntu ile birlikte yüksek $NO_x$ değerleri ortaya çıkmaktadır [23, 31, 49, 50].

Yanma odasındaki karışımın tutuşmaya başlaması; buji ateşlemeli motorlarda bir buji kıvılcımı ile, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda ise yakıt enjeksiyonu ile kontrol edilebilmektedir. HCCI yanmasının başlangıcı ise geleneksel motorlardan farklı şekilde gerçekleşmektedir. HCCI yanması, silindirdeki yakıt/hava karışımı sıcaklığının ve zamanın etkisine bağlı olarak kendi kendine gerçekleşmektedir. Kendi kendine tutuşma özelliği yüksek olan yakıtların kullanıldığı HCCI uygulamalarında, istenmeyen şekilde erken tutuşma sebebiyle vuruntu oluşmaktadır ve bu sorunu önleyebilmek için sıkıştırma oranının düşürülmesi veya EGR sistemi tarafından

silindire gönderilen dolgunun soğutulması gibi erken tutuşmayı engelleyen uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Kendi kendine tutuşma özelliği düşük olan yakıtların kullanıldığı HCCI uygulamalarında ise herhangi bir soğutma yapılmadan EGR uygulaması ve emme havası giriş sıcaklığının yükseltilmesi gibi değişikliklerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. HCCI yanmasında düşük sıcaklıkta gerçekleşen yanma reaksiyonlarının sürelerinin uzun olması, yanma başlangıcının kontrolünü zorlaştırmaktadır [23, 31].




Şekil 2.7 : HCCI yanmasının kontrol algoritması [23, 49]

HCCI yanmasının kontrol algoritması Şekil 2.7'de görülmektedir. Burada HCCI yanma fazının kontrol edilebilmesi için iki ana grup kontrol mekanizması incelenmektedir. İlk grupta karışım aktivitesinin değişimi başlığı altında; yakıt karışımları, hava/yakıt oranı ve yakıt katkı maddeleri uygulamaları görülmektedir. İkinci grupta ise karışım oranının ısıl özelliklerinin değiştirilmesi başlığı altında; enjeksiyon zamanlaması, emme havası giriş sıcaklığı, EGR, değişken supap zamanlaması ve değişken sıkıştırma oranı gibi uygulamaların olduğu görülmektedir.

Yanma için kimyasal reaksiyonların başlaması, öncelikli olarak yanma odasında gelişen ısıl koşullara ve yanacak olan dolgunun kimyasal bileşimine bağlıdır [23, 46].

#### 2.3.2.1. Emme havası sıcaklığının HCCI yanmaya etkisi

Yanma odasındaki sıcaklığı yükseltmek ve yanma için gerekli olan enerjiyi sağlayabilmek için emme havası giriş sıcaklığı arttırılmaktadır. Bu yöntem HCCI yanma başlangıcının kontrol edilmesinde çok yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Emme havası sıcaklığının arttırıldığı uygulamalarda, silindirdeki dolgunun yanma eğilimi arttırılırken tutuşma gecikmesi süresi kısaltılmaktadır. Ancak gereğinden fazla ısıtılan emme havası, yanmayı olması gereken zamandan daha geriye çekeceği için sıkıştırma zamanı sürecinde gerçekleşen tutuşma sebebiyle oluşan ters basınç ısıl verimi azaltacaktır. Gereğinden fazla ısıtılan emme havası aynı zamanda düşük konsantrasyona sahip dolgularda hacimsel verimi ve ortalama efektif basıncı düşürmektedir. Yüksek emme havası sıcaklıkları, yanma sonunda meydana gelen sıcaklıkları yükseltmekte ve buna bağlı olarak $NO_x$ oluşumunu attırırken, HC ve CO emisyonlarının azaltılmasında etkili olmaktadır [23, 51, 52].

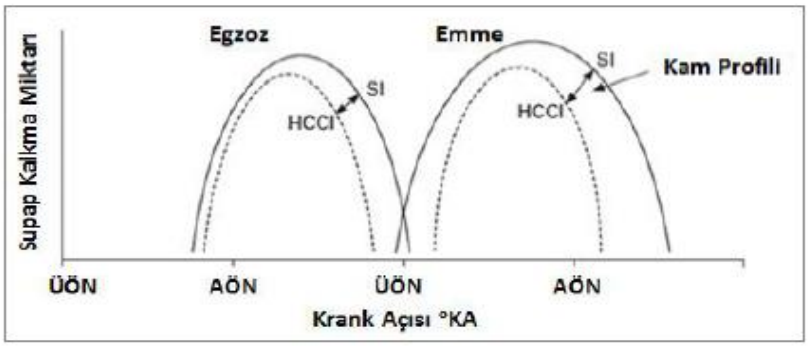
Zhang ve arkadaşları, CT2100Q motorunu modifiye ederek HCCI uygulamasında kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada yakıt olarak etanol, metanol ve benzin kullanmışlardır. Emme havası giriş sıcaklığının HCCI yanmasına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaya göre emme havası sıcaklığının artışı ile birlikte silindirde elde edilen en yüksek basınç değeri artış göstermiş ve en yüksek basıncın gerçekleştiği noktanın daha erken krank mili derecesinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak benzin yakıtı ile yapılan deneylerde bu eğilimin azaldığı gözlemlenmiştir. Emme havası sıcaklığının artışı ile kullanılan üç yakıt için de HC ve CO miktarlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Emme havası sıcaklığı 110-160℃ aralığında etanol ve metanol yakıtları ile yapılan deneylerde $NO_x$ miktarları sıfır (0) olmakla birlikte benzin yakıtının kullanıldığı deneylerde $NO_x$ emisyonlarında artış gözlenmiştir. Emme havası giriş sıcaklığının değiştirilmesinin etanol ve metanol yakıtlarında daha fazla değişime sebep olduğu gözlemlenmiştir. Hava fazlalık katsayısının artışı ile birlikte HC ve CO emisyonları artmış, en düşük HC emisyonu ise diğer yakıt kullanımlarına göre metanol yakıtının kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. HCCI yanması sebebiyle her üç yakıtta $NO_x$ emisyonları çok düşük seviyelerde olmaktadır. Ek olarak hava fazlalık

katsayısının 2,5 değerinin üzerinde olduğu bölgelerde $NO_x$ emisyonu görülmemiştir [23, 53].

Maurya ve Agarwal, iki silindirli bir motoru HCCI modunda çalışacak şekilde düzenlemişler ve bu motorda emme havası giriş sıcaklığının ısıl ve yanma verimlerine etkilerini araştırmışlardır. Emme havası sıcaklığının yüksek olduğu ve motorun zengin karışım ile çalıştırıldığı durumda vuruntu oluştuğu gözlemlenmiş, emme havası sıcaklığının artışıyla birlikte hacimsel verimin düştüğü ve ortalama efektif basıncın azaldığı belirlenmiştir. Emme havası sıcaklığındaki artışın yanma sürecini kolaylaştırdığı ve ısı yayılım hızını arttırdığı gözlemlenmiştir. Isı yayılımının hızlı olması sonucu vuruntu meydana gelmektedir. Bu problemlerden dolayı emme havası giriş sıcaklığı belirli bir sınıra kadar arttırılabilmektedir [23, 54].

### 2.3.2.2. Supap zamanlamasının HCCI yanmaya etkisi

HCCI motorlarda, düşük yüklerde tutuşamama ve yüksek yüklerde ise erken tutuşma kaynaklı vuruntu sorunlarından dolayı sınırlı bir çalışma aralığı bulunmaktadır. Bu çalışma aralığını arttırmak ve geniş bir aralıkta kararlı HCCI yanması elde edebilmek için değişken supap zamanlama mekanizmaları kullanılmaktadır [23, 53].




Şekil 2.8 : SI ve HCCI motorlarındaki supap kalkma miktarları [18, 23].

Geleneksel dört zamanlı motorlarda, supaplar kam mili üzerindeki çıkıntılar tarafından hareket ettirilmektedir. Supaplar için açılma zamanı, kalkma miktarı, açık kalma süresi ve kapanma zamanını bu çıkıntıların profilleri belirlemektedir. Şekil 2.8'de buji ateşlemeli motorlar ile HCCI motorların supap hareketleri arasındaki farklar görülmektedir. Şekil 2.8'e göre buji ateşlemeli motorların supap hareketleri incelendiğinde emme ve egzoz supaplarının kalkma miktarlarının yüksek olduğu ve

supap açık kalma sürelerindeki uzunluktan dolayı emme ve egzoz supaplarının aynı anda açık kaldığı bir supap bindirmesi sürecine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Buji ateşlemeli motorlardaki supap hareketlerine karşın HCCI motorlarda daha kısa supap kalkma miktarı, daha kısa açık kalma süreleri ve negatif supap bindirmesine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir [18, 23].

Negatif supap bindirmesi uygulaması ile egzoz supabının buji ateşlemeli motorlardaki çalışmaya göre daha az açık kalması sayesinde silindir içerisinde dışarı atılamayan bir miktar egzoz gazı kalmaktadır. Silindir içerisinde kalan bu egzoz gazları bir sonraki çevrimde silindire alınan havanın sıcaklığını arttırarak yanma işleminin başlangıcını kolaylaştırmaktadır. Negatif supap bindirmesi, emme supabının geç açılması ve egzoz supabının erken kapanması ile oluşturulmaktadır. Bu açılma ve kapanma süreleri üst ölü noktaya simetrik şekilde gerçekleşiyorsa bu sürece simetrik negatif supap bindirmesi adı verilir [23, 55]. Basit bir uygulama gibi görünen negatif supap bindirmesi ile motorun çalışma aralığının genişletilmesi mümkün olmaktadır [23, 56].

#### 2.3.2.3. EGR'nin HCCI yanmaya etkisi

HCCI yanması için iki problem temel olarak çok önemlidir. Bu problemlerin ilki yanma başlangıcının bütün çalışma aralığında kontrolüdür. İkincisi ise yüksek seviyelerde ortalama efektif basınç değerlerine ulaşılamamasıdır. EGR zengin karışımlarda kullanıldığında, yanma işleminin hızını düşürmekte, erken ateşlemeyi ve dolayısıyla vuruntuyu önlemekte, yanma kaynaklı gürültü miktarını azaltmakta ve yüksek değerlerde ortalama efektif basınç elde edilmesini sağlamaktadır. Basınç artış ve ısı yayılım oranları azalmakta, bu sebeple yanma daha düzgün bir şekilde gerçekleşmektedir. Yanma işlemi daha geç krank mili açılarında gerçekleşmekte ve yanma periyodu daha uzun sürede tamamlanmaktadır [23, 57]. EGR ile silindire alınan egzoz gazları emme zamanında silindire alınan taze dolgu ile hızlıca karıştırıldığında yanma için gerekli olan sıcaklık koşullarına ulaşmak kolaylaşmaktadır [23, 58, 59].

EGR uygulamaları genel olarak dahili ve harici olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Dahili EGR uygulaması, negatif supap bindirmesi ile yanma sonucunda egzoz gazlarının bir kısmının silindirden çıkışına izin verilmeyerek gerçekleştirilmektedir. Harici EGR uygulaması ise silindirden yanmış olarak atılan egzoz gazlarının bir kısmının emme manifolduna tekrar yönlendirilmesi ile

gerçekleştirilmektedir. Yanmış egzoz gazlarının sıcaklıkları istenen seviyeden çok yüksek ise bir EGR soğutucusundan geçirildikten sonra emme manifolduna yönlendirilmektedir [23, 31, 60].

EGR uygulaması HCCI motorlarda dört önemli etkiye sebep olmaktadır.

- *Isı kapasitesi etkisi*

EGR uygulaması ile silindire döndürülen egzoz gazları silindir içerisindeki dolgunun ısı kapasitesini yükseltmektedir. EGR uygulaması ile silindire döndürülen egzoz gazları içindeki su buharı ve karbon dioksit gazlarının ısı kapasiteleri ortamın ısı kapasitesini yükseltmektedir. Bu sebeple daha düşük sıcaklık seviyelerinde yanma gerçekleşebilmektedir. Bu durum basınç artış oranını ve ısı yayılım oranını düşürmektedir [23, 61, 62]. EGR oranı fazla arttırıldığında yanma süreci uzamaktadır.

- *Dolguyu ısıtıcı etkisi*

Soğutma yapılmayan EGR uygulamalarında sıcak olarak silindire gönderilen egzoz gazları dış ortamdan alınan taze dolgunun sıcaklığını yükseltmektedir. Bu şekilde karışımın kendi kendine tutuşma yeteneğini arttırmaktadır. Bununla birlikte yanma süresini kısaltırken ısı yayılım oranını ve yanma sonu ulaşılan en yüksek basınç oranını yükseltmektedir [23, 62, 63].

- *Dolguyu seyreltici etkisi*

EGR uygulaması temel olarak yanmış egzoz gazlarını silindire gönderdiği için dışarıdan silindire alınan taze dolgu miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Silindir içerisindeki oksijenin azalması HCCI motorlarda yanma süresini uzatmaktadır, ancak kendi kendine tutuşma zamanında herhangi bir değişime sebep olmamaktadır. EGR oranı artışı ısı yayılım oranını azaltmaktadır [23, 64].

- *Kimyasal etkisi*

EGR uygulaması ile silindire döndürülen gazların içerisinde yanmaya fırsat bulamamış ve bir sonraki çevrimde yanma potansiyeline sahip gazlar

bulunabilmektedir. Soğutma uygulanan ve harici EGR sistemleri ise genellikle silindire yanma potansiyeli olmayan gazları göndermektedir. Dahili EGR sistemlerinde ise yanma sonu silindirde kalan gazların içeriğinde geçici aktif bileşenler bulunduğu için bu durum yanma başlangıcını etkilemektedir [23, 31, 61, 65].

Farklı HCCI motorlarında, farklı EGR yöntemlerinde ve farklı yakıt türlerindeki EGR uygulamaları farklı etkiler meydana getirmektedir. Benzin benzeri yakıtların kullanıldığı HCCI motorlarda, dolgunun kendi kendine tutuşmasını kolaylaştırmak için silindir sıcaklığını arttırmak amacıyla dahili EGR veya soğutma uygulaması yapılmadan kullanılan harici EGR uygulanmaktadır. Dizel benzeri yakıtların kullanıldığı HCCI motorlarda ise yakıtın tutuşma gecikmesinin uzatılması için soğutma uygulaması ile birlikte harici EGR uygulaması tercih edilmektedir [23, 31].

Cairns ve Blaxill, HCCI motorlarda dahili ve harici EGR uygulamalarının motor yükünü arttırdığını ifade etmektedir. Soğutma yapılan harici EGR uygulamasında, egzoz gazı geri dönüşüm oranının kontrolü bir supap ile ayarlanmıştır. Bu uygulamanın kendi kendine tutuşma başlangıcını geciktirdiğini, böylece vuruntunun önlendiğini ve ısı yayılım oranını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. EGR oranının fazla yükselmesi ile birlikte yanmada kararsızlık ve yükün belirli bir seviyeden sonra yükseltilmesine engel oluşturduğu gözlemlenmiştir [66].

Lü ve arkadaşları, soğutularak uygulanan EGR ile ısı yayılımının yavaşladığını ve yanma süresinin arttığını ifade etmektedir [67].

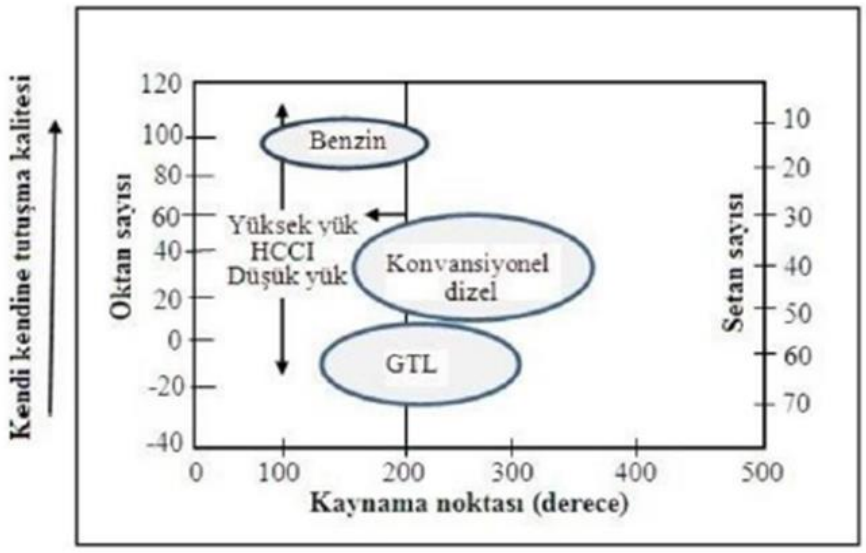
Xu ve arkadaşları, çift silindirli, direkt enjeksiyonlu, benzinli bir HCCI motorunun çalıştığı yük aralığının yüksek yük tarafına doğru genişletilebilmesi için dahili ve harici EGR uygulamalarının yanmaya etkilerini araştırmışlardır. Dahili EGR uygulamasında dolgu giriş sıcaklığı atmosfer şartlarındaki sıcaklığa eşit olarak seçilmiştir. Harici EGR uygulaması ile yanma fazının kontrolü gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, EGR kullanımı ile birlikte yüksek motor yüklerinde HCCI çalışma aralığının genişletilebildiğini gözlemlemişlerdir. Yüksek yüklerde çalışma sağlanmasına karşın bu aralıkta en yüksek basınç, yanma verimi, basınç artış oranı ve $NO_x$ emisyonları belirli sınırların dışına çıkamamıştır. Emme havası basıncının belirli bir seviyeye kadar arttırılması $NO_x$ emisyonlarının oluşumunu yüksek oranda azaltırken, emme havası giriş basıncının belirli bir seviyenin üzerine çıkarılması ile birlikte yanmanın kötüleştiği ve bu sebeple CO ve HC emisyonlarının yükseldiği

görülmüştür. Xu ve arkadaşları, bu çalışmalara göre, dahili ve harici EGR uygulamalarının HCCI motorlarda birlikte kullanılmasıyla yüksek motor yüklerindeki çalışma aralığını genişletmenin mümkün olacağını belirtmişlerdir [68].

#### 2.3.2.4. Yakıt özelliklerinin HCCI yanmaya etkisi

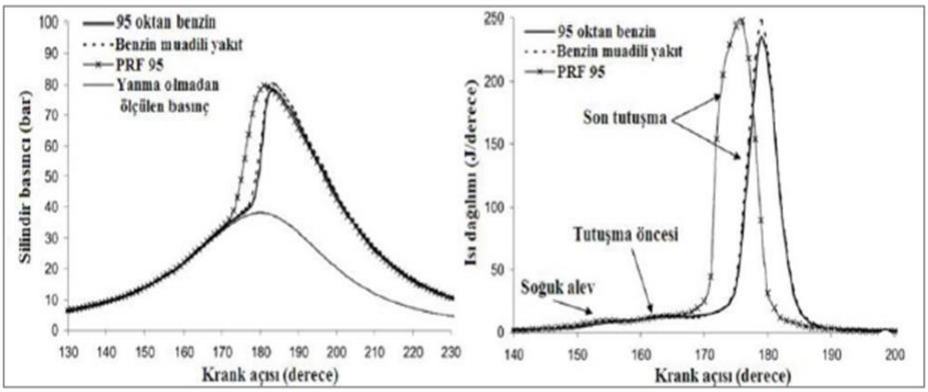
HCCI motorlarda yanma oluşumu, dolgunun kendi kendine tutuşması ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle, yakıtın özellikleri ile birlikte yanma kontrolü yöntemi ve motor tasarımı parametreleri birbirini yakından etkileyen parametrelerdir. HCCI motorlardan yüksek performans elde etmek için yanma kalitesinin yüksek olması gerekmektedir. Yüksek yanma kalitesini elde edebilmek için ise karışımın doğru zamanda tutuşturulması çok önemlidir. Ayrıca yakıtın doğru zamanda tutuşturulabilmesi ile yakıt tüketiminde ve egzoz emisyonlarında azalma elde edilebilmektedir. Yanma başlangıcı; yanma odası sıcaklığına, basıncına ve karışım yoğunluğuna bağlıdır [19].

Yüksek motor yüklerinde meydana gelen vuruntu nedeniyle HCCI motorların çalışma aralığı kısmi yük bölgesinde kalmaktadır. Yüksek motor yüklerinde yanma oranı (anlık olarak yakılan karışım miktarı) ve basınç artış oranı maksimum düzeye ulaşmaktadır. Dolayısıyla motor sesi aşırı artmaktadır. Aksine düşük yüklerde HCCI yanması sırasında silindirde oluşan en yüksek sıcaklık çok düşük seviyelerde kalmaktadır ve HC ve CO emisyonları yüksek olmaktadır [48]. Bu sebeplerden dolayı HCCI motorun taşıtlarda kullanımı ancak çift modlu uygulama ile mümkün olabilecektir [18, 50]. Yüksüz şartlarda buji ateşlemeli veya dizel modda, orta seviye yüklerde HCCI modda, yüksek seviyelerdeki yüklerde buji ateşlemeli modda ve tam yük şartlarında ise dizel modda çalıştırılmaktadır. HCCI motorlar için değişken yük şartlarına göre farklı yakıt özellikleri gerekmektedir. HCCI motorlarda benzin yakıtı kullanıldığında, düşük yüklerde kolayca kendi kendine tutuşması beklenirken (düşük oktan), yüksek yüklerde ise vuruntu mukavemetine sahip olması beklenmektedir (yüksek oktan). HCCI motorlarda dizel yakıtı kullanıldığında, normal çalışma koşullarında yanmanın üstü ölü nokta civarında geç tutuşması için düşük setan sayılı olması beklenirken, tam yük koşullarında tutuşma gecikmesi süresi kısa olan yüksek setan sayılı bir yakıt olması beklenmektedir [19].




Şekil 2.9 : Farklı yakıtların uçuculuk özellikleri ve kendi kendine tutuşabilme kaliteleri [18].

Benzinin diğer yakıtlara karışma yeteneği HCCI motorlarda kullanım imkanlarını arttırmaktadır. Bu sebeple dizel yakıtlara göre HCCI çalışması için benzin yakıtların daha uygun olduğu söylenebilir [18]. Şekil 2.9'da yakıtların kendi kendine tutuşma yetenekleri ve uçuculukları görülmektedir.



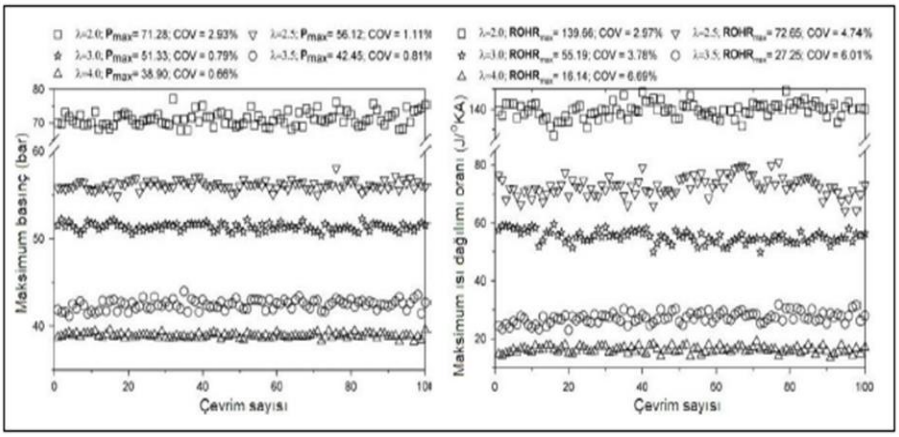

Şekil 2.10 : 95 oktan benzin, benzin muadili izooktan, n-heptan ve PRF95 yakıtlarının silindir içi basınç ve ısı yayılımı üzerindeki etkileri [69].

Machrafi ve Cavadias, bazı yakıtların benzinli bir HCCI motorda kendi kendine tutuşma özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan yakıtlar; 95 oktan benzin, izooktan, n-heptan ve PRF95 referans yakıtıdır. Çalışmada benzin yakıtının fakir karışım şartlarında da kendi kendine tutuşabileceği görülmüştür. Çalışmalara göre HCCI yanmasının üç safhadan oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu safhalar; soğuk alev

safhası, tutuşmadan önceki safha ve son tutuşma bölgesi olarak tanımlanmıştır [69]. Şekil 2.10'da silindir içi basınç ve ısı yayılım oranının farklı üç yakıt için nasıl değiştiği gösterilmiştir.

### 2.3.2.5. Hava/yakıt oranının HCCI yanmaya etkisi

HCCI motorlarda en önemli karakteristik özelliklerden biri kendi kendine tutuşmadır. Bu özellik buji ateşlemeli motorlara göre silindir içi basınç ve sıcaklıkla birlikte karışımın oluşumundan yüksek oranda etkilenmektedir. HCCI modda hava miktarının bol olması ihtiyacından dolayı HCCI motorlar tam açık emme manifoldu kanalı ile çalışmaktadır. Bu durum, buji ateşlemeli motorlara göre daha fakir karışımlarla çalışmaya izin verirken bir yandan da motor verimini arttırarak yakıt tüketiminin düşürülmesine imkân vermektedir. Daha fakir karışımlar, ısı dağılımını ve yanma sonucunda meydana gelen gazların sıcaklıklarını düşürdüğünden HC ve CO emisyonlarının artışına sebep olmaktadır. Karışım zenginleştikçe yanma süreci daha erkene çekilmektedir [18, 70]. Karışımın fakir ve zengin olması ile silindir içinde ulaşılan en yüksek basınçta ve ısı yayılım oranında meydana gelen değişiklikler Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Şekil 2.11'de peş peşe 100 çevrimin hava fazlalık katsayısı ile en yüksek basınç değeri ve ısı dağılımı oranı değerleri gösterilmiştir. Şekil 2.11'de gösterilen ısı dağılımı oranı, krank mili açısına göre açığa çıkan enerji miktarını Joule cinsinden ifade etmektedir. Maurya ve Agarwal, yaptıkları araştırma sonuçlarına göre, daha fakir karışımların silindir içi basıncı ve ısı dağılım oranını azalttığını, daha zengin karışımların ise silindir içi basıncını ve vuruntu eğilimini arttırdığını ifade etmektedir [71].




Şekil 2.11 : Hava/yakıt oranının silindir basıncı ve ısı yayılım oranına etkileri [71].

#### 2.3.2.6. Motor hızının HCCI yanmaya etkisi

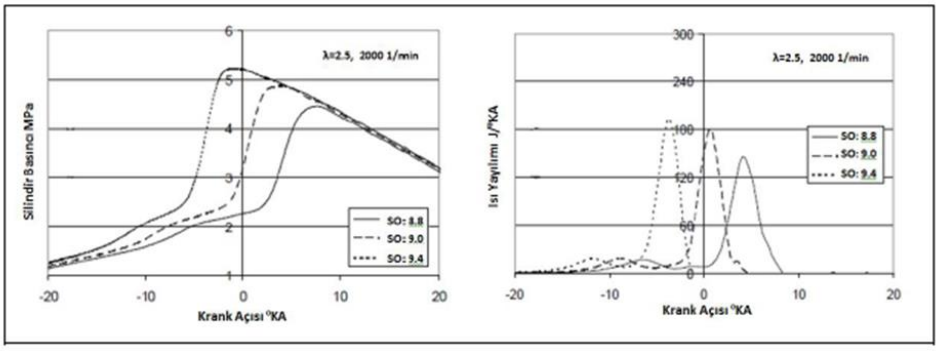
Motor hızı yükseldikçe silindir içinde karışımın oluşması için gerekli olan süre kısalmaktadır. Motor hızı yükseldikçe silindir içerisindeki piston hızı artmakta ve bu durum silindir içerisindeki hava hareketinin artmasına sebep olmaktadır. Böylece motor hızı yükseldikçe yanma istenenden daha erken ve hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ancak yüksek motor hızlarında yanma için gereken tüm şartların sağlanması durumunda bile yanma için ayrılan süre kısalmaktadır. Aynı zamanda sıkıştırma zamanı başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki süre de kısalmaktadır. Motor hızının artışı ile birlikte karışımın kendi kendine tutuşma sıcaklığı azalmaktadır. Motor hızının artmasıyla birlikte, önceki çevrimden silindirde artık olarak kalan gaz miktarı ve silindir içi sıcaklık artmaktadır. Bu sebeple yanma daha erken ve hızlı bir şekilde gerçekleşme eğilimindedir. Bu durum vuruntu meydana getirmektedir. Ayrıca sonuç olarak, motor hızı arttıkça güç kaybı ve verim düşüklüğü görülmektedir [18, 26].

#### 2.3.2.7. Sıkıştırma oranının HCCI yanmaya etkisi

HCCI yanması, temel olarak silindir içerisindeki homojen dolgunun kendi kendine tutuşma prensibine dayanmaktadır. Sıkıştırma oranı ise homojen karışımın kendi kendine tutuşma şartlarını oluşturmak için çok önemli bir parametredir. Silindirde, sıkıştırma sonunda yanma başlangıcında oluşacak basınç ve sıcaklık şartları doğrudan sıkıştırma oranına bağlıdır. Dolayısıyla sıkıştırma oranı, tutuşma başlangıcını ve maksimum silindir içi basınç miktarını etkilemektedir. Buji ateşlemeli motorlarda sıkıştırma oranları dizel motorlarına göre düşüktür. Bunun sebebi vuruntu kaynaklı sorunlardır. Bu sebeple buji ateşlemeli motorların ısıl verimleri dizel motorlara göre daha düşüktür. HCCI motorlarda ise yanmanın homojen dolgunun her yerinde aynı anda başlaması ve yanma kontrolünün sağlanabilmesi gerektiği için yüksek sıkıştırma oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır. HCCI motorların sıkıştırma oranları yükseltildiği için doğru orantılı olarak ısıl verimleri de yükselmektedir [18, 72, 73].

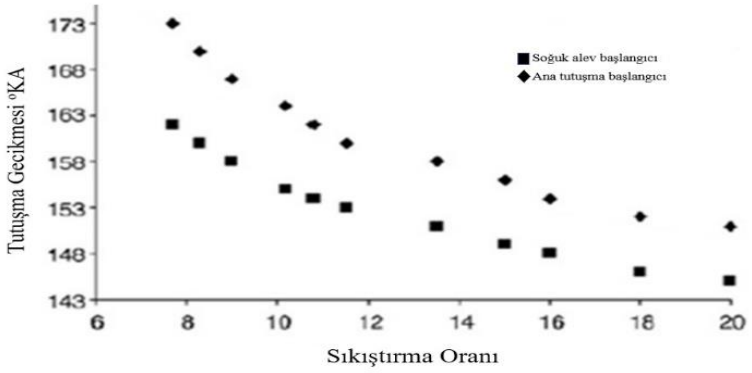
Pedersen ve arkadaşları, farklı motor hızlarında DME yakıtı ile yaptıkları deneylerde sıkıştırma oranı ve eşdeğerlik oranlarını değiştirerek etkilerini incelemişlerdir. Şekil 2.12'de farklı sıkıştırma oranlarında yapılan deneylerde ısı yayılımı ve silindir içi basıncının nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi sıkıştırma oranı

arttıkça silindirde ulaşılan en yüksek basınç değeri artarken, en yüksek basıncın oluştuğu nokta daha erkene kaymaktadır. Farklı sıkıştırma oranlarında ısı yayılım oranı değişimine bakıldığında, yanmanın daha soğuk alev ile ve daha erken bir krank mili açısında gerçekleştiği görülmektedir [74].




Şekil 2.12 : HCCI motorunda sıkıştırma oranının silindir içi basıncına ve ısı yayılım oranına etkisi [74].

Sıkıştırma oranından etkilenen bir diğer parametre ise silindirde bir önceki çevrimden kalan gazların oranındaki değişimdir. Dolgu içerisindeki egzoz gazlarının oranı arttıkça yanma reaksiyonları daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Sıkıştırma oranı arttıkça silindirde bir önceki çevrimden kalan art gaz oranı azalmaktadır. Sıkıştırma oranı belirli bir seviyenin üzerine çıkarıldığında ise art gaz yoğunluğu artmakta ve tutuşmaya karşı bir direnç oluşturmaktadır. Sıkıştırma oranı etkisinin art gazların etkisinden daha yüksek olması sebebiyle, sıkıştırma oranı artışı ile birlikte yanmanın kolaylaştığı, soğuk alev bölgesinde ve ana tutuşma bölgesinde yanmanın daha erken gerçekleştiği görülmektedir [74-76].

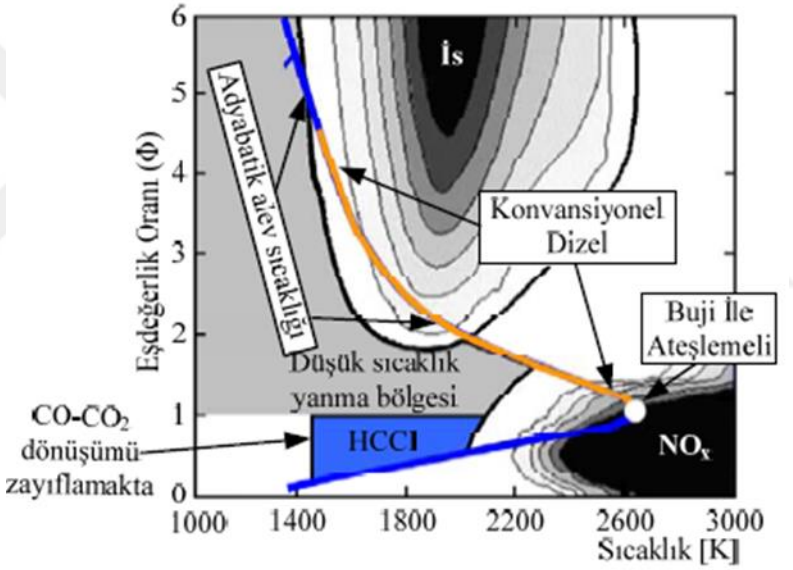



Şekil 2.13 : HCCI motorunda sıkıştırma oranının tutuşma gecikmesine etkisi (Emme havası giriş sıcaklığı: 70℃, eşdeğerlik oranı: 0,41, yakıt: n-heptan) [76].

Machrafi ve arkadaşları, HCCI modda çalışan bir motorda n-heptan yakıtı kullanarak, dolgu sıcaklığını, eşdeğerlik oranını ve sıkıştırma oranlarını değiştirerek tutuşma sürecinin nasıl etkilendiğini araştırmak için deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre sıkıştırma oranı arttıkça tutuşma gecikmesinin azaldığı Şekil 2.13'te görülmektedir [76].

### 2.3.3. HCCI motorların emisyon karakteristikleri

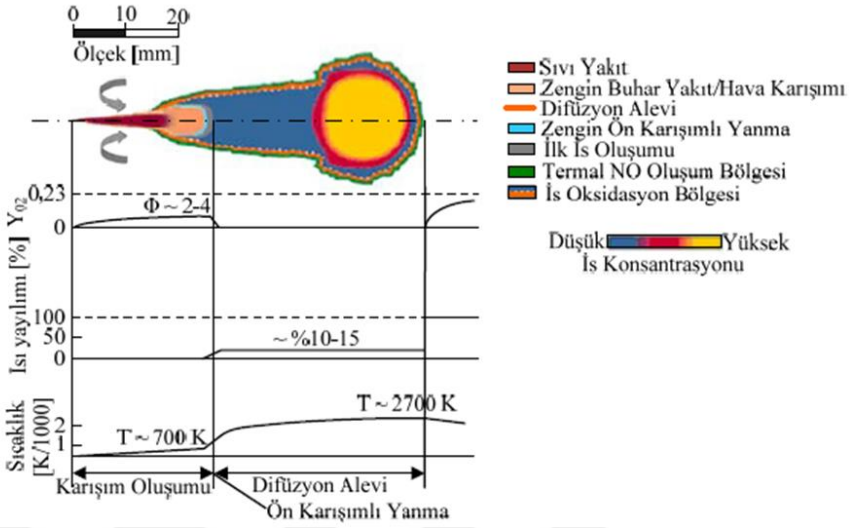
Şekil 2.14'te $NO_x$ ve is emisyonu oluşumunun eşdeğerlik oranına göre değişimi görülmektedir. İs emisyonu karışımın tam homojen olmadığı (eşdeğerlik oranının 1,25) ve 1400 K sıcaklığında meydana gelirken, $NO_x$ emisyonları 2000 K ve üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelmektedir [31, 46, 77, 78].



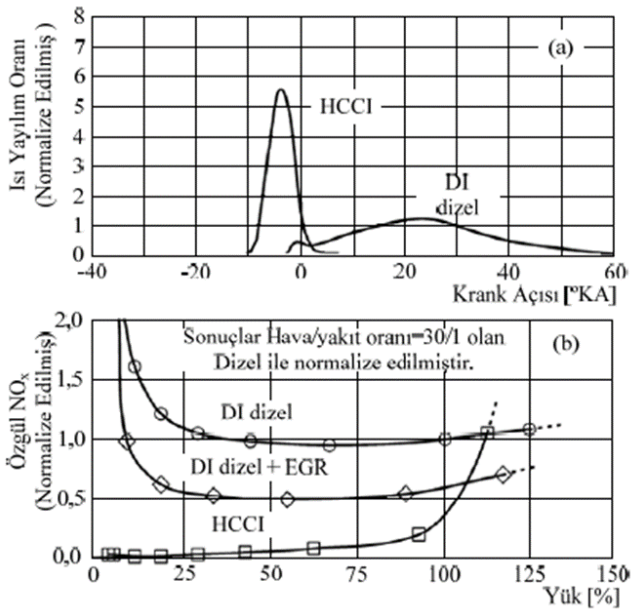

Şekil 2.14 : HCCI motorda eşdeğerlik oranı (Φ) ve silindir içi sıcaklık değerlerine göre is-$NO_x$ emisyonlarının değişimi [31, 46, 77, 78].

Geleneksel dizel motorlarında ise yanma, eşdeğerlik oranının 4 civarında olduğu zengin karışım bölgelerinde başlamakta ve stokiyometrik orana sahip bölgelerde devam etmekte ve bitmektedir. Şekil 2.14'e bakıldığında geleneksel dizel yanmasına ait adyabatik alev sıcaklığı eğrisinin $NO_x$ ve is bölgelerinden geçtiği görülmektedir. Geleneksel dizel motorlarda, karakteristik olarak iki emisyonun (is ve $NO_x$) birbirinin tersi bir etkileşime sahip olması sebebiyle aynı anda iki emisyonun azaltılması mümkün olamamaktadır. Şekil 2.14'te HCCI yanma bölgesine bakıldığında ise is ve

$NO_x$ bölgelerinin dışında kaldığı görülmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi geleneksel motorlarla HCCI motorlar kıyaslandığında HCCI motorlarda is ve $NO_x$ emisyonlarının aynı anda %90 oranından fazla azaltılabildiği görülmektedir [46, 79-81].




Şekil 2.15 : Konvansiyonel dizel motorda yanma gelişim evreleri [18, 31, 46, 77].




