
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ (HCCI) BİR MOTORDA YANMA PARAMETRELERİNİN İYON AKIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Merve ATAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2019

Merve ATAY tarafından hazırlanan "HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ (HCCI) BİR MOTORDA YANMA PARAMETRELERİNİN İYON AKIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Fatih ŞAHİN

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi ……..……..

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Seyfi POLAT

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hitit Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 28/10/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

……..…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

……..
Merve ATAY
28/10/2019

HOMOJEN DOLGULU SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ (HCCI) BİR MOTORDA YANMA PARAMETRELERİNİN İYON AKIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Merve ATAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2019

ÖZET

HCCI motorlar yüksek termik verim ve egzoz emisyon standartlarını karşılayabilecek avantajlara sahip bir yanma modu olarak gelecek vaat etmektedir. İdeal HCCI motorlarda kendi kendine tutuşma ve yanma eş zamanlı olarak gerçekleşmekte, hızlı bir ısı dağılım oranı görülmektedir. Buji ile ateşlemeli motorlarda ve sıkıştırmayla ateşlemeli motorlarda, yanma başlangıcı ve yanma periyotları doğrudan kontrol edilebilir. Bununla birlikte HCCI motorlarda yanma silindirdeki sıcaklığa göre kimyasal kinetik tarafından kontrol edilebilir. Bu yüzden HCCI motorlarda direk kontrol yapılamaz. Bu aşamada, iyon akımı yanma bilgisini belirlemek için kullanışlıdır. Buji üzerine seri bir direnç yardımıyla uygulanan DC ön gerilim sayesinde oluşan iyon akımı ölçülebilmektedir. Oluşan bu akım iyon veya iyonlaşma akımı olarak adlandırılır ve seri direnç üzerinden gerilimin ölçülmesiyle sinyale dönüştürülmüş olur. İyonların türü ve miktarı yanma özelliklerine bağlıdır. İyonizasyon akımı basınca, sıcaklığa, hava/yakıt oranına, motor yüküne, yakıt özelliklerine ve yanma süresine bağlıdır. İyon akımı ölçümü genellikle mevcut ateşleme sistemi veya ilave ateşleme bujisi ile yapılır. İyon akımı doğrudan silindir içi yanma işlemini yansıtır. Tekleme ve vuruntu tespitinin doğrudan yapılabilmesini sağlar. Bu çalışmada, HCCI motorlarda yanma parametreleri ile iyon akımı arasındaki ilişkiyi incelemek üzere pratik bir iyon akımı ölçüm sistemi ve silindir içi basınç bilgisini esas alan yanma analizi yazılımı geliştirilmiştir. Test koşulları olarak farklı motor devir ve yükleri seçilmiştir. Sonuçlara göre, iyon akımı sinyali ve yanma parametreleri arasında bir korelasyon olduğu gözlenmiştir

Bilim Kodu	:	93008
Anahtar Kelimeler	:	İyon akımı, HCCI motor, yanma analizi
Sayfa Adedi	:	81
Danışman	:	Doç. Dr. Fatih ŞAHİN

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF COMBUSTION PARAMETERS ON ION CURRENT IN HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION ENGINE

(M. Sc. Thesis)

Merve ATAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2019

ABSTRACT

HCCI engines promise to be a combustion mode with the advantages that can meet high thermal efficiency and exhaust emission standards. In ideal HCCI engines, self-ignition and combustion occur simultaneously and a rapid heat dissipation rate is seen. In spark ignition engines and compression-ignition engines, starting of combustion and combustion periods can be controlled directly. On the other hand, the combustion can be controlled by chemical kinetics according to in cylinder temperature of HCCI engines. This means that direct control of combustion is not possible in HCCI engines. At this stage, the ion current is useful for determining combustion information. The ion current can be measured by a series resistor and a DC bias source. This current is called the ion or ionization current and is converted into a signal by measuring the voltage across the series resistor. The type and amount of ions depends on combustion characteristics. The ionization current depends on the pressure, temperature, air / fuel ratio, engine load, fuel characteristics and combustion duration. Ion current is usually measured with the existing ignition system or with a measurement spark plug. The ion current reflects to combustion in the cylinder directly. It enables detection of misfire and knocking directly. In this study, a practical ion current measurement system and combustion analysis software based on in-cylinder pressure information have been developed to investigate the relationship between combustion parameters and ion current in HCCI engines. Different engine speeds and loads were selected as test conditions. According to the results, there is a correlation between the ion current signal and the combustion parameters

Science Code : 93008

Key Words : Ion current, HCCI engine, combustion analysis

Page Number : 81

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Fatih ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini şahsımla paylaşan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Fatih ŞAHİN'e, deneysel çalışmalar sırasında yardım eden Öğr. Gör. Dr. Alper CALAM ve Arş. Gör. Serdar HALİS'e, çalışmaya katkı sunan hocam Doç. Dr. Seyfi POLAT'a, yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösterip destek olduğu için sevgili babam Mustafa DUMAN'a, yüksek lisansa devam etmem için hasta yatağındayken beni motive etmiş olan biriciğim, Rahmetli annem Filiz DUMAN'a, çalışmalarım sırasında ümit verdiği için canım abim Miraç DUMAN'a, her daim yanımda olduğunu hissettiren sevgili eşim Bilal ATAY'a ve yoğun geçen tez dönemimde yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. HCCI MOTORLAR 5

2.1. Tarihçesi 6

2.2. HCCI Motorlarda Yanma 7

2.3. HCCI Motorların Performans Karakteristiği 12

2.3.1. Sıkıştırma oranın etkisi 12

2.3.2. Emme havası giriş sıcaklığının etkisi 14

2.3.3. Supap zamanlaması ve kalkma miktarının etkisi 17

2.3.4. Kullanılan yakıtın etkisi 18

2.3.5. Motor hızının etkisi 19

2.4. HCCI Motorların Emisyon Karakteristiği 20

2.4.1. HC, CO ve CO_2 emisyonları 21

2.4.2.NO_x ve is emisyonları 22

3. İYON AKIMI 23

Sayfa

4. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....27

5. MATERYAL METOD 39

5.1. HCCI Dönüşümü Yapılan Deney Motoru ve Deney Ekipmanları.....39

5.1.1. Deney motoru.....39

5.1.2. Dinamometre.....41

5.1.3. İndikatör sistemi.....42

5.1.4. Sıkıştırma oranının değiştirilmesi 45

5.1.5. Emme havası giriş sıcaklığının değiştirilmesi.....46

5.1.7. Emisyon analiz cihazı 46

5.1.8. İyon akımı ölçüm devresi.....47

5.2. Deney Verilerinin Analizi 48

5.2.1. Verilerin işlenmesi 48

5.2.2. Yanma analizi yazılımı 50

5.2.3. Motor geometrisi.....56

5.2.3. İş ve indike ortalama efektif basıncın hesaplanması.....59

5.2.4. Çevrimsel farklılıkların analizi 60

5.2.5. Politropik indeksin belirlenmesi 62

5.2.6. Silindir duvarlarına iletilen ısı miktarının hesaplanması 62

5.2.7. Isı yayılım analizi.....64

6. DENEY SONUÇLARI 67

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 73

KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Motor özellikleri 40

Çizelge 5.2. Basınç sensörü teknik özellikleri 43

Çizelge 5.3. Enkoder teknik özellikleri.....45

Çizelge 5.4. Emisyon cihazı teknik özellikleri 47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. HCCI yanması....8

Şekil 2.2. İki fazlı ısı yayılım profili....10

Şekil 2.3. Dizel benzeri yakıtlarda oluşan ısı yayılım profili....11

Şekil 2.4. Farklı motor yüklerinde ve SO: 10.7 olan motorun silindir basınç değişimi 12

Şekil 2.5. Farklı motor yüklerinde ve SO: 14 olan motorun silindir basınç değişimi 13

Şekil 2.6. Farklı motor yüklerinde ve SO: 10,7 olan motorun silindir içi sıcaklık değişimi....13

Şekil 2.7. Farklı motor yüklerinde ve SO: 14 olan motorun silindir içi sıcaklık değişimi....14

Şekil 2.8. Farklı yakıt türleri için emme havası giriş sıcaklığının silidir basıncı, ısı dağılımı ve basınç artış oranı üzerindeki etkisi 15

Şekil 2.9. Krank açısına bağlı olarak 1,0 ve 1,2 HFK değerlerinde silindir basıncı ve ısı yayılım oranının değişimi 16

Şekil 2.10. Eşdeğerlik oranı (Φ) ve sıcaklığa göre emisyon oluşumları....21

Şekil 3.1. iyon akımı ölçüm tekniğinin devre diyagramı....26

Şekil 4.1. n-heptan için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyalleri 27

Şekil 4.2. PRF 77 için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyalleri 28

Şekil 4.3. Aulin ve arkadaşları tarafından yapılan iyon akım ölçüm devresi 30

Şekil 4.4. Farklı miktarlarda hava/yakıt oranları için ortalama sinyaller....31

Şekil 4.5. Farklı miktarlardaki yakıt için iyon akım genlikleri....32

Şekil 4.6. EGR kullanıldığı durum ve normal durum için iyon akımı ölçümleri 35

Şekil 4.7. COV(IMEP) ile COV(M) arasındaki bağlantı....36

Şekil 4.8. COV(IMEP) ile Mean (M) arasındaki bağlantı 36

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.9. 7 farklı noktadan iyon akımı ve bir noktadan da silindir içi basınç ölçümü.....37

Şekil 5.1. Deney düzeneği 41

Şekil 5.2. Enkoder çıkış sinyalleri 44

Şekil 5.3. DAQ bağlantı şematiği 45

Şekil 5.4. İyon akımı ölçüm devresi 48

Şekil 5.5. Ham silindir içi basınç verilerinde meydana gelen kayma.....49

Şekil 5.6. Arayüz blok diyagramı 56

Şekil 5.7. Motor Geometrisi.....57

Şekil 5.8. Çevrim boyunca yapılan iş ve kapalı indikatör diyagramı 60

Şekil 5.9. Silindirde oluşan ısı transferi 63

Şekil 5.10. Tek bölgeli yanma modeli 65

Şekil 6.1. RON 40 yakıtı ile 800 d/d motor hızında farklı sıcaklık ve hava fazlalık katsayısı değerleri için iyon akımı sinyalleri 68

Şekil 6.2. RON 60 yakıtı ile 800 d/d motor hızında farklı sıcaklık ve lamda değerleri için iyon akımı sinyalleri 69

Şekil 6.3. Farklı sıcaklık ve motor devirlerinde RON 40 ve RON 60 yakıtları için iyon akımı sinyalleri 70

Şekil 6.4. Farklı sıcaklık, farklı motor yükleri ve farklı motor devirlerinde RON 40 ve RON60 yakıtları için iyon akım grafikleri.....71

Şekil 6.5. Farklı deney koşullarında RON 40 yakıtı için kümülatif ısı dağılımı ve iyon akımı sinyalleri 71

Şekil 6.6. Farklı deney koşullarında RON 60 yakıtı için kümülatif ısı dağılımı ve iyon akımı sinyalleri 72

Şekil 6.7. Farklı deney koşullarında CA50 ve maksimum iyon akımı açısı arasındaki uyum 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Deney motoru 39

Resim 5.2. Deney düzeneği, dinamometre ve kontrol paneli 42

Resim 5.3. İndikatör cihazı 43

Resim 5.4. Silindir basınç sensörü 43

Resim 5.5. Emme havası ısıtma sistemi....46

Resim 5.6. SUN MGA 1500 marka emisyon ölçüm cihazı 47

Resim 5.7. Motor ve deney parametreleri giriş arayüzü 51

Resim 5.8. Deney datalarına geçiş....51

Resim 5.9. Deney dataları arayüzü 52

Resim 5.10. Excel dosyasının yüklenmesi....52

Resim 5.11. Analiz penceresine geçiş....53

Resim 5.12. Arayüzde ‘Analiz’ penceresi 53

Resim 5.13. Arayüzde ‘Analiz’ penceresinde ‘iyon akımı’ ve ‘kümülatif ısı yayılımı grafiklerinin çizdirilmesi....54

Resim 5.14. Arayüzde ‘Analiz’ penceresinde ‘Verileri Excel’e Kaydet’ butonu....54

Resim 5.15. Export edilen excel deney dosyası....55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Anlık yanma odası yüzey alanı, [m^2**]**
$\mathbf{A_{pis}}$	Piston tepesi alanı, [m^2**]**
$\mathbf{c_m}$	Ortalama piston hızı, [m/s**]**
D	Silindir çapı, [m**]**
$\mathbf{h_g}$	Anlık ısı taşınım katsayısı, [W/m^2K**]**
L	Piston kol uzunluğu, [m**]**
n	Ardışık devir sayısı ve motor hızı, [1/min**]**
$\mathbf{n_c}$	Politropik sıkıştırma işlemi üst katsayısı
θ	Krank mili açısı, [derece**]**
P	Silindir gaz basıncı, [kPa**]**

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AÖN	Alt ölü nokta
ÜÖN	Üst ölü nokta
COV	Varyans katsayısı
DAQ	Veri aktarım kartı
°KA	Krank açısı, derece

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğine yol açan sera etkisi, atmosfere daha fazla sera gazı salındığı için dünya gündeminde ilk sıralarda yer almaktadır. Sera gazlarının olumsuz etkileri arasında aşırı sıcaklık artışları, kararsız hava koşulları, kuzey ve güney kutup bölgesindeki buzulların erimesinden kaynaklı yükselen okyanus seviyeleri gösterilebilir. 2000 yılında Dünya Kaynakları Enstitüsü tarafından hazırlanan rapora göre, sera gazlarının %14'lük kısmının ulaşımdan kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Aslında bu oran CO_2 emisyonlarının da %18'lik bir kısmını oluşturmakta ve küresel iklim değişikliğine sebep olacak derecededir. Bu oranlar ulaşım sektörü tarafından ciddiye alınmalı ve gerekli tedbirlerin alınmasını gerektirmektedir. Taşıtlardan kaynaklanan emisyonları azaltmak için alternatif çözümler araştırılmaktadır. İçten yanmalı motorların yüksek verimli ve çevreye daha az zararlı (kanserojen olan NO_x ve sera gazı oluşumunda büyük rol oynayan CO_2 emisyonları azaltılmasıyla) olması bir zorunluluk halini almıştır. Aynı zamanda yüksek termik verim ihtiyacını karşılamak için günümüz motorlarının düşük yakıt tüketimi, yüksek verimlilik ve düşük maliyete sahip olması gerekmektedir. Tüm bu gereksinimler araştırmaların alternatif yanma modları üzerine yoğunlaşmasına yol açmıştır. Alternatif yanma modları incelendiğinde homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme modunun ön plana çıktığı görülmektedir. Tüm bunları karşılayacak yeni bir yanma modu araştırılmış ve potansiyel aday olarak homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme (Homogeneous Charge Compression Ignition – HCCI) yanma modu gösterilmiştir [1-5].

HCCI motorlar daha fakir karışımlarla çalıştırıldıklarında, NO_x ve is emisyonlarında eş zamanlı olarak azalma gözlemlenmektedir. HCCI motorda yanma prosesi, hava, yakıt ve önceki çevrimden kalan yanma ürünlerinin oluşturduğu karışımın kendiliğinden tutuşana kadar sıkıştırılmasıyla elde edilir. HCCI motorlarda yakıt-hava karışımının otomatik tutuşması ve yanması eş zamanlı olarak gerçekleşmekte ve hızlı bir ısı yayılım profili ortaya çıkmaktadır. Isı yayılım profilini düzenlemek için HCCI motorların fakir veya seyreltilmiş karışımlarla çalıştırılması gerekmektedir. Benzinli motorlarda ise içeri alınan dolgu, yanma prosesinde alev cephesi vasıtasıyla yanmış ve yanmamış olarak iki bölgeden oluşmaktadır. Yanmanın kontrolü ise alev cephesinin ilerlemesi ile olmaktadır. HCCI yanması, benzinli veya dizel bir motorda yapılan değişikliklerle gerçekleştirilmektedir. Benzinli motorların bir özelliği olarak HCCI motorlarda yakıt ve hava yanma odası

içerisinde veya emme manifoldunda karıştırılabilmektedir. İlk olarak, yanma odası içerisine alınmadan önce karıştırılan yakıt-hava ön karışım halinde sıkıştırılır. Daha sonra, sıkıştırma prosesinin sonuna doğru sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda olduğu gibi otomatik ateşleme yolu ile başlar. Sıkıştırma prosesinin başında, otomatik ateşleme prensibi için dolgunun sıcaklığını arttırmak gerekmektedir. Klasik buji ile ateşlemeli motorlarda HCCI dönüşümü gerçekleştirmek ve yanma odası içerisinde otomatik tutuşmayı sağlamak için sıkıştırma oranının arttırılması veya emme havasının ısıtılması zorunludur [6,7].

HCCI yanma modu yakıt ekonomisini geliştirmek ve NO_x emisyonlarını azaltmak için önemli bir potansiyele sahiptir. Buji ile ateşlemeli benzinli motorlar ve yakıt enjeksiyonlu dizel motorlarda yanma başlangıcı ve yanma periyotları direk olarak kontrol edilebilir. Fakat HCCI motorlarda yanma silindirdeki sıcaklığa göre kimyasal kinetik tarafından kontrol edilebilir. Bu yüzden HCCI motorlarda yanmanın başlangıcı kontrol edilemez. Bu durum HCCI yanma modunun en önemli dezavantajlarından biridir [3,8].

Genel olarak, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR), emme havasının ısıtılması, aşırı doldurma veya değişken sıkıştırma oranı (VCR) gibi HCCI yanmasını kontrol etmek için birkaç dolaylı yol vardır. HCCI motorlarda yanma durumunun geri bildirimi çok önemlidir. Çünkü yanma işlemi sırasında vuruntu veya yanlış ateşlemeyi önlemek için ısı salınım oranın kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Süreci kontrol etmek ve yanma işleminin durumunu belirlemek için bir geri bildirim sinyali gereklidir. Bu aşamada iyon akımı yanma bilgisini belirlemek için ideal bir yöntemdir. Buji ile ateşlemeden kaynaklı alev yayılımından farklı olarak, HCCI yanmasının, çok noktalı otomatik ateşlemeyle gerçekleştiği değerlendirilmektedir. HCCI yanmasının bu özelliği, yanma bilgisinin iyon akımı geri beslemesi ile daha güvenilir olmasını sağlar. Benzinli HCCI motorları, genellikle SI yanma modunda çalışmak için bujilere ihtiyaç duyar. Bu nedenle, buji bir iyon akımı probu olarak kullanılabilir ve bu yöntem HCCI yanma işleminde genel reaksiyonu izleyebilme olanağı sunar [9,10-12].

Buji üzerine seri bir direnç yardımıyla uygulanan DC öngerilim sayesinde oluşan iyon akımı ölçülebilmektedir. Uygulanan öngerilim yanma sırasında açığa çıkan elektronların bir akım oluşturmasını sağlar. Oluşan bu akım iyon veya iyonlaşma akımı olarak adlandırılır ve seri direnç üzerinden gerilimin ölçülmesiyle sinyale dönüştürülmüş olur.

İyonlar yanma sırasında ve sonrasında oluşur. İyonların türü ve miktarı yanma özelliklerine bağlıdır. İyonizasyon akımı basınca, sıcaklığa, hava/yakıt oranına, motor yüküne, yakıt özelliklerine ve yanma süresi gibi birçok parametreye bağlıdır. İyon akımının ölçülmesinde genellikle mevcut ateşleme sisteminden yararlanılır veya ilave ateşleme bujisi kullanılır. İyon akımı doğrudan silindir içi yanma işlemini yansıtır. Tekleme ve vuruntu tespitinin doğrudan yapılabilmesini sağlar [13]. Bu çalışmada bir HCCI motorda yanma parametrelerinin iyon akımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla iyon akımı ölçüm devresi geliştirilmiştir. Yanma parametrelerinin analizi için ise silindir içi basınç bilgisi yardımıyla yanma analizi yapılmasını sağlayan bir yazılım Matlab programında geliştirilmiştir. Tezin ikinci ve üçüncü bölümlerinde sırasıyla HCCI motorlar ve iyon akımı ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde konu ile ilgili literatür özetleri yer almaktadır. Beşinci bölümde deney düzeneği, iyon akımı ölçüm devresi, geliştirilen yanma analizi yazılımı, yanma analizinde gerçekleştirilen hesaplamalar açıklanmıştır. Altıncı ve yedinci bölümlerde deneylerden elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

2. HCCI MOTORLAR

Çevre hava kalitesinin iyileştirilmesi, sera gazlarının azaltılması, enerji kaynaklarının korunması ve sıkılaşan emisyon normlarının yerine getirilmesi için daha az yakıt tüketimi ile içten yanmalı motor teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Otomotiv sektörü ve araştırma kuruluşları içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt kullanımı, değişken supap zamanlaması, sıkıştırma oranının değiştirilmesi, HCCI ve RCCI (reaktivite kontrollü sıkıştırma ile ateşleme) motorları gibi çeşitli çalışmalar yapmaktadır [6,14,15].

Sıkıştırma ile ateşlemeli ve buji ile ateşlemeli motorlar, otomotiv sektöründe kullanılan iki temel teknolojidir. Her iki içten yanmalı motorun kendine özgü olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır. Geleneksel buji ile ateşlemeli motorlarda hava/yakıt karışımı emme manifoldunda veya silindir içerisinde hazırlanmaktadır. Hazırlanan karışım homojen veya katmanlı bir yapıda oluşturularak sıkıştırma zamanı sonunda buji tırnak aralığında oluşturulan kıvılcım ile ateşlenir. Buji ile ateşlemeli motorlarda yanma başlangıcı yani bujide kıvılcım oluşturulma zamanlaması elektronik kontrol ünitesi tarafından değiştirilerek yönetilir. Buji ile ateşlemeli motorlarda kısmi yük ve tam yük çalışma şartlarında silindir içerisine alınan hava/yakıt karışımının değişmesi nedeniyle pompalama kayıpları artmakta ve düşük verime neden olmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlar stokiyometrik oranda çalıştırıldıkları zaman daha düşük is emisyonu oluşturmaktadır. Ancak vuruntu nedeniyle sıkıştırma oranlarının (genellikle 8 ila 12 arasında) düşük seviyede tutulması ısıl veriminde daha düşük seviyede olmasına neden olmaktadır [7,16-18].

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ise silindir içerisine emme zamanı sadece hava alınır ve sıkıştırma zamanı sonunda yakıt, basıncı ve sıcaklığı artan hava üzerine püskürtülür. Püskürtülen yakıt tutuşma gecikmesinin ardından otomatik olarak tutuşur [7].

Yakıt enjeksiyonu ile yanma olaylarının başlangıcı arasında gerçekleşen işlemler, damlacık oluşumu, çarpışmalar, parçalanma, buharlaşma gibi uzun bir süreçten oluşmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hava ve yakıtın sadece bir kısmı önceden karıştırılır ve hızlı yanar. Yakıtın büyük bir kısmının yanması kimyasal reaksiyondan daha fazla zaman gerektirir ve parçalanma, buharlaşma, yayılma gibi süreçlerden geçer. Bu nedenle, silindir içerisinde yüksek yakıt konsantrasyonu ve yüksek alev sıcaklığı bölgeleri oluşur. Silindir

içerisinde yakıt açısından zengin bölgelerde oksijen azlığından dolayı is emisyonu oluşmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların yüksek sıkıştırma oranına (15 ile 24 arasında) sahip olmaları yüksek termal verim ve düşük pompalama kayıpları sağlamaktadır. Çünkü emme esnasında kısılma olmaksızın içeri hava alınmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar yüksek verimlere sahip olmasına rağmen yüksek oranda NO_x ve partikül emisyonu en önemli problemleridir. Bu nedenle, is emisyonunu azaltmak için homojen bir hava/yakıt karışımının oluşturulmasına ve ayrıca NO_x emisyonunu azaltmak için silindir içi maksimum sıcaklığın düşürülmesine ihtiyaç vardır [1,2,4].

Hem sıkıştırma ile ateşlemeli hem de buji ile ateşlemeli motorlar yanmamış HC ve CO emisyonları ile çevresel hava kirliliğine sebep olmaktadırlar. Bu motorlardan salınan nitrojen oksitler ve hidrokarbonlar atmosferde fotokimyasal duman biçimine ulaşır ve dizel motorlardan yayılan partiküller astım ve solunum yolu hastalıklarına neden olur. Bu zararlı egzoz emisyonlarının insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, giderek daha sıkı emisyon yasaları yürürlüğe konmaktadır [4,19].

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) motorlar, yüksek ısıl veriminin yanı sıra NO_x ve partikül emisyonlarını azaltma konusunda yüksek potansiyele sahiptir [20].

2.1. Tarihçesi

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ilk çalışma, iki zamanlı motorlar için alternatif bir yol olarak 1979 yılında Onishi tarafından yapılmıştır. İki zamanlı motorlar düşük devirlerde ve kısmi yüklerde yüksek artık emisyonları oluşturmaktadır. Aynı zamanda motor durdurulmasına rağmen vuruntu nedeniyle çevrim devam etmektedir. Onishi ve arkadaşları, yüksek seviyedeki egzoz emisyonlarını azaltan ve yüksek dolgu sıcaklığına dayanan yanma modunu geliştirmişlerdir. Kendiliğinden ateşlemeye neden olan koşulları yaratarak, emisyonlarda önemli ölçüde azalma ve yakıt ekonomisinde iyileşme sağlamışlardır [21,22].

Onishi'nin çalışmasından kısa bir süre sonra, Toyota'da aynı yanma sürecini kanıtlamıştır. HCCI yanmanın, kısmi yük koşullarında iki zamanlı motorlara çok uygun olduğu ve yanma oranlarının çok hızlı olduğu keşfedilmiştir. HCCI motorlardaki yanmanın gayet iyi

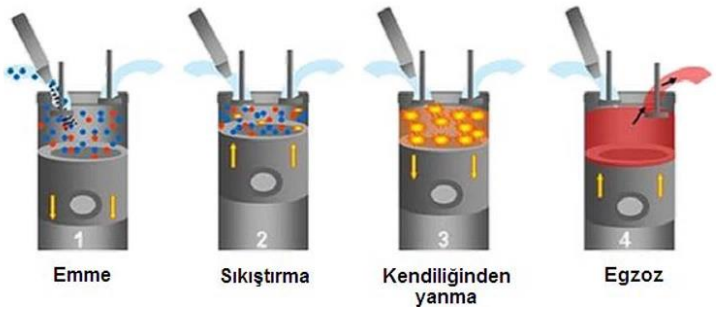
sonuçlar verdiği ve düşük egzoz emisyonları ile birlikte düşük yakıt tüketimine sahip olduğu fark edilmiştir. HCCI yanmanın dört zamanlı motorlardaki ilk testleri ise 1983 yılında yapılmıştır. Deneyler farklı motor hızlarında parafinik ve aromatik yakıtların karıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. HCCI yanmanın, kimyasal kinetik tarafından kontrol edildiği dikkate alınarak süreç analiz edilmiştir. Isı transfer oranını hesaplamak için, yanma odasındaki basınç, sıcaklık ve farklı yakıt konsantrasyonlarının fonksiyonu olarak, basitleştirilmiş bir kinetik model kullanılmıştır. Oluşturulan model sayesinde, HCCI motorda yanma işlemi ateşleme ve enerji yayılımı olarak birbirinden bağımsız iki sürece ayrılmıştır. Kendi kendine tutuşma 1000 K sıcaklık altında gerçekleşirken, enerji yayılımı 1000 K üzeri sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Önceki araştırmalara ve bu sonuçlara istinaden, HCCI yanmanın, sıcaklık, basınç ve dolgu bileşimi tarafından kontrol edilen kimyasal kinetik bir yanma süreci olduğu sonucuna varılmıştır. 1989 yılında araştırmalar daha farklı bir boyuta taşınmıştır. Deneyler geleneksel buji ile ateşlemeli motorda yüksek yüklerde ve HCCI modda kısmi yüklerde gerçekleştirilmiştir. Homojen olarak karıştırılmış benzin ve dizel yakıtla çalışan HCCI motorunun, farklı λ (hava fazlalık katsayısı) ve EGR kombinasyonları ile performansı incelenmiştir. Araştırmalar sırasında, dizel yakıt kullanmak için düşük sıkıştırma oranının gerekli olduğu bulunmuştur. Dizel yakıtla yapılan HCCI yanma çalışmaları %0 ila %50 EGR oranları arasında başarılı bir işlem göstermiştir. 1992 yılında, sıkıştırma oranı yükseltilerek ve önceden ısıtılmış seramik-ısı izolasyonlu yanma odası sayesinde emme havası sıcaklığı arttırılarak, benzinli 1,6 litre hacmindeki VW motorun HCCI yanmasını test etmek amacıyla dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Motor veriminin kısmi yük şartlarında %14'den %34'e kadar yükseldiği görülmüştür [14,21,22].

2.2. HCCI Motorlarda Yanma

Yüksek termik verim, düşük NO_x ve is (partikül) emisyonlarına sahip olan, benzinli motorlardan dönüşüm yapıldığında: kontrollü kendiliğinden tutuşma ve dizel motorlardan dönüşüm yapıldığında: homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme şeklinde tanımlanan yanma teknolojisi, geleneksel yanma işlemlerinden tamamen farklıdır. Yeni teknolojiye göre çalışan motorlar, her iki geleneksel motorun özelliklerinin birleştirilmesi ile elde edilmektedir ve iki motorun avantajlarına aynı anda sahip olabilmektedir. Sıkıştırma ile ateşlemeli ya da buji ile ateşlemeli bir motor üzerinde değişikliğe gidilerek HCCI motoruna dönüşüm yapılabilmektedir [15,23].

HCCI yanma teorisinde, buji ile ateşlemeli motorlar da olduğu gibi, yakıt ve hava emme manifoldunda veya direkt enjeksiyonlu motorlara benzer olarak silindir içerisinde homojen olarak karıştırılır. Silindire alınmadan önce karıştırılan artık gaz, yakıt ve hava homojen dolgulu ön karışım halinde dizel motorlarındaki gibi sıkıştırılır. Sıkıştırmanın sonuna doğru yanma, klasik dizel motorlarında olduğu gibi kendi kendine tutuşma yolu ile başlar. Kendi kendine tutuşmanın gerçekleşmesi için sıkıştırma zamanın başında dolgunun sıcaklığı arttırılmalıdır. Dolgu sıcaklığını arttırmak için giriş havasının ısıtılması veya negatif subap bindirmesi sonucu gaz değişim işlemi sırasında silindir içerisinde daha fazla sıcak yanma ürünlerinin bırakılması gerekir. Bu yanma ürünleri bir sonraki çevrimde silindir içerisine alınan dolgu sıcaklığını arttırır ve kendi kendine tutuşma işlemi kolaylaşır. Kullanılan bu yöntemler homojen hava/yakıt/artık gaz karışımı yanmasının başlamasına neden olmaktadır [5,7,24].

HCCI yanması adım adım Şekil 2.1'de gösterilmektedir. HCCI motorlarda yanma başlangıcı ve ısı dağılımı, seyreltme stratejisine, hazırlanan yakıt/hava/artık gaz karışımın kimyasal kinetiklerine, sıkıştırma işlemi boyunca homojen dolgunun basınç sıcaklık ilişkisine ve silindir içi termal şartlara bağlıdır. HCCI motorlarda otomatik ateşleme ve yanma aynı süreçte gerçekleşmekte, ısı dağılım oranında ani artışlar görülmektedir. Homojen karışımın silindir içerisinde eş zamanlı olarak yanmasından kaynaklanan ısı dağılım oranını düzenlemek için HCCI motorlar fakir veya seyreltilmiş karışımlarla çalıştırılmalıdır [4,18].



Şekil 2.1. HCCI yanması

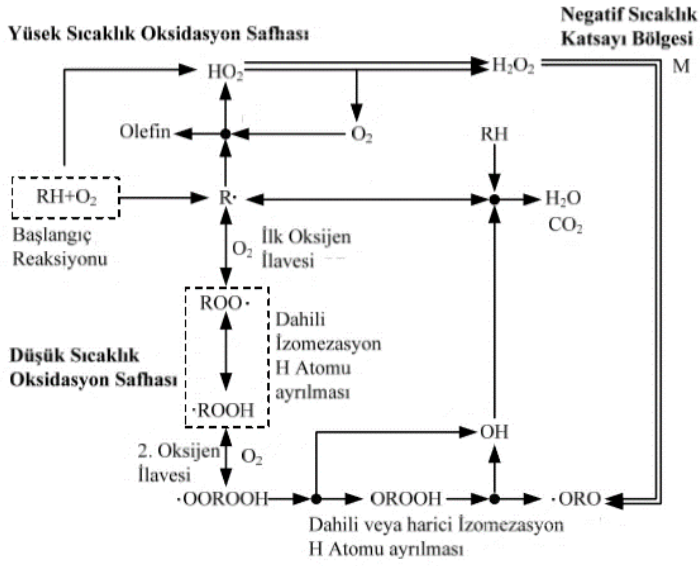
HCCI teorisinde karışımın tamamı yanmaya dahil edildiğinden daha homojen bir yanma gerçekleşmektedir. HCCI yanmasında, tutuşmanın gerçekleştiği bölgede iki önemli parametre rol oynamaktadır. Birincisi daha önceden hazırlanmış hava/yakıt karışım

kompozisyonun silindir içerisindeki sıcaklık değişimine etkisi, diğeri ise yakıtın otomatik tutuşma karakteristiğidir. HCCI yanmasının kimyasal olarak açıklanabilmesi için iki farklı hipotez sunulmuştur [19]. İlk hipotez, uygun sıcaklık ve basınç koşullarında yanma odasındaki yakıt moleküllerin birbirine çarpması sonucu kendi kendine tutuşmanın gerçekleşmesidir. İkinci hipotez ise yanma odası içerisinde aktif olan kimyasal bölgelerde oluşan zincir dallanma reaksiyonları ile tutuşmanın başlamasıdır. HCCI yanmasında silindir içerisinde eş zamanlı olarak birden fazla bölgede kendi kendine tutuşma reaksiyonları gerçekleşmektedir. HCCI motorlarda sıkıştırma sonunda elde edilen ısı miktarı yanmanın ilerlemesine yol açan ana mekanizmadır [4,19].

Yanmanın ilk fazındaki ısı yayılım profili, düşük sıcaklıklardaki kinetik reaksiyonlarla (low temperature oxidation-LTO ya da soğuk alev bölgesi) açıklanmaktadır. İkinci fazdaki ısı yayılım profili ise temel yanma reaksiyonlarının gerçekleştiği yüksek sıcaklık oksidasyonları (high temperature oxidation-HTO ya da sıcak alev bölgesi) ile açıklanmaktadır. Isı yayılım profilinde başlangıç ve bitiş fazları arasında kalan gecikme süresi ise negatif sıcaklık katsayısı rejimi (negative temperature coefficient regime-NTC) ile ifade edilmektedir. Şekil 2.2'de iki fazlı ısı yayılım profilinden de görüldüğü üzere, toplam enerjinin yaklaşık %7-10'u düşük sıcaklık bölgesinde ve diğer kalan kısmı ise yüksek sıcaklık bölgesinde açığa çıkmaktadır Yakıt moleküllerinin boyutuna ve yapısına bağlı olan HCCI motorlarda tutuşma, yaklaşık 850 K'nin altındaki düşük sıcaklıklarda başlamaktadır. Silindir içerisinde bulunan yakıt O_2 ile reaksiyona girdikten sonra hidrojen atomu ayrılır. Böylelikle, kinetik reaksiyonlar başlamış olur. Ve aynı zamanda, oksidasyon reaksiyonlarının da başlangıcı olan alkil radikali (R) ve HO_2 oluşmaktadır. Düşük sıcaklıkta gerçekleşen oksidasyon mekanizması sayesinde, HO_2 ve alkil peroksit O=ROOH üreten aşama başlamaktadır. Sıcaklığın artmasıyla reaksiyonun bu kısmı, $R+O_2$ ➔ Olefin + HO_2 reaksiyonunun ilk aşama ısı yayılımını sınırlamasına kadar devam eder. Silindir içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar 800 K ile 1000 K sıcaklıkları arasında devam etmektedir. Silindir içi sıcaklık düşük seviyelere indikçe (1000K ve altında) H_2O_2 âtıl olarak davranmakta ve birikmektedir. Sıkıştırma zamanında silindir içi taze hava/yakıt karışımının sıcaklığı yüksek değerlere (1000 K ve üzeri) çıktığında, ana yanma fazı gerçekleşir. Bu fazda yüksek sıcaklık reaksiyonları başlar. Daha sonra olefin ile H_2O_2 oluşumu ile sıcaklık artışı düşmeye başlar. Bu aşamadan sonra sıcaklık artışı çok yavaş şekilde gerçekleşir ve $H_2O_2 + M = OH + OH + M$ reaksiyonları ana yanma aşaması sonlanacak şekle gelinceye kadar devam eder. Reaksiyon sonunda termal dallanma

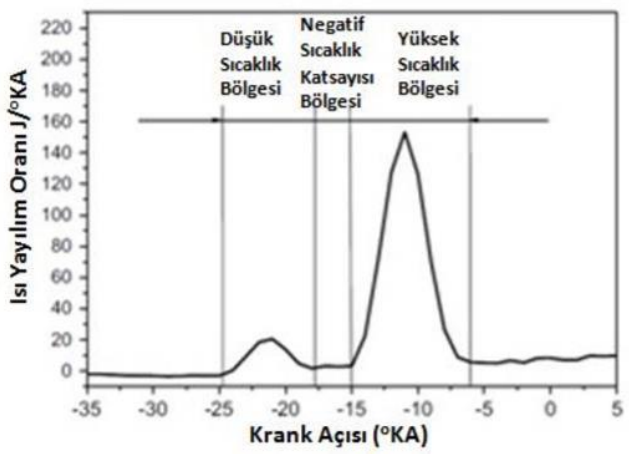
reaksiyonları başlamaktadır. O=ROOH ve olefin tersinmez şekilde H_2O ve CO ya ayrışır. Karbonmonoksit, CO + OH = CO_2 + H reaksiyonu ile CO_2 ye dönüşür ve yanma sonlanır. Tutuşma gecikmesi R + O_2 = Olefin + H_2O reaksiyonlarının ile tanımlanmaktadır.

Silindir içerisinde gerçekleşen bu reaksiyonlar, sıcaklık değişimi ve yakıt cinsine göre gelişim göstermektedir. Dolayısıyla, silindir içi gaz sıcaklık değişimi tutuşma gecikmesi üzerinde büyük öneme sahiptir. Ayrıca, HCCI motorlarda giriş havası sıcaklığı kontrol parametresi olarak kullanılmaktadır [4,19].



Şekil 2.2. İki fazlı ısı yayılım profili

HCCI yanmasında kullanılan yakıtlar, genellikle dizel benzeri yakıtlar, iki aşamalı bir ısı yayılım profili ortaya çıkarırken (Şekil 2.3), oktan sayısı fazla olan benzin gibi yakıtlar ise tek aşamalı ısı yayılım profili ortaya çıkartır. [5,8,21,23].



Şekil 2.3. Dizel benzeri yakıtlarda oluşan ısı yayılım profili

Yanma odası içerisinde, yakıtın tutuşması sırasında yakıt buharının farklı kompozisyonlara sahip olması konvansiyonel bir dizel yanma ile HCCI yanma arasındaki esas farklılığı gözler önüne sermektedir. Konvansiyonel dizel motorda, yanma odası içerisinde heterojen hava/yakıt karışımı bulunmaktadır. Dolayısıyla, tutuşma şartlarının en iyi olduğu noktalarda, yanma bölgesel olarak başlamaktadır. Tutuşmanın başladığı bölgelerde açığa çıkan ısı yanma odası içerisindeki diğer bölgelere yayılır ve o bölgelerde de tutuşmayı sağlar. Konvansiyonel dizel yanması, tutuşmanın gerçekleştiği süre boyunca yanma odası içerisinde oluşan ön karışımlı hava-yakıt miktarının çok hızlı bir şekilde oksidasyon olması ile başlar. Ön karışımlı yanma safhasından sonra, yanmış ya da kısmen yanmış yakıt ile havanın türbülanslı karışım hızına bağlı olarak difüzyon yanma safhası gerçekleşmektedir. Bu safhada ana ısı yayılım oranı oluşmaktadır [2,4,16].

HCCI motorlarda yanma ise, dizel motorlardan farklı olarak, yanma odasındaki homojen dolgunun eş zamanlı reaksiyona girmesiyle başlar. Başlangıçta yanma odası içerisindeki dolgu, düşük sıcaklık bölgesinde okside olur. Daha sonra negatif sıcaklık katsayı bölgesinde bir gecikme gerçekleşir. En son olarak yüksek sıcaklık oksidasyon aşamasına geçerek okside olur. İstenilen derecede homojen hava/yakıt karışımını elde edebilmek için, yakıt enjeksiyonunun erken bir krank açısında yapılması gerekmektedir. Bu sayede, homojen karışımın elde edilebilmesi için gerekli süre tanınmış olmaktadır. Ancak bu durum, LTO ve dolayısıyla HTO aşamalarının daha erken bir krank açısında başlamasına sebep olmaktadır. Fakat, silindirdeki dolgu yanma odasının farklı bölgelerinde aynı zamanda reaksiyona girdiğinden çok kısa bir sürede ısı yayılımı gerçekleşmektedir.

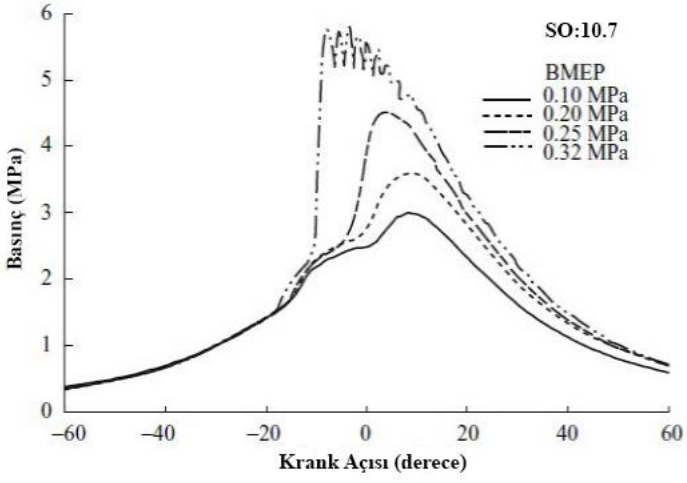
Dolayısıyla, yüksek basınç artış oranı olmakta ve vuruntu meydana gelmektedir. Konvansiyonel dizel yanmasına göre maksimum silindir basınç değeri daha yüksek elde edilmektedir. HCCI yanması üç temel problemle karşı karşıya kalmaktadır. Bunlar: homojen bir karışım elde edebilmek, erken tutuşmayı önlemek ve ısı yayılım oranının çok hızlı şekilde gerçekleşmesine engel olabilmektir. Bu problemleri çözmenin yolu ise HCCI yanmasının motorda kısmi yüklerde kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir [7,25].

2.3. HCCI Motorların Performans Karakteristiği

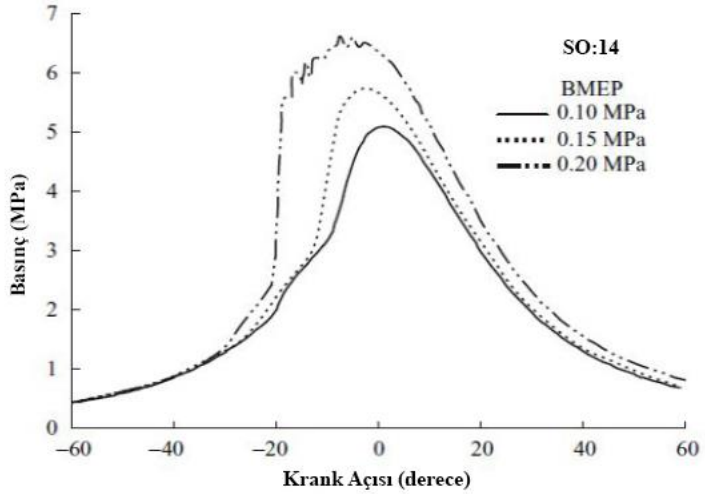
2.3.1. Sıkıştırma oranın etkisi

Sıkıştırma oranı, silindir hacminin yanma odası hacmine oranı şeklinde ifade edilmektedir. Sıkıştırma oranı, silindir içerisinde sıkıştırılmış hava miktarını göstermektedir ve yanma odasındaki hava basıncı ile doğru orantılıdır. HCCI motorlarda, silindir içerisine alınan taze hava/yakıt karışımı sıkıştırma sonucu kendi kendine tutuşacağından, sıkıştırma oranı HCCI motor performansı açısından oldukça önemlidir. Sıkıştırma oranı değişimi, yanma sonu oluşan maksimum sıcaklık ve basıncı değişmesine neden olurken aynı zamanda taze hava/yakıt karışımının da tutuşma zamanını etkilemektedir [2,4,7].

Ruizhi ve arkadaşları [26] yapmış oldukları çalışmada, HCCI bir motorda yakıt olarak dimetil eter (DME) kullanarak, sabit bir motor devrinde (2000 d/d), farklı motor yüklerinde ve farklı sıkıştırma oranlarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

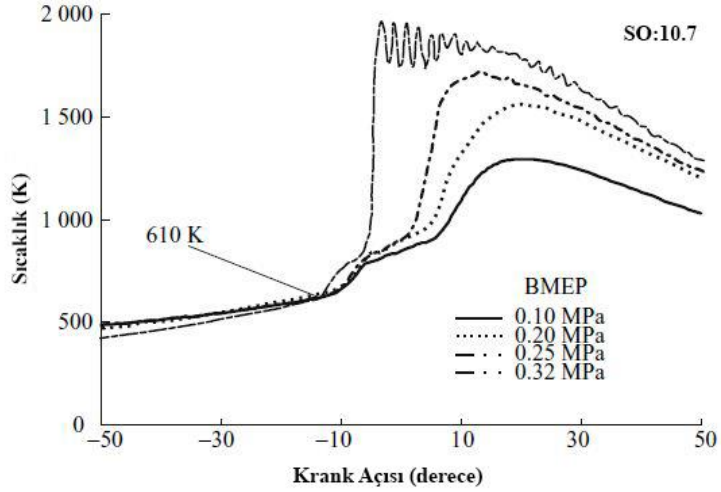


Şekil 2.4. Farklı motor yüklerinde ve SO: 10.7 olan motorun silindir basınç değişimi

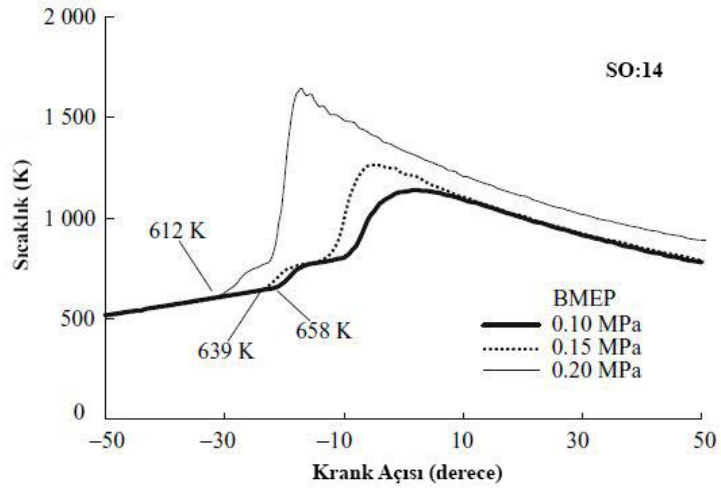


Şekil 2.5 Farklı motor yüklerinde ve SO: 14 olan motorun silindir basınç değişimi

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de farklı sıkıştırma oranı ve motor yüklerinde, silindir basıncının krank açısına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 2.6. Farklı motor yüklerinde ve SO: 10,7 olan motorun silindir içi sıcaklık değişimi



Şekil 2.7. Farklı motor yüklerinde ve SO: 14 olan motorun silindir içi sıcaklık değişimi

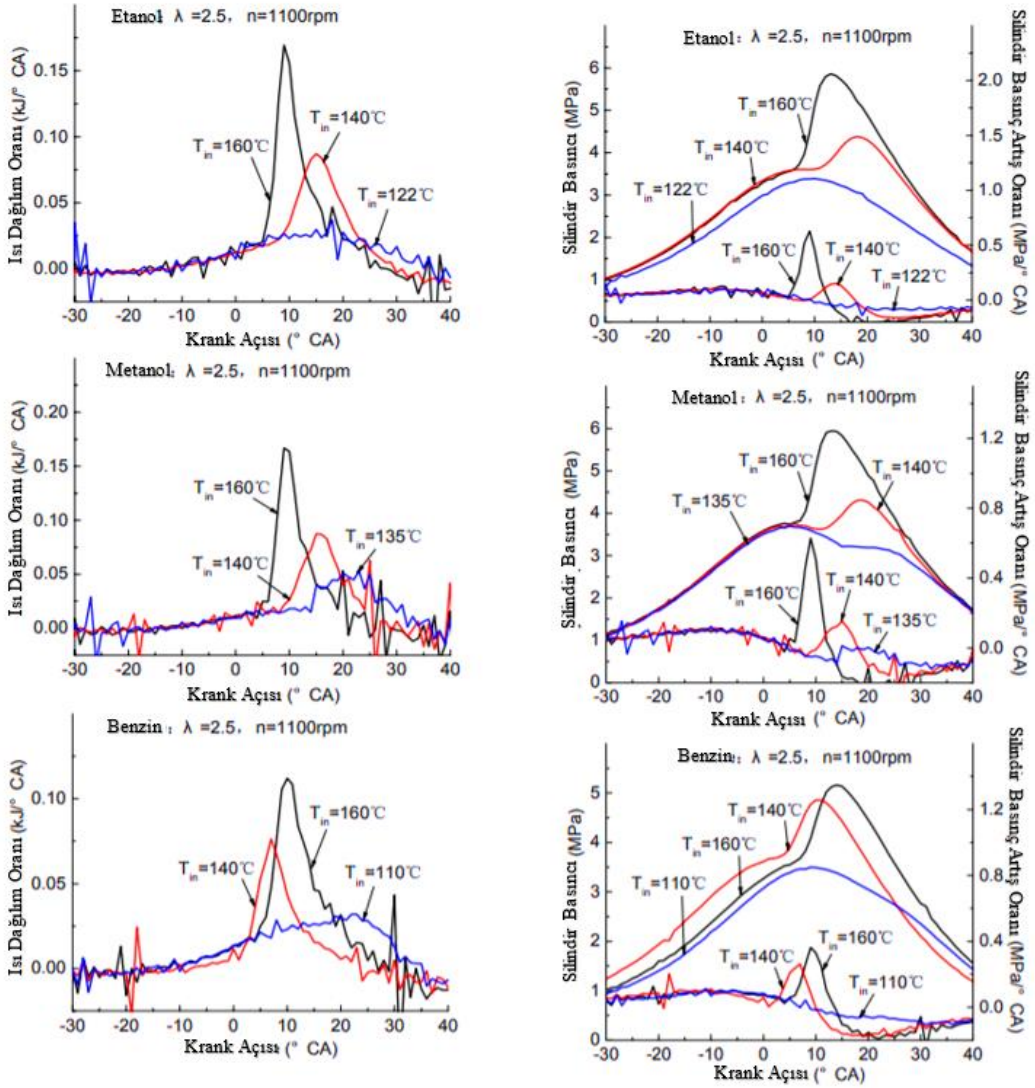
Şekillerde de görüldüğü gibi sıkıştırma oranının artması ile maksimum silindir basıncının arttığı ve maksimum silindir basıncının daha erken krank açısında oluştuğu görülmektedir. Sıkıştırma oranının diğer bir etkisi de silindir içi maksimum sıcaklığı arttırmasıdır. Şekil 2.6'da sıkıştırma oranı 10,7 ve fren ortalama efektif basınç (BMEP) 0,2 MPa iken, silindir içi maksimum sıcaklık 1500 K civarında ölçülmüştür. Şekil 2.7'de ise sıkıştırma oranı 10,7'den 14'e yükseltilmesiyle aynı fren ortalama efektif basınçta (BMEP), silindir içi maksimum sıcaklık 1700 K civarında ölçülmüştür. Sıkıştırma oranının artması ile hem maksimum basınç hem de silindir içi maksimum sıcaklık artmakta bu durum tutuşma gecikmesinin daha kısa sürede gerçekleşmesini sağlamaktadır.

2.3.2. Emme havası giriş sıcaklığının etkisi

HCCI yanması, homojen dolgulu ön karışımın yanma odasının tamamında eş zamanlı tutuşarak yanmaya devam etmesiyle meydana gelmektedir. Emme havası giriş sıcaklığının artması ile birlikte dolgu içerisindeki hareket eden moleküllerin sayısı artmakta ve bu durum moleküllerin çarpışma olasılığının daha da arttırmaktadır. Moleküllerin daha fazla çarpışması kimyasal reaksiyon hızını arttırarak yakıtın daha kolay buharlaşmasına ve okside olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle emme havası giriş sıcaklığının arttırılması yanma başlangıcını avansa almaktadır [27]. Sonuç olarak, HCCI yanması emme havası giriş sıcaklığından büyük oranda etkilenmektedir. Emme havası giriş sıcaklığının artışı sıkıştırma sonu gaz sıcaklığını arttırmakta ve kendiliğinden tutuşmanın gerçekleşeceği ortamın şartlarını hazırlamaktadır. Zhang ve arkadaşları, metanol, etanol ve benzin ile

HCCI modda çalıştırdıkları CT2100Q motorda, emme havası giriş sıcaklığının HCCI yanması ve emisyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [7,27].

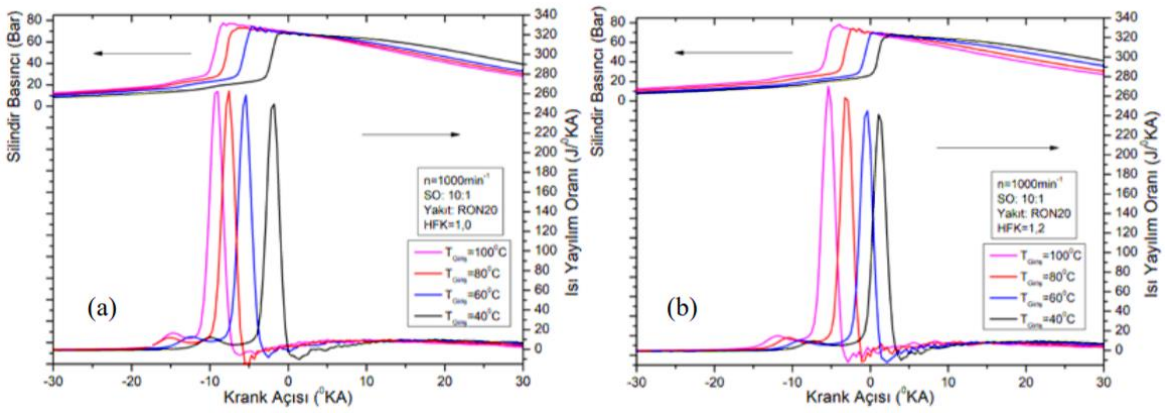
Şekil 2.8'de etanol, metanol ve benzin ile yapılan HCCI çalışmasında emme havası giriş sıcaklığının silindir basıncı, ısı dağılımı ve silindir basınç artış oranı üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 2.8. Farklı yakıt türleri için emme havası giriş sıcaklığının silidir basıncı, ısı dağılımı ve basınç artış oranı üzerindeki etkisi

3 farklı yakıt türü için belli bir hava fazlalık katsayı ve motor hızında gerçekleştirilen deney sonuçlarından emme havası giriş sıcaklığının artışı ile maksimum silindir basıncı ve ısı dağılımının arttığı görülmektedir. Ayrıca, benzin yakıtı kullanımında emme havası giriş

sıcaklığının artmasıyla HC ve CO emisyonları azalırken, NO_x emisyonlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. Maurya ve arkadaşları HCCI motorda emme havası giriş sıcaklığının yanma parametreleri, ısıl verim ve yanma verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüksek emme havası giriş sıcaklıklarında motor zengin karışımlarla çalıştırıldığında vuruntunun meydana geldiğini, emme havası giriş sıcaklığı arttıkça ortalama efektif basınç değişim katsayısının azaldığını görmüşlerdir. Emme havası giriş sıcaklığındaki artış yakıt ve oksijen molekülleri arasındaki oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta daha hızlı bir ısı dağılımı görülmektedir. Hızlı ve ani ısı dağılımı sonucunda vuruntu problemi meydana gelmektedir. Basınç artış oranı ve vuruntu problemlerini en az seviyeye indirebilmek için emme havası giriş sıcaklığı sınırlandırılmaktadır [7,28]. Calam ve arkadaşları, dört zamanlı, tek silindirli, benzinli motordan HCCI motora dönüşümü gerçekleştirilmiş Ricardo Hydra deney motorunda, emme havası giriş sıcaklığının silindir basıncı, ısı yayılım oranı, yanma süresi ve motor performansına etkilerini incelenmişlerdir.



Şekil 2.9. Krank açısına bağlı olarak 1,0 ve 1,2 HFK değerlerinde silindir basıncı ve ısı yayılım oranının değişimi

Şekil 2.9'da farklı hava fazlalık katsayılarında 40 °C, 60 °C, 80 °C ve 100 °C emme havası giriş sıcaklık değerlerinin silindir basıncı, ısı dağılımı ve silindir basınç artış oranı üzerindeki etkileri görülmektedir. Emme havası giriş sıcaklığındaki artışın maksimum silindir içi basınç değerinde artmaya ve daha erken bir krank açısında meydana gelmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. HCCI yanmasında oluşan düşük ve yüksek sıcaklık yanmalarının avansa alındığı ve çok yüksek emme havası sıcaklıklarında yanma aşamasının büyük bir bölümünün ÜÖN'dan önce gerçekleştiği belirtilmiştir. Aynı zamanda, motorun çalışma aralığının genişleyip daha fakir karışımlarda HCCI yanmasının

elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, sıcaklıktaki artışın silindir içerisine alınan dolgunun yoğunluğunu azalttığı, volumetrik verimde düşüşlerin olduğu ve buna bağlı olarak efektif moment değerlerinde de azalmalara sebebiyet verdiği dile getirilmiştir [29].

2.3.3. Supap zamanlaması ve kalkma miktarının etkisi

HCCI motorlarda yanma başlangıcı tutuşma zamanlaması ve ısı yayılım oranının kontrolü ile belirlenebilir. Fakat bu iki çözüm yolu da HCCI motorların en büyük problemidir. Yanma odası içerisine dolgunun alınması ve yanmış gazların egzoz manifoldunda atılması işlemlerinde, emme ve egzoz supaplarının açılma – kapanma zamanları, ne kadar süre açık kaldıkları, içeri alınan dolgu ve art gaz miktarını direk olarak etkilemektedir. Bu sebeplerden ötürü, supapların açılma-kapanma zamanlaması ve açık kalma süreleri içeri alınan dolgunun kendi kendine tutuşması için büyük önem teşkil etmektedir. Dört zamanlı motorlarda, supaplar kam mili üzerinde bulunan kamın profiline göre açılıp kapanmaktadır. Kam profilleri, emme ve egzoz supaplarının açılma-kapanma zamanını, kalkma miktarını, ne kadar süre açık kalması gerektiğini belirlemektedir. HCCI motorların çalışma aralığına bakıldığında, düşük yüklerde ateşlenememe problemleri ile yüksek yüklerde vuruntu ile karşılaşılmaktadır [2,5,6]. HCCI motorlarının geniş yük ve motor hızı aralıklarında çalıştırılabilmesi, vuruntu ve ateşlenememe problemlerinin önlenebilmesi için değişken supap mekanizmaları ve farklı kam profilleri kullanılmaktadır. Klasik benzin ve dizel motorlarda standart supap stratejisi uygulanmaktadır. Supapların kalkma miktarının fazla olması, açık kalma süresinin uzun olması ve pozitif supap bindirmesi gerekli olmaktadır. Fakat HCCI motorlarda, bunun aksine, supap kalkma miktarının az olması, açık kalma süresinin kısa olması ve negatif supap bindirmesi tercih edilmektedir. Negatif supap bindirmesi, emme sırasında emme supabının geç açılması, egzoz sırasında egzoz supabının erken kapanması ile yapılmaktadır. Negatif supap bindirmesi sayesinde, gaz değişimi olurken yanma odası içerisinde daha fazla sıcak egzoz gazı kalmaktadır. Bu gazlar bir sonraki çevrimde emme manifoldundan silindir içine alınan dolgunun sıcaklığı artarak kendi kendine tutuşma işlemini daha kolay hale getirirler. Silindir içerinde bırakılmış egzoz gazları, egzoz supabı açılana kadar sıkıştırılır ve bu işleme yeniden sıkıştırma işlemi denir. Emme işlemi sırasında bu gazların genişlemesine ise yeniden genişleme denir. Hunicz, HCCI motorda negatif supap bindirmesinin yanmaya etkilerini incelemiştir. Tasarlamış olduğu değişken supap zamanlaması mekanizması ile 157 ° ile 182 ° KA aralığında negatif supap bindirmesi gerçekleştirmiştir. Egzoz gazlarının

sıkıştırılmaya başladığı andan itibaren ve egzoz gazlarının yeniden genişlemesine kadar geçen sürede yakıt yanma odası içerisine direkt olarak tek aşamada püskürtülmüştür. Deneyleri ise, tekleme sınırını aşmadan fakir ile stokiyometrik karışım aralıklarında gerçekleştirmiştir. Egzoz gazlarının sıkıştırıldığı zaman aralığında yakıt enjeksiyonun geciktiği ve yanmanın avansa alındığını gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra, egzoz gazlarının genişlemesi zamanında negatif supap bindirmesinin termal etkisine bağlı olarak yanmanın geciktiğini tespit etmiştir. Negatif supap bindirmesi ile geciken yakıt enjeksiyonu sonucunda yanma zamanlamasının stokiyometrik ve fakir karışım aralıklarında geciktiğini görmüştür [5,30]. Megaritis ve arkadaşları, HCCI motorda bio-etanol yakıtını kullanarak negatif supap bindirmesinin yanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sırasında egzoz supabı kapanma zamanlamasını sabit değerde tutmuşladır. Emme supabı açılma zamanlaması için dört farklı değer kullanmışlardır. Bu sayede negatif supap bindirmesini gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda yanma odası içerisinde kalan egzoz gazı miktarını arttırmak için daha düşük seviyelerde kalkma sağlayan kam profili tercih etmişlerdir. Belirli bir hava fazlalık katsayısı değerinde, emme supabının açılma zamanın geciktirilmesi ile yanmanın daha geç başladığını gözlemlemişlerdir. Geciktirilen supap zamanlamasının, kararlı yanma reaksiyonu için gerekli olan hava fazlalık katsayısı değerini azalttığını tespit etmişlerdir [5,31]. Karagiorgis ve arkadaşları, HCCI motor kullanarak negatif supap bindirmesinin egzoz gazları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Gaz örnekleme metodu ile art gaz miktarını tayin etmişlerdir. Egzoz supabı kapanma zamanlamasının geciktirilmesiyle yanmanın rötara alındığını ve çevrimsel farklılıkların arttığını gözlemlemişlerdir [5,32]. Çınar ve arkadaşları, negatif supap bindirmesinin HCCI motor üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı değerde tutulan supap kalkma miktarları ile silindir içi basınç ve ısı dağılımları gözlemlenmiştir. Emme supabının 5,5 mm egzoz supabının 3,5 mm kalktığı değerlerde silindir basıncının ve ısı dağılımının arttığı tespit edilmiştir. Her iki supabının da 3,5 mm kalktığı değerlerde ise art gaz oranın arttığı ve yanmanın geciktiği gözlemlenmiştir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, supap kalkma miktarı azaldığında HCCI motorun vuruntu olmadan stabil bir şekilde çalışabildiğine ve geniş çalışma aralığına sahip olduğuna kanaat getirmişlerdir [5,33].

2.3.4. Kullanılan yakıtın etkisi

Buji ile ateşlemeli içten yanmalı motorlarda kendiliğinden tutuşmayı önlemek için oktan sayısı fazla olan yakıtlar tercih edilmektedir. Klasik dizel motorlarda ise benzinli

motorların aksine yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyetinin fazla olması beklenmektedir. İdeal HCCI motorlarda ise yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanma eş zamanlı meydana gelmektedir. Bu durum motor tasarımına ve motor çalışma parametrelerine göre değişmektedir. Uygun çalışma şartları sağlandığında ideal HCCI motorlar neredeyse bütün yakıtlarla çalışabilir. Fakat homojen bir karışım elde edilebilmesi için kullanılacak yakıtın uçucu özelliğinin bulunması gerekmektedir. Kullanılacak olan yakıtın kendi kendine tutuşma kalitesi HCCI yanmasını önemli ölçüde etkilemektedir. HCCI yanma modunda kimi yakıtlar için iki aşamalı ısı dağılımı görülürken kimi yakıtlar için tek aşamalı ısı dağılımı gözlemlenmektedir. Bu sebeplerden ötürü ideal HCCI yanması için optimum düzeyde oktan sayısına sahip yakıtların belirlenmesi önem arz etmektedir. Oktan sayısının fazla olması HCCI yanma modunda düşük ve yüksek sıcaklık oksidasyon bölgelerini rötara almaktadır ve negatif sıcaklık bölgesinin uzamasına sebep olmaktadır. Calam ve arkadaşları, 80 °C emme havası giriş sıcaklığında, 800 rpm motor hızında, sıkıştırma oranının 11:1 olduğu çalışma koşullarında, RON20, RON40 ve RON60 yakıt kullanımında, oktan sayısının HCCI yanmasına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, oktan sayısındaki artış ile IMEP değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Fakat hem motor hızı hem de motor yük aralığının daraldığı kaydedilmiştir. Ayrıca, ısı yayılım oranı da rötara alınmıştır. En geniş çalışma aralığına RON40 yakıtı ile ulaşılmıştır. Oktan sayısındaki azalma ile maksimum silindir içi basıncın avansa alındığı dile getirilmiştir. Kullanılan 3 deney yakıtı içinde iki aşamalı karakteristik HCCI yanmasının oluştuğu söylenmiştir. Oktan sayısındaki artışın tutuşma başlangıcının rötara alınmasına ve yanma süresinin uzamasına neden olduğu vurgulanmıştır. RON20 yakıtı kullanıldığında kümülatif ısı yaylımının %50'sinin açığa çıktı noktanın (CA50) ÜÖN'dan önce gerçekleştiği, RON60 yakıtı kullanımında ise ÜÖN'dan çok sonra meydana geldiği ifade edilmiştir. Her iki durumun da indike termik verimin düşmesine sebep olduğu belirtilmiştir. En yüksek indike termik verim RON40 yakıt kullanımı ile %38,8 olarak kaydedilmiştir [1,2,4,7,20].

2.3.5. Motor hızının etkisi

Motor hızının HCCI yanma modu üzerinde dolaylı olarak etkisi bulunmaktadır. Motor hızının artmasıyla yakıt ve havanın karışması için gerekli olan süre azalmaktadır. Ayrıca, motor hızının artması ile silindir içi türbülans artmakta, yanma daha erken ve hızlı gerçekleşmektedir. Karışımın homojenliği tam olarak sağlanmış olsa da oksidasyon

reaksiyonlarının göreceli olarak motor hızı ile değişmediği göz önünde bulundurulduğunda yanmanın gerçekleşmesi için gereken süre azalmaktadır. Aynı zaman da sıkıştırma ile kendi kendine tutuşmanın başladığı zaman farkı kısalmaktadır. Sonuç olarak kendi kendine tutuşma sıcaklığı motor hızı arttıkça bir miktar azalmaktadır. Silindir içi dahili karışım-sıcaklık türevi motor hızı arttıkça artmaktadır. Dolayısıyla kendi kendine tutuşma daha önce ve hızlı gerçekleşmektedir. Yüksek motor hızlarında tekleme meydana gelmesi, motor gücünde ve veriminde azalmaya sebep olabilmektedir. Bu nedenle motor hızının artmasıyla kendi kendine tutuşma olanağının azaldığını söylemek mümkündür [6,7].

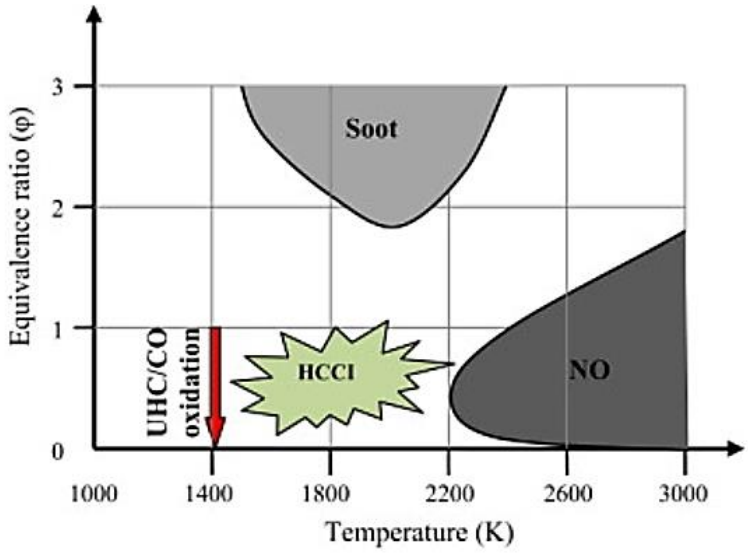
2.4. HCCI Motorların Emisyon Karakteristiği

Günümüzde, Avrupa, ABD ve Japonya gibi ülkelerin düzenleyici kurumları tarafından sıkı emisyon standartları uygulandığı için yeni motor teknolojilerinde emisyon seviyeleri önemli bir odak haline gelmiştir. Gelişmiş yanma modu, düşük emisyon seviyeleri ve yüksek verim için yanma başlangıç noktasının kıvılcım veya sıkıştırmayla ateşlemeli olmasına bağlı olarak farklı avantajlar sunar. Buji ile ateşlemeli motorlarda HCCI uygulaması, başarılı bir şekilde uygulanabildiği hız ve yük eğrisi boyunca yakıt tüketimini azaltabilir. Dizel motorlarda HCCI uygulaması emisyon seviyelerini azaltabilir ve böylelikle aracın performans gereksinimlerini ve maliyeti azalmış olur.

HCCI motorlarda yanma, silindir içerisindeki taze hava/yakıt karışımının kendi kendine tutuşması ile meydana gelen ön karışımlı bir yanma türüdür. HCCI motorlarda yanma sonunda CO, HC, NOx ve is partikülleri oluşmaktadır. Eşdeğerlik oranı (Φ) ve sıcaklığa göre emisyon oluşumları Şekil 2.10'da görülmektedir. NOx emisyonları genellikle 2000 K'in üzerinde, is emisyonları ise homojen olmayan zengin karışım bölgelerinde ($\Phi \cong 1{,}25$) ve 1400 K'de oluşmaktadır [4,34-36].

HCCI yanma bölgesinin UHC ve CO oksidasyon limitinin üzerinde olduğu ayrıca NO_x ve is oluşum bölgesinin dışında kaldığı görülmektedir.

Geleneksel motorlardaki yanma ile karşılaştırıldığında, HCCI yanması is emisyonları ile birlikte NO_x emisyonlarında eş zamanlı olarak %90-98 oranında azalmayı sağlayabilmektedir [4,37,38].



Şekil 2.10. Eşdeğerlik oranı (Φ) ve sıcaklığa göre emisyon oluşumları

2.4.1. HC, CO ve CO_2 emisyonları

HCCI motorlardaki yanmamış hidrokarbon ve CO emisyon seviyeleri geleneksel dizel motorlardan daha yüksek oranlara sahiptir. HCCI motorlarda, düşük sıcaklıklarda eksik yanmanın sonucu olarak HC ve CO emisyonları artış göstermektedir. Karışımın homojen hale getirilememesi, silindir cidarları üzerinde alevin sönmesinden kaynaklı (düşük sıcaklık bölgeleri) çatlaklarda ve yanma odası kenarlarında yakıt birikmesi HC emisyonlarında artışa sebep olmaktadır. CO emisyonları ise hava/yakıt oranı ile ilgilidir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO_2'ye dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanamaması CO miktarını arttırır. CO'in CO_2'e dönüşümü için yanma odasında minimum gaz sıcaklığının 1400-1500 K'e ulaşması gerekmektedir. HCCI yanmasında daha düşük yanma sonu silindir gaz sıcaklığının elde edilmesi CO emisyonlarını arttırmaktadır. Zengin karışımlar için egzozdaki CO, giren yakıt miktarı yükselirken yükselen eşdeğer oranı ile birlikte düzenli olarak yükselir. Fakir karışımlar için egzozdaki CO konsantrasyonu eşdeğer oran ile az miktarda değişmektedir. Daha zengin karışımlarda meydana gelen hızlı ısı dağılımı sonucu yanma süresi kısalmaktadır. HCCI yanmasının bu özelliği, Otto çevriminde olduğu gibi yanmanın sabit hacim yanmasına yaklaşmasını sağlamaktadır. Sabit hacme yakın şekilde meydana gelen yanma sonucu net iş arttırılabilmektedir. Aynı zamanda buji ile ateşlemeli motorlardan farklı olarak gaz kelebeği tam açık olduğundan pompalama kayıpları azalmaktadır. Bunun

sonucunda HCCI yanmasının kararlı ve tekleme yapmadan sağlanması sonucu ısıl verim artırılabilmektedir [6, 24].

2.4.2.NO_x ve is emisyonları

Buji ile ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda NO_x ve is emisyonları aynı anda azaltılamamaktadır. HCCI yanmada ise NO_x ve is emisyonlarını eş zamanlı olarak azaltmak mümkündür. NO_x emisyonlarını oluşturan üç temel neden vardır. Bunlar termal NO_x oluşumu, hazır NO_x oluşumu ve yakıt NO_x oluşumudur. Hazır NO_x oluşumu alev cephesinde direkt meydana gelen NO_x oluşumu formasyonudur. Yakıt NO_x oluşumu ise yakıt içerisindeki nitrojen ile havadaki oksijenin reaksiyona girmesi ile meydana gelir. Termal NO_x oluşumu ise yanma sonu gaz sıcaklığına bağlı olarak meydana gelmektedir. HCCI motorların fakir karışımlarla çalışabilmesi sonucu hem yakıt ekonomisi sağlanmakta hem de üç yollu katalitik konvantörlü buji ile ateşlemeli motorlara göre daha az NO_x emisyonu açığa çıkmaktadır. HCCI yanmasında fakir karışım yanma sonu gaz sıcaklığının azaltır. Dolayısıyla oksijen ile azot molekülleri arasındaki oksidasyon yavaşlamaktadır. Düşük sıcaklıkta meydana gelen yanma ile NO_x emisyonları azaltılmaktadır. Dizel motorlarda ise eşdeğerlik oranının artması is emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bunun tersine eşdeğerlik oranı azaltılmaya başlandığında yanma sonu gaz sıcaklığı artarak NO_x oluşumu meydana gelmektedir. HCCI motorda karışımın homojen olması ve daha fakir karışımlarla çalışabilmesi hem is hem de NO_x emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda yüksek yanma sonu gaz sıcaklıklarında meydana gelen NO_x emisyonlarını azaltmak için katalizörler kullanılmaktadır. Dolayısıyla HCCI yanması düşük eşdeğerlik oranı ile kısmi yüklerde gerçekleşmektedir. Stokiyometrik hava-yakıt oranına yaklaştıkça yanma sonu gaz sıcaklığı artış göstermekte, homojen karışımın seyreltilmesi gerekmektedir [17,20,39].

3. İYON AKIMI

İyon akım sinyallerinin yanma parametreleri ile ilişkisini ortaya koymaya yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. İyonlaşma süreci silindir içerisindeki hava yakıt karışımının yanması esnasında meydana gelen çok sayıda kimyasal tepkime setinden oluşur [9]. Bu süreç başlıca iki safhadan oluşmaktadır [10,40]. Yanma ile ortaya çıkan iyon akım sinyalinin ilk fazı "alev ön fazı" olarak tanımlanır. Bu aşama alev çekirdeğindeki yanma prosesine (hidrokarbon yanması) ilişkindir ve yanma odası içindeki ön alev yayılımı ve iyon probunun pozisyonuna bağlıdır. Bu evredeki akımın kaynağı esas olarak kimyasal iyonizasyon süreçleri ile ilgilidir. İkinci aşama "alev sonrası faz" olarak tanımlanır. Bu fazdaki iyonizasyon, yanma odasındaki yüksek sıcaklığa bağlıdır ve bu aşamadaki en dominant iyon üretim mekanizması genişletilmiş Zeldovich Mekanizması aracılığıyla yavaş oluşan Nitrik Oksittir [11,19]. Bu evredeki akımın kaynağı esas olarak termal iyonizasyon süreçleri ile ilgilidir.

Hidrokarbon/hava alev bölgesinde 10^{9}-10^{12} iyon.cm^{-3} aralığında iyon konsantrasyonları olduğu dile getirilmektedir. Alev içerisinde üretilen iyonlar için çeşitli mekanizmalar öne sürülmektedir. Butt [11], bu mekanizmaların fizibilitesi hakkında kapsamlı bir araştırma yapmıştır. İyon akım tekniği, yanma odası içerisindeki yük taşıyıcıların tespitine dayanmaktadır. Yanma safhasında serbest yük taşıyıcılar üretilir. Bu taşıyıcılar, elektron haricinde pozitif ya da negatif iyonlardan oluşabilir. Yük taşıyıcılarının oluşmasının iki ana nedeni vardır. Alev bölgesinde meydana gelen kimyasal iyonlaşma ve sıcak gaz bölgesinde meydana gelen termal termal iyonlaşmadır. Bu mekanizmalar:

<u>Kimyasal iyonizasyon:</u>

Yakıtın alev içerisindeki kimyasal dönüşümü çok sayıda reaksiyon zinciriyle gerçekleşir. Böylece birincil ve ikincil iyonlar oluşur. Kimyasal iyonlaşma, alev sıcaklığına, yanma safhasında salınan enerjiye ve hava/yakıt oranına bağlıdır. Kimyasal iyonlaşma için karışım konsantrasyonu alev sıcaklığından daha önemlidir. CHO^{+}, H_3O^{+} ve $C_3H_3^{+}$ kimyasal iyonizasyonun baskın temsilcileri olarak kabul edilirler.

Termal İyonizasyon:

Termal iyonizasyon alev cephesinin arkasındaki bölgede gerçekleşir. Çoğu ekzotermik reaksiyon bu noktada çoktan sona erer. Gazın termal iyonlaşması, birbiriyle çarpışan parçacıklardan dolayı meydana gelir. Pozitif yüklü iyonlar, elektronların soyutlanması sırasında nötr atomlardan oluşabilmektedir. Termal iyonlaşma sıcaklığa bağlıdır. Çünkü sıcaklık, parçacıkların termal hareketliliğini belirler. Termal iyonizasyon sırasında, NO tüm yük taşıyıcılarının %95'lik payını almasıyla dominant temsilci olarak kabul edilir.

Elektron bağlanması:

Çok yüksek olan elektron ilgilerinin bir sonucu olarak, nötr atomlar veya moleküller serbest elektronları yakalayarak kararlı negatif iyonlar haline gelebilir.

Rekombinasyon:

Pozitif yüklü bir iyon serbest bir elektrona veya negatif yüklü bir iyona çarptığında, elektron transferi veya rekombinasyon meydana gelebilir. Önceden yüklenmiş parçacık daha sonra nötr bir parçacık haline gelir.

Difüzyon:

Yanma odasındaki yük taşıyıcılarının konsantrasyon farkı, difüzyon işlemleri ile telafi edilir. Bu bağlamda yüklü parçacıklar daha yüksek konsantrasyonlu alanlardan daha düşük konsantrasyonlu bölgeye göç eder.

Buji ile ateşlemeli motorlar ile karşılaştırıldığında, HCCI motorlarındaki yanmanın eş zamanlı olarak çok noktalı kendiliğinden tutuşma ile gerçekleştiği ve reaksiyon sıcaklığının çok daha düşük olduğu bilinmektedir [4]. Bu nedenle HCCI motorlarda iyonlar termal iyonizasyonla üretilmez onun yerine bazı temel reaksiyonlar tarafından tanımlanan kimyasal iyonizasyonla üretilir [5]. Temel olarak hidrokarbon molekülleri oksijen ile reaksiyon gösterir ve yanma sonunda karbon dioksit ve su oluşur [41].

$C_8H_{18}+25/2O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2$ (3.1)

Yanma adımları sırasında, kimyasal iyonizasyondan kaynaklı olarak serbest elektronlar iyonizasyon akımının oluşumuna sebep olabilir. Bu reaksiyonlara ilişkin 3 temel örnek aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [21,43].
İlk reaksiyon hidrokarbon/hava alevinde CHO+ iyonları üretendir:

$CH^+ \rightarrow CHO^+ + e^-$ (3.2)

Ardından, en yaygın iyon H3O+'nun üretildiği proton transfer reaksiyonu gelir:

$CHO^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + CO$ (3.3)

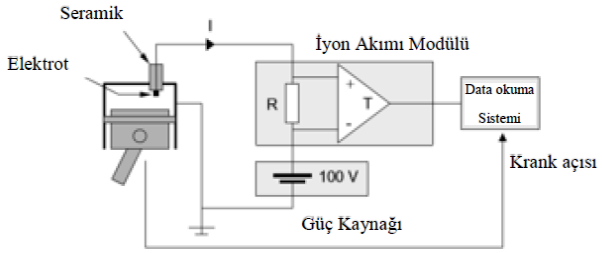
Son olarak, yavaş rekombinasyon olan 4. tepkime H3O+ iyonunu tüketir. Bu reaksiyon yavaş olduğu için H3O+ iyonu alev sonrası bölgede çok bulunabilir [21].

$H_3O^+ + e^- \rightarrow H_2O + H$ (3.4)

İyonizasyon akımının miktarı, yanmanın oluştuğu bölgedeki iyonik madde miktarına, elektrik alanın gücüne, buji elektrotları arasındaki mesafeye, elektrotların şekline, sıcaklığa ve nem gibi etkenlere bağlıdır. Bu nedenle, iyonizasyon akımı yanma fazları ve silindir basıncı hakkında bilgi içerir. Yanma parametrelerini belirlemek için iyonizasyon akım ölçümü uygulanabilir bir yöntemdir [13,42].

<u>İyon algılama sisteminin temel yapısı:</u>

İyonları tespit etmek için, yanma odası içindeki elektrota (genelde buji ölçüm probu olarak kullanır) ve motor bloğu arasına gerilim uygulanır. Elektrot, çevresindeki seramik gövde sayesinde motor bloğundan elektriksel olarak yalıtılmış olur. Elektrot ve motor bloğu arasında ölçülebilen elektrik akımı, elektrotun etrafındaki iyon konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. Şekil 3.1 iyon akımı ölçüm tekniğinin devre diyagramını göstermektedir.

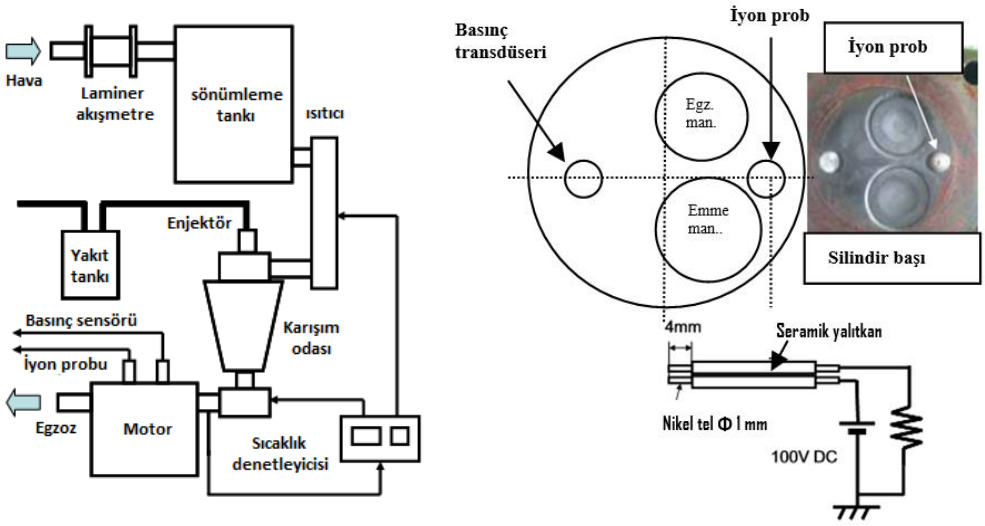


Şekil 3.1. iyon akımı ölçüm tekniğinin devre diyagramı

İyon akımı modülüne bir direnç (R) ve yükseltici (T) entegre edilmiştir. Bir güç kaynağı ünitesi ya da dış bir kaynağa ihtiyaç duymadan buji akımı, ön gerilim voltajı üretmek için kullanılır. Toprak motor bloğu tarafından oluşturulur veya doğrudan akü topraklandırılmasına gönderilir. Gerilim uygulanmasıyla buji elektrotları arasında bir elektrik alan oluşturulur. Elektrot çevresinde serbest yük taşıyıcıları varsa, elektrik alandan dolayı oluşan kuvveti takip ederler. Böylelikle I akımı R direnci üzerinden geçer ve direnç üzerinde voltaj düşüşüne neden olur. Bu voltaj düşüşü, T yükselticisiyle ölçülür ve veri toplamı sistemi ile kayıt edilir. Elde edilen akım, iyonizasyon seviyeleriyle orantılıdır, bu nedenle iyon akımı adı verilir. Bu akımdan ateşleme, vuruntu, ön ateşleme, tekleme hakkında bilgi alınabilir [14].

4. LİTERATÜR ÖZETLERİ

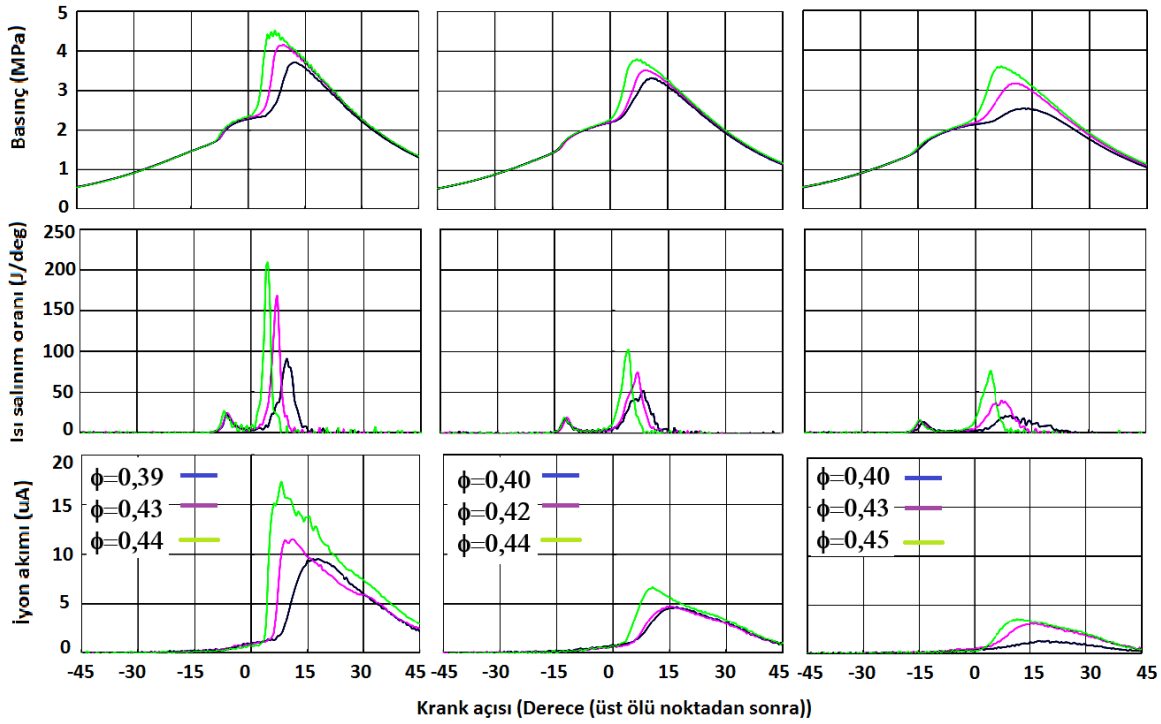
Yoshiyama ve arkadaşları [9], HCCI motorlarda iyon akımı ile ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır. Çeşitli dolgu sıcaklıklarında, eşdeğerlik oranlarında ve farklı türdeki yakıtlar için iyon akımı ölçülmüştür. Eş zamanlı olarak silindir içi basınçlar ölçülmüş ve ısı yayınım oranı hesaplanmıştır. Isı yayınım oranı ve iyon akımı arasındaki ilişki esas olarak tartışılmıştır ve ilişkiyi araştırmak için birkaç parametre tanımlanmıştır. Deneylerle iyon akımı ile ısı yayınım oranı arasında iyi bir ilişki olduğu gözlenmiştir. HCCI motorda iyon akımını belirlemek için yaptıkları çalışmada Şekil 4.1'de gösterilen deney düzeneklerini kullanmışlardır. Bu çalışmada yakıt olarak n-heptan ve PRF77 (izo-oktan %77 n-heptan %23) kullanılmıştır. Şekil 4.1, iyon sensörü ve algılama devresini göstermektedir. İyon sensörü silindir kapağına monte edilmiştir. Sensör elektrot çapı 1 mm ve uzunluğu 4 mm olarak kullanılmıştır. İki elektrot silindir kapağından izole edilmiştir. Bir elektrota 100V DC gerilim uygulanmış, diğer elektrot ise dirence bağlanmıştır.



Şekil 4.1. n-heptan için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyalleri

Şekil 4.1. n-heptan için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyallerini göstermektedir. Isı salınım oranı grafiklerinde, düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonları ile iki karakteristik tepe noktasının olduğu görülmektedir. Birinci tepenin düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonunu, ikinci tepenin yüksek sıcaklık oksidasyon reaksiyonunu gösterdiği ifade edilmiştir. Isı salınım oranındaki ilk tepe noktasında iyon akımının akmaya başladığı, ikici tepe noktasında ise iyon akımının hızla arttığı

görülmektedir. Eşdeğerlik oranın artmasıyla, ısı salınım oranının ikinci tepe noktası ilerlemekte ve genliği artmaktadır. Yüksek sıcaklık oksidasyon reaksiyonunda iyon akımının da benzer bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Fakat, ısı salınım oranının ilk tepe noktasının konum ve genliğindeki değişimin, eşdeğerlik oranının değişmesine karşı çok küçük olduğu söylenmiştir. Bu deneyler sonucunda dolgu sıcaklığı arttıkça, ısı salınım oranının azaldığı ve yanma başlangıç zamanının ilerlediği sonuçlarına varılmıştır. İyon akımının da benzer davranışlar sergilediği ve bunun sebebinin, dolgu sıcaklığının artmasıyla, volumetrik verimin ve dolgu miktarının azalması olduğu dile getirilmiştir.



Şekil 4.2. PRF 77 için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyalleri

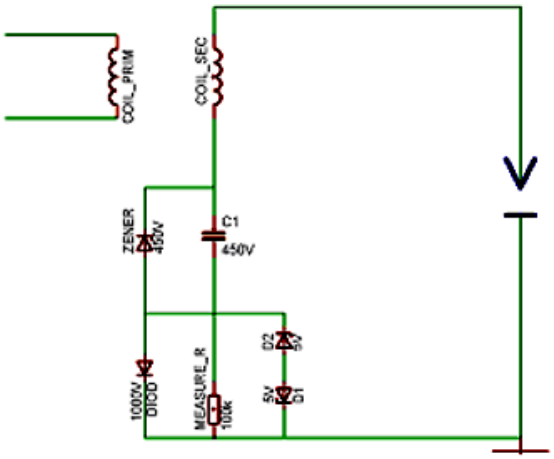
Şekil 4.2 PRF 77 için çeşitli dolgu sıcaklıklarında basınç, ısı salınım oranı ve iyon akımı sinyallerini göstermektedir. Isı salınım oranı grafiklerinde, tek karakteristik tepe noktası olduğu görülmektedir. Eşdeğerlik oranının ve dolgu sıcaklığının ısı salınım oranı ve iyon akımı üzerindeki etkisinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, PRF 77 için iyon akımının genliğinin n-heptanla karşılaştırıldığında düşük olduğu tespit edilmiştir. PRF 77 karışımını tutuşturmak için için sıkıştırma oranı, n-heptana kıyasla arttırılmıştır. Bu nedenle, PFR 77 için maksimum basıncın n-heptandan daha yüksek olduğu saptanmıştır. İyon akımının değeri esas olarak iyon konsantrasyonuna bağlı oluğu fakat ortam basıncından etkilendiği dile getirilmiştir. Basınç arttıkça, elektrik alanının göreli

mukavemetinin azaldığı, bu durumda da yakıtlar arasındaki genlik farkının, basıncın farkı ile ilişkili olabildiği öne sürülmüştür.

Isı salınımı ve iyon akımı arasındaki ilişkiyi araştırmak için çeşitli parametreler tanımlanmıştır. İyon akımının iyon konsantrasyonuna karşılık geldiği varsayıldığında, iyon akımının zamana göre değişiminin iyonların oranına karşılık geldiği söylenmiştir. Yüksek sıcaklık oksidasyon reaksiyonu ile iyon akımının zamana göre değişimi arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda, düşük dolgu sıcaklığı ve yüksek eşdeğerlik oranlarında, yakıt konsantrasyonunun homojenliğinin nispeten düşük olduğu görülmüş ve iyon akımının zamana göre değişimindeki dalgalanmaların yanma odasındaki ısı salınımından bağımsız olarak lokal reaksiyonlardan kaynaklandığı düşünülmüştür [9,13].

Aulin ve arkadaşları [13,40] HCCI motor kontrolünde iyon akımı geri beslemesinin önemi üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Yanma olayının başlangıcını kontrol etmenin zor bir görev olduğu ve önceki döngülerden geri besleme alınması gerektiği söylenmiştir. Bu geri beslemenin iyon akımı ölçümlerinden alınabileceği öne sürülmüştür. Buji üzerine bir gerilim uygulandığında, iyonların bir akım oluşturacağı ve silindirdeki yanmayı temsil eden bir sinyal alınacağı belirtilmiştir. Düşük hava/yakıt oranlarında çalışmayı mümkün kılmak için EGR kullanılmıştır. Yeterli sinyallerin alınması için farklı ölçüm teknikleri denenmiş ve değerlendirilmiştir. Alınan sinyalin filtrelenmesi ve yükseltilmesi için farklı yollar tartışılmıştır. Farklı yüklerde, hava/yakıt oranlarında ve farklı oranda EGR için testler tekrarlanmıştır. Bu koşullar için yanma fazı ile iyon akımı arasındaki ilişki araştırılmıştır. İyon akımından gelen geribildirimin, motorun kontrol edilmesi için yeterli olup olmadığını görebilmek adına farklı birim adım fonksiyonları oluşturulmuştur. İyon akımı geri besleme sinyali, kapalı döngü yanma kontrol sisteminde kontrol geri bildirimi olarak kullanılmıştır. İyon akım ölçüm sistemi olarak Şekil 4.3 [13,40] devresini kullanmışlardır. Ölçümlerin bobinle, ground arasında yapıldığı ve besleme geriliminin, bobin ile bir direnç arasında seri bağlanmış 450V kapasitör ile sağlandığı ifade edilmiştir. Ölçümlerin direnç üzerinden yapıldığı, ateşleme şarjı kesildiğinde, şarjın bir kısmının kapasitörde saklandığı belirtilmiştir. Bu sayede harici bir gerilim kaynağına gerek olmadığı söylenmiştir. Deşarj durduğunda kısa bir süre için bujinin, yüksek akım üreten kısa devre olarak çalıştığı ve ölçüm direnci üzerinden yüksek voltaj oluşmasını önlemek için, zener diyotların dirençle paralel bağlandığı görülmektedir. Ayrıca, kapasitörün 450V'luk bir zener diyotunun sağladığı korumaya ihtiyacı vardır. Direnç üzerindeki gerilim gürültüyü

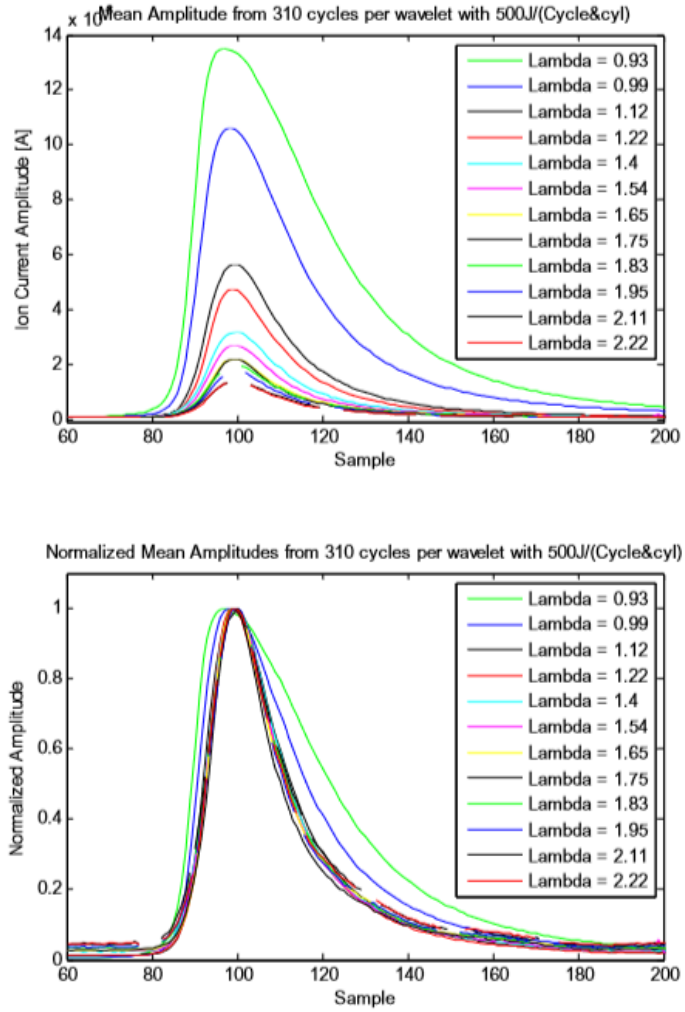
önlemek için güçlendirilmiştir, daha iyi sonuçlar elde etmek için A/D dönüştürücü kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Aulin ve arkadaşları tarafından yapılan iyon akım ölçüm devresi

Testlerin yapıldığı motor, dört silindirli 2.0 litrelik SAAB L850 motordur. Pistonları değiştirilerek sıkıştırma oranı 9.5’den 18'e çıkarılmıştır. Emme supabı kam profili, 15 dereceden daha erken kapanacak şekilde değiştirilmiştir. Testler, 1000 devir ve 2000 devirde gerçekleştirilmiştir. Hava/yakıt oranına karşı iyon akım genliğindeki değişim değerlendirilmiştir. Hava/yakıt oranı 1.3'ün altına düştüğünde, ortalama iyon akım genliğinin önemli ölçüde arttığını gözlemlenmiştir.

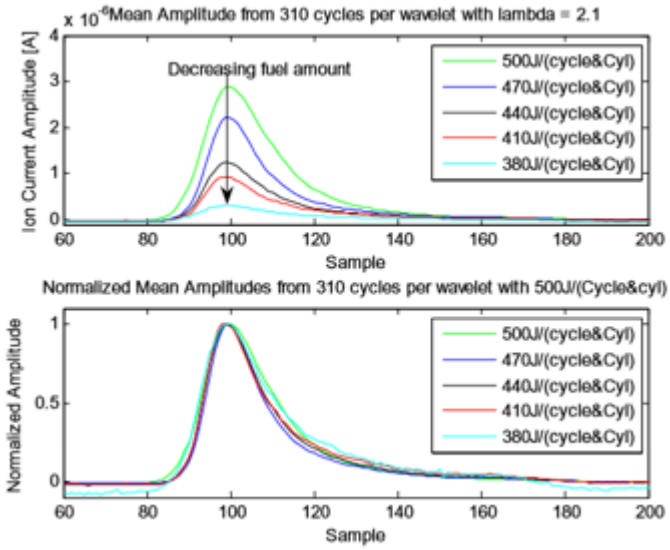
Şekil 4.4'te, farklı miktarlarda hava/yakıt oranları için ortalama sinyaller hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Farklı miktarlarda hava/yakıt oranları için ortalama sinyaller

Deney sonuçlarına göre, EGR'nin iyon sinyali üzerinde çok az veya hiç etkisi olmadığı söylenmiştir. Hava/yakıt oranı zengin bölgelerdeyken (<1) sinyal şeklini değiştirme eğiliminde olduğu ve iyon akım genliğinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Oksijen eksikliği nedeniyle yanmanın daha yavaş gerçekleştiği vurgulanmıştır.

Şekil 4.5 de ise farklı miktarlardaki yakıt için iyon akım genlikleri incelenmiştir. Devir ve hava/yakıt oranı sabit tutulmuştur. Deneyler sonucunda, iyon akımı genliğinin yakıt miktarının artmasıyla doğru orantılı olduğu vurgulanmıştır. Daha fazla yakıtın, daha yüksek sıcaklığa ve dolayısıyla daha yüksek bir iyonizasyon derecesine yol açtığı söylenmiştir.



Şekil 4.5. Farklı miktarlardaki yakıt için iyon akım genlikleri

Yapılan diğer bir deneyde ise farklı yükler için iyon sinyali şeklinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, yüksek sıcaklıklarda daha fazla iyon üretildiği görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklar nedeniyle yanmanın daha hızlı olduğu, bu nedenle de erken zamanlama ile daha önce sinyaller elde edildiği belirtilir.

Jr ve arkadaşları [10,43], HCCI motorlarda emme basıncının, yakıt konsantrasyonunun ve öngerilim değerinin, iyonların tespiti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İyon sinyalinin emme basıncının artması, eşdeğerlik oranının azalması ve öngerilim kaynağının düşmesiyle azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca benzin ve etanolün yanma sırasında n-heptana göre daha fazla iyon ürettiğini deneylerle desteklemişlerdir.

Dong ve arkadaşları [10,13], HCCI motorlarda iyon akım sinyali ve yanma fazı arasındaki ilişki üzerine bir çalışma yapmışlardır. Maksimum iyon akım artış oranın (Ion50) gerçekleştiği krank açısı ile yakıtın %50sinin yandığı krank açısı (CA50) arasındaki ilişki incelenmiştir. CA50 ile Ion50 arasındaki ilişkinin sabit olmadığı ve hava-yakıt oranı kadar

yakıt türüne de bağlı olduğu görülmüştür. İkisi arasındaki faz farkı PDelta olarak adlandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, eşdeğerlik oranındaki değişimin PDelta değerini etkilediği gözlemlenmiştir. Düşük oktanlı hidrokarbon yakıtları için, (örneğin dizel), yüksek sıkıştırma oranı ve düşük emme sıcaklığı koşullarında çok düşük iyon konsantrasyonları gözlenmiştir. Ayrıca, dizel yakıtlar için Ion50 değerinin giderek CA50 değerinden uzaklaştığı ve PDelta'nın en büyük değere ulaştığı gözlenmiştir.

Butt ve arkadaşları [11,13], düşük eşdeğerlik oranlarında çeşitli yakıt katkı maddelerinin iyon sinyali üzerinde etkilerini incelemiş, metal asetat ilavesinin yan etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde etanol içine sodyum asetat (NaOAc), potasyum asetat (KOAc) ve sezyum asetat (CsOAc) eklenmiştir. 0.5 ile 4.9 mmol/L arasında değişen asetat-etanol konsantrasyon seviyeleri, 0.11,0.22, 0.28, ve 0.32 eşdeğerlik oranlarına göre incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre sezyum asetatın en güçlü iyon sinyallerini ürettiğini, onuda potasyum asetat ve sodyum asetatın takip ettiği ve en zayıf sinyalin sodyum asetatta gözlemlendiği dile getirilmiştir. 0.11 eşdeğerlik oranında, ayırt edilebilir bir iyon sinyali ölçülememiş, fakat 0.22 eş değerlik oranında iyon sinyalinde önemli derecede artış gözlemlenmiştir.

Peter Strandh ve arkadaşları [12,13], HCCI yanmasında iyon akım sinyalinin ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacının, ölçülebilir bir iyon akım sinyalinin olup olmadığını ve yanma sürecine ilişkin yararlı bilgilerin elde edilmesinin mümkün olup olmadığını araştırılması olduğu dile getirilmiştir. Ayrıca, farklı hava/yakıt oranlarında ve EGR açısından iyon akım sinyalleri incelenmiştir.

İyon akım sensörü olarak konvansiyonel bir buji kullanılmıştır. Buji tırnak açıklığı arasına DC gerilim (85 volt) uygulanmıştır. Ölçülen basınç ve iyon akım sinyalleri arasında karşılaştırma yapılmış ve dinamik modeller sistem tanımlama yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneylerde, HCCI yanmasında iyon akım sinyallerinin alınabildiği ve sinyal seviyesinin hava/yakıt oranına çok duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Karışım zenginleştikçe alınan iyon akım sinyal seviyelerinin arttığı tespit edilmiştir.

Tanaka ve arkadaşları [13,19], iyon akımının içten yanmalı motorlarda yanma kontrolünde kullanılma olasılığını doğrulamak için HCCI motorunda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerle, HCCI yanma modunda, iyonlaşma reaksiyonlarının ısı transferi ile kimyasal

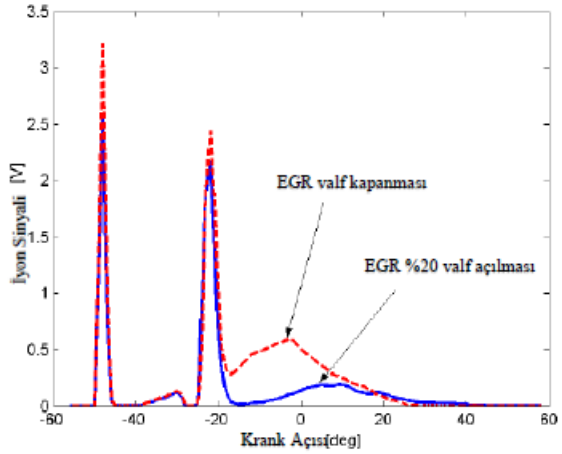
iyonizasyondan etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. İyon akımının oluşma zamanlaması ile yanan kütle zamanlaması arasında güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Maksimum iyon akımının zamanlaması ile maksimum ısı yayılım oranı arasında da iyi bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Her sürüş koşulu için gaz bileşimi ile silindirdeki yakıt miktarı önceden biliniyorsa, maksimum iyon akımının oluştuğu zamanın saptanmasıyla ısı yayılım hızının maksimum değerinin elde edilebileceği öne sürülmüştür. Maksimum iyon akımının zamanlamasıyla her döngü boyunca oluşan maksimum basıncın zamanlaması arasında iyi bir korelasyon olduğu söylenmiştir. Bu sayede HCCI yanma modunda fazlar arası değişimin izlenebileceği dile getirilmiştir.

Liu ve arkadaşları [13,44], iyon akımının silindir içi yanma tespiti için özgün ve uygulanabilir bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. HCCI motorda, etanol ve benzin karışımı ile iyon akımı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Deney sonuçları etanol kütlesi arttırıldığında yanmanın geciktiğini ve iyon sinyalinin zayıfladığını göstermiştir. Isı yayılım oranı ile iyon akımının başlangıç noktası arasındaki faz farkının genişlediği söylenmiştir. Benzin enjeksiyonun gecikmeli başlangıcının, yanma reaksiyonlarını iyileştirdiğini ve iyon akımı sinyalinin artmasına sebep olduğu söylenmiştir. Fakat benzin kütlesi arttırıldığında aynı etkiler görülememiştir.

Mehresh ve arkadaşları [13, 42], HCCI motorda iyon akım sinyalleri üzerinde çalışmışlardır. Amaçları ise, çok fakir (Q=0.35) karışımlarda, yeterli bir iyon akım sinyali elde edebilmektir. Propan yanmasında detaylı kimyasal kinetik incelemeler için sayısal modeller kullanılmıştır, modeller iyon formlarının kinetiğini de içermektedir. Modeller deneysel bulgularla desteklenmiştir. Eş değerlik oranı, emme giriş sıcaklığı ve uygulanan bias voltajın iyon akım sinyali üzerinde etkilerine bakılmıştır. Bulgular sayısal modellerle kıyaslanmıştır. HCCI motorlarda, pahalı basınç sensörleri yerine ucuz iyon sensörlerinin kullanılabileceği tespit edilmiştir. İyon akımının eşdeğerlik oranına duyarlı olduğu söylenmiştir. Giriş havası sıcaklığı ve eşdeğerlik oranı arttıkça iyon akım sinyalinin güçlendiği görülmüştür.

S. Byttrer ve arkadaşları [13, 45], içten yanmalı bir motorda yanma değişikliğini ve basınç tepe noktasını iyon akımı ölçümlerini kullanarak tahmin eden iki sensor geliştirmişlerdir. Bu sensörlerden ilki, temelde egzoz gazı resirkülasyonunu kontrol etmek suretiyle yanma değişikliğini tahmin etmek için kullanılmıştır.

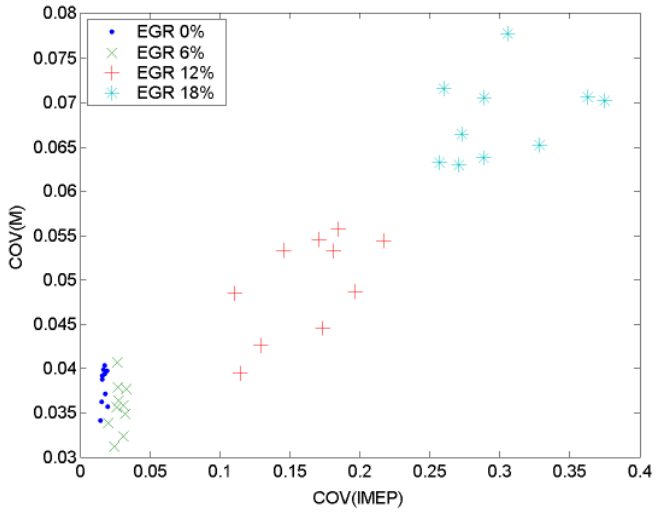
İkinci sensor ise, ateşleme zamanının kontrol edilebilmesi için basınç tepe noktasını tahmin etmede kullanılmıştır.



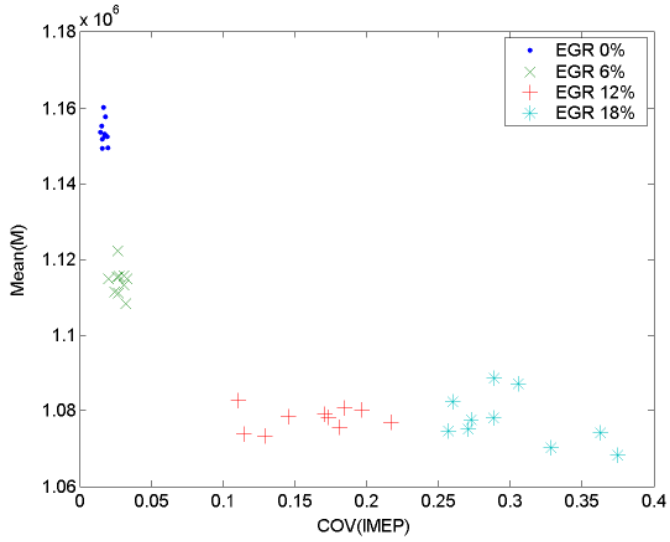
Şekil 4.6. EGR kullanıldığı durum ve normal durum için iyon akımı ölçümleri

İlk olarak yanma çeşitliliğini gözlemleyebilmek için çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.6'da EGR kullanıldığı durum ve normal durum için iyon akımı ölçümlerine yer verilmiştir. EGR kullanıldığı durumda yanmanın yavaşladığı ve sıcaklığın azaldığı, dolayısıyla daha düşük bir sinyal genliğinin gecikmeli olarak elde edildiği tespit edilmiştir. İyon integralinin değişkenlik katsayısının COV (M) yanma değişkenliği ile iyi korele olduğu da ifade edilmiştir. M ise iyon sinyalinin integralini ifade etmektedir.

Şekil 4.7'de COV(IMEP) ile COV(M) arasında yüksek EGR oranlarında iyi bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Minimum yakıt tüketim noktasının bulmak için COV (M)'nin hesaplanmasının uygun olmadığı söylenmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, düşük EGR oranları için mean M değerinin kullanılmasının daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bunun temel nedenini, düşük EGR oranlarında M değerindeki değişimin, yüksek EGR oranlarındaki değişime göre fazla olması olarak göstermişlerdir.

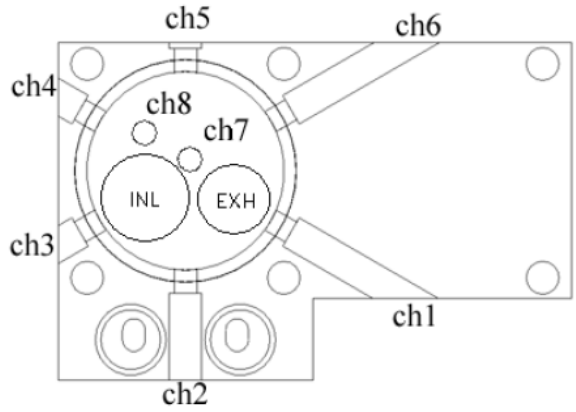


Şekil 4.7. COV(IMEP) ile COV(M) arasındaki bağlantı



Şekil 4.8. COV(IMEP) ile Mean (M) arasındaki bağlantı

Andreas Vressner ve arkadaşları [13,46], yaptıkları çalışmada, iyon akımının bölgesel olmasını göz ardı edip farklı noktalarda iyon akımı sinyalleri elde etmeye çalışmışlardır. Ayrıca iyon akımı ölçümünde kullanılan bujinin konumu açısından iyon sinyalleri üzerindeki etkisini anlamaya çalışmışlardır. Deneyleri Şekil 4.9'da görüldüğü üzere 7 farklı noktadan iyon akımı ve bir noktadan da silindir içi basınç ölçümü alarak gerçekleştirmişlerdir



Şekil 4.9. 7 farklı noktadan iyon akımı ve bir noktadan da silindir içi basınç ölçümü

Kanal 8'e piezoelektrik basınç sensörü yerleştirmişlerdir. Yapılan deneylerle değişik lokasyonlar için farklı genlik değerlerinde iyon akımı sinyalleri elde edilmiştir. Bu değişikliğin, yanma odasının bazı kısımlarının diğer yerlere göre daha sıcak olmasından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ayrıca, homojen olmayan gaz bileşiminin iyon konsantrasyonunu ve dolayısıyla iyon akımı genliğini de etkileyebileceği dile getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, iyon akımı sinyal gücünün buji konumuna bağlı olduğu ve bujinin yanma odası merkezine yakın yerleştirilmesiyle daha güçlü iyon akımı sinyallerinin elde edildiği belirtilmiştir.

5. MATERYAL METOD

5.1. HCCI Dönüşümü Yapılan Deney Motoru ve Deney Ekipmanları

5.1.1. Deney motoru

Deneyler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Buji ile ateşlemeli motorun HCCI modda çalıştırılabilmesi adına sıkıştırma oranı, emme havası giriş sıcaklığı, yakıt püskürtme miktarı gibi çalışma parametreleri değiştirilebilen, tek silindirli Ricardo Hydra marka deney motoru üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Deney motorunun HCCI modda çalıştırabilmesi için emme havası giriş sıcaklığı ve sıkıştırma oranı yükseltilmiştir. HCCI yanmasını gözlemyebilmek için silindir içi basınç sensörü ve indikatör sistemi motora adapte edilmiştir. Ham silindir içi basınç ve iyon akım sinyalleri MATLAB programlama dilinde geliştirilen program ve kullanıcı arayüzü ile işlenmiştir. Oluşturulan arayüz ve program ile yanma analizi gerçekleştirilmiştir. Deney motoru Resim 5.1'de görülmektedir [13].



Resim 5.1. Deney motoru

Deneylerde, HCCI motorları için pratik bir iyon akımı ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Test koşulları olarak farklı yakıt türleri, emme havası giriş sıcaklıkları, motor devirleri ve

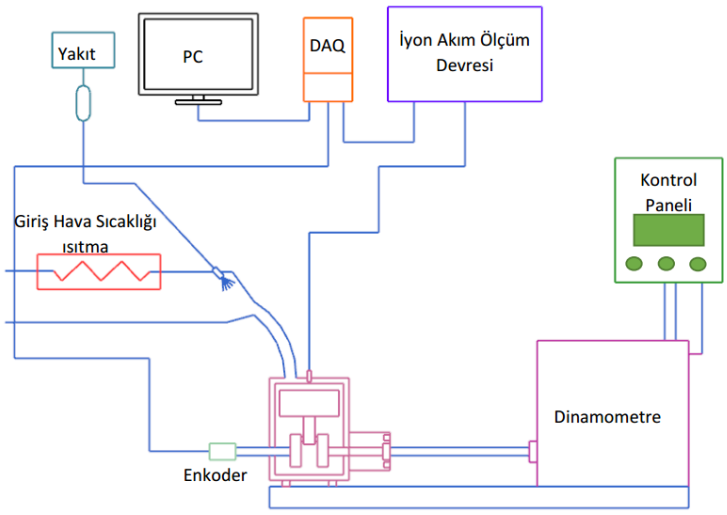
yükleri seçilmiştir. Bu şartlar altında iyon akımı ve silindir içi basınç sinyalleri incelenmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Motor özellikleri

Markası	Hydra
Silindir Sayısı	1
Çap x Kurs	80,26 x 88,9
Silindir Hacmi	0,54 L
Max. Devir	5400 d/d
Max. Güç	15 kW
Sıkıştırma Oranı	5/1 – 13/1
Subap Düzenlemesi	Üstten Kamlı, Düşey İki Supab
Yakıt Sistemi	Enjeksiyonlu
Ateşleme Zaman Aralığı	70° ÜÖN'den- 20° ÜÖN'den sonra
Emme Supabı Açılma Zamanlaması Emme Supabı Kapanma Zamanlaması Egzoz Supabı Açılma Zamanlaması Egzoz Supabı Kapanma Zamanlaması	ÜÖN dan 12° KMA önce AÖN dan 56° KMA sonra ÜÖN dan 56° KMA önce ÜÖN dan 12° KMA sonra

HCCI yanması için motor ilk olarak geleneksel buji ile ateşleme modunda çalıştırılmış ve çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Daha sonra buji kıvılcımı yok edilerek 1500-2100 rpm (tam yükte) motor devirlerinde HCCI yanma modunda gerçekleştirilmiştir. HCCI yanmasını elde edebilmek için kolay buharlaşabilen ve otomatik olarak tutuşabilen düşük oktanlı yakıtların kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla deney motoru RON 40 ve RON 60 yakıtları ile çalıştırılmış, deney motorunun sıkıştırma oranı 12/1'e ayarlanmıştır. Deneyler tam yükte λ=1.2, λ=1.5, λ=1.8 lambda değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.1'de deney düzeneğinin şematik görünümü verilmektedir.

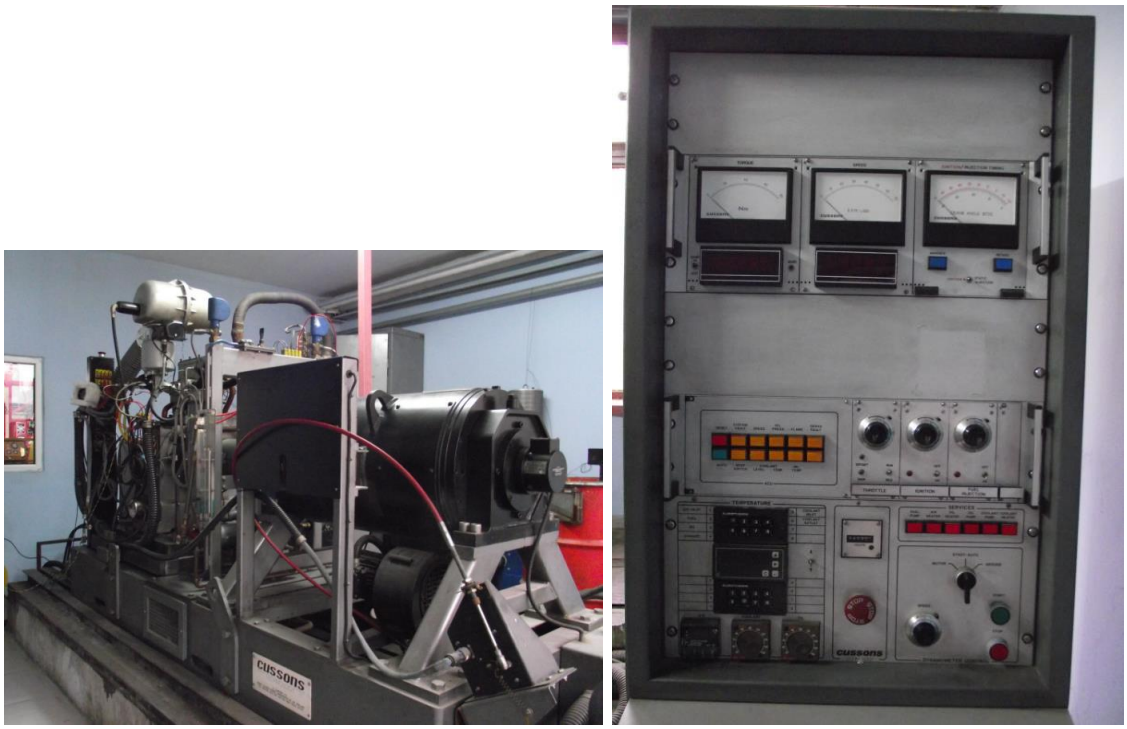


Şekil 5.1. Deney düzeneği

5.1.2. Dinamometre

Deneylerde motor volanındaki gerçek gücü ölçebilmek için McClure marka 6500 d/d motor devrinde ve 30 kW güce kadar frenleme yapabilen elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Dinamometreye takılı bulunan gerinim ölçer (strain-gauge) ile motor yükü ayarlanabilmektedir. Dinamometre kontrol paneli üzerine adapte edilmiş potansiyometre kullanılarak motor hızı değiştirilebilmektedir. Hava-yakıt oranını değiştirmek için port tipi yakıt enjeksiyon sistemlerinde enjektörün açık kalma süresinin ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarda dinamometre üzerinden gerçekleştirilmektedir. Dinamometre kontrol panelinden emme havası giriş sıcaklığı, motor soğutma suyu sıcaklığı, yağ sıcaklığı, motor hızı kontrol edilebilmektedir. Motor moment değeri ise dijital ve analog göstergelerden okunabilmektedir. Deneye başlamadan önce motorun yağlama ve soğutma sistemlerini çalıştırmak gerekmektedir. Bu sistemler kontrol paneli üzerinden çalıştırılmaktadır. Sistemde herhangi bir problem olmadığı tespit edildiğinde arıza tespit ışığı kontrol edilerek sistem çalıştırılabilir [4,6,7,13].

Resim 5.2’de deney düzeneği, dinamometre ve kontrol paneli yer almaktadır.

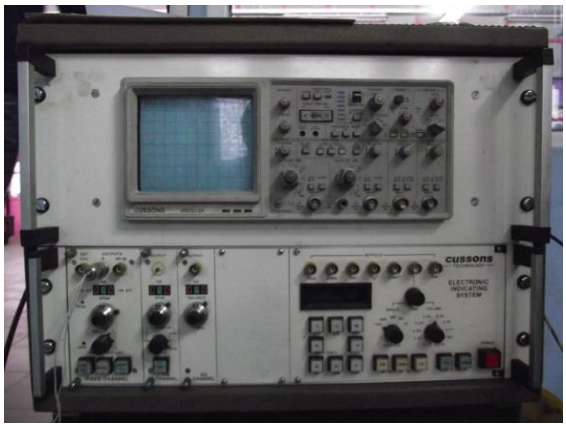


Resim 5.2. Deney düzeneği, dinamometre ve kontrol paneli

5.1.3. İndikatör sistemi

İndikatör sistemi basınç sensörü, enkoder, indikatör cihazı, veri toplama kartı, iyon akım devresi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Basınç sensöründen alınan analog silindir içi basınç ve iyon akım sinyalleri National Instrument marka veri aktarım kartında (NI USB-6251) dijital sinyallere çevrilmiştir. Dijital verilere çevrilen sinyaller bilgisayara aktarılmaktadır. Çevrimsel farklılıkların azaltılabilmesi adına silindir içi basınç ve iyon akım verilerinin ortalaması alınmaktadır.

Silindir içi basınç verilerinin alınması ve sinyallerin yükseltilmesi için Resim 5.3’de görülen Cussons P4410 indikatör cihazı kullanılmıştır [4,6,7,13].



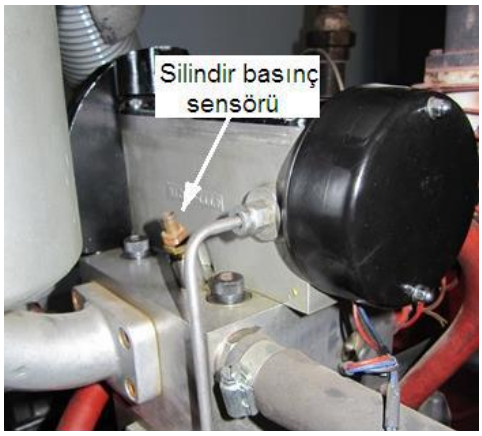
Resim 5.3. İndikatör cihazı

Basınç Sensörü:

Yanma analizinde kullanılacak olan silindir içi basınç verileri Kistler 6121 marka basınç sensörü yardımı ile elde edilmektedir. Veriler 0,36° KA krank açısı aralıklarında kaydedilmektedir. Basınç sensörünün teknik özellikleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Silindir içi basınç sensörü Resim 5.4'te görülmektedir [4,6,7,13].

Çizelge 5.2. Basınç sensörü teknik özellikleri

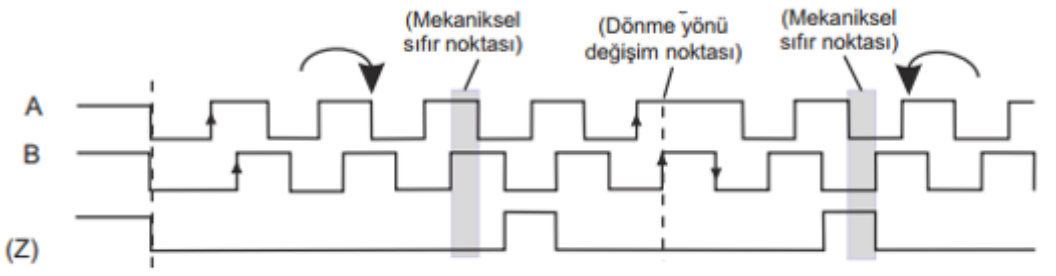
Marka/Model	Kistler 6121 Piezo Elektrik
Çalışma Aralığı (bar)	0-250
Ölçüm Hassasiyeti (pC/bar)	14,7
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-50-350
Ölçüm Toleransı (+/- %)	0,5



Resim 5.4. Silindir basınç sensörü

Enkoder:

Krank mili üzerine bağlanarak bir tam turda 1000 pals üreten enkoderin şaft bağlantısı yapılarak motor devrinin ölçülmesi sağlanmıştır. Enkoderden iki sinyal elde edilmektedir. Sinyallerden biri üst ölü nokta sinyali (Z) diğeri ise krank açısı sinyalidir (A). Enkoder 0,36° KA aralıklarında motor hızını ölçmektedir. Bu aralıklarda silindir içi basınç sinyallerinin veri toplama kartına iletilmesinde görev almaktadır. Enkoder krank miline plastik kaplin vasıtasıyla bağlanmıştır. Enkoderin krank miliyle olan montajı silindir basıncının ölçülmesinde ve imep değerlerinin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Dolayısıyla ÜÖN hassas bir şekilde ayarlanmalıdır. Hassas ayarı yapabilmek için 0,01 mm hassasiyette sahip komparatör kullanılarak ÜÖN belirlenmektedir. Daha sonra enkoderin veri toplama kartına bağlantısı yapılmaktadır. Enkoder +5V'luk ÜÖN sinyalini (Z) gönderdikten sonra kaplin üzerinde bulunan civatalar sıkılarak enkoder krank miline sabit hale getirilmektedir. Bu sayede piston ÜÖN'ya geldiğinde enkoderin ürettiği sinyal (Z) çakıştırılmıştır. Şekil 5.2'de enkoderin çıkış sinyalleri ve çalışma mantığı anlatılmaktadır. A ve B çıkışları enkoder milinin bir tam tur dönmesiyle 1000 pals üretmektedir. Z çıkışı ise her turda bir pals üretmektedir. A ve B çıkışlarından elde edilen palsler arasında faz farkı bulunmaktadır ve bu sayede dönüş yönünün belirlenmesi gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Yaptığımız çalışmada enkoder, krank açısı bilgisini almak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla A çıkışından palsler alınmıştır. Z çıkışı ise motorun ÜÖN tespitinde kullanılmıştır. Çizelge 5.3 Enkoderin teknik özelliklerine yer verilmiştir.



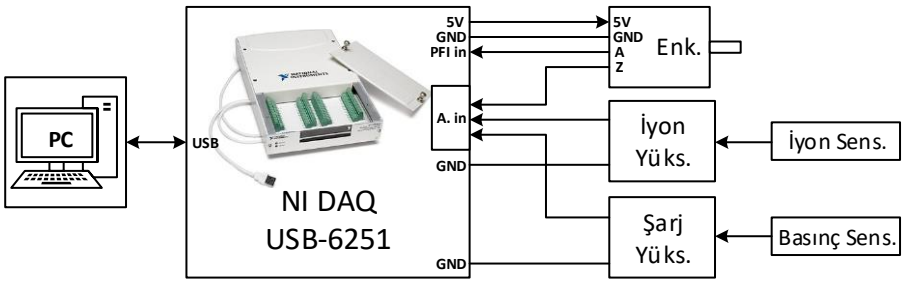
Şekil 5.2. Enkoder çıkış sinyalleri

Çizelge 5.3. Enkoder teknik özellikleri

Marka/Model	Opkon
Gövde Çapı (mm)	50
Mil Çapı (mm)	8
Besleme Gerilimi (V DC)	5
Bir Turdaki Pals Sayısı	1000
Çıkış Tipi	Line Driver
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20-80
Maksimum Çalışma Hızı (rpm)	4000
Çıkış Sinyalleri	A, B, Z

Veri Toplama Kartı:

Analog silindir içi basınç ve iyon akım sinyallerinin dijital sinyallere çevrilmesi ve bilgisayar ortamına aktarılması için National Instrument marka (NI USB-6251) veri aktarım kartı (DAQ) kullanılmıştır. Enkoderin ürettiği krank açısı sinyallerinden Z sinyali ile ÜÖN belirlenmekte ve motorun her devrinde enkoderden 1000 pals gelmektedir. 0,36°KA aralıkları ile silindir içi basınç verileri dijital ortama kaydedilmektedir. Şekil 5.3'te veri aktarım kartının PC, enkoder, iyon sensörü ve basınç sensörü ile bağlantıları verilmiştir.



Şekil 5.3. DAQ bağlantı şematiği

5.1.4. Sıkıştırma oranının değiştirilmesi

Sıkıştırma oranını ayarlamak için motor bloğuna farklı kalınlıklara sahip şimler eklenmektedir. Buji ile ateşlemeli Hydra marka deney motorunun HCCI motora dönüşümünü sağlamak için sıkıştırma oranı 9:1'den 12:1'e çıkartılmıştır. Sıkıştırma oranını 12:1'e yükseltebilmek için 10.124 mm kalınlığında şim kullanılmıştır [4,6,7,13].

5.1.5. Emme havası giriş sıcaklığının değiştirilmesi

Emme havası giriş sıcaklığını değiştirebilmek için ilk olarak kontrol paneli üzerinden emme havası ısıtıcısı çalıştırılmaktadır. Elektronik bir devre yardımı ile de emme havası giriş sıcaklığı istenilen sıcaklığa ayarlanabilmektedir. Deney motorunun üzerinde bulunan emme havası ısıtma sistemine ek olarak emme hattına ayrı bir ısıtıcı bağlanmaktadır. Yapılan bu ek sistem ile emme havası giriş sıcaklığı hızlı bir şekilde istenen değere ulaştırılmaktadır. İlave edilen bu sistem Farnam Flow Torch 400 model ısıtıcı rezistans ve ENDA ETC9420 model sıcaklık kontrol ünitesinden oluşmaktadır.

Emme havası sıcaklığı motor girişinde bulunan sıcaklık sensörü (termokupl) ile ölçülerek istenilen değere set edilebilmektedir. Resim 5.5'te emme havası ısıtma sistemi gösterilmektedir [4,6,7,13].



Resim 5.5. Emme havası ısıtma sistemi

5.1.7. Emisyon analiz cihazı

Deneyler sırasında SUN MGA 1500 marka emisyon analiz cihazı egzoz gazlarının ve hava yakıt oranlarının ölçümünde kullanılmıştır. Egzoz gazı ölçüm cihazıyla HC, CO, O_2, CO_2, NO emisyonları, hava/yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı ölçülebilmektedir. Resim 5.6'da emisyon ölçüm cihazı görülmektedir [4,6,7,13]. Çizelge 5.4'te Emisyon cihazının teknik özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.4. Emisyon cihazı teknik özellikleri

	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
HFK	0-4	0,001
CO (% vol)	0-14	0,001
CO_2 (% vol)	0-18	0,01
HC (ppm vol)	0-9999	1
NO (ppm vol)	0-5000	1
O_2 (% vol)	0-25	0,01

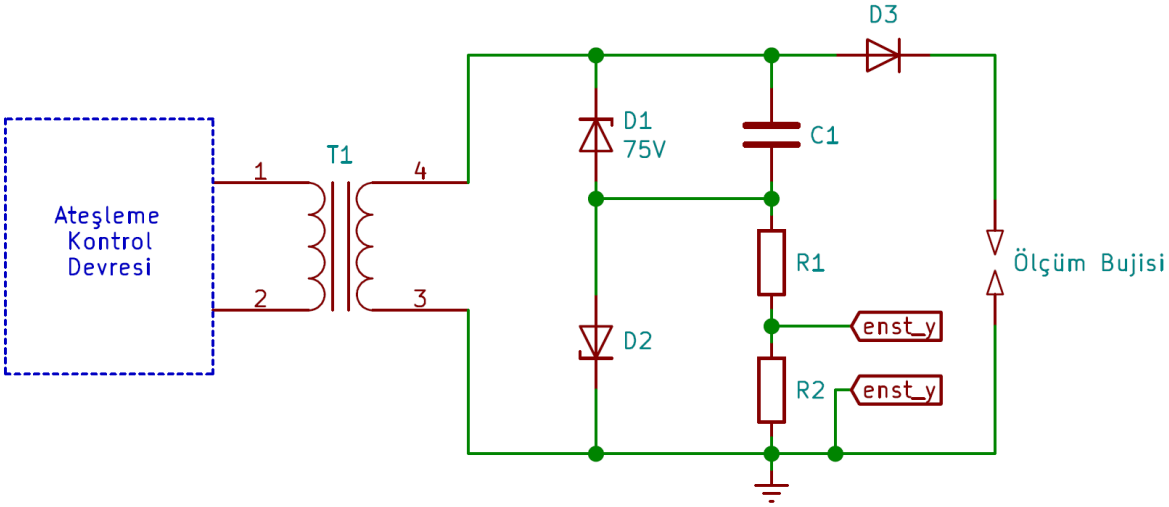


Resim 5.6. SUN MGA 1500 marka emisyon ölçüm cihazı

5.1.8. İyon akımı ölçüm devresi

Şekil 5.4'te iyon akımı ölçüm devresi görülmektedir. Devrede T1 ateşleme sistemi bobinidir. Ateşleme kontrol devresi yardımıyla T1 primer sargılarına enerji verilir. Primer sargı akımı kısa bir süre sonra kesilerek sekonder sargı uçlarında yüksek gerilim elde edilmesi sağlanır. Elde edilen yüksek gerilim C1 kondansatörünün şarj edilmesini sağlar. C1 kondansatörünün şarj gerilimi 75V'luk D1 zener diyotu ile belirlenir. C1 kondansatörü üzerinde depolanan 75V gerilim D3, R1 ve R2 üzerinden iyon akımı için ön gerilim görevi görmektedir. Silindir içerisinde yanma meydana geldiğinde ölçüm bujisi tırnak aralığında iyonlaşma ile açığa çıkan elektronlar C1 kondansatöründe depolanan gerilim sayesinde bir akıma dönüştürülür. Bu akım devresini D3, R1 ve R2 üzerinden tamamlar. R2 direnci iyon akımı ölçüm direncidir ve bu direnç üzerinde iyon akımı ile orantılı bir gerilim elde edilir. R2 üzerinde düşen gerilim enstrümantasyon yükselteci üzerinden veri toplama kartına aktarılır.

Devrede bulunan D2 zener diyotu R2 üzerinden alınan gerilimin sınırlandırılmasını sağlar. Veri toplama kartının analog girişleri en fazla 10V'tur. Bu nedenle R2 üzerinden alınan gerilimin sınırlandırılması gerekmektedir.



Şekil 5.4. İyon akımı ölçüm devresi

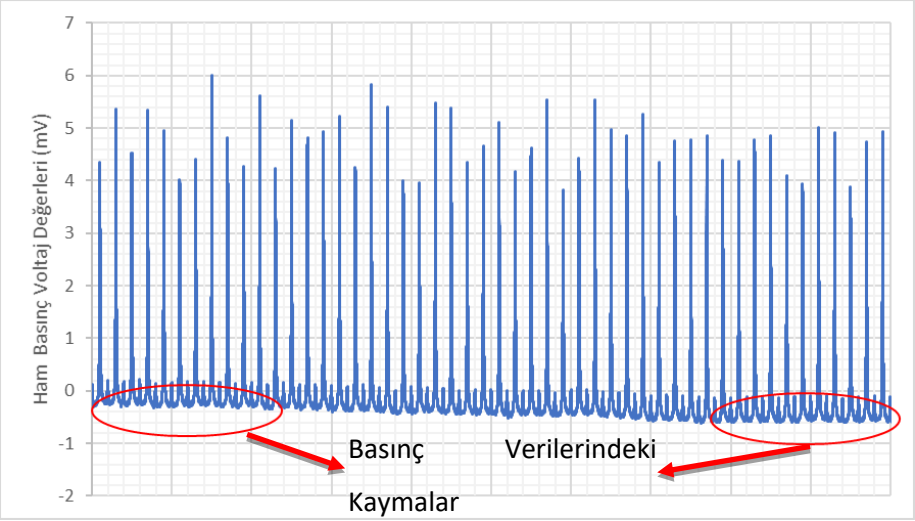
75 voltluk ön gerilimle ölçüm bujisi elektrotları arasında elektrik alan oluşturulur. Elektrik alan sonucunda oluşan iyonlaşma akımı R2 direnci üzerinde gerilim sinyaline dönüştürülür.

5.2. Deney Verilerinin Analizi

5.2.1. Verilerin işlenmesi

Silindir içi basınç ve iyon akımı sinyalleri ASCII formatında bilgisayara aktarılmaktadır. HCCI yanmasını iyon akımı sinyalleri ile birlikte değerlendirebilmek için silindir içi basınç verileri ile yanma analizi gerçekleştirebilen bir kullanıcı arayüzü Matlab yazılımı ile geliştirilmiştir. Ham silindir içi basınç ve iyon akımı dataları hazırlanan arayüzden excel dosyası formatı halinde çağrıldıktan sonra ardışık 50 çevrimin krank açısına bağlı ortalama silindir basıncı ve ortalama iyon akımı, kümülatif ısı değerleri elde edilmektedir. Basınç sensörünün ilettiği ve iyon akım devresinden elde ettiğimiz sinyalleri işlenmeden önce sinyaller üzerinde düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Basınç sensörünün gönderdiği analog sinyaller dijital sinyallere çevrilir. Daha sonra basınç sensörünün referans basınç değeri ile çarpılarak basınç verileri elde edilmiş olur. Güvenilir ve doğru silindir içi basınç verileri elde etmek için enkoderden gelen ÜÖN sinyali (Z sinyali) ile motorun ÜÖN'sı arasında sapma bulunmamalıdır. Sapma olmaması için ÜÖN hassas bir şekilde ayarlanıp enkoderin krank miline bağlantısı sabitlenmelidir. Kaymaya sebep olarak ölçüm hattında oluşan elektriksel yük ve gürültü ile basınç sensöründe oluşan elektriksel yükün çakışması,

kabloların yalıtımlı olmaması, yanma işlemi sonucunda meydana gelen ısıl stres gösterilmektedir [2,5,7,13].



Şekil 5.5. Ham silindir içi basınç verilerinde meydana gelen kayma

Şekil 5.5'te ham silindir içi basınç verilerinde zamana bağlı meydana gelen kayma görülmektedir. Kaymanın düzeltilebilmesi için kaymanın açısı belirlenir ve bütün basınç değerlerinde görülen kayma farkı çıkartılır. Bu işlemlerle birlikte emme zamanı sonunda piston AÖN'da iken mutlak basınç atmosferik basınca (1,013 bar) eşitlenir. Yanma analizini gerçekleştirmek ve 50 ardışık çevrimin ortalama silindir basıncını hesaplamak için veriler kullanılır. Bir çevrim boyunca, 0,36°KA aralıklarında 2000 adet ham silindir içi basınç ve iyon akımı verisi alınmaktadır. Alınan analog sinyaller dijital sinyallere çevrilmektedir. Dijital basınç sinyallerinin türevi alındığında ısı dağılım grafiklerinde gürültüler meydana gelmektedir. Gürültünün önüne geçebilmek için ısı dağılım sinyallerin filtrelenmesi gerekmektedir. Filtreleme işlemi ısı dağılımı sinyallerinin Taylor serisi formatında 4. seriye göre açılması ile gerçekleştirilmiştir [2,5,7,13].

$$P_{i+2}=P_i+\frac{2\,Pi'd\theta}{1!}+\frac{2^2\,Pi''d\theta^2}{2!}+\frac{2^3\,Pi'''d\theta^2}{3!}+\frac{2^4\,Pi''''d\theta^4}{4!}+\cdots.$$

$$P_{i+1}=P_i+\frac{Pi'd\theta}{1!}+\frac{Pi''d\theta^2}{2!}+\frac{Pi'''d\theta^2}{3!}+\frac{Pi''''d\theta^4}{4!}+\cdots. \quad (5.1)$$

$$P_i=P_i$$

$$P_{i-1}=P_i-\frac{Pi'd\theta}{1!}+\frac{Pi''d\theta^2}{2!}-\frac{Pi'''d\theta^2}{3!}+\frac{Pi''''d\theta^4}{4!}-\cdots.$$

$$P_{i-2}=P_i-\frac{2\,Pi'd\theta}{1!}+\frac{2^2\,Pi''d\theta^2}{2!}-\frac{2^3\,Pi'''d\theta^2}{3!}+\frac{2^4\,Pi''''d\theta^4}{4!}-\cdots.$$

4 tane düğüm noktasına göre fonksiyonun 1.dereceden türevi ise:

$$P'_i=\frac{P_{i-2}-8P_{i-1}+8P_{i+1}-P_{i+2}}{12d\theta} \tag{5.2}$$

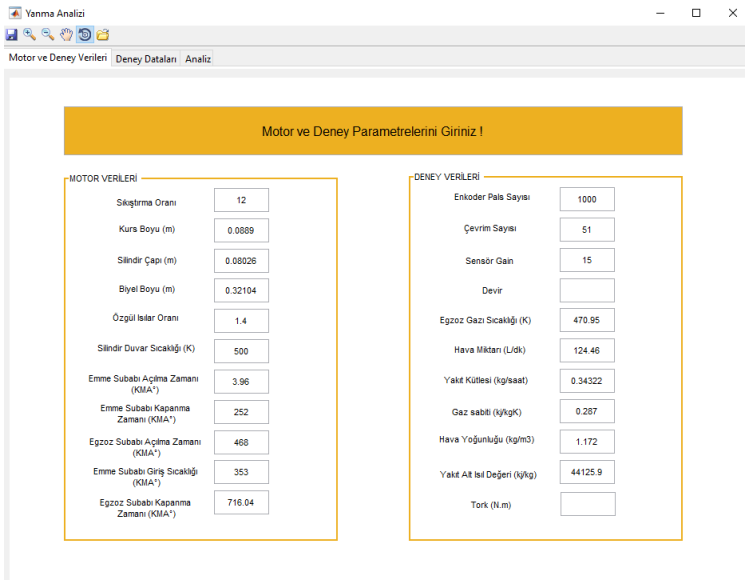
Sonuç olarak gürültüyü azaltmak için Eş. 6.3'deki algoritmaya göre filtreleme işlemi yapılmıştır.

$$P_i=\frac{1}{x^2}\left[\begin{matrix}P_{i-(x-1)}+2P_{i-(x-2)}+3P_{i-(x-3)}+\cdots+xP_i+\cdots 3P_{i+(x-3)}\\+2P_{i+(x-2)}+P_{i+(x-1)}\end{matrix}\right] \tag{5.3}$$

Denklemdeki P_i fonksiyonları silindir içi basınç sinyallerini i indisleri ise krank mili açılarını ifade etmektedir.

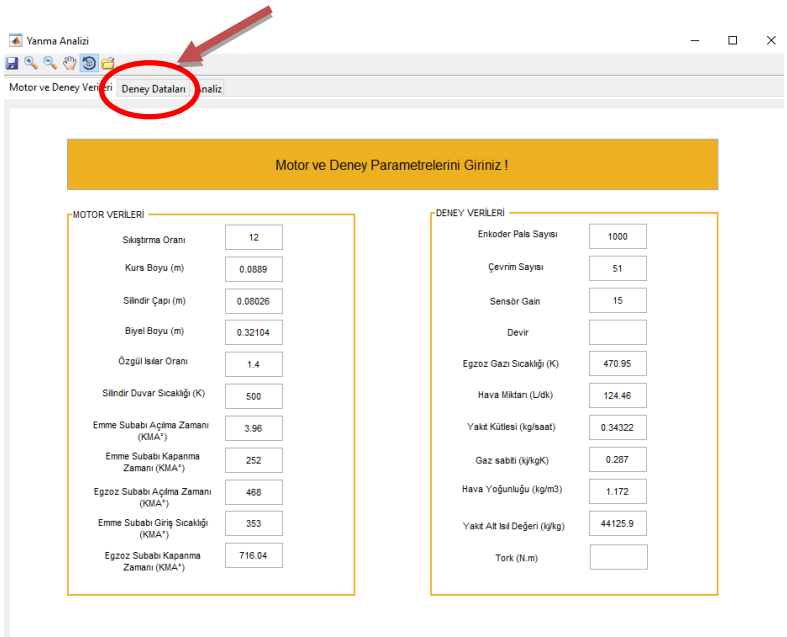
5.2.2. Yanma analizi yazılımı

HCCI motorda yanma başlangıcını iyon akımı sinyalleri ile tespit edebilmek için silindir içi basınç verileri kullanarak yanma analizi gerçekleştirebilen kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Kullanıcı ilk olarak 'Motor ve Deney Parametrelerini Giriniz' penceresiyle karşılaşmaktadır. Bu pencerede motora ve deneye ait verilerin girilmesi gerekmektedir. Resim 5.7'de örneğini görebiliriz.

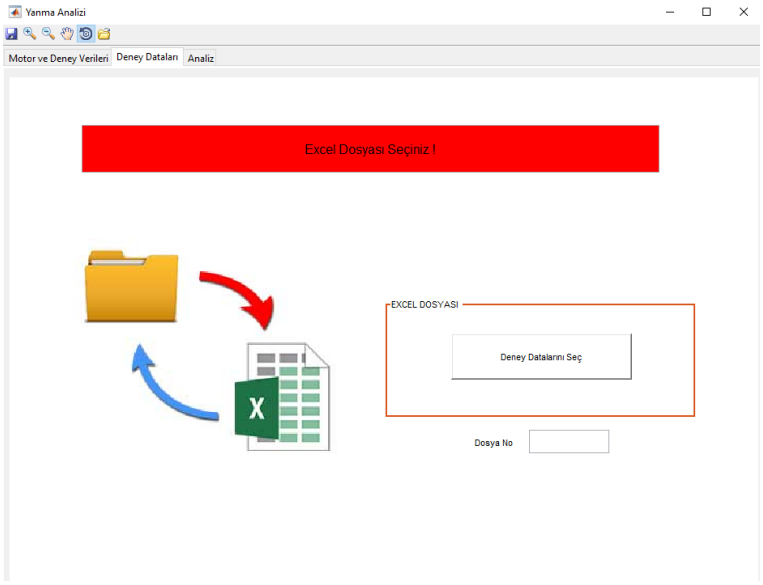


Resim 5.7. Motor ve deney parametreleri giriş arayüzü

Kullanıcı Resim 5.8'de görüldüğü üzere 'Deney Dataları' butonuna basarak ikinci aşamaya geçmelidir. Burada karşısına Resim 5.9'da ki gibi bir pencere açılacaktır. Bu pencerede Resim 5.10'da ki gibi 'Deney Dosyalarını Seç' butonuna basarak deneye ait silindir içi basınç ve iyon akımı ham verilerinin olduğu excel dosyası yazılım içine import etmelidir. 'Dosya no' kısmı ile de yanma analizden sonra kullanıcı elde ettiği verileri excel dosyası halinde export ederken dosyaya istediği ismi verebilmektedir.

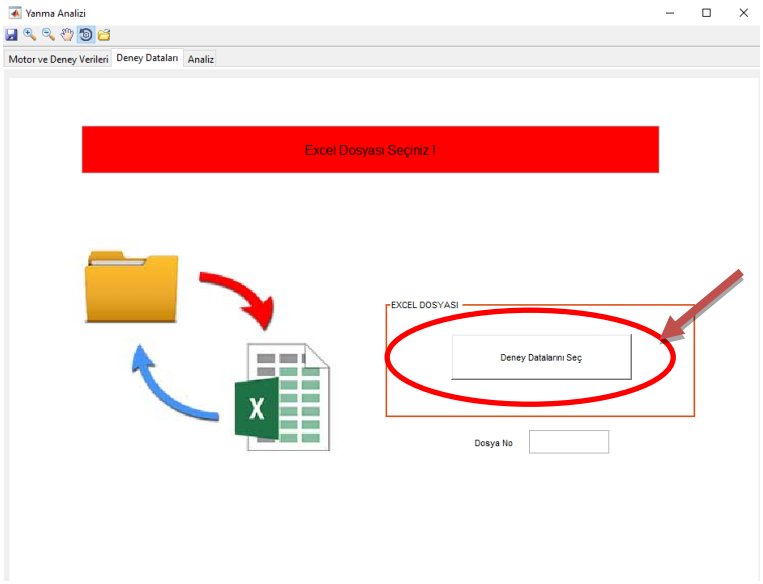


Resim 5.8. Deney datalarına geçiş

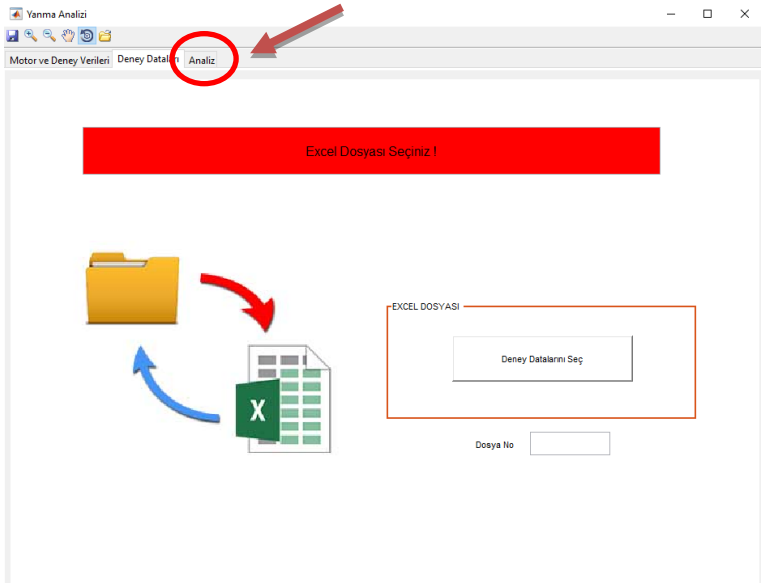


Resim 5.9. Deney dataları arayüzü

Kullanıcı Resim 5.11'de görüldüğü üzere 'Analiz' butonuna basarak son aşamaya geçmelidir.

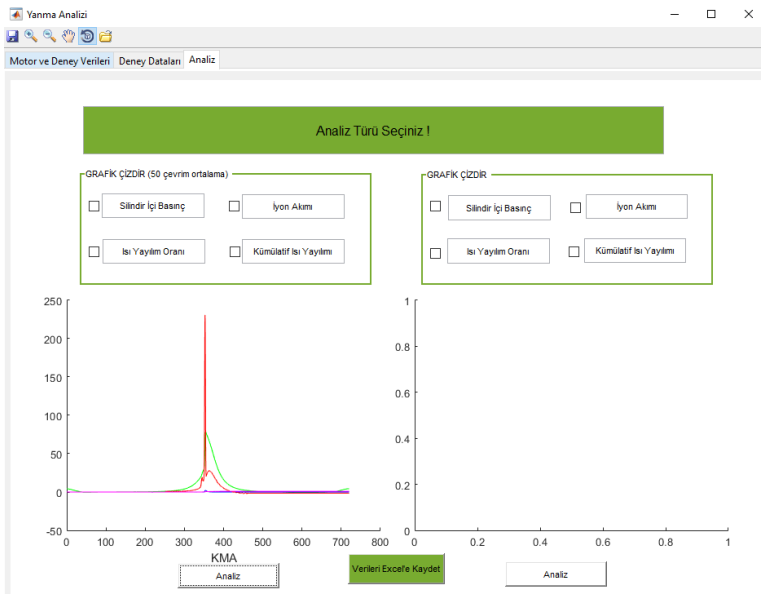


Resim 5.10. Excel dosyasının yüklenmesi

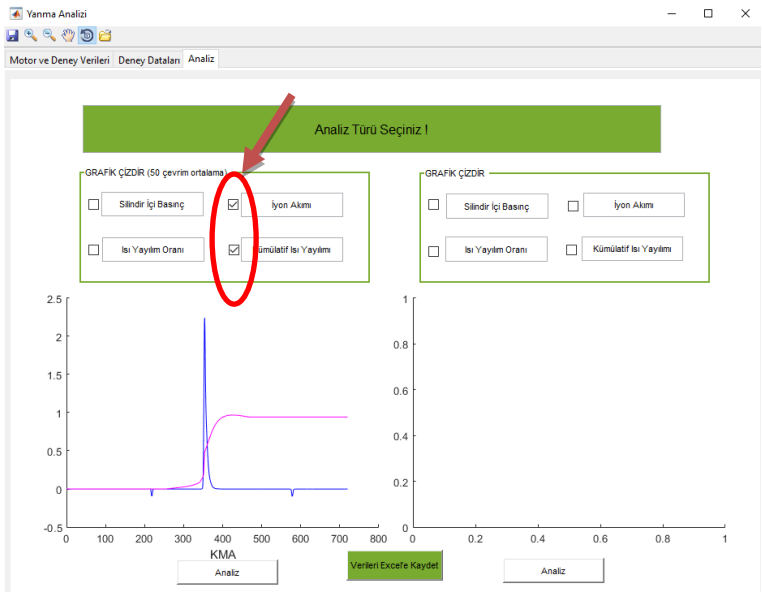


Resim 5.11. Analiz penceresine geçiş

Resim 5.12'de ki gibi 'Analiz' butonuna basmasıyla yanma analizi sonucunda elde ettiği, silindir içi basınç, iyon akım grafiği, kümülatif ısı yayılımı ve ısı yayılım oranı grafiklerini görebilecektir. Ayrıca Resim 5.13'de anlatıldığı gibi silindir içi basınç, iyon akımı, ısı yayılım oranı ve kümülatif ısı yayılım oranı yanında bulunan 'check box' lara basılarak grafikler tek tek görülebilir.

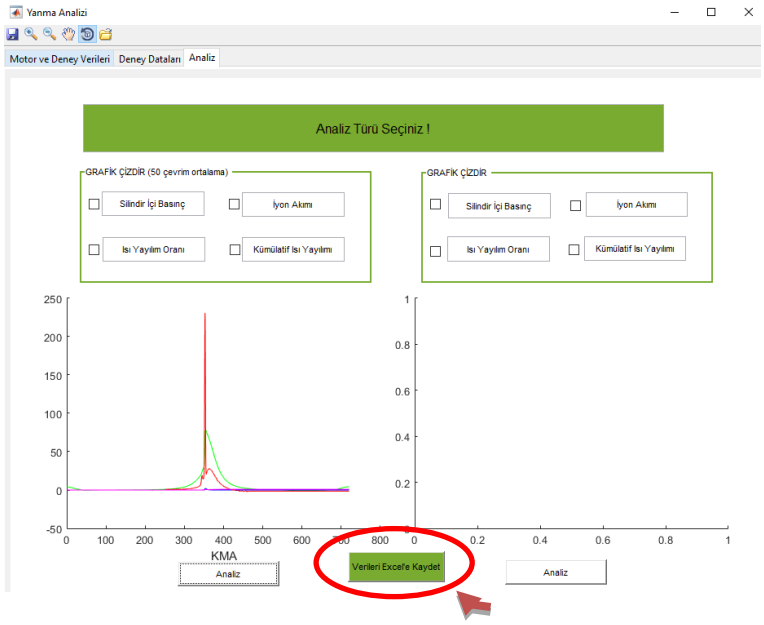


Resim 5.12. Arayüzde 'Analiz' penceresi



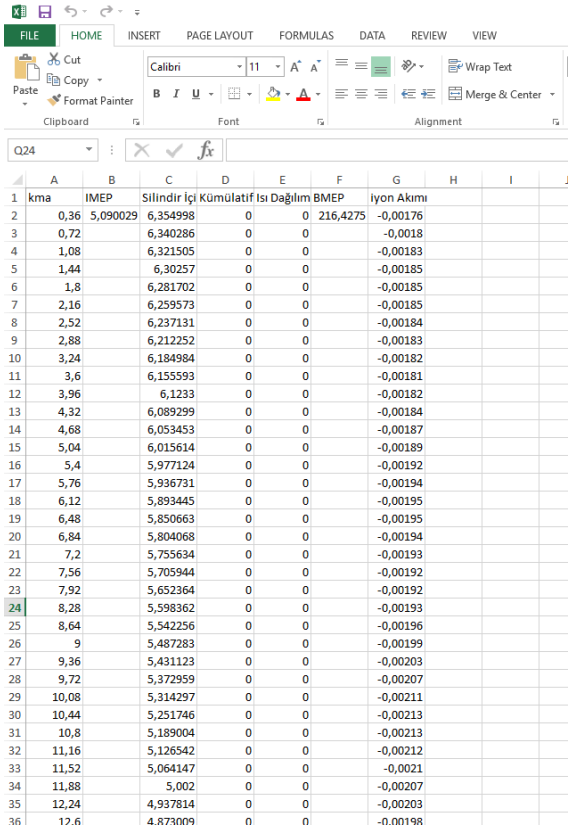
Resim 5.13. Arayüzde ‘Analiz’ penceresinde ‘iyon akımı’ ve ‘kümülatif ısı yayılımı grafiklerinin çizdirilmesi

Resim 5.14’te gösterilen ‘Verileri Excel’e Kaydet’ butonu, işlenen ham verilerle gerçekleştirilen yanma analizi sonuçlarını excel dosyası halinde export eder. Export edilen excel dosyasını açtığında Resim 5.15’deki gibi bir pencere ile karşılaşır.



Resim 5.14. Arayüzde ‘Analiz’ penceresinde ‘Verileri Excel’e Kaydet’ butonu

Kullanıcı bu penreceden krank mili açısına (kma), IMEP’e, 50 çevrim ortalaması alınmış silindir içi basınç verilerine, 50 çevrim ortalaması alınmış iyon akımı verilerine, ısı yayılım oranına, kümülatif ısı yayılım oranına ve BMEP değerlerine ulaşmaktadır.



	A	B	C	D	E	F	G
1	kma	IMEP	Silindir İçi	Kümülatif Isı	Dağılım	BMEP	İyon Akımı
2	0,36	5,090029	6,354998	0	0	216,4275	-0,00176
3	0,72		6,340286	0	0		-0,0018
4	1,08		6,321505	0	0		-0,00183
5	1,44		6,30257	0	0		-0,00185
6	1,8		6,281702	0	0		-0,00185
7	2,16		6,259573	0	0		-0,00185
8	2,52		6,237131	0	0		-0,00184
9	2,88		6,212252	0	0		-0,00183
10	3,24		6,184984	0	0		-0,00182
11	3,6		6,155593	0	0		-0,00181
12	3,96		6,1233	0	0		-0,00182
13	4,32		6,089299	0	0		-0,00184
14	4,68		6,053453	0	0		-0,00187
15	5,04		6,015614	0	0		-0,00189
16	5,4		5,977124	0	0		-0,00192
17	5,76		5,936731	0	0		-0,00194
18	6,12		5,893445	0	0		-0,00195
19	6,48		5,850663	0	0		-0,00195
20	6,84		5,804068	0	0		-0,00194
21	7,2		5,755634	0	0		-0,00193
22	7,56		5,705944	0	0		-0,00192
23	7,92		5,652364	0	0		-0,00192
24	8,28		5,598362	0	0		-0,00193
25	8,64		5,542256	0	0		-0,00196
26	9		5,487283	0	0		-0,00199
27	9,36		5,431123	0	0		-0,00203
28	9,72		5,372959	0	0		-0,00207
29	10,08		5,314297	0	0		-0,00211
30	10,44		5,251746	0	0		-0,00213
31	10,8		5,189004	0	0		-0,00213
32	11,16		5,126542	0	0		-0,00212
33	11,52		5,064147	0	0		-0,0021
34	11,88		5,002	0	0		-0,00207
35	12,24		4,937814	0	0		-0,00203
36	12,6		4,873009	0	0		-0,00198

Resim 5.15. Export edilen excel deney dosyası

Arayüzün çalışma mantığı şekil 5.6'daki blok diyagram ile de anlatılmaktadır.

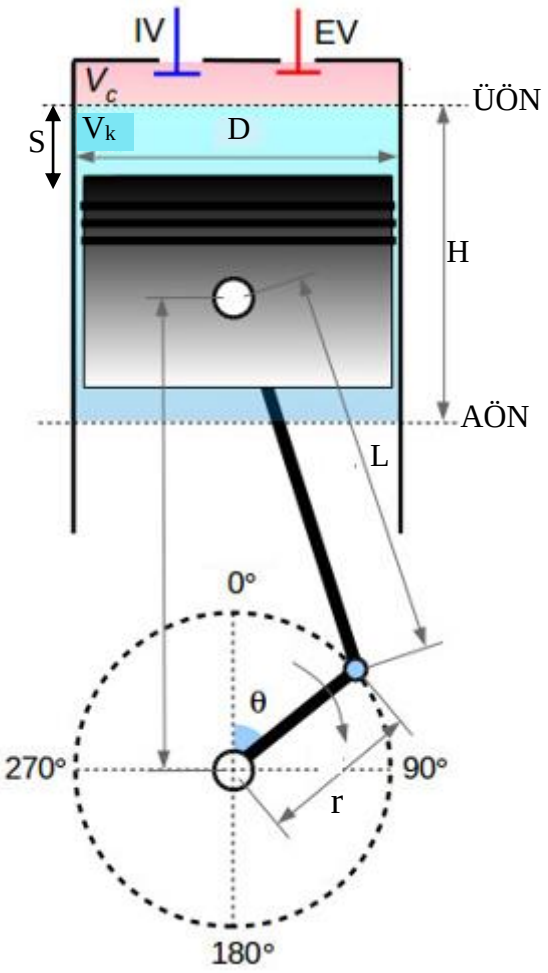


Şekil 5.6. Arayüz blok diyagramı

5.2.3. Motor geometrisi

Yanma analizini gerçekleştirebilmek ve motor performans parametrelerini hesaplayabilmek için silindir içi hacmin ve hacmin türevinin krank açısına göre

değişiminin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 5.7'de motor geometrisi verilmektedir. Krank açısına (θ) göre pistonun aldığı yol ve değişen silindir hacmi aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır [2,5,7,13].



Şekil 5.7. Motor Geometrisi

Toplam silindir hacmini bulmak için öncelikle kurs hacminin ve yanma odası hacminin sırasıyla hesaplanması gerekmektedir. Eş. 5.4, Eş.5.5 ve Eş.5.6 bu hesaplamalar için kullanılır.

$$V_k = \frac{\pi x D^2}{4} x H \tag{5.4}$$

$$V_c = \frac{V_k}{\varepsilon - 1} \tag{5.5}$$

$$V_s = V_k + V_c \quad (5.6)$$

Denklemlerdeki parametreler;

V_k: Kurs hacmi, m^3

V_c: Yanma odası hacmi, m^3

V_s: Toplam silindir hacmi, m^3

D: Silindir çapı, m

H: Kurs boyu, m

ε: Sıkıştırma oranını ifade eder.

Pistonun aldığı yolu hesaplamak için motor geometrisinden yararlanılarak Eş.5.7 yazılır.

$$S = L + r - rxcos\theta - Lxcos\beta \quad (5.7)$$

Trigonometrik dönüşümler yapılarak $cos\beta$ ifadesinin θ açısı cinsinden yazılır.

$$Lxsin\beta = rxsin\theta \quad (5.8)$$

$$sin\beta = \frac{r}{L}xsin\theta \quad (5.9)$$

$$sin^2\beta + cos^2 = 1 \quad (5.10)$$

$$cos\beta = \sqrt{1 - sin^2\beta} \quad (5.11)$$

$$cos\beta = \sqrt{1 - (\frac{r}{L}x\ sin\theta)^2} \quad (5.12)$$

Eş.5.12'deki $cos\beta$, Eş.5.7'de yerine konulup, $\frac{r}{L}$ yerine λ ifadesi yazılırsa ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Eş.5.14 elde edilir.

$$S(\theta) = L + r - rxcos\theta - Lx(1 - (\frac{r}{L} x\ sin\theta)^2) \quad (5.13)$$

$$S(\theta) = rx((1 - cos\theta) + \frac{1}{\lambda} - \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - sin\theta^2} \quad (5.14)$$

Denklemlerdeki parametreler;

L: Biyel kolu uzunluğu, m
r: Krank mili yarıçapı, m
λ: Krank mili çapının biyel kolu uzunluğuna oranı
θ: Krank mili açısı, °

S (θ): Krank mili açısına göre pistonun aldığı yol, m'dir.

Krank mili açısına göre anlık silindir hacmi ise Eş.5.15'deki denklem ile ifade edilir.

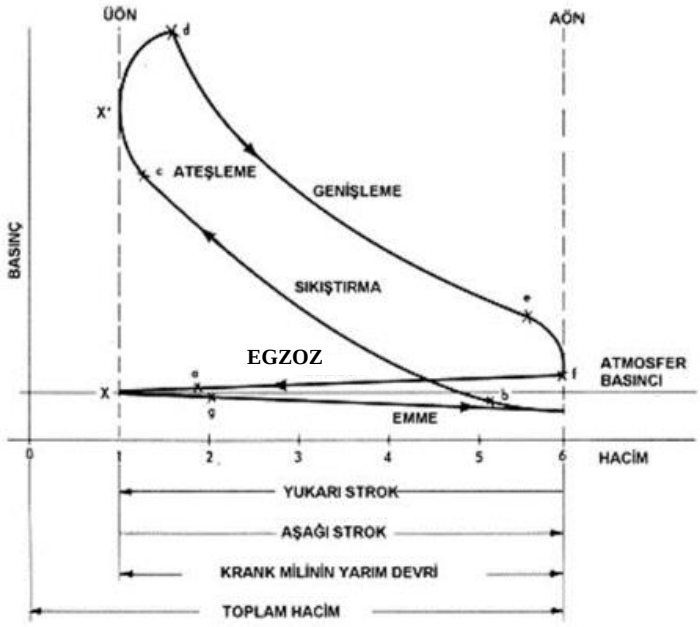
$$V = V_c + \frac{\pi x D^2}{4} x\mathrm{S}\ (\theta) \quad (5.15)$$

Silindir hacminin krank açısına göre birinci mertebeden türevi için Eş.5.15'in türevi alındığında Eş.5.16 elde edilir.

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi x D^2}{4} xr(sin\theta + \frac{cos\theta x sin\theta}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - sin^2\theta}} \quad (5.16)$$

5.2.3. İş ve indike ortalama efektif basıncın hesaplanması

Çevrim boyunca elde edilen iş ve indike ortalama efektif basınç (IMEP) basınç verileri kullanılarak hesaplanmaktadır. İndike ortalama efektif basınç değerleri, motor hızı, silindir sayısı ve motor hacmine bağlı olmadığından dolayı, motor veriminin belirlenmesinde kullanılan ana parametrelerden biridir [2,5,7,13].



Şekil 5.8. Çevrim boyunca yapılan iş ve kapalı indikatör diyagramı

Şekil 5.8'deki kapalı indikatör diyagramının altındaki alandan her çevrim boyunca piston yapılan iş Eş.5.17 vasıtasıyla bulunur. İMEP ise hesaplanan iş değerinin kursa hacmine bölünmesi ile bulunur.

$$W_c = \oint P dV \tag{5.17}$$

$$imep = \frac{W_c}{V_d} \tag{5.18}$$

Denklemlerdeki parametreler;

W_c: iş, J

P=Silindir basıncı, Pa

dV: Hacim değişimi, m^3'dür.

5.2.4. Çevrimsel farklılıkların analizi

Her çevrimdeki silindir içi karışım kompozisyonun değişimi, silindir içi sıcaklık ve basınç farkları çevrimsel farklılıklara sebep olmaktadır. HCCI yanma modunda yanma odasının

tümünde oluşan ani ve hızlı ısı dağılımı çevrimler arasındaki farkların artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, düşük motor yüklerinin sebep olduğu ateşlenememe problemi ve yüksek motor yüklerinden kaynaklanan vuruntudan dolayı da çevrimsel farklılıklar artmaktadır. Motorun düzenli çalışıp çalışmadığını anlamak ve tekleme sınırlarını belirlemek adına belirli sayıdaki ardışık çevrimin aralarındaki farklılıkların incelenmesi gerekmektedir. Motor performans kararlılığı ise IMEP (indike ortalama efektif basınç) değerinin çevrimsel farklılıklara göre değişiminin incelenmesi ile belirlenmektedir. Çevrimler arasındaki farkları ifade edebilmek için varyans katsayısı (COV) kullanılmaktadır. Literatürde motorun kararlı bölgede çalışabilmesi için COV değerinin %10'u geçmemesi gerektiği vurgulanmaktadır. HCCI yanma modu için bu değerin kritik olduğu kabul edilmektedir [3,7,15,20,25,39] Ortalama efektif basınç varyans katsayısı (COV_{imep}) Eş. 5.19 ile hesaplanmaktadır.

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{\bar{X}} x100 \tag{5.19}$$

Denklemdeki parametreler;

σ_{imep}; 100 çevrimin IMEP değerlerinin standart sapmasını,

$\bar{X}$; 100 çevrimin IMEP değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

Eş. 5.19'daki $\bar{X}$ ve σ_{imep} parametreleri Eş.5.20 ve Eş.5.21'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i-1}^{n} X_i}{n_{çevrim}} \tag{5.20}$$

$$\sigma_{imep} = \sqrt{\frac{\sum_{i-1}^{n} (X_i - \bar{X})}{n_{çevrim}}} \tag{5.21}$$

Denklemlerdeki parametreler;

X_i; Her çevrimin IMEP değerini,

n; çevrim sayısını ifade etmektedir.

5.2.5. Politropik indeksin belirlenmesi

Yanmanın gerçekleştiği zaman boyunca politropik indeks değişim göstermektedir. Silindir içerinde yanmanın başladığı ve sonlandığı zaman bu değişim ile belirlenebilmektedir. Sıkıştırma ve genişleme zamanları boyunca politropik üs sabit kalmakta, yanma gerçekleştiği zaman ise değişmektedir. Politropik üs sıkıştırma ve genişleme işlemi boyunca Eş.5.22'deki denklem ile ifade edilmektedir [2,5,7,13].

$$PV^{n_c} = c \tag{5.22}$$

Denklemin diferansiyelini alırsak;

$$n_c PV^{n_c-1} dV + V^{n_c} dP = 0 \tag{5.23}$$

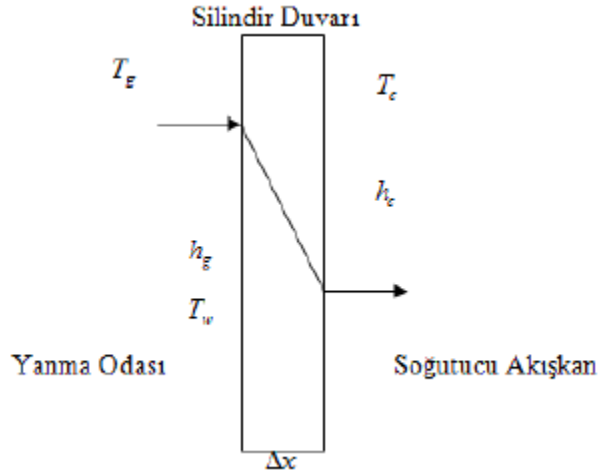
$$n_c = -\frac{VdP}{PdV} \tag{5.24}$$

elde edilmiş olur.

5.2.6. Silindir duvarlarına iletilen ısı miktarının hesaplanması

Yakıt sayesinde yanma odasına verilen enerjinin yaklaşık olarak %10-15'i yanma işlemi sırasında oluşan ısı kayıplarına gitmektedir. Dolayısıyla krank açısına bağlı olarak ısı transfer değerleri de değişmektedir. Yanma odası duvarlarından, köşe noktalardan ve silindirdeki oyuklardan transfer edilen ısı yüzünden piston üzerine uygulanan kuvvet ve net iş azalmaktadır. Isı transferine bağlı olarak termik verim ve motor performansında kayıplar olmaktadır. Emme zamanında yanma odası içerisindeki dolgunun sıcaklığı silindir duvar sıcaklığından daha düşük olduğu için ısı transferi duvardan dolguya geçmektedir. Bu durumdaki ısı akışı negatife düşmektedir. Yanma işlemi sırasında ise, ısı akışı maksimum silindir içi basıncın ve sıcaklığının oluştuğu zamanlarda en yüksek seviyelere çıkmakta ve ısı transferi dolgudan silindir duvarlarına geçmektedir [2,5,7,13,16,18,25,47].

Şekil 5.9'da ısı transferinin temsili olarak şematiği yer almaktadır



Şekil 5.9. Silindirde oluşan ısı transferi

İçten yanmalı motorlarda silindir yüzeylerine olan ısı transferi Newton'un soğutma yasasına göre Eş.5.25'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{dQ_{ht}}{d\theta} = \frac{1}{6xn} x h_g x A x (T_g - T_w) \quad (5.25)$$

$$A = \frac{V}{A_{pis}} x\ \pi\ x\ D + 2\ x\ A_{pis} \quad (5.26)$$

$$A_{pis} = \frac{\pi\, x\, D^2}{4} \quad (5.27)$$

$\frac{dQ_{ht}}{d\theta}$: Krank açısına göre anlık ısı transferi, J/°KA

n: Motor hızı, rpm

h_g: Anlık ısı taşınım katsayısı, W/m^{2}K

T_g: Krank açısına bağlı olarak anlık silindir içi ortalama gaz sıcaklığı, K

T_w: Silindir duvar sıcaklığı, K

A: Krank açısına bağlı olarak ısı transfer yüzey alanı, m^2

V: Krank açısına bağlı olarak anlık silindir hacmi, m^3

D: Silindir çapı, m

A_{pis}: Piston başı alanı, m^2

Isı taşınım katsayısı, silindir hacmi, silindir çapı, silindir sıcaklığı, silindir basıncı ve ortalama gaz hızı gibi parametrelere bağlıdır. Isı taşınım katsayısı Hohenberg tarafından geliştirilen Eş.5.28'deki algoritma ile hesaplanmıştır.

$$h_g(\theta) = \alpha_s V(\theta)^{-0.06} p(\theta)^{0.8} T(\theta)^{-0.4} (\bar{s}_p + b)^{0.8} \quad (5.28)$$

$h_g(\theta)$: Krank mili açısına bağlı olarak ısı taşınım katsayısı,

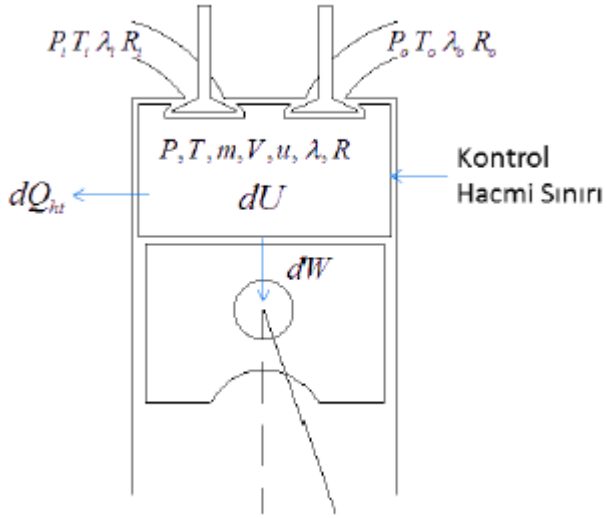
$\bar{s}_p$: Ortalama piston hızı $\bar{s}_p = \frac{2xSxn}{60}$, m/s

S: Kurs boyu,
n: motor devri,
V(θ): Krank mili açısına bağlı olarak anlık silindir hacmi,
p(θ): Krank mili açısına bağlı olarak anlık silindir basıncı,
T(θ): Krank mili açısına bağlı olarak anlık silindir gaz sıcaklığı,
α ve b: Kalibrasyon sabitleri olup Hohenberg tarafından 130 ve 1.4 olarak önerilmiştir.

5.2.7. Isı yayılım analizi

Isı yayılım analizi sırasında matematiksel olarak modeli kolaylaştırabilmek adına genel olarak tek bölgeli yanma modeli tercih edilmektedir. Şekil 5.10'da tek bölgeli yanma modeline yer verilmektedir. Bu modelde, tüm yanma bölgesi tek bir hacim olarak düşünülür ve yanma odası duvarları sistem sınırlarını vermektedir. Bütün hacimde silindir içerisindeki dolgunun sıcaklığı ve kompozisyonu eşit olarak düşünülmektedir. Isı yayılım analizi yapılırken, yanma işlemi boyunca silindir içerisindeki yanan yakıttan kaynaklı olarak açığa çıkan enerjiyi oranı incelenir. Dolayısıyla, matematiksel hesapların kapalı çevrim aralığında (emme supabı kapanmasından egzoz supabı açılmasına kadar geçen zaman) yapılması ısı yayılım analizini basite indirgemektedir.

Silindirdeki segmanlardan ve supaplardan gerçekleşen gaz kaçakları ihmal edildiğinde, kontrol hacmi içerisindeki dolgu miktarının kapalı çevrim boyunca sabit kaldığı düşünülmektedir [4,5,7,39].



Şekil 5.10. Tek bölgeli yanma modeli

Eş. 5.29 'da termodinamiğin birinci kanuna yer verilmektedir.

$$Q\text{-}W= \Delta U \tag{5.29}$$

Eş. 5.29 açık sistemler için yazılırsa Eş. 6.30 elde edilir.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dU}{dt} \tag{5.30}$$

Eş. 5.30'da;

$\frac{dQ}{dt}$: Sistem sınırlarına birim zamanda transfer olan ısı,

$\frac{dW}{dt}$: Sistem sınırlarının değişimi ile birim zamanda yapılan iş,

$\frac{dU}{dt}$: Sistem sınırları içerisinde kalan dolgunun birim zamandaki iç enerji değişimidir.

Toplam ısı dağılımı ile silindir duvarlarına transfer edilen ısı arasındaki fark ise net ısı dağılımını vermektedir [6].

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_w}{dt} \tag{5.31}$$

Eş. 5.31'de;

dQ_n: Net ısı dağılımı (kJ)

dQ_t: Toplam ısı dağılımı (kJ)

dQ_w: Silindir duvarına transfer edilen ısı (kJ)

Eş. 5.30, Eş. 5.31'de yerine yazılırsa;

$$\left(\frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_w}{dt}\right) - P\frac{dV}{dt} = \frac{dQ_n}{dt} - P\frac{dV}{dt} = mC_v\frac{dT}{dt}$$

(5.32)

İdeal gaz denkleminin (P. V= m. R. T) sabit kütle için zamana göre diferansiyeli alındığında;

$$mR\frac{dT}{dt} = V\frac{dP}{dt} + P\frac{dV}{dt}$$

(5.33)

Olur. Eş.5.33, Eş.5.32'de yerine konulursa net ısı dağılımı;

$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(1 + \frac{C_v}{R}\right)P\frac{dV}{dt} + \frac{C_v}{R}V\frac{dP}{dt}$$

(5.34)

Olarak elde edilir. Zamanın diferansiyeli krank açısına göre yazıldığında ve özgül ısıların oranı sabit alındığında Eş.5.34;

$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{k}{k-1}P\frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1}V\frac{dP}{d\theta}$ şeklinde yazılabilir. (5.35)

Eş. 5.35'de;

k: Özgül ısı oranı,$k = \frac{c_p}{c_v}$

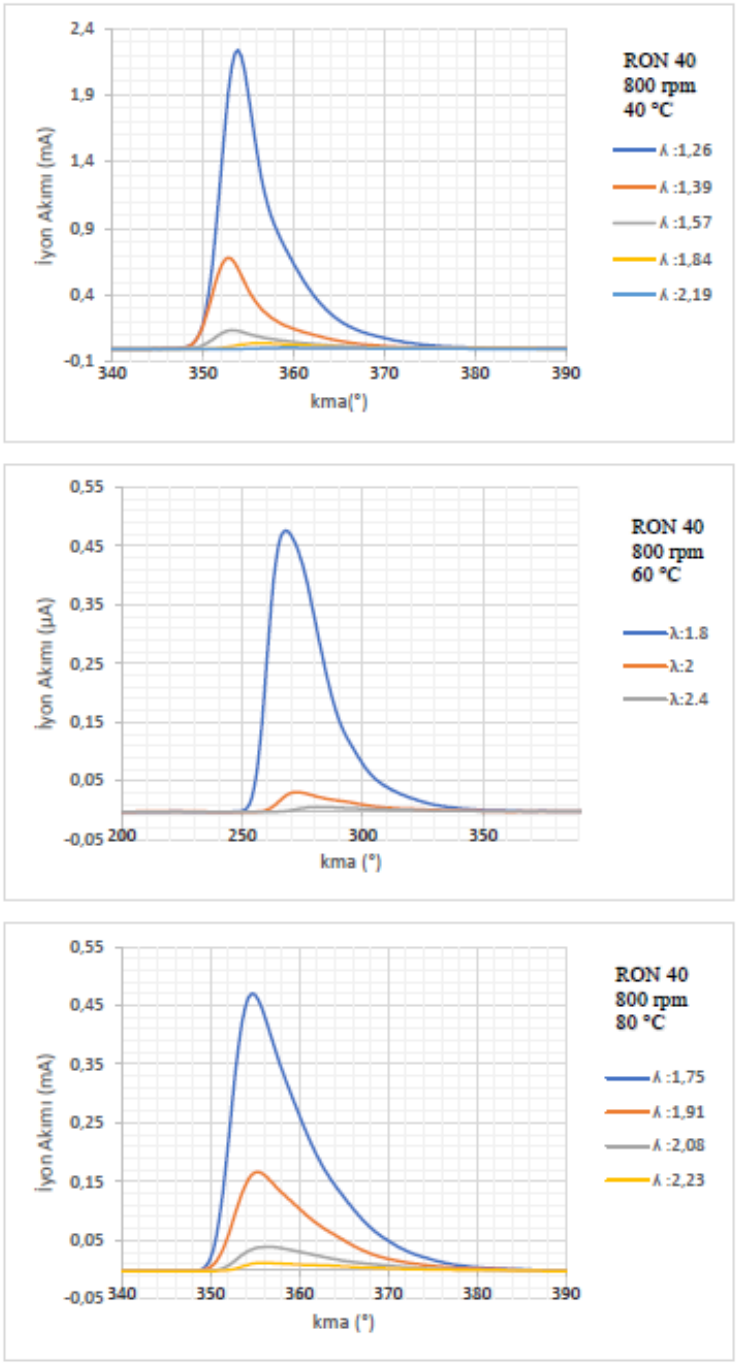
P,V : Anlık basınç ve hacim (kPa), (m^3)

θ: Krank açısı (◦) dır.

6. DENEY SONUÇLARI

HCCI dönüşümü gerçekleştirilen buji ile ateşlemeli motorda yanma analizi sonucu krank açısına bağlı olarak farklı hava fazlalık katsayıları ve farklı motor hızlarında iyonlaşma akımı sinyalleri ölçülmüştür. Esas olarak iyonlaşma akımı ile yanma başlangıcı tespiti arasındaki ilişki tartışılmıştır. Deneyler motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra farklı hava fazlalık değerlerinde, RON 40 ve RON 60 yakıtı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil.6.1.'de HCCI yanma modunda RON 40 yakıtı ile, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıkta 800 rpm motor hızında farklı hava fazlalık katsayısı değerleri için elde edilen iyon akımı sinyalleri görülmektedir. Karışım fakirleştikçe iyon akımının azaldığı gözlemlenmiştir. Fakat RON 40 yakıtı için yapılan deneylerde sıcaklık değerindeki artışın iyon akımı üzerindeki etkisinde net bir kanıya varılamamıştır. Bunun sebebinin deneylerin yapıldığı ortam koşullarının değişken olması ve HCCI motorun kararlı çalışamamasından dolayı aynı hava-yakıt oranının baz alınamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

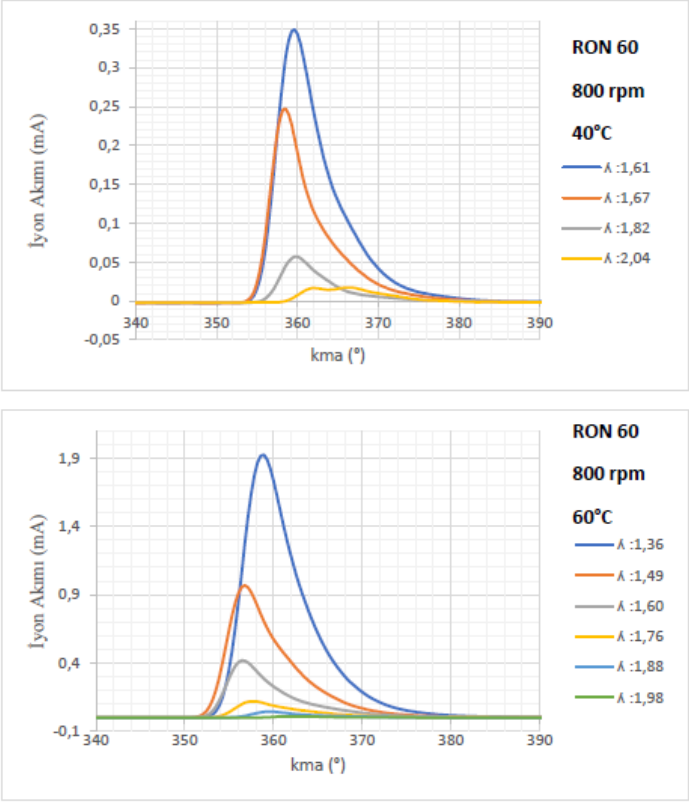
Maksimum iyon akımı RON 40 yakıtı ile λ=1.26 değerinde 800 d/d motor devrinde ve 40°C'de elde edilmiştir. λ=2.4 değerinde 800 d/d motor devrinde ve 60°C'de iyon akımı oldukça düşük seviyede bir değişim göstermiştir. Bu değerden sonra iyon akım sinyali elde edilememiştir.



Şekil 6.1. RON 40 yakıtı ile 800 d/d motor hızında farklı sıcaklık ve hava fazlalık katsayısı değerleri için iyon akımı sinyalleri

Şekil 6.2'de HCCI yanma modunda RON 60 yakıtı ile 40°C ve 60°C sıcaklıkta 800 rpm motor hızında farklı hava fazlalık katsayısı değerleri için elde edilen iyon akımı sinyalleri görülmektedir. Karışım fakirleştikçe iyon akımının azaldığı gözlemlenmiştir. RON 60 yakıtı kullanıldığında iyon akımı genliklerinde düşüş gözlemlenmiştir. RON 40 yakıtında olduğu gibi RON 60 yakıtında da sıcaklık değerindeki artışın iyon akımı üzerindeki etkisinde net bir kanıya varılamamıştır. Maksimum iyon akımı RON 60 yakıtı ile λ=1.36

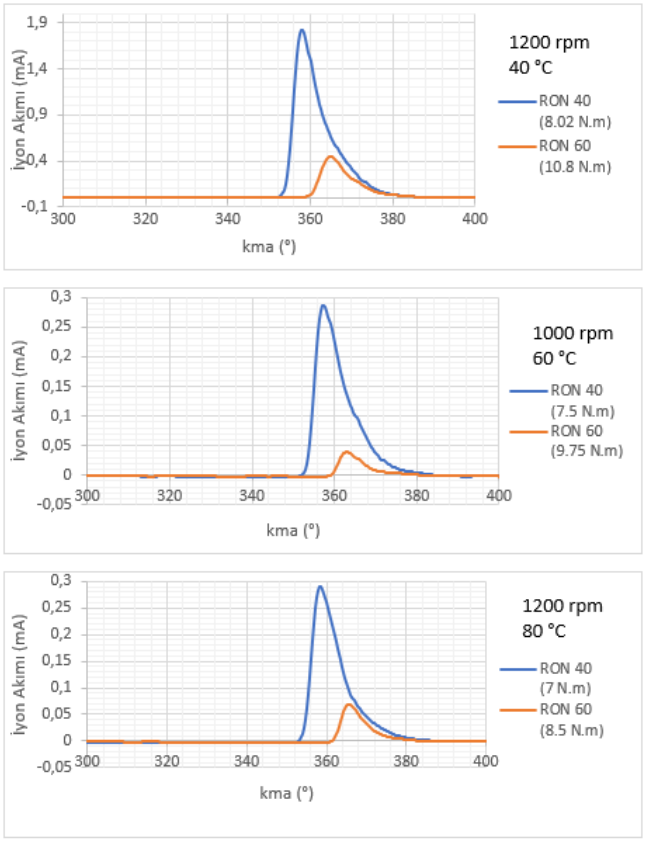
değerinde 800 d/d motor devrinde ve 60°C'de elde edilmiştir. λ=2.04 değerinde 800 d/d motor devrinde ve 40°C'de iyon akımı oldukça düşük seviyede bir değişim göstermiştir. Bu değerden sonra iyon akım sinyali elde edilememiştir.



Şekil 6.2. RON 60 yakıtı ile 800 d/d motor hızında farklı sıcaklık ve lamda değerleri için iyon akımı sinyalleri

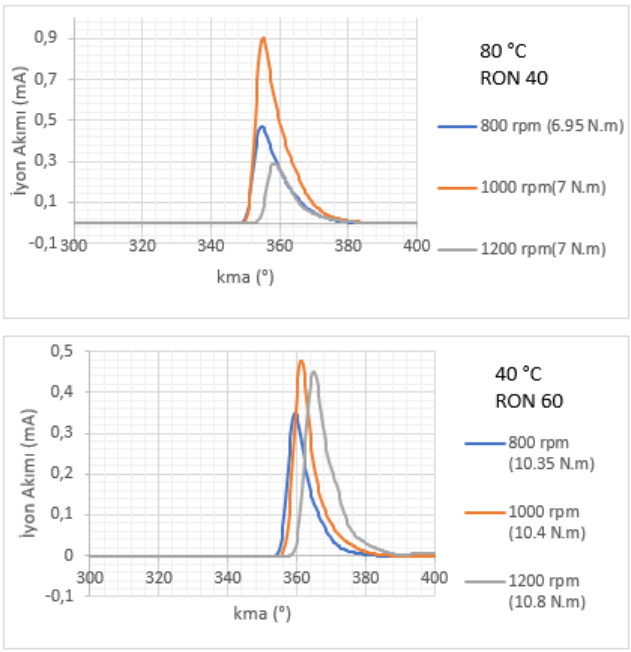
RON 40 ve RON 60 yakıtları ile sabit motor devrinde ve farklı hava fazlalık katsayıları değerlerinde yapılan deneyler sonucunda iyon akımı sinyal genliklerinin hava fazlalık katsayısı'nın artmasıyla azalması iyon ölçüm bujisi tırnak aralığında meydana gelen iyonlaşma reaksiyonlarının azalmasıyla yani karışım içerisindeki yakıt miktarının azalmasıyla açıklanabilir.

Şekil 6.3'te Farklı sıcaklık, motor hızı ve motor yüklerinde RON 40 ve RON 60 yakıtları için iyon akımı sinyallerine yer verilmiştir. Motorun aynı koşullarda çalıştırılması mümkün olmadığından sabit hız ve sıcaklık değerlerinde en yakın motor yükleri seçilmiştir. Elde edilen sinyallerde RON 40 ve RON 60 yakıtları arasında faz farkı görülmektedir. Faz farkına RON 60 yakıtının daha düşük reaktiveteli olması neden olmaktadır. Dolayısıyla yanma daha geç başlamaktadır.



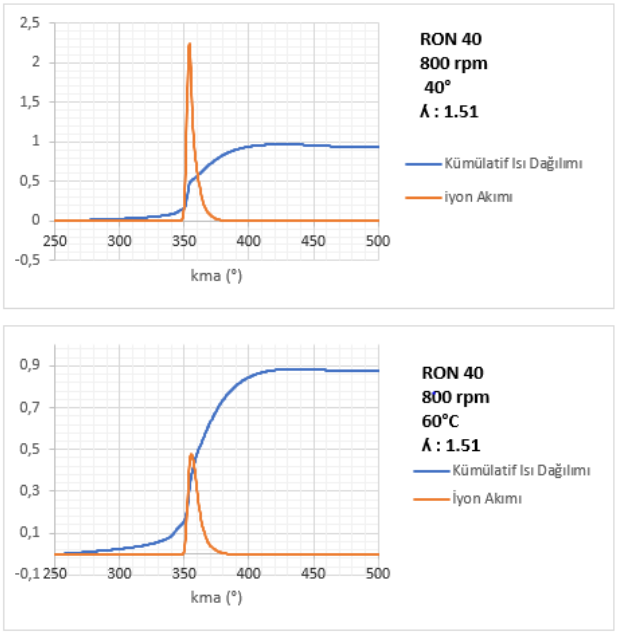
Şekil 6.3. Farklı sıcaklık ve motor devirlerinde RON 40 ve RON 60 yakıtları için iyon akımı sinyalleri

Şekil 6.4.'de RON 40 ve RON 60 yakıtlarına ait, 40°C ve 80°C sıcaklıkta birbirine en yakın motor yükleri baz alınarak farklı motor devirlerine karşılık gelen iyon akım sinyalleri verilmiştir. Hacimsel verimin değişmesine bağlı olarak içeriye alınan dolgu miktarı her devirde aynı olmamaktadır. 1000 rpm motor devrinde yanma odası içerisine daha yüksek bir verimle dolgu alındığı gözlemlenmiştir. Kısaylama yapılırken deney koşulları ve hava-fazlalık katsayısının aynı olmadığı ve bu yüzden farklılıkların meydana geldiği göz ardı edilmemelidir. Farklılığın bir kısmı hava-fazlalık katsayısının tam olarak aynı yapılamamasından kaynaklanmasıdır.

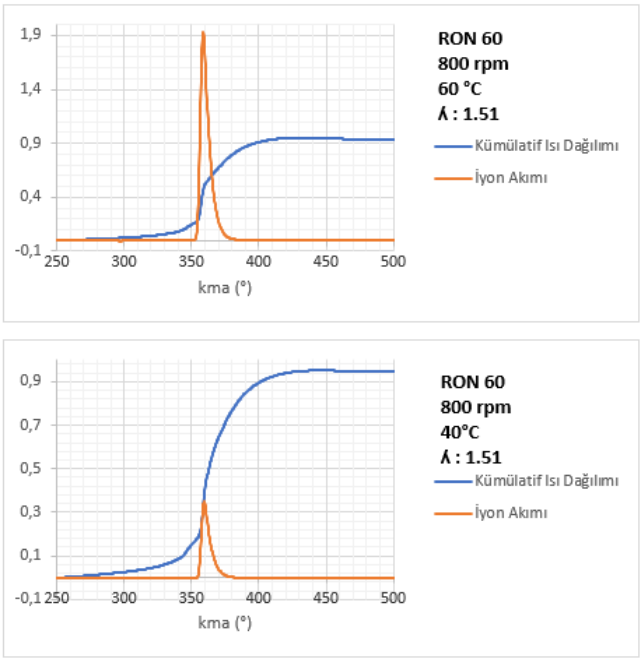


Şekil 6.4. Farklı sıcaklık, farklı motor yükleri ve farklı motor devirlerinde RON 40 ve RON60 yakıtları için iyon akım grafikleri

Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.'da farklı çalışma koşulları için iyon akımı ve kümülatif ısı dağılımı grafikleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre CA50 noktası ile iyon akımı tepe noktası arasında iyi bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

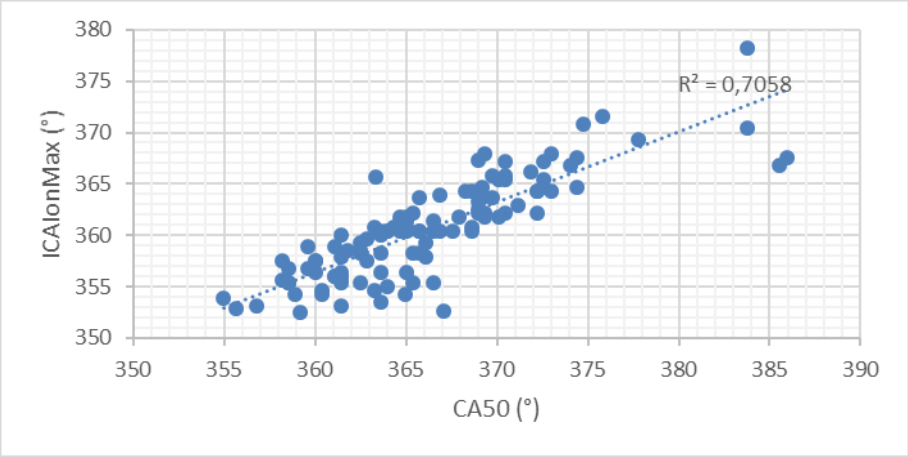


Şekil 6.5. Farklı deney koşullarında RON 40 yakıtı için kümülatif ısı dağılımı ve iyon akımı sinyalleri



Şekil 6.6. Farklı deney koşullarında RON 60 yakıtı için kümülatif ısı dağılımı ve iyon akımı sinyalleri

Şekil 6.7'de ise kümülatif ısı dağılımı sonuçlarından belirlenen CA50 noktaları ile iyon akımı sinyallerinden elde edilen CAIonMax noktalarının korelasyonuna yer verilmiştir. İyon akımı CAIonMax ve kümülatif ısı dağılımı CA50 noktaları arasında R^2 = 0,7058'lik bir korelasyon olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değer, iyon akımının CA50 noktasının tespitinde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.7. Farklı deney koşullarında CA50 ve maksimum iyon akımı açısı arasındaki uyum

İyon akımı tepe noktası ve CA50 noktası arasında güçlü bir korelasyon olduğu Hans Aulin ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir çalışmada da ortaya konmuştur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz taşıtlarında tahrik sistemi olarak çoğunlukla içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar buji ile ateşlemeli motorlar (SI) ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (CI) olarak ikiye ayrılabilir. Buji ile ateşlemeli motorlarda (SI) önceden karıştırılmış dolguyu ateşlemek için buji kıvılcımından yararlanılır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda (CI) ise sıkıştırılmış hava üzerine yüksek basınçta yakıtın enjekte edilmesi ile ateşleme gerçekleştirilir. Benzinli motorların avantajı, egzoz emisyon seviyelerinin düşük oranlarda olmalarıdır. Dezavantajı ise düşük verime sahip olmalarıdır. Öte yandan dizel motorlar yüksek verime sahiptir, fakat yüksek NO_x ve is emisyonları nedeniyle benzinli motorlar kadar düşük emisyon seviyelerine sahip değillerdir. HCCI yanma modu ise bu iki motorun kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Çünkü yakıt ve hava benzinli motorlarda olduğu gibi önceden karıştırılıp yanma odası içerisine alınır ve daha sonra dizel motorlardaki gibi dolgu yüksek sıkıştırma oranlarında sıkıştırılarak ateşleme gerçekleştirilir. Fakat HCCI motorlarda yanma başlangıcını kontrol etmek kolay değildir. Çünkü benzinli motorda olduğu gibi buji kıvılcımından ve dizel motorda olduğu gibi enjektörden yararlanılmaz. Doğal olarak yanmanın başladığı zamanla ilgili herhangi bir geri besleme bilgisi alınamaz. Motoru kontrol etmek için, önceki çevrimlerden bilgilerin alınması gerekir. Bu geri bildirimler, genellikle silindir içi basınç sensörlerinin kullanılmasıyla kaydedilir. Fakat basınç sensörünün kullanılması yüksek maliyetli bir ölçüm metodudur. Bu çalışmada HCCI yanma modunda, yanma kontrolünün iyon akımı sinyalleri ile tespit edilip edilemeyeceği ele alınmıştır. Çalışmada farklı parametreler göz önünde bulundurularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan değişken parametreler ise hava-yakıt oranı, giriş hava sıcaklığı, motor devri ve yakıttır. RON 40 ve RON 60 yakıtları ile yapılan ilk deneylerde benzinli HCCI yanmasında karışım fakirleştikçe iyonlaşma akım değerlerinin değişimleri gözlemlenmiştir. Karışım fakirleştikçe, buji tırnakları arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan iyon miktarı azalır ve bu azalma da iyon akımı sinyal genliğindeki düşüşle gözlemlenir. Ayrıca, silindire verilen enerji karışım fakirleştikçe azaldığından maksimum silindir içi basınç değerlerinde de düşüş gözlemlenir. Elde edilen sonuçlara göre, iyon akım sinyal değerindeki ani artışla silindir içi basınç değerlerindeki ani artış noktaları örtüşmektedir. Silindir içi basınç değerindeki bu artış yanma başlangıcını ifade etmekte dolayısıyla, iyon akım sinyali yanma başlangıcı ve maksimum basınç değerinin belirlenmesinde

kullanılabileceği anlaşılmaktadır. RON 40 ve RON 60 yakıtları ile yapılan diğer deney koşullarında ise, değişken motor hızlarında krank açısına bağlı olarak iyonlaşma akım değerlerinin değişimleri gözlemlenmiştir. İyonlaşma akımı ile motor hızı arasında iyi bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Motor hızı arttıkça maksimum iyon akım sinyalinin ÜÖN'dan uzaklaştığı ve genlik değerlerinde önce artma sonra azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. HCCI yanma modunda, tepkime oranının motor hızı ile değişmediği varsayıldığında, artan motor hızı ile birlikte tepkime için gerekli olan zaman azalmaktadır. Yüksek motor hızında teklemeler olmakta dolayısıyla motor gücünde ve veriminde azalmaya sebep olabilmektedir [4]. Genlik değerlerindeki azalmaların sebebinin bundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneylerde gözlemlediğimiz gibi devir 800'den 1200'e arttırıldığında iyon akım sinyal genliğindeki azalmanın sebebi olarak bu gösterilebilir. Silindir içerisine alınan dolgunun giriş sıcaklığı yanma verimini etkileyen diğer bir parametredir. Fakat motorun aynı koşullar altında çalıştırılması mümkün olmadığından, giriş hava sıcaklığının iyon akımı üzerindeki etkisini efektif bir şekilde anlamak pek mümkün olamamıştır. Farklı oktan sayılarına sahip yakıtlar kullanılarak yapılan deneylerde ise sabit motor devri ve sabit giriş hava sıcaklığı değerlerinde birbirine en yakın hava fazlalık katsayısı değerleri alınarak çalışmalar yapılmıştır. Oktan sayısı arttıkça iyon akımı tepe noktasının ÜÖN'dan uzaklaştığı ve genliğinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebininde oktan sayısı arttıkça reaktivitenin düştüğü ve yanma gerçekleştiği anda iyon miktarının azalmasından olduğu düşünülmektedir. Deneylerde CA50 noktası ile iyon akımı arasındaki uyuma da bakılmıştır. CA50 noktası kümülatif ısı yayılımının %50'sinin açığa çıktığı krank mili açısını ifade etmektedir ve iyon akımın CA50 noktasının tespitinde başarılı bir parametre olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Tüm deneylerde ölçülen iyon akımı sinyali için basit bir iyon akım devresi dizayn edilmiştir. Fakat elde edilen sinyallerin karmaşık olmasından dolayı değerlendirmelerin real time (gerçek zamanlı) yapılması mümkün olmadığı düşünülmektedir. Bu şartlarda sağlıklı bir ölçüm için DC öngerilim, seri direnç ve enstrümantasyon yükselteci kazanç değerinin de yüksek olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu durumda da karışımın söz konusu değere göre zenginleştirilmesi iyon akım genlik değerinin ölçülebilir değer aralığının dışına çıkılmasına sebep olacaktır. Bu sorunların önüne geçebilmek adına motor çalışma şartlarına uygun DC ön gerilim ve kazanç değerleri değiştirilebilir bir iyon akım ölçüm devresinin kullanılması daha uygun olacaktır.

Tez çalışmasının deneysel boyutu ve sonuçların değerlendirilmesi neticesinde elde edilen bilgilerle, HCCI motorlarda iyon akımı ölçümü konusunda yapılabilecek farklı çalışmaların da olduğu düşünülmektedir. Çalışmalar sırasında HCCI motorlarda bazı parametrelerin kontrolünün HCCI modunun doğası gereği zor olmasından dolayı iyon akımının değerlendirilmesi zorlaştığı görülmüştür. Deneyler sırasında çalışma parametrelerinin daha kararlı hale getirilmesinin önem arz ettiği düşünülmektedir. Çalışmalar sırasında deney motorunun ateşleme bujisi ölçüm probu olarak kullanılmış, buji ile ilgili parametreler dikkate alınmamıştır. İyon akımı üzerinde buji elektrotları arası mesafe ve elektrotların şeklinin de etkisinin olacağı düşünülmektedir. Ayrıca ölçüm probu olarak kullanılan bujinin konumunun ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilebilecek bir parametredir. Benzer şekilde iki ayrı ölçüm bujisi kullanılarak yanma hızı hakkında da değerlendirme yapılabilir. Çalışmada iyon akımı elde edebilmek için 75V DC ön gerilim uygulanmıştır. Farklı ön gerilim değerlerinin daha geniş bir çalışma aralığında iyon akımının ölçülmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. İyon akımı ile bazı motor parametrelerinin tahminine, kestirimine yönelik yapay sinir ağları, genetik algoritmalar gibi yöntemlerin kullanılabileceği değerlendirilmektedir

KAYNAKLAR

1. Halis, S., Nacak, Ç., Solmaz, H., Yılmaz, E., Yücesu, S. (2018). HCCI Bir Motorda Oktan Sayısının Yanma Karakteristikleri ve Motor Performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 38(2), 73-84.

2. Baydır, Ş. (2012). *HCCI (Homojen Şarjlı Sıkıştırma ile Ateşlemeli) Bir Motorda Yanma Analizi,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-25.

3. H.S. Soyhan, H. Yasar, H. Walmsley, B. Head, G.T. Kalghatgi, et al. (2008). Evaluation of Heat Transfer Correlations for HCCI Engine Modelling. *Applied Thermal Engineering*, 29(2-3), 541-549.

4. Can, Ö. (2012*). Bir DI Dizel Motorda Etanol Ön Karışımlı Kısmi-HCCI Uygulamasının Yanma ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45-70.

5. Polat, S., Solmaz, H., Uyumaz, A., Calam, A., Yılmaz, E., et al. (2018). *Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli Bir Motorda Negatif Subap Bindirmesinin Motor Çalışma Aralığı ve Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması,* 14th International Combustion Symposium (INCOS2018), Karabük.

6. Polat, S. (2015). *HCCI Bir Motorda Çalışma Parametrelerinin Yanmaya Etkilerinin İncelenmesi,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-60 .

7. Uyumaz, A. (2014). *Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Benzin Motorunda Supap Kalkma Miktarının Yanma ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-65.

8. Shahangian, S., Keshavarz, M., Javadirad, G., Bagheri, N., Jazayeri, S. (2008). *A Theoritical Study on Performance and Combustion Characteristics of HCCI Engine Operation with Diesel Surrogate Fuels: N-heptane, Dimethyl Ether*, American Society of Mechanical Engineers Internal Combustion Engine Division 2008 Spring Technical *Conference*, Chicago, IIIinois, USA.

9. S. Yoshiyama, E. Tomita, M. Mori and Y, Sato. (2007). Ion Current in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 104271: 2688-3627 (2007).

10. G. Dong, Z. Wu, L. Li, Y. Chen and R. W. Dibