

**ÖN KARIŞIMLI MTBE DOLGUSUNUN HCCI-Dİ MOTORDA
PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Nuri AKCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Nuri AKCAN tarafından hazırlanan “ÖN KARIŞIMLI MTBE DOLGUSUNUN HCCI-DI MOTORDA PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Can ÇINAR

.....

Tez Danışmanı, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU

.....

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Can ÇINAR

.....

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Nureddin DİNLER

.....

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 16/07/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nuri AKCAN

**ÖN KARIŞIMLI MTBE DOLGUSUNUN HCCI-DI MOTORDA
PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Nuri AKCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2013**

ÖZET

Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, HCCI-DI dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda ön karışimli metil tersiyer bütül eter (MTBE) dolgusunun motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, motorun maksimum moment devri olan 2200 d/d'da tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) çalışma koşullarında yapılmıştır. Ön karışimli MTBE yakıtı düşük basınçlı bir enjeksiyon sistemi ile motorun emme manifolduna püskürtülmüş ve programlanabilir bir elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmiştir. Deneylerde motorun klasik dizel çalışma şartlarında verdiği moment % 10 - 50 arasında, % 10 aralıklarla azaltılmış, aynı moment değeri emme manifolduna püskürtülen MTBE yakıtı ile tamamlanmıştır. Deneylerde her bir ön karışimli MTBE oranı için özgül yakıt tüketimi, termik verim ve egzoz emisyonlarının (THC, CO, NO_x ve duman) değişimi incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, özgül yakıt tüketimi tam yük çalışma şartlarında % 10 ön karışimli MTBE oranında azalmış bu oranın üzerinde belirgin bir değişim göstermemiştir. Yarım yük çalışma şartlarında ise ön karışimli MTBE oranına bağlı olarak sürekli bir artış göstermektedir. Termik verim, tam yükte % 27,16 artmış, yarım yükte ise önce bir azalma ve ardından daha yatay bir seyir göstermiştir. Ön karışimli MTBE oranındaki artışa bağlı olarak HC emisyonları tam yükte % 53,5 artmış, yarım yükte ise sürekli bir eğim ile

% 243,97 artış ile göstermiştir. CO emisyonları, tam yük deneylerinde % 20 ön karışımli yakıt oranına kadar artarken bu oranin üzerinde azalma göstermiştir. Yarım yükte ise CO emisyonları sürekli bir artış eğilimi göstermiştir. Tam yük çalışma şartlarında NO_x emisyonlarında % 55,56'lık bir artış meydana gelirken, yarım yük çalışma şartlarında önemli bir değişim görülmemiştir. Kısmi HCCI çalışmasında her iki motor yükünde de ön karışımli MTBE oranına bağılı olarak duman emisyonlarının azaldığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 708.3.026
Anahtar Kelimeler : Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme, MTBE, Motor performansı, Egzoz emisyonları
Sayfa Adedi : 65
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Can ÇINAR

**THE INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF PREMIXED
MTBE CHARGE ON HCCI-DI ENGINE PERFORMANCE AND
EXHAUST EMISSIONS**

(M.Sc. Thesis)

Nuri AKCAN

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

July 2013

ABSTRACT

In this study, the effects of premixed methyl tert-butyl ether (MTBE) charge on the engine performance and exhaust emissions were experimentally investigated in a single-cylinder, four stroke, HCCI-DI diesel engine. The experiments were conducted at the maximum torque speed of 2200 rpm under full load (16 Nm) and half load (8 Nm) operating conditions. Premixed MTBE fuel was injected into the intake manifold of the engine with a low-pressure injection system and controlled by a programmable electronic control unit. In the experiments, the maximum torque that the engine gives under conventional diesel operation was decreased between 10 % - 50 % at an interval of 10%. Same torque value was obtained with MTBE fuel injection. In the experiments, the variations of specific fuel consumption, thermal efficiency and exhaust emissions (THC, CO, NO_x and soot) were investigated for each premixed MTBE ratio. As a result of the experimental studies, the specific fuel consumption (SFC) decreased up to 10 % premixed MTBE ratio and no significant change was observed with the increase of premixed MTBE ratio at full load. At half load, the SFC was showed a continuous increase with the increase of premixed MTBE ratio. At full load, thermal efficiency increased by 27,16 %, at half load, firstly decreased and then showed a horizontal process. Depending on the increase of premixed MTBE

ratio, HC emissions increased by 53,5 % at full load and showed a continuous slope up to 243,97 % increase at half-load. At full load tests, CO emissions increased up to 20 % premixed MTBE ratio and then decreased. CO emissions increased continuously at half load. NO_x emissions increased by 55,56 % at full load. No significant change was observed at half load operating conditions. It was seen that soot emissions decreased at partial HCCI operation depending on premixed MTBE charge at each engine load.

Science Code : 708.3.026

**Key Words : Homogeneous charge compression ignition, MTBE,
Engine performance, Exhaust emissions**

Page Number : 65

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Can ÇINAR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenciliğim süresince yönlendiriciliği, yol göstericiliği ve güveniyle bana daima destek olan ve çalışmalarımı yüksek teşvik, yardım ve bilgisi ışığında yürüttüğüm ve her zaman anlayışla karşılayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Can ÇINAR'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU'ya, ayrıca deneyler aşamasında yardımcı olan hocam Yrd. Doç. Dr. Özer CAN'a ve manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Mine Pilevne AKCAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ MOTORLAR	4
2.1. HCCI Motorların Tarihçesi.....	5
2.2. HCCI Motorların Avantajları.....	7
2.3. HCCI Motorların Dezavantajları.....	7
2.4. HCCI Kontrol Metotları ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi	8
2.5. Yanma Karakteristiği	9
2.6. Emisyon Karakteristikleri	11
2.7. Karışım Şekli.....	12
2.8. Kullanılan Alternatif Yakıtlar ve Katkı Maddeleri	13
3. LİTERATÜR ÖZETLERİ	17
4. MATERYAL VE METOT	34
4.1. Deney Motoru	35

4.2. Deney Düzeneği	36
4.3. Egzoz Emisyon Cihazı	38
4.4. Duman Ölçümü	39
4.5. Terazı ve Kronometre	40
4.6. Sıcaklık Ölçüm Cihazı	41
4.7. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar	41
4.8. Deneylerin Yapılışı	42
4.9. Motor Performans Parametrelerinin Hesaplanması	42
4.9.1. Motor momenti	42
4.9.2. Efektif güç	43
4.9.3. MTBE yakıt tüketimi	43
4.9.4. Özgöl yakıt tüketimi.....	44
4.9.5. Termik verim.....	45
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
5.1. Özgöl Yakıt Tüketimi	47
5.2. Termik Verim.....	48
5.3. HC Emisyonları.....	49
5.4. CO Emisyonları.....	51
5.5. NO _x Emisyonları	52
5.6. Duman Emisyonları	53
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. HCCI motorların geleceği.....	7
Çizelge 2.2. Homojen yakıt/hava karışım teşkili yöntemleri.....	13
Çizelge 2.3. Katkısız alternatif yakıtların bazı özellikleri.....	15
Çizelge 4.1. HCCI-DI dönüşümü yapılan motorun teknik özellikleri.	35
Çizelge 4.2. EGAS 2M egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri	39
Çizelge 4.3. AVL DiSmoke 4000 cihazının teknik özellikleri	39
Çizelge 4.4. No.2 dizel yakıtı ve MTBE'nin çeşitli özellikleri.....	41

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sıkıştırma ile ateşlemeli, buji ile ateşlemeli ve HCCI motorlarda yanma..	4
Şekil 2.2. HCCI yanma sürecinde kullanılan kontrol metotları.....	9
Şekil 2.3. Yanma aşamalarının gelişimi.....	10
Şekil 2.4. MTBE'nin moleküler ve yapısal formülü.	16
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	34
Şekil 5.1. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi. .	48
Şekil 5.2. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak termik verim değişimi.....	49
Şekil 5.3. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi....	50
Şekil 5.4. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak CO emisyonlarının değişimi....	52
Şekil 5.5. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak NO _x emisyonlarının değişimi...	53
Şekil 5.6. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak duman emisyonlarının değişimi.	54

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Saturn Aura konsept otomobil.	6
Resim 4.1. Deney düzeneği.....	34
Resim 4.2. HCCI dönüşümü yapılan deney motoru.	35
Resim 4.3. Emme manifoldu ve port tipi yakıt enjeksiyon sistemi.	36
Resim 4.4. DC elektrikli dinamometre.	37
Resim 4.5. Kontrol paneli.	37
Resim 4.6. EGAS 2M egzoz gaz analiz cihazı	38
Resim 4.7. AVL DiSmoke 4000 model duman ölçer	39
Resim 4.8. Ohaus GT 8000 marka dijital terazi ve yakıt kabı.	40
Resim 4.9. Robic SC 700 marka kronometre.....	40
Resim 4.10. Çok kanallı sıcaklık göstergesi.	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
F	Kuvvet (N)
H_u	Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)
l	Moment kol uzunluğu (m)
M	Moment (Nm)
n	Motor devri (d/d)
$\dot{OYT}$	Özgöl yakıt tüketimi (g/kWh)
P	Basınç (kPa)
P_e	Efektif güç (kW)
t_{inj}	Enjektörün açık kalma süresi (ms)
T	Sıcaklık (K)
η_t	Termik Verim (%)

Kısaltmalar**Açıklama****AÖN**

Alt Ölü Nokta

ATAC

Aktif Termo Atmosferik Yanma

CCS

Kombine Yanma Sistemi

CNG

Sıkıştırılmış Doğal Gaz

CO

Karbonmonoksit

CO₂

Karbondioksit

COV_{imep}

IMEP Değerleri İçin Varyans Değişim Katsayısı

DEE

Dietil Eter

DI

Direkt Enjeksiyon

DME

Dimetil Eter

DMM

Dimetoksi Metan

DTBP

Di-tertiary Butil Peroksit

EGR

Egzoz Gazı Resirkülasyonu

HCCI

Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşleme

HC

Hidrokarbon

HiMICSHomojen Dolgulu Akıllı Kademeli
Enjeksiyonlu Yanma Sistemi**IMEP**

İndike Ortalama Efektif Basınç

KMA

Krank Mili Açısı

LPG

Sıvılaştırılmış Petrol Gazı

MTBE

Metil Tersiyer Bütil Eter

NO_x

Azotoksit

PCCI

Ön Karışım Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli

PM

Partikül Madde

PREDIC

Fakir Ön Karışımlı Dizel Yanması

SCCI

Kademeli Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli

TS

Toyota Soken

TY

Tam Yük

ÜÖN

Üst Ölü Nokta

50Y

Yarım Yük

1. GİRİŞ

Sıkıştırma ile ateşlemeli ve buji ile ateşlemeli motorlar, çalışma prensipleri bakımından birbirinden oldukça farklıdır ve kendilerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Dizel motorlar, yüksek sıkıştırma oranı ve emme zamanında silindir içerisine alınan dolguda herhangi bir kısılma olmaması sayesinde yüksek termik verime sahiptir. Buji ile ateşlemeli motorlar ise vuruşu nedeniyle sıkıştırma oranının çok fazla artırılmaması ve farklı motor yüklerinde emme dolgusunun kısılarak kontrol edilmesi sonucunda termik verimleri daha düşüktür. Bunun yanında her iki motordan kaynaklanan hava kirliliği büyük şehirlerde ciddi bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle karbondioksit (CO_2) salınımına bağlı olarak yaşanan küresel ısınma ve iklim değişiklikleri ile dünya petrol rezervlerinin sınırlı olması otomobil üreticileri üzerindeki baskıyı her geçen gün arttırmakta, daha verimli ve emisyon bakımından daha temiz motorların üretilmesini zorunlu kılmaktadır [1-3].

İçten yanmalı motorlarda egzoz emisyonlarının ve yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla birçok çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların başında, alternatif yakıtlar, malzeme, emisyon kontrol sistemleri, elektronik kontrol sistemleri, yanma ve yakıt püskürtme sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar gelmektedir. Bunların yanında içten yanmalı motorlara alternatif olabilecek yakıt hücreleri, hibrit ve elektrikli taşıtlar üzerinde yapılan çalışmalar da özellikle son yıllarda büyük önem kazanmıştır [4,5].

Bu çalışmalardan biri de, homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme (HCCI) olarak adlandırılan, günümüz dizel motorlarına yakın yüksek verimlilikleri ile NO_x ve PM emisyonlarında önemli ve eş zamanlı azaltma potansiyeline sahip olan alternatif bir yanma teknolojisidir. HCCI yanma teknolojisi, bu yüksek verimli çalışma ile birlikte pahalı ve karmaşık emisyon kontrol sistemlerine ihtiyaç duymadan günümüz ve geleceğin emisyon gereksinimlerini karşılama potansiyeline sahiptir [6].

HCCI yanma, adından da anlaşıldığı üzere homojen yakıt/hava karışımının sıkıştırma sonrası buji kıvılcımına gereksinim duymadan kendi kendine tutuşması esasına dayanmaktadır. Böylece HCCI motorlar karışımın önceden hazırlanması yönüyle buji ile ateşlemeli motorlara, yanmanın başlaması için karışımın kendiliğinden tutuşması yönüyle de dizel motorlarına benzemektedir. HCCI yanması, buji ateşlemeli ve dizel motorlarının en iyi özelliklerini bir araya getirmektedir. Bu nedenle HCCI yanması özellikle son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışılan bir konu haline gelmiştir. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar HCCI teknolojisinin, dizel motorlarındaki gibi yüksek termik verim ve düşük emisyon standartlarını sağlanmasının mümkün olabileceğini göstermektedir [4,5].

Dizel motorlarında reaksiyon oranı difüzyon yanmayla, buji ile ateşlemeli motorlarda ise alev cephesinin ilerlemesiyle kontrol edilmektedir. HCCI motorlarda yanma reaksiyonları buji ile başlatılmadığı için aşırı derecede fakir karışımlar da yakılabilmektedir. Buji ile ateşlemeli motorlar ile karşılaştırıldığında, HCCI yanma işleminde karışımın sadece küçük bir miktarı alevin önünde bulunmakta ve homojen dolgu eş zamanlı olarak yanma işlemine katılmaktadır [4,7].

Klasik dizel yanmasından farklı olarak HCCI yanma bir alev cephesinin ilerleyişi şeklinde gerçekleşmez. Yanma, sıkıştırma hacminin her tarafındaki birçok noktada kendi kendine tutuşmanın sonucu olarak meydana gelir. HCCI yanmanın bu özelliği çok fakir veya seyreltik karışımların yanmasına imkân verir ve düşük yanma sıcaklıklarının sonucu olarak NO_x emisyonları azalır. Aynı zamanda klasik dizel yanmasından farklı olarak homojen dolgu sebebiyle PM emisyonları da azalmaktadır [5].

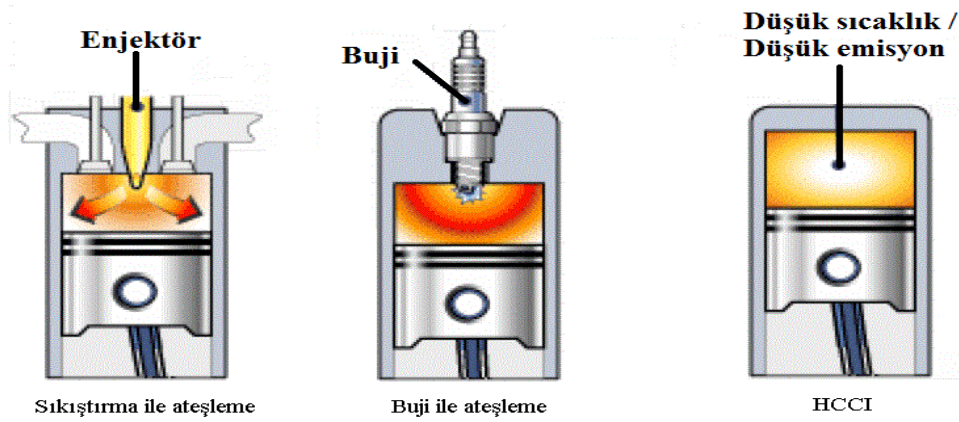
HCCI yanma işleminde, silindir içerisine alınan homojen karışımın piston ile sıkıştırılması suretiyle ÜÖN civarlarında kendi kendine tutuşması sağlandığı için buji ile ateşlemeli motorlardaki kıvılcım ve dizel motorlardaki yakıt püskürtme zamanlaması gibi yanma başlangıcını doğrudan kontrol edebilecek mekanizmalar yoktur. Bu sebeple, motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında HCCI yanmanın sağlanması, yanma başlangıcı ve ısı açığa çıkış hızının kontrolü üzerinde çalışılan

konular arasındadır. HCCI motorların yüksek motor yüklerindeki çalışma şartları ve ilk hareket zorluğu ile HC ve CO emisyonlarındaki artışlar çözülmesi gereken diğer konuların başında gelmektedir [5].

Bu çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, HCCI-DI dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda ön karışimli metil tersiyer bütül eter (MTBE) dolgusunun performans ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde motorun klasik dizel çalışma şartlarında verdiği moment % 10 - 50 oranında % 10 aralıklarla azaltılacak, aynı moment değeri emme manifolduna püskürtülen MTBE yakıtı ile tamamlanmıştır. Ön karışimli MTBE miktarı motorun vuruntu seviyesi ile sınırlandırılmıştır. Deneylerde her bir ön karışimli yakıt oranı için özgül yakıt tüketimi, termik verim ve egzoz emisyonlarının (THC, CO, NO_x ve duman) değişimi incelenmiştir.

2. HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ MOTORLAR

HCCI, buji ile ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorların en iyi özelliklerine sahip, homojen şekilde karıştırılmış yakıt ve havanın kendiliğinden tutuşma noktasına kadar sıkıştırıldığı bir yanma şeklidir. HCCI motorda yakıt ile hava buji ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi karıştırılmakta fakat buji ile ateşlemenin yerine sıkıştırma esnasında karışımın basınç ve sıcaklığı kendiliğinden tutuşacak noktaya kadar yükseltilerek tutuşma olayı dizel motorlarında olduğu gibi kendiliğinden gerçekleşmektedir (Şekil 2.1). HCCI motorlarda karışım genellikle çok fakir ve oldukça seyreltilmiş olduğundan, maksimum basınç ve sıcaklık buji ile ateşlemeli motorlara kıyasla daha düşük olmaktadır. Bunun sonucu olarak, HCCI motorlar çok düşük azotoksit (NO_x) emisyonları, yüksek verim ve ihmal edilebilir seviyelerde partikül madde emisyonlarına sahip olmaktadır [3].



Şekil 2.1. Sıkıştırma ile ateşlemeli, buji ile ateşlemeli ve HCCI motorlarda yanma [8]

Buji ile ateşlemeli veya klasik dizel motor üzerinde değişikliklerle HCCI yanma sistemine dönüşüm yapılabilmektedir. Her iki durumda da yanma, fakir ve homojen hava/yakıt karışımının kendi kendine tutuşması ile başlamaktadır. Klasik buji ile ateşlemeli bir motorda kendi kendine tutuşmayı sağlayabilmek için sıkıştırma oranı artırılmakta, motor yükü ise hava/yakıt oranı değişimi ile kontrol edilmektedir. Kısmi motor yüklerinde, gaz keleşği olmaksızın silindir içine alınan dolguda herhangi bir kısılma meydana gelmeden ve homojen dolgulu olarak oldukça fakir

karışımlarda çalışabilmektedir. Bu yeni yanma şekli ile herhangi bir özel yakıtla bağımlı olmadan, dizel ve benzin yakıtlarının yanında biyodizel, etanol, metanol, doğal gaz ve dimetil eter (DME) gibi çok çeşitli alternatif yakıtlar kullanılabilmektedir [9-16].

2.1. HCCI Motorların Tarihçesi

HCCI yanma şekli ile ilgili ilk çalışmalar 1979 yılında Onishi ve ark. [17] tarafından, iki zamanlı motorların yanma kararlılığını artırma çalışması ile başlamıştır. “Aktif Termo Atmosferik Yanma” (ATAC) olarak da adlandırılan bu sistem ile iki zamanlı motorlarda silindir içerisinde kalan yüksek oranda egzoz gazı ve yüksek sıcaklıktan faydalanarak, yakıt/hava karışımının kendiliğinden ateşlenmesini sağlayan koşullar oluşturulduğunda, yakıt ekonomisinde iyileştirmeler ve emisyonlarda önemli azalmalar elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır.

1979 yılında Noguchi ve ark. [18] tarafından “Toyota Soken” (TS) yanma prosesi olarak adlandırılan çalışmada, karşıt pistonlu, iki zamanlı bir motorda HCCI yanmasının analizi gerçekleştirilmiştir. Kısmi yük koşullarında HCCI yanması ile olumlu sonuçlar elde edilmiş, motor HCCI modunda çalıştırıldığında yanma hızı artmış, yanma daha kararlı hale gelmiş, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarında azalmalar olmuştur.

İki zamanlı motorlarda yapılan bu çalışmalara dayanarak, 1983 yılında Najt ve Foster [19], tarafından dört zamanlı bir motora emme havası ısıtma düzeneği adapte edilerek “Sıkıştırma ile Ateşlemeli Homojen Dolgulu” (CIHC) yanma olarak adlandırılan kendiliğinden tutuşma sağlanmıştır. Çalışmada, karışımın kendiliğinden tutuşması emme havası ısıtılarak, ısı açığa çıkışı ise egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ile kontrol edilmiştir.

1989 yılında, Thring [20], dört zamanlı benzinli bir motor üzerine yaptığı çalışma ile EGR ve hava/yakıt oranının HCCI motor performansına etkilerini incelemiştir.

Thring ayrıca, çalışma aralığının kısmi yük ile sınırlandığını ve kendiliğinden ateşleme zamanlamasının kontrolünün önemli bir sorun olduğunu ortaya koymuştur.

1992 yılında ilk defa standart seri üretim bir motor (1,6 litrelik VW motoru) HCCI yanma prosesini test etmek amacıyla emme havasına ön ısıtma düzeneği eklenerek HCCI motora dönüştürülmüştür. Kısmi yük çalışma şartlarında motor verimi % 14'den % 34'e yükselmiştir [21].

2007 yılında General Motors firması, Resim 2.1'de görülen Saturn Aura konsept otomobilinde HCCI motor kullanmıştır. HCCI modunda çalışabilen bu motor, soğukta ilk harekette, yüksek hız ve yüksek motor yüklerinde buji ile ateşlemeli bir motor olarak çalışmaktadır [22].



Resim 2.1. Saturn Aura konsept otomobil [22]

Otomotiv endüstrisinde yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının azaltılması çabaları, HCCI yanma şekline olan ilgiyi arttırmıştır. HCCI yanma, günümüzde içten yanmalı motorlar üzerinde en çok çalışılan konuların başında gelmektedir. Çizelge 2.1'de çeşitli otomotiv firmaları tarafından HCCI motorlu araçların ticari olarak üretimine yönelik çalışmalar görülmektedir.

Çizelge 2.1. HCCI motorların geleceği [23]

Firma	Model	Teknoloji	Tahmini Ticarileştirme Yılı
General Motors	Saturn Aura	Kısmi HCCI	Araç test aşamasında
General Motors	Opel Vectra	Kısmi HCCI	Araç test aşamasında
Mercedes-Benz	F 700	Diesotto (Kontrollü Kendiliğinden Tutuşma)	2007 Frankfurt Auto Show'da gösterilmiştir.
Volkswagen	Touran	Birleştirilmiş Yanma Sistemi	2015
Volkswagen	Touran	Sıkıştırma ile Ateşlemeli Benzin Motoru	2015

2.2. HCCI Motorların Avantajları

- Benzin kullanan buji ile ateşlemeli bir motorun ve dizel yakıtı kullanan bir dizel motorunun en iyi özelliklerini belli bir noktaya kadar bir araya getirme kabiliyetine sahiptir.
- Klasik bir buji ateşlemeli motor ile karşılaştırıldığında yakıt ekonomisinde iyileşme, NO_x emisyonlarında azalma ve termik verimde artış sağlamaktadır.
- NO_x ve is emisyonlarında eş zamanlı azalma sağlayabilecek yeni bir kavram olarak görülmektedir [23].

2.3. HCCI Motorların Dezavantajları

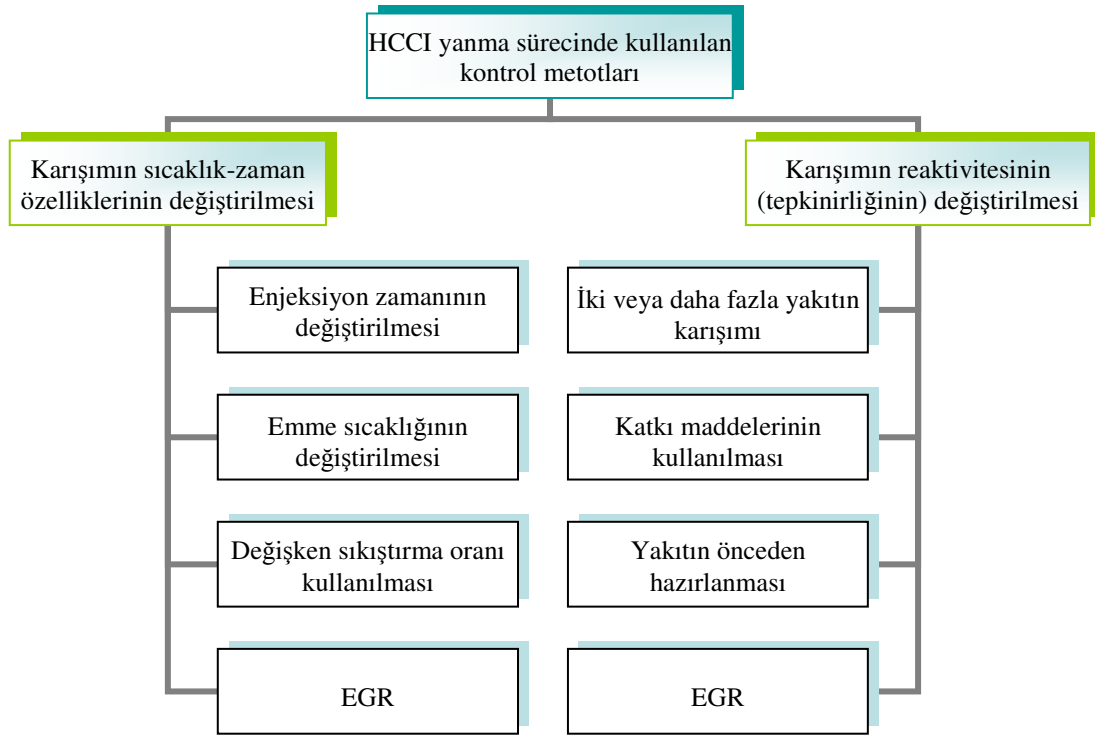
- Yanmanın başlatılması ve yanma hızının kontrol zorlukları
- Yüksek motor yüklerinde çalışma zorluğu
- Dar bir çalışma aralığına sahip olması ve ilk hareket zorluğu
- Özellikle yüksek motor yüklerinde ısı açığa çıkışının aşırı hızlı gerçekleşmesinden kaynaklanan yüksek yanma sesi ve vuruntu olasılığı
- Buji ile ateşleme/HCCI veya Dizel/HCCI çalışma modlarında yapılan değişiklik esnasında geçiş zorlukları
- Özellikle düşük yüklerde CO ve HC emisyonlarının aşırı artması
- Tam yük çalışma şartlarında açığa çıkan yüksek NO_x emisyonları [23]

2.4. HCCI Kontrol Metotları ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi

HCCI yanması üzerinde laboratuvar ortamında, deney motorlarında birçok başarılı çalışma yapılmakla birlikte bu yanma şekli hâlâ ticari olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek seviyeye ulaşmamıştır. Bu konsepti daha çevreci ve verimli bir taşıt motoru olarak geliştirmeye çalışanların karşılaştığı temel sorun, maksimum termik verim elde etmek için arzulanan doğru zamanlamalı tutuşmanın, buji ile ateşlemeli veya dizel motorlarında olduğu gibi buji kıvılcımı veya yakıt püskürtme zamanlaması ile kontrol edilememesidir.

HCCI yanma olayını başlatmak için gerekli olan ısı koşullarının kontrolü hâlâ etkili bir biçimde ortaya konulamamıştır. Bu konudaki çalışmaların çoğu; motorun çalışması için ilk hareketin gerçekleştirilmesi, hızdaki ve/veya yükteki ani değişikliklerin üstesinden gelinmesi ve motor tasarım yöntemlerine dayanmaktadır. Bir HCCI motoru tüm ilgili parçalarının ısıl denge içinde olduğu durumda bir defa çalıştırıldıktan sonra iyi bir performans göstermekte ancak yük değişimi gibi nedenler, ısıl dengede küçük bozulmalara, karışımın tutuşmaması veya vuruntu gibi önemli problemlere neden olmaktadır.

Ayrıca motor çalışma şartlarına bağlı olarak HCCI yanmasının kontrolü, ısıl sınır koşulların doğru bir şekilde sağlanması ile mümkündür. Yanma odası boyunca çeşitli sıcaklık noktaları bulunmaktadır. Çevrimden çevrime ve parçadan parçaya bu sıcaklıklar önemli derecede değişiklik göstermektedir. Dolgu ve silindir yüzeyleri (piston, silindir cidarı, supaplar, silindir kapağı) arasında önemli derecede ısı alışverişi gerçekleşir. Ayrıca EGR oranı ve sıcaklığı, emilen dolgunun sıcaklığı ve ısıtma bujilerinin kullanımı kontrol işlemini karmaşık hale getiren parametrelerdir. Şekil 2.2’de HCCI yanma sürecinde kullanılan kontrol metotları görülmektedir.



Şekil 2.2. HCCI yanma sürecinde kullanılan kontrol metotları [7]

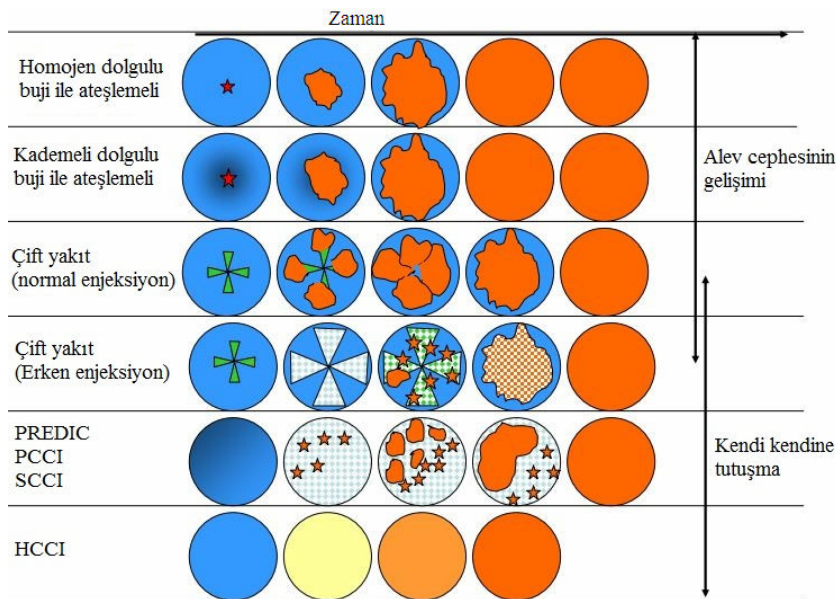
2.5. Yanma Karakteristiği

HCCI motorlarda kendi kendine tutuşma zamanlamasını, ısı geçiş oranını, yanma reaksiyon ara oluşum maddelerini ve yanma sonu ürünlerini yanma kimyası belirlemektedir.

Erken tutuşmanın önlenmesi ve aşırı ısı geçiş oranına engel olabilmek için HCCI yanma modunun kısmi motor yükleri ile sınırlandırılması zorunlu olmaktadır. HCCI yanma kimyası iki tutuşma teorisi ile açıklanabilmektedir. Birincisi termal tutuşma teorisidir ve bu teoriye göre sıcaklık ve basınç yeteri kadar arttırıldığında belirli miktardaki molekülün çarpışmaları ile yanma başlayabilmektedir. Diğeri ise Nikolai Semenov ve arkadaşları tarafından içten yanmalı motorlara uygulanan zincir tutuşma teorisidir. Kimyasal dallanma zincir reaksiyonlarının oluşumunu kapsayan bu teoriye göre yanma ortaya çıkan aktif kimyasal merkezlerde başlamaktadır.

Tutuşma eş zamanlı olarak reaksiyona başlayan zincirlerin sayısı reaksiyondaki sonlanmış zincir sayısını geçtiği anda başlamaktadır [3,21].

HCCI yanma, homojen hava/yakıt karışımının belli bir sıcaklığa erişmesi ile yanma odasının her yerinde ve eş zamanlı olarak kendiliğinden başlamaktadır. Böylece zengin yakıt karışım bölgeleri meydana gelmediğinden is oluşumu da önlenabilmektedir. Ön karışımli homojen dolgunun difüzyon alevi oluşmadan yanması ile silindirdeki bölgesel sıcaklıklar, buji ile ateşlemeli motorlardaki alev cephesinin önünde veya dizel motorlardaki yakıt demetinin stokiyometrik bölgelerinden daha düşük olur. Böylece NO_x emisyonların oluşumu azalmaktadır [1,24,25]. Fakat ısı iletimi daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Yanma başlangıcı, hızlı ısı iletimi ve yanmanın faz evresini kontrol edebilmek için çeşitli uygulamalar halen incelenmektedir. Dizel motorlardan yapılan dönüşümlerde, pilot dizel yakıt enjeksiyonu ile ön karışımli HCCI yanmasının kontrol edilmeye çalışılması bu uygulamalardan birisidir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere bu yanma konumu, ön karışımli HCCI ile dizel yanması arasında özellik gösteren bir yanma şekli olarak nitelendirilebilmektedir. Sırası ile kısmi-HCCI, HCCI-DI, kombine yanma sistemi (CCS), PREDIC, PCCI, SCCI veya fumigasyon olarak çeşitli şekillerde literatürde tanımlanabilmektedir.



Şekil 2.3. Yanma aşamalarının gelişimi [26]

2.6. Emisyon Karakteristikleri

Buji ile ateşlemeli ve dizel motorlardaki yanma sistemlerine göre HCCI yanmasının en önemli özeliği, is ve NO_x emisyonlarında eş zamanlı azalmayı sağlayabilmesidir [14,15]. Yüksek hava fazlalığında, düşük sıcaklıkta ve yüksek basınçta meydana gelen HCCI yanma işleminde son derece önemli olan N_2O 'den NO oluşum mekanizması olup NO_x emisyonlarının azaltılmasındaki en büyük rolü oynamaktadır [27-29].

Klasik dizel motorlarda NO_x -is emisyonları arasında zıt bir ilişki bulunmakta ve her iki emisyon için eşzamanlı olarak yeterli azaltma mümkün olmamaktadır. NO_x emisyonları genellikle 2000 K'in üzerinde, is emisyonları ise homojen olmayan zengin karışım bölgelerinde ($\lambda=0,8$) ve 1400 K sıcaklıkta oluşmaktadır [7]. HCCI motorlarda ise NO_x emisyonları ve is emisyonları eş zamanlı olarak azaltılabilmektedir [27,30].

Bununla birlikte karışımın homojenliğinin sağlanamaması durumunda, silindir duvarları üzerinde zengin karışım oluşumuna yol açmakta ve böylece yanmanın tamamlanamaması neticesinde is oluşumuna neden olabilmektedir. Klasik yanma sistemlerine göre, HCCI yanmasında HC emisyonlarında önemli derecede artış görülmektedir [28,31,32]. HCCI yanmasında aşırı ısı geçiş hızına engel olmak ve yanma işleminin süresini biraz daha uzatmak için EGR uygulaması tercih edilmektedir. Silindir içi dolgunun oldukça fakir olmasından dolayı düşük yanma sıcakları ya da yüksek EGR oranı, HC emisyonlarında artışa neden olmaktadır.

Silindir içerisindeki yanma sıcaklarının azalması ile özellikle silindir cidarlarına yakın kısımlarda kısmi yanmanın meydana gelmesine ve art yanma oksidasyon oranının da azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple dizel motorlarında HCCI yanmasında genel olarak CO emisyonları artabilmektedir [21].

HCCI yanmasının ısı geçişi yüksek oranda gerçekleşmekte ve çok düşük yanma süresine sahip olmaktadır. Bu zeliği sayesinde motordaki çevrime göre yanma işleminde uygun bir faz ayarlanabildiği takdirde ideal Otto çevrimine yaklaşılabilir. Kısmi yanma ya da tekleme olmadığında, genellikle termik verim yüksek olmaktadır [33]. Yanma sıcaklıkları daha düşük olduğundan motordan olan ısı kayıpları azalmaktadır. Gaz kelebeği olmadığı için pompalama kayıpları da azalmakta ve verim artmaktadır.

HCCI motorların yakıt tüketimi potansiyel olarak DI dizel motorlarına göre kısmi yük çalışma şartlarında daha iyi olmaktadır [34-36]. Düşük uçuculuğa sahip ve dizel yakıtı gibi kendi kendine tutuşması daha yüksek olan yakıtların kullanılması durumunda; yakıt/hava karışımın yeterli derecede hazırlanamaması, yakıtın silindir duvarlarına çarpması, kısmi yanma ve erken tutuşma neticesinde yanma aşamasının tam olarak uygun bir şekilde gereklememesi nedeniyle HCCI yanmasının olumlu etkileri ortadan kalkmaktadır.

2.7. Karışım şekli

Silindir içerisine alınan yakıtın silindir duvarları ile etkileşimi olmadan, etkili bir biçimde homojen karışım teşkilinin sağlanması çok önemlidir. Böylece yakıt ekonomisinin sağlanabilmesi, HC ve PM emisyonlarının azaltılması ve yağlama yağının seyrelmesinin önüne geçilmesi sağlanabilmektedir. Benzin gibi uçucu yakıtlarda bile silindir duvarları üzerinde yakıt birikmesi durumunda, HC emisyonlarında artış meydana gelmektedir [37]. Yakıt/hava karışımının teşkili ve homojenliğinin sağlanması için kullanılan yöntemlere bakıldığında, silindir dışı (harici) ve silindir içi (dhili) karışım teşkili olarak iki temel kategoriye ayrılmaktadır (izelge 2.2).

Çizelge 2.2. Homojen yakıt/hava karışım teşkili yöntemleri [7]

Silindir Dışı (Harici) Homojen Karışım Teşkili	Silindir İçi (Dahili) Homojen Karışım Teşkili
Port Tipi	Klasik yakıt enjeksiyon sistemlerinde erken yakıt enjeksiyonu
Fumigasyon	Klasik yakıt enjeksiyon sistemlerinde geç yakıt enjeksiyonu

HCCI'ye dönüşümü yapılan motorun tipine ve kullanılan yakıtlara bağlı olarak homojen dolgunun hazırlanmasında uygulanan yöntemler farklı olabilmektedir. Port tipi yakıt enjeksiyon sistemi ile harici homojen karışım teşkilinde kullanılacak yakıtların uygun viskoziteye, düşük kaynama noktasına sahip ve uçucu olması gerekmektedir. Aksi durumlarda, manifold duvarlarında yakıt filmi oluşumu meydana gelebilmekte ve böylece her bir çevrimde silindire alınan dolgu miktarında değişim ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, motorun çalışmasında çevrimden çevrime farklılıkların artmasına yol açabilmektedir. Silindir duvarlarında ıslanma meydana geldiğinde ise yüksek HC oluşumuna neden olmaktadır.

2.8. Kullanılan Alternatif Yakıtlar ve Katkı Maddeleri

Petrol kökenli yakıtların sınırlı ömrü sebebiyle benzin ve dizel yakıtının ekonomik alternatifleri üzerinde yapılan çalışmalar her geçen gün önem kazanmaktadır. Her ne kadar petrol kökenli yakıtların alternatifleri geliştirilmekte ise de, bu alternatif yakıtların pazardaki geniş çaplı kullanımı, yüksek üretim maliyetleri ve yüksek dağıtım maliyetleri gibi ekonomik faktörlerle sınırlanmaktadır [38]. Alternatif yakıtların kullanılmasıyla elde edilen taşıt performansları ancak sınır değerlerde olabildiği için bu alternatif yakıtların taşıtlarda kullanılıp kullanılamayacağını genellikle ekonomik faktörler tayin etmektedir. HCCI yanma süreci ve bu yanma sürecinin sahip olduğu yüksek yakıt ekonomisi ve düşük emisyon potansiyeli, HCCI motorlarda alternatif yakıtların kullanılmasına karşı ilgi uyandırmıştır. Buradaki beklenti alternatif yakıtların HCCI motorunun gelişimindeki problemlerin birçoğuna çözüm olması yönündedir.

Tutuşma kabiliyetini arttırıcı katkı maddeleri, dizel yakıtların setan sayısını arttırmak için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Tutuşma kabiliyetini arttırıcı katkı maddesi olarak, dimetil eter (DME), dimetoksi metan (DMM), dietil eter (DEE) ve di-tertiary butil peroksit (DTBP) gibi oksijenli bileşikler kullanılmaktadır. Her ne kadar katkısız DME dizel yakıtının yerine bir seçenek olarak düşünülse de DME'nin bugünkü maliyeti dizel yakıtının yaklaşık iki katıdır [39]. Bu yüksek maliyetten dolayı DME gerçekte sadece bir yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir. Literatürde, DME yakıtı HCCI yanmasında katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [20].

Başta etanol ve metanol olmak üzere alkoller de içten yanmalı motorlarda kullanılan sıvı yakıtlardandır. Alkoller tek başına motor yakıtı olarak kullanılabileceği gibi petrol kökenli yakıtlara belli oranlarda katılarak yakıt karışımları şeklinde de kullanılabilirler. Düşük emisyon değerlerine sahip olmaları nedeniyle alkoller birçok ülkede ana yakıt ve yakıt katkısı olarak kullanılmaktadır Etanol, ağaç ve otlardan (biyolojik kütle) üretildiği için yenilenebilir bir yakıt çeşidi olmakla beraber özellikle 1990'lı yıllardan bu yana Amerika Birleşik Devletleri'nde CO emisyonlarını düşürmek için katkı olarak kullanılmaktadır [40].

Mevcut katkısız alternatif yakıtlarla ilgili ana problem, metanol ve etanol haricinde tümünün yüksek oktan sayısına sahip olmasıdır (Çizelge 2.3). Bu yüksek oktanlı yakıtların tümü HCCI çalışması için yüksek sıkıştırma oranlarını gerekli kılmaktadır. Yüksek oktanlı yakıtlar kullanıldığında HCCI çalışma aralığını genişletmek için tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katkı maddesinin yakıtı ilave edilmesi gerekmektedir. Dizel yakıtının setan sayısını arttırmak üzere kullanılan yakıt katkı maddelerinin aynıları benzinde veya alternatif yakıtların herhangi birinde de HCCI tutuşmasını kolaylaştırmak için kullanılabilmektedir. Ancak HCCI motorlarda dizel yakıtı kullanıldığında, yakıtın erken püskürtülmesi tutuşmayı gereğinden çabuk gerçekleştirmekte ve yanma kötü bir şekilde aşırı gelişmektedir. Bu nedenle dizel yakıtı için kullanılan katkı maddesi yakıtın kendi kendine tutuşmasını geciktirerek tutuşma gecikmesi süresini uzatmalıdır [5].

Çizelge 2.3. Katkısız alternatif yakıtların bazı özellikleri [5]

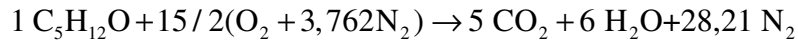
Yakıt	MON	RON	Setan sayısı	LHV (MJ/kg)
Hidrojen		> 130	-	120
Metan	120	> 127	-	49,9
Propan	97	112	-	46,3
n-Bütan	89	94	-	45,8
Benzin	82 - 89	90 - 100	13 - 17	42 - 44
Dizel Yakıtı	-	-	40 - 60	42,5
FT Dizel	-	-	74 - 81	42,5
Doğal Gaz	120	> 127	< 6	45 - 49
LPG	93 - 96	94 - 110	< 3	~ 46
Metanol	92	106	< 5	19,9
Etanol	89	107	< 5	26,8

Oksijenatlar, oktan sayısını ve oksijen içeriğini arttırmak için alternatif olarak ortaya çıkmışlardır. Oksijenatların en önemlisi metil tersiyer bütıl eter (MTBE)'dir. MTBE, ilk olarak 1970'lerin başlarında Avrupa'da, Batı Almanya ve İtalya'da üretilmiştir. 1979 yılında ABD'de Çevre Koruma Ajansı tarafından MTBE'nin kurşunsuz benzine ilave edilmesi onaylandıktan sonra, MTBE'nin üretimi hız kazanmış ve 1998 yılında üretim ve ithalat en yüksek seviyelere gelmiştir. Türkiye'nin başlıca MTBE (Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu Numarası: 2909.19.90.00.13) ithalatı yaptığı ülkeler sırasıyla Fransa, Suudi Arabistan, Hollanda, İsrail, Almanya, Belçika, Birleşik Arap Emirlikleri, İngiltere, ABD, Polonya ve Katar'dır. 2012 yılında Türkiye'nin Fransa'dan MTBE ithalatı 93 milyon 553 bin dolar, toplam ithalatı ise 139 milyon 59 bin dolardır. MTBE yüksek oktan sayısı içermesi, kabul edilebilir Reid buhar basıncı (Rvp), benzinde yüksek çözünürlüğü ve depolanmada dayanıklılığı ile yüksek performans kalitesine sahiptir. Aynı zamanda, MTBE'nin fiyatı diğer yüksek oktanlı bileşikler ile karşılaştırıldığında daha ekonomiktir [41]. Özellikle oktan sayısının yüksek olması ve kolay depolanabilirliği sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [42].

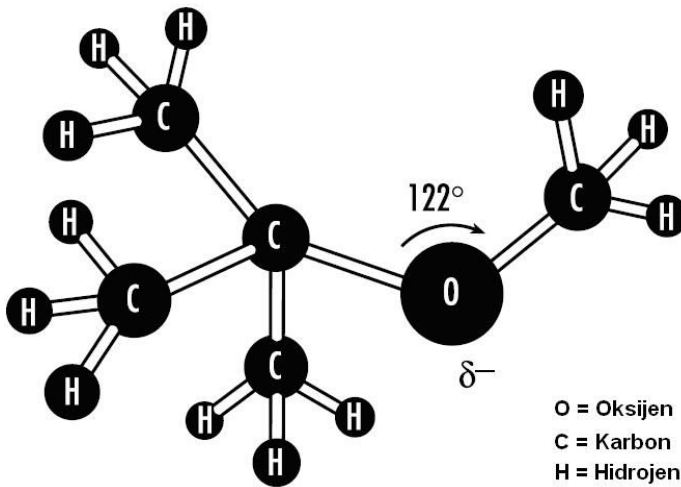
İçten yanmalı motorlarda egzozdan atılan yanmamış MTBE'nin büyük bir kısmı atmosfere yayılmakla birlikte az bir miktarı da toprak ve yeraltı sularına karışabilmektedir. MTBE'nin çevre ve insan sağlığı açısından tehlikeli olduğu, insanlar ve diğer canlıların kas ve sinir sistemlerine zarar verdiği, gözde yanma ve kaşınmalara sebep olduğu tespit edilmiştir [43].

Metil tersiyer bütül eter, izobütenin metanol ile verdiği ekzotermik ve tersinir, katalitik eterleşme reaksiyonu sonucu sentezlenmektedir. Reaksiyon sistemin basıncına bağlı olarak gaz ya da sıvı fazda gerçekleşebilmektedir.

Şekil 2.4 de moleküler yapısı görülen MTBE, $\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$, ağırlık bakımından % 18,2 O_2 ile diğer sıvı hidrokarbonları içeren, benzinde katkı maddesi olarak kullanılan, metanol ve izobutilenin reaksiyonundan elde edilen organik bir eterdir.



$$\text{Hava/yakıt oranı} = \frac{\frac{15}{2} (\text{O}_2 + 3,762\text{N}_2)}{\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}} = \frac{1034,534}{88,15} = 11,7$$



Şekil 2.4. MTBE'nin moleküler ve yapısal formülü [44]

3. LİTERATÜR ÖZETLERİ

HCCI motorlar, oldukça düşük NO_x ve is emisyonu üretirken, direkt püskürtmeli dizel motorlardaki gibi yüksek verime sahip olabilmektedir. Bununla birlikte, pek çok araştırma HCCI motorlarının düşük yanma sıcaklıklarından dolayı oldukça yüksek seviyede HC ve CO emisyonlarına sahip olduğunu göstermektedir. HCCI motorlarda başta HC ve CO emisyonlarının azaltılması, tutuşma başlangıcının kontrolü ve çalışma aralığının genişletilmesi olmak üzere birçok araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Wang ve ark. [45] MTBE'nin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde kurşunsuz benzine farklı oranlarda MTBE ilave etmişlerdir. İki adet 1,8 litre Volkswagen motorunda testler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; % 14 MTBE içeren yakıt karışımı ile orta ve yüksek motor hızlarında, motor momentinde artış, özgül yakıt tüketiminde ise azalma görülmüştür. Emisyonlar açısından ise en iyi sonuç % 13 MTBE içeren yakıt karışımında görülmüş, CO ve HC emisyonlarında dikkate değer oranda azalmalar elde edilmiştir.

Sezer ve Bilgin [42], benzine MTBE katılmasının buji ile ateşlemeli motorda performansa etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneyler; tek silindri, 4 zamanlı, sıkıştırma oranı değiştirilebilen Tequipment marka deney motorunda yapılmıştır. Deney düzeneğinde elektrikli dinamometre kullanılmış ve tam gaz kelebek açıklığında farklı sıkıştırma oranları kullanılmıştır. Hacimsel olarak dört farklı oranlarda (% 5, 10, 15, 20) MTBE'nin benzine katılmasıyla elde edilen karışımlar kullanılmıştır. Çalışma koşullarına ve karışımdaki MTBE oranına bağlı olarak; efektif verimde iyileşme, özgül yakıt tüketiminde azalma sağlanmıştır. Ortalama efektif basınçtaki en yüksek artış % 10'luk MTBE karışımında, 1400 d/d motor devrinde, 8/1 sıkıştırma oranında % 5,6 olarak elde edilmiştir. En iyi efektif verim değerleri % 15 MTBE karışımında, 1400 d/d motor devrinde 8/1 sıkıştırma oranında elde edilmiş ve normal benzine göre % 8,1 artış elde edilmiştir. Verimdeki artışa bağlı olarak özgül yakıt tüketiminde, benzine göre % 5 düşüş kaydedilmiştir.

Al-Dawood [46] çalışmasında, MTBE, etanol ve metanolün motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneyler altı silindirli çok noktadan enjeksiyonlu bir motorda yapılmış, MTBE, metanol ve etanol hacimsel olarak % 10, 15, 20 oranlarında kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre; CO ve NO_x emisyonlarında en fazla azalma etanol karışımlarında, HC emisyonlarındaki iyileşme ise MTBE karışımlarında meydana gelmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda motor performansı ve emisyon değerlerinin %15 etanol oranında en iyi seviyede gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

Hamdan ve Al-Subaih [47] kurşunsuz benzine MTBE katkısının, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde tek silindirli 4 zamanlı buji ile ateşlemeli bir deney motoru ve motor performansını ölçmek için hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Yakıt olarak % 5, 10, 15, 20 MTBE kullanılmıştır. Yakıt karışımlarının oktan sayısının, MTBE oranındaki artışa bağlı olarak sürekli olarak arttığını bildirmişlerdir. Motor performansı ve emisyon değerlerinin % 10 MTBE oranında en iyi seviyede gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [47].

Yokota ve ark. [48] dizel motorlarında NO_x ve partikül madde emisyonlarında eş zamanlı azalma sağlamak amacıyla, çoklu enjeksiyon ile ön karışimli sıkıştırma ile ateşlemeli yanmanın bir araya getirildiği ve HiMICS (Homojen Dolgulu Akıllı Kademeli Enjeksiyonlu Yanma Sistemi) olarak adlandırılan yeni bir yanma sistemini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. HiMICS yanma karakteristikleri, standart tekli enjeksiyon ve pilot enjeksiyon ile mukayese edilmiştir. Her bir enjeksiyon metodu için motor performans ve emisyon değerleri KIVA II ile tahmin edilmiştir. Simulasyon sonuçları HiMICS yanma sistemi ile NO_x emisyonları ve yakıt tüketiminde dikkate değer iyileşmeler sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Gray ve Ryan [49] tarafından Southwest Araştırma Enstitüsü'nde yapılan bu çalışmada stabil ve tekrarlanabilir HCCI yanması geniş bir hava/yakıt oranı, emme havası sıcaklığı, sıkıştırma oranı, EGR oranı ve iki farklı yakıt (dizel yakıtı ve % 19 heksadekan+% 81 heptan) için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 14-80 hava/yakıt

oranı, 8-13 sıkıştırma oranı ve 0 - % 50 EGR oranı aralığında motor başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar seramik kaplamalı piston ve supaplarla elde edilen sonuçlarla mukayese edilmiştir. Çalışmada, normal dizel sıkıştırma oranları kullanıldığında çok erken ateşleme ortaya çıkmıştır. Emme manifoldu yüzeyinde sıvı yakıt birikmesini en aza indirmek için, kısmen yüksek giriş hava sıcaklıklarına (135 - 205 °C) ihtiyaç olduğu ve partikül madde emisyonlarının emme havası sıcaklığından önemli oranda etkilendiği ortaya konulmuştur. Ayrıca yanmamış hidrokarbon emisyonlarının çok yüksek olduğunu ve düşük yanma verimliliği, azalmış sıkıştırma oranları ve ideal olmayan yanma safhası sonucunda, yakıt tüketiminin yaklaşık olarak % 28 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

Tsurushima ve ark. [50] silindir içi gaz örnekleme çalışması ile HCCI yanmasının kimyasal süreçlerini ortaya koymuşlardır. Deneylerde düz zincirli doymuş hidrokarbonlardan olan 3 çeşit n-parafinin (n-pentan, n-hekzan ve n-heptan) etkilerini açıklamaya çalışmışlardır. Çalışmalarında 2,0 litre silindir hacmine sahip, dört supaplı, doğal emişli, tek silindirli bir motor kullanmışlardır. Ateşleme zamanlamasının kontrolü için, yanmanın düşük sıcaklık oksidasyon aralığında 700-900 K aralığında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çift yakıt kullanıldığında, setan sayısı yüksek olan yakıtın tutuşabilirliğinin kontrolü ile HCCI motorun ateşleme zamanlamasının kontrolünün sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Lee ve ark. [51] ön karışımli yakıt oranının, dizel motorda yanma ve emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemle araştırmıştır. Deneylerde ön karışımli yakıt olarak benzin kullanılmıştır. Deney motoru olarak tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, 673 cm³ silindir hacmine sahip klasik bir dizel motor kullanılmıştır. Ön karışım oranının etkisinin araştırılması amacıyla motorun emme manifoldu modifiye edilmiş ve ön karışımli yakıt enjeksiyon sistemi monte edilmiştir. Ön karışım oranı, EGR oranı ve eşdeğerlilik oranı gibi çeşitli faktörlerin etkisini incelemek amacıyla, elektronik kontrollü port tipi enjeksiyon sistemi tarafından ön karışımli yakıtın enjeksiyon miktarını ayarlamışlardır. Yaptıkları çalışmada kullanılan çift yakıtların arasındaki ön karışım oranı aralığı 0-0,85 arasında tutulmuş ve EGR oranı % 30'a kadar arttırılmıştır. NO_x ve is azalmasında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Çanakçı ve ark. [52] tarafından elektronik kontrollü Caterpillar 3400 marka, tek silindirli yağ test motoru (SCOTE), direkt enjeksiyonlu HCCI-SI motoruna dönüştürülmüştür. Bu motor üzerine elektronik kontrollü, düşük basınçlı, 60° püskürtme açılı ve kademeli püskürtme özelliğine sahip, common rail tip bir enjektör monte edilmiştir. Deneyler 10 MPa yakıt basıncında ve 700 d/d motor devrinde ölçülmüştür Püskürtme parametresi olarak; emme havası giriş sıcaklığı, püskürtme başlangıç zamanı, her bir püskürtmedeki yakıt miktarındaki değişim kullanılmıştır. Egzoz emisyonlarında önemli miktarda azalmaları gözlemlenmiştir.

Fang ve ark. [53] tarafından sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda, ön karışimli yakıt oranının motor yükü, yanma ve emisyonlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney motoru 1200 d/d'da % 25-75 motor yükünde çalıştırılmıştır. Motorun emme manifolduna monte edilen bir yakıt enjeksiyon sistemi ile, düşük setan sayılı ve düşük kaynama noktalı DMM yakıtı püskürtülmüştür. Bu şekilde homojen karışım oluşturulmuş ve az bir miktar dizel yakıtı ÜÖN'ye yakın silindir içerisine püskürtülerek yanma gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları deneyin sonuçlarına göre; ön karışimli yakıt oranının artışına bağlı olarak NO_x ve duman emisyonları azalmıştır. Ancak HC ve CO emisyonları aksi yönde tesir etmiştir. Özellikle düşük ve kısmi motor yüklerinde yüksek HC ve CO emisyonları gözlenmiştir. Tutuşma gecikmesi; ön karışimli yakıt oranının artışına bağlı olarak azalmış, içeri alınan dolgudaki CO_2 miktarındaki artışa bağlı olarak artmıştır. Port enjeksiyonlu DMM yakıtının etkisiyle oluşan ön karışimli yanmanın, dizel motor egzoz emisyonlarını kontrol etmek için kullanılabileceği ve eşzamanlı olarak NO_x ve duman emisyonlarını büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Peng ve ark. [30] n-heptan yakıtlı bir HCCI-DI motorda hava/yakıt oranı ve EGR'nin vuruntuya, motor yüküne, yanma verimine ve emisyonlara (NO_x , CO ve yanmamış HC) olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyde; tek silindirli, dört zamanlı, değişken sıkıştırma oranlı ve port tipi yakıt enjeksiyonlu bir motor kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada HCCI yanmasının, klasik dizel motorun sahip olduğu sıkıştırma oranlarında uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek yakıt/hava oranlarında vuruntu miktarı artmıştır. Deneyler sonucunda; dizel HCCI

yanmasında EGR oranının, düşük ve yüksek sıcaklık yanma aşamalarında kendi kendine ateşleme zamanlamasına etkili olduğunu belirtmişlerdir. Yanma sıcaklığı düştüğünde NO_x 'in çok fazla azaldığını bunun yanında HC ve CO emisyon değerlerinin yüksek çıktığını ve eksik yanmanın teklemeye sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.

Lida ve ark. [54] emme havası sıcaklığı, sıkıştırma oranı ve motor devri değişiminin HCCI yanmasına etkilerini incelemiştir. HCCI çalışma aralığı; n-bütan yakıtlı tek silindirli, dört zamanlı ve sıkıştırma oranı değiştirilebilen bir CFR motorunda araştırılmıştır. Deneyler 600 - 2000 d/d motor devir aralığında yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre HCCI çalışma modunda maksimum IMEP 3,5 bar, minimum yakıt tüketimi 175 g/kWh olarak ölçülmüştür. HCCI çalışma aralığının üzerinde motor yükü artışına bağlı olarak HC ve CO emisyonları azalmıştır. NO_x emisyonları çok düşük çıkmıştır. N-bütan yakıtlı HCCI motorun düşük eşdeğerlik oranı ve yüksek motor hızlarında çalışabilmesi için, emme havası sıcaklığının ya da sıkıştırma oranının artırılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Aşırı fakir karışımların ise düşük sıcaklıklarda CO ve HC emisyonlarının yükselmesine neden olan eksik yanmaya yol açtığını tespit etmişlerdir.

Kim ve ark. [55] tarafından kısmi ön karışimli dolgunun HCCI yanması ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Tek silindirli, dört zamanlı, 673 cm³ hacmine sahip dizel bir motor deneylerde kullanılmıştır. Direkt enjeksiyonlu, dizel motorun emme manifolduna ilave yakıt enjeksiyon sistemi monte edilerek, ön karışimli yakıtların püskürtülmesi sağlanmıştır. Yaptıkları deney sonucunda; ön karışimli benzin kullanıldığında, karışım oranındaki artışa bağlı olarak tüm çalışma şartlarında tutuşma erken başlamış, NO_x emisyonları azalmıştır. Ön karışimli dizel yakıtı kullanıldığında, NO_x emisyonları sadece yüksek emme sıcaklığında ve düşük ön karışım oranlarında azalmıştır. Ön karışimli benzin yakıtının kullanıldığı tüm yük koşullarında ön karışım oranının artışına bağlı olarak is emisyonları azalmış fakat ön karışimli dizel yakıtının kullanıldığı durumlarda ön karışım oranı göz önüne alınmadığında neredeyse sabit kalmıştır. Ön karışım oranının artışı HC ve CO emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Yüksek ön

karışım oranlarında artan HC ve CO emisyonlarının önlenmesi için emme havasının ısıtılmasının kullanışlı bir metot olacağını ortaya koymuşlardır.

Soylu [15] tarafından yapılan çalışmada, doğal gaz ile çalışan bir HCCI motorunda basit ısı geçişi alt modeli ve kendi kendine tutuşma modeli kullanılarak tek boyutlu termodinamik modelleme ile çeşitli parametrelerin yanmaya olan etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda karışımın ÜÖN'da kendi kendine tutuşarak enerjisini kısa sürede açığa çıkarmasıyla, silindir içi basınç ve sıcaklığın hemen maksimuma ulaşacağını, bu durumun yanan gazların ısı transferinde ve yanma sonu oluşan gazların ayrışmasında önemli rol oynadığını ve bu yüzden verim ve IMEP miktarında azalma meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Deneyler sonucunda motor gürültüsüne ve hasarına sebep olan şiddetli vuruntu ile yüksek NO_x emisyonları meydana gelmiştir. Ayrıca HCCI motorda yanma, değişken supap zamanlaması (VVT), değişken sıkıştırma oranı (VCR) veya EGR oranı ile kontrol edilebilmektedir. Doğal gaz ve propan karışım miktarı, yanma kontrolünde etkili bir metot olarak görülmüştür. Aşırı doldurma ve eşdeğerlik oranı artışıyla IMEP miktarında artış kaydedileceği belirtilmiştir.

Tiegang ve ark. [56] tarafından HCCI dönüşümü yapılmış tek silindirli bir motor üzerinde, DME yakıtının yanma ve emisyon özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, HCCI motor yanmasının iki kademeli bir ısı yayılım süreci olduğunu ve motor yükünün, maksimum silindir basıncı, basınç artış oranı ve ısı yayılım oranı üzerinde önemli etkileri olduğunu ancak motor devrinin etkisinin az olduğunu gözlemlemişlerdir. DME yakıtlı HCCI motorunda, NO_x , CO ve HC miktarlarının 0,25-0,30 MPa fren ortalama efektif basınçlı çalışma koşulları altında az olabileceğini belirtmişlerdir

Lü ve ark. [57] HCCI motorda birincil referans yakıt ve bunların farklı oranlarda karışımlarını kullanarak emisyon değerleri (CO, yanmamış HC ve NO_x), ateşleme zamanının başlangıcı, yanma süresi ve çevrimden çevrime farklılıkları incelemişlerdir. Birincil referans yakıt olarak n-heptan ve izo-oktan ile bunların farklı oranlarda karışımları (RON25, RON50, RON75 ve RON90) kullanılmıştır.

Çalışmada araştırma oktan sayısındaki artış ile birlikte, yanmanın birinci aşamasında tutuşma başlangıcı rötara kaymış, maksimum ısı yayılım hızı azalmıştır. Ayrıca yanmanın birinci aşamasında basınç ve sıcaklık yükselmesi azalmıştır. Buna ek olarak yanmanın birinci aşamasındaki toplam ısı yayılımının, karışımındaki n-heptan miktarına bağlı olduğu görülmektedir. Eşdeğerlik oranı ve oktan sayısındaki azalmaya bağlı olarak ikinci aşamada yanma süresi azalmaktadır. Ayrıca eşdeğerlik oranı ve setan sayısındaki artış ile çevrimden çevrime farkların azalacağı ortaya konulmuştur. HCCI yanmasında eşdeğerlik oranı kritik değeri geçtiğinde NO_x emisyonları da artmaktadır.

Lü ve ark. [58] tarafından çalışmanın ikinci aşamasında, tek silindirli bir HCCI motorda n-heptan ve izo-oktan birincil referans yakıtları ile bunların karışımlarının oktan sayısı ve eşdeğerlik oranının yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. EGR oranı, emme havası sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı ve motor hızının tek silindirli bir HCCI motorda yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına etkilerini belirlemişlerdir. Çalışmalarında soğutmalı EGR uygulaması ısı dağılımının birinci ve ikinci aşamasında rötara neden olmuş ve yanma süresi de artmıştır. Aynı zamanda setan sayısı yüksek n-heptan ve RON25 gibi yakıtların daha fazla oranda EGR'yi tolere edebildiğini belirtmişlerdir (1800 d/d motor hızında, RON75 yakıtı ile % 45 EGR oranına kadar). Bundan başka n-heptan ve RON25 yakıtları kullanıldığında, CO ve yanmamış HC emisyonlarında çok fazla bir azalma görülmemiştir. Fakat oktan sayısı biraz daha yüksek yakıt (RON75) kullanıldığında, emisyonların azaltılmasında daha belirgin bir etki göstermiştir. Çalışmalarında HCCI yanma karakteristiği üzerinde, emme havası sıcaklığı ve motor soğutma suyu sıcaklığının yanma süresi üzerine önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Emme havası ve soğutma suyu sıcaklığının arttırılması ile yanma süresi azalmaktadır.

Hou ve ark. [59] temel yakıt olarak n-heptan kullanılan HCCI motorunda MTBE, etanol ve metanol içeren yüksek oktanlı oksijenli yakıtların birbirine eklenmesinin etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. N-heptan, hacimsel olarak % 10 - 60 aralığında % 10 aralıklarla MTBE, etanol ve metanol ile karıştırılmıştır. Karıştırılmış bu üç farklı yakıt, emme manifolduna püskürtülmüş ve ön karışımli HCCI yanması

karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. N-heptan karıştırılmış yüksek oktanlı oksijenli yakıtlar ile HCCI yanmasının geciktiği ve saf n-heptanın aksine yanma hızının çok azaldığı görülmüştür. Yakıt/hava eşdeğerlik oranlarında ve MTBE, etanol ve metanol miktarında artışa bağlı olarak, yanma aşamalarında gecikmelerin olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda; MTBE, etanol ve metanolün belirli bir miktara kadar artırılmasıyla HCCI yanmasında kısmi yanmaların hatta teklemelerin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yanma aşaması oluşan gecikme göz önüne alındığında; üç çeşit yakıt içerisinde metanol en etkili olarak gösterilmiş ayrıca etanolün MTBE'den daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. HCCI yanma hızının kontrol altına alınmasında ise metanol en etkili yakıt olmuştur. MTBE bu üç çeşit yakıt içerisinde en az etkili olmuştur. Ancak, MTBE/n-heptan karıştırılmış yakıt deneylerinde, MTBE % 60 hacminde (MTBE60) olana kadar motor teklemeye yapmamıştır. Yanma aşaması ve yanma hızı kontrolü dikkate alındığında yüksek oktanlı üç oksijenli yakıt arasından MTBE'nin; n-heptan yakıtlı HCCI yanmasının çalışma aralığını arttırma potansiyeli açısından metanol ve etanolden daha fazla avantajının olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yao ve ark. [16] HCCI dönüşümü yapılmış tek silindirli bir motorda, port enjeksiyon şeklinde DME ve metanol yakıtlarını kullanarak, kontrol stratejilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada EGR oranının ve DME miktarının, HCCI yanma sürecini kontrol etmek için iki önemli parametre olduğunu göstermişlerdir. DME miktarı ve EGR oranı değiştirilerek, tutuşma zamanlaması ve yanma süresi kontrol edilebilmektedir. Yanma verimliliği büyük ölçüde DME miktarına bağlıdır ve EGR yanma verimliliğini iyileştirebilmektedir. Ayrıca HC emisyonlarının büyük ölçüde DME miktarına bağlı olduğunu ve CO emisyonlarının silindirdeki en üst ortalama sıcaklıkla iyi etkileşime girdiğini belirtmişlerdir. Artan DME miktarı ve EGR oranına bağlı olarak yanma iyileşmektedir.

Lu ve ark. [9] tarafından n-heptan ve etanol/n-heptan karışımı yakıtlar kullanılarak HCCI motorunda kendiliğinden tutuşma, yanma ve emisyon özellikleri araştırılmıştır. Deneyler 1800 d/d sabit motor devrinde, saf n-heptan yakıtı ve hacimsel olarak % 10, 20, 30, 40 ve 50 etanol/n-heptan karışımları kullanılarak tek

silindirli bir HCCI motor üzerinde yapılmıştır. Etanol/n-heptan karışımları ile maksimum IMEP'in 3,38 bar'dan 5,1 bar'a arttırılabileceğini, termik verimin yüksek motor yüklerinde % 50'ye kadar arttırılabileceğini fakat termik verimin düşük motor yükünde azaldığını göstermişlerdir. Ancak % 20 - 50 etanol/n-heptan karışım yakıtları için, tutuşma zamanı etanol ilavesiyle yavaş yavaş ÜÖN'ya geciktirilmektedir. Deneysel çalışmada; yanma süresi, saf n-heptan ile karşılaştırıldığında aynı motor yükünde belirgin bir şekilde uzamaktadır. Tüm sabit çalışma aralıklarında, HC emisyonları % 40 ve % 50 etanol/n-heptan karışımları için büyük ölçüde artarken, n-heptan ve % 10-30 etanol/n-heptan karışımları için HC emisyonları çok düşüktür. 1,5-2,5 bar motor yükünde, CO emisyonlarının tüm yakıtlar için oldukça yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Lu ve ark. [60] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, metanol katkısının, n-heptan kullanan bir HCCI motorun yanma hızına ve kendiliğinden tutuşma üzerindeki etkilerini incelemiştir. N-heptan ve % 10 - 40 metanol/n-heptan karışım yakıtları emme portuna püskürtülmüş, 1800 d/d'da farklı metanol/n-heptan karışım yakıtları için HCCI yanmasının emisyonları ve yanma özellikleri analiz edilmiştir. Deneyler sonucunda düşük ve yüksek sıcaklık reaksiyonunda ateşleme zamanının geciktiğini ve düşük sıcaklık süresince maksimum ısı yayılımının, n-heptan içerisindeki metanol katkısının artmasıyla birlikte azaldığını göstermişlerdir. Sıralı olarak, hem maksimum hem de minimum kabul edilen eşdeğerlilik oranları artmaktadır, ancak maksimum motor yükü metanol/n-heptan yakıtların üzerinde % 40'tan daha fazla arttırılamamaktadır. Emisyonlara ilişkin olarak, % 10 ve % 20 metanol katkısı CO ve HC emisyonlarında çok az etki göstermiştir. % 30 ve % 40 metanol/n-heptan karışım yakıtları için büyük ölçüde artmaktadır. NO_x emisyonları tüm yakıtlar için oldukça azaltılmıştır.

Kim ve Lee [61] yaptıkları çalışmada, HCCI yanmasının kontrolünde kısmi-HCCI uygulamasını bir metot olarak ele almışlardır. Port tipi bir yakıt enjeksiyon sistemi ile direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunun emme manifolduna ön karışimli yakıt püskürtmüşlerdir. Ön karışimli yakıt olarak benzin, dizel ve n-heptan yakıtlarını kullanmışlardır. Ön karışimli yakıtın erken tutuşmasına engel olabilmek için

soğutmalı EGR uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, ön karışımli dizel ve n-heptan'a göre NO_x ve is emisyonlarının azaltılmasında benzinin daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. EGR uygulaması ile birlikte klasik dizel yanmasına göre NO_x emisyonlarında 10 kata kadar azalmayı sağlayabilmişlerdir. Buna göre yüksek EGR oranları ile vuruntu sınırı daha yüksek ön karışım oranlarına doğru genişlemiştir. Bu azalma, yanmadaki faz farkının artarak geç ve yavaş yanmaya göre gelişmekte, böylece daha düşük silindir içi basınç ve yanma sıcaklıklarına yol açmaktadır. Bununla birlikte is emisyonlarının artışı ile EGR uygulaması da belli bir oranda sınırlandırılmıştır. Yüksek dizel ön karışım oranı ve yüksek emme havası sıcaklığı NO_x konsantrasyonlarını artmasına neden olmuş ve vuruntu oluşumu nedeniyle motorun çalışma bölgesi kısıtlanmıştır.

Ma ve ark. [62] tarafından HCCI-DI kavramının yanma ve emisyon özellikleri ile ön karışım oranının ve direkt püskürtme zamanlamasına etkileri araştırılmıştır. HCCI-DI motorda dizel yakıtı silindir içine direkt püskürtülürken, n-heptan yakıtı port tipi bir enjeksiyon sistemi ile emme manifolduna püskürtülmüştür. Ön karışımli n-heptan ve aynı zamanda silindire direkt enjekte edilmiş dizel yakıt miktarları ayarlanarak, 1800 d/d motor hızında ve farklı ön karışımli yakıt oranlarında deneyler yapılmıştır. % 0 - 100 yük aralığında yapılan deneylerde ön karışımli n-heptan oranı 0'dan 1'e kadar değiştirilmiş, klasik dizel, HCCI-DI ve tam HCCI çalışma koşullarda motor performans parametreleri incelenmiştir. HCCI-DI'nın optimum çalışma aralığı belirlenmiştir.

Lu ve ark. [63] tarafından dört silindirli, dört zamanlı ve yüksek hızlı direkt püskürtmeli bir HCCI-DI motorda, farklı oranlarda kullanılan katkı maddelerinin HCCI yanmasının verimliliğine ve emisyon değerlerine olan etkileri araştırılmıştır. Motorun bir silindiri HCCI modunda çalışacak hale getirilmiş, diğer üç silindir ise orijinal direkt püskürtmeli dizel modunda çalıştırılmıştır. Bu amaçla port tipi bir yakıt enjeksiyon sistemi adapte edilmiştir. HCCI çalışma şartlarında temel yakıt n-heptan olmak üzere metanol, etanol, isopropanol ve MTBE katkı maddeleri kullanılmıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda yanma verimliliğinin $\text{MTBE} < \text{isopropanol} < \text{etanol} < \text{metanol}$ sıralaması ile arttığını ölçmüşler ancak

etanolun çalışma aralıklarının, indike termik verim ve emisyonlar göz önüne alındığında en iyi katkı maddesi olduğunu belirtmişlerdir. CO emisyonunun büyük oranda maksimum yanma sonu sıcaklığına bağlı olduğunu ve HC emisyon oluşumunun n-heptan'ın toplam yakıtta olan mol oranına göre belirlendiğini gözlemlemişlerdir.

Çanakçı [64] yaptığı çalışmada, bir ağır yük dizel motorundan HCCI motora dönüştürülmüş, tek silindirli direkt enjeksiyonlu motorda emme havası basıncının motor performans ve emisyonları üzerine etkilerini incelemiştir. Deneyler, farklı motor hızlarında ve emme hava sıcaklığında, üç farklı hava girişi basınçlarında yapılmıştır. Püskürtme zamanlaması her bir test şartında maksimum motor torkunu elde etmek için bağımlı olarak ayarlanmıştır. Farklı motor hızlarında ve farklı emme havası basınçlarında çalışan HCCI motorunda hem CO, HC ve NO_x emisyonlarının değişimi incelenmiş, hem de yakıt tüketimi, tork ve yanma verimleri gibi performans parametreleri de araştırılmıştır. Yapılan deney sonucunda motor momenti; turbo basıncının artmasıyla artmış, motor devrinin artmasıyla azalmıştır. Turbo basıncına bağlı olarak motor devri arttıkça egzoz gaz sıcaklığı artmıştır. Motor devri ve turbo basıncı beraber dikkate alındığında yanma verimi artmıştır. Termik verim, turbo basıncının artması neticesinde artan motor momenti benzer şekilde bir eğilim göstermiştir. Turbo basıncı ve motor devri beraber dikkate alındığında CO emisyonlarında artış gözlenmiştir. CO emisyonlarının aksine HC miktarında azalma görülmüştür. NO_x emisyonlarında ise motor devrine bağlı olarak artış görülmüştür.

Liu ve ark. [65] tarafından farklı emme sıcaklık, basınç ile motor hızlarını içeren çalışma koşulları altında, HCCI yanma sürecinin, yük aralığı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla RON değerleri 90'ın üzerinde altı farklı yakıt, HCCI dönüşümü yapılmış dört silindirli direkt enjeksiyonlu bir motorda test edilmiştir. Deneylerde, yakıt özelliklerinin çalışma koşullarına bağlı olarak HCCI yanma üzerinde etkili olduğu görülmüştür. HCCI motorunda yanma veriminin, oktan sayısı fazla olan yakıtların oktan sayısı az olan yakıtlara oranla daha fazla etkili olduğunu ancak daha iyi bir yanma için uygun kontrol stratejilerine ihtiyaç olduğu sonucuna varmışlardır.

Jung ve ark. [66] HCCI motorların en önemli sorunlarından biri olan çalışma aralığını arttırmak amacıyla egzoz emisyonları (THC, CO, NO_x) ile yanmayı etkileyen sıkıştırma oranı, eşdeğerlik oranı ve enjeksiyon zamanlamasını araştırmışlardır. Bu nedenle DME yakıtı iki farklı şekilde (ön karışım şeklinde emme manifolduna ve sıkıştırma sonuna doğru direkt yanma odasına) püskürtülmüştür. Deneylerde hızlı sıkıştırma ve genişleme makinesi kullanılmıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda, DME'yi tamamen homojen bir yakıt/hava karışımı şeklinde emme manifolduna vermek yerine, direkt olarak silindir içine göndermenin daha yüksek eşdeğerlilik oranlarında vuruntusuz çalışmanın mümkün olabileceğini göstermişlerdir. Sıkıştırma zamanında erken püskürtülen yakıt, silindirdeki DME/hava karışımının homojenliğini arttırmasına rağmen, yüksek motor yüklerinde termik verim ve vuruntusuz çalışmayı olumsuz etkilemektedir. Düşük sıcaklık reaksiyonları; yakıt hazırlama yöntemleri, yakıt enjeksiyon zamanlaması ve eşdeğerlilik oranı dikkate alınmaksızın yaklaşık 660 K'da meydana gelmiştir. Yanmamış DME yakıtı, formaldehid ve metan, HC emisyonlarının temel bileşenlerini oluşturmuştur.

Kim ve ark. [67] tarafından NO_x emisyonlarında azalma sağlamak amacıyla; ön karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli (PCCI) ve kısmi ön karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli (PPCCI) motorda yanmaya olan etkileri incelenmiştir. Deney yakıtı olarak DME seçilmiştir. Tek silindirli dizel motoru, sıkıştırma oranı 17,8'den 15'e düşürülerek kullanılmıştır. Motor devri 1500 d/d sabit tutulmuştur. Deney sonuçları dikkate alındığında; düşük NO_x üreten PCCI yanmada maksimum eşdeğerlik oranı 0,2 – 0,3 olarak hesaplanmıştır. Koni biçimli dar püskürtme açısı ve modifiye edilen piston geometrisi ile motorun İMEP'inde önemli bir artış gözlemişlerdir. Ayrıca ÜÖN'dan 100° önce yapılan ilk enjeksiyon ve ÜÖN'dan 10° sonra yapılan ikinci bir enjeksiyon içeren çift enjeksiyon stratejisi, daha fazla motor yükü koşullarında aşırı derecede düşük NO_x emisyonları ortaya çıkarmıştır. ÜÖN'dan 10° sonra yapılan ikinci enjeksiyon zamanlamasının en düşük NO_x emisyonun seviyesinin elde edilebileceğini, tek enjeksiyon durumu ile karşılaştırıldığında ise NO_x emisyonlarında % 90'ın üzerinde bir azalma olduğunu göstermiştir.

Lu ve ark. [68] MTBE katkılı n-heptan kullanan dört zamanlı tek silindirli bir HCCI-DI motor üzerinde yanma özelliklerini ve egzoz emisyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sabit motor devrinde 1800 d/d'da hacimsel olarak % 10, 20, 30, 40 ve 50 oranında yapılmış, MTBE/n-heptan ve saf n-heptan yakıtı kullanılmıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda n-heptan içerisindeki MTBE katkısının artışı ile motor yükü doğrusal olarak artmıştır. MTBE/n-heptan karışım yakıtlarının tutuşabilirliği bozulmuş, aynı IMEP'teki yanma verimliliği MTBE'nin eklenmesiyle azalmıştır. MTBE katkısı ile n-heptan'ın aynı kısmi eşdeğerlilik oranı için, düşük ve yüksek sıcaklık reaksiyonunda gecikmeler yaşanmıştır. MTBE katkısı ile düşük sıcaklık kimyasal reaksiyonu önlenmiş ve düşük sıcaklık ısı yayılımının daha yavaş başlamasıyla sonuçlanarak azalmıştır. Sıkıştırma zamanı boyunca sıcaklık artış oranı yavaşlatılmış ve yakıt/hava karışımının yanma reaksiyonu azaltılmıştır. Motor yükü ne olursa olsun tüm çalışma aralıklarında karışım yakıt n-heptanın hacimsel olarak artışıyla HC emisyonları önemli ölçüde azalmıştır. Ancak n-heptan miktarı CO emisyonları üzerinde doğrudan bir etki göstermemiş, çok düşük motor yüklerinde CO emisyonları azalmıştır. Düşük motor yüklerinde % 10-30 MTBE/n-heptan karışımında HC emisyonları azalmış, %40-50 MTBE/n-heptane karışımlarında önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca yüksek setan sayılı yakıt kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Can ve ark. [69] tarafından tek silindirli bir HCCI-DI motorda ön karışimli benzin kullanımının, yanma ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun emme manifoldunda port tipi bir yakıt enjeksiyon sistemi adapte edilerek kısmi HCCI moduna dönüşüm sağlanmıştır. Maksimum moment devrinde (2200 d/d) ve tam yükte yapılan deneylerde ön karışimli yakıt oranı % 10, 20 ve 30 olacak şekilde değiştirilmiştir. Vuruntu oluşması nedeniyle ön karışimli yakıt oranı % 30 ile sınırlandırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, ön karışimli benzin oranı arttıkça silindir içi basınç azalmıştır. Ön karışimli yakıt oranına bağlı olarak HCCI yanmasında yüksek sıcaklık oksidasyon aşaması artış göstermiştir. Deney sonuçları klasik dizel yanması ile karşılaştırılmış, sıkıştırma ve yanma başlangıçlarında silindir içi basınç değerleri ile ısı dağılımı

değerlerinde artış meydana gelmiştir. Silindir içerisine homojen olarak alınan karışım pilot dizel enjeksiyonu ile aniden tutuştuğundan, ısı dağılımı ani olarak artmakta ve basınç artış oranını yükselerek tutuşma zamanında değişimlere sebep olmaktadır. HC ve CO emisyonlarında artış görülmüş ancak NO_x emisyonlarında % 16, is emisyonlarında % 65 ve egzoz gazı sıcaklığında % 22 oranında azalma elde edilmiştir.

Çınar ve ark. [70] tarafından ön karışimli DEE dolgusunun, tek silindirli HCCI-DI motorunun yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkisi incelenmiştir. Deneyler 2200 d/d motor hızında ve 19 Nm çalışma koşullarında yapılmıştır. Ön karışimli DEE miktarı, programlanabilir bir elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmiş ve DEE yakıtı düşük basınçlı enjektör ile emme havasının içine püskürtülmüştür. Ön karışimli DEE oranı % 0'dan % 40'a kadar değiştirilmiş ve sonuçlar saf dizel çalışması ile karşılaştırılmıştır. Yaptıkları deney sonucunda silindir içi basınç ve ısı yayılımında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca daha düşük difüzyon yanması oluşmuştur. Çevrimden çevrime farklılıklar, dizel yakıt ve % 10 DEE ön karışimli yakıt oranında çok az meydana gelmiştir. Ön karışimli yakıt oranı % 40 DEE ile duyulabilir vuruntu ortaya çıkmıştır. Egzoz gaz sıcaklığı % 23,8'e düşerken, NO_x ve is emisyonları sırasıyla % 19,4 ve % 76,1 azalmıştır. Diğer taraftan CO ve HC emisyonları artmıştır.

Ghazikhani ve ark. [71] ön karışım ve eşdeğerlilik oranlarının, çift yakıtlı bir HCCI motorunda CO ve HC emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla HCCI dönüşümü yapılmış, sıkıştırma oranı 17,5 olan tek silindirli 582 cm³ hacimli motor üzerinde testler yapılmıştır. Test motoru 1200 - 1700 d/d arasında çalıştırılmıştır. Ön karışimli benzin, emme manifolduna takılan yakıt sistemi ile sağlanmıştır. Dizel yakıt 250 bar basınçtaki bir enjektör aracılığıyla doğrudan silindirin içine püskürtülmüştür. Emme manifolduna yerleştirilen bir ısıtıcı, emme havası sıcaklığını kontrol etmek için kullanılmıştır. Tüm testler için ön karışimli yakıt başlangıçta kullanılmayıp motor dizel yakıt ile çalıştırılmıştır. Daha sonra, HCCI yanmasına yaklaşmak için yükün yanı sıra ön karışimli yakıt miktarı yavaş yavaş artırılmıştır. Deney sonuçlarına göre ön karışım oranının artışıyla daha fazla

enerji açığa çıkmış bu yüzden CO emisyonlarında azalma meydana gelmiştir. Ancak EGR miktarının artışıyla CO emisyonu artmıştır. Eşdeğerlik oranı ve ön karışım oranının artmasına bağlı olarak HC emisyonları artmıştır. EGR, çift yakıtlı HCCI motorun çalışma aralığını genişletmiştir.

Can ve ark. [72] tarafından HCCI dönüşümü yapılmış tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda ön karışımli etanolün motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Bu maksatla emme manifolduna etanol püskürtülmüştür. Deneyler motorun normal dizel çalışmasında verdiği tork miktarı azaltılıp emme manifolduna püskürtülen etanol miktarı ile tamamlanarak yapılmıştır. Vuruntu nedeniyle etanol oranı % 30'dan daha fazla arttırılmamıştır. Kısmi motor yüklerinde (8 ve 12 Nm) % 90 tork değişimine kadar motor çalıştırılabilmiş, düzensiz çalışma nedeniyle COV_{IMEP} 'in artmasına bağlı olarak tork değişim oranı % 60 ile sınırlandırılmıştır. Deney sonuçlarına göre; kısmi motor yüklerinde (8 Nm), duman ve NO_x emisyonlarında eş zamanlı olarak % 87 ve % 26 azalma görülmüştür. Yüksek motor yüklerinde ise ön karışımli etanol miktarındaki artışa bağlı olarak NO_x emisyonları artmıştır. Ön karışımli ethanol miktarındaki artışa bağlı olarak CO ve HC emisyonları artış göstermiştir.

Can ve ark. [73] tarafından HCCI dönüşümü yapılmış tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda, ön karışımli etanolün ve EGR oranının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Etanol yakıtı düşük basınçlı bir port tipi yakıt enjeksiyon sistemi ile motorun emme manifolduna püskürtülmüştür. Deneylerde motorun klasik dizel çalışmasında verdiği tork miktarı % 10 aralıklarla azaltılıp aynı tork değeri emme manifolduna püskürtülen etanol miktarı ile tamamlanmıştır. Deneyler 2200 d/d motor hızında, 4, 8, 12 ve 16 Nm olmak üzere dört farklı motor yükünde ve % 0 - 30 EGR oranlarında yapılmıştır. EGR uygulaması ile vuruntu sınırı arttırılmış, 12 Nm yükte tork değişim oranı % 80'e kadar genişletilebilmiştir. Motorda tam ve kısmi yüklerde EGR oranının artırılması ile çevrimsel farklılıklarda ve basınç artış oranında azalma görülmüştür. Düşük motor yükünde ise COV_{IMEP} değerlerinde düzensizlik meydana gelmektedir.

EGR uygulaması ile NO_x emisyonları azalırken THC ve CO emisyonlarında artış görülmüştür.

Yücesu ve ark. [74] tarafından tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda 2200 d/d sabit motor hızında, RON40 yakıtı kullanılarak kısmi ve tam HCCI çalışma konumunda motor performansı ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Bu maksatla kısmi HCCI konumunda tam yük (16 Nm) ve yarım yükte (8 Nm) motor testleri yapılmış, tam HCCI konumunda ise 1 - 5 Nm motor yükü aralığında deneyler yapmışlardır. Motorda vuruntulu çalışma sebebiyle deneyler tam yükte % 60, yarım yükte % 90 tork değişim oranı ile sınırlandırılmıştır. Kısmi HCCI çalışma şartlarında tam ve yarım yükte tork değişim oranının artmasıyla silindir basıncı artmıştır. Tam yük çalışma şartlarında tork değişim oranına bağlı olarak ısı dağılımında artış görülmüştür. Ayrıca, tork değişim oranının artmasıyla çevrimden çevrime farklar artmıştır. Tam yük çalışma şartlarında tork değişim oranındaki artışa bağlı olarak THC ve CO emisyonları azalma gösterirken NO_x emisyonları artmıştır.

Singh ve ark. [6] bir silindiri klasik dizel, diğer silindiri ise HCCI modunda çalışmak üzere dönüşümü yapılan iki silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir motorda deneyler yapmışlardır. Homojen karışım hazırlamak için “dizel buharlaştırıcı” adında özel bir cihaz geliştirilmişlerdir. Yaptıkları deneyi; motor, dizel buharlaştırıcı, yakıt enjeksiyon sistemi, EGR ve veri toplama sistemi olmak üzere beş alt sisteme ayırmışlardır. NO_x oluşumunu en aza indirmek için gerekli olan silindir içi ısı EGR ile kontrol edilmiştir. EGR oranı % 0, 10 ve 20 olarak kullanılmış, üç farklı yakıt / hava oranında deneyler yapılmıştır ($\lambda=4,95$, 3,70 ve 2,56). Yaptıkları deney sonucuna göre; egzoz gazları, homojen yakıt / hava karışımını etkileyerek yanma verimini düşürmüştür. EGR tarafından kontrol edilen ısı yayılım oranı, yüksek motor yüklerinde oldukça yüksek çıkmıştır. Karışım zenginleştikçe yanma süresi hızla düşmüştür.

Lu ve ark. [75] port tipi yakıt enjeksiyonu ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda n-heptan yakıtı ile beraber, ön karışımly yakıt olarak yüksek oktanlı izo-oktan, etanol, izo-propanol ve i-butanol kullanarak çift yakıtlı ardışık yanma modunu (DFSC) bir

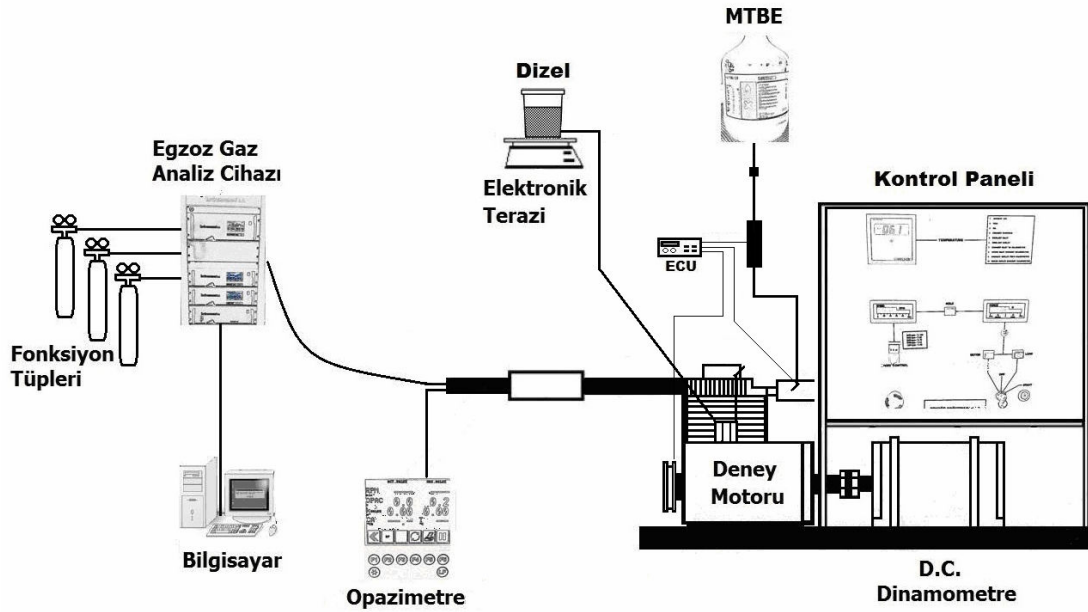
yöntem olarak değerlendirmişlerdir. Deneyler tek silindirli motor üzerinde yapılmıştır. N-heptane, programlanabilir bir ECU tarafından kontrol edilmiş ve düşük basınçlı enjektör ile emme havasının içine püskürtülmüştür. Direkt püskürtülen yakıtın moleküler yapısı ve özellikleri ile ateşleme-yanma mekanizması, emisyon karakteristikleri, ön karışım oran ve toplam eşdeğerlik oranının etkilerini deneysel olarak ele almışlardır. Deney sonuçlarına göre; ön karışım oranı, erken ateşleme zamanlamasını etkilemektedir. Ayrıca NO_x emisyonunun maksimum yanma sıcaklığına bağlı olduğunu ve çift yakıtlı ardışık yanma modu (DFSC)'nin maksimum basınç artış oranının, ön karışım oranı n-heptan yakıtının eşdeğerlik oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

4. MATERYAL VE METOT

Deneyler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deney düzeneği Resim 4.1 ve Şekil 4.1'de görülmektedir.



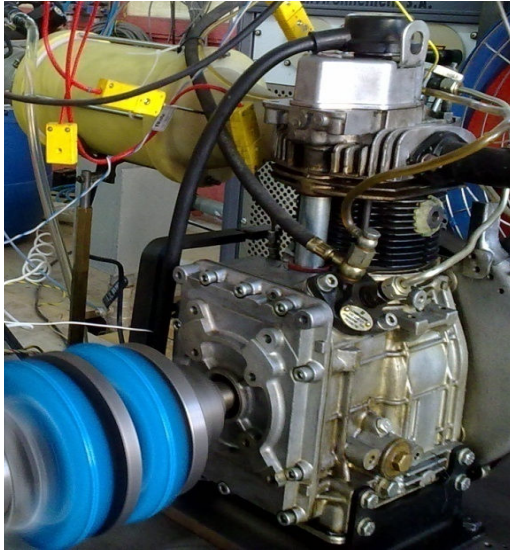
Resim 4.1. Deney düzeneği



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

4.1. Deney Motoru

Deneylerde, Resim 4.2’de görülen HCCI-DI dönüşümü yapılmış, tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motoru kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

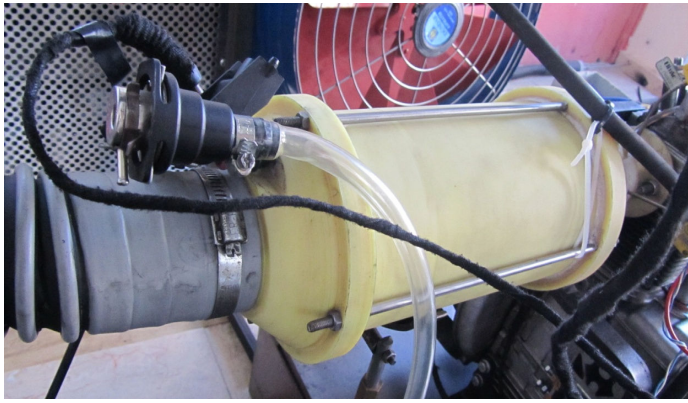


Resim 4.2. HCCI dönüşümü yapılan deney motoru

Çizelge 4.1. HCCI-DI dönüşümü yapılan motorun teknik özellikleri

Motor tipi	DI, Dizel motoru	
Silindir sayısı	1	
Silindir çapı (mm)	86	
Kurs boyu (mm)	68	
Silindir hacmi (cm ³)	395	
Sıkıştırma oranı	18:1	
Maksimum motor devri (d/d)	3600	
Maksimum motor gücü (kW)	5,4 (3000 d/d)	
Maksimum moment (Nm)	19 (2200 d/d)	
Püskürtme basıncı (bar)	180	
Püskürtme avansı	24 ° önce ÜÖN	
Supap	Em. açılma avansı	7,5 °KMA önce ÜÖN
	Em. kapanma gecikmesi	25,5 °KMA sonra AÖN
zamanlaması	Eg. açılma avansı	21 °KMA önce AÖN
	Eg. kapanma gecikmesi	3 °KMA sonra ÜÖN

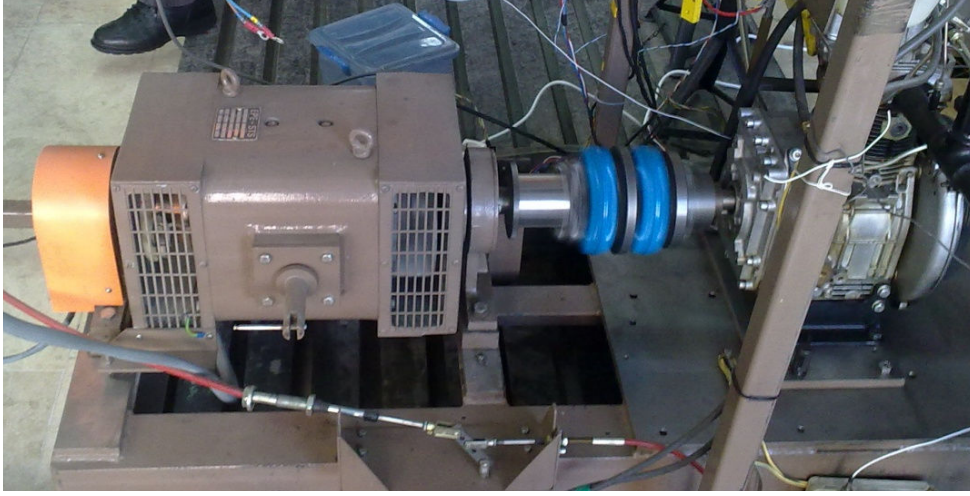
Motorun HCCI-DI dönüşümü Yücesu ve ark. [76] tarafından 108M228 kodlu TUBİTAK projesi kapsamında yapılmıştır. Resim 4.3’de görülen motorun emme manifoldu, homojen dolgu oluşumu sağlamak amacıyla yeniden imal edilmiş ve üzerine port tipi düşük basınçlı bir yakıt enjeksiyon sistemi adapte edilmiştir. Bir hall-efekt sensörü ile yakıt sisteminin zaman referansı için üst ölü nokta belirlenmiştir. Yakıt enjeksiyon süresi, programlanabilir bir elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmektedir. Enjektörün toplam açık kalma süresi, hesaplanan yakıt enjeksiyon süresi ile açılma gecikmesi süresinin toplamına eşittir. Enjektör açılma gecikmesi süresi hesaplanmış ve her bir çevrimde püskürtülecek MTBE miktarı belirlenmiştir [69,76].



Resim 4.3. Emme manifoldu ve port tipi yakıt enjeksiyon sistemi

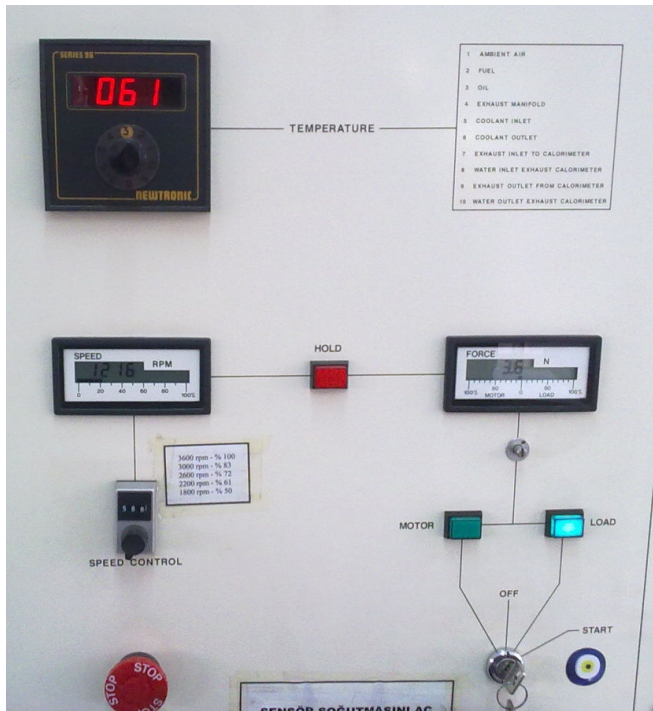
4.2. Deney Düzenegi

Deneyler, Cussons P8160 marka test düzeneğinde yapılmıştır (Resim 4.1). Resim 4.3’de görülen DC elektrikli dinamometre, 4000 d/d’da 10 kW güç absorbe edebilmektedir. DC dinamometrede bulunan tristör sürücü devresi ile yük ve kapalı döngü hız kontrolü yapılabilmektedir. Motor hızı manyetik pick-up sensörü ile dinamometre milinde dişli teker üzerinden ölçülmüştür. Motor yükü straingauge yük hücresi ile ölçülmüştür [69,77].



Resim 4.4. DC elektrikli dinamometre

Motor devri, yük hücreesine etki eden kuvvet, yağlama yağı sıcaklığı, emme havası sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı ve yakıt sıcaklığı Resim 4.5’de görülen kontrol paneli üzerinde yer alan göstergeler üzerinden okunabilmektedir.



Resim 4.5. Kontrol paneli

4.3. Egzoz Emisyon Cihazı

Deneylerde, THC, CO ve NO_x emisyonlarının ölçümünde Resim 4.6'da görülen Environnement SA firması tarafından üretilen EGAS 2M model analitik ham egzoz analiz cihazı kullanılmıştır. Sistem; ısıtmalı alev iyonizasyon detektör (HFID) prensibine göre THC ölçümü yapan GRAPHITE 52M, saçınımsız kızılötesi ısıma (NDIR) prensibine göre CO-CO₂ ölçümü yapan MIR 2M ve ısıtmalı kimyasal ısıma prensibine göre NO_x/NO ölçümü yapan TOPAZE 32M analizörlerinden oluşmaktadır. Egzoz analiz cihazının teknik özellikleri ve analizörlerin çalışma aralıkları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Emisyon ölçüm sonuçları cihaz üzerindeki RS-232 portu üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır [4,76].



Resim 4.6. EGAS 2M egzoz gaz analiz cihazı

Çizelge 4.2. EGAS 2M egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri [4,76]

Analizör	GRAPHIDE 52M	TOPAZE 32M	MIR 2M
Ölçülen gazlar	THC	NO/NO _x	CO/CO ₂ /O ₂
Yöntem	Isıtmalı alev iyonizasyonu	Isıtmalı kimyasal ışıma	Soğutulmuş kızılötesi ışıma
Ölçüm aralığı	0-10 / 0-30000 ppm	0-10 / 0-10000 ppm	0-500/10000 ppm CO için 0-1/20 % CO ₂ için 0-5/25 % O ₂ için
Hassasiyeti	0-10 aralığında 0,05 ppm	0-10 aralığında 0,1 ppm	< % 2

4.4. Duman Ölçümü

Duman ölçümü için teknik özellikleri Çizelge 4.3’de verilen AVL DiSmoke 4000 model kısmi akışlı opazimetre ile ölçülmüştür (Resim 4.7).



Resim 4.7. AVL DiSmoke 4000 model duman ölçer

Çizelge 4.3. AVL DiSmoke 4000 cihazının teknik özellikleri

	Ölçüm aralığı	Doğruluk
Opazite (%)	0 - 100	% 0,1
k değeri (m ⁻¹)	0 - 99,99	0,01

4.5. Terazi ve Kronometre

Dizel yakıt tüketimi kütleli olarak ölçülmüştür. Yakıt tüketimini ölçmek için Resim 4.8’de görülen Ohaus GT 8000 marka dijital terazi kullanılmıştır. Terazi 0,1 gr hassasiyete ve azami 8 kg ölçme kapasitesine sahiptir.



Resim 4.8. Ohaus GT 8000 marka dijital terazi ve yakıt kabı

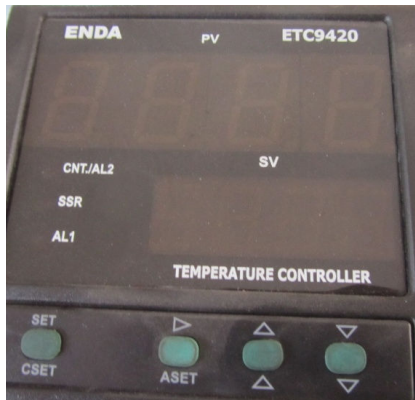
Tüketilen yakıt miktarının ölçümünde Resim 4.9’da görülen 1 salise hassasiyetinde Robic SC 700 marka kronometre kullanılmıştır.



Resim 4.9. Robic SC 700 marka kronometre

4.6. Sıcaklık Ölçüm Cihazı

Sıcaklık ölçümleri Resim 4.10'da görülen ENDA marka çok kanallı sıcaklık göstergesi ve 1200 °C kadar ölçüm alabilen NiCr-Ni tipinde termokupllar ile yapılmıştır.



Resim 4.10. Çok kanallı sıcaklık göstergesi

4.7. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar

Deneylerde No.2 dizel yakıtı ve MTBE kullanılmıştır. No.2 dizel yakıtı ve MTBE'nin bazı özellikleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. No.2 dizel yakıtı ve MTBE'nin çeşitli özellikleri [44,76]

	No.2 Dizel Yakıtı	MTBE
Yoğunluk (15 °C @ g/cm ³)	0,8254	0,74
Alt ısı değeri (MJ/kg)	42,6	35,108
Setan sayısı	45	-
Vizkozite (40 °C @ mm ² /s)	3,196	0,31
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	14,6	11,7
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	316	425
Oksijen (% ağırlık)	0	18,2
Hidrojen (% ağırlık)	14	13,7
Karbon (% ağırlık)	86	68,1

4.8. Deneylerin Yapılışı

Deneyler, klasik dizel ve HCCI-DI çalışma şartlarında motorun maksimum moment devri olan 2200 d/d'da tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) olmak üzere iki farklı motor yükünde yapılmıştır. Deneylerden önce motor No.2 dizel yakıtı ile çalıştırılmış ve ısıtılmıştır. Deneyler süresince motorun yağ sıcaklığı yaklaşık 85 °C'de tutularak sabit motor çalışma şartları oluşturulmuştur. Deneylerde ön karışimli yakıt olarak metil tersiyer bütül eter (MTBE) kullanılmıştır. Ön karışimli MTBE yakıtı düşük basınçlı bir enjeksiyon sistemi ile Resim 4.3'de görülen motorun emme manifolduna püskürtülmüştür. Püskürtülen MTBE miktarı programlanabilir bir elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmiştir. Deneylerde motorun klasik dizel çalışma şartlarında verdiği moment % 10 - 50 arasında % 10 aralıklarla azaltılmıştır. Tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) çalışma şartlarında elde edilen moment değeri püskürtülen dizel yakıtına kumanda ederek azaltılmış, aynı moment değeri emme manifolduna püskürtülen MTBE yakıtı ile elde edilmiştir. Ön karışimli MTBE oranı motorun vurunutulu çalışması ile sınırlandırılmıştır. Bu sebeple tam yük ve yarım yük çalışma şartlarında ön karışimli MTBE oranı % 50 ile sınırlandırılmıştır.

4.9. Motor Performans Parametrelerinin Hesaplanması

4.9.1. Motor momenti

Motor momenti krank miline uygulanan döndürme kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Deneylerde moment ölçümü için DC elektrikli dinamometre kullanılmıştır.

Dinamometre yüklenmek istendiğinde stator sargıları doğru akımla beslenerek bir manyetik alan oluşturulmakta ve oluşan manyetik alan rotoru frenlemeye çalışmaktadır. Oluşan frenleme kuvveti ise statora bağlı bir yük hücresi tarafından ölçülmektedir [78]. Göstergede okunan kuvvet değeri, dinamometre moment kol uzunluğu ile çarpılarak o devirdeki motor momenti hesaplanmıştır (Eş. 4.1).

$$M = F \cdot l \quad (4.1)$$

Burada;

M : Moment (Nm),

F : Kuvvet (N),

l : Moment kol uzunluğu (m)'dur.

4.9.2. Efektif güç

Motor krank milinden alınan efektif motor gücü P_e (kW), moment ve açısal hıza bağlı olarak,

$$P_e = \frac{2\pi nM}{60} \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada;

P_e : Efektif motor gücü (W)

n : Motor devri (d/d)'dir.

4.9.3. MTBE yakıt tüketimi

Ön karışımlı MTBE yakıt tüketimi, enjektörün açık kalma süresi boyunca emme manifolduna püskürtülen yakıt miktarına göre belirlenmiştir. Yakıt enjeksiyon süresi, enjektörün toplam açık kalma süresinden, açılma gecikmesi süresi çıkarılarak hesaplanmıştır. Enjektörün açılma gecikmesi süresi ise ölçülerek belirlenmiş ve 12 V DC sabit besleme gerilimi sağlanarak deneyler süresince sabit kalması sağlanmıştır. Ön karışımlı MTBE yakıt tüketimi,

$$\dot{m}_{MTBE} = \frac{t_{inj} \rho_{MTBE} \dot{V}_{inj} n}{60000} \quad (4.3)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada,

$\dot{m}_{MTBE}$: MTBE yakıt tüketimi (g/dak)

t_{inj} : Enjektörün açık kalma süresi (ms)

ρ_{MTBE} : MTBE'nin yoğunluğu (g/mL)

V_{inj} : Enjektör debisi (mL/dak)

n : Motor devri (d/d)'dir [4,76].

Örnek olarak,

Tam yükte 2200 devirde, % 30 ön karışımli MTBE yakıtı ile yapılan deneylerde,

Toplam enjeksiyon süresi 2,57 ms ,

Enjektör açılma gecikmesi 1,38 ms ,

MTBE yoğunluk 0,742 g/mL ,

Enjektör debisi 94,5 mL/dak , alınırsa

$$t_{inj} = 2,57 - 1,38 = 1,19 \quad ms$$

$$\dot{m}_{MTBE} = \frac{(1,19)(0,74)(94,5)(2200)}{(60000)} = 3,05128 \quad g / dak$$

olarak hesaplanır.

4.9.4. Özgül yakıt tüketimi

Özgül yakıt tüketimi birim motor gücü için harcanan kütleli yakıt miktarıdır.

Toplam yakıt tüketimi ve efektif güç bilindiğinden özgül yakıt tüketimi (ÖYT) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}_{Dizel} + \dot{m}_{MTBE}}{P_e} 60 \quad (4.4)$$

Burada,

ÖYT : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

$\dot{m}_{Dizel}$: Dizel yakıt tüketimi (g/dak)'dir [4,76].

Örnek olarak,

Tam yükte 2200 devirde, % 30 ön karışımli MTBE yakıtı ile yapılan deneylerde,

Dizel yakıt tüketimi (m_{Dizel}), 13,36 g/dak olarak ölçülmüştür.

Hesaplanan MTBE yakıt tüketimi 3,05128 g/dak ve

Motor gücü $P_e = 3,6862499 \text{ kW}$

olduğuna göre ÖYT,

$$\text{ÖYT} = \frac{13,36 + 3,05128}{3,6862499} \cdot 60 = 267,126 \text{ g / kWh}$$

olarak hesaplanmıştır.

4.9.5. Termik verim

Termik verim motordan elde edilen faydalı gücün motora verilen ısı enerjisine oranıdır. Motora hem dizel hem de MTBE yakıtı alındığına göre termik verim,

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_{Dizel} \cdot H_{Dizel} + \dot{m}_{MTBE} \cdot H_{MTBE}} \quad (4.5)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,

η_e : Termik verim (%)

H : Yakıtların alt ısı değeri (kJ/kg) dir [4,76]

Örnek olarak,

Tam yükte 2200 devirde, % 30 ön karışımli MTBE yakıtı ile yapılan deneylerde,

Dizel yakıt tüketimi (m_{Dizel}), 13,36 g/dak,

MTBE yakıt tüketimi 3,05128 g/dak,

Motor gücü $P_e = 3,6862499 \text{ kW}$

Dizel yakıtının alt ısı değeri 42600 kJ/kg

MTBE'nin alt ısı değeri 35108 kJ/kg alınır,

$$\eta_e = \frac{3,6862499}{\left(\frac{13,36}{60}\right)(42,600) + \left(\frac{3,05128}{60}\right)(35,108)} = 0,327$$

olarak hesaplanır.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

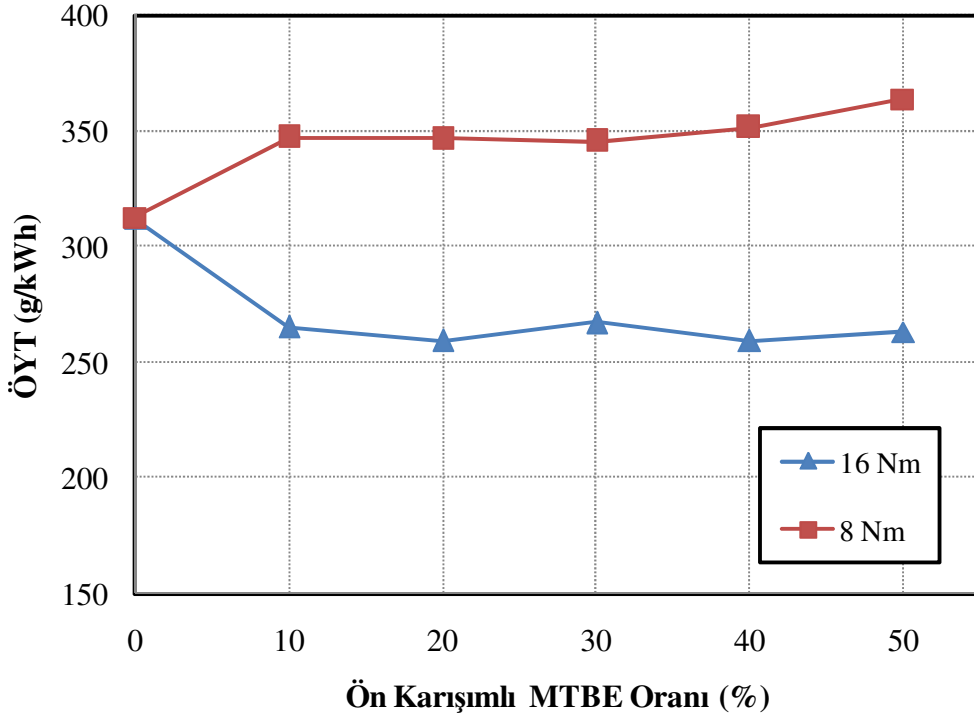
Deneyler, motorun maksimum moment devri olan 2200 d/d'da tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) çalışma koşullarında yapılmıştır. Deneylerde motorun klasik dizel çalışma şartlarında verdiği moment % 10 - 50 arasında % 10 aralıklarla azaltılmış, aynı moment değeri emme manifolduna püskürtülen MTBE yakıtı ile tamamlanmıştır. Deneylerde her bir ön karışimli MTBE yakıt oranı için özgül yakıt tüketimi, termik verim ve egzoz emisyonlarının (THC, CO, NO_x ve duman) değişimi incelenmiştir.

5.1. Özgül Yakıt Tüketimi

Şekil 5.1'de ön karışimli MTBE oranına bağlı olarak tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) çalışma şartlarında özgül yakıt tüketimi değişimleri görülmektedir. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında özgül yakıt tüketimi 311,86 g/kWh iken MTBE enjeksiyonu ile % 10 ön karışimli MTBE oranında 265 g/kWh'a düşmektedir. Özgül yakıt tüketimi % 10 ön karışimli yakıt oranının üzerindeki değerlerde belirgin bir değişim göstermezken, % 50 ön karışimli yakıt oranında 263,2 g/kWh olarak elde edilmiştir. Yarım yük çalışma şartlarında ise klasik dizel çalışmasında özgül yakıt tüketimi 312,51 g/kWh olarak elde edilmiştir. Motorun kısmi HCCI çalışma şartlarında, % 10 ön karışimli MTBE enjeksiyonu ile özgül yakıt tüketimi 346,9 g/kWh olarak elde edilmiştir. Yarım yük çalışma şartlarında, dizel yakıtının azaltılması ve ön karışimli MTBE yakıtının arttırılmasına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi artış eğilimi göstermiş ve % 50 ön karışimli MTBE oranında 363,79 g/kWh olarak elde edilmiştir.

Her iki motor yükünde yapılan deneylerde, ön karışimli MTBE yakıt oranı % 50'ye kadar arttırılmıştır. Bu yakıt oranının üzerinde motorda vuruntu oluşması sebebiyle ön karışimli yakıt oranı % 50 ile sınırlandırılmıştır. Yarım yük çalışma koşullarında MTBE enjeksiyonu ile elde edilen özgül yakıt tüketimi değerlerindeki artış MTBE yakıtının ısı değeri düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yakıtın

ısı değerinin düşük olması, aynı motor gücünü alabilmek için daha fazla yakıtın silindire içerisinde püskürtülmesini gerektirmektedir.

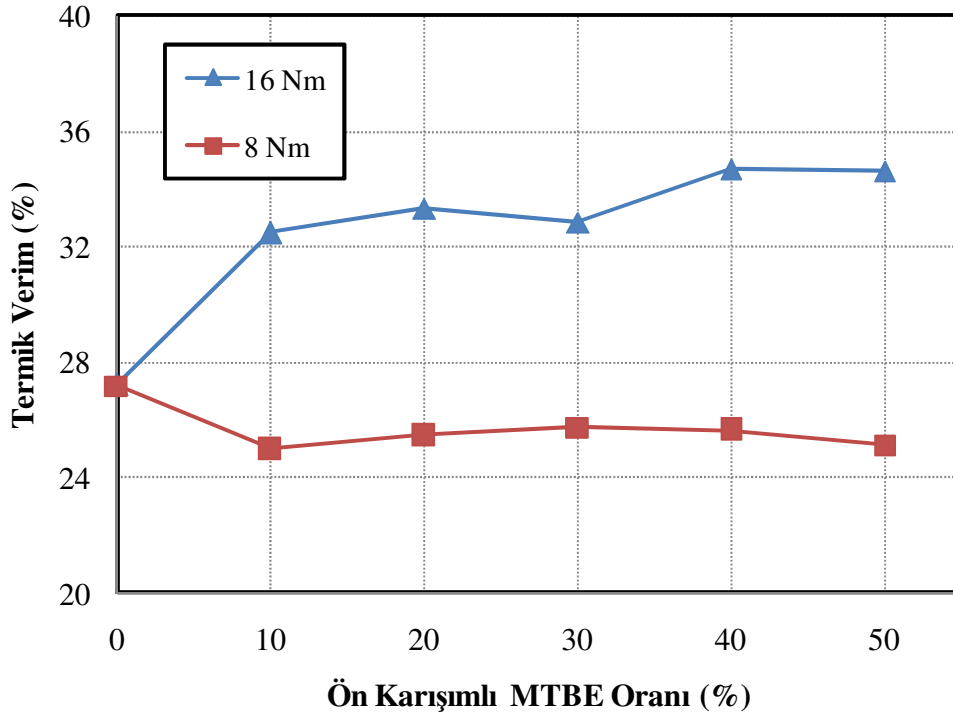


Şekil 5.1. Ön karışıklı MTBE oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimi

5.2. Termik Verim

Şekil 5.2’de ön karışıklı MTBE oranına bağlı olarak termik verim değişimleri görülmektedir. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında termik verim % 27,2 iken MTBE enjeksiyonu ile % 10 ön karışıklı MTBE oranında % 32,48, % 50 ön karışıklı MTBE oranında % 34,62 olarak hesaplanmıştır.

Yarım yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında termik verim % 27,17 iken MTBE enjeksiyonu ile % 50 ön karışıklı MTBE oranında termik verim % 7,52 azalarak % 25,12’ye düşmüştür.



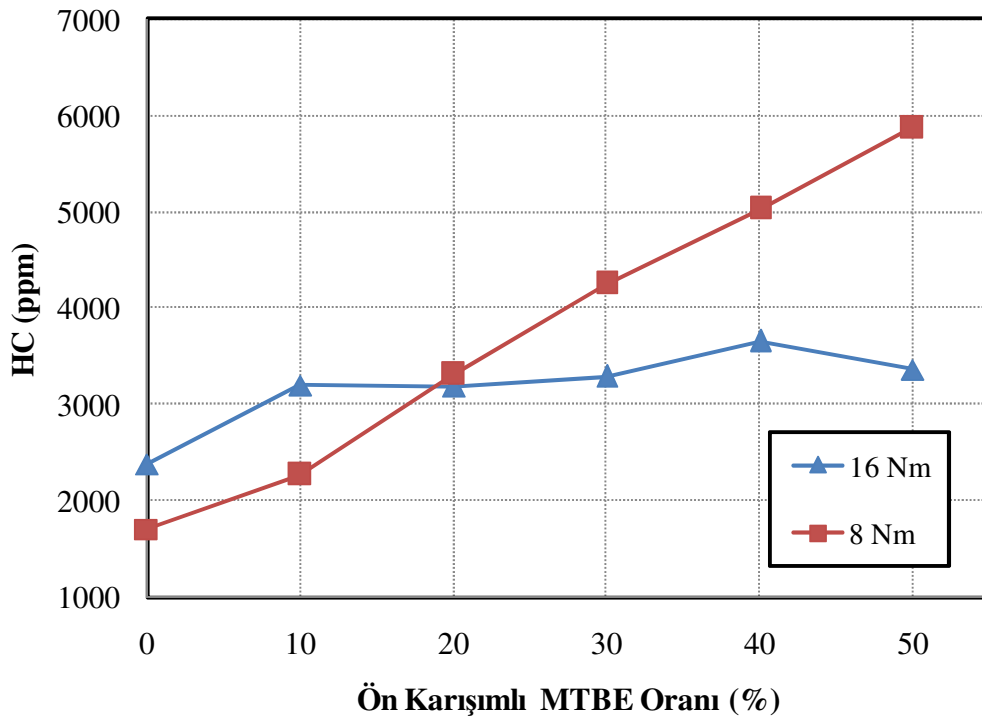
Şekil 5.2. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak termik verim değişimi

Termik verim, yakıtın kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüşüm oranının bir göstergesidir. Özgül yakıt tüketiminin düşük olduğu durumlarda termik verim artış göstermekte, yüksek olduğu durumlarda ise termik verim azalmaktadır. Şekil 5.1’de tam yük koşulunda elde edilen özgül yakıt tüketim değerlerinin düşüş kaydettiği ön karışımli MTBE oranlarında, Şekil 5.2’de buna karşılık gelen termik verim değerlerinde artış görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 5.1’de yarım yük koşulunda elde edilen özgül yakıt tüketim değerlerinin artış kaydettiği ön karışımli MTBE oranlarında, Şekil 5.2’de buna karşılık gelen termik verim değerlerinde azalma görülmüştür.

5.3. HC Emisyonları

Şekil 5.3’de ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi görülmektedir. Tam yük ve yarım yük çalışma şartlarında ön karışımli MTBE yakıtındaki artışa bağlı olarak HC emisyonları artmaktadır. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında HC emisyonları 2381,2 ppm iken, MTBE

enjeksiyonu ile % 40 ön karışımli yakıt oranında % 53,5 artarak 3656,46 ppm'e kadar çıkmaktadır. Yarım yük çalışma şartlarında ise HC emisyonlarında sürekli bir artış görülmektedir. Yarım yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında HC emisyonları 1707,89 ppm iken MTBE enjeksiyonu ile % 50 ön karışımli yakıt oranında % 243,97 artarak 5874,58 ppm'ye çıkmaktadır.



Şekil 5.3 Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi

HCCI çalışmasında HC emisyonları klasik dizel çalışmasına göre daha yüksek olmaktadır. Literatürde kısmi HCCI şartlarında yapılan deneylerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Can ve ark. [72] tarafından ön karışımli etanol yakıtı kullanılarak yapılan çalışmada farklı motor yüklerinde ön karışımli yakıt oranına bağlı olarak HC emisyonlarının arttığı görülmüştür. Silindir cidarlarında alev sönmesi ile segman yarıkları, piston tepesi ve silindir cidarı arasına sıkıştırma esnasında dolan ön karışımli genişleme esnasında basıncın düşmesi ile silindire tekrar geri dolması ve yanmadan silindir dışına atılması HC emisyonlarındaki artışa sebep olmaktadır.

Yanma odasındaki alevin ulaşamadığı dar bölgeler de bu emisyonların yüksek olmasına sebep olmaktadır [24].

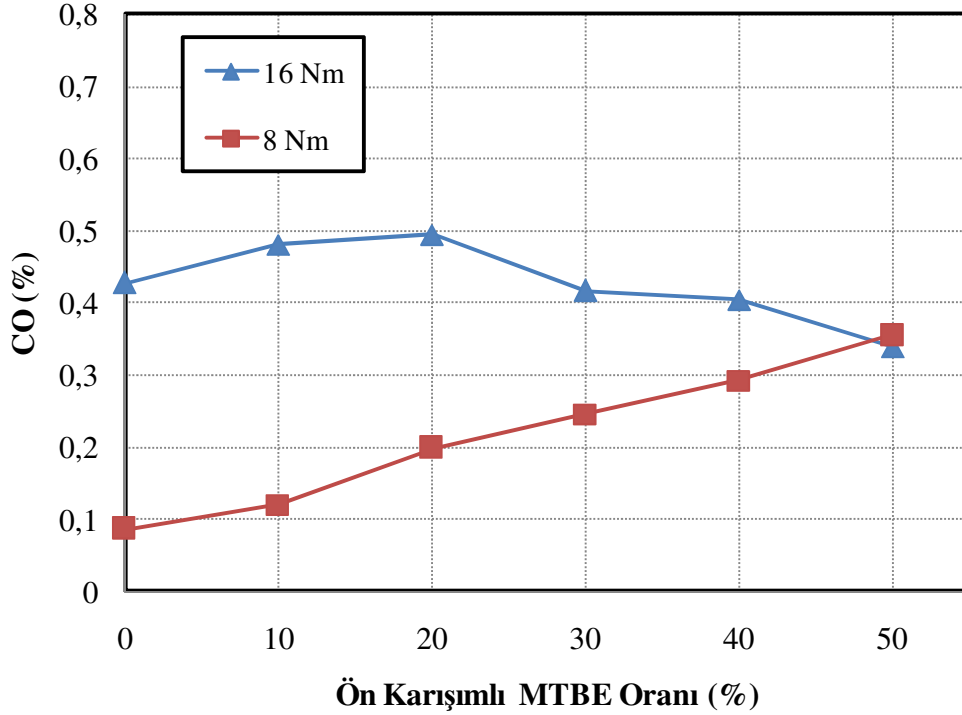
Çizelge 4.4'te MTBE yakıtının ısı değeri, yoğunluk ve kinematik viskozitesi No.2 dizel yakıtına oranla çok düşük olduğu görülmektedir. Bu sebeple dizel yakıtı ile MTBE yakıtının dizel motorunda aynı anda kullanılması silindir içi (silindir cidarları, segman yarıkları ve piston tepesi) sıcaklıkları azalmaktadır. İlk alev çekirdeğinin oluşmasıyla elde edilen alev demeti, silindir içerisindeki düşük sıcaklıklı bölgelere ulaştığında aniden sönmekte ve bu durumda ön karışimli MTBE yakıtı ile elde edilen HC emisyonlarında Şekil 5.3'te görüldüğü gibi artış meydana gelmektedir.

5.4. CO Emisyonları

Şekil 5.4'de ön karışimli MTBE yakıt oranına karşılık CO emisyonu değişimleri görülmektedir. Özellikle yarım yükte yapılan deneylerde ön karışimli MTBE yakıt oranının artışı ile CO emisyonları sürekli bir artış göstermektedir. Klasik dizel çalışmasında, tam yükte yapılan deneylerde CO emisyonları % 0,43 iken, % 20 ön karışimli yakıt oranına kadar % 13,9 artarak % 0,49'a kadar çıkmaktadır. Bu oranın üzerinde ön karışimli yakıt miktarının arttırılması ile CO emisyonları düşme eğilimi göstermekte, % 50 ön karışimli MTBE oranında % 0,34'e kadar düşmektedir. Yarım yük çalışma şartlarında ise CO emisyonlarında sürekli bir artış görülmektedir. Klasik dizel çalışmasında CO emisyonları % 0,08 iken, % 50 ön karışimli MTBE oranında % 0,35'e kadar artmaktadır.

CO emisyonu önemli ölçüde silindir sıcaklığına bağlıdır. Silindir sıcaklığı arttıkça CO emisyonunda azalma meydana gelir. Bununla birlikte silindir sıcaklığı oldukça düşük olduğunda (1300 K'den daha düşük) CO miktarı sıcaklığın düşmesiyle birlikte düşer [79]. Genelde HCCI çalışmasında karışımın zengin sınıra yakın ve/veya erken yanma aşamasında CO emisyonları azalmaktadır. Fakat karışımın fakir sınıra yakın ve/veya geç yanma aşamasında CO emisyonları artmaktadır. Çok düşük motor yüklerinde CO emisyonlarının arttığını vurgulamak gerekir. Bu genellikle yakıt/hava

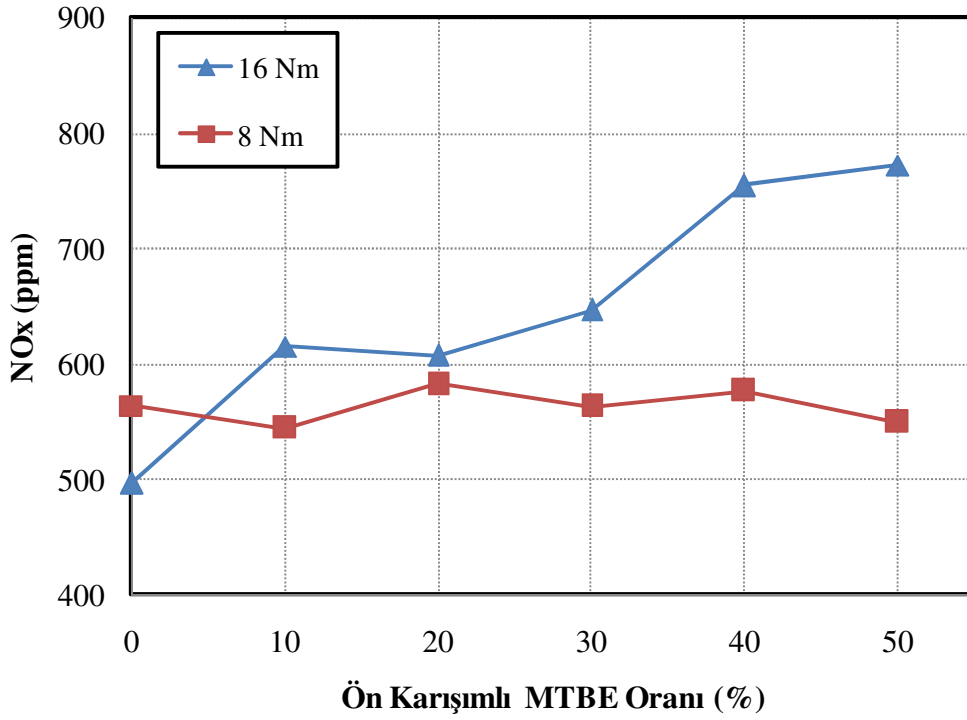
karışımının tutuşamamasından dolayı geniş miktarda yakıtın oksitlenmeden egzozdan doğruca atılmasından kaynaklanmaktadır [9].



Şekil 5.4. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak CO emisyonlarının değişimi

5.5. NO_x Emisyonları

Şekil 5.5’de NO_x emisyonlarının ön karışımli MTBE yakıt oranına bağlı olarak değişimleri görülmektedir. Tam yük çalışma şartlarında ön karışımli MTBE oranındaki artışa bağlı olarak NO_x emisyonları artma eğilimi göstermektedir. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında NO_x miktarı 496 ppm iken MTBE enjeksiyonu ile % 50 ön karışımli MTBE oranında % 55,56 artarak 771,6 ppm’ye çıkmaktadır. Yarım yük çalışma şartlarında ise MTBE enjeksiyonu ile % 10 ön karışımli MTBE oranında NO_x miktarında önce %3,44’lik bir azalma ardından % 6,95’lik artma ve % 5,65’lik bir azalma meydana gelmiştir. Yük azaldıkça yükü karşılamak için silindire sevk edilen yakıt miktarı azaldığı için yanma sonu basıncı ve sıcaklığı nispeten daha düşük olmakta ve NO_x emisyonunda buna bağlı olarak az miktarda bir değişim görülmektedir.



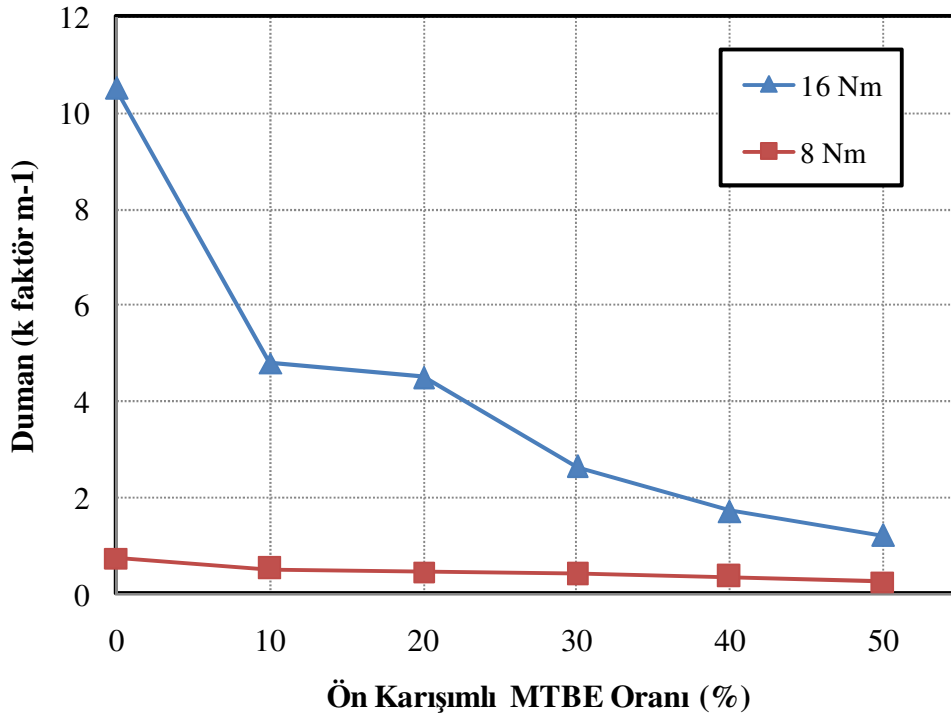
Şekil 5.5. Ön karışıklı MTBE oranına bağlı olarak NO_x emisyonlarının değişimi

Silindir içi sıcaklığın 1800 K'nin üzerine çıktığında, NO_x oluşumunda büyük bir artış meydana gelmektedir. Bunun yanında NO_x oluşumunu, karışımın bu sıcaklığın üzerinde kalma süresi ve yanma odasındaki bölgesel O₂ konsantrasyonu etkilemektedir. Tam yük çalışma şartlarında, silindir içerisine püskürtülen No.2 dizel yakıt miktarının ve bunun yanında ön karışıklı MTBE yakıt oranında da artışına bağlı olarak yanma odasındaki bölgesel O₂ konsantrasyonu artmaktadır. Bu etkinin tam yük çalışma şartlarındaki NO_x oluşum miktarının artmasına katkıda bulunduğu değerlendirilmektedir.

5.6. Duman Emisyonları

Şekil 5.6'da ön karışıklı MTBE oranına bağlı olarak duman emisyonlarının değişimi görülmektedir. Kısmi HCCI çalışmasında her motor yükünde ön karışıklı MTBE değişimine bağlı olarak duman emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında duman miktarı 10,5 iken MTBE

enjeksiyonu ile % 50 ön karışımli yakıt oranında hızlı bir azalma ile (% 88,38) 1,22'ye düşmektedir. Yarım yükte ise azalma miktarı daha yatay bir seyir göstermektedir. Belirli bir ön karışımli MTBE oranında motor momenti azaldıkça silindire sevk edilen yakıt miktarı da azaldığından duman miktarı da azalmaktadır.



Şekil 5.6. Ön karışımli MTBE oranına bağlı olarak duman emisyonlarının değişimi

Dizel yanmasında duman emisyonu enjektörden yakıt püskürtüldükten sonra yakıt demetinin tutuşmaya başlamasıyla iç kısımlarında meydana gelen zengin karışım bölgelerinde karbon partiküllerinin birbirine tutunmasıyla meydana gelmektedir. HCCI yanmasında hazırlanan ön karışım, silindirde homojen fakir karışım oluşturmakta ve yanma eşzamanlı olarak tüm silindirde bir anda başladığından, is oluşumunda azalma meydana gelmektedir. Ayrıca, MTBE yakıtının kimyasal yapısında bulunan O_2 molekülünün, is emisyon oluşumunun azalmasında etkin bir rol oynadığı düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, HCCI-DI dönüşümü yapılmış, tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir motorda, ön karışimli metil tersiyer bütül eter (MTBE) dolgusunun motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Motorda maksimum moment devri olan 2200 d/d'da, tam yük (16 Nm) ve yarım yük (8 Nm) çalışma koşullarında elde edilen moment değerleri % 10 – 50 oranında, % 10 aralıklarla azaltılmış, momentteki azalma emme manifolduna püskürtülen MTBE yakıtı ile tamamlanarak, iki farklı motor yükünde deneyler yapılmıştır. Bu koşullar altında her bir ön karışimli MTBE yakıt oranı için özgül yakıt tüketimi, termik verim ve egzoz emisyon (HC, CO, NO_x ve duman) değişimleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Her iki motor yükünde yapılan deneylerde, ön karışimli MTBE yakıt oranı % 50'ye kadar arttırılmıştır. Bu yakıt oranının üzerinde motorda vuruntu oluşması sebebiyle ön karışimli yakıt oranı % 50 ile sınırlandırılmıştır.
- Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında özgül yakıt tüketimi 311,86 g/kWh iken MTBE enjeksiyonu ile % 10 ön karışimli MTBE oranında 265 g/kWh'a düşmekte, % 10 ön karışimli yakıt oranının üzerindeki değerlerde belirgin bir değişim görülmemektedir. Yarım yük çalışma şartlarında, ön karışimli MTBE yakıtının arttırılmasına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi sürekli bir artış göstermiştir.
- Ön karışimli MTBE yakıt oranı ile termik verimin değişimi incelendiğinde, tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında termik verim miktarı 27,2 iken MTBE enjeksiyonu ile % 50 ön karışimli MTBE oranında termik verim % 27,16 artarak 34,62'ye çıkmıştır. Yarım yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışmasında termik verim % 27,17 iken MTBE enjeksiyonu ile % 50 ön karışimli MTBE oranında termik verim % 7,52 azalarak % 25,12'ye düşmüştür.

- Her iki motor yükünde yapılan deneylerde ön karışimli MTBE yakıtındaki artışa bağlı olarak HC emisyonları artmaktadır. Klasik dizel çalışması ile karşılaştırıldığında, tam yük çalışma şartlarında HC emisyonları % 40 ön karışimli yakıt oranında % 53,5 artmıştır. Yarım yük çalışma şartlarında ise klasik dizel çalışmasına göre en fazla artış % 50 ön karışimli MTBE oranında % 243,97 olmuştur.
- CO emisyonu değişimleri incelendiğinde, özellikle yarım yükte yapılan deneylerde ön karışimli MTBE yakıt oranının artışı ile CO emisyonları sürekli bir artış göstermektedir. Klasik dizel çalışmasında CO emisyonları % 0,08 iken, % 50 ön karışimli MTBE oranında % 0,35'e kadar artmaktadır. Tam yükte yapılan deneylerde ise CO emisyonları % 20 ön karışimli yakıt oranına kadar artmakta, bu oranın üzerinde düşme eğilimi göstermektedir.
- NO_x emisyonları tam yük çalışma şartlarında yapılan deneylerde ön karışimli MTBE oranındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. Klasik dizel çalışması ile mukayese edildiğinde % 50 ön karışimli MTBE oranında NO_x emisyonlarında % 55,56'lık bir artış olmuştur. Yarım yük çalışma şartlarında ise az bir değişimle nispeten yatay bir eğilim göstermektedir.
- Ön karışimli MTBE oranına bağlı olarak duman emisyonlarının değişimi incelendiğinde, kısmi HCCI çalışmasında her iki motor yükünde de ön karışimli MTBE değişimine bağlı olarak duman emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Tam yük çalışma şartlarında klasik dizel çalışması ile mukayese edildiğinde % 50 ön karışimli yakıt oranında duman miktarı % 88,38 azalma gösterirken, yarım yükte ise azalma miktarı daha yatay bir seyir göstermektedir.

Tek silindirli, dört zamanlı, HCCI-DI dönüşümü yapılmış dizel motorunda ön karışimli MTBE dolgusuna bağlı olarak motor performansı ve egzoz emisyonlarının değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada kısmi-HCCI çalışması için motorda herhangi

bir değişiklik yapılmadan sadece emme portuna bir manifold ve düşük basınçlı yakıt sistemi ile MTBE yakıtı püskürtülmüştür. Vuruntulu çalışma sebebiyle ön karışımı yakıt oranı % 50 ile sınırlandırılmıştır. Motorda, emme havası ısıtma düzeneği, silindir içi veya harici EGR uygulaması, değişken supap mekanizması veya sıkıştırma oranı değişimi ile ön karışımı yakıt miktarı arttırılabilir veya belirli yük sınırlarında tamamen HCCI modunda çalıştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Jacobs, T.J., Assanis, D.N. , “The attainment of premixed compression ignition low-temperature combustion in a compression ignition direct injection engine”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31: 2913-2920 (2007).
2. Alkidas, A.C., “Combustion advancements in gasoline engines”, *Energy Conversion and Management*, 48(11): 2751-2761 (2007).
3. Zhao, H., “HCCI and CAI engines for the automotive industry”, *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge England, 1-18 (2007).
4. Can, Ö., “Bir DI dizel motorda etanol ön karışımli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-84 (2012).
5. Özden, C. M., “Homojen karışımli içten yanmalı motorlar”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-22 (2005).
6. Singh, A.P., Agarwal, A.K., “Combustion characteristics of diesel HCCI engine: An experimental investigation using external mixture formation technique”, *Applied Energy*, 99: 116–125 (2012).
7. Baumgarter, C., “Mixture formation in internal combustion engines”, *Springer*, Heat and Mass Transfer Series, (2006).
8. İnternet: <http://ccrc.kaust.edu.sa/Pages/HCCI.aspx>
9. Xingcai, L., Yuchun, H., Linlin, Z., Zhen, H., “Experimental study on the auto-ignition and combustion characteristics in the homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion operation with ethanol/n-heptane blend fuels by port injection”, *Fuel*, 85(17-18): 2622–2631 (2006).
10. Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R., Kinoshita, E., “The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review”, *Fuel*, 87 (7): 1014-1030 (2007).
11. Yap, D., Karlovsky, J., Megaritis, A., Wyszynski, M.L., Xu, H., “An investigation into propane homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine operation with residual gas trapping”, *Fuel*, 84 (18): 2372–2379 (2005).
12. Megaritis, A., Yap, D., Wyszynski M.L., “Effect of water blending on bioethanol HCCI combustion with forced induction and residual gas trapping”, *Energy*, 32 (12): 2396-2400 (2007).

13. Megaritis, A., Yap, D., Wyszynski M.L., “Effect of inlet valve timing and water blending on bioethanol HCCI combustion using forced induction and residual gas trapping”, 87 (6): 732-739 (2008).
14. Papagiannakis R.G., Hountalas, D.T., “Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas”, *Energy Conversion and Management*, 45 (18-19): 2971-2987 (2004).
15. Soyulu S., “Examination of combustion characteristics and phasing strategies of a natural gas HCCI engine”, *Energy Conversion and Management*, 46: 101-119 (2005).
16. Yao, M., Chen, Z., Zheng, Z., Zhang, B., Xing, Y., “Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol”, *Fuel*, 85: 2046-2056 (2006).
17. Onishi, S., Jo S.H., Shoda K. , Jo P.D., Kato S., “Active thermo-atmospheric combustion (ATAC) – a new combustion process for internal combustion engines”, *SAE Technical Paper*, No: 790501 (1979).
18. Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., ve Takeuchi, Y., “A Study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion”, *SAE Technical Paper*, No: 790840 (1979).
19. Najt, P. M. ve Foster, D. E., “Compression-ignited homogeneous charge combustion”, *SAE Technical Paper*, No: 830264 (1983).
20. Thring, R. H., , “Homogeneous-charge compression ignition (HCCI) engines”, *SAE Technical Paper*, No: 892068 (1989).
21. Çınar, C., Karabulut, H., Yücesu, H. S., Topgöl, T., Okur, M., Öztürk, E., Can, Ö., “Homojen Karışımli Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorun Tasarımı ve İmalatı Üzerine Bir Araştırma”, *Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu*, Ankara, (2008).
22. İnternet: “GM HCCI fuel efficient system”, http://www.motortrend.com/features/auto_news/2008/112_0806_gm_hcci_fuel_efficient_system/
23. İnternet: “Homogeneous charge compression ignition”, http://en.wikipedia.org/wiki/Homogeneous_charge_compression_ignition.
24. Ma, J., Lu, X., Ji., L., Huan, Z., “An Experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel”, *International Journal of Thermal Sciences*, 47: 1235-1242 (2008).

25. Kim, D.S., Kim, M.Y., Lee, C.S., "Reduction of nitric oxides and soot by premixed fuel in partial HCCI engine", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 128: 497505 (2006).
26. Internet: Tomita, E., "Dual fuel HCCI combustion - High octane and high cetane number fuels", <http://ieacombustion.com/Documents/1.6A5%20Tomita%20HCCI%20Fuels.pdf>
27. Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., Aijoshizawa, E., "Ultra-clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards", *SAE Paper*, No: 2001-01-0200 (2001).
28. Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., Ma, T., "Experimental studies on controlled auto-ignition (CAI) combustion of gasoline in a 4-stroke engine", *SAE Paper*, No: 2001- 01-1030 (2001).
29. Drake, M.J., Ratcliffe, J.W., Blint, R.J., Carter, C.D., Laurendeau, N.M., "Measurements and modelling of flamefront no formation and superequilibrium radical concentrations in laminar high-pressure premixed flames", *23th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, Pittsburgh, 387-395 (1990).
30. Peng, Z., Zhao, H., Ladommatos, N., "Effects of air/fuel rates on HCCI combustion of n-heptane, a diesel type fuel", *SAE Paper*, No: 2003-01-0747 (2003).
31. Pucher, G.R., Gardiner, D.P., Bardon, M.F., Battista, V., "Alternative combustion systems for piston engines involving homogeneous charge compression ignition concepts - a review of studies using methanol, gasoline and diesel fuel", *SAE Paper*, No: 962063 (1996).
32. Stranglmaier, R.H., Roberts, C.E., "Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, compromises, and future engine applications", *SAE Paper*, No: 1999-01-3682 (1999).
33. Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R., Dec, J., "The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions", *SAE Paper*, No: 2002-01-1923 (2002).
34. Fuerhapter, A., Piock, W.F., Fraidl, G.K., "CSI - Controlled auto ignition - the best solution for the fuel consumption versus emission trade off", *SAE Paper*, No: 2003-01- 0754 (2003).
35. Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J., Sato, Y., "An experimental study on premixed- charge compression ignition gasoline engines", *SAE Paper*, No: 960081 (1996).

36. Harada, A., Shimazaki, N., Satoru, S., Miyamoto, T., Akagawa, H., Tsujimura, K., "The effects of mixture formation on premixed lean diesel combustion", *SAE Paper*, No: 980533 (1998).
37. Stranglmaier, R.H., Li, J., Matthews, R.D., "The effect of in-cylinder wall wetting on the HC emissions from SI engines", *SAE Paper*, No: 1999-01-0502 (1999).
38. Owen, K., "Automotive Fuels Reference Book, 2nd edition", (1995).
39. He, D., "Contribution Feedstock and Fuel Transportation to Total Fuel-Cycle Energy Use and Emissions", *SAE Technical Paper*, No: 2000-01-2976 (2000).
40. Hamdan, M. A. and Al-Subaih, T. A., "Improvement of Locally Produced Gasoline and Studying its Effects on Both the Performance of the Engine and the Environment", *6. International Combustion Symposium*, İstanbul, 11-25 (1999).
41. Ziyang, Z., Hidajat, K., Ray, A. K., "Determination of Adsorption and Kinetic Parameters for Methyl tert-butyl Ether Synthesis from tert-butyl alcohol and methanol", *Journal of Catalysis*, 200: 209-221 (2001).
42. Sezer, İ. ve Bilgin, A., "Benzine MTBE Katılmasının Motor Performansına Etkisi", *7. Uluslararası Yanma Sempozyumu*, Ankara, 205-216 (2002).
43. Ahmed, F.E., "Toxicology and human health effects following exposure to oxygenated or reformulated gasoline", *Toxicology Letters*, 121: 89-113 (2001).
44. Hamid, H., Ali, M.A., "Handbook of MTBE and Other Gasoline Oxygenates", *Marcel Dekker*, New York, (2005).
45. Wang, X., Yang, Y., Shang, S. and Feng, X., "Study of the Performance of MTBE Blended Unleaded Gasoline", *SAE Paper*, No: 871268 (1987).
46. Al- Dawood, A.M., "Effect of Blending MTBE, Methanol, or Ethenol with Gasoline on Performance and Exhaust Emission of SI Engines", *MSc Thesis, King Fahd University, Department of Mechanical Engineering*, Dhahran-Saudi Arabia, 214-215 (1998).
47. Hamdan, M.A., Al-Subaih, T.A., "Improvement of Locally Produced Gasoline and Studying its Effects on Both the Performance of the Engine and the Environment", *Energy Conversion and Management*, 43: 1811-1820 (2002).
48. Yokota, H., Kudo, Y., Nakajima, H., Kakegawa, T., and Suzuki T., "A new concept for low emission diesel combustion", *SAE Paper* 970891 (1997).
49. Gray, A.W., Ryan, T.W. "Homogeneous charge compression ignition (HCCI) of diesel fuel". *SAE Paper*, 971676 (1997).

50. Turushima, T., Shimazaki, N., Asaumi, Y., “Gas sampling analysis of combustion processes in a homogeneous charge compression ignition engine”, *International Journal of Engine Research*, 1(4): 337-352 (2000).
51. Lee, C.S., Lee, K.H., Kim, D.S. “Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel”, *Fuel*, 82: 553–560 (2003).
52. Çanakçı, M., Sayın, C., Özsezen, N., “A methodology for a HCCI-Gasoline engine design using the parameters of double injection and intake air temperature”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16(4): 811-824 (2003).
53. Fang, J., Huang, Z., Qiao, X., Zhong, Y., Song, J., “Study on a pre-mixed charge compression ignition engine by dimethoxymethane port injection”, *Proc. Inst. Mech. Engrs*, 218 (2003).
54. Iida, M., Hayashi, M., Foster, D.E., Martin, J.K., “Characteristics of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine operation for variations in compression ratio, speed, and intake temperature while using n-butane as a fuel”, *Transactions of the ASME*, 125: 472-478 (2003).
55. Kim, D.S., Kim, M.Y., Lee, C.S., “Combustion and emission characteristics of partial homogeneous charge compression ignition engine”, *Combust. Sci. andTech.*, 177: 107-125 (2005).
56. Tiegang, H., Shenghua, L., Longbao, Z., Chi, Z., “Combustion and emission characteristics of a homogeneous charge compression ignition engine” *Proc. IMechE*, 219: 1133-1139 (2005).
57. Lü, Z.C., Chen, W., Huang, Z., “A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 1. The basic characteristics of HCCI combustion”, *Fuel*, 84: 1074-1083 (2005).
58. Lü, X.C., Chen, W., Huang, Z., “A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 2: Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion”, *Fuel*, 84: 1084-92 (2005).
59. Hou, Y.C., Lu, X.C., Zu, L.L., Ji, L.B., Huang, Z., “Effect of high-octane oxygenated fuels on n-heptane-fueled HCCI combustion”, *Energy & Fuels*, 20: 1425-1433 (2006).
60. Lu, X.C., Yuchun, H., Linlin, Z., Zhen, H., “Inhibition of autoignition and combustion rate for n-heptane homogeneous charge compression ignition combustion by methanol additive”, *Proc. IMechE*, 220: 1629-1639 (2006).

61. Kim, D.S., Lee, C.S., “Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR”, *Fuel*, 85 (5-6): 695-704 (2006).
62. Ma, J., Lü, X., Ji, L., Huang, Z., “An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel”, *International Journal of Thermal Sciences*, 47: 1235–1242 (2008).
63. Lu, X., Ji, L., Zu, L., Hou, Y., Huang, C., Huang, Z., “Experimental study and chemical analysis of n-heptane homogeneous charge compression ignition combustion with port injection of reaction inhibitors”, *Combustion and Flame*, 149: 261–270 (2007).
64. Çanakçı, M., “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 (2008).
65. Liu, H., Yao, M., Zhang, B., Zheng, Z., “Influence of fuel and operating conditions on combustion characteristics of a homogeneous charge compression ignition engine”, *Energy & Fuels*, 23: 1422–1430 (2009).
66. Jung, G.S., Sung, Y.H., Cho, B.C., Lim, M.T., “Effects of mixture stratification on HCCI combustion of DME in a rapid compression and expansion machine”, *International Journal of Automotive Technology*, 10 (1) : 1–7 (2009).
67. Kim, M.Y., Lee, J.H., Lee, C.S., “Combustion characteristics and NO_x Emissions of a dimethyl-ether-fueled premixed charge compression ignition engine”, *Energy & Fuels*, 22: 4206-4212 (2008).
68. Lu, X., Ji, L., Hou, Y., Zu, L., Huang, Z., “Inhibition effect of doping methyl tert-butyl ether compounds to n-heptane on homogenous charge compression ignition combustion”, *Energy Conversion and Management*, 49: 1705-1714 (2008).
69. Can, Ö., Çınar, C., Şahin, F., “Ön karışımli benzin dolgusunun HCCI-DI motorunda yanma ve egzoz emisyonlarına etkilerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24: 229-236 (2009).
70. Çınar, C., Can, Ö., Şahin, F., Yücesu, H.S., “Effects of premixed diethyl ether (DEE) on combustion and exhaust emissions in a HCCI-DI diesel engine”, *Applied Thermal Engineering*, 30: 360-365 (2010).
71. Ghazikhani, M., Kalateh, M.R., Toroghi, Y.K., Dehnavi, M., “An Experimental study on the effect of premixed and equivalence ratios on CO and HC emissions of dual fuel HCCI engine”, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 40: 129-135 (2009).

72. Can, Ö., Yücesu, H. S., Çınar, C., Baydır, Ş. A., Şahin, F., “HCCI-DI Motorun Düzenli Çalışabilme Limitleri ve Egzoz Emisyonları (Kısım 1: Ön Karışımli Etanol Dolgusunun Etkileri)”, **11. Uluslararası Yanma Sempozyumu**, Saraybosna, (2010).
73. Can, Ö., Yücesu, H. S., Çınar, C., Baydır, Ş. A., Şahin, F., “HCCI-DI Motorun Düzenli Çalışabilme Limitleri ve Egzoz Emisyonları (Kısım 2: EGR'nin Etkileri)”, **11. Uluslararası Yanma Sempozyumu**, Saraybosna, (2010).
74. Yücesu, H.S., Can, Ö., Çınar, C., Yavuzcan, H.G., Önder, M., “Bir Dizel Motorunda Kısmi ve Tam HCCI Uygulaması”, **6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'11)**, Elazığ (2011).
75. Lu, X., Zhou, X., Ji, L., Yang, Z., Han, D., Huang, C., Huang, Z., “Experimental studies on the dual-fuel sequential combustion and emission simulation”, **Energy**, 51: 358-373 (2013).
76. Yücesu, H. S., Çanakçı, M., Çınar, C., Can, Ö., Şahin, F., Öztürk, E., Baydır, Ş. A., Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda (HCCI) Yanma, Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarının İncelenmesi, Tübitak Projesi, Kod No: 108M228, (2011).
77. İnternet:” Cussons P8160 single cylinder engine test bed” http://www.cussons.co.uk/education/products/automotive technology/single_cylinder_engine_test_beds/p8160_single_cylinder_engine_test_bed.asp
78. Türkcan, A., “Bir dizel motorun performans parametrelerinin deneysel tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 8-9 (2006).
79. Yao, M., Zhang, B., Zheng, Z., Chen, Z., “Experimental Study on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion with Primary Reference Fuel”, **Combust. Sci. and Tech.**, 179: 2539-2559 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKCAN, Nuri
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.04.1979 Torul/Gümüşhane
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (266) 221 23 50
 Faks : -
 e-mail : nuriakcan@gazi.edu.tr

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğt. ABD	2013
Lisans	Marmara Üniversitesi / Makine Eğt. ABD	2001
Lise	Çankırı Astsb. Haz. Okulu	1997

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

2001-2009	K. K. Astsubay Meslek Yüksek Okulu	Öğretim Elemanı
2009-2011	Kara Harp Okulu	Müdavim
2011-	K. K. Astsubay Meslek Yüksek Okulu	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Basketbol