Şekil 2.16 : HCCI, DI dizel ve DI dizel + EGR uygulamalarının karşılaştırılması [82, 84].

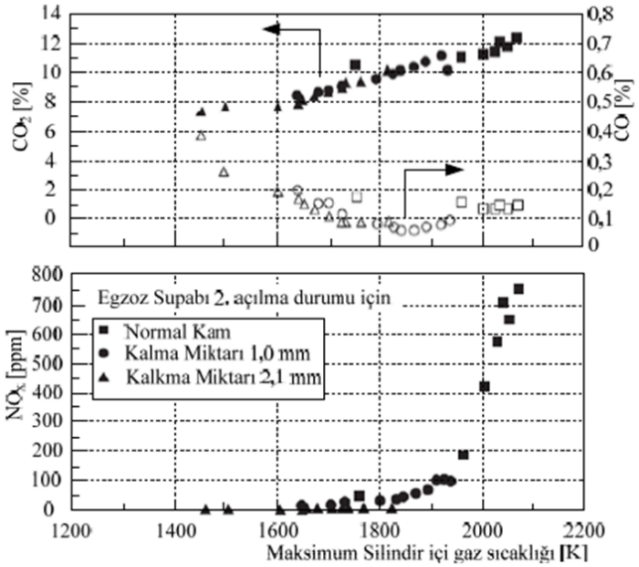
Şekil 2.16'da HCCI ile direkt enjeksiyonlu dizel ve direkt enjeksiyonlu dizel + EGR uygulamaları arasındaki farkların görüldüğü bir modelleme çalışması sonuçları verilmiştir. Giriş değeri olarak sıkıştırma oranı 16 alınmıştır. Bu şartlarda ısıl ve ani oluşum mekanizmaları kullanılarak $NO_x$ emisyonları bulunmuştur. Isıl-NO kavramı;

azot bileşikleri barındırmayan yakıtların yanması sırasında, yakıcı gaz olarak ortamda bulunan atmosfer içeriğindeki azot ortamda yeteri kadar oksijen bulunması halinde "ısıl" mekanizma ile oksitlenmesi sonucu meydana gelmekte ve sıcaklığın üstel bir fonksiyonu olarak gelişmektedir. Hızlı-NO (ani oluşum) kavramı ise; hidrokarbon yakıtların yanmasındaki $NO_x$ oluşum hızlarının özellikle zengin karışım bölgelerindeki ısıl-NO mekanizmasında tanımlanan azotun oksitlenme hızının aşılmasıyla çok hızlı (ani) bir şekilde NO oluşumunun meydana gelmesi olarak tanımlanmaktadır. $NO_x$ sonuçlarına bakıldığında kısmi yüklerde belirgin bir iyileşme gözlenirken, yüksek yüklerde silindir içi sıcaklığın artışı ile $NO_x$ emisyonlarının da arttığı görülmektedir [82, 83].

CO ve HC emisyonları, HCCI yanmada geleneksel yanmaya kıyasla daha yüksek değerlerde elde edilmektedir [49, 58, 80]. HCCI motorlarda HC emisyonunu etkileyen iki önemli parametre; karışım oluşturma tekniği ve kullanılan yakıttır. Eğer karışım silindir içerisinde (dahili) oluşturuluyorsa, silindir içerisine yapılan erken püskürtme ile birlikte belirli bölgelerde biriken yakıt sebebiyle HC emisyonları artmaktadır. Bu durumu önleyebilmek için silindir içerisinde karışım oluşturulurken yakıt birikimini engelleyecek bir püskürtme sistemi geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca homojen karışımı oluşturma aşamasında yakıtın uçuculuğunun yüksek olmaması, silindir yüzeylerine yapışma sorunlarını arttıran bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır [46].

Ikemoto ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada dahili EGR tekniğinin HCCI motor uygulamasına olan etkileri incelenmiştir [51]. Deney motoru olarak 0,34 litre hacimli, tek silindirli, hava soğutmalı, buji ateşlemeli, 8/1 sıkıştırma oranlı bir motor kullanılmıştır. Yakıt olarak DME (dimetil eter) kullanılmıştır. Dahili EGR uygulaması için emme zamanında da egzoz supabının açılmasını sağlayacak şekilde farklı kam milleri ile çalışılmıştır. Şekil 2.17'de $NO_x$, CO ve $CO_2$'nin maksimum silindir sıcaklığına göre değişimleri verilmiştir. Silindir içerisindeki gaz sıcaklığı değeri yükseldikçe $NO_x$ ve $CO_2$ emisyonlarının arttığı, CO emisyonlarının ise azaldığı görülmektedir. $NO_x$ emisyonu özellikle 2000 K üzerindeki değerlerde belirgin bir artış göstermektedir. Silindirde meydana gelen sıcaklıklar yanma ve emisyonlar açısından önemlidir. Çalışma fakir karışım ile gerçekleştiğinden özellikle soğuk kalan silindir yüzeyleri civarında yanma tamamlanamayacağından CO ve HC emisyonlarında artış meydana gelmektedir. $CO_2$ emisyonunun artması ve CO emisyonunun azalabilmesi

için yüksek yanma verimine ve en az 1500 K silindir sıcaklığına ihtiyaç duyulmaktadır. Tam yanma ve $NO_x$ oluşumu arasında dar bir sıcaklık aralığı bölgesi olduğu görülmektedir. $NO_x$ ve CO emisyonunu minimum seviyede tutabilmek için bu dar bölgede maksimum silindir sıcaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir.




Şekil 2.17 : Maksimum silindir içi gaz sıcaklığına bağlı olarak CO, $CO_2$ ve $NO_x$ emisyonlarının değişimi [18, 51].

CO ve HC emisyonlarının meydana gelmesinin sebebi eksik yanmadır. Eksik yanma aynı zamanda yanma verimini düşürmekte ve yakıt sarfiyatını arttırmaktadır. Eksik yanmanın gerçekleştiği durum ile tam yanmanın gerçekleştiği durum kıyaslandığında, eksik yanma olan tarafta bir enerji kaybının olduğu görülmektedir. İçten yanmalı motorlarda, kullanılan yakıttan en yüksek verimi elde edebilmek için yakıtı tam olarak yakarak enerjinin mümkün olan en büyük kısmını mekanik enerjiye dönüştürmek gerekmektedir. HCCI motorlarda yanma sırasında ısı yayılım oranı çok yüksektir ve yanma çabuk gerçekleşmektedir. Yanma süresini uzatabilmek için EGR uygulaması kullanılmaktadır. Ancak EGR oranı fazla yüksek seviyelere çıktığında meydana gelen faz farkının artışı ile birlikte çalışma düzensizliği meydana gelmekte ve tam yanma gerçekleşemediğinden HC emisyonları yükselmektedir. Motor çevrimine uygun bir yanma fazı ayarı yakalandığında ideal çevrime yakınlık sağlanabilmektedir. Tam yanma şartlarında ısıl verim yüksek olmaktadır [46, 85]. HCCI tekniği ile daha düşük sıcaklıklarda yanma sağlanabildiğinden ısı kayıpları daha düşük olmaktadır. Ayrıca emme manifoldunda gaz kelebeği kullanılmadığı için pompalama kayıpları az olmakta

ve yüksek indike verim elde edilebilmektedir. Geleneksel direkt püskürtmeli dizel motorları ile kıyaslandığında HCCI motorların yakıt tüketimleri, kısmi yükler altında daha düşük olmaktadır [46, 50, 86, 87].

HCCI tekniği ile çalışan bir motorda, dizel benzeri, uçuculuk özelliği düşük ve silindirdeki yanma şartlarında kolay tutuşabilen yakıtlar kullanıldığında; yakıt/hava karışımının yeterli yoğunlukta hazırlanamaması, silindir yüzeyinde yakıt birikmesi, tam yanamama ve erken tutuşma sonucunda yanma olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. HCCI tekniğinin sağladığı avantajların elde edilebilmesi için aşağıdaki şartların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır;

- Tutuşma öncesinde karışım (yakıt/hava/yanmış gaz) homojenliği sağlanmalıdır,
- Tutuşma başlangıcı kontrolü, yanma süreci kontrolü ve ısı yayılım oranı kontrolü sağlanmalıdır [46].

# BÖLÜM 3. LİTERATÜR ÖZETİ

Stanglmaier ve Roberts; 1999 yılında HCCI üzerine yaptıkları bir çalışmada, HCCI yanmanın potansiyel faydalarını tartışmışlar ve bir HCCI motorunu başarılı bir şekilde çalıştırmak için aşılması gereken engelleri belirtmişlerdir. HCCI motorlar, kısmi yüklerde çok düşük $NO_x$ ve PM emisyonlarının yanında yüksek ısıl verimle çalışmakla birlikte, yüksek HC ve CO emisyonlarına sebep olmaktadır. Karışım hazırlama aşamasında bazı zorluklara sahiptir ve fakir yanma aşamasının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. HCCI yanmasının özgül yakıt tüketiminin geliştirilmesi gerektiği de belirtilmiştir [32, 84, 88].

Yao ve arkadaşları; HCCI motorların sayısal yanma simülasyonları üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Başlangıçta, HCCI yanmasının sayısal bir simülasyonunda beş farklı modeli tartışmışlardır. Dizel yakıtlı ve benzin yakıtlı HCCI yanması için kontrol stratejilerinin gelişimini gözden geçirmişlerdir. Tipik genelleştirilmiş dizel yakıtlı HCCI yanma modlarının şunları içerdiğini bulmuşlardır; erken direkt enjeksiyonlu HCCI, geç direkt enjeksiyonlu HCCI, önceden karıştırılmış / direkt enjeksiyonlu HCCI yanması ve düşük sıcaklıkta yanma (LTC) [47, 88].

HCCI motorlarda sıkıştırmadan önce karışım hazırlığı buji ateşlemeli motor prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle HCCI yanması, direkt enjeksiyonlu buji ateşlemesini (DISI) veya direkt benzin enjeksiyonunu (GDI) içeren buji ateşlemeli bir motor için bir yanma gelişimi olarak kabul edilebilir [88, 89]. Önceden hazırlanmış karışım, sıkıştırma ateşlemeli bir motorda olduğu gibi sıkıştırma yoluyla tutuşturulmaktadır. Bu nedenle HCCI yanması, sıkıştırma ateşlemeli bir motor için gelişmiş bir yanma tekniği olarak ele alınabilir [77, 88]. Sıkıştırma ateşlemeli motorların gelişiminde, kullanılan yakıta göre HCCI için dizel dışındaki yakıtlar ve LTC için dizel yakıt olmak üzere iki sınıflandırma yapılmıştır. Ancak Musculus ve arkadaşları LTC'yi, ön karıştırma derecesine göre HCCI ve kısmen önceden karıştırılmış sıkıştırma ateşlemeli (PPCI) olarak iki gruba ayırmıştır

[88, 90]. PPCI, önceden karıştırılmış-dolgu sıkıştırma ateşlemeli (PCCI) ve önceden karıştırılmış sıkıştırma ateşlemeli (PCI) gibi terimleri içermektedir. Direkt enjeksiyon kullanılan bir PCCI motorunda daha uygun bir karışım süresi elde etmeye çalışmışlardır. PPCI ve HCCI arasındaki fark, PPCI çalışmasında silindire gönderilen karışımın ateşleme sırasında HCCI'dan daha heterojen olmasıdır ve bunlar yakıt açısından fakir ve zengin karışımları içermektedir.

Lu ve arkadaşları; farklı yakıtların yeni nesil yanma modlarına sahip motorlardaki yanma süreçlerine etkilerini araştırmışlardır [92]. Gelişmiş sıkıştırma ateşlemeli yanma modunun en belirgin özellikleri olarak; HCCI, kademeli dolgu sıkıştırma ateşlemeli (SCCI) ve LTC'yi tercih etmişlerdir. Alkolün HCCI yanması ile ilgili bazı çalışmalar, Komninos ve Rakopoulos [88, 91] tarafından yapılan biyoyakıt HCCI yanmasının sayısal simülasyonunun bir incelemesine dahil edilmiştir. Yaptıkları çalışmada, biyoyakıt HCCI yanması için mevcut simülasyon modellerini tek bölgeli modeller, çok bölgeli modeller ve çok boyutlu modeller olmak üzere üç gruba ayırmışlardır [88, 92].

Saxena ve Bedoya; özellikle yüksek yük koşullarına vurgu yaparak HCCI çalışmasına yön veren temel olguların kapsamlı bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, LTC motorlarını buji ateşlemeli ve dizel motorlara alternatif sunan yeni bir teknoloji olarak tanımlamışlardır. HCCI yanmasını, reaktivite kontrollü sıkıştırmalı ateşleme (RCCI) veya çift yakıtlı HCCI, kısmi yakıt katmanlaşması (PFS), PPCI ve buji destekli HCCI (SA HCCI) vb. içeren bir LTC türü olarak ele almışlardır. Çalışmadaki engelleri ortadan kaldırmak ve çalışma aralığını genişletmek amacıyla HCCI için gecikmeli yanma zamanlaması, PFS, çift enjeksiyonlu LTC ve özellikle SA-HCCI gibi çeşitli teknolojileri tartışmışlardır [88, 93].

Starck ve arkadaşları; HCCI, PCCI ve PPCI yanma stratejilerini içeren LTC gibi gelişmiş yanma süreçleriyle aynı anda düşük $NO_x$ ve PM elde etmek için umut verici yöntemler önermişlerdir [94]. HCCI motorun seri üretimi için; yanma aşaması kontrolünü sağlamak, çalışma aralığını genişletmek, homojen bir karışım hazırlığı sağlamak, soğuk çalıştırma ve yüksek gürültü seviyelerini ele almak ve yanmamış hidrokarbon (UHC) ve CO emisyonlarını azaltmak dahil olmak üzere beş zorluk bulunmaktadır [47]. Bu sorunlardan biri olan karışım hazırlama ve yanma aşaması kontrolü, HCCI motorların verimliliğinin ve emisyonlarının belirlenmesindeki önemi nedeniyle Bendu ve Murugan tarafından

kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [95]. HCCI motorlarında yanma aşamasını kontrol etme yöntemleri; karışım reaktivitesini değiştirme ve zaman-sıcaklık gelişim aşamalarını değiştirme olarak iki grupta sınıflandırılabilir. İlk grup; yakıt ön koşullandırma, egzoz gazı geri dönüşümü (EGR), iki veya daha fazla yakıtı harmanlama ve yakıt katkı maddeleri kullanarak yakıtın özelliklerini değiştirme gibi uygulamaları içermektedir. Yanma aşamasını kontrol etmek için alkol, eter, biyodizel vb. dahil olmak üzere çeşitli biyoyakıtların harmanlanması gibi yöntemler kullanılmaktadır [91]. Çeşitli alkoller arasında etanol, HCCI yanma kontrol stratejilerinde kullanılan tipik bir biyoyakıttır. İkinci grup; emme havası sıcaklık modülasyonlarını, silindirde yakıt enjeksiyon zamanlamasını, su enjeksiyonu gibi uygulamaları içermektedir.

Imtenan ve arkadaşları; dizel ve biyodizel kullanarak LTC stratejilerine ait emisyon özelliklerinin eleştirel bir incelemesini yapmışlardır. Bu çalışmada; HCCI, PCCI, PCI ve RCCI yöntemleri LTC elde etme stratejilerine dahil edilmiştir. Yazarlar, dizel yakıtlı LTC stratejilerinin aynı anda $NO_x$ ve PM'yi düşürdüğünü, ancak silindirdeki yanma sıcaklığını ve oksijen konsantrasyonunu düşürürken UHC ve CO emisyonlarını artırdığını bulmuşlardır. Bununla birlikte biyodizelin, önceden karıştırılmış yanmanın kısa süresi ve daha yüksek oksijen konsantrasyonu nedeniyle LTC modu sırasında dizele göre UHC ve CO emisyonlarını azaltabileceği sonucuna varmışlardır. Ancak HC ve CO seviyeleri hala geleneksel yanma sistemlerinden daha yüksek kalmaktadır [96].

Boot; yakın zamanda içten yanmalı (IC) motorlar için ana yanma süreçlerini; önceden karıştırılmış buji ateşlemeli (SI), difüzyon alevli (sıkıştırma ateşlemeli- CI) ve önceden karıştırılmış bir dolgunun toplu kendiliğinden tutuşması (HCCI) olarak sınıflandırmıştır. Gelişmiş CI (sıkıştırma ateşlemeli) motorları; kıvılcım destekli sıkıştırma ateşlemeli (SACI), PPC, RCCI, çift yakıtlı yanma (DFC), ön bölmeli alev ateşlemeli, pilot destekli sıkıştırma ateşlemeli (PACI) veya dizel pilot yanması (DPC) olmak üzere altı çalışma moduna ayırmıştır. Çalışmada; SACI'nin SI ve HCCI'nın bir kombinasyonu olduğu, ön yanma odalı SI ve DFC'nin SI ve CI'nın bir kombinasyonu olduğu, PPC ve RCCI'nın CI ve HCCI'nın bir kombinasyonu olduğu, DPC'nin geleneksel bir CI sürecinin bir versiyonu olduğu açıklanmaktadır [97].

Hasan ve Rahman; yakın zamanda HCCI motorların farklı koşullardaki motor performansı ve emisyon özelliklerini araştırmışlardır. HCCI yanması ile ilgili zorlukların;

yanma aşaması kontrolünü sağlamak, yüksek gürültü seviyelerini ele almak, uygun bir çalışma aralığı elde etmek, soğuk çalıştırmaları yönetmek ve homojen bir karışım hazırlığı sağlamak olduğunu tespit etmişler ve ardından bu zorluklara çözümler önermişlerdir [98].

İçten yanmalı motorlarda biyoyakıt kullanımını araştırmak için son zamanlarda çalışmalar yapılmıştır. Biyoyakıtlardan olan etanol, içten yanmalı motorlarda özellikle Brezilya'da saf etanol (E100) olarak, ABD, Kanada ve Avustralya'da %10 etanol ve %90 benzin (E10) karışımı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Benzine etanol ilavesinin yanma ve egzoz emisyonlarını belirli bir dereceye kadar iyileştirdiği bilinmektedir. Ancak ısıl verim önemli ölçüde değişmemektedir [92]. Ayrıca, $NO_x$ ve PM emisyonlarını azaltmak için bir oksijen sağlayıcı katkı olarak dizel yakıta da etanol ilave edilmektedir [71, 99].

Najt ve arkadaşları; dört zamanlı bir motorda, farklı motor hızlarında, farklı yakıtlar kullanarak, emme havası sıcaklıklarını değiştirmişler ve HCCI yanması üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, HCCI yanmasının silindirdeki karışım yoğunluğunu, sıcaklığını ve basıncını değiştirerek kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Yanma kontrolü zorluğu ve çalışma aralığının dar olması HCCI ile çalışmanın dezavantajları olarak belirtilmiştir [27].

Marriott ve arkadaşları; enjeksiyon zamanlaması değişiminin HCCI yanması için gerekli olan homojen karışım oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, erken enjeksiyon sayesinde $NO_x$ ve is emisyonlarında ciddi bir azalma meydana geldiğini, enjeksiyon süresi geciktirildiğinde ise bu emisyon değerlerinin yükseldiğini görmüşlerdir [100].

Hiraya ve arkadaşları; HCCI motorun çalışmasına EGR uygulamasının etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak; düşük seviyelerdeki EGR oranlarında HCCI modda motorun çalışma aralığının daha sınırlı olduğu, ancak motor gücünün bir miktar artış gösterdiği gözlemlenmiştir. EGR oranının yükselmesiyle birlikte motor çalışma aralığının arttığı ve motor gücünün azaldığı gözlemlenmiştir [101].

Machrafi ve arkadaşları; tek silindirli, su soğutmalı ve sıkıştırma oranı değiştirilebilen bir CFR motorunda deneyler yapmıştır. Deneylerde emme havası sıcaklığı, sıkıştırma oranı, eşdeğerlik oranı ve EGR sıcaklığı değiştirilerek emisyonlar üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. Sıkıştırma oranı, emme havası sıcaklığı, EGR sıcaklığı ve eşdeğerlik oranı yükseldikçe HC ve CO emisyonlarında yaklaşık %75 oranında azalma meydana gelmiştir [102].

Zhao ve arkadaşları; supap zamanlaması değişiminin HCCI yanmasına etkisini araştırmışlardır. Bu sayede egzoz gazlarının bir kısmı silindirde bırakılarak (dahili EGR) silindir içi sıcaklığın artması sağlanmakta ve böylece sıkıştırma ile elde edilmesi gereken ısı miktarı azaltılmaktadır. Yeterli egzoz gazının silindire gönderilmesiyle, HCCI yanmasına ait tutuşma süresinin ve ısı yayılımının kontrol edilmesi mümkün olmaktadır [62].

Garcia ve arkadaşları; bir dizel motorunu HCCI modda çalışacak şekilde modifiye etmişlerdir. Motor performansının dizel ve HCCI modlar arasındaki farkını gözlemlemişlerdir. Püskürtme avansını, emme havası sıcaklıklarını değiştirmişler ve soğuk EGR uygulaması yapmışlardır. Sonuç olarak en iyi HCCI çalışması, enjeksiyonun ÜÖN'dan 45 KMA önce yapıldığı şartlarda meydana gelmiştir. HCCI çalışmasında eşdeğerlik oranının doğrudan etkili olduğunu belirtmişlerdir. Eşdeğerlik oranı azaldıkça tutuşmanın daha geç olacağını tespit etmişler ve bu durumun motor performansını olumsuz etkileyeceğini belirtmişlerdir. HCCI modda is emisyonları ise EGR'den bağımsız olarak çok düşük seviyelerde tespit edilmiştir. HCCI modda $NO_x$ emisyonlarının ise çok düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca HCCI modda HC ve CO emisyonlarının, erken püskürtme ve silindir yüzeylerindeki yakıt birikiminden dolayı dizel yanmasına göre daha yüksek seviyelerde olduğu belirtilmiştir [103].

Çanakçı ve arkadaşları; elektronik kontrollü, direkt enjeksiyonlu, tek silindirli bir dizel motoru HCCI modda çalışacak şekilde modifiye etmişlerdir. Kademeli püskürtme ve mikro-genetik algoritma optimizasyonu ile motor çalışmasının optimize edilmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Püskürtme başlangıcı, emme havası giriş sıcaklığı, püskürtmelerdeki yakıt oranları ve kademeli püskürtme aralıklarını değişken olarak seçmişlerdir. Deneylerde kullanılan yakıtın basıncı 10 MPa ve motor hızı 700 d/d olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre, püskürtme sürelerinin optimizasyonu ile emisyonların önemli ölçüde azaltılmasının mümkün olduğunu ifade etmişlerdir [104].

Çanakçı ve arkadaşları; direkt enjeksiyonlu bir HCCI motorunda (DI-HCCI) emme havası sıcaklıklarının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini

incelemişlerdir. Deneyler tüm motor hızlarında, eşdeğerlik oranının 0,22 ve emme havası sıcaklığının 119℃ olduğu şartlarda yapılmıştır. Emme havası basınçları ise 101, 117 ve 138 kPa olarak değiştirilmiştir. Püskürtme avansı tüm deney koşulları için maksimum tork değerine göre seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre; emme havası basıncı arttıkça motor torku artmış, motor hızı arttıkça motor torku azalmıştır. Her basınç artışı için motor hızı ile birlikte egzoz sıcaklığı yükselmiştir. Ancak, püskürtme zamanının geciktirilmesiyle basınç artışı yükseldikçe egzoz sıcaklığı azalmıştır. Basınç arttıkça yanma veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük basınç artışlarının verime olumlu etkisi, yüksek artışlardan daha fazla olmuştur. Dolayısıyla yanma veriminin, motor hızından ziyade basınç artışı ve püskürtme avansı değerlerinden daha fazla etkilendiği ifade edilmektedir [105].

Chen ve arkadaşları; bir yanma simülasyon programı ile HCCI yanmasında EGR'nin kimyasal ve ısıl etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, EGR tarafından tutuşma için gerekli ısıl enerjinin kontrol edildiği gözlemlenmiştir. Ancak, HCCI yanmasının kontrolünü sağlayan kimyasal özelliklerin, ısı yayılım oranı ve tutuşma zamanında farklı olarak ortaya çıktığını belirtmişlerdir [106].

Tanaka ve arkadaşları; eşdeğerlik oranı, yakıt, katkı maddesi ve emme havası sıcaklıklarının HCCI motorlara olan etkilerini incelemişlerdir. Deneyleri farklı yakıt karışımları ile gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, ağır hidrokarbonların yanma oranının ve tutuşma gecikmesinin yakıt özelliklerinden oldukça fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. N-heptan ve i-oktan yakıt karışımları ile yapılan testlerde, tutuşma gecikmesinin n-heptanın içeriğindeki oksijen miktarıyla orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Deneylerde, yanma oranı ve basınç artışı değerlerinin, oktan sayısı ve eşdeğerlik oranı ile değiştiği gözlemlenmiştir. Tutuşma gecikmesi değerinin, DTBP (di tetra etil bütil peroksit) veya 2-EHN (2 etil hekzil nitrat)'ın karışıma eklenmesiyle veya emme havası sıcaklığının yükseltilmesiyle oldukça kısaldığı, ancak yanma oranının ve toplam basınç artışının bu şartlardan etkilenmediği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yapılan bu çalışmadan, HCCI yanmasında, yanma oranı ve tutuşma gecikmesi değişkenlerinin, çeşitli yakıt katkıları kullanılarak birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebileceği anlaşılmaktadır [11].

Ma ve arkadaşları; dört zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, bir dizel motorda, dizel ve n-heptan yakıtları ile yaptıkları deneylerde ön karışım oranının ve enjeksiyon zamanının kısmi HCCI çalışmasına etkilerini incelemişlerdir. Dizel yakıtı silindire yakıt pompası ile direkt olarak püskürtülürken, n-heptan yakıtı emme manifolduna elektronik kontrollü bir püskürtme sistemi ile püskürtülmüştür. Dizel çalışması ile kısmi HCCI modda çalışma kıyaslandığında; düşük ve orta yüklerde ön karışım oranının artışı ile indike ortalama efektif basıncın (IMEP) arttığı, geniş ön karışım oranlarında ve yüksek yüklerde ise azaldığı görülmüştür. Kısmi HCCI uygulamasındaki direkt enjeksiyon zamanı, emisyonları ve yanma özelliklerini sınırlı oranda etkilemiştir. Ek olarak, direkt enjeksiyon zamanı ve ön karışım oranı, kısmi HCCI motorların optimum çalışmasında önemli bir rol oynamaktadır. Kısmi HCCI uygulamasının, düşük ve orta yük seviyelerinde dizel motorunun indike ısıl verimini arttırma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür [107].

Lü ve arkadaşları; dört zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir HCCI motorunda n-heptan yakıtına tersiyer bütil eter (MTBE) ekleyerek yanma sürecinde meydana gelen değişiklikleri araştırmışlardır. Öncelikle deneyleri %100 n-heptan ile daha sonra %10, %20, %30, %40 ve %50 MTBE ekleyerek gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçları, karışımdaki MTBE oranının artışı ile birlikte düşük sıcaklık reaksiyonunun (LTR) ateşleme zamanlamasının geciktiğini, (LTR) sürecindeki ısı salınımının en yüksek değerinin azaldığını ve negatif sıcaklık katsayısı (NTC) süresinin uzadığını göstermektedir. Yüksek MTBE içeren karışımlarda en yüksek ve en düşük motor yüklerinde doğrusal bir artış gözlemlenmiştir. Karışım içerisindeki MTBE oranı arttıkça yanma kötüleşmiş ve yanma verimi düşmüştür. Karışım içerisindeki MTBE oranı arttıkça düşük sıcaklık (LTR) ve yüksek sıcaklık (HTR) reaksiyonları gecikmeli olarak gerçekleşmektedir. Yanma sürecindeki maksimum basınç ve ısı yayılım değerleri, tutuşma ÜÖN'da gerçekleştiğinde elde edilmiştir [108].

Lü ve arkadaşları; dört zamanlı, dört silindirli, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunu HCCI modda çalışması için düzenlemişlerdir. Motorun bir silindirini HCCI modda diğer silindirleri ise orijinal modda çalıştırmışlardır. N-heptan yakıtına; metanol, etanol, izopropanol, metil tetra bütil eter (MTBE) ilave ederek yanmada meydana gelen değişiklikleri gözlemlemişlerdir. Ateşlemeyi yavaşlatma bakımından en etkiliden etkisize doğru sırasıyla yakıtlar; metanol, etanol, izopropanol ve MTBE olarak belirlenmiştir. Isıl

verim ve emisyonlar bakımından bir sıralama yapıldığında ise etanol yakıtının en iyi etkiyi yaptığı görülmüştür. Katkıların gereğinden fazla kullanımı CO ve HC emisyonlarını arttırmış, ısıl verimi düşürmüştür. HC emisyonlarının yakıt içeriğindeki n-heptan miktarına göre, CO emisyonunun ise en yüksek yanma sıcaklığına göre değişim gösterdiği bildirilmiştir [109].

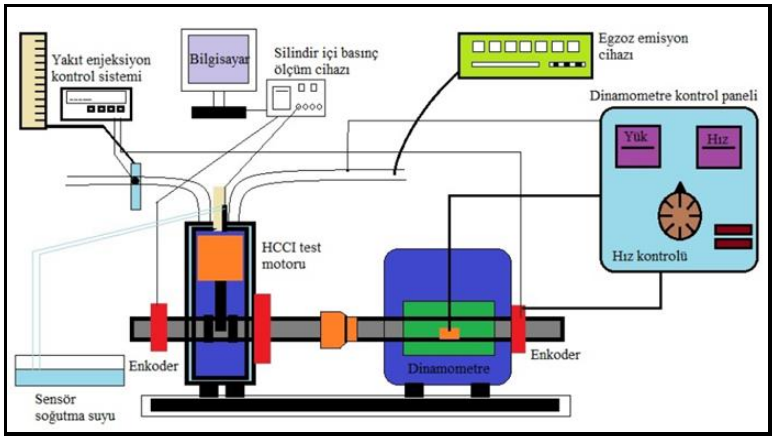
Christensen ve arkadaşları; yüksek uçuculuğa (i-oktan, etanol, doğalgaz) ve düşük setan sayısına sahip yakıtlar ile yüksek sıkıştırma oranlarında HCCI deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde elde edilen ısıl verimin geleneksel dizel motorlarınkine yakın olduğunu ifade etmişlerdir. HCCI modunda, 21/1 sıkıştırma oranında, i-oktan yakıtı ile yapılan deneylerde ön ısıtma ihtiyacı olmadığını ve etanol kullanıldığında 80℃ ve doğalgaz kullanıldığında ise 120℃'lik ön ısıtmalara ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir [110].

Sjöberg ve arkadaşları; HCCI motorlarının çalışmasında uygun olan en düşük yanma sıcaklıklarını incelemişlerdir. Deneylerde n-heptan, i-oktan, tolüen ve metil siklo hegzan yakıtlarını kullanmışlardır. Deneyleri sabit 1200 d/d motor hızında gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre; CO oluşum sürecinin kullanılan yakıttan bağımsız olarak meydana gelmesi sebebiyle yanma için gerekli olan maksimum yanma sıcaklığının yakıt türünden ve kendi kendine tutuşma sıcaklığından bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, maksimum yanma sıcaklığına yükselme sırasında reaksiyonun yavaşlaması sebebiyle, bu sürenin fazla değişim göstermemesinden dolayı, ÜÖN'deki yanma sürecinin gerekli olan maksimum yanma sıcaklığından bağımsız geliştiğini gözlemlemişlerdir. Motor hızının ise doğrudan yanma zamanından etkilenmesinden dolayı, kabul edilebilir maksimum karışım sıcaklığında etkili olduğunu tespit etmişlerdir [111].

# BÖLÜM 4. MATERYAL ve METOT

## 4.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada; dört zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı, doğal emişli bir dizel motorunun emme manifolduna elektronik kontrollü bir yakıt püskürtme sistemi adapte edilerek HCCI modunda çalışır hale dönüştürülmüş ve deneyler HCCI modda çalıştırılan bu motor ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler; Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. CI bir motorun HCCI modunda çalışır hale dönüştürülmesi için emme hattına elektronik olarak püskürtme zamanı ve miktarı ayarlanabilen bir enjeksiyon sistemi ilave edilmiştir. Yakıt karışımları bu püskürtme sistemi ile emme manifolduna püskürtülmüş ve homojen karışım bu şekilde hazırlanmıştır. Şekil 4.1'de deney düzeneği şematik olarak görülmektedir.




Şekil 4.1 : Deney düzeneği.

### 4.1.1. Deney motoru

Deneylerde; dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı, doğal emişli bir dizel motor, HCCI ile çalışacak şekilde dönüştürülerek kullanılmıştır. Şekil 4.2'de deney motoru, Tablo 4.1'de ise deney motoruna ait teknik özellikler görülmektedir.



Şekil 4.2 : Deney motoru.

Tablo 4.1 : Deney motoruna ait özellikler.

| | | |
|---|---|---|
| Marka/model | : | Lombardini, LDA450 |
| Çalışma prensibi | : | Dört zamanlı |
| Silindir sayısı | : | 1 |
| Silindir çapı | : | 85 mm |
| Strok boyu | : | 80 mm |
| Silindir hacmi | : | 0,454 litre |
| Sıkıştırma oranı | : | 17,5/1 |
| Maksimum moment | : | 1700 d/d - 28,5 Nm |
| Maksimum güç | : | 5,5 kW |
| Enjektör püskürtme basıncı (orijinal dizel modda) | : | 183 bar |
| Püskürtme zamanı | : | 25°BTDC (Üst ölü noktadan önce) |

### 4.1.2. Dinamometre

Deney motorunun testi için CUSSONS marka test cihazı kullanılmıştır. Test cihazındaki dinamometre, tek silindirli motor deneyleri için EPE-STS 132 E tipi, 4000 d/d'de 10 kW çıkış gücüne sahip elektrikli bir dinamometredir. Dinamometre ihtiyaç duyulduğunda bir elektrik motoru olarak çalışabilmektedir. Kontrol paneli üzerinden devir sayısı ayarlanarak kontrol edilmektedir. Kontrol paneli üzerinde ayrıca motor hızı, motor yükü, egzoz sıcaklığı göstergeleri bulunmaktadır. Tablo 4.2'de kontrol paneli üzerinden ölçülen motor hızı ve motor yükü ölçüm cihazlarının hassasiyetleri verilmiştir.

Tablo 4.2 : Kontrol panelindeki diğer ölçümler için hassasiyet ve ölçüm aralığı bilgileri.

| | Ölçüm aralığı | Hassasiyet |
|---|---|---|
| Motor hızı (d/d) | 0 - 7000 | 1 |
| Döndürme momenti (Nm) | 0 - 80 | 0,01 |



Şekil 4.3 : Deney düzeneği.

Şekil 4.3'te deney düzeneği görülmektedir. Motor deneylerine başlarken öncelikle dinamometre tarafından motoru döndürerek motorun dizel modunda çalışması sağlanmıştır. Motor rejim sıcaklığına ulaştıktan sonra, motorun HCCI modda çalışabilmesi için sonradan adapte ettiğimiz elektronik kontrollü enjeksiyon sistemi ile emme manifolduna deney yakıtı püskürtülmüş ve dizel yakıtı tamamen kesilerek motor tam HCCI modda çalıştırılmıştır. Dinamometre kontrol panelinden ölçüm yapılacak olan motor hızı ayarlanmış, ayrıca enjeksiyon kontrol panelinden yakıt miktarı ve püskürtme süresi ayarlanarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te dinamometre kontrol paneli ve Şekil 4.5'te enjeksiyon kontrol paneli görülmektedir.



Şekil 4.4 : Dinamometre kontrol paneli




Şekil 4.5 : Enjeksiyon kontrol paneli

### 4.1.3. Silindir içi basınç ölçüm sensörü

Silindir içi basınç ölçümü için AVL marka basınç sensörü kullanılmıştır. Sensör ölçüm sistemine ait bir motor krank mili açısı algılayıcısı bulunmaktadır. Deneylere başlamadan önce, motorun sıkıştırma sonu-yanma başlangıcındaki ÜÖN konumu, krank mili açısı algılayıcısına tanıtılmaktadır. Bu sayede krank mili açısına göre basınç değerini gösteren grafikler üretilebilmektedir. Ayrıca, yanma odasına bakacak şekilde yerleştirilen basınç ölçüm sensörünün yüksek sıcaklıklardan olumsuz bir şekilde etkilenmesini önlemek için soğutma devresi bulunmaktadır. Bu soğutma sisteminde, bir depodan sağlanan su sirkülasyonu ile sürekli olarak sensör soğutulmaktadır. Şekil 4.6'da silindir içi basınç ölçüm düzeneği görülmektedir.

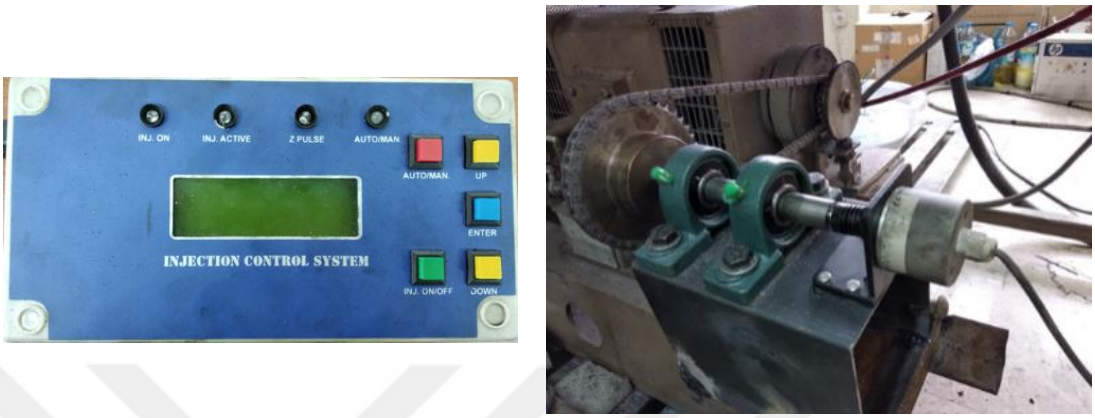



Şekil 4.6 : Silindir içi basınç ölçüm düzeneği.

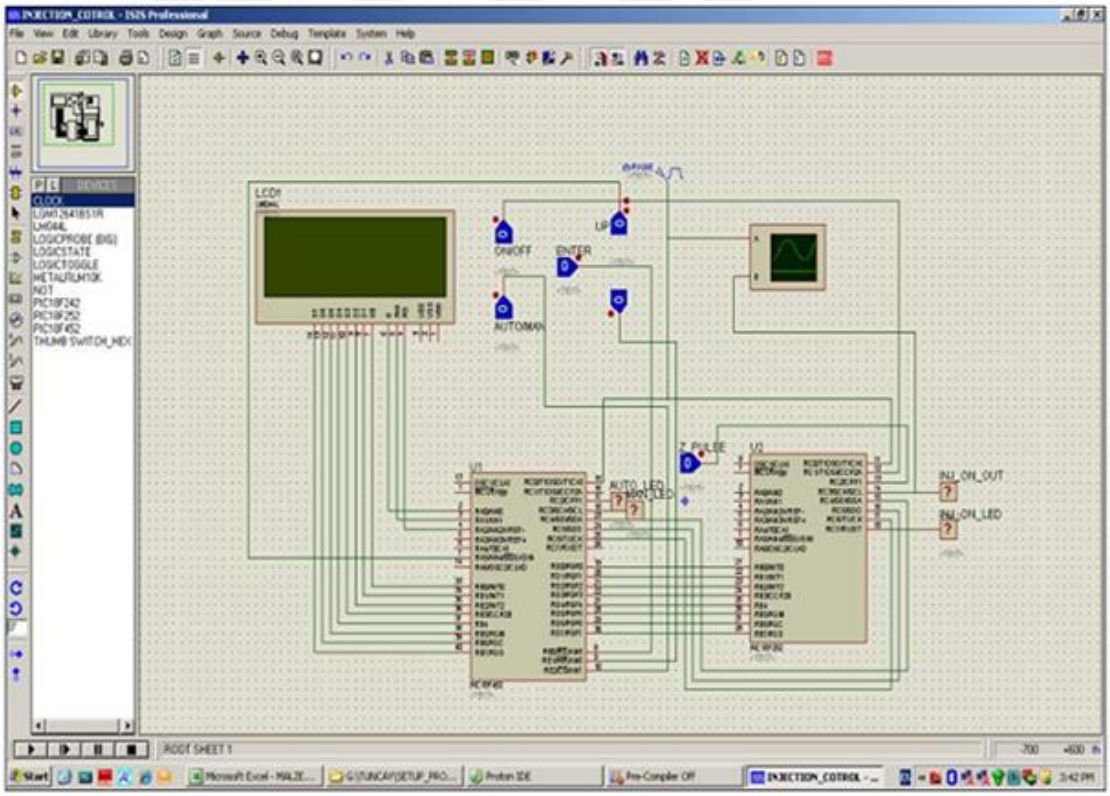
### 4.1.4. Enjeksiyon sistemi

Dizel motorun HCCI modunda çalışabilmesi için emme manifolduna yakıt püskürtebilen elektronik kontrollü bir enjeksiyon sistemi kullanılmıştır. Sonradan motora adapte edilen enjeksiyon sistemi, otomatik ve manuel olarak çalışabilmektedir. Motorun çıkış miline bağlı bir devir sayıcı ile motor hızı ölçülmektedir. Ölçülen devir dikkate alınarak,

enjeksiyon sisteminin kontrol paneli üzerinden ayarlanan krank mili açısı değerine göre enjeksiyon başlatılmakta ve kullanıcı tarafından istenen süre kadar püskürtme devam etmektedir.



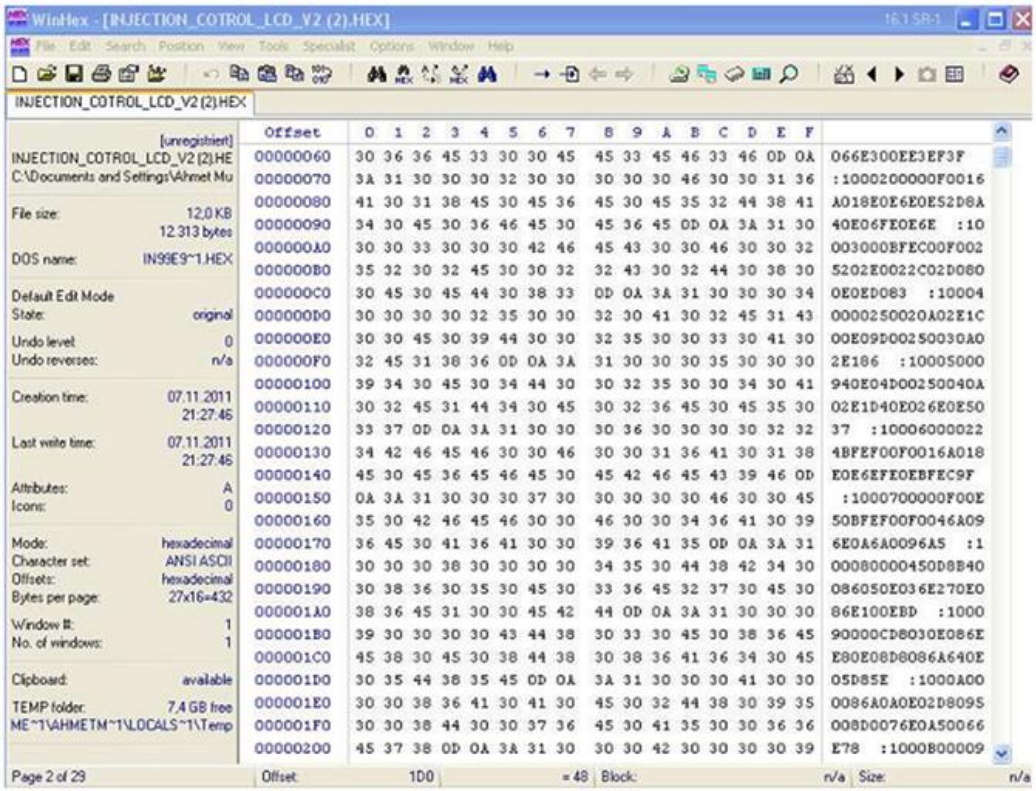

Şekil 4.7 : Enjeksiyon sistemi.




Şekil 4.8 : Enjeksiyon sisteminin yapısı.

Otomatik çalışma modunda motor hızına göre enjeksiyon zamanı otomatik olarak ayarlanmaktadır. Manuel modda ise ayarlanan süre kadar enjeksiyon devam etmektedir.

Enjeksiyon sisteminin kumanda panosunda; devir, süre ve enjeksiyonun başlayacağı krank mili açısına ait ayarlanan ve gerçek değerler görülmektedir. Alt menüleri kullanarak ayar işlemleri ayrı ayrı yapılabilmektedir. Enjeksiyon sisteminde kontrolü sağlayan iki adet mikroişlemci bulunmaktadır. Şekil 4.7'de enjeksiyon sistemi görülmektedir. Şekil 4.8'de ise enjeksiyon sisteminin yapısı ve Şekil 4.9'da mikro kontrol yazılımı gösterilmektedir. Ayrıca enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.




Şekil 4.9 : Mikro kontrol yazılımı.

Tablo 4.3 : Enjeksiyon sisteminin teknik özellikleri.

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

### 4.1.5. Yakıt ölçüm düzenekleri

Yakıt ölçümü için standart dizel deneylerinde CAS ED-H marka hassas terazi ve KENKO KK-613D marka bir kronometre kullanarak debi ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.10'da deneylerde kullanılan hassas terazi ve Tablo 4.4'te hassas teraziye ait teknik özellikler görülmektedir. Şekil 4.11'de kronometre cihazı ve Tablo 4.5'te kronometre cihazına ait teknik özellikler görülmektedir.



Şekil 4.10 : Hassas terazi.




Şekil 4.11 : Kronometre.

Tablo 4.4 : Hassas teraziye ait teknik özellikler.

| | | |
|---|---|---|
| Marka/Model | : | CAS/ED-H |
| Kapasite (kg) | : | 6 |
| Hassasiyet (g) | : | 0,2 |
| Çözünürlük | : | 1/30000 |
| Ekrandaki rakam sayısı | : | 6 |
| Ekran tipi | : | LCD (mavi arka ışıkı) |
| Güç tipi | : | Şarj edilebilir pil veya DC adaptörü |
| Bir şarj ile maksimum açık kalma süresi (saat) | : | 200 (arka ekran ışığı kapalı iken) |
| Boyutlar (genişlik x yükseklik x derinlik) (mm) | : | 330 x 346 x 107 |
| Cihaz ağırlığı (kg) | : | 4,5 |

Tablo 4.5 : Kronometre teknik özellikleri.

| | | |
|---|---|---|
| Marka/Model | : | KENKO/KK-613D |
| Hassasiyet (saniye) | : | 0,01 |
| Ekran tipi | : | Led (gün ışığı) |
| Çalışma süresi (saat) | : | 10 |
| Güç | : | Pil |
| Ampul ömrü (saat) | : | 100.000 |
| Boyutlar (genişlik x yükseklik x derinlik) (mm) | : | 6,7 x 4 x 1,3 |

### 4.1.6. Emisyon ölçümü

Deneylerde egzoz emisyonu ölçümleri BOSCH/BEA350 marka emisyon ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Emisyon ölçüm cihazı; CO, $CO_2$, HC, $O_2$, λ ve NO ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir. Şekil 4.12'de emisyon cihazı görülmektedir. Tablo 4.6'da emisyon cihazının teknik özellikleri verilmiştir.




Şekil 4.12 : Emisyon ölçüm cihazı.

Tablo 4.6 : Emisyon ölçüm cihazı teknik özellikleri.

| Değerler | Ölçüm aralığı | Hassasiyet |
|---|---|---|
| CO | % 0.000–10.00 (hacimsel) | % 0.001 (hacimsel) |
| $CO_2$ | % 0.00–18.00 (hacimsel) | % 0.01 (hacimsel) |
| HC | 0–9.999 ppm (hacimsel) | 1 ppm (hacimsel) |
| $O_2$ | % 0.00–22.00 (hacimsel) | % 0.01 (hacimsel) |
| λ | 0.500–9.999 | 0.001 |
| NO | 0–5000 ppm (hacimsel) | <=1 ppm (hacimsel) |

## 4.2. Yakıt Özellikleri

Deneylerde yakıt olarak dizel, benzin ve hafif nafta kullanılmıştır. Tablo 4.7'de yakıt özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 4.7 : Dizel, benzin ve hafif nafta yakıtının özellikleri.

| Özellikler | Hafif nafta | Benzin | Dizel |
|---|---|---|---|
| Isıl değer (kj/kg) | 43.360 | 43.400 | 42.550 |
| Araştırma oktan sayısı | 68 | 95 | - |
| Setan sayısı | - | - | 40-60 |
| Kaynama noktası (˚C) | 26,7-148,9 | 32-221 | 453-653 |
| Yoğunluk (20˚C'deki kg/cm$^3$ değeri) | 0,72 | 0,73 | 0,84 |
| Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (˚C) | 280-470 | 246-280 | 210 |

### 4.2.1. Dizel yakıtı

Dizel yakıtı, petrol rafinerilerinde ham petrolün 200℃ ile 380℃ sıcaklıklar arasında damıtılması ile elde edilen, özgül ağırlığı 0,84 kg/cm$^3$ olan bir yakıttır. Dizel yakıtını oluşturan hidrokarbonlardaki karbon sayısı 8 ile 16 arasında değişmektedir. İçeriğinde %1 S (kükürt), %0,02 kül ve çok az miktarda N (azot) bulunmaktadır [15].

Dizel motorların vuruntu özellikleri, dizel yakıtının tutuşma kabiliyetine bağlıdır. Tutuşma kabiliyeti, dizel yakıtının silindir içerisinde hava ile karışarak kendi kendine alev alabilme yeteneğidir. Dizel yakıtının tutuşma kabiliyetini, yakıtın içeriğindeki setan sayısı belirlemektedir. Setan sayısı arttıkça tutuşma gecikmesi azalmaktadır. Setan sayısı azaldıkça, tutuşma gecikmesi artmakta ve dizel vuruntusuna sebep olmaktadır [15].

### 4.2.2. Benzin yakıtı

Benzin; petrol rafinerilerinde ham petrolün 32℃ ile 204℃ sıcaklıklar arasında damıtılması ile elde edilen, özgül ağırlığı 0,68 kg/cm$^3$ ile 0,76 kg/cm$^3$ arasında olan, renksiz ve kendine has bir kokuya sahip olan bir hidrokarbonlar karışımıdır. Benzini oluşturan hidrokarbonlardaki karbon sayısı 4 ile 10 arasında değişmektedir. İçeriğinde çok az miktarlarda olmak koşuluyla petrolden gelen S (kükürt) ve N (azot) bulunmaktadır.

Normal şartlar altında sıvı haldedir. Benzinin içinde parafinik, etilenik, naftanik ve benzenik hidrokarbonlar bulunmaktadır [15].

Benzin, genel olarak $C_nH_m$ kapalı formülü ile ifade edilmektedir. Benzinin özelliklerini iyileştirmek ve renk vermek amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır. Benzinin yapısında;

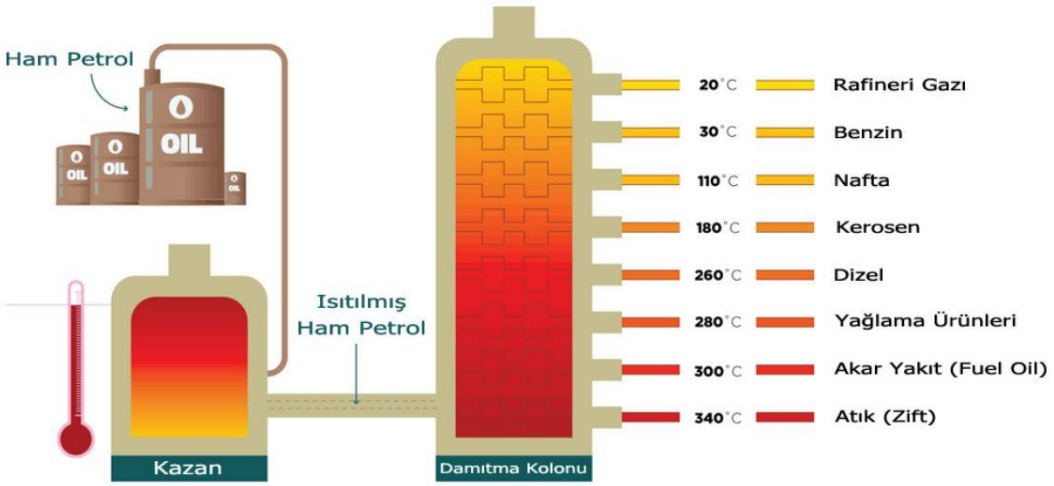
- $C_nH_{2n+2}$ kapalı formülü ile gösterilen parafinik HC'ler,
- $C_nH_n$ kapalı formülü ile gösterilen etilenik (hafif) HC'ler,
- $C_nH_{2n}$ kapalı formülü ile gösterilen naftanik HC'ler,
- $C_nH_{2n-6}$ kapalı formülü ile gösterilen benzenik HC'ler bulunmaktadır [15].

Motorun sıkıştırma oranını arttırmak motor verimini arttırmaktadır. Benzinin oktan sayısı, sıkıştırma oranını doğrudan etkileyen bir özelliktir. Oktan sayısı yükseldikçe yakıtın vuruntu dayanımı da yükselmektedir. Oktan sayısı, yakıtın içerisindeki izo-oktan oranına bağlıdır.

### 4.2.3. Hafif nafta yakıtı

Nafta, petrol rafinerilerinde ham petrolün damıtılması ile elde edilen ara ürünlerden biridir. Ham petroldeki hafif gazlar ile daha ağır sıvı gazyağı arasındaki sıvı bir ara maddedir. Naftalar, yaklaşık 0,7 kg/cm$^3$'lük bir özgül ağırlığa sahip, uçucu ve yanıcı maddelerdir. Genel isim olarak 'nafta' farklı uygulamalarda kullanılan bir dizi farklı rafineri ürününü tanımlamaktadır. Nafta, bir dizi farklı yanıcı sıvı hidrokarbon karışımını ifade etmektedir. Petrol içindeki sıvı hidrokarbonların en hafif ve en uçucu fraksiyonlarını kapsayan geniş bir terimdir. Nafta, benzine çok benzeyen renksiz, uçucu ve aromatik bir sıvıdır [116]. Şekil 4.13'te ham petrolün damıtılması sırasında elde edilen ürünler gösterilmiştir.

Nafta esas olarak, katalitik dönüştürme metodu ile yüksek oktanlı benzin üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bitüm madenciliği endüstrisinde seyreltici olarak, petrokimya endüstrisinde buharlı krakerlerde olefin üretmek amacıyla ve kimya endüstrisinde solvent (çözücü/temizleyici) uygulamalarında kullanılmaktadır. Nafta ile üretilen yaygın ürünler; çakmak sıvısı, kamp sobaları için yakıt ve bazı temizleme maddelerindeki çözücüler olarak sıralanabilir [116].




Şekil 4.13 : Ham petrolün damıtılması.

Petrol mühendisliğinde nafta, 30℃ ile 200℃ sıcaklıklar arasında kaynayan petroldeki hidrokarbonların fraksiyonu olarak tanımlanır. Genellikle 5 ile 12 arasında karbon atomuna sahip olan karmaşık bir hidrokarbon molekülleri karışımından meydana gelmektedir. Tipik olarak ham petrolün ağırlıkça %15 - %30'unu oluşturur. Hafif nafta, 30℃ ile 90℃ arasında kaynayan kısımdır ve 5-6 karbon atomlu moleküllerden oluşur. Ağır nafta, 90℃ ile 200℃ sıcaklıklar arasında kaynayan kısımdır ve 6 - 12 karbonlu moleküllerden oluşur [116].

Hafif nafta; kimyasallar ve kauçuk ürünler gibi başka maddeleri üretmek için kullanılan endüstriyel bir ara üründür. Yakıtlar, antifriz ürünleri, kaplama ürünleri, yağlayıcılar, gresler, temizleme ürünleri, kaynak ve lehimleme ürünleri gibi farklı ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Çeşitli sektörlerdeki kullanım uygulamalarından bazıları; buzdolaplarındaki soğutma sıvıları, yağ bazlı elektrikli ısıtıcılar, otomotivde kullanılan süspansiyon sıvıları, motor yağı ve fren hidrolik sıvılarındaki yağlayıcılar olarak sıralanabilir [115].

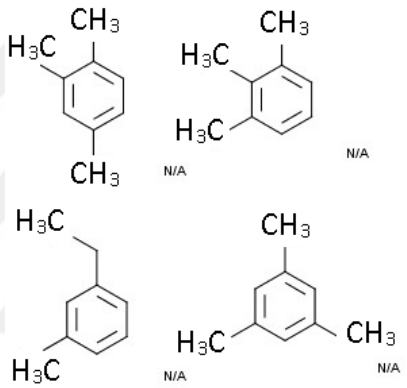
Hafif nafta, kanserojen ve mutajenik etkileri sebebiyle tehlikeli madde sınıfında yer almaktadır. Resmi olarak Avrupa Birliği'nde kanserojen ve mutajenik olarak tanınmıştır. Bu maddenin yutulması ve solunum yollarına girmesi kansere, genetik sorunlara ve ölüme yol açabilmektedir. Araştırmacı kuruluşların Avrupa Kimya Ajansı'na sağladığı bilgilere göre farklı tehlikeli madde sınıflandırmaları da yapılmıştır. Şekil 4.14'te tehlike sınıflandırmalarına ait uyarı etiketleri görülmektedir. Bu sınıflandırmalara göre, hafif

naftanın uzun süre etkilerinin toksik sonuçları olduğu, son derece yanıcı bir sıvı ve buhar olduğu, doğurganlığa ve doğmamış bebeğe zarar verdiğinden şüphelenildiği, cilt tahrişine, uyuşukluk veya baş dönmesine neden olabileceği belirtilmektedir [115].



Şekil 4.14 : Hafif naftanın tehlike sınıflandırma etiketleri.

Çözücü olarak kullanılan hafif aromatik petrol naftasının kapalı formülü $C_{36}H_{48}$ olarak verilmektedir. Şekil 4.15'te ise molekül bağları görülmektedir.




Şekil 4.15 : Çözücü olarak kullanılan hafif aromatik petrol naftasının molekül bağları.

## 4.3. Belirsizlik Analizi

Tüm deneysel çalışmaların doğasında hatalar ve bunlara bağlı olarak belirsizlikler vardır. Deneylerden elde edilen veriler ile hesaplanan değerlerin doğrulukları ölçüm esnasında kullanılan cihazların hata yüzdelerinden etkilenmektedir. Belirsizliklerin tespiti için kullanılan cihazların hata yüzdeleri ve belirsizlikleri tespit edilmiştir [5, 113].

Deneylerde elde edilen sayısal veriler değerlendirilirken farklılıklar göz önünde bulundurularak ortalama değerler hesaplanmıştır. Motor deneylerinde üç deney ortalaması alınarak nihai sonuçlar elde edilmiştir. Bu ortalama değerlerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için standart sapmalar hesaplanmıştır. Ayrıca sınırların dışında kalan veriler Chauvenet kriteri uygulanarak elenmiş veya düzeltilmiştir. Bu kriter, ölçümlerde okunan değerlerin şüpheli olanlarının devreden çıkarılması için

kullanılmaktadır. Bu kriterin uygulanabilmesi için tüm ölçü cihazlarının hata oranlarının ve standart sapmalarının bilinmesi gerekmektedir [5, 113].

Tanım olarak sapma ($d_i$), i'ninci veri ile ortalama değer arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır:

$$d_i = (x_i - \bar{x}) \tag{4.1}$$

n tekrarlı bir ölçümün ortalaması ($x_m$):

$$x_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{4.2}$$

Standart sapma (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n\text{-}1}\sum_{i\text{-}1}^{n}(x_i\text{-}\bar{x})^2} \tag{4.3}$$

Ölçüm ortalamasının belirsizliği ($S_{\bar{x}}$):

$$S_{\bar{x}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{4.4}$$

Formülde;

σ: Ölçümün standart sapması

n: Tekrar edilen ölçüm sayısı

$S_{\bar{x}}$ ifadesi aynı zamanda ortalamanın standart hatası (σ) olarak adlandırılmaktadır. Eğer ölçümlerde sistematik bir hata söz konusu değilse ölçülen belirli sayıdaki verinin ortalaması ($x_i$):

$$x_i = \bar{x}_m \pm t_{v,99} S_{\bar{x}} = \bar{x}_m \pm P_{xi} \tag{4.5}$$

Formülde;

$\pm t_{v,99} S_{\bar{x}}$ : Ölçüm ortalamasındaki rastgele belirsizlik ($P_{xi}$)

P : Güvenilirlik aralığı (%)

t : ν' ye bağlı serbestlik derecesi (ν = n-1)

Deneylerde ölçülen değerler ile hesaplanan parametreler çok sayıda bağımsız değişken içermektedir. Bağımsız değişkenler ne kadar fazla olursa ortalama belirsizlik o kadar artmaktadır. Bu bağımsız değişkenlerin ortalamaya etkisi, toplam belirsizliği ifade etmektedir.

Ölçümdeki rastgele belirsizlik $P_{xi}$ ve $x_i$ bağımsız değişkeninin sistematik belirsizliği $T_{xi}$ olmak üzere, toplam belirsizliği içeren doğru ortalama değer bu şekildedir;

$$R = \overline{R} \pm u_R \tag{4.6}$$

Formülde;

$\overline{R}$ : Ölçümün ortalama değeri

Toplam belirsizlik yukarıdaki gibi ifade edilmektedir. Sistematik ve rastgele belirsizlik arasındaki bağıntı aşağıda gösterilmiştir.

$$u_R = f(T_{x1}, T_{x2}, \dots\dots\dots T_{xm}, P_{x1}, P_{x2}, \dots\dots\dots\dots P_{xm}) \tag{4.7}$$

Sistematik belirsizlik ($T_x$):

$$T_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} [\theta_i T_{xi}]^2} \tag{4.8}$$

Formülde;

$\Theta_i$ : Duyarlılık indeksi

Toplam rastgele belirsizlikler $P_x$ olarak ifade edilir.

$$P_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} [\theta_i P_{xi}]^2} \tag{4.9}$$

Toplam belirsizliğe sistematik ve rastgele belirsizliğin etkileri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u_R = \pm\sqrt{T_x^2 + \left(t_{v,99} B_x\right)^2} \tag{4.10}$$

Tablo 4.8 : Deneysel bulguların seçilmesi için Chauvenet kriteri [5, 113].

| Tekrarlı ölçüm sayısı | \|di\|/s |
|---|---|
| 3 | 1,38 |
| 4 | 1,54 |
| 5 | 1,65 |
| 7 | 1,8 |
| 10 | 1,96 |
| 15 | 2,13 |
| 50 | 2,57 |
| 100 | 2,81 |
| 300 | 3,14 |
| 500 | 2,29 |
| 1000 | 3,48 |

Chauvenet kriterinin uygulanabilmesi için, ölçümlere ait sapmalar ($d_i$) ve standart sapmalar ($\sigma$) önceden bilinmelidir. Tablo 4.8'de deneylerdeki tekrarlı ölçüm sayıları ve sapma değerleri görülmektedir. Deneylerden elde edilen ölçümler arasında kriter değerlerinden büyük olanlar elenerek hesaplamaların dışında tutulmuştur.

Deneyler sırasında ölçülen değerlerin belirsizliklerinin birbirinden bağımsız olduğu durumda, bağımlı değişkene ait toplam belirsizlik kısmi diferansiyel çözüm tekniği ile bulunmuştur. Bu yöntem ile hesaplanan belirsizlikler Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9 : Belirsizlik değerleri.

| Parametreler | Sistematik belirsizlikler ± |
|---|---|
| Yük (N) | 0,1 |
| Motor hızı(d/d) | 1 |
| Zaman (s) | 1 |
| Yakıt tüketimi (g) | 0,1 |
| Güç (kW) | 1,44 |
| Tork (Nm) | 1,41 |
| Özgül yakıt tüketimi (g/kWh) | 3,05 |

## 4.4. Ölçüm Yöntemi

Deneysel çalışmaya başlamadan önce, motor ve dinamometre arasındaki hareketi ileten bağlantıların sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli altyapı hazırlanmıştır. Motorun dinamometre sistemine doğru olarak bağlanabilmesi ve ölçümlerin sağlıklı bir şekilde alınabilmesi için öncelikle, dinamometrenin kaplin düzeneğine uygun flanş yaptırılarak motorun krank mili çıkışı dinamometre bağlantısına adapte edilmiştir. Daha sonra, aynı eksen üzerinde hareket aktarımını sağlayabilmek için motor yüksekliği ayarlanmıştır.

Deneylere başlamadan önce motor bakımları yapılmıştır. Bakım kapsamında motor yağı ve filtreleri değiştirilmiştir. Motorun yakıt düzenleyici sistemi devre dışı bırakılmıştır. Böylece standart dizel modunda deney yapılırken motor hızı kontrolü el ile sağlanabilmiştir.

Tam yük deneylerine başlamadan önce hareket iletim sisteminin kontrolü yapılmıştır. Ayrıca motorun yakıt ve yağ devrelerinin sızdırmazlıkları kontrol edilmiştir. Test yakıtının var olduğundan emin olunarak teste başlanmıştır. Motor ilk olarak dinamometre tarafından yüklenmeden çalıştırılmıştır. Motor, kendi çalışma hızında rejim sıcaklığına gelene kadar boşta çalıştırılmıştır. Çalışma sıcaklığına geldikten sonra motor, maksimum

hıza getirilmiştir. Motor kararlı çalışma sıcaklığına geldiğinde, dinamometre tarafından yüklenerek test hızına getirilmiştir. Motor çalışma sıcaklıkları kararlı hale geldiğinde ölçümler alınmıştır. Motorun gaz konumu değiştirilmeden dinamometre tarafından yük değişimi yapılarak, motor hızı değiştirilmiş (sabit gaz kolu konumu 'tam gaz' – değişken yük) ve diğer ölçümler bu yöntem izlenerek gerçekleştirilmiştir.

HCCI modundaki deneylerin gerçekleştirilmesi için ölçüm yönteminin değiştirilmesi gerekmiştir. Standart dizel modunda yapılan 'tam gaz-değişken yük' deneylerinde, motorun gaz kolu maksimum seviyede sabit tutulmuş ve devir değişimi dinamometre yükü değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. HCCI modunda yapılan testlerde ise motorun dizel yakıt pompası ve enjektörü devre dışı bırakılmış, bunun yerine HCCI çalışması için tasarlanmış olan enjeksiyon sistemi ile emme manifolduna yakıt püskürtülerek karışım sağlanmıştır. Motor hızı, standart dizel modundaki testlerde olduğu gibi dinamometre yükü ile değiştirilmiştir. Motor, ölçüm hızına getirildiğinde ise enjeksiyon sisteminin kontrol paneli üzerinden enjeksiyon miktarı değiştirilerek, farklı enjeksiyon sürelerinin motor çalışmasında meydana getirdiği değişimler not edilmiştir. HCCI modda yapılan deneyler; 1100, 1300, 1500 ve 1700 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir.

Standart dizel modunda yapılan deneylerde, standart dizel yakıtı %100 dizel (StdD) kullanılmıştır. HCCI modda yapılan deneylerde; %100 hafif nafta (N100), %90 hafif nafta + %10 benzin (N90), %80 hafif nafta + %20 benzin (N80), %70 hafif nafta + %30 benzin (N70), %50 hafif nafta + %50 benzin (N50) yakıtları kullanılmıştır.

## 4.5. Hesaplama Yöntemleri

Motor deneylerinde alınan ölçümlerden hesaplanan değerler; döndürme momenti, efektif güç ve özgül yakıt tüketimidir.

### 4.5.1. Döndürme momenti

Motorun test hızındaki döndürme momenti, dinamometre gövdesine bağlı S tipi bir yük hücresinin gösterdiği yük değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Deney yapılan dinamometreye ait kol uzunluğu 0,25 metredir. Yük hücresinden kilogram olarak ölçülen yük değerleri yerçekimi ivmesi ile çarpılarak Newton'a dönüştürülmüş ve kol uzunluğu

olan 0,25 metre değeri ile çarpılarak tork değerleri Newton metre (Nm) cinsinden hesaplanmıştır.

$$M = F.L \tag{4.11}$$

Formülde;

M : Moment (Nm)

F : Kuvvet (N)

L : Moment kolu uzunluğu (m)

### 4.5.2. Efektif güç

Motorun döndürme momenti hesaplandıktan sonra, motor hızı verilerini de kullanarak aşağıdaki formül ile efektif güç hesaplanmaktadır [5, 113].

$$P_e = \frac{M.n}{9549} \tag{4.12}$$

Formülde;

Pe : Efektif güç (kW)

M : Moment (Nm)

n : Motor hızı (d/d)

### 4.5.3. Özgül yakıt tüketimi

Standart dizel modunda yapılan deneylerde özgül yakıt tüketimi değerini hesaplayabilmek için, saniyede tüketilen yakıt miktarı hassas terazi ile kütlesel olarak ölçülmüştür. Kronometre ile süre tutularak 30 saniyede motorun tükettiği yakıt miktarı hassas bir terazi kullanılarak gram cinsinden ölçülmüştür. Buradan, ölçüm alınan motor hızında tüketilen yakıtın kütlesel debisi gram/saniye cinsinden elde edilmiştir. Formül 4.13 uygulanarak g/kWh cinsinden özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

$$b_e = \frac{3600.\Delta V.\rho_y}{P_e.\Delta t} = \frac{3600.\dot{m}_y}{P_e} \quad (4.13)$$

Formülde;

$b_e$ : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

$\Delta V$ : Yakıt hacmi ($cm^3$)

$\rho_y$ : Yakıt yoğunluğu ($g/cm^3$)

$\Delta t$ : Zaman (s)

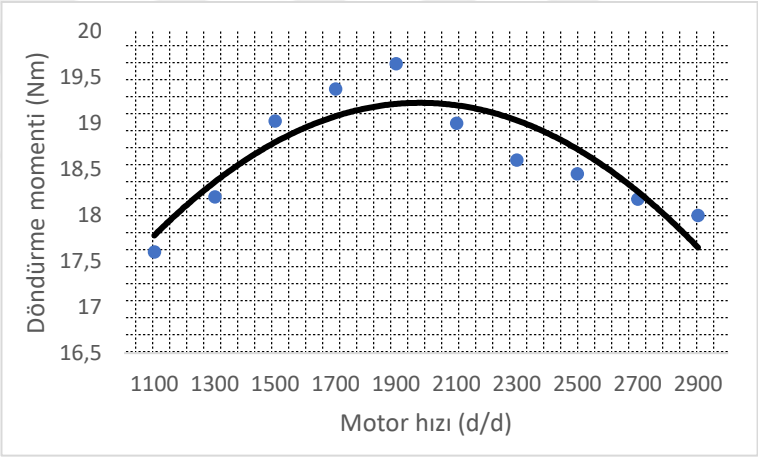
$P_e$ : Motor gücü (kW)

$\dot{m}_y$ : Kütlesel yakıt debisi (g/s)

HCCI modda yapılan motor deneylerinde ise yakıtın kütlesel debisi farklı bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. HCCI modda ayrı bir enjeksiyon sistemi kullanıldığından, deneylerde tüketilen yakıt karışımlarının kütlesel debilerini hesaplayabilmek için, deneylere geçmeden önce yakıt karışımlarının enjektörden birim zamanda püskürtülme miktarları gram cinsinden ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan enjektöre eşdeğer bir enjektör kullanılarak, birim zamanda püskürtülen yakıt miktarları tüm karışımlar için tek tek gram cinsinden ölçülmüştür. Böylece HCCI modda kullanılacak olan bütün yakıt karışımlarına ait kütlesel debi karakteristikleri elde edilmiştir. Her yakıt karışımı farklı bir yoğunluk değerine sahiptir. Her bir karışım için yoğunluk değerleri öncelikle hacimsel karışım oranına göre hesaplanıp not edilmiştir. Test esnasında ise enjeksiyon sisteminin ekranından enjeksiyon süresi okunmuş ve gram/saniye cinsinden püskürtülen karışımın kütlesel debisi hesaplanmıştır.

# BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

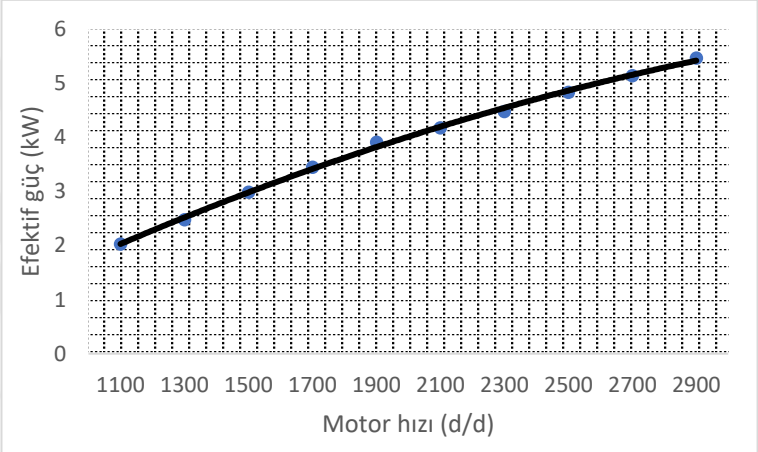
Deney motoru olarak tek silindirli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu, doğal emişli bir dizel motor kullanılmıştır. Motor HCCI modunda çalışacak şekilde dönüştürülmeden önce dizel yakıtı ile orijinal dizel modunda tam yük testi yapılarak standart veriler elde edilmiştir. Standart dizel modunda %100 dizel yakıtı ile yapılan tam yük testi; 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100, 2300, 2500, 2700 ve 2900 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Standart tam yük deneylerinde elde edilen karakteristikler Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'teki grafiklerde gösterilmiştir.




Şekil 5.1 : Dizel tam yük döndürme momenti karakteristiği.

Şekil 5.1'deki standart dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan tam yük deneylerinden elde edilen döndürme momenti karakteristiğine bakıldığında, 1900 d/d motor hızında 19,7 Nm değeri ile en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Döndürme momentinin en yüksek seviyede olduğu motor hızında, silindir içerisine alınan dolgu miktarı maksimum seviyede olmaktadır. En yüksek döndürme momentinin elde edildiği motor hızına göre düşük motor hızlarında ve yüksek motor hızlarında çeşitli sebeplerle silindir içerisindeki dolgu miktarı azalmaktadır. Düşük motor hızlarında, silindire alınan dolgu ulaşılabilecek en yüksek seviyelerde değildir. Doğal emişli bir motorda bunun sebebi, motor hızının

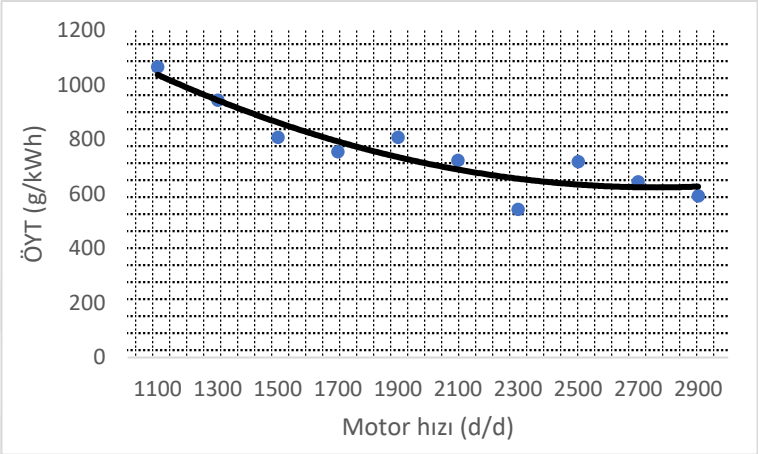
yeteri kadar yüksek olmamasıdır. Bu nedenle atmosferden silindire alınan temiz hava miktarı sınırlı olmaktadır. En yüksek karışım oranına, en yüksek döndürme momentinin ölçüldüğü motor hızında ulaşılmaktadır. Bu karışım oranında, motor maksimum dolguyu silindire alır ve iyi bir yanma için gerekli zamana sahiptir. Böylece bu orta motor hızında en yüksek döndürme momenti elde edilir. Motor hızı arttıkça çevrimin tamamlanması için ayrılan süre kısalmaktadır. Emme süresinin kısalması ile birlikte silindir içerisine alınan dolgu miktarı da azalmaktadır. Bu nedenle, en yüksek döndürme momentinin elde edildiği motor hızından daha yüksek motor hızlarına çıkıldıkça döndürme momentinde azalma görülmektedir.




Şekil 5.2 : Dizel tam yük efektif güç karakteristiği.

Şekil 5.2'deki standart dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan tam yük deneylerinden elde edilen efektif güç karakteristiğine bakıldığında, en yüksek efektif güç değerinin en yüksek ölçüm hızı olan 2900 d/d motor hızında 5,47 kW olarak ölçüldüğü görülmektedir. Güç, birim zamanda yapılan iş olarak tanımlanmaktadır. Denklem 4.12'de efektif güç formülü verilmiştir. Formül incelendiğinde, döndürme momenti ve motor hızının çarpımı ile efektif güçteki değişiminin gözlenebileceği anlaşılmaktadır. Şekil 5.1 incelendiğinde, motor hızına bağlı olarak döndürme momentinde çok büyük bir değişimin olmadığı görülmektedir. En düşük döndürme momenti değeri 1100 d/d motor hızında 17,6 Nm olarak, en yüksek döndürme momenti değeri ise 1900 d/d motor hızında 19,7 Nm olarak ölçülmüştür. En yüksek ve en düşük döndürme momenti arasındaki değişim %10,66'dır. Dolayısıyla efektif güç hesabı yapılırken, motor hızındaki artış ile birlikte efektif güç değerinin de artacağı görülmektedir. En düşük döndürme momentinin ölçüldüğü 1100 d/d

motor hızı ile en yüksek döndürme momentinin ölçüldüğü 1900 d/d motor hızları arasında döndürme momentinde meydana gelen artış nedeniyle efektif güç artışı daha belirgin gözlemlenirken, 1900 d/d motor hızından yukarıya doğru gidildikçe döndürme momentinde meydana gelen düşüş nedeniyle efektif güçteki artışın azaldığı görülmektedir.

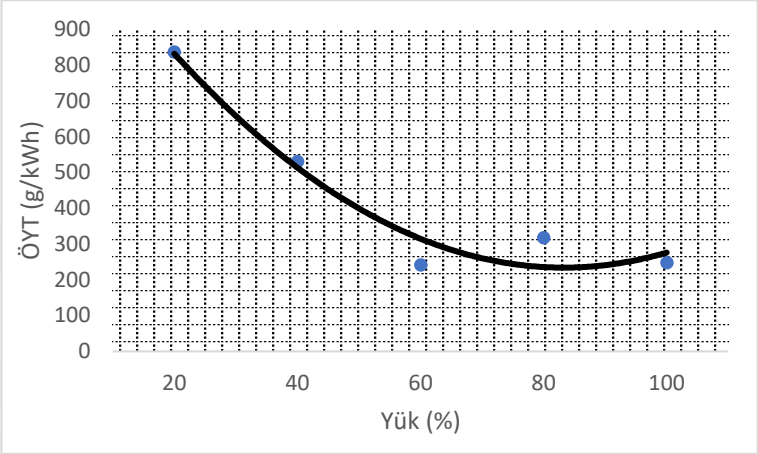



Şekil 5.3 : Dizel tam yük özgül yakıt tüketimi karakteristiği.

Özgül yakıt tüketimi, motorun harcadığı enerjinin motordan alınan enerjiye oranını belirtmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde, ÖYT'nin düşük ve yüksek motor hızlarında yüksek değerlerde olduğu, 2300 d/d motor hızında ise en düşük ölçüm değeri olan 543,74 g/kWh olarak ölçüldüğü görülmektedir. Genel eğilim olarak en düşük özgül yakıt tüketimi, en yüksek döndürme momentinin elde edildiği motor hızına yakın motor hızlarında elde edilmektedir. Düşük ve yüksek motor hızlarında ise artış göstermektedir. Bunun sebebi, silindire alınan dolgunun orta motor hızlarında daha verimli yanmasıdır. Düşük motor hızlarında silindire alınan dolgu miktarının azlığı, yüksek motor hızlarında ise çevrimin tamamlanması için gerekli olan sürenin kısalması ve mekanik sürtünme kayıplarındaki artış, motor verimini ve dolayısıyla özgül yakıt tüketimini olumsuz etkilemektedir.

Şekil 5.4'te standart dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan kısmi yük deneyinden elde edilen ÖYT grafiği verilmiştir. Kısmi yük deneyleri için tam yük deneylerinde maksimum döndürme momenti değerinin ölçüldüğü 1900 d/d motor hızı seçilmiştir. 1900 d/d motor hızında, motorun yükü %20 ile %100 arasında değiştirilerek ölçümler alınmıştır.

Standart modda yapılan deneylerden sonra motor HCCI modda çalışacak şekilde düzenlenmiştir. Standart dizel yakıtının enjeksiyon sistemi devre dışı bırakılmıştır. Emme manifolduna elektronik kontrollü bir enjeksiyon sistemi eklenmiştir ve test karışımları bu enjeksiyon sistemi ile püskürtülmüştür. HCCI modda çalışma bu şekilde sağlanmıştır. Motorda başka herhangi bir değişiklik yapılmamıştır (emme havası sıcaklığı, emme havası basıncı, sıkıştırma oranı vb.).

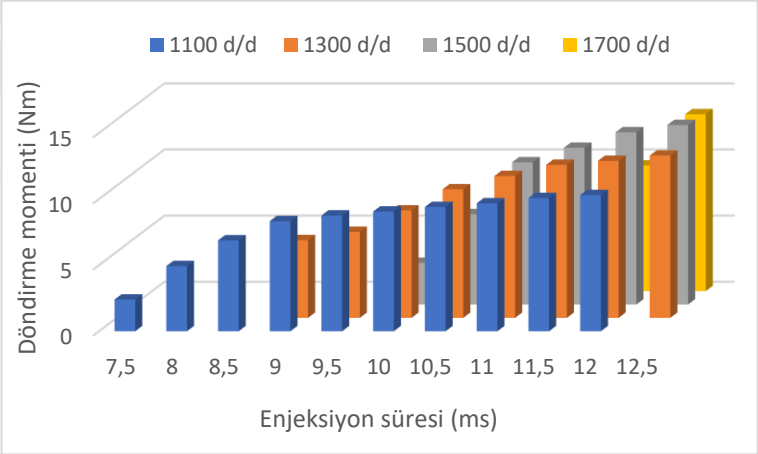



Şekil 5.4 : 1900 d/d motor hızındaki dizel kısmi yük özgül yakıt tüketimi karakteristiği.

HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deneyler; 1100, 1300, 1500 ve 1700 d/d motor hızlarında ve 7,5 ms ile 12,5 ms arasında 0,5 ms'lik artış ile enjeksiyon süreleri değiştirilerek yapılmıştır.

Şekil 5.5'te %100 hafif nafta ile yapılan HCCI deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, farklı motor hızlarındaki farklı enjeksiyon sürelerinin döndürme momentine etkileri görülmektedir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi 1100 d/d motor hızında 10 farklı enjeksiyon süresinde, 1300 d/d motor hızında 8 farklı enjeksiyon süresinde, 1500 d/d motor hızında 6 farklı enjeksiyon süresinde ve 1700 d/d motor hızında 3 farklı enjeksiyon süresinde veri alınabilmiştir. Motor hızı arttıkça, motorun çalışabildiği farklı enjeksiyon süresi sayısının azaldığı yani çalışma aralığının daraldığı görülmektedir. Ayrıca motor hızı arttıkça enjeksiyon sürelerinin grafik üzerinde sağa kaydığı görülmektedir. Bu da motor hızı artışı ile birlikte enjeksiyon süresinin de artması gerektiğini göstermektedir. Bunun sebebinin, motor hızı artışı ile birlikte emme manifoldundan silindire alınan dolgu miktarının artması olduğu düşünülmektedir. HCCI modda, emme manifoldu tam açık durumdadır ve yakıt karışımı silindire girmeden önce emme manifoldunda hazırlanmaktadır.

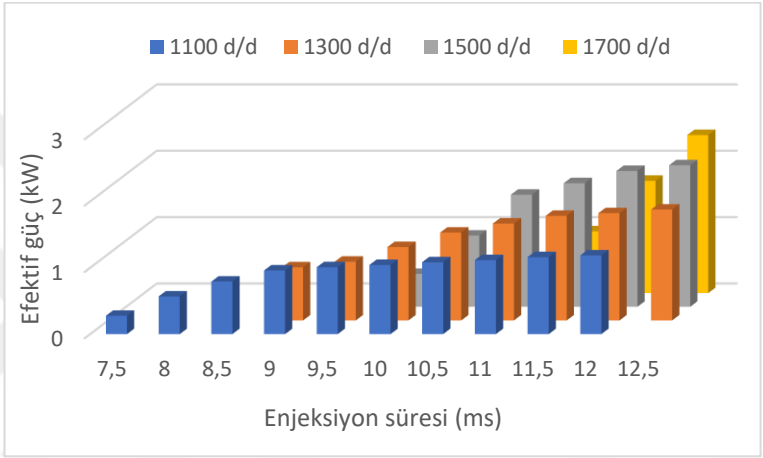
Elektronik kontrollü yakıt enjeksiyon sistemi, iki krank turunda bir kez emme manifolduna yakıt püskürtmektedir. Motor hızı arttıkça püskürtülen yakıt miktarı arttırılmazsa, silindire giren hava miktarı aşırı artmakta ve karışım çok fakir hale gelmektedir. Motorun yüksek hızlarda da çalışabilmesi için aşırı fakir karışımı püskürtülen yakıt miktarını arttırarak dengelemek gerekmektedir. Yüksek motor hızlarında, silindire alınan dolgu miktarının artmasıyla birlikte silindire giren yakıt miktarı da arttırılmalıdır. Şekil 5.5 incelendiğinde, motorun çalışabildiği en yüksek enjeksiyon zamanının 12,5 ms olduğu görülmektedir. Standart dizel motorunun HCCI modda çalışabilmesi için motora adapte edilen enjeksiyon sistemi dışında başka herhangi bir değişiklik yapılmadığından, HCCI modda yanma koşullarının kontrolü sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple motorun, HCCI modda çalışma aralığı sınırlı bir seviyede kalmıştır. Motorun çalışma sınırlarını, alt enjeksiyon sürelerinde kararlı çalışma, üst enjeksiyon sürelerinde ise vuruntu oluşumu belirlemiştir.




Şekil 5.5 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki döndürme momenti değişimi.

Şekil 5.5 incelendiğinde, 12 ms enjeksiyon süresinde tüm motor hızlarında motorun çalışabildiği görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde, en düşük döndürme momenti değeri 1700 d/d motor hızında 9,5 Nm iken, en yüksek döndürme momenti değeri 1500 d/d motor hızında 13,02 Nm olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda, 1500 d/d motor hızındaki döndürme momenti değerinin, 1700 d/d motor hızındaki döndürme momenti değerine göre %37,05 oranında arttığı görülmektedir.

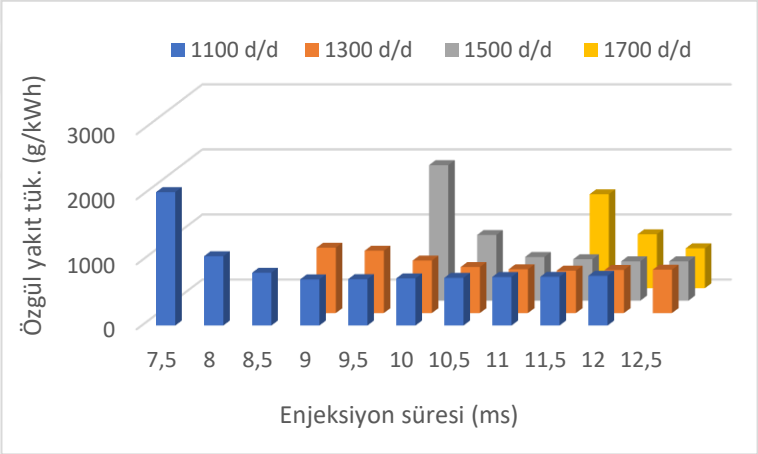
Şekil 5.6'da HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin efektif güce etkileri görülmektedir. Püskürtme süresi arttıkça motor efektif gücünün de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca motor hızı yükseldikçe motorun efektif gücünün de arttığı görülmektedir. Tüm motor hızları için motorun çalışabildiği 12 ms enjeksiyon süresinde, en düşük efektif güç değeri 1100 d/d'de 1,18 kW iken en yüksek efektif güç değeri 1500 d/d'de 2,04 kW olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda 1500 d/d motor hızındaki efektif güç değeri 1100 d/d motor hızına göre %72,88'lik artış göstermektedir.




Şekil 5.6 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki efektif güç değişimi.

Güç, birim zamanda yapılan iş olarak tanımlanmaktadır. Denklem 4.12'de efektif gücün hesaplanması için kullanılan formül görülmektedir. Denklemden anlaşılabileceği gibi pratik olarak, motorun döndürme momenti ve motor hızı çarpımı ile efektif güçteki değişim karşılaştırılabilir. HCCI modda motor testleri, 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında gerçekleştirilmiştir. Genel eğilim olarak motorun döndürme momentinde çok ciddi bir fark olmadığı sürece motor hızı arttıkça efektif gücün artması beklenmektedir. Tüm motor hızlarında veri alınabilen 12 ms'lik enjeksiyon süresinde yapılan deneyler kıyaslandığında; 1100 d/d motor hızından 1500 d/d motor hızına kadar döndürme momentinin yükseldiği, 1700 d/d motor hızında ise 1500 d/d motor hızına göre %27,06'lık bir düşüş olduğu görülmektedir. Döndürme momentindeki bu değişimlere bağlı olarak hesaplanan efektif güç değeri de 1100d/d motor hızından 1500 d/d motor hızına kadar yükselmiş, 1700 d/d motor hızında ise düşüş göstermiştir. Bunun sebebini anlayabilmek için bu ölçüm aralıklarında motorda meydana gelen diğer değişiklikler

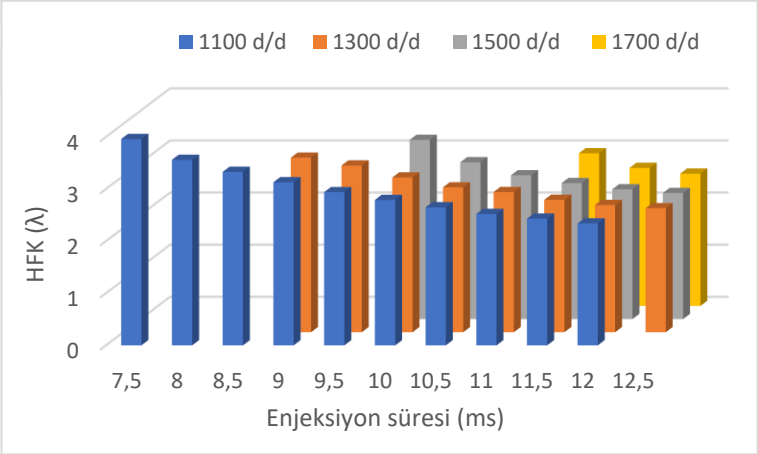
gözden geçirilmiştir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan deney verileri incelendiğinde, 1700 d/d motor hızında diğer motor hızlarına göre belirgin bir şekilde artan HC ve CO emisyonları göze çarpmaktadır. 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değeri 571 ppm iken, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC değeri 1051 ppm olarak ölçülmüştür. Buna göre, 1500 d/d motor hızında ölçülen HC değeri ile kıyaslandığında, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC değerinin %84,06 oranında yükseldiği görülmektedir. Ek olarak, 1500 d/d motor hızında ölçülen CO değeri %0,159 iken, 1700 d/d motor hızında ölçülen CO değeri %0,475 olarak ölçülmüştür. Buna göre, 1500 d/d motor hızında ölçülen CO değeri ile kıyaslandığında, 1700 d/d motor hızında ölçülen CO değerinin %198,74 oranında yükseldiği görülmektedir. HC ve CO değerlerinde meydana gelen bu yükseliş, 1700 d/d motor hızında yanmanın belirgin bir şekilde kötüleştiğini göstermektedir. Bu sebeple, 1700 d/d motor hızında belirgin bir şekilde döndürme momenti ve efektif güç değerlerinin düştüğü tahmin edilmektedir.




Şekil 5.7 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki ÖYT değişimi.

Şekil 5.7'de HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin ÖYT'ye etkileri görülmektedir. Şekil 5.7'deki grafik incelendiğinde, ölçüm yapılan tüm motor hızlarında veri alınabilen enjeksiyon süresinin 12 ms olduğu görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, 1100 d/d motor hızından 1500 d/d motor hızına kadar ÖYT'nin belirgin bir şekilde değişmediği, 1700 d/d motor hızında ise belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen verilere göre, 1500 d/d motor hızında ÖYT 604,39 g/kWh, 1700 d/d motor hızında ÖYT 828,65 g/kWh

olarak ölçülmüştür. 1500 d/d motor hızındaki ÖYT ile kıyaslandığında, 1700 d/d motor hızındaki ÖYT'nin %37,1 oranında arttığı görülmektedir. Bunun sebebini anlayabilmek için bu ölçüm aralıklarında motorda meydana gelen diğer değişkenler gözden geçirilmiştir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan deneyler incelendiğinde, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC ve CO emisyonu değerlerinin, 1100 d/d motor hızından 1500 d/d motor hızına kadar ölçülen HC ve CO emisyonu değerlerinden ayrıştığı görülmektedir. 1700 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değeri, 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerine göre %84,06 oranında yükselmiştir. 1700 d/d motor hızında ölçülen CO emisyonu değeri, 1500 d/d motor hızında ölçülen CO emisyonu değerine göre %198,74 oranında yükselmiştir. HC ve CO değerlerinde meydana gelen bu artışlar, 1700 d/d motor hızında yanmanın belirgin bir şekilde kötüleştiğini göstermektedir. Bu sebeple, 1700 d/d motor hızında ÖYT değerinin belirgin bir şekilde yükseldiği düşünülmektedir.




Şekil 5.8 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki HFK değişimi.

Şekil 5.8'de HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin HFK'ye etkileri görülmektedir. Şekil 5.8 incelendiğinde HFK değerinin 2,34 ile 3,96 arasında değiştiği görülmektedir. Bu HFK değerleri, motorun HCCI modda fakir karışım ile çalıştığını göstermektedir. HCCI çalışmasının sağlanabilmesi için, emme manifoldunda gaz kelebeği gibi bir engel bulunmamaktadır ve hava ile yakıt emme manifoldunda karıştırılarak silindire gönderilmektedir. Nafta, kimyasal olarak içeriğinde parafinik, naftenik ve aromatik hidrokarbonlar barındırmaktadır. Naftenik hidrokarbonlar, $C_nH_{2n}$ olarak formüle

edilmektedir. Hafif nafta için karbon sayısı 5 ile 6 arasında değişmektedir [118]. Hafif nafta formülünü $C_6H_{12}$ olarak kabul ederek hafif nafta için tam yanma denklemini kurarsak, buradan hava/yakıt oranını hesaplayabiliriz.

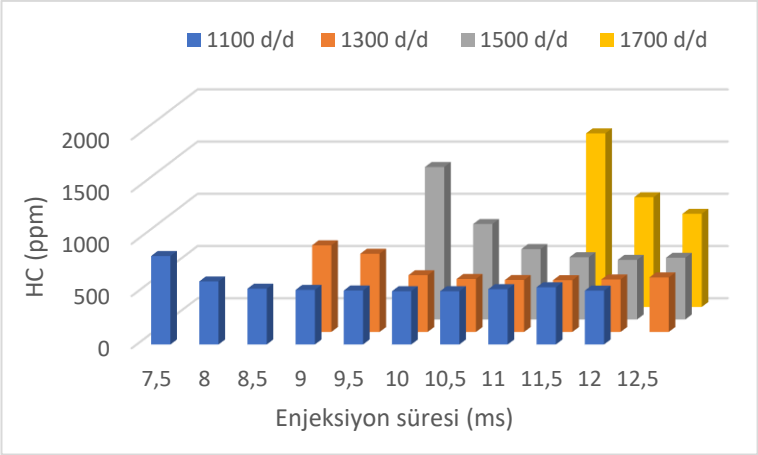
$$C_6H_{12} + \mathbf{9}\ O_2 + \mathbf{9}\ (3{,}76)\ N_2 \Rightarrow \mathbf{6}\ CO_2 + \mathbf{6}\ H_2O + \mathbf{33{,}84}\ N_2$$

$$[(12x6) + (1x12)] + [(9 \times 16 \times 2) + (9x3{,}76x14x2)]$$

$$[\ 84\ ] + [\ (288) + (947{,}52)\ ]$$

Hava/yakıt oranı 1235,52/84 olarak alındığında tam yanma oranı 14,7 olarak bulunmaktadır. Şekil 5.8'den HFK değerlerinin 2,34-3,96 arasında ölçüldüğü görülmektedir. Bu durum, bir birim hafif nafta yakıtının yanması için ihtiyaç duyulan hava miktarı 14,7 birim iken, HCCI modda yaptığımız deneylerde silindire ihtiyaç duyduğumuz hava miktarının 2,34 ila 3,96 kat fazlasını gönderdiğimiz anlamına gelmektedir. Bu da silindire giren dolgunun kısılmaması sebebiyle, motorun HCCI modda sürekli fakir karışım ile çalıştığını göstermektedir.

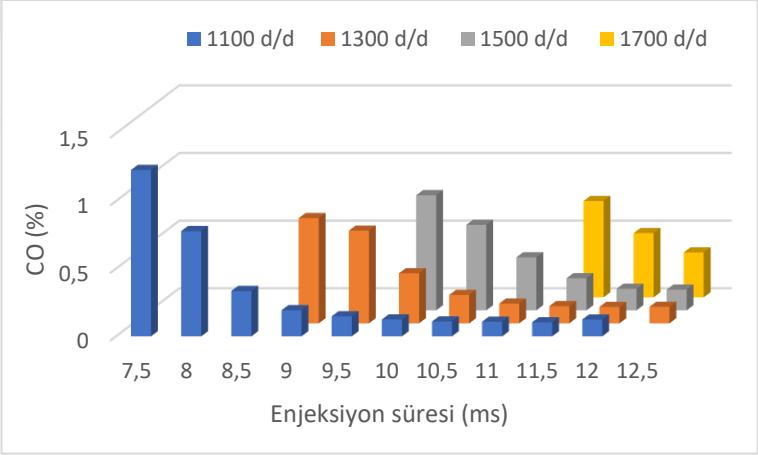
Şekil 5.9'da HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin HC emisyonlarına etkileri görülmektedir. Şekil 5.9'daki grafik incelendiğinde, tüm motor hızlarındaki ölçüm alınabilen en düşük enjeksiyon sürelerinde HC emisyonlarının yüksek ölçüldüğü görülmektedir. Her motor hızı için test edilen enjeksiyon sürelerinin alt sınırlarındaki bu yükselişlerin sebebini anlayabilmek için, aynı ölçüm koşullarında motordan ölçülen diğer değişkenler incelenmiştir. HC emisyonun artmasının sebebi yanmanın tamamlanamamasıdır. Her motor hızında test edilen en düşük enjeksiyon sürelerindeki artışa paralel olarak, Şekil 5.10'da CO emisyonun ve Şekil 5.7'de ÖYT'nin arttığı görülmektedir. Silindire alınan hava miktarına oranla, enjektör tarafından emme manifolduna püskürtülen yakıt miktarının çok düşük seviyede kalması sebebiyle aşırı fakir karışım meydana gelmektedir. Aşırı fakir karışım ise yanma esnasında alev sönmelerine neden olmakta ve yanmayı kötüleştirmektedir. Her ölçüm hızındaki en düşük enjeksiyon sürelerinde meydana gelen HC emisyonlarındaki artışın, bu şartlarda meydana gelen aşırı fakir karışımdan kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.9 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki HC değişimi.

En düşük HC emisyonu değeri 1300 d/d motor hızında ve 11,5 ms enjeksiyon süresinde yapılan testte ölçülmüştür. HC emisyonunun bu şartlarda en düşük olmasının, yanma koşullarının bu şartlarda diğer durumlara göre daha iyi gerçekleşebilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. HCCI modda yanma kontrolü dizel ve benzinli motorlarda olduğu gibi yakıt püskürtme zamanlaması veya buji kıvılcımı ile gerçekleştirilememektedir. Yanmanın tam gerçekleşemediği durumlarda HC emisyonu yükselmektedir. Yanmanın tam olarak gerçekleşemediği şartlarda; Şekil 5.5'te motor torkunun en düşük seviyelerinde olduğu, Şekil 5.6'da efektif gücün en düşük seviyelerinde olduğu, Şekil 5.7'de ÖYT'nin en yüksek seviyelerinde olduğu ve bunlara bağlı olarak Şekil 5.9'da HC emisyonun en yüksek seviyelerinde olduğu görülmektedir. HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneylerde, 12 ms enjeksiyon süresinde tüm motor hızlarında veri alınabilmiştir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen veriler incelendiğinde, 1100 d/d ve 1500 d/d motor hızlarında ölçülen HC değerlerinde belirgin bir fark görülmemektedir. Ancak 1700 d/d motor hızında diğer motor hızlarına göre ölçülen HC değerinde belirgin bir artış görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerde, 1500 d/d motor hızında ölçülen HC değeri 571 ppm iken, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC değeri 1051 ppm olarak ölçülmüştür. 1500 d/d motor hızında ölçülen HC değeri ile kıyaslandığında, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC değerinin %84,06 oranında arttığı görülmektedir. Motor hızı 1500 d/d'nin üzerine çıktığında HC emisyonunda meydana gelen bu artışın, yüksek motor hızı sebebiyle silindire alınan dolgu miktarında meydana gelen azalmalardan ve yanmanın

tamamlanması için ihtiyaç duyulan sürenin bulunamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. HCCI yanması, karışımın silindirin her yerinde kendi kendine homojen bir şekilde tutuşması prensibine dayanmaktadır. Yapılan deneylerde dolgu atmosfer sıcaklığında silindir içerisine alınmaktadır. Herhangi bir emme havası ısıtıcısı kullanılmamaktadır. Motor hızı yükseldikçe emme havasının çok kısa sürede yanma koşullarını oluşturması gerekmektedir. Ancak artan motor hızı ve atmosfer sıcaklığında silindire alınan karışım sebebiyle yanma şartlarının kalan kısa sürede oluşturamadığı düşünülmektedir. Motorun en fazla farklı enjeksiyon süresinde çalıştığı motor hızı 1100 d/d'dir. 1100 d/d motor hızı için ölçülen en yüksek HC emisyonu değeri 7,5 ms enjeksiyon süresinde 848 ppm'dir. Aynı motor hızı için ölçülen en düşük HC emisyonu değeri ise 10,5 ms enjeksiyon süresinde 510 ppm'dir. 10,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülen HC emisyonunun 7,5 ms enjeksiyon süresine göre %39,86 oranında azaldığı görülmektedir. Bu durum, 1100 d/d motor hızında motorun HCCI modunda çalışabileceği en uygun enjeksiyon süresinin 10 ms olduğunu göstermektedir.

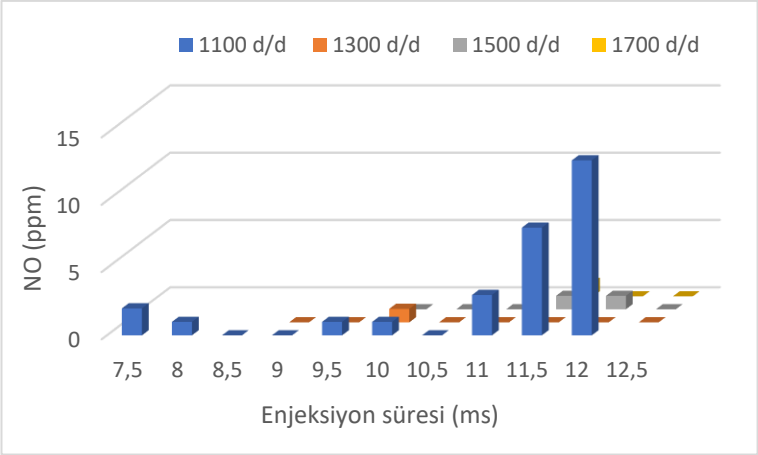



Şekil 5.10 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki CO değişimi.

Şekil 5.10'da HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin CO emisyonlarına etkileri görülmektedir. Şekil 5.10'daki grafik incelendiğinde, %100 hafif nafta ile HCCI modda yapılan deneylerde ölçülen CO emisyonu değerlerinin genel olarak çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, yakıtın gaz formuna yakın uçuculuk özelliği yüksek bir yakıt olmasının yanında, motorun HCCI modda dolgunun kısılmadan silindire alınması sayesinde sürekli fakir karışım ile çalışması olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.9'da

incelenen HC emisyonu değişimi ile CO değişiminin benzer olduğu görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarındaki farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneyler incelendiğinde, CO emisyonunun HC emisyonuna benzer şekilde, tüm motor hızlarında en düşük enjeksiyon sürelerinde yükseldiği görülmektedir. CO emisyonundaki artışın sebebinin, HC emisyonu artışı ile benzer şekilde yanmanın tam gerçekleşememesi olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 5.10'da verilen grafikten, tüm motor hızlarında veri alınabilen 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, motor hızına göre CO emisyonu değişimi görülebilmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, 1100 d/d motor hızından 1500 d/d motor hızına kadar belirgin bir değişikliğin olmadığı, 1700 d/d motor hızında ise belirgin bir artış meydana geldiği görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen verilere göre 1500 d/d motor hızında ölçülen CO değeri %0,159 iken, 1700 d/d motor hızında ölçülen CO değeri %0,475 olarak ölçülmüştür. 1500 d/d motor hızında ölçülen CO değeri ile 1700 d/d motor hızında ölçülen CO değeri kıyaslandığında, 1700 d/d motor hızında ölçülen CO değerinin 1500 d/d motor hızında ölçülen CO değerine göre %198,74 oranında arttığı görülmektedir. Motor hızı 1500 d/d'nin üzerine çıktığında CO emisyonunda meydana gelen bu artışın, aynı koşullarda HC emisyonunda meydana gelen artışta olduğu gibi, yüksek motor hızı sebebiyle silindire alınan dolgu miktarındaki azalmalardan ve yanmanın tamamlanması için ihtiyaç duyulan sürenin bulunamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

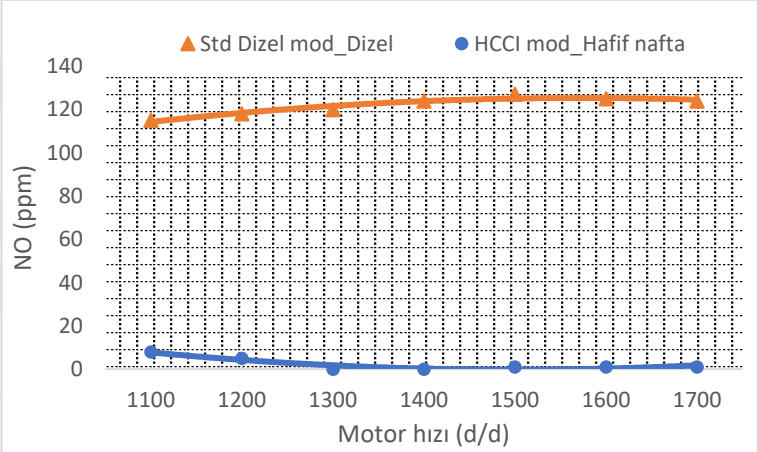
Şekil 5.11'de HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deney sonuçlarına göre, farklı motor hızlarında farklı enjeksiyon sürelerinin NO emisyonlarına etkileri görülmektedir. HCCI modda ölçülen NO değerleri dizel çalışmasına göre çok düşük seviyelerdedir. Bunun nedeninin, HCCI yanmasının düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi olduğu düşünülmektedir. Temelde NO emisyonlarının oluşum sebepleri, yüksek yanma sıcaklıkları ve yanma odasındaki fakir karışımdır. HCCI yanmasında fakir karışım olmasına karşın yanmanın dizel motorlarına kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi sebebiyle hemen hemen tüm HCCI deneylerinde NO emisyonları sıfır seviyelerinde ölçülmüştür. En fazla farklı enjeksiyon süresi, 1100 d/d motor hızında test edilebilmiştir. 1100 d/d motor hızında yapılan testlerin sonuçları incelendiğinde, en yüksek NO emisyonu değerlerinin, motorun aynı hızda çalışabildiği en yüksek ve en düşük enjeksiyon sürelerinde ortaya çıktığı görülmektedir.




Şekil 5.11 : HCCI modda %100 hafif nafta ile farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki NO değişimi.

Orta seviyelerdeki enjeksiyon sürelerinde NO emisyonu değerlerinin sıfır seviyesinde oluştuğu görülmektedir. 1100 d/d motor hızında ölçülen en yüksek NO emisyonu değeri 12 ms enjeksiyon süresinde 13 ppm olarak ölçülmüştür. Aynı motor hızı için en düşük NO emisyonu ise 8,5-10,5 ms enjeksiyon sürelerinde sıfır seviyelerinde ölçülmüştür. Diğer motor hızlarında yapılan deneylerde de NO emisyonunun sıfır seviyelerinde olduğu görülmektedir. Şekil 5.11'de verilen grafikten, tüm motor hızlarında veri alınabilen 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, motor hızına göre NO emisyonu değişimi görülebilmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, 1300 d/d motor hızından 1700 d/d motor hızına kadar belirgin bir değişikliğin olmadığı, 1100 d/d motor hızında ise belirgin bir artış meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.11'deki grafik incelendiğinde, 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında test edilen 12 ms enjeksiyon sürelerinin ara çalışma kademesi olduğu,1100 d/d motor hızında ise motorun üst çalışma sınırı olduğu görülmektedir. Testlerin alt ve üst sınırlarında motor ara değerlerde olduğu gibi düzgün çalışamamaktadır. Bu durumun, 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerdeki NO emisyonunun, diğer motor hızlarındaki NO emisyonu değerine göre yüksek çıkmasının sebeplerinden biri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, 1100 d/d motor hızında, farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerde ölçülen HFK oranlarını Şekil 5.8'den incelediğimizde, 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresindeki HFK değerinin diğer enjeksiyon sürelerinde ölçülen HFK değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 7,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülen HFK değeri 3,96 iken, 12 ms enjeksiyon süresinde ölçülen HFK değeri

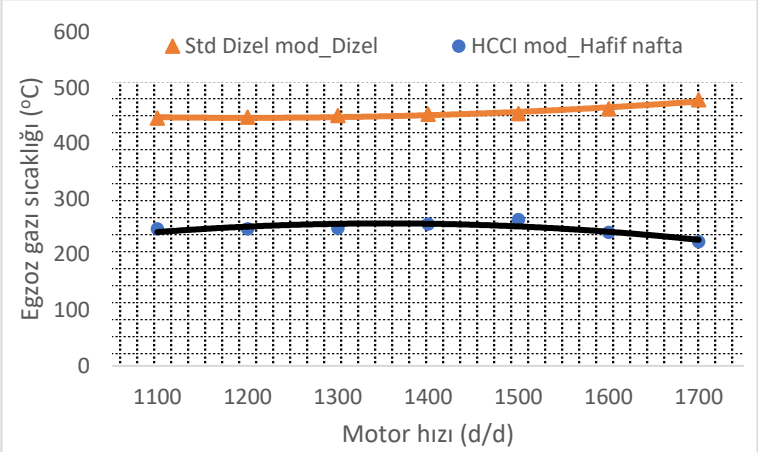
2,34'tür. 1100 d/d motor hızında, farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen verilere göre, HFK değerinin 2,65'ten daha düşük değerlere inmesi ile NO emisyonu artışının başladığı görülmektedir. Benzer şekilde, NO değerlerinde 7,5 ms ve 8 ms enjeksiyon sürelerinde de NO artışı meydana gelmiştir. Bu şartlardaki artışın HFK ile bağlantısı incelendiğinde ise HFK değerinin 3,33'ün üzerine çıktığı bölgede NO değerinin artmaya başladığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerde, orta çalışma bölgesindeki 8,5 ms ile 10,5 ms aralığındaki enjeksiyon sürelerinde HFK değerleri 3,33 ile 2,65 arasında ölçülmüştür ve bu aralıkta NO emisyonları sıfır seviyesinde ölçülmüştür.



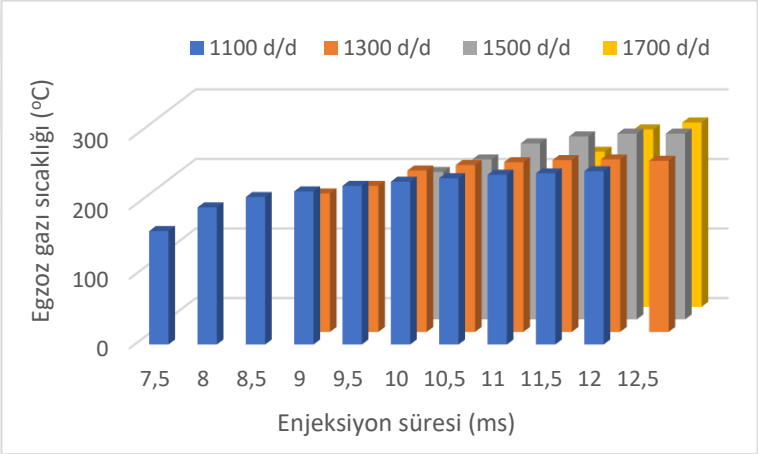

Şekil 5.12 : Standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki NO değişimi.

HFK değerlerinin 3,33 ile 2,65 aralığından uzaklaşmasıyla birlikte NO emisyonlarının yükseldiği görülmektedir. HCCI modda hafif nafta ile yapılan testlerde, 1100 d/d motor hızında motorun çalışabildiği farklı püskürtme zamanlarına bakıldığında, NO artışı görülen bölgelerin motorun çalışma sınırlarına yakın bölgeler olduğu görülmektedir. Testler sırasında bu sınır şartlardaki çalışmalarda motorda vuruntu gözlemlenmiştir. NO değerlerindeki artışın sebebinin, sınır şartlardaki çalışmada meydana gelen vuruntu sonucunda oluşan ani basınç artışları olduğu tahmin edilmektedir. HCCI modda hafif nafta ile yapılan deneylerde en yüksek NO değeri 1100 d/d motor hızında, 12 ms enjeksiyon süresinde 13 ppm olarak ölçülmüştür. Bu değer, standart dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen ortalama 129 ppm civarındaki NO değerlerine göre oldukça düşük seviyede kalmaktadır. Standart dizel modda dizel yakıtı ile yapılan

testlerde ölçülen NO değerleri ile HCCI modda hafif nafta yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen NO değerlerinin karşılaştırması Şekil 5.12'de gösterilmiştir.




Şekil 5.13 : Standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimi.




Şekil 5.14 : HCCI modda %100 hafif nafta ile yapılan deneylerde, farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimi.

Şekil 5.13'te standart dizel modunda %100 dizel yakıtı ile ve HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneylerden elde edilen, motor hızına göre egzoz gazı sıcaklığı değişimini gösteren grafik verilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıklarının standart dizel modunda 445-478℃ arasında olduğu görülmektedir. HCCI modda ise egzoz gazı sıcaklıklarının 163-267℃ arasında olduğu görülmektedir. HCCI modunda ve dizel modunda yapılan deneylerden elde edilen egzoz gazı sıcaklığı verileri karşılaştırıldığında, HCCI modunda egzoz gazı sıcaklıklarının dizel moduna göre ortalama %58,93 oranında azaldığı görülmektedir. HCCI modda ölçülen düşük egzoz gazı sıcaklıklarının, Şekil 2.4'de

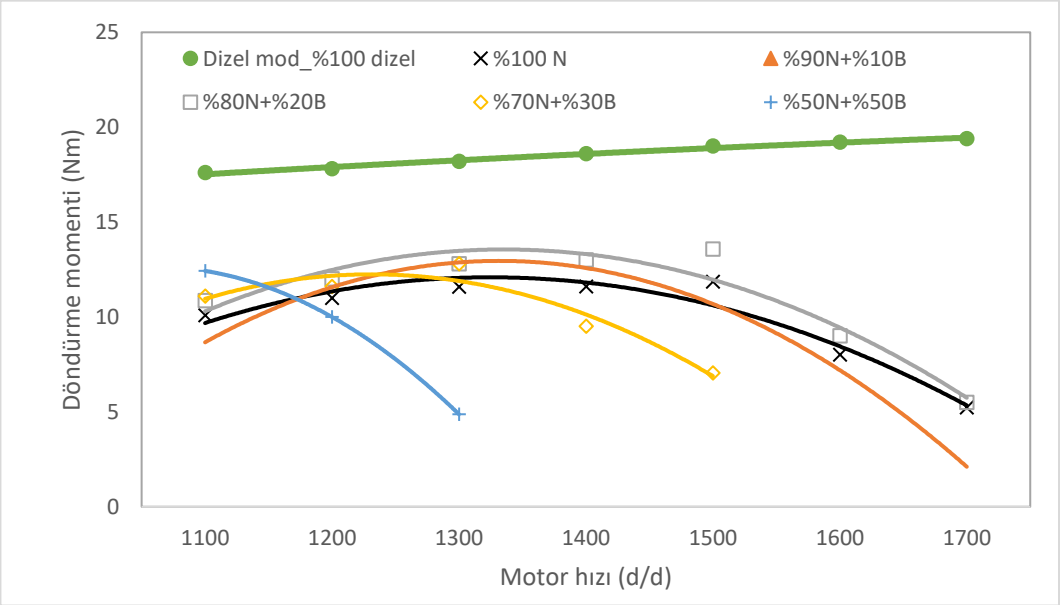
gösterildiği gibi HCCI yanmasının, dizel veya buji ateşlemeli motorlardaki yanmadan farklı olarak, silindirdeki homojen karışımın her yerinde aynı anda meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece HCCI yanması sırasında yanma odasında, dizel veya buji ateşlemeli motorlardaki gibi yüksek sıcaklıklar oluşmamaktadır.

Şekil 5.14'te HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı kullanılarak yapılan deneylerde, farklı enjeksiyon süreleri ve farklı motor hızlarındaki egzoz gazı sıcaklıklarında meydana gelen değişim görülmektedir. Şekil 5.14'te verilen grafikten, tüm motor hızlarında veri alınabilen 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, motor hızına göre egzoz gazı sıcaklıklarındaki değişim görülebilmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler incelendiğinde, 1100 d/d ve 1300 d/d motor hızlarında egzoz gazı sıcaklığının aynı sevide kaldığı, 1500 d/d motor hızında belirgin bir artış meydana geldiği, 1700 d/d motor hızında ise tekrar azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, HCCI test şartlarında, 1500 d/d motor hızında silindire alınan homojen dolgunun diğer motor hızlarına göre daha yüksek seviyede olmasından dolayı hacimsel verimin en yüksek seviyeye ulaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı deney koşulları için Şekil 5.5'teki motor döndürme momenti, Şekil 5.6'daki efektif güç ve Şekil 5.7'deki özgül yakıt tüketimi grafiği incelendiğinde; 12 ms enjeksiyon süresi için 1500 d/d motor hızında en düşük özgül yakıt tüketimi, en yüksek döndürme momenti ve efektif güç değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumda, motorun 12 ms enjeksiyon süresi ile çalıştığı şartlarda silindire alınan dolgu miktarının ve HCCI yanması için gerekli olan yanma şartlarının 1500 d/d motor hızında diğer motor hızlarına göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Şekil 5.15'te dizel modda dizel yakıtı ile ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre döndürme momenti değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, dizel modda yapılan deneylerde daha yüksek döndürme momenti değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir.

HCCI moddaki en yüksek döndürme momenti değeri, 1500 d/d motor hızında %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 13,57 Nm olarak ölçülmüştür. Dizel

modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde, 1500 d/d motor hızındaki döndürme momenti değeri ise 19 Nm olarak ölçülmüştür. 1500 d/d motor hızında HCCI modda ölçülen en yüksek döndürme momenti değeri ile aynı motor hızında dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testte ölçülen döndürme momenti değeri kıyaslandığında, dizel moduna göre HCCI modda ölçülen döndürme momentinin %28,58 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.15 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre döndürme momenti değişimi.

Bilindiği gibi dizel modunda yanma; sıkıştırılarak sıcaklığı ve basıncı yükseltilmiş olan dolgunun içerisine yüksek basınçta dizel yakıtının enjektörden çok küçük sıvı damlacıkları olarak püskürtülmesi ile başlatılmakta ve püskürtülmeye devam eden yakıtın difüzyon şeklinde yanmasıyla gelişmektedir. Dizel prensibinde de HCCI'da olduğu gibi kendi kendine tutuşma söz konusudur. Aralarındaki en büyük fark ise dizel modda emme zamanında silindire sadece temiz hava dolarken, HCCI modda silindire emme manifoldunda homojen olarak oluşturulmuş homojen karışım dolmaktadır. Bu durum, yanmanın başlamasını ve gelişmesini tamamen değiştirmektedir. Ayrıca, HCCI modda ve dizel modda kullanılan yakıtlar farklı özelliklere sahiptir. Dizel modunda yanma süreci, hacim ve zaman olarak heterojendir. HCCI modda ise karışımın mümkün olduğu

kadar homojen olması ve yanmanın homojen karışımın her yerinde aynı anda başlayıp bitmesi istenmektedir. HCCI modda yapılan deneyler kendi içerisinde değerlendiğinde; hafif nafta oranının yüksek olduğu karışımlar ile yapılan deneylerde motorun 1100 d/d ile 1700 d/d arasında çalışabildiği görülmektedir. %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 Benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımları 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında çalışabilirken, %70 hafif nafta + %30 benzin ile yapılan deneylerde motor 1100 d/d ile 1500 d/d aralığındaki motor hızlarında çalışabilmiştir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneylerde ise motorun sadece 1100 d/d ile 1300 d/d motor hızı aralığında çalışabildiği görülmektedir. Karışım içerisindeki benzin oranı yükseldikçe motorun çalışabildiği motor hızı aralığının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, karışımdaki benzin oranı artışı ile oktan sayısının yükseltmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. HCCI yanmasının gerçekleşebilmesi için yakıtın sıkıştırma esnasında kendi kendine tutuşabilmesi gerekmektedir. Oktan sayısı artışı, yakıtın kendi kendine tutuşmasını zorlaştırmaktadır. Düşük motor hızlarında, yüksek oranda benzin içeren yakıt karışımlarının da çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında karışımlardaki hafif naftanın yanma başlangıcında etkili olmasının buna sebep olduğu düşünülmektedir. Yani, homojen karışım içerisindeki hafif naftanın yanmayı başlattığı ve karışımın tutuşmasını sağladığı düşünülmektedir. Motor hızının yüksek olmaması, HCCI yanmasının başlayabilmesi için gerekli zamanı sağlamıştır.

1100 d/d motor hızında yakıt içeriğindeki benzin oranı arttıkça motor torkunun da arttığı görülmektedir. Karışım içeriğindeki benzin oranı attıkça torkun yükselmesinin, benzinin ısıl değerinin hafif naftaya göre yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karışım içerisindeki benzin oranı arttıkça kilogram başına açığa çıkan enerji miktarı arttığından, yanma sonucunda daha yüksek tork değerlerinin ölçülebildiği düşünülmektedir. Motor hızı arttıkça benzin içeriği yüksek olan karışımlar ile motorun HCCI modda çalışamadığı gözlemlenmiştir. Bu duruma, motor hızı arttıkça yanma için ayrılan zamanın kısalmasının ve karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile artan oktan sayısının kendi kendine tutuşmayı olumsuz etkilemesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

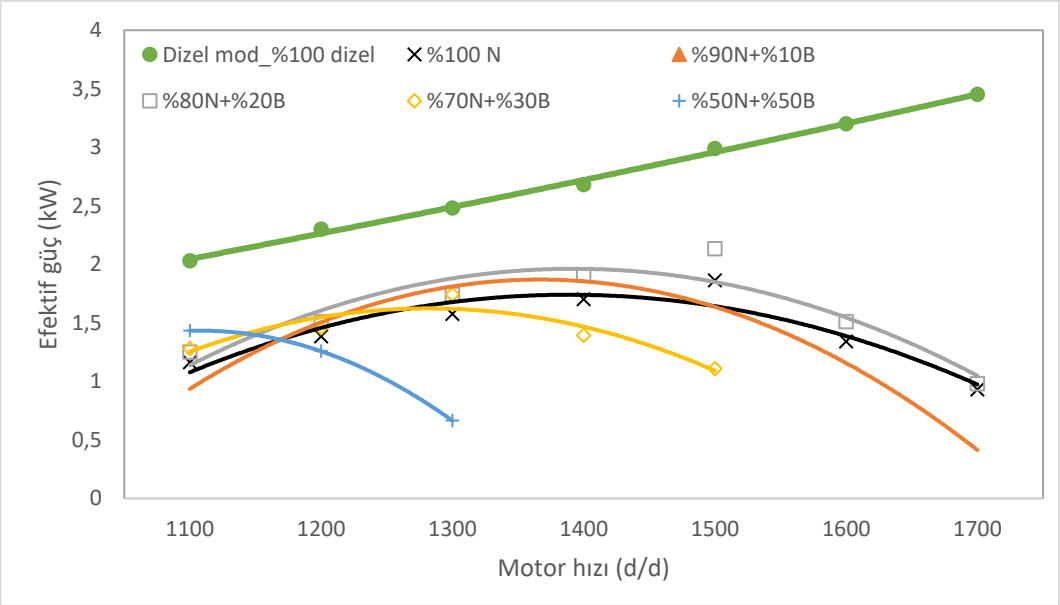
Şekil 5.15'te görüldüğü gibi maksimum döndürme momenti değeri 1500 d/d motor hızında %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 13,57 Nm olarak ölçülmüştür. Motor, 1500 d/d motor hızında %50 hafif nafta + %50 benzin dışındaki karışımlar ile çalışabilmiştir. 1500 d/d motor hızında ölçülen en düşük döndürme

momenti değeri, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan deneyde 7,05 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan deneylerde ise 1500 d/d motor hızında döndürme momenti 11,85 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan testte ölçülen döndürme momenti ile karşılaştırıldığında, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testte ölçülen döndürme momentinin %14,51 oranında arttığı görülmektedir.

Şekil 5.15'te, 1500 d/d motor hızında %70 hafif nafta +%30 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen döndürme momentinin, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen döndürme momenti değerine göre %48,05 oranında azaldığı görülmektedir. Şekil 5.15'teki grafik incelendiğinde, 1500 d/d motor hızında yapılan deneylerde, karışım içerisindeki benzin oranının %30'a kadar olduğu deneylerde döndürme momenti değerleri birbirine yakın ölçülürken, karışım içerisindeki benzin oranının %30 olduğu deneylerde ise döndürme momentinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, karışımlardaki benzin oranı artışının karışımın oktan sayısını arttırmasından dolayı belirli bir oktan sayısının üzerine çıkıldığında HCCI yanmasının olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.16'da dizel modda dizel yakıtı ile ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre efektif güç değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, dizel modda yapılan deneylerde daha yüksek efektif güç değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. HCCI moddaki en yüksek efektif güç değeri, 1500 d/d motor hızında %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 2,13 kW olarak ölçülmüştür.

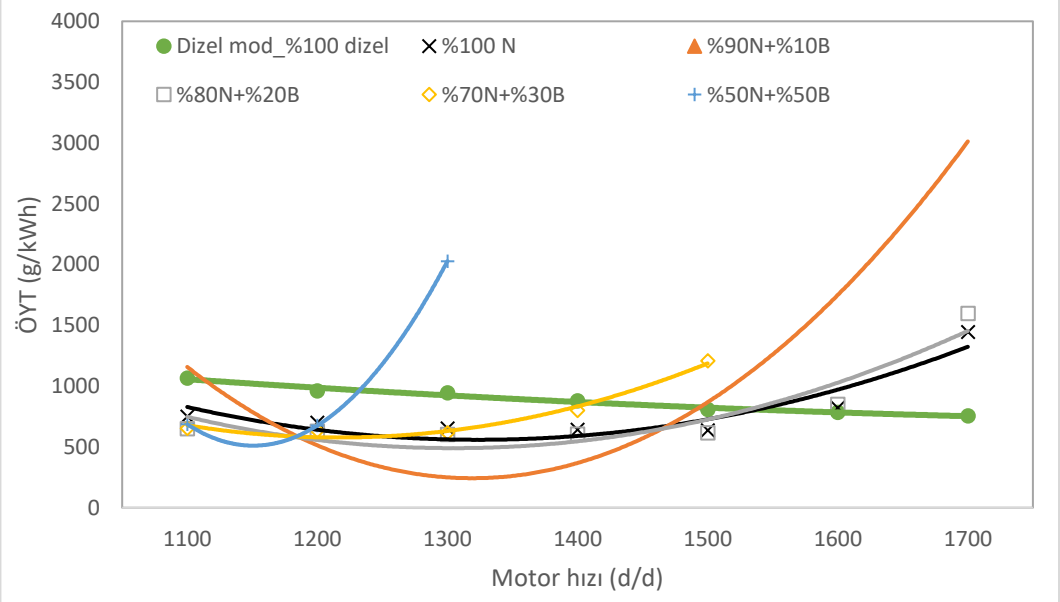
Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde, 1500 d/d motor hızındaki efektif güç değeri ise 2,99 kW olarak ölçülmüştür. 1500 d/d motor hızında HCCI modda ölçülen en yüksek efektif güç değeri ile aynı motor hızında dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testte ölçülen efektif güç değeri kıyaslandığında, dizel moduna göre HCCI modda ölçülen efektif gücün %28,76 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.16 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre efektif güç değişimi.

Şekil 5.16'daki grafikten, HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan deneyler kendi içerisinde değerlendirildiğinde, maksimum efektif güç değerinin 1500 d/d motor hızında ve %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 2,13 kW olarak ölçüldüğü görülmektedir. Motorun, 1500 d/d motor hızında %50 hafif nafta + %50 benzin dışındaki karışımlar ile çalışabildiği görülmektedir. 1500 d/d motor hızında ölçülen en düşük efektif güç değeri, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan deneyde 1,1 kW olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan deneylerde ise 1500 d/d motor hızındaki efektif güç 1,86 kW olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan testte ölçülen efektif güç ile karşılaştırıldığında, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testte ölçülen efektif gücün %14,52 oranında arttığı görülmektedir. %100 hafif nafta ile yapılan testte ölçülen efektif güç ile karşılaştırıldığında, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testte ölçülen efektif gücün %40,86 oranında azaldığı görülmektedir. Şekil 5.16'da 1500 d/d motor hızındaki minimum değer olan, %70 hafif nafta +%30 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen efektif gücün, maksimum değer olan, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen efektif güç değerine göre %48,36 oranında azaldığı görülmektedir. Şekil 5.16'daki grafik incelendiğinde, 1500 d/d motor hızında yapılan deneylerde, karışım içerisindeki benzin oranının %30'a kadar olduğu deneylerde efektif güç değerleri birbirine yakın ölçülürken, karışım içerisindeki benzin oranının %30 olduğu deneylerde ise efektif gücün belirgin bir

şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, karışımlardaki benzin oranı artışının karışımın oktan sayısını arttırmasından dolayı belirli bir oktan sayısının üzerine çıkıldığında HCCI yanmasının olumsuz etkilenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yanmanın olumsuz etkilenmesine kanıt olarak aynı deney koşullarında ölçülen HC emisyonu grafiği gösterilebilir. Şekil 5.20'de gösterilen HC emisyonu grafiği incelendiğinde, 1500 d/d motor hızında %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımlarının test edildiği şartlarda ölçülen HC değerlerinde belirgin bir değişiklik olmadığı, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımının test edildiği şartlardaki HC değerinin ise belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu da HCCI modda %30 sınırına kadar hafif nafta ile karıştırılan benzinin döndürme momenti ve efektif gücü yükseltmesi nedeniyle performans açısından olumlu sonuç verdiğini, %30 oranındaki benzin içeriğinin ise yanmayı olumsuz etkileyerek HC ve CO emisyonlarını belirgin bir şekilde yükselttiğini ve performansı düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, 1500 d/d motor hızında hafif nafta içerisinde %30'dan daha yüksek oranda benzin karıştırıldığında HCCI modda motor çalışmamaktadır.




Şekil 5.17 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre özgül yakıt tüketimi değişimi.

Şekil 5.17'de dizel modda dizel yakıtı ile ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre özgül yakıt

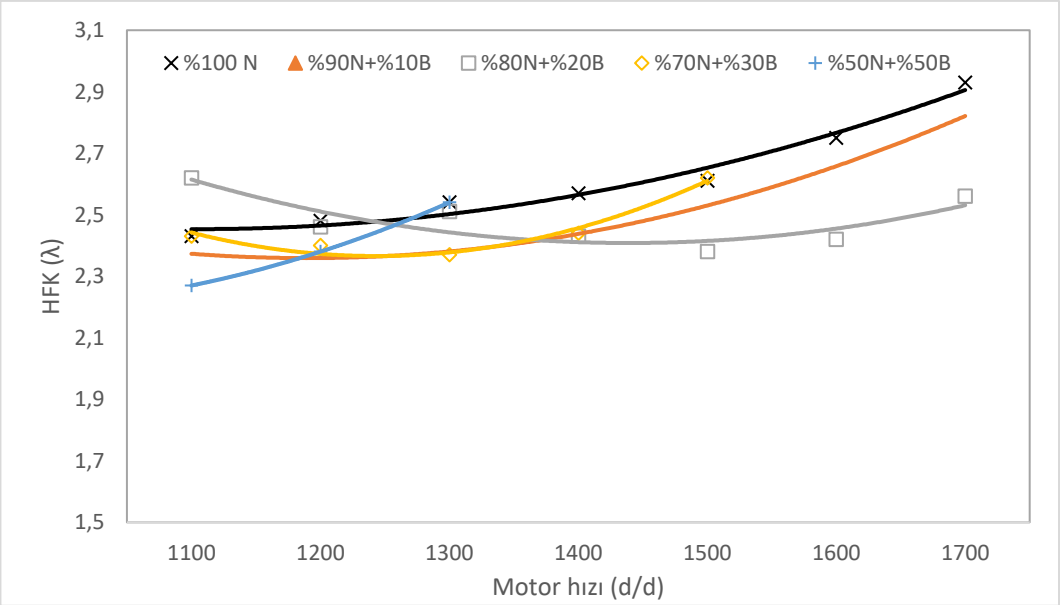
tüketimi değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile motorun kararlı olarak çalışabildiği sınır koşulları dışındaki HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, dizel modda yapılan deneylerde daha yüksek özgül yakıt tüketimi değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir.

HCCI moddaki en düşük özgül yakıt tüketimi değeri, 1300 d/d motor hızında %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 601,59 g/kWh olarak ölçülmüştür. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde, 1300 d/d motor hızındaki özgül yakıt tüketimi değeri ise 944,4 g/kWh olarak ölçülmüştür. 1300 d/d motor hızında HCCI modda ölçülen en düşük özgül yakıt tüketimi değeri ile aynı motor hızında dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testte ölçülen özgül yakıt tüketimi değeri kıyaslandığında, dizel moduna göre HCCI modda ölçülen özgül yakıt tüketiminin %36,3 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kıyaslama yapılan motor hızı, HCCI çalışması için orta seviyedeki bir motor hızı iken, dizel moddaki çalışma için düşük seviyede kalmaktadır. Şekil 5.3'te verilen standart dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan tam yük testlerinden elde edilen özgül yakıt tüketimi grafiği incelendiğinde, motorun minimum özgül yakıt tüketimi değerinin 2300 d/d motor hızında 543,74 g/kWh olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu motor hızı da standart dizel modundaki çalışma için orta seviyede yer almaktadır. Ancak, HCCI moddaki çalışma ile özgül yakıt tüketimi kıyaslaması yaptığımız motor hızı olan 1300 d/d'nin standart dizel modu için düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Bu nedenle her iki çalışma modu için özgül yakıt tüketiminin ortalama ölçüm aralığına bakmanın daha sağlıklı bir sonuç vereceği düşünülmektedir. HCCI modda en düşük özgül yakıt tüketimi ölçümü alınan %80 hafif nafta + %20 benzin karışımının motorun kararlı olarak çalışabildiği aralık olan 1100 d/d ile 1500 d/d motor hızları arasındaki özgül yakıt tüketimi ortalaması 658,61 g/kWh, dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerden 1100 d/d ve 2900 d/d motor hızları arasındaki özgül yakıt tüketimi ortalaması ise 760,16 g/kWh olarak ölçülmüştür. HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testler ile dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testler ortalama özgül yakıt tüketimleri bakımından kıyaslandığında HCCI modda dizel moda göre ortalama %13,36 oranında daha düşük özgül yakıt tüketimi ölçüldüğü görülmektedir. Bunun sebebinin, HCCI yanmasının düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi ve silindirin her

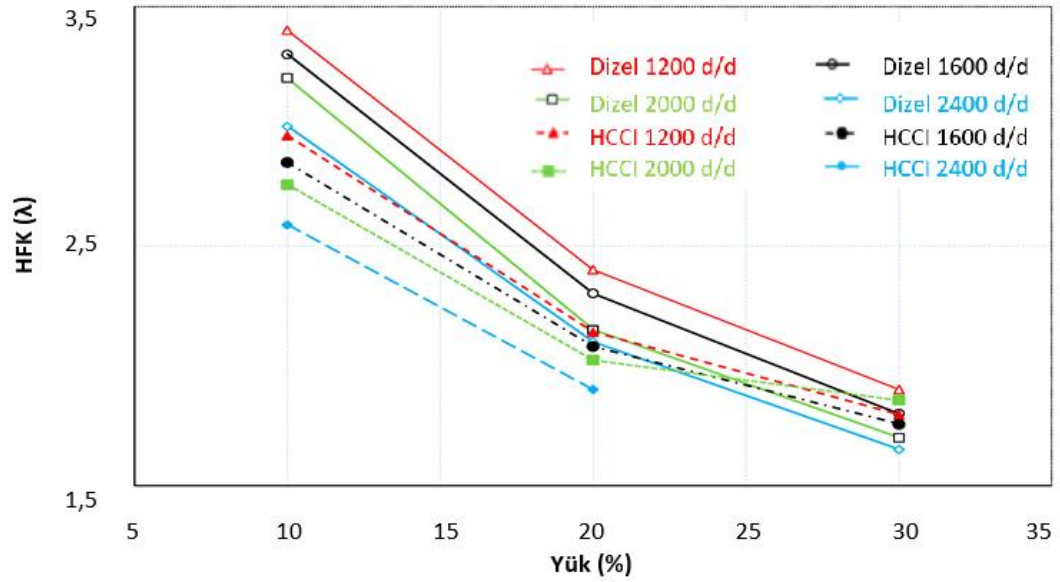
yerinde eş zamanlı olarak başlamasından dolayı daha verimli bir yanma meydana gelmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.17'deki grafikten, HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan deneyler kendi içerisinde değerlendirildiğinde, minimum özgül yakıt tüketimi değerinin 1300 d/d motor hızında %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 601,59 g/kWh olarak ölçüldüğü görülmektedir. HCCI modda motor, 1300 d/d motor hızında tüm test karışımları ile çalışabilmiştir. 1300 d/d motor hızında ölçülen maksimum özgül yakıt tüketimi değeri ise %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneyde 2027,91 g/kWh olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan deneyde ise 1300 d/d motor hızında ölçülen özgül yakıt tüketimi değeri 651,77 g/kWh olarak ölçülmüştür. 1300 d/d motor hızında, %100 hafif naftaya göre %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testte ölçülen özgül yakıt tüketimi değerinin %7,7 oranında azaldığı görülmektedir. 1300 d/d motor hızında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen maksimum özgül yakıt tüketimi değerinin, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen minimum özgül yakıt tüketimi değerine göre %237,09 oranında arttığı görülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneylerde motorun maksimum 1300 d/d motor hızında çalışabildiği görülmektedir. Bu karışım için üst çalışma sınırı olan bu motor hızında motorun düzgün çalışmadığı, vuruntu sınırında çalıştığı gözlemlenmiştir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde 1300 d/d motor hızında motorun efektif gücünün 0,66 kW gibi oldukça düşük seviyelere indiği Şekil 5.16'da görülmektedir. Bu sebeple özgül yakıt tüketiminin Şekil 5.17'de 2027,91 g/kWh olarak maksimum seviyede ölçüldüğü görülmektedir.

Şekil 5.18'de HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre HFK değişimini gösteren grafik verilmiştir. Standart dizel modunda yapılan deneylerde HFK ölçümü yapılmamıştır. Ancak, Anh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, motor hızından bağımsız olarak dizel modda ölçülen HFK değerlerinin HCCI modda ölçülen HFK değerlerinden yüksek çıktığı Şekil 5.19'da görülmektedir [119].




Şekil 5.18 : HCCI modda farklı yakıt karışımları ile yapılan testlerde motor hızlarına göre HFK değişimi.




Şekil 5.19 : Dizel ve HCCI modlarında farklı motor hızı ve yüklerindeki HFK değerleri [119].

Hafif nafta karışımları ile yapılan deneylerde, Şekil 5.18'de görüldüğü gibi HFK değerleri 2,27 ile 2,93 değerleri arasında değişmiştir. Grafikte görüldüğü gibi genel eğilim olarak karışım içerisindeki benzin oranı arttıkça HFK değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, hafif naftanın tam yanma için ihtiyaç duyduğu hava miktarının, benzinin tam yanma için ihtiyaç duyduğu hava miktarından daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hafif naftanın tam yanması için gerekli olan hava/yakıt oranı 14,7 iken

benzinin tam yanması için gerekli olan hava/yakıt oranı 15'tir. Yani hafif nafta içeriği fazla olan karışımlar, silindire alınan temiz hava miktarı aynı motor hızları için sabit kabul edildiğinde, aynı hava miktarı ile daha fazla yakıtın yanmasını sağlayabilmektedir. Bu da karışımın hafif naftanın fazla olduğu durumlarda daha fakir olması anlamına gelmektedir. Bu durum, karışım içerisindeki benzin oranı arttıkça karışımın HFK değerinin azalacağı anlamına gelmektedir.

Benzin için tam yanma denklemi ve hava/yakıt oranı hesabı;

$$C_8H_{18} + \mathbf{12,5}\ O_2 + \mathbf{12,5}\ (3,76)\ N_2 \rightarrow \mathbf{8}\ CO_2 + \mathbf{9}\ H_2O + \mathbf{47}\ N_2$$

$$[(12x8) + (1x18)] + [(12,5 \times 16 \times 2) + (12,5x3,76x14x2)]$$

$$[\ 114\ ] + [\ (400) + (1316)\ ]$$

Yakıt Hava

$$[\ 114\ ] + [\ 1716\ ]$$

Hafif nafta için tam yanma denklemi ve hava/yakıt oranı hesabı;

$$C_6H_{12} + \mathbf{9}\ O_2 + \mathbf{9}\ (3,76)\ N_2 \rightarrow \mathbf{6}\ CO_2 + \mathbf{6}\ H_2O + \mathbf{33,84}\ N_2$$

$$[(12x6) + (1x12)] + [(9 \times 16 \times 2) + (9x3,76x14x2)]$$

$$[\ 84\ ] + [\ (288) + (947,52)\ ]$$

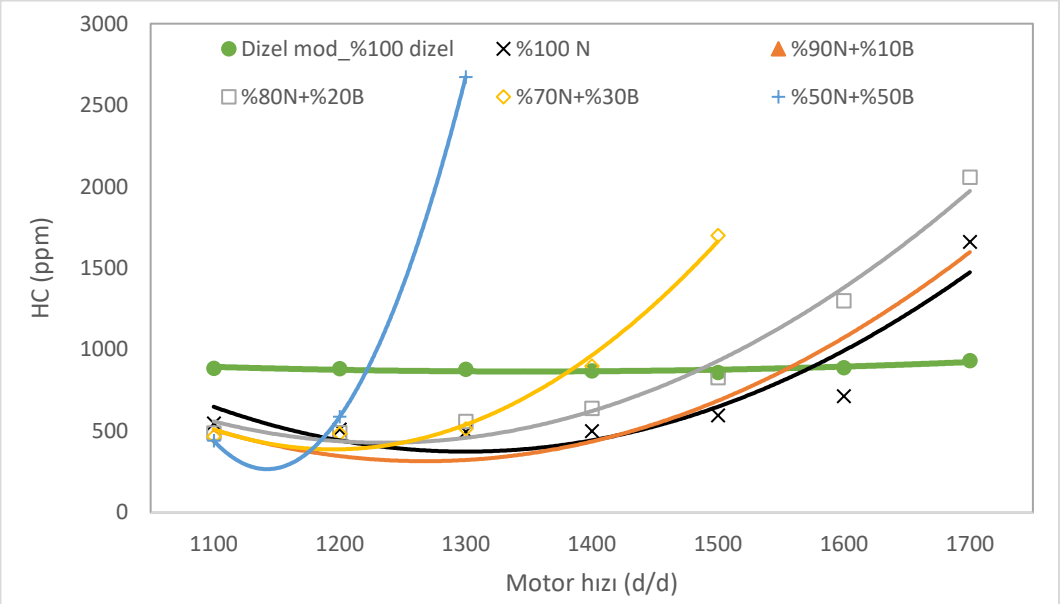
Yakıt Hava

$$[\ 84\ ] + [\ 1235,52\ ]$$

Hafif naftanın tam yanma için gerekli hava/yakıt oranı 1235,52/84 = 14,71 olarak bulunmaktadır.

Şekil 5.20'de standart dizel modda %100 dizel yakıtı ile yapılan tam yük deneyi sonucunda motor hızına göre HC emisyonu değişimi görülmektedir. HC emisyonu değerlerinin standart dizel modunda 568-949 ppm aralığında olduğu görülmektedir. Şekil 5.20'deki HCCI modda ve farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneylerde ise 384-2673 ppm aralığında HC emisyonu değerleri görülmektedir. Standart dizel modu ve HCCI modda 1300 d/d motor hızındaki HC verileri incelendiğinde standart dizel modda

HC emisyonu 880 ppm, %100 hafif nafta ile yapılan HCCI mod deneyindeki HC emisyonu ise 496 ppm olarak ölçülmüştür. Burada HCCI moddaki HC emisyonu değerinin dizel moduna göre %43,64 oranında azaldığı görülmektedir.




Şekil 5.20 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre HC emisyonu değişimi.

Şekil 5.20'de dizel modda %100 dizel yakıtı ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre HC emisyonu değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile motorun kararlı olarak çalışabildiği sınır koşulları dışındaki HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, dizel modda yapılan deneylerde daha yüksek HC emisyonu değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir.

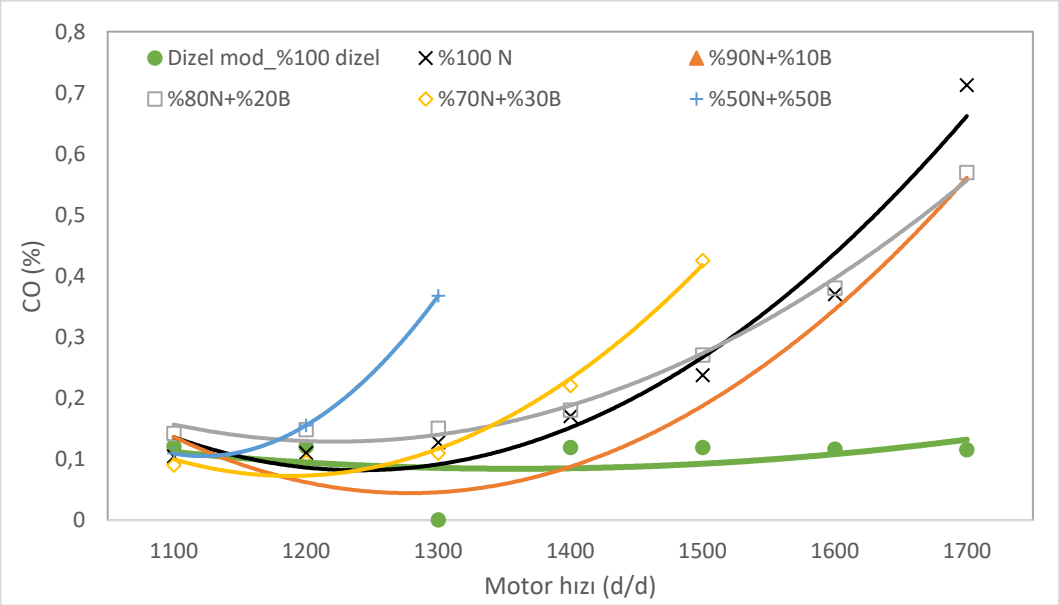
HCCI moddaki en düşük HC emisyonu değeri, 1100 d/d motor hızında %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 384 ppm olarak ölçülmüştür. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde, 1100 d/d motor hızındaki HC emisyonu değeri ise 885 ppm olarak ölçülmüştür. 1100 d/d motor hızında HCCI modda ölçülen en düşük HC emisyonu değeri ile aynı motor hızında dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testte ölçülen HC emisyonu değeri kıyaslandığında, dizel moduna göre HCCI modda ölçülen HC emisyonu değerinin %56,61 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma

tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kıyaslama yapılan motor hızı, HCCI çalışması için orta seviyedeki bir motor hızı iken, dizel moddaki çalışma için düşük seviyede kalmaktadır. Ayrıca, 1100 d/d motor hızı için özgül yakıt tüketimi değerleri Şekil 5.17'ye bakarak kıyaslandığında, HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testte 810,56 g/kWh ölçülen özgül yakıt tüketiminin, dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan testte 1065,38 g/kWh olarak ölçüldüğü görülmektedir. Ek olarak, 1100 d/d motor hızı için efektif güç değerleri Şekil 5.16'ya bakarak kıyaslandığında, HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testte 1,09 kW olarak ölçüldüğü, dizel modunda dizel yakıtı ile yapılan testte 2,03 kW olarak ölçüldüğü görülmektedir. 1100 d/d motor hızı için incelenen bu değerlerden, dizel modunda motorun daha fazla yakıt tüketimine sahip olduğu ve HCCI moda göre yaklaşık 2 kat fazla güç ürettiği görülmektedir. Bu durumun da 1100 d/d motor hızında HC emisyonlarının dizel modda fazla ölçülmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.20'deki grafik incelendiğinde, orta ve yüksek motor hızlarında genel eğilim olarak karışım içerisindeki benzin oranı yükseldikçe HC emisyonun da yükseldiği görülmektedir. HC emisyonunun yükselmesinin sebebi silindire gönderilen yakıtın tam yanamamasıdır. Silindire alınan yakıtın yanmanın tam gerçekleşemediği durumlarda yakılmadan silindirden atılması HC emisyonlarını arttırmaktadır. HC emisyonu bize silindirdeki tam yanma kalitesi ile ilgili bilgi vermektedir. Özellikle her karışım için test edilen üst sınırdaki motor hızlarında HC emisyonun belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Deneyler sırasında bu sınır çalışma bölgelerinde motor vuruntusu meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, motorun çalışabildiği bu sınır değerlerde vuruntu nedeniyle yanmanın tam gerçekleşemediğini açıklamaktadır. Maksimum HC emisyonu, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneylerde motorun çalışabildiği en yüksek hız olan 1300 d/d motor hızında 2673 ppm olarak ölçülmüştür. En düşük HC emisyonu ise %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 1100 d/d motor hızında 384 ppm olarak ölçülmüştür.

Tüm yakıt karışımları ile motorun çalıştırılabildiği 1300 d/d motor hızına ait veriler incelendiğinde, minimum HC emisyonu değerinin %100 hafif nafta ile yapılan deneylerde 496 ppm olarak ölçüldüğü görülmektedir. Aynı motor hızı için maksimum HC emisyonu ise %50 hafif nafta %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde 2673 ppm olarak ölçülmüştür. 1300 d/d motor hızında, %100 hafif nafta ile yapılan testlerde ölçülen

HC emisyonu değerinin, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HC emisyonu değerine göre %81,44 oranında azaldığı görülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneylerde, 1300 d/d motor hızındaki vuruntu dikkat çekmektedir. Şekil 5.17'deki özgül yakıt tüketimi değişimlerini gösteren grafik incelendiğinde, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile 1300 d/d motor hızında yapılan testlerde ölçülen özgül yakıt tüketiminin belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu durum, vuruntulu çalışma nedeniyle yanmada meydana gelen kötüleşmeyi ispat etmektedir.




Şekil 5.21 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre CO emisyonu değişimi.

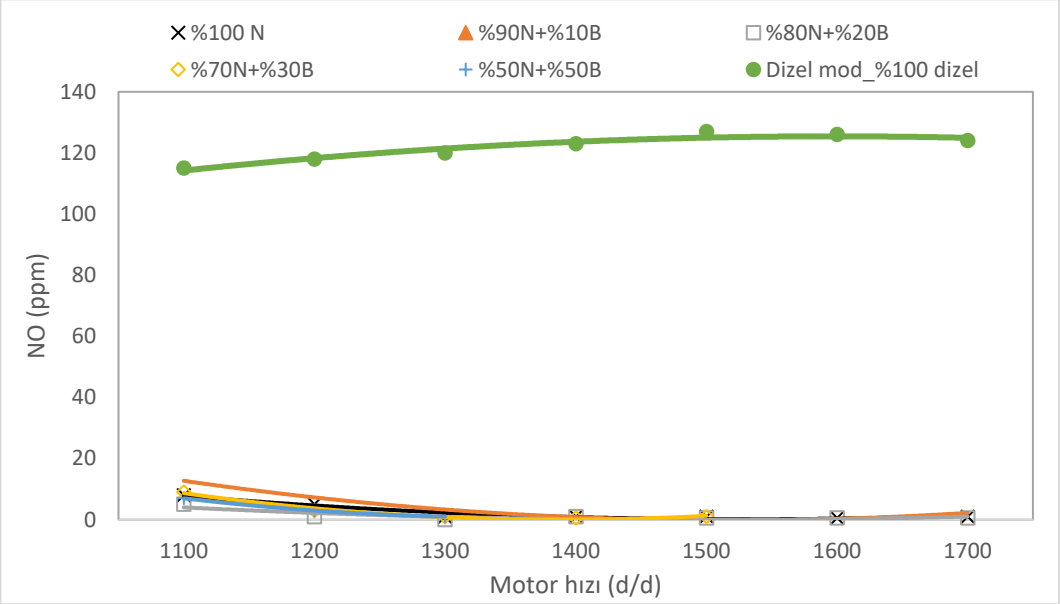
Şekil 5.21'de dizel modda %100 dizel yakıtı ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre CO emisyonu değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, yüksek motor hızlarında dizel modda yapılan deneylerde daha düşük CO emisyonu değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Bunun sebebinin, HCCI modunda üst çalışma sınırı olarak karşımıza çıkan 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarının, dizel modunda orta çalışma aralığında kalması ve dizel modunda bu motor hızlarında vuruntusuz iyi bir yanmanın sağlanabilmesi olduğu düşünülmektedir. HCCI moddaki en düşük CO emisyonu değeri,

1100 d/d motor hızında %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde %0,09 olarak ölçülmüştür. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testlerde, 1100 d/d motor hızındaki CO emisyonu değeri ise %0,11 olarak ölçülmüştür. 1100 d/d motor hızında HCCI modda ölçülen en düşük CO emisyonu değeri ile aynı motor hızında dizel modda dizel yakıtı ile yapılan testte ölçülen CO emisyonu değeri kıyaslandığında, dizel moduna göre HCCI modda ölçülen CO emisyonu değerinin %25 oranında azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kıyaslama yapılan motor hızı, HCCI çalışması için orta seviyedeki bir motor hızı iken, dizel moddaki çalışma için düşük seviyede kalmaktadır. 1100 d/d motor hızında, dizel modundaki yanma HCCI modundaki kadar iyi gerçekleşemediğinden CO emisyonunun bir miktar yüksek ölçüldüğü düşünülmektedir. Standart dizel modda ve HCCI modda 1300 d/d motor hızındaki CO emisyonu verileri incelendiğinde, standart dizel modda yapılan deneylerde CO emisyonunun %0,12 olarak ölçüldüğü, %100 hafif nafta ile HCCI modda yapılan deneylerde CO emisyonunun ise %0,13 olarak ölçüldüğü görülmektedir. 1300 d/d motor hızında ölçülen bu verilere göre, HCCI moddaki CO emisyonu değerinin dizel moduna göre %7,69 oranında azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.21'de verilen grafik incelendiğinde, HCCI modda hafif nafta ve benzin karışımları ile yapılan deneylerden elde edilen CO emisyonu verilerinde, düşük ve orta motor hızlarında belirgin bir değişiklik görülmemektedir. Ancak, yüksek motor hızlarında vuruntunun meydana geldiği, dolayısıyla yanmanın kötüleştiği bölgelerde CO emisyonunun belirgin bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Buradaki CO emisyonu değişimi karakteristik olarak, Şekil 5.20'de HCCI modda farklı yakıt karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre HC emisyonu değişimini veren grafiğe benzemektedir. Yanmanın kötüleştiği bölgelerde eksik yanma ürünü olan HC ve CO emisyonlarının aynı anda yükselmesi beklenen bir durumdur.

Şekil 5.22'de dizel modda %100 dizel yakıtı ve HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre NO emisyonu değişimini gösteren grafik verilmiştir. Dizel modda dizel yakıtı ile yapılan deneyler ile HCCI modda hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneyler kıyaslandığında, tüm

deney şartlarında HCCI modda yapılan deneylerde belirgin seviyede düşük NO emisyonu değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir.




Şekil 5.22 : Dizel modda %100 dizel ve HCCI modda farklı hafif nafta karışımları ile yapılan testlerde farklı motor hızlarına göre NO emisyonu değişimi.

Bu azalmanın, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. NO emisyonunun, yanma sırasında silindirde meydana gelen yüksek sıcaklıklardan kaynaklandığı bilinmektedir. Dizel modunda difüzyon alevi şeklinde yanma meydana geldiği için, özellikle alevin meydana geldiği bölgedeki sıcaklıklar NO oluşumuna sebep olabilecek seviyelere yükselmektedir. HCCI modunda ise yanma, homojen dolgunun her yerinde eş zamanlı olarak başladığından, yanma odasında bölgesel olarak yüksek sıcaklıklar oluşmamaktadır. HCCI yanmasında meydana gelen sıcaklıklar, NO emisyonu oluşturacak kadar yükselmemektedir. Şekil 5.13'te standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimi görülmektedir. Şekil 5.13'teki grafikte, %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modunda yapılan deneylerde ölçülen egzoz gazı sıcaklıklarının, %100 dizel yakıtı ile dizel modunda yapılan deneylerde ölçülen egzoz sıcaklıklarına göre ortalama %49,17 oranında az olduğu görülmektedir. Bu durum, HCCI yanmasının dizel yanmasına kıyasla daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği tespitini desteklemektedir. HCCI modda yapılan deneylerde NO emisyonu değeri, genel olarak sıfır seviyesinde ölçülmüştür. Şekil

5.22'de, HCCI modda ölçüm alınan en düşük test hızı olan 1100 d/d motor hızında, tüm yakıt karışımları ile yapılan deneylerdeki NO emisyonunun diğer motor hızlarına göre artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu artma eğilimine rağmen, HCCI moddaki en yüksek NO emisyonu değeri, 1100 d/d motor hızında %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde 17 ppm olarak ölçülmüştür ve 1100 d/d motor hızında dizel modunda %100 dizel yakıtı ile yapılan deneylerde ölçülen 115 ppm'lik NO emisyonlarına göre ihmal edilebilecek seviyelerde kalmaktadır.

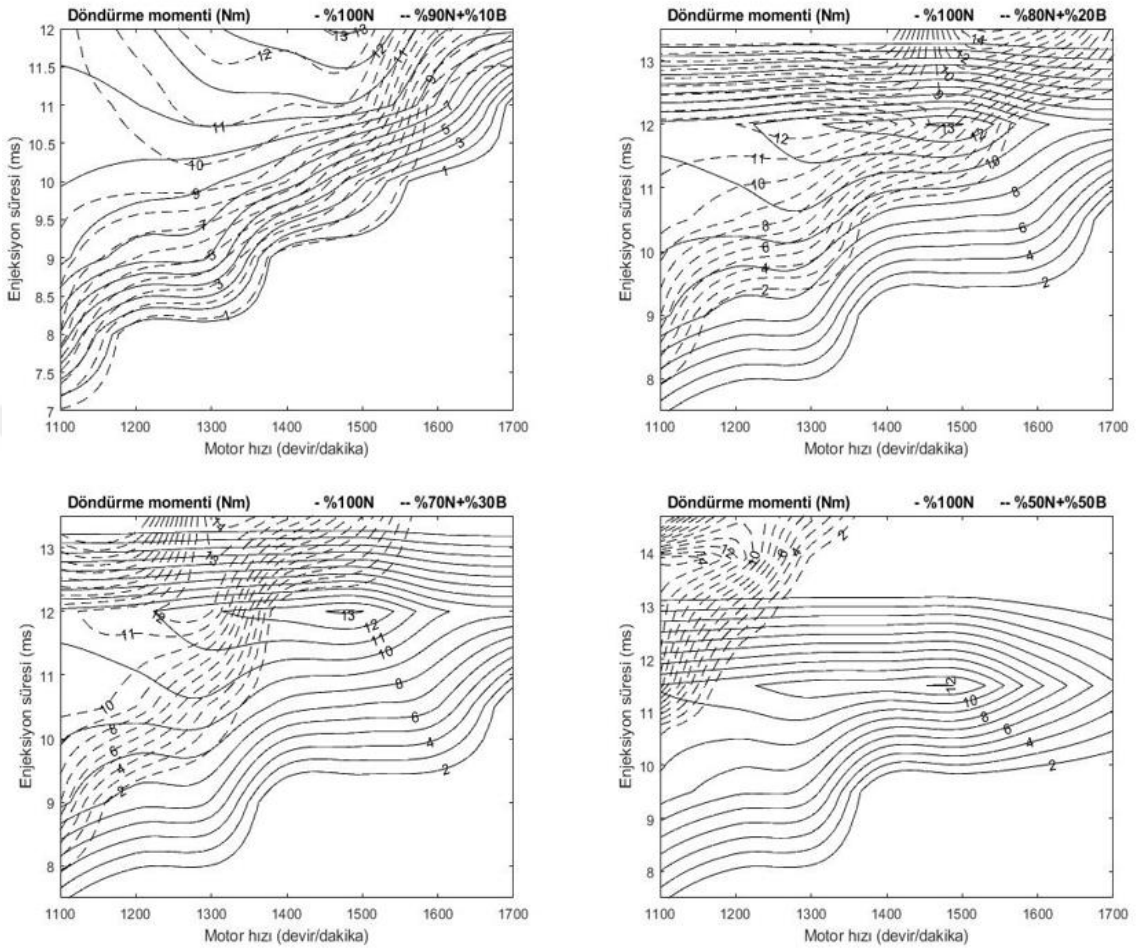
Şekil 5.22'deki grafikten, HCCI modunda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan 1100 d/d motor hızındaki deneylere ait veriler incelendiğinde, yüksek motor hızlarına kıyasla NO emisyonunun bir miktar artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük motor hızlarında dolgunun silindire yeterli miktarda alınması ancak, piston hızının dolguyu yeteri kadar homojen bir şekilde karıştıracak kadar hızlı olmamasından kaynaklı olarak yanmanın silindir içerisindeki bazı bölgelerde yoğunlaşmasıyla meydana gelen bölgesel sıcaklık artışlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Motor hızı artışı ile piston hızı artmakta ve bu durum silindir içerisindeki hava hareketini arttırarak daha homojen bir karışım oluşmasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle 1100 d/d motor hızından yukarıya doğru gidildikçe NO emisyonunun sıfır sevilerine indiği tahmin edilmektedir.

Şekil 5.23'te verilen grafiklerde maksimum döndürme momenti değerlerinin ölçüldüğü motor hızları karşılaştırıldığında, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile döndürme momentlerinin de arttığı görülmektedir. %100 hafif nafta ile yapılan deneyler ile kıyaslandığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde çalışma aralığının motor hızı arttıkça yüksek enjeksiyon sürelerinin olduğu bölüme kaydığı görülmektedir. Yüksek motor hızlarına doğru gidildikçe düşük enjeksiyon sürelerinde motor çalışmamıştır. Ayrıca düşük motor hızlarında, motorun çalıştığı enjeksiyon süresi aralığının daha geniş olduğu görülmektedir. %100 hafif nafta ile yapılan testlerdeki en yüksek döndürme momenti, 1500 d/d motor hızında ve 12,5 ms enjeksiyon süresinde 13,58 Nm olarak ölçülmüştür. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde en yüksek döndürme momenti, 1500 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde 13,73 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testler ile kıyaslandığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde, 1500 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti değerinin %1,1 oranında

yükseldiği görülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan deneylerde en yüksek döndürme momenti, 1500 d/d motor hızında 13,5 ms enjeksiyon süresinde 14,18 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan testler ile kıyaslandığında, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde, 1500 d/d motor hızında döndürme momenti değerinin %4,42 oranında yükseldiği görülmektedir. %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan deneylerde en yüksek döndürme momenti 1300 d/d motor hızında 13,5 ms enjeksiyon süresinde 13,75 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan testlerde 1300 d/d motor hızında ölçülen en yüksek döndürme momenti 12 ms enjeksiyon süresinde 11,88 Nm'dir. %100 hafif nafta ile yapılan testler ile kıyaslandığında %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde, 1300 d/d motor hızında ölçülen en yüksek döndürme momenti değerinde %15,74 oranında artış görülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan deneylerde en yüksek döndürme momenti 1100 d/d motor hızında 14 ms enjeksiyon süresinde 13,43 Nm olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ile yapılan testlerde 1100 d/d motor hızında ölçülen en yüksek döndürme momenti 12 ms enjeksiyon süresinde 10,3 Nm'dir. %100 hafif nafta ile yapılan testler ile kıyaslandığında %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde, 1100 d/d motor hızında ölçülen en yüksek döndürme momenti değerinde %30,39 oranında artış görülmektedir.

Şekil 5.23'te verilen grafikler incelendiğinde, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile motorun döndürme momentinin arttığı, bu yüksek döndürme momenti değerlerinin daha düşük motor hızlarında ve daha yüksek enjeksiyon sürelerinde ölçüldüğü görülmektedir. Karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile döndürme momentinde meydana gelen artışın sebebinin, benzinin ısıl değerinin hafif naftanın ısıl değerinden yüksek olmasından ve karışımdaki benzin oranının artmasıyla görülen daha yüksek enjeksiyon süreleri nedeniyle daha fazla yakıtın dolgu içerisine gönderilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.18'de verilen HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre HFK değişimini gösteren grafik incelendiğinde, tüm yakıt karışımları ile veri alınabilen 1100 d/d motor hızında %100 hafif naftanın HFK değeri 2,43 iken, %50 hafif nafta + %50 benzin içeren karışımın HFK değerinin 2,27 olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu da karışım içerisindeki

benzin oranı artışı ile dolgu içerisine daha fazla yakıt gönderildiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

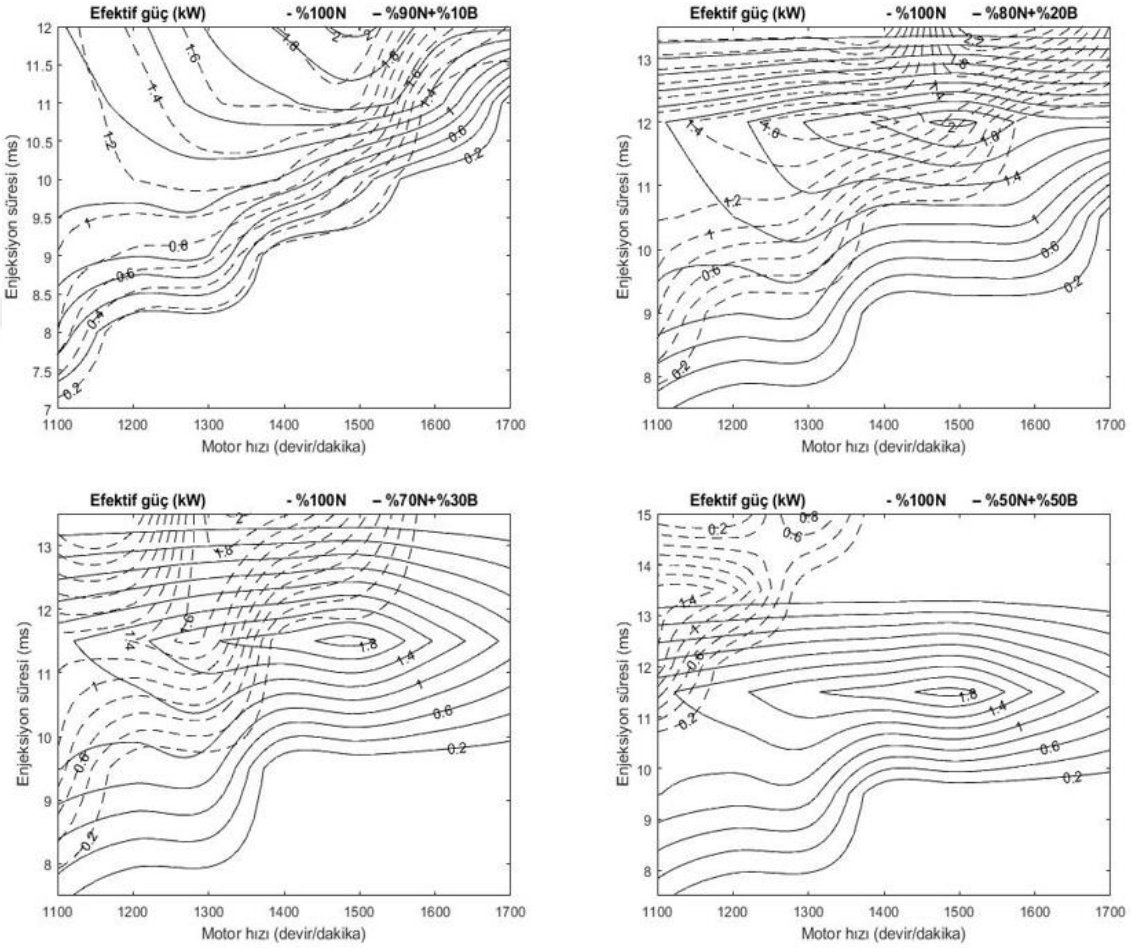



Şekil 5.23 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen döndürme momenti grafikleri.

Şekil 5.23'te verilen grafikler incelendiğinde, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile motorun döndürme momentinin arttığı, bu yüksek döndürme momenti değerlerinin daha düşük motor hızlarında ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumun, benzinin oktan sayısının hafif naftanın oktan sayısından yüksek olmasından dolayı, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile karışımın oktan sayısının yükselmesinden ve motor hızı arttıkça yanma için ayrılan zamanın kısalmasından dolayı HCCI yanmanın başlaması için yeterli sürenin kalmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.24'te verilen grafiklerde maksimum efektif güç değerlerinin ölçüldüğü motor hızları karşılaştırıldığında, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile efektif güç

değerlerinin de arttığı görülmektedir. %100 hafif nafta ile yapılan testlerde en yüksek efektif güç değeri, 1500 d/d motor hızında ve 12,5 ms enjeksiyon süresinde 2,13 kW olarak ölçülmüştür. Aynı motor hızında ve aynı enjeksiyon süresinde %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde efektif güç değeri 2,16 kW olarak ölçülmüştür.




Şekil 5.24 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen efektif güç grafikleri.

1500 d/d motor hızı ve 12,5 ms enjeksiyon süresinde, %100 hafif nafta ve %90 hafif nafta + %10 benzin yakıtları ile yapılan testler kıyaslandığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerdeki efektif güç değerinin %1,4 oranında yükseldiği görülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde en yüksek efektif güç değeri, 1500 d/d motor hızında ve 13,5 ms enjeksiyon süresinde 2,23 kW olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ve %80 hafif nafta + %20 benzin yakıtları ile yapılan testler, 1500 d/d motor hızında ölçülen en yüksek efektif güç değerleri bakımından

kıyaslandığında, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde efektif güç değerinin %4,69 oranında yükseldiği görülmektedir. %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde en yüksek efektif güç değeri, 1500 d/d motor hızında ve 14 ms enjeksiyon süresinde 1,85 kW olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ve %70 hafif nafta + %30 benzin yakıtları ile yapılan testler, 1500 d/d motor hızında ölçülen en yüksek efektif güç değerleri bakımından kıyaslandığında, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde efektif güç değerinin %13,15 oranında azaldığı görülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde en yüksek efektif güç değeri, 1200 d/d motor hızında ve 14,5 ms enjeksiyon süresinde 1,65 kW olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta ve %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan testler, 1200 d/d motor hızında ölçülen en yüksek efektif güç değerleri bakımından kıyaslandığında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde efektif güç değerinin %22,22 oranında yükseldiği görülmektedir.

Şekil 5.24'te verilen grafikler incelendiğinde, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile motorun efektif gücünün arttığı, bu yüksek efektif güç değerlerinin daha düşük motor hızlarında ve daha yüksek enjeksiyon sürelerinde ölçüldüğü görülmektedir. Karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile efektif güçte meydana gelen artışın sebebinin, benzinin ısıl değerinin hafif naftanın ısıl değerinden yüksek olmasından ve karışımdaki benzin oranının artmasıyla görülen daha yüksek enjeksiyon süreleri nedeniyle daha fazla yakıtın dolgu içerisine gönderilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.18'de verilen HCCI modda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin yakıtları ile yapılan deneylerde motor hızına göre HFK değişimini gösteren grafik incelendiğinde, tüm yakıt karışımları ile veri alınabilen 1100 d/d motor hızında %100 hafif naftanın HFK değeri 2,43 iken, %50 hafif nafta + %50 benzin içeren karışımın HFK değerinin 2,27 olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu da karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile dolgu içerisine daha fazla yakıt gönderildiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

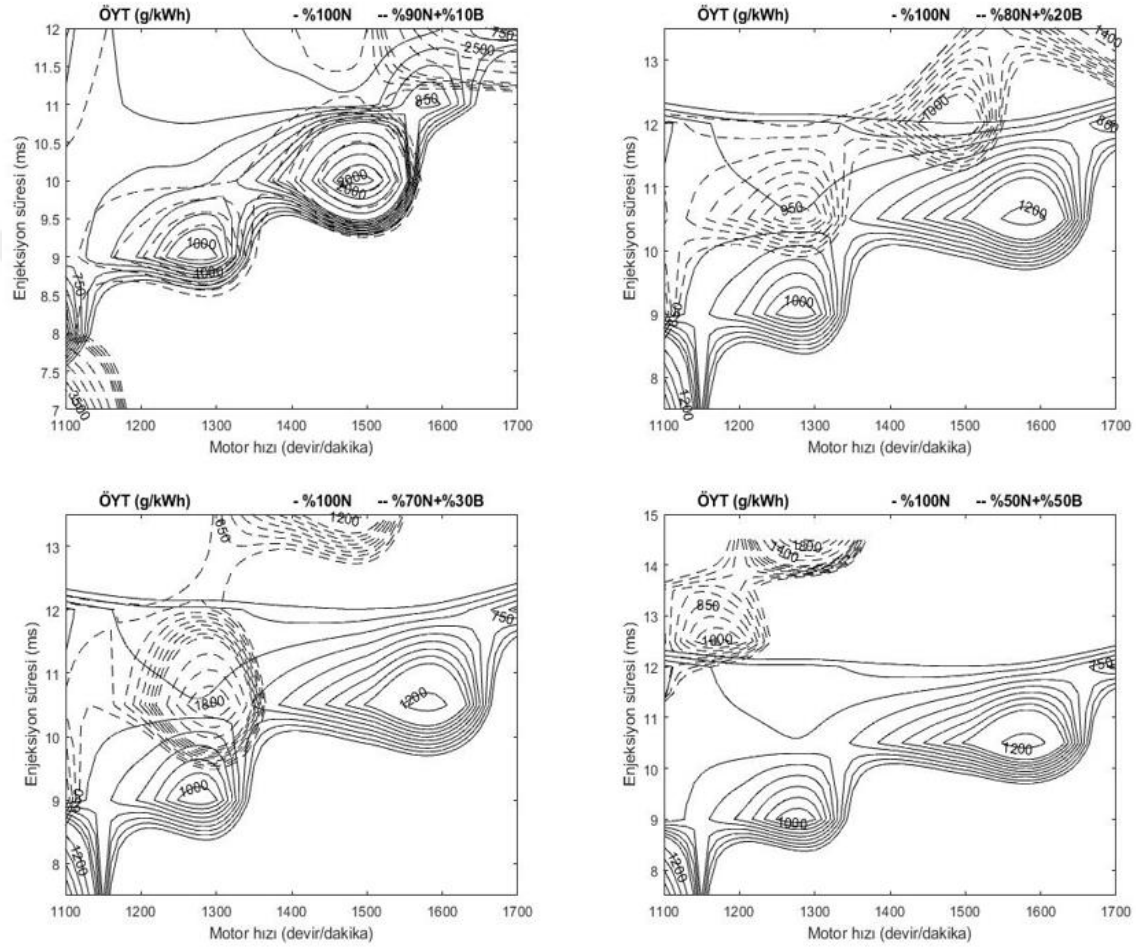
Şekil 5.24'te verilen grafikler incelendiğinde, %100 hafif nafta yakıtından %70 hafif nafta + %30 benzin karışımına kadar, karışımdaki benzin oranı arttıkça efektif gücün arttığı görülmektedir. Bunun sebebinin, en yüksek efektif gücün ölçüldüğü 1500 d/d motor hızında, vuruntu yapmadan kararlı bir şekilde çalışabilen en yüksek benzin oranı içeren karışımın, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı olmasından kaynaklandığı

düşünülmektedir. Benzin oranı %20'nin üzerine çıktığında, Şekil 5.24'te %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile motorun en yüksek 1500 d/d hızda çalışabildiği görülmektedir. Sınır çalışma koşullarında meydana gelen vuruntunun efektif güçte azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımında ise motorun en yüksek 1300 d/d hızda çalışabildiği görülmektedir. Efektif güç hesaplanırken motor hızı çarpan olduğu için, motor hızındaki düşüş otomatik olarak efektif güçte düşme meydana getirmektedir. Şekil 5.24'ten, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile %50 hafif nafta + %50 benzin karışımlarında motorun çalışabildiği en yüksek hızlarda ölçülen efektif güç değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.24'te karışım içerisindeki benzin oranı arttıkça motorun çalışma aralığının düşük hız bölgesine kaydığı görülmektedir. Bu durumun, benzinin oktan sayısının hafif naftanın oktan sayısından yüksek olmasından dolayı, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile karışımın oktan sayısının yükselmesinden ve motor hızı arttıkça yanma için ayrılan zamanın kısalmasından dolayı HCCI yanmanın başlaması için yeterli sürenin kalmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.25'te verilen grafiklerde farklı hafif nafta benzin karışımları ile yapılan testlerde ölçülen ÖYT değişimleri görülmektedir. %100 hafif nafta ile yapılan testlerde en düşük özgül yakıt tüketimi, 1500 d/d motor hızında ve 12,5 ms enjeksiyon süresinde 604,07 g/kWh olarak ölçülmüştür. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde ise en düşük özgül yakıt tüketimi, 1500 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde 584,42 g/kWh olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT ile kıyaslandığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT değerinin %3,25 oranında azaldığı görülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde en düşük özgül yakıt tüketimi, 1500 d/d motor hızında 13,5 ms enjeksiyon süresinde 611,13 g/kWh olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT ile kıyaslandığında, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT değerinin %1,17 oranında arttığı görülmektedir. %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde en düşük özgül yakıt tüketimi, 1300 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde 615,46 g/kWh olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT ile kıyaslandığında, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT değerinin %1,89 oranında arttığı görülmektedir.

%50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde en düşük ÖYT, 1100 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde 685,91 g/kWh olarak ölçülmüştür. %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT ile kıyaslandığında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen en düşük ÖYT değerinin %13,55 oranında arttığı görülmektedir.

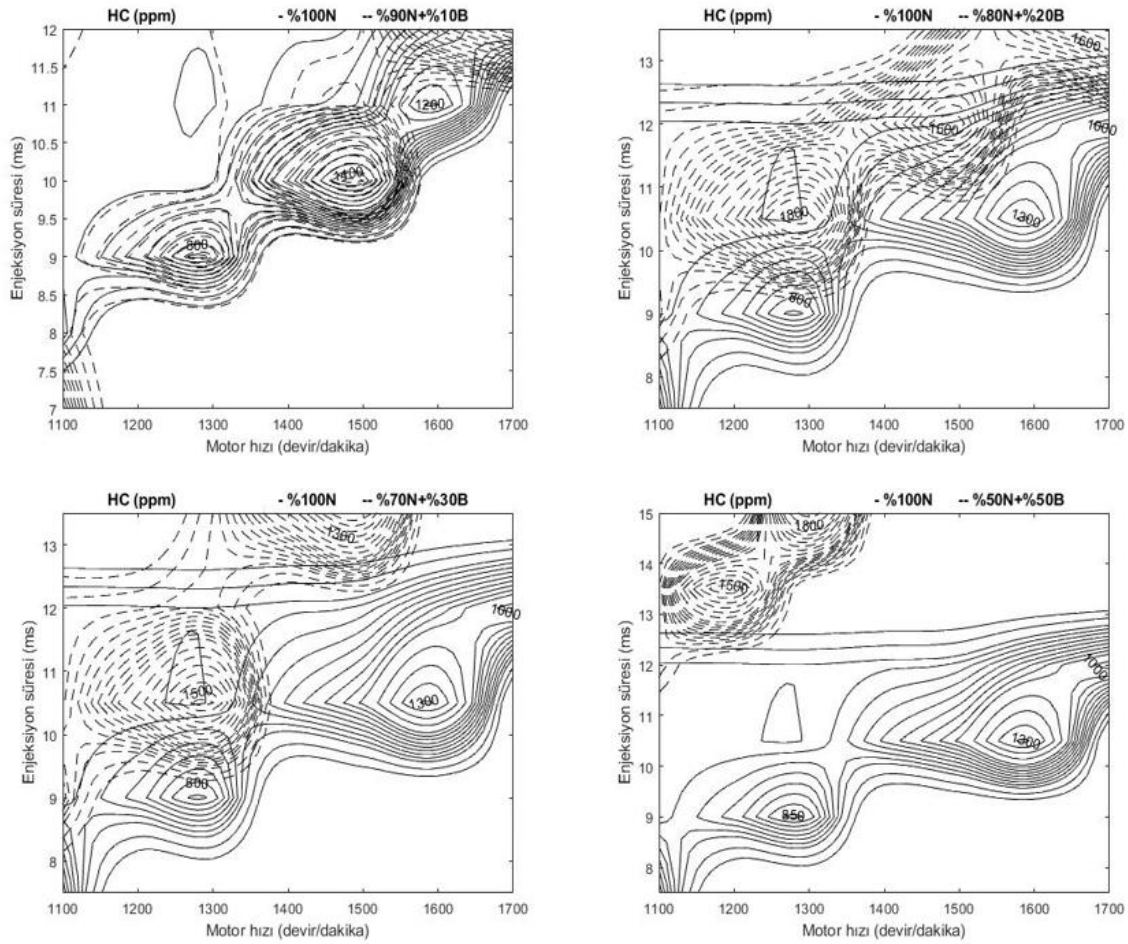



Şekil 5.25 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen ÖYT grafikleri.

Şekil 5.25'teki grafikler incelendiğinde, minimum ÖYT değerinin ölçüldüğü karışımın %90 hafif nafta + %10 benzin olduğu görülmektedir. Tüm karışımlar içerisindeki en düşük ÖYT değerinin ölçüldüğü 1500 d/d motor hızındaki HC emisyonu verilerini Şekil 5.20'de verilen grafikten incelediğimizde, en düşük ÖYT değerinin ölçüldüğü %90 hafif nafta + %10 benzin karışımının 1500 d/d motor hızındaki en düşük HC emisyonu değerini verdiği görülmektedir. Bu nedenle, 1500 d/d motor hızında %90 hafif nafta + %10 benzin

karışımının diğer karışımlara göre daha verimli yandığı ve bu sebeple ÖYT değerinin de diğer karışımlara göre daha düşük seviyede ölçüldüğü düşünülmektedir.

Şekil 5.25'te verilen grafiklerdeki %100 hafif nafta ile yapılan referans testler incelendiğinde, veri alınabilen tüm motor hızlarında, test edilebilen en düşük enjeksiyon sürelerinde en yüksek ÖYT değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Bu durumun, ölçüm alınan en düşük enjeksiyon sürelerinde silindire gönderilen dolgu içerisindeki yakıt miktarının çok düşük kalmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanma zamanında HCCI yanmasının başlamasını zorlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.26'da verilen HC emisyonu grafikleri incelendiğinde, ÖYT'nin yüksek olduğu bölgelerde HC emisyonunun da yüksek değerlerde ölçüldüğü görülmektedir. Bu da değerlerin yüksek ölçüldüğü noktalarda yanmanın sağlıklı gerçekleşmediğini göstermektedir.




Şekil 5.26 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen HC emisyonu grafikleri.

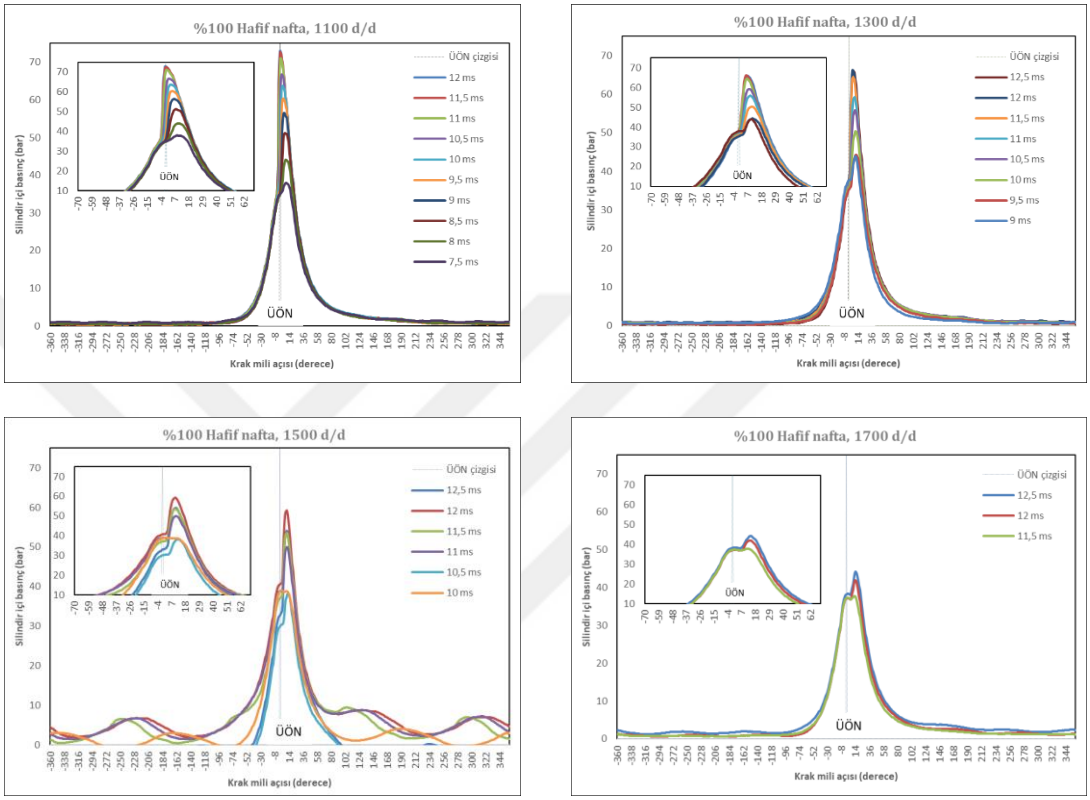
Şekil 5.26'da HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen HC emisyonu grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, her motor hızındaki motorun çalışabildiği en düşük enjeksiyon sürelerinde en yüksek HC emisyonlarının ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 5.26'daki HC emisyonu grafiklerinin, Şekil 5.25'teki ÖYT grafikleri ile benzer şekilde oluştuğu görülmektedir. Bu durum hem ÖYT hem de HC emisyonunun maksimum seviyede ölçüldüğü, her motor hızındaki en düşük enjeksiyon sürelerindeki yanmanın tam gerçekleşemediğini göstermektedir.

Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen, motor hızına ve enjeksiyon süresine göre döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt tüketimi ve HC emisyonu değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile motorun çalışabildiği enjeksiyon sürelerinin yükseldiği görülmektedir. Bunun sebebinin, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile karışımın oktan sayısının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Karışım içerisindeki benzin oranıyla beraber oktan sayısında meydana gelen artış, HCCI yanmasının başlamasını zorlaştırmaktadır. Karışım içerisindeki benzin oranı arttıkça hafif nafta oranı azalmaktadır. HCCI yanmasının rahat bir şekilde başlatılması karışımdaki hafif naftanın, sıkıştırma zamanı sonunda yanma odasındaki şartlarda kolay tutuşması sayesinde meydana gelmektedir. Karışımdaki hafif nafta oranının azalması HCCI yanmasının başlamasını zorlaştırmaktadır. HCCI yanmasının gerçekleşebilmesi için, silindire daha fazla yakıt püskürterek silindirdeki hafif nafta miktarını yanmayı başlatacak kadar çoğaltmak gerekmektedir. Karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile enjeksiyon süresinde meydana gelen artışın sebebinin bu olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilen grafikler incelendiğinde, karışım içerisindeki benzin oranı artışı ile motorun HCCI modda çalışabildiği motor hızının azaldığı görülmektedir. %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin ve %80 hafif nafta + %20 benzin yakıtları ile yapılan HCCI testlerinde 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan HCCI testlerinde 1100 d/d ile 1500 d/d motor hızları arasında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan HCCI testlerinde ise 1100 d/d ile 1300 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. HCCI modda yapılan testlerde, yakıt karışımı içerisindeki

benzin oranının artmasıyla motorun yüksek hızlarda çalışmamasının, karışım içeriğindeki benzin oranı artışının karışımın oktan sayısını arttırmasından ve yüksek motor hızlarında yanma için ayrılan zamanın kısalmasından dolayı HCCI yanmanın başlaması için yeterli sürenin kalmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.27 : HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

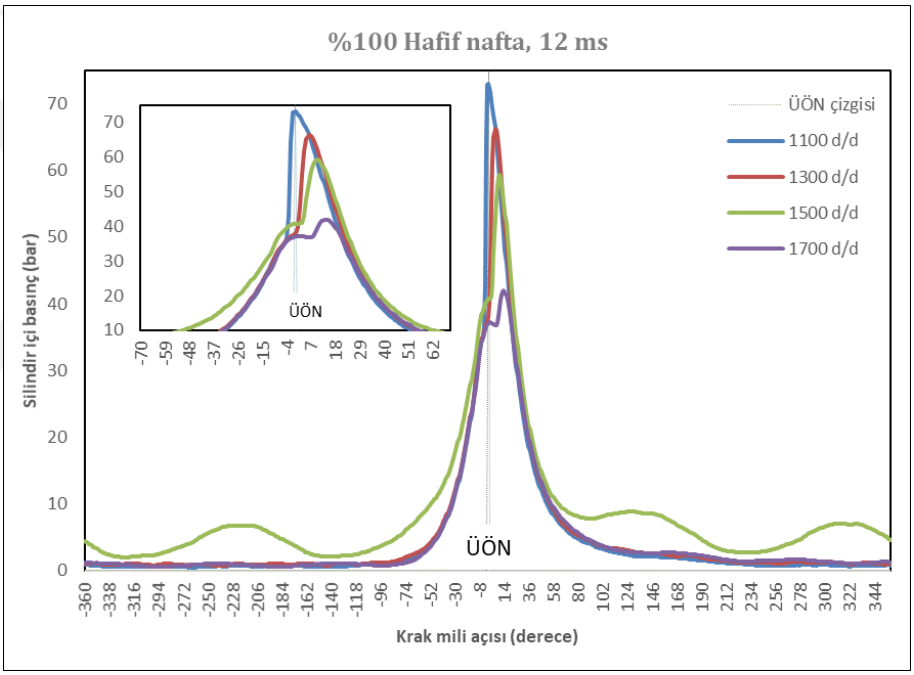
Şekil 5.27'de HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. %100 hafif nafta yakıtı ile motordan 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun 7,5 ms ile 12 ms enjeksiyon süresi aralığında çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değeri 12 ms enjeksiyon süresinde sıfır (0) krank mili açısında 73 bar olarak, en düşük maksimum silindir içi basınç değeri 7,5 ms enjeksiyon süresinde dokuz (9) krank mili açısında 37,94 bar olarak ölçülmüştür. 7,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin,

12 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %48,03 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, %100 hafif nafta yakıtı ile farklı motor hızlarında yapılan deneylerde enjeksiyon sürelerine göre değişimleri verilen, Şekil 5.5'teki döndürme momenti, Şekil 5.6'daki efektif güç, Şekil 5.7'deki ÖYT, Şekil 5.8'deki HFK ve Şekil 5.9'daki HC emisyonu değişimleri incelenmiştir. 1100 d/d motor hızında yapılan testlerde diğer enjeksiyon sürelerinde elde edilen veriler ile kıyaslandığında, 12 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (10,3 Nm) ve efektif güç (1,19 kW) değerlerinin en yüksek seviyede olduğu, HFK değerinin (2,34) en düşük seviyede olduğu, ÖYT (764,29 g/kWh) ve HC (516 ppm) emisyonu değerlerinin ise en düşük seviyeye yakın ortalama değerlerde olduğu görülmektedir.

1100 d/d motor hızında yapılan testlerde diğer enjeksiyon sürelerinde elde edilen veriler ile kıyaslandığında, 7,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (2,4 Nm) ve efektif güç (0,28 kW) değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (3,96), ÖYT (2050,05 g/kWh) ve HC (847 ppm) emisyonu değerlerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler ile kıyaslandığında, 7,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti ve efektif güçte belirgin bir düşüş görülürken, HFK, ÖYT ve HC emisyonunda ise belirgin bir artış görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında en yüksek silindir içi basıncın 12 ms enjeksiyon süresinde ölçülmesinin, bu şartlarda yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.27'deki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, enjeksiyon süresi azaldıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinin çok yüksek olmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.8'de verilen HFK değerine bakıldığında, yüksek enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (12 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,34) diğer enjeksiyon sürelerine göre düşük olduğu, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (7,5 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 3,96) ise diğer enjeksiyon sürelerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.27'de verilen 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarında, enjeksiyon süresi artışı ile elde edilen

en yüksek silindir içi basınç değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamadığı ve test edilebilen farklı enjeksiyon süresinin sayı olarak azaldığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 7,5 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süresi aralığında 0,5 ms'lik artış ile 10 farklı enjeksiyon süresinde motordan veri alınabilmişken, 1700 d/d motor hızında 11,5 ms, 12 ms ve 12,5 ms olmak üzere sadece 3 farklı enjeksiyon süresinde motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 10 farklı enjeksiyon süresinde veri alınabilirken, 1700 d/d motor hızında sadece 3 farklı enjeksiyon süresinde veri alınabilmesinin sebebi, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.28 : HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi.

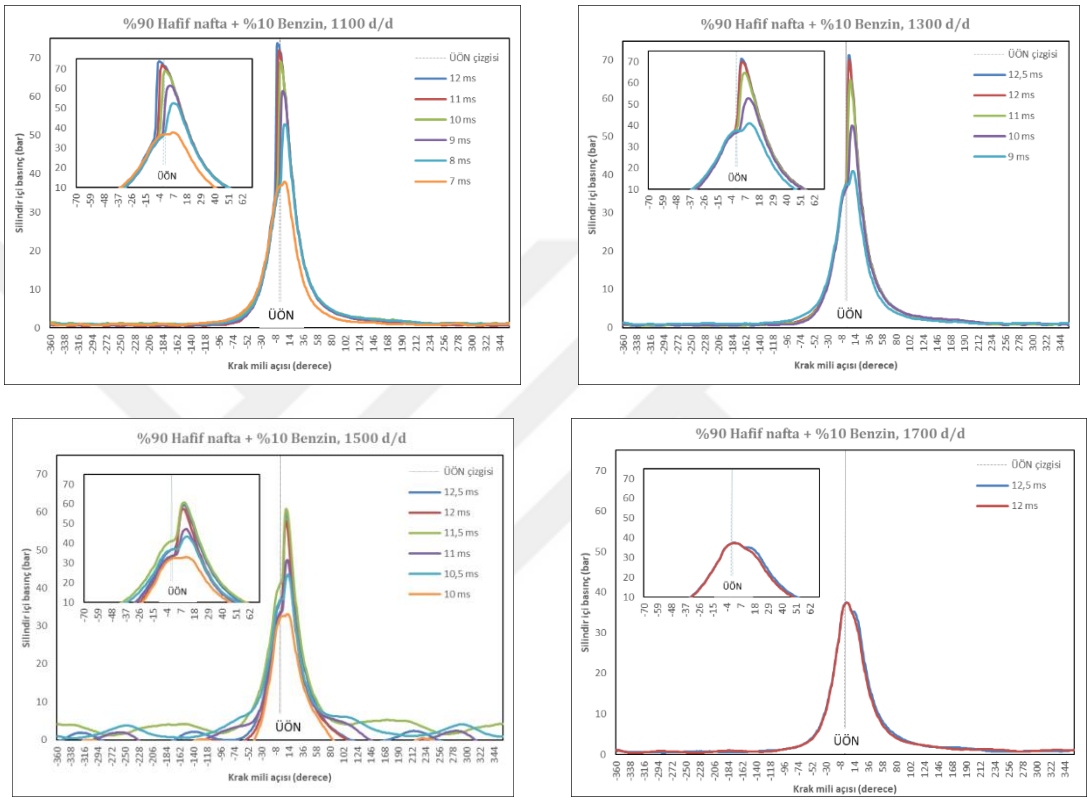
Şekil 5.28'de verilen HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarına göre silindir içi basınç değişimleri incelendiğinde, motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin azaldığı ve ölçülen maksimum silindir içi basınç değerlerinin ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönüne doğru kaydığı görülmektedir. Şekil 5.8'de verilen %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modda farklı motor hızları ve farklı enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinde meydana gelen değişimleri gösteren grafik incelendiğinde, tüm motor hızlarında veri

alınabilen 12 ms enjeksiyon süresinde HFK değerlerinin motor hızı artışı ile arttığı görülmektedir. Bu sebeple, motor hızı artışı ile daha fakir hale gelen karışımın yanmaya daha zor başladığı ve motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basıncın ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönünde kaydığı (yanmanın geciktiği) düşünülmektedir.

Şekil 5.28'deki 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında ölçülen silindir içi basınç değerlerine bakıldığında, silindir içi basıncın düşük motor hızlarına göre daha erken artma eğiliminde olduğu, daha sonra bir süre sabit kaldığı ve piston ÜÖN'yi 5-10 krank mili açısı kadar geçtikten sonra aniden yükseldiği görülmektedir. Ancak bu yükselme düşük motor hızlarındaki kadar yüksek bir silindir içi basınç değeri vermemektedir. Bunun sebebini anlayabilmek için Şekil 5.9'da verilen %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modda farklı motor hızları ve farklı enjeksiyon sürelerindeki HC emisyonu değerlerinde meydana gelen değişimleri gösteren grafik incelendiğinde, 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan test sonuçlarına göre; 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 516 ppm, 1300 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 503 ppm, 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 571 ppm olduğu, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin ise belirgin bir artışla 1051 ppm olarak ölçüldüğü görülmektedir. 1700 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerine göre %103,68 oranında yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alınarak, 1700 d/d motor hızında ölçülen maksimum silindir içi basıncın diğer motor hızlarına göre belirgin bir şekilde azalmasının, bu şartlarda silindir içerisindeki yanmanın tam gerçekleşememesinden ve vuruntudan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.29'da HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile motordan 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun 7 ms ile 12 ms enjeksiyon süresi aralığında çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değeri 12 ms enjeksiyon süresinde eksi dört (-4) krank mili açısında 73,87 bar olarak, en düşük maksimum silindir içi basınç değeri 7 ms enjeksiyon süresinde yedi (7) krank mili açısında 37,89 bar olarak ölçülmüştür. 7 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum

silindir içi basınç değerinin, 12 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %48,71 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında yapılan deneylerde enjeksiyon sürelerine göre döndürme momenti, efektif güç, ÖYT, HFK ve HC emisyonu değişimleri incelenmiştir.

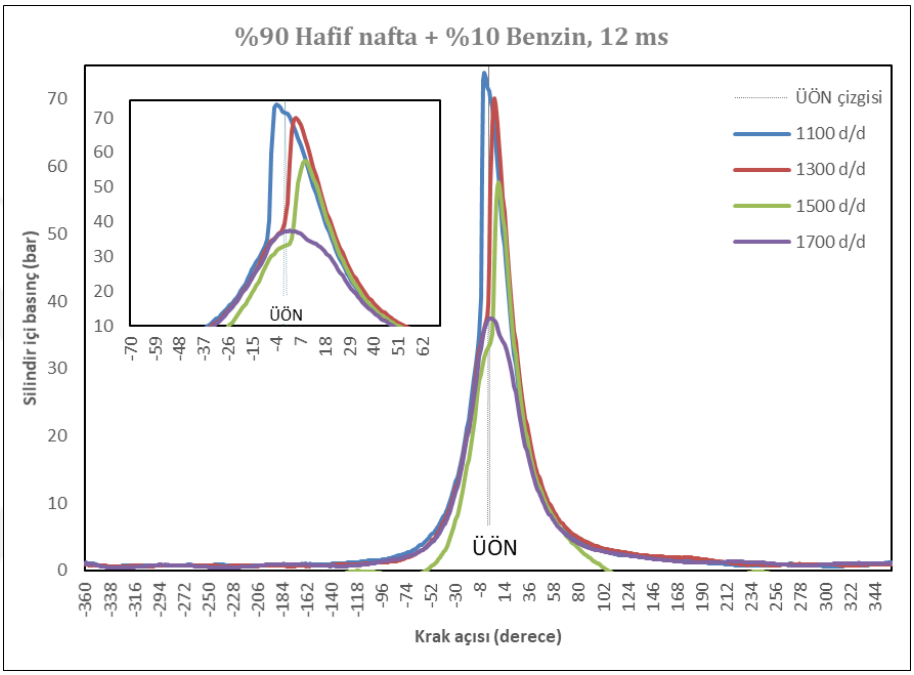



Şekil 5.29 : HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

1100 d/d motor hızında yapılan testlerden elde edilen farklı enjeksiyon sürelerindeki testler kıyaslandığında, 12 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (9,5 Nm) ve efektif güç (1,09 kW) değerlerinin en yüksek seviyeye yakın olduğu, HFK (2,34) ve HC (384 ppm) emisyonu değerlerinin en düşük seviyede olduğu, ÖYT (810,56 g/kWh) değerinin ise en düşük seviyeye yakın ortalama değerlerde olduğu görülmektedir. 7 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (0,88 Nm) ve efektif güç (0,1 kW) değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (4,35), ÖYT (5133,54 g/kWh) ve HC (878 ppm) emisyonu değerlerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler ile kıyaslandığında, 7 ms enjeksiyon süresinde döndürme

momenti ve efektif güçte belirgin bir düşüş görülürken, HFK, ÖYT ve HC emisyonunda ise belirgin bir artış görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında en yüksek silindir içi basıncın 12 ms enjeksiyon süresinde ölçülmesinin, bu şartlarda yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak ÜÖN'den dört (4) krank mili açısı önce maksimum basıncın oluşması, elde edilen işin bir kısmının kaybedilmesi anlamına gelmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testten elde edilen silindir içi basınç eğrisini incelediğimizde, maksimum basıncın ÜÖN'den önce oluşmasına, HFK değerinin bu koşullarda diğer çalışma koşullarına göre en düşük seviyede olması nedeniyle karışımın diğer karışımlara göre yakıt bakımından zengin olması ve motor hızının yanmayı gerçekleştirmek için yeterli zamanı sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karışım içerisindeki hafif naftanın oktan sayısı düşük olduğu için sıkıştırma koşullarında yanmanın başlatılması için etkin bir rol oynadığı düşünülmektedir. Hafif naftanın yanmayı başlatmasıyla homojen karışımın tamamının silindirin her yerinde yanmaya başladığı ve motor hızının da düşük seviyede kalması sebebiyle yeterli yanma zamanı kalmasından dolayı ÜÖN'den önce maksimum silindir içi basıncın oluştuğu tahmin edilmektedir. Şekil 5.29'daki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, enjeksiyon süresi azaldıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinin çok yüksek olmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK değerine bakıldığında, yüksek enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (12 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,34) diğer enjeksiyon sürelerine göre düşük olduğu, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (7 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 4,35) ise diğer enjeksiyon sürelerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.29'da verilen 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarında, enjeksiyon süresi artışı ile elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamadığı ve test edilebilen enjeksiyon süresi aralığının azaldığı görülmektedir.

1100 d/d motor hızında 7 ms ile 12 ms enjeksiyon süresi aralığında motordan veri alınabilmişken, 1700 d/d motor hızında 12 ms ve 12,5 ms enjeksiyon süresinde motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, 1700 d/d motor hızına göre daha fazla enjeksiyon süresi aralığında veri alınabilmesinin, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



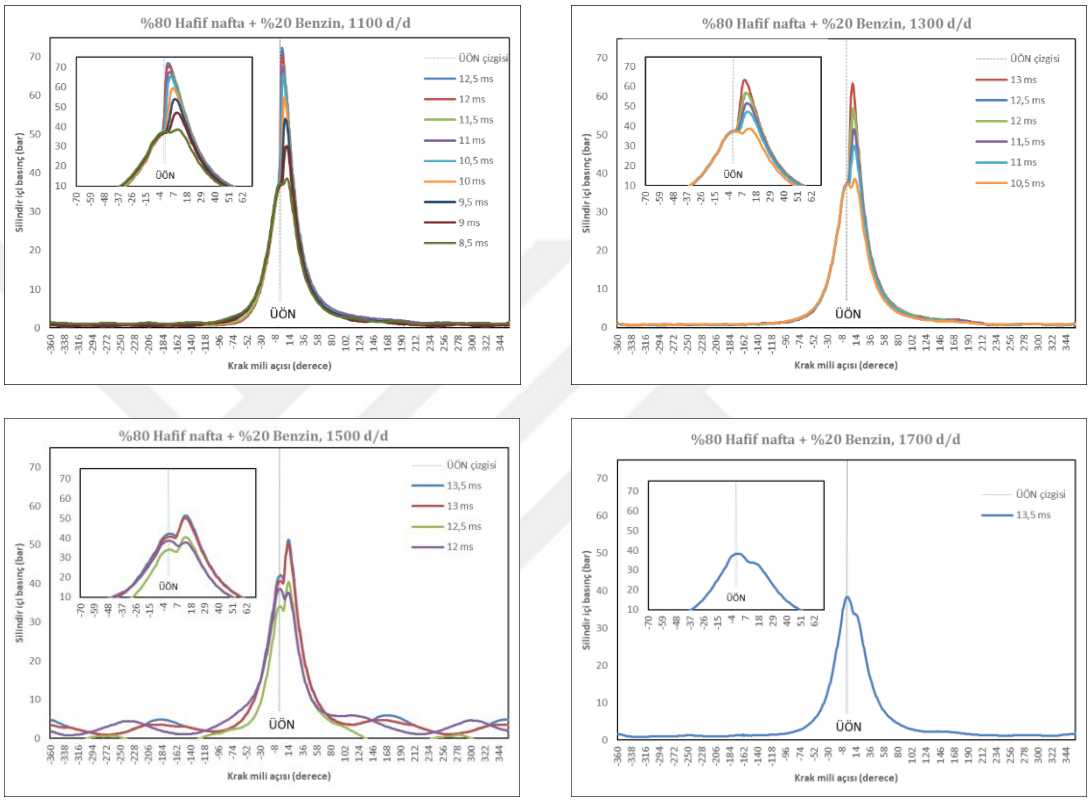

Şekil 5.30 : HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi.

Şekil 5.30'da verilen HCCI modda %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarına göre silindir içi basınç grafikleri incelendiğinde, motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin azaldığı ve ölçülen maksimum silindir içi basınç değerlerinin ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönüne doğru kaydığı görülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile HCCI modda farklı motor hızlarında ve 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen HFK değerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde, 1100 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,34, 1300 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,43, 1500 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,49, 1700 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,87 olarak ölçüldüğü görülmektedir. Tüm motor hızlarında veri alınabilen 12 ms enjeksiyon süresinde HFK değerlerinin motor hızı artışı ile arttığı görülmektedir. Bu sebeple, motor

hızı artışı ile daha fakir hale gelen karışımın yanmaya daha zor başladığı ve motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basıncın ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönünde kaydığı (yanmanın geciktiği) düşünülmektedir. Şekil 5.30'daki 1700 d/d motor hızında ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine bakıldığında düşük motor hızlarına göre belirgin bir şekilde düşük ölçüldüğü görülmektedir. Bunun sebebini anlayabilmek için %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile HCCI modda farklı motor hızları ve farklı enjeksiyon sürelerindeki HC emisyonu değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde, 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan test sonuçlarına göre; 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 384 ppm, 1300 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 502 ppm, 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 557 ppm olduğu, 1700 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin ise belirgin bir artışla 1828 ppm olarak ölçüldüğü görülmektedir. 1700 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerine göre %376,04 oranında yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alınarak, 1700 d/d motor hızında ölçülen maksimum silindir içi basıncın diğer motor hızlarına göre belirgin bir şekilde azalmasının, bu şartlarda silindir içerisindeki yanmanın tam gerçekleşememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.31'de HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile motordan 1100 d/d ile 1700 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun 8,5 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süresi aralığında çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değeri 12,5 ms enjeksiyon süresinde üç (3) krank mili açısında 72,29 bar olarak, en düşük maksimum silindir içi basınç değeri 8,5 ms enjeksiyon süresinde on (10) krank mili açısında 38,51 bar olarak ölçülmüştür. 8,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin, 12,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %46,73 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında yapılan deneylerde enjeksiyon sürelerine göre döndürme momenti, efektif güç, ÖYT, HFK ve HC emisyonu değişimleri incelenmiştir. 1100 d/d motor hızındaki farklı enjeksiyon

sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 12,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (12,08 Nm) ve efektif güç (1,39 kW) değerlerinin en yüksek seviyede olduğu, HFK (2,31) ve HC (452 ppm) emisyonu değerlerinin en düşük seviyede olduğu, ÖYT (644,28 g/kWh) değerinin ise en düşük seviyeye yakın ortalama değerlerde olduğu görülmektedir.




Şekil 5.31 : HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

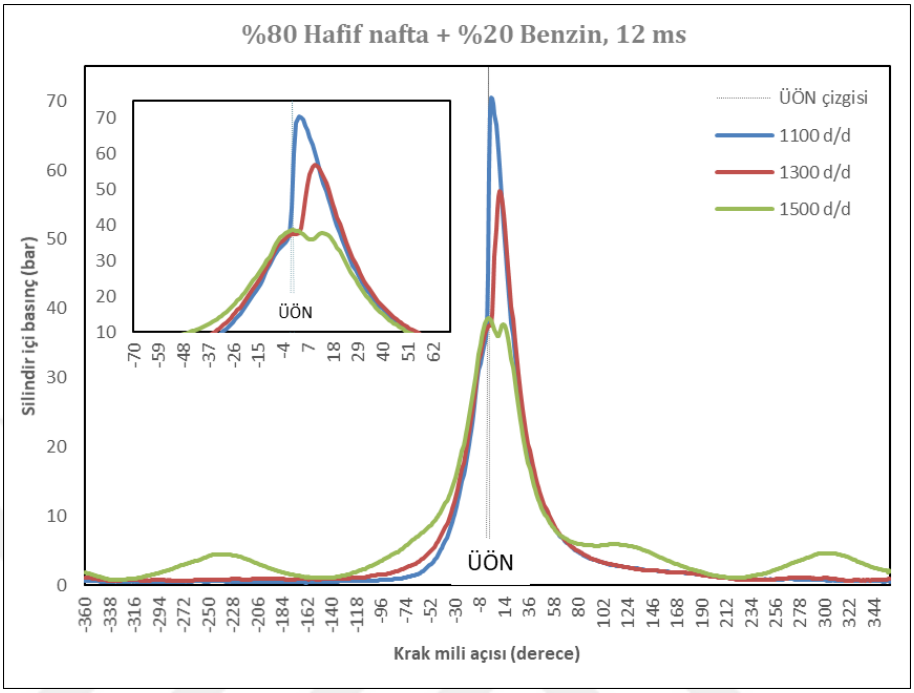
1100 d/d motor hızındaki farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 8,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (4,93 Nm) ve efektif güç (0,57 kW) değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (3,58), ÖYT (1120,52 g/kWh) ve HC (841 ppm) emisyonu değerlerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 12,5 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler ile kıyaslandığında, 8,5 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti ve efektif güçte belirgin bir düşüş görülürken, HFK, ÖYT ve HC emisyonunda ise belirgin bir artış görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında en yüksek silindir içi basıncın 12,5 ms enjeksiyon süresinde ölçülmesinin, bu şartlarda yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil

5.31'deki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, enjeksiyon süresi azaldıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinin çok yüksek olmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK değerine bakıldığında, yüksek enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (12,5 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,31) diğer enjeksiyon sürelerine göre düşük olduğu, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (8,5 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 3,58) ise diğer enjeksiyon sürelerine göre yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.31'de verilen 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarında, enjeksiyon süresi artışı ile elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamadığı ve test edilebilen enjeksiyon süresi aralığının azaldığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 8,5 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süresi aralığında motordan veri alınabilmişken, 1700 d/d motor hızında sadece 13,5 ms enjeksiyon süresinde motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, 1700 d/d motor hızına göre daha fazla enjeksiyon süresi aralığında veri alınabilmesinin, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

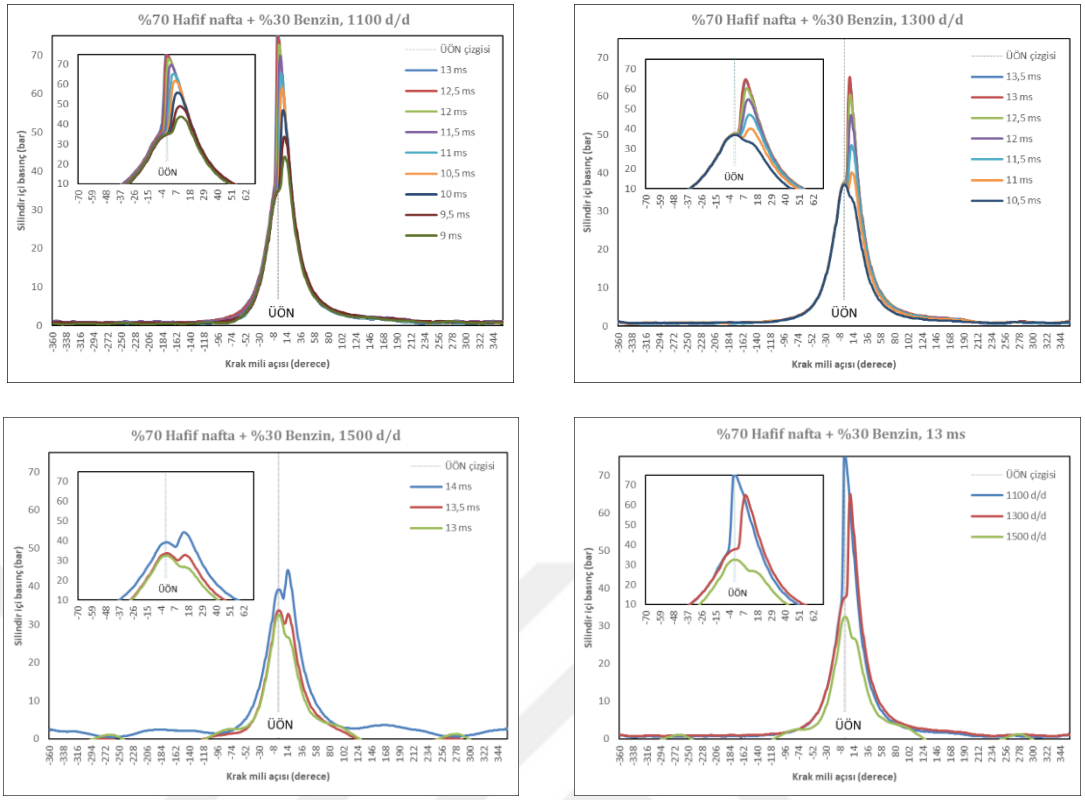
Şekil 5.32'de verilen HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarına göre silindir içi basınç grafikleri incelendiğinde, motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin azaldığı ve ölçülen maksimum silindir içi basınç değerlerinin ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönüne doğru kaydığı görülmektedir. %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile HCCI modda farklı motor hızlarında ve 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen HFK değerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde, 1100 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,40, 1300 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,43, 1500 d/d motor hızındaki HFK değerinin 2,85 olarak ölçüldüğü görülmektedir. 12 ms enjeksiyon süresinde HFK değerlerinin motor hızı artışı ile arttığı görülmektedir. Bu sebeple, motor hızı artışı ile daha fakir hale gelen karışımın yanmaya daha zor başladığı

ve motor hızı arttıkça ölçülen maksimum silindir içi basıncın ÜÖN'den pozitif krank mili açısı yönünde kaydığı (yanmanın geciktiği) düşünülmektedir.




Şekil 5.32 : HCCI modda %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan testlerden elde edilen farklı motor hızlarındaki silindir içi basınç değişimi.

Şekil 5.32'deki 1500 d/d motor hızında ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine bakıldığında, düşük motor hızlarına göre belirgin bir şekilde azaldığı ve vuruntulu çalışma meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebini anlayabilmek için %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı ile HCCI modda farklı motor hızları ve farklı enjeksiyon sürelerindeki HC emisyonu değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde, 12 ms enjeksiyon süresinde yapılan test sonuçlarına göre; 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 460 ppm, 1300 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 536 ppm olduğu ve 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin ise belirgin bir artışla 1661 ppm olduğu görülmektedir. 1500 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerinin 1100 d/d motor hızında ölçülen HC emisyonu değerine göre %261,09 oranında yükseldiği görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alınarak, 1500 d/d motor hızında ölçülen maksimum silindir içi basıncın diğer motor hızlarına göre belirgin bir şekilde azalmasının, bu şartlarda silindir içerisindeki yanmanın tam gerçekleşememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.33 : HCCI modda %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

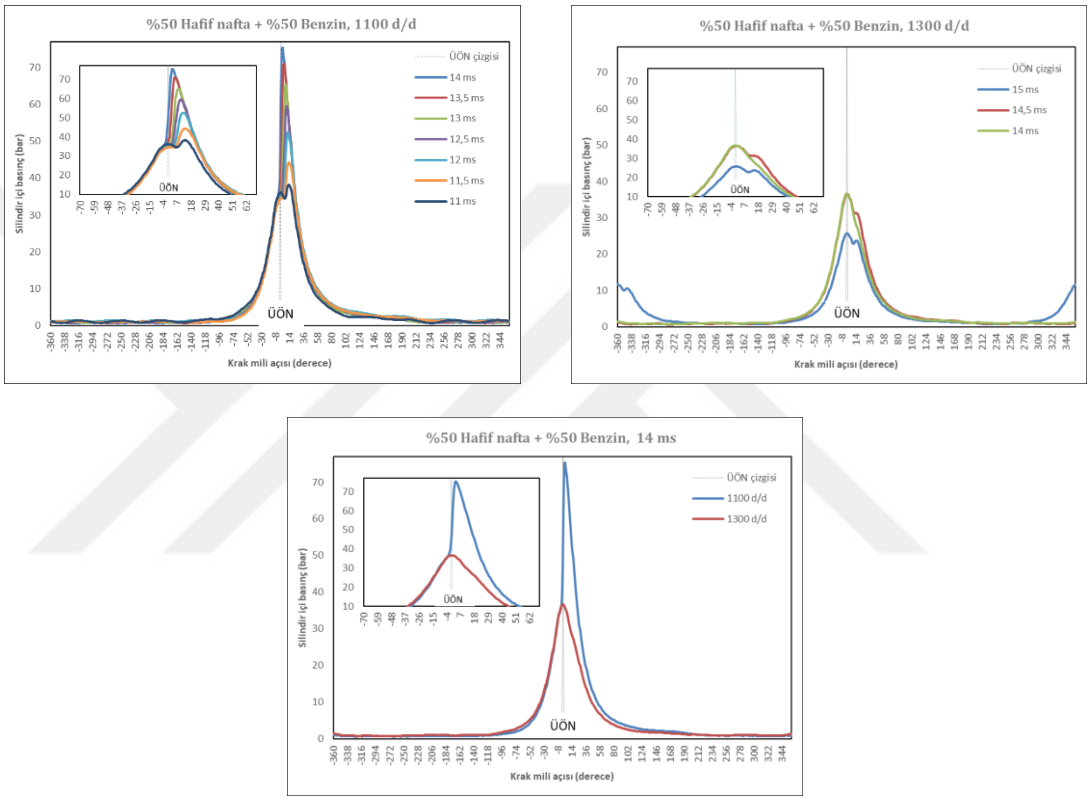
Şekil 5.33'te HCCI modda %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile motordan 1100 d/d ile 1500 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun 9 ms ile 13 ms enjeksiyon süresi aralığında çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değeri 13 ms enjeksiyon süresinde sıfır (0) krank mili açısında 75,81 bar olarak, en düşük maksimum silindir içi basınç değeri 9 ms enjeksiyon süresinde on bir (11) krank mili açısında 43,74 bar olarak ölçülmüştür. 9 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin, 13 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %42,30 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında yapılan deneylerde enjeksiyon sürelerine göre döndürme momenti, efektif güç, ÖYT, HFK ve HC emisyonu değişimleri incelenmiştir.

1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 13 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (11,3 Nm) ve efektif güç (1,30 kW) değerlerinin en yüksek seviyede olduğu, HFK (2,11) ve HC (435 ppm) emisyonu değerlerinin en düşük seviyede olduğu, ÖYT (725,05 g/kWh) değerinin ise ortalama bir değerde olduğu görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 9 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (7 Nm) ve efektif güç (0,81 kW) değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (3,27), ÖYT (810,30 g/kWh) ve HC (693 ppm) emisyonu değerlerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 13 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler ile kıyaslandığında, 9 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti ve efektif güçte belirgin bir düşüş görülürken, HFK, ÖYT ve HC emisyonunda ise belirgin bir artış görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında en yüksek silindir içi basıncın 13 ms enjeksiyon süresinde ölçülmesinin, bu şartlarda yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.33'teki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, enjeksiyon süresi azaldıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 5.33'teki 1500 d/d motor hızında yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç eğrilerine bakıldığında, test edilen tüm enjeksiyon sürelerinde motorun vuruntulu çalıştığı görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinin çok yüksek olmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %70 hafif nafta + %30 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK değerine bakıldığında, yüksek enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (13 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,11) diğer enjeksiyon sürelerine göre düşük olduğu, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (9 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 3,27) ise diğer enjeksiyon sürelerine göre yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.33'te verilen 1300 d/d ve 1500 d/d motor hızlarında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarında, enjeksiyon süresi artışı ile elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamadığı ve test edilebilen enjeksiyon süresi aralığının azaldığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 9 ms ile 13 ms enjeksiyon süresi

aralığında motordan veri alınabilmişken, 1500 d/d motor hızında 13 ms ile 14 ms enjeksiyon süresi aralığında motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, 1500 d/d motor hızına göre daha fazla enjeksiyon süresi aralığında veri alınabilmesinin, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 5.34 : HCCI modda %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

Şekil 5.34'te HCCI modda %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile motordan 1100 d/d ile 1300 d/d motor hızları arasında veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun 11 ms ile 14 ms enjeksiyon süresi aralığında çalışabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değeri 14 ms enjeksiyon süresinde üç (3) krank mili açısında 75,31 bar olarak, en düşük

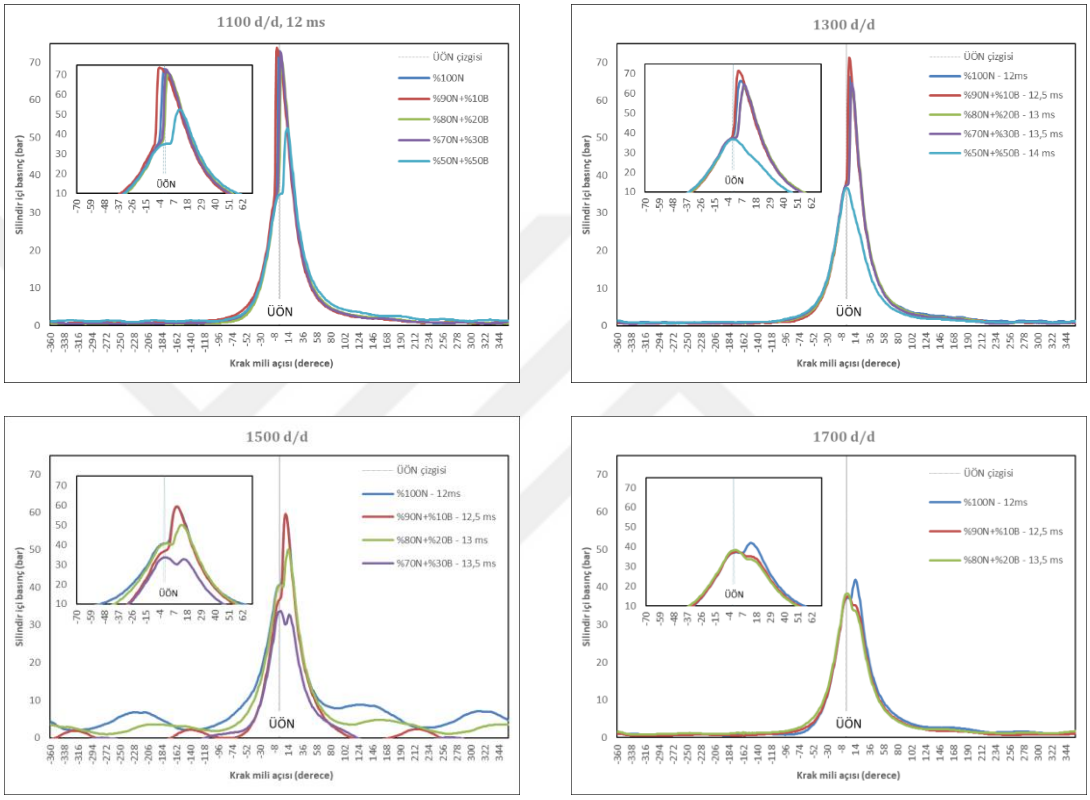
maksimum silindir içi basınç değeri 11 ms enjeksiyon süresinde on üç (13) krank mili açısında 38,17 bar olarak ölçülmüştür. 11 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin, 14 ms enjeksiyon süresinde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %49,32 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile farklı motor hızlarında yapılan deneylerde enjeksiyon sürelerine göre döndürme momenti, efektif güç, ÖYT, HFK ve HC emisyonu değişimleri incelenmiştir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 14 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (13,43 Nm) ve efektif güç (1,55 kW) değerlerinin en yüksek seviyede olduğu, HFK (2,07) ve HC (430 ppm) emisyonu değerlerinin en düşük seviyede olduğu, ÖYT (711 g/kWh) değerinin ise ortalama bir değerde olduğu görülmektedir. 1100 d/d motor hızında farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testler kıyaslandığında, 11 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti (6,88 Nm) ve efektif güç (0,79 kW) değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (2,88), ÖYT (1090,88 g/kWh) ve HC (1061 ppm) emisyonu değerlerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 14 ms enjeksiyon süresinde yapılan testler ile kıyaslandığında, 11 ms enjeksiyon süresinde döndürme momenti ve efektif güçte belirgin bir düşüş görülürken, HFK, ÖYT ve HC emisyonunda ise belirgin bir artış görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında en yüksek silindir içi basıncın 14 ms enjeksiyon süresinde ölçülmesinin, bu şartlarda yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.34'teki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, enjeksiyon süresi azaldıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 5.34'teki 1300 d/d motor hızında yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç eğrilerine bakıldığında, 14 ms ve 14,5 ms enjeksiyon sürelerinde motorun vuruntulu çalıştığı görülmektedir. Bunun sebebinin, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerinin çok yüksek olmasından dolayı aşırı fakir karışımın yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK değerine bakıldığında, yüksek enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (14 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,07) diğer enjeksiyon sürelerine göre düşük olduğu, düşük enjeksiyon sürelerindeki HFK değerlerinin (11 ms enjeksiyon süresindeki HFK değeri 2,71) ise diğer enjeksiyon sürelerine göre yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.34'te verilen 1300 d/d motor hızında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen 1100 d/d ve 1300 d/d motor hızlarında, enjeksiyon süresi artışı ile elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerinin de arttığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamadığı ve test edilebilen enjeksiyon süresi aralığının azaldığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 11 ms ile 14 ms enjeksiyon süresi aralığında motordan veri alınabilmişken, 1300 d/d motor hızında 14 ms ile 15 ms enjeksiyon süresi aralığında motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, 1300 d/d motor hızına göre daha fazla enjeksiyon süresi aralığında veri alınabilmesinin, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.35'te HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı motor hızlarında yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri verilmiştir. Her bir grafikten sabit motor hızında farklı yakıt karışımlarının silindir içi basınca etkisi görülmektedir. 1100 d/d motor hızında tüm karışımlar 12 ms enjeksiyon süresinde test edilebildiğinden her karışımda 12 ms enjeksiyon süresinde ölçülen silindir içi basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Diğer motor hızlarında ise motorun kullanılan yakıt karışımı ile kararlı çalışabildiği şartlarda en yüksek silindir içi basıncın ölçüldüğü enjeksiyon süreleri seçilmiştir.

Şekil 5.35'te HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı motor hızlarında ve farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. 1100 d/d ile 1300 d/d motor hızları arasında tüm karışımların test edilebildiği görülmektedir. 1500 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde, motorun %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile çalışamadığı görülmektedir. 1700 d/d motor hızında yapılan deneyler incelendiğinde ise motorun %50 hafif nafta + %50 benzin ve %70 hafif nafta + %30 benzin karışımları ile çalışamadığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde farklı yakıt karışımları ile yapılan testler kıyaslandığında, en yüksek maksimum silindir içi basınç değerinin %90 hafif nafta + %10 benzin karışımında eksi dört (-4) krank mili açısında 73,87 bar olarak, en düşük maksimum silindir içi basınç değeri %50 hafif nafta + %50 benzin karışımında on iki (12) krank mili açısında 52,54 bar olarak ölçüldüğü görülmektedir. %50 hafif nafta + %50

benzin karışımı ile yapılan deneylerde ölçülen maksimum silindir içi basınç değerinin, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımında ölçülen maksimum silindir içi basınç değerine göre %28,88 oranında azaldığı görülmektedir. Bunun sebebini tespit edebilmek için, 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde farklı yakıt karışımları ile yapılan deneylerde, yakıt karışımına göre döndürme momenti, efektif güç, ÖYT, HFK ve HC emisyonu değişimleri incelenmiştir.




Şekil 5.35 : HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı motor hızlarında yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç grafikleri.

1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde elde edilen veriler, diğer yakıtlar ile yapılan testlerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımında döndürme momenti (9,5 Nm), efektif güç (1,09 kW) ve HC (384 ppm) emisyonu değerlerinin en düşük seviyede olduğu, HFK (2,34) değerinin orta seviyede olduğu, ÖYT (810,56 g/kWh) değerinin ise en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı yapılan testlerde elde edilen veriler, diğer yakıtlar ile yapılan testlerden elde edilen veriler ile kıyaslandığında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımında döndürme momenti (11,93 Nm), efektif güç

(1,37 kW) ve HFK (2,34) değerlerinin en yüksek seviyede olduğu, HC (471 ppm) emisyonu değerinin en yüksek seviyeye yakın bir seviyede olduğu, ÖYT (686,09 g/kWh) değerinin ise en düşük seviyeye yakın olduğu görülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımıyla yapılan testler ile kıyaslandığında, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde döndürme momentinin %25,58 oranında, efektif gücün %25,69 oranında, HFK'nin %2,14 oranında, HC emisyonunun %22,66 oranında yükseldiği, ÖYT'nin ise %15,36 oranında azaldığı görülmektedir. Bu veriler dikkate alındığında, 1100 d/d motor hızında 12 ms enjeksiyon süresinde farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerde en yüksek silindir içi basıncın %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde diğer karışımlara göre yanmanın daha erken krank mili açısında başladığı görülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde diğer karışımlara göre daha yüksek silindir içi basıncın daha erken krank mili açısında meydana gelmesinde, benzinin ısıl değerinin hafif naftaya göre bir miktar yüksek olmasının ve %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı içerisindeki hafif nafta oranının diğer hafif nafta-benzin karışımlarına göre yüksek olması sebebiyle yanmanın diğer karışımlara göre erken başlamasının etkili olduğu düşünülmektedir. Karışım içeriğindeki benzin oranı artışı aynı zamanda karışımın oktan sayısını da arttırmaktadır. Karışım içeriğindeki benzin oranının %10'dan daha fazla olduğu yakıt karışımları ile yapılan testler incelendiğinde, benzin oranı arttıkça maksimum silindir içi basıncın ölçüldüğü krank mili açısı değerinin pozitif yöne kaydığı (yanmanın geciktiği) ve maksimum silindir içi basıncın azaldığı görülmektedir. Bu duruma, benzin oranının %10'dan daha yüksek seviyeye çıkmasıyla karışımların oktan sayılarının, mevcut motor çalışma koşullarında (emme havası sıcaklığı, sıkıştırma oranı, motor hızı vb.) yanmada gecikme oluşturacak boyuta ulaşmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.35'teki 1100 d/d motor hızında yapılan testler incelendiğinde, karışım içeriğindeki benzin oranı arttıkça maksimum silindir içi basıncın meydana geldiği krank mili açısının ÜÖN'den pozitif yönde uzaklaştığı ve değerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 5.35'teki 1500 d/d motor hızında yüksek benzin oranı kullanılarak yapılan testlerden ve 1700 d/d motor hızında yapılan tüm testlerden elde edilen silindir içi basınç eğrilerine bakıldığında, bu şartlarda motorun vuruntulu çalıştığı görülmektedir. Bu durumun, yüksek benzin oranlarının karışımın oktan sayısını arttırması ve karışımdaki benzin oranı artışı ile artan HFK değerinin karışımı daha fakir hale getirmesi ile yanmayı geciktirmesinden kaynaklandığı

düşünülmektedir. %50 hafif nafta + %50 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK (2,39) değerine bakıldığında, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan testlerde ölçülen HFK (2,34) değerine göre yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.35'te verilen 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında yapılan deneylerde elde edilen verilerin de 1100 d/d motor hızındaki verilere benzer şekilde geliştiği görülmektedir. Test edilen tüm motor hızlarında, karışımdaki benzin oranı artışı ile elde edilen en yüksek silindir içi basınç değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, motor hızı artışı ile motorun yüksek benzin içeren karışımlar ile çalışamadığı görülmektedir. 1100 d/d motor hızında %100 hafif nafta ile %50 hafif nafta + %50 benzin karışımları aralığında motordan veri alınabilmişken, 1700 d/d motor hızında %100 hafif nafta ile %80 hafif nafta + %20 benzin karışımları aralığında motordan veri alınabildiği görülmektedir. 1100 d/d motor hızında, 1700 d/d motor hızına göre daha fazla benzin oranı içeren karışımlardan veri alınabilmesinin, motor hızı artışı ile silindire bir çevrimde alınan dolgu miktarındaki azalmadan, yanma için ihtiyaç duyulan sürenin kısalmasından ve bu şartlarda benzin oranı yüksek olan karışımların yüksek oktan sayılarına sahip olması sebebiyle kendi kendine tutuşmanın gerçekleşememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

# BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fosil kökenli yakıtların kullanımı sebebiyle meydana gelen hava kirliliği önemli bir sorun haline gelmiştir. Çevreye olumsuz etkide bulunan fosil yakıt kullanımında içten yanmalı motorların payı oldukça fazladır. Bilim insanları içten yanmalı motorlarda kullanılan fosil yakıtların çevreye zarar veren emisyonlarını azaltmak için yeni yanma teknikleri ve alternatif yakıtlar üzerinde çalışmaktadır. Bu çalışmada, ham petrolün işlenmesi ile elde edilen hafif naftanın alternatif yakıt olarak homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışmada, tek silindirli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu, doğal emişli bir dizel motoru kullanılmıştır. Motor HCCI moduna dönüştürülmeden önce standart dizel yakıtı ile tam ve kısmi yük deneyleri yapılmıştır. Daha sonra motorun emme manifolduna sıvı olarak yakıt püskürten bir enjeksiyon sistemi ilave edilmiştir. Bu sayede motor HCCI modunda çalıştırılmıştır. Motora sonradan ilave edilen enjeksiyon sistemi devreye girdiğinde dizel enjeksiyonu tamamen devre dışı bırakılarak motor HCCI modda çalıştırılabilmektedir. Motorda enjeksiyon süresi dışında (sıkıştırma oranı, emme havası giriş sıcaklık ve basıncı, EGR kullanımı vb.) herhangi bir yapısal değişiklik yapılmamıştır. HCCI modunda %100 hafif nafta, %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta + %20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin, %50 hafif nafta + %50 benzin karışımları ile farklı enjeksiyon sürelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde; fren yükü, motor hızı, egzoz sıcaklığı, kütlesel yakıt tüketim debisi, HC, CO, NO, HFK ve silindir içi basınç değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerden faydalanarak; döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt sarfiyatı değerleri hesaplanmıştır. Enjeksiyon sürelerine, motor hızlarına ve karışım içeriğindeki benzin oranlarına göre döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt sarfiyatı, egzoz sıcaklığı, HC, CO, NO, HFK ve silindir içi basınç değerleri arasındaki farklar incelenmiştir.

%100 hafif nafta kullanılarak yapılan HCCI deneylerinde 1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d ve 1700 d/d motor hızlarında ve 7,5 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süresi aralığında 0,5 ms artımla farklı koşulların motor çalışmasına etkileri incelenmiştir. %100 hafif nafta kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde maksimum döndürme momenti, maksimum efektif güç ve minimum özgül yakıt tüketimi 1500 d/d motor hızında 12,5 ms enjeksiyon süresinde elde edilmiştir. Deney motoru, %100 hafif nafta ile yapılan HCCI deneylerinde 1100 d/d motor hızında 7,5 ms ile 12 ms enjeksiyon süreleri aralığında, 1300 d/d motor hızında 9 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süreleri aralığında, 1500 d/d motor hızında 10 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süreleri aralığında, 1700 d/d motor hızında ise 11,5 ms ile 12,5 ms enjeksiyon süreleri aralığında çalışmıştır. Görüldüğü gibi motor hızı yükseldikçe motor düşük enjeksiyon sürelerinde çalışamamakta ve motorun çalışma aralığı daralmaktadır. Bu durumun, motor hızı yükseldikçe homojen karışımın kendi kendine uygun krank mili açısında tutuşması için gerekli olan sürenin yetersiz kalmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Bilindiği gibi HCCI tekniğinde, yanma odasında homojen bir karışım oluşturmak ve sıkıştırma zamanı sonundaki şartların yanma koşullarına ulaştırılması ile yanmanın homojen karışımın her yerinde aynı anda başlatılması hedeflenmektedir. %100 hafif nafta yakıtı ile farklı motor hızları ve farklı enjeksiyon sürelerinde ölçülen HFK değerlerinin 2,34 ile 3,96 aralığında olduğu görülmektedir. Bu verilerden motorun fakir karışım ile çalıştığı anlaşılmaktadır. Deneylerde kullanılan dizel motorun HCCI modda çalışacak şekilde düzenlendiği belirtilmiştir. Dizel motorun emme manifoldunda silindire hava girişini sınırlandıran herhangi bir mekanizma bulunmamaktadır. HCCI moda dönüşümü sırasında motorun emme manifoldunda herhangi bir değişiklik yapılmadığı için HFK değerlerinin fakir karışımı gösteren değerlerde ölçülmesi beklenen bir sonuçtur. Düşük enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerde motorun yüksek hızlarda çalışamamasının; düşük enjeksiyon sürelerinde ölçülen yüksek HFK oranları nedeniyle aşırı fakir karışımın yanmayı engellemesinden, yüksek motor hızlarında çevrim başına silindire alınan dolgu miktarının azalmasından ve yüksek motor hızlarında yanma süresinin yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

%100 hafif nafta yakıtı ile yapılan HCCI deneylerinde ölçülen egzoz emisyonları öncelikle, tam yükte ve aynı motor hızlarında standart dizel modunda yapılan deneylerde ölçülen veriler ile kıyaslanmıştır. Daha sonra %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneylerden ölçülen emisyon değerleri; %90 hafif nafta + %10 benzin, %80 hafif nafta +

%20 benzin, %70 hafif nafta + %30 benzin ve %50 hafif nafta + %50 benzin karışımları ile kıyaslanarak meydana gelen değişimler incelenmiştir. %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modda yapılan testlerde en yüksek döndürme momenti değerinin ölçüldüğü 1500 d/d motor hızında; %100 dizel yakıtı ile dizel modda ölçülen HC emisyonu değerine göre %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modda ölçülen HC emisyonu değerinin %31,28 oranında azaldığı görülmektedir. HCCI modda HC emisyonunda meydana gelen bu düşüşün, HCCI modda kullanılan yakıtlar ve yanma tekniği ile dizel modda kullanılan yakıt ve yanma tekniğinin tamamen birbirinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kıyaslama yapılan 1500 d/d motor hızı, HCCI çalışması için orta seviyede iken, dizel moddaki çalışma için düşük seviyede kalmaktadır. Ayrıca, 1500 d/d motor hızı için ÖYT değerleri Şekil 5.17'ye bakarak kıyaslandığında, HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testte 636,64 g/kWh ölçülen özgül yakıt tüketiminin, dizel modunda %100 dizel yakıtı ile yapılan testte 807,08 g/kWh olarak ölçüldüğü görülmektedir. Ek olarak, 1500 d/d motor hızı için efektif güç değerleri Şekil 5.16'ya bakarak kıyaslandığında, HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan testte 1,86 kW olarak, dizel modunda %100 dizel yakıtı ile yapılan testte 2,99 kW olarak ölçüldüğü görülmektedir. 1500 d/d motor hızı için incelenen bu değerlerden, dizel modunda motorun daha fazla yakıt tüketimine sahip olduğu ve HCCI moda göre yaklaşık 2 kat fazla güç ürettiği görülmektedir. Bu durumun da 1500 d/d motor hızında HC emisyonlarının dizel modda fazla ölçülmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.21'de verilen CO emisyonu grafikleri incelendiğinde, standart dizel modda %100 dizel yakıtı ile yapılan deneylerde ve %100 hafif nafta yakıtı ile HCCI modda yapılan deneylerde ölçülen CO emisyonu değerlerinin %0,1 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Her iki çalışma koşulunda yakın değerlerde CO emisyonu değeri ölçülmesinin, her iki çalışma modunda ölçülen yüksek HFK değerleri nedeniyle CO emisyonlarının ortamdaki bol oksijenle birleşerek $CO_2$'ye dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. HCCI modda silindirde oluşturulan homojen karışım içerisinde yakıtın dengeli dağıldığı ve yanmanın aynı anda yanma odasındaki tüm karışımda gerçekleştiği bilinmektedir. Bu durum yanma tekniği açısından değerlendirildiğinde, HCCI yanması sürecindeki ısı yayılımının daha dengeli olduğu Şekil 2.4'te görülmektedir. Şekil 2.4'te gösterilen ısı yayılım grafiklerinden, dizel tekniğinde difüzyon yanması aşamasındaki karmaşık yanma süreci ve otto tekniğinde buji kıvılcımı ile başlatılan alev cephesi

ilerlemesinin sebep olduğu kontrolsüz ısı yayılım süreçleri görülmektedir. HCCI modda yanmanın homojen dolgunun her yerinde aynı anda meydana gelmesinden dolayı dizel moda göre daha doğrusal bir ısı yayılımı meydana gelmektedir. Bu durumun HC emisyonunun azalmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.22'deki NO emisyonu grafiğinden 1500 d/d motor hızında, dizel modda %100 dizel yakıtı ile yapılan deneylerle, HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneyler kıyaslandığında, dizel modda NO emisyonu değerinin 127 ppm, HCCI modda NO emisyonu değerinin ise sıfır seviyelerinde ölçüldüğü görülmektedir. Bilindiği gibi NO oluşumunun en önemli sebebi yanma esnasında meydana gelen yüksek sıcaklıklardır. Dizel modunda difüzyon yanma sebebiyle meydana gelen yüksek yanma sıcaklıkları NO oluşumunu arttırmaktadır.

HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneylerin tamamında NO emisyonlarının sıfır seviyelerinde olduğu görülmektedir. HCCI tekniğinde yanmanın düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, HCCI yanma tekniğini dizel yanma tekniğinden ayıran önemli bir özelliktir. Şekil 5.13'te standart dizel mod ve HCCI mod çalışmalarındaki egzoz gazı sıcaklığı değişimini gösteren grafik incelendiğinde, dizel modda %100 dizel yakıtı ile yapılan deneylerde egzoz gazı sıcaklığının ortalama 455,29℃, HCCI modda %100 hafif nafta yakıtı ile yapılan deneylerde egzoz gazı sıcaklığının ortalama 231,43℃ olarak ölçüldüğü görülmektedir. Dizel modda ölçülen ortalama egzoz gazı sıcaklığının, HCCI modda ölçülen ortalama egzoz gazı sıcaklığına göre %96,73 oranında yüksek olduğu görülmektedir. HCCI modda dizel moddaki çalışmaya göre yanma sıcaklıklarının belirgin bir şekilde düşük olması sebebiyle NO emisyonlarının ortadan kalktığı düşünülmektedir.

Şekil 5.15'teki grafikte, HCCI modda %100 hafif nafta ve diğer hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan deneylerde farklı motor hızlarına göre döndürme momentinde meydana gelen değişimler verilmiştir. Tüm karışımlar ile döndürme momenti ölçümü alınabilen 1100 d/d ile 1300 d/d motor hızları arasında genel eğilim olarak, benzin oranının %20'ye kadar olduğu karışımlarda %100 hafif naftaya göre döndürme momentinin arttığı, %20'den daha yüksek oranda benzin içeren karışımlarda ise döndürme momentinin azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer eğilim efektif güç için de geçerlidir. Aynı şekilde, %20'ye kadar benzin içeren karışımlarda ÖYT'nin azaldığı, %20'den daha yüksek oranda benzin içeren karışımlarda ise ÖYT'nin arttığı

gözlemlenmiştir. Bu durum motor performansı açısından değerlendirildiğinde, dizel modundan HCCI moda dönüşüm sırasında motora ilave edilen enjeksiyon sistemi dışında herhangi bir değişiklik yapılmadan dönüştürülen bu motor için en ideal test yakıtının %80 hafif nafta + %20 benzin karışımı olduğu görülmektedir. %90 hafif nafta + %10 benzin karışımı ile yapılan deneylerde, HC ve CO emisyonunun en düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Emisyonlar açısından değerlendirildiğinde, %90 hafif nafta + %10 benzin karışımının HCCI modda en ideal test karışımı olduğu görülmektedir.

HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen verilere göre karışım içeriğindeki benzin oranı arttıkça, test motorunun çalışabildiği maksimum motor hızının azaldığı görülmektedir. Bu durumun; karışım içerisindeki benzin oranının artışı ile karışımın oktan sayısının artmasından dolayı kendi kendine tutuşmanın zorlaşmasından, motor hızı yükseldikçe çevrim başına silindir içerisine alınan dolgu miktarının azalmasından, motor hızı yükseldikçe silindirde bir önceki çevrimden kalan yanmış gaz miktarının artmasından ve yüksek motor hızlarında yanma reaksiyonlarının gelişimi için yeterli zamanın kalmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yapılan testlerden elde edilen silindir içi basınç değişimlerine göre, tüm karışımlarda test edilen farklı enjeksiyon sürelerinin en düşük değerlerinde ve her karışım için motorun çalışabildiği en yüksek motor hızında motorda vuruntu gözlemlenmiştir. Vuruntu gözlemlenen noktalardaki diğer veriler incelendiğinde, döndürme momenti ve efektif güç değerlerinin diğer durumlara oranla belirgin bir şekilde azaldığı, HC, CO ve ÖYT değerlerinin ise yükseldiği görülmektedir. Bu değişimlerin vuruntudan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler dikkate alınarak öneriler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan deneyler, yüksek motor hızlarında motorun daha dar bir enjeksiyon süresi aralığında çalıştığını göstermektedir. Motorun HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile yüksek motor hızlarında daha geniş bir çalışma aralığına sahip olabilmesi için; farklı sıkıştırma oranları, değişken supap zamanlaması ve karışımın yanma sıcaklığına

çıkmasına yardımcı uygulamalar olan EGR ve emme havası sıcaklığını arttırma uygulamalarının kullanılması tavsiye edilmektedir.

HCCI motorlarda kullanmak için alternatif yakıt seçerken; homojen karışım oluşturmaya uygun olan buharlaşma yeteneğine sahip ve düşük sıcaklıklarda kendi kendine tutuşma özelliği olan yakıtların değerlendirilmesi önerilmektedir.

HCCI modda yanma işlemini kolaylaştırmak ve motorun daha geniş bir motor hızı aralığında çalışmasını sağlayabilmek için; yanma odasında homojen karışım oluşumunu ve oluşturulan homojen karışımın kendi kendine tutuşabilmesini kolaylaştıracak şekilde yanma odası ve piston tasarımlarının yapılması tavsiye edilmektedir. Böylece daha homojen bir karışım oluşturularak daha kontrollü bir HCCI yanması elde edilebilecek ve motorun çalışma aralığı ve verimi arttırılabilecektir.

Bu çalışmada yapılan testlerden elde edilen verilere göre, HCCI modda farklı hafif nafta-benzin karışımları ile farklı enjeksiyon sürelerinde yapılan testlerde, her motor hızı için ideal bir enjeksiyon süresinin olduğu tespit edilmiştir. HCCI motor, günlük olarak bir taşıtta veya sabit güç makinesinde kullanılmak istendiğinde, bu çalışmada yapılan testler göz önünde bulundurularak her motor hızı için ideal enjeksiyon süreleri elektronik enjeksiyon sistemine tanımlanabilir ve motor her devirde en verimli enjeksiyon süresinde çalıştırılabilir.

# KAYNAKLAR


[1] Killingsworth, N. J. (2007). HCCI engine control and optimization (Doctoral dissertation, UC San Diego).

[2] https://www.iklimhaber.org/turkiye-sera-gazi-emisyon-istatistiklerine-yakin-bakis/, 02.11.2020.

[3] Calam, A. (2020). Effects of the fusel oil usage in HCCI engine on combustion, performance and emission. Fuel, 262, 116503.

[4] Hunicz, J., Mikulski, M., Geca, M. S., & Rybak, A. (2020). An applicable approach to mitigate pressure rise rate in an HCCI engine with negative valve overlap. Applied Energy, 257, 114018.

[5] Murcak, A. (2012). Farklı yakıt karışımlarının ve çalışma parametrelerinin homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motor performansına etkileri. (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[6] Gemi Dizel Motorları-1 (2006), Mesleki Eğitim ve Öğretiminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), MEB, Ankara.

[7] Challen, B., & Baranescu, R. (Eds.). (1999). Diesel engine reference book. Butterworth-Heinemann Limited.

[8] Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill Education, New York.

[9] Balcı, M., Borat, O., Sürmen, A. (1995). İçten Yanmalı Motorlar Cilt 1, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara.

[10] Anonim (2000), Renault Eğitim Merkezi, Dizel Motorları.

[11] Tanaka, S., Ayala, F., Keck, J. C., & Heywood, J. B. (2003). Two-stage ignition in HCCI combustion and HCCI control by fuels and additives. Combustion and flame, 132(1-2), 219-239.

[12] Gemi Dizel Motorları-2 (2006), Mesleki Eğitim ve Öğretiminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), MEB, Ankara.

[13] Srivastava, A., & Prasad, R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels. Renewable and sustainable energy reviews, 4(2), 111-133.

[14] Haşimoğlu, C. (2005). Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi. (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[15] Motor Çevrimleri ve Yakıtlar (2006), Mesleki Eğitim ve Öğretiminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), MEB, Ankara.

[16] Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E., & Soruşbay, C. (2013). İçten yanmalı motorlar. Birsen Yayınevi. İstanbul.

[17] Öz, İ. H., Borat, O., & Sürmen, A. (2003). İçten yanmalı motorlar. Birsen Yayınevi. İstanbul.

[18] Zhao, H. (2007). HCCI and CAI engines for the automotive industry. Elsevier.

[19] Polat, S. (2015). HCCI (Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli) Bir Motorda Çalışma Parametrelerinin Yanmaya Etkilerinin İncelenmesi. (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[20] Khair, M. K., & Majewski, W. A. (2006). Diesel emissions and their control (Vol. 303). SAE Technical Paper.

[21] Hsu, B. D. (2002). Practical diesel-engine combustion analysis. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

[22] Merker, G. P., Schwarz, C., Stiesch, G., & Otto, F. (2005). Simulating Combustion: Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development. Springer Science & Business Media.

[23] Calam, A. (2018). Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorda sıkıştırma oranının yanma ve performansa etkilerinin incelenmesi. (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[24] Brouzos, N. P. (2007). Experimental Studies of CAI combustion in a Four-stroke GDI Engine with an Air-assisted Injector (Doctoral dissertation, Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses).

[25] 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, 1851-1860.

[26] Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., & Takeuchi, Y. (1979). A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. SAE Transactions, 2816-2828.

[27] Najt, P. M., & Foster, D. E. (1983). Compression-ignited homogeneous charge combustion. SAE Transactions, 964-979.

[28] Thring, R. H. (1989). Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines (No. 892068). SAE Technical paper.

[29] Zhao, H., Ladommatos, N., & Ma, T. (2002). New Generation "Direct Injection Gasoline Engine with Controlled Autoignition,". School of Engineering and Design, Brunel University.

[30] Johansson, B. (2007). Homogeneous charge compression ignition: the future of IC engines. International journal of vehicle design, 44(1-2), 1-19.

[31] Baumgarten, C. (2006). Mixture formation in internal combustion engines. Springer Science & Business Media.

[32] Zhao, F., Asmus, T. N., Assanis, D. N., Dec, J. E., Eng, J. A., & Najt, P. M. (2003). Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines: Key research and development issue. SAE International USA.

[33] Yang, J., Culp, T., & Kenney, T. (2002). Development of a gasoline engine system using HCCI technology—the concept and the test results. SAE Transactions, 1841-1854.

[34] Aceves, S. M., Martinez-Frias, J., Flowers, D. L., & Smith, J. (2000). HCCI Engine Control by Thermal Management. SAE paper 2000-01-2869.

[35] Haraldsson, G., Tunestål, P., Johansson, B., & Hyvönen, J. (2004). HCCI closed-loop combustion control using fast thermal management. SAE Transactions, 599-610.

[36] Hyvönen, J., Haraldsson, G., & Johansson, B. (2004). Balancing cylinder-to-cylinder variations in a multi-cylinder VCR-HCCI engine (No. 2004-01-1897). SAE Technical Paper.

[37] Chiang, C. J., & Stefanopoulou, A. G. (2005, June). Control of thermal ignition in gasoline engines. In Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005. (pp. 3847-3852). IEEE.

[38] Agrell, F., Ångström, H. E., Eriksson, B., Wikander, J., & Linderyd, J. (2003). Integrated simulation and engine test of closed loop HCCI control by aid of variable valve timings. SAE Transactions, 1078-1091.

[39] Souder, J. S. (2005). Closed-loop control of a multi-cylinder HCCI engine. PhD thesis, University of California, Berkeley.

[40] Haraldsson, G., Tunestål, P., Johansson, B., & Hyvönen, J. (2002). HCCI combustion phasing in a multi cylinder engine using variable compression ratio. SAE Transactions, 2654-2663.

[41] Haraldsson, G., Tunestål, P., Johansson, B., & Hyvönen, J. (2003). HCCI combustion phasing with closed-loop combustion control using variable compression ratio in a multi cylinder engine. SAE Transactions, 1233-1245.

[42] Olsson, J. O., Eriandsson, O., & Johansson, B. (2000). Experiments and simulation of a six-cylinder homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. SAE Transactions, 2046-2056.

[43] Olsson, J. O., Tunestål, P., & Johansson, B. (2001). Closed-loop control of an HCCI engine. SAE Transactions, 1076-1085.

[44] Olsson, J. O., Tunestål, P., Johansson, B., Fiveland, S., Agama, R., Willi, M., & Assanis, D. (2002). Compression ratio influence on maximum load of a natural gas fueled HCCI engine. SAE Transactions, 442-458.

[45] Christensen, M., & Johansson, B. (1999). Homogeneous Charge Compression Ignition with Water Injection. SAE Paper, 1999-01-0182.

[46] Can, Ö. (2012). Bir DI dizel motorda etanol ön karışımlı kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[47] Yao, M., Zheng, Z., & Liu, H. (2009). Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. Progress in energy and combustion science, 35(5), 398-437.

[48] Hwang, W., Dec, J., & Sjöberg, M. (2008). Spectroscopic and chemical-kinetic analysis of the phases of HCCI autoignition and combustion for single-and two-stage ignition fuels. Combustion and Flame, 154(3), 387-409.

[49] Stanglmaier, R. H., Li, J., & Matthews, R. D. (1999). The effect of in-cylinder wall wetting location on the HC emissions from SI engines. SAE Transactions, 533-542.

[50] Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J. I., & Sato, Y. (1996). An experimental study on premixed-charge compression ignition gasoline engine (No. 960081). SAE Technical paper.

[51] Ikemoto, M., Kojima, Y., & Iida, N. (2005). Development of the control system using EGR for the HCCI engine running on DME (No. 2005-32-0062). SAE Technical Paper.

[52] Sun, Y., Shuai, S. J., Wang, J. X., & Wang, Y. J. (2003). Numerical simulation of mixture formation and combustion of gasoline engines with multi-stage direct injection compression ignition (DICI) (No. 2003-01-1091). SAE Technical Paper.

[53] Chun-Hua, Z., Jiang-Ru, P., Juan-Juan, T., & Jing, L. I. (2011). Effects of intake temperature and excessive air coefficient on combustion characteristics and emissions of HCCI combustion. Procedia Environmental Sciences, 11, 1119-1127.

[54] Maurya, R. K., & Agarwal, A. K. (2011). Experimental investigation on the effect of intake air temperature and air–fuel ratio on cycle-to-cycle variations of HCCI combustion and performance parameters. Applied Energy, 88(4), 1153-1163.

[55] Zheng, J., Yang, W., Miller, D. L., & Cernansky, N. P. (2002). A skeletal chemical kinetic model for the HCCI combustion process. SAE Transactions, 898-912.

[56] Li, J., Zhao, H., Ladommatos, N., & Ma, T. (2001). Research and development of controlled auto-ignition (CAI) combustion in a 4-stroke multi-cylinder gasoline engine. SAE Transactions, 2114-2122.

[57] Christensen, M., & Johansson, B. (1998). Influence of mixture quality on homogeneous charge compression ignition. SAE Transactions, 951-963.

[58] Pucher, G. R., Gardiner, D. P., Bardon, M. F., & Battista, V. (1996). Alternative combustion systems for piston engines involving homogeneous charge compression ignition concepts-a review of studies using methanol, gasoline and diesel fuel. SAE Transactions, 2025-2035.

[59] Standing, R., Kalian, N., Ma, T., Zhao, H., Wirth, M., & Schamel, A. (2005). Effects of injection timing and valve timings on CAI operation in a multi-cylinder DI gasoline engine (No. 2005-01-0132). SAE Technical Paper.

[60] Shi, L., Cui, Y., Deng, K., Peng, H., & Chen, Y. (2006). Study of low emission homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR). Energy, 31(14), 2665-2676.

[61] Law, D., Allen, J., & Chen, R. (2002). On the mechanism of controlled auto ignition. SAE Transactions, 889-897.

[62] Zhao, H., Peng, Z., Williams, J., & Ladommatos, N. (2001). Understanding the effects of recycled burnt gases on the controlled autoignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines. SAE Transactions, 2100-2113.

[63] Dec, J. E. (2002). A computational study of the effects of low fuel loading and EGR on heat release rates and combustion limits in HCCI engines (No. 2002-01-1309). SAE Technical Paper.

[64] Groenendijk, A., & Müller, E. (2004). Mixture formation and combustion control for low emission DI diesel combustion with HCCI characteristics. In Thermo and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2 (pp. 383-401). Springer, Berlin, Heidelberg.

[65] Ishibashi, Y., & Asai, M. (1996). Improving the exhaust emissions of two-stroke engines by applying the activated radical combustion. SAE Transactions, 982-992.

[66] Cairns, A., & Blaxill, H. (2005). The effects of combined internal and external exhaust gas recirculation on gasoline controlled auto-ignition (No. 2005-01-0133). SAE Technical Paper.

[67] Lü, X. C., Chen, W., Hou, Y. C., & Huang, Z. (2005). Study on the ignition, combustion and emissions of HCCI combustion engines fueled with primary reference fuels (No. 2005-01-0155). SAE Technical Paper.

[68] Xu, F., Wang, Z., Yang, D., & Wang, J. (2009). Potential of high load extension for gasoline HCCI engine using boosting and exhaust gas recirculation. Energy & Fuels, 23(5), 2444-2452.

[69] Machrafi, H., & Cavadias, S. (2008). Three-stage autoignition of gasoline in an HCCI engine: An experimental and chemical kinetic modeling investigation. Combustion and Flame, 155(4), 557-570.

[70] Duret, P., Dabadie, J. C., Lavy, J., Allen, J., Blundell, D., Oscarsson, J., ... & Cunningham, G. (2000). The air assisted direct injection ELEVATE automotive engine combustion system. SAE Transactions, 1771-1782.

[71] Maurya, R. K., & Agarwal, A. K. (2011). Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine. Applied Energy, 88(4), 1169-1180.

[72] Yang, J., & Kenney, T. (2002). Some concepts of DISI engine for high fuel efficiency and low emissions. SAE Transactions, 1467-1476.

[73] Velji, A., Günthner, M., & Spicher, U. (2003). Direkteinspritzung im Ottomotor mit Fremd-und Kompressionszündung-Brennverfahren der Zukunft. Direkteinspritzung im Ottomotor IV: Forschungsergebnisse und aktueller Entwicklungsstand bei der Benzin-Direkteinspritzung, 4, 1.

[74] Pedersen, T. D., & Schramm, J. (2007). A study on the effects of compression ratio, engine speed and equivalence ratio on HCCI combustion of DME (No. 2007-01-1860). SAE Technical Paper.

[75] Aceves, S. M., Smith, J. R., Westbrook, C. and Pitz, W. (1998). Compression ratio effect on methane HCCI combustion. The American Society of Mechanical Engineers Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 121(3), 569-574.

[76] Machrafi, H., & Cavadiasa, S. (2008). An experimental and numerical analysis of the influence of the inlet temperature, equivalence ratio and compression ratio on the HCCI auto-ignition process of Primary Reference Fuels in an engine. Fuel Processing Technology, 89 (11), 1218-1226.

[77] Dec, J. E. (2009). Advanced compression-ignition engines understanding the in-cylinder processes. Proceedings of the Combustion Institute, 32(2), 2727-2742.

[78] Jacobs, T. J., & Assanis, D. N. (2007). The attainment of premixed compression ignition low-temperature combustion in a compression ignition direct injection engine. Proceedings of the Combustion Institute, 31(2), 2913-2920.

[79] Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., & Aiyoshizawa, E. (2001). Ultra-clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards. SAE Transactions, 239-246.

[80] Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., & Ma, T. (2001). Experimental studies on controlled auto-ignition (CAI) combustion of gasoline in a 4-stroke engine. SAE Transactions, 1062-1075.

[81] Peng, Z., Zhao, H., & Ladommatos, N. (2003). Effects of air/fuel ratios and EGR rates on HCCI combustion of n-heptane, a diesel type fuel (No. 2003-01-0747). SAE Technical Paper.

[82] Dickey, D. W., Roberts, C. E., & Stanglmaier, R. H. (1999). Simultaneous reduction of diesel engine $NO_x$ and fuel consumption using homogeneous combustion. Japanese Society of Automotive Engineers (JSAE) Paper, (9933646).

[83] https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/f0aab058ce179e4_ek.pdf, 01.04.2021.

[84] Stanglmaier, R. H., & Roberts, C. E. (1999). Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, compromises, and future engine applications. SAE Transactions, 2138-2145.

[85] Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R., & Dec, J. E. (2002). The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions (No. 2002-01-1923). SAE Technical Paper.

[86] Fuerhapter, A., Piock, W. F., & Fraidl, G. K. (2003). CSI - Controlled Auto Ignition - the best solution for the fuel consumption - versus emission trade-off. SAE transactions, 1142-1151.

[87] Harada, A., Shimazaki, N., Sasaki, S., Miyamoto, T., Akagawa, H., & Tsujimura, K. (1998). The effects of mixture formation on premixed lean diesel combustion engine (No. 980533). SAE Technical Paper.

[88] Noh, H. K., & No, S. Y. (2017). Effect of bioethanol on combustion and emissions in advanced CI engines: HCCI, PPC and GCI mode–A review. Applied energy, 208, 782-802.

[89] Alkidas, A. C. (2007). Combustion advancements in gasoline engines. Energy Conversion and Management, 48(11), 2751-2761.

[90] Musculus, M. P., Miles, P. C., & Pickett, L. M. (2013). Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion. Progress in energy and combustion science, 39(2-3), 246-283.

[91] Komninos, N. P., & Rakopoulos, C. D. (2012). Modeling HCCI combustion of biofuels: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(3), 1588-1610.

[92] Lu, X., Han, D., & Huang, Z. (2011). Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes. Progress in Energy and Combustion Science, 37(6), 741-783.

[93] 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.

[94] Starck, L., Lecointe, B., Forti, L., & Jeuland, N. (2010). Impact of fuel characteristics on HCCI combustion: Performances and emissions. Fuel, 89(10), 3069-3077.

[95] Bendu, H., & Murugan, S. (2014). Homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion: Mixture preparation and control strategies in diesel engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 732-746.

[96] Imtenan, S., Varman, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Sajjad, H., Arbab, M. I., & Fattah, I. R. (2014). Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: a review. Energy Conversion and Management, 80, 329-356.

[97] Boot, M. (2016). Biofuels from lignocellulosic biomass: innovations beyond bioethanol. John Wiley & Sons.

[98] Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2016). Homogeneous charge compression ignition combustion: Advantages over compression ignition combustion, challenges and solutions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 282-291.

[99] Hansen, A. C., Zhang, Q., & Lyne, P. W. (2005). Ethanol–diesel fuel blends—a review. Bioresource Technology, 96(3), 277-285.

[100] Marriott, C. D., Kong, S. C., & Reitz, R. D. (2002). Investigation of hydrocarbon emissions from a direct injection-gasoline premixed charge compression ignited engine. SAE Transactions, 875-888.

[101] Hiraya, K., Hasegawa, K., Urushihara, T., Iiyama, A., & Itoh, T. (2002). A study on gasoline fueled compression ignition engine. A trial of operation region expansion. SAE Transactions, 854-862.

[102] Machrafi, H., Cavadias, S., & Amouroux, J. (2008). A parametric study on the emissions from an HCCI alternative combustion engine resulting from the auto-ignition of primary reference fuels. Applied Energy, 85(8), 755-764.

[103] García, M. T., Aguilar, F. J. J. E., & Lencero, T. S. (2009). Experimental study of the performances of a modified diesel engine operating in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion mode versus the original diesel combustion mode. Energy, 34(2), 159-171.

[104] Canakci, M., Sayin, C., & Ozsezen, N. (2003). A methodology for a HCCI-Gasoline engine design using the parameters of double injection and intake air temperature. Gazi University Journal of Science, 16(4), 811-824.

[105] Canakci, M. (2008). An experimental study for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of a DI-HCCI gasoline engine. Fuel, 87(8-9), 1503-1514.

[106] Chen, R., & Milovanovic, N. (2002). A computational study into the effect of exhaust gas recycling on homogeneous charge compression ignition combustion in internal combustion engines fuelled with methane. International Journal of Thermal Sciences, 41(9), 805-813.

[107] Ma, J., Lü, X., Ji, L., & Huang, Z. (2008). An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel. International Journal of Thermal Sciences, 47(9), 1235-1242.

[108] Lü, X., Ji, L., Hou, Y., Zu, L., & Huang, Z. (2008). Inhibition effect of doping methyl tert-butyl ether compounds to n-heptane on homogenous charge compression ignition combustion. Energy Conversion and Management, 49(6), 1705-1714.

[109] Lü, X., Ji, L., Zu, L., Hou, Y., Huang, C., & Huang, Z. (2007). Experimental study and chemical analysis of n-heptane homogeneous charge compression ignition combustion with port injection of reaction inhibitors. Combustion and flame, 149(3), 261-270.

[110] Christensen, M., Johansson, B., & Einewall, P. (1997). Homogeneous charge compression ignition (HCCI) using isooctane, ethanol and natural gas-a comparison with spark ignition operation. SAE Transactions, 1104-1114.

[111] Sjöberg, M., & Dec, J. E. (2005). An investigation into lowest acceptable combustion temperatures for hydrocarbon fuels in HCCI engines. Proceedings of the Combustion Institute, 30(2), 2719-2726.

[112] Çelebi, S., Haşimoğlu, C., Uyumaz, A., Halis, S., Calam, A., Solmaz, H., & Yılmaz, E. (2021). Operating range, combustion, performance and emissions of an HCCI engine fueled with naphtha. Fuel, 283, 118828.

[113] Duzcan, B. (2017). Etanol-Dizel yakıt karışımlarının kısmi homojen dolgulu bir dizel motorun performansına etkisi. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[114] www.collectioncare.org/MSDS/naphthamsds.pdf, 01.04.2021.

[115] www.echa.Eurepa.eu/substance-information//substanceinfo/100.059.115, erişim tarihi: 01.04.2021.

[116] www.cargohandbook.com/Naphtha, 01.04.2021.

[117] www.sihirlifasulyeler.com/bilim/petrol-nasıl-ayrıştırılır_benzin-dizel-lpg-asfalt-üretimi, 01.04.2021.

[118] web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/ibrahimbilici@hititedutr080420162L9W1G2I.pdf, 01.04.2021.

[119] Anh, T. L., Duy, V. N., Thi, H. K., & Xa, H. N. (2018). Experimental investigation on establishing the HCCI process fueled by N-heptane in a direct injection diesel engine at different compression ratios. Sustainability, 10(11), 3878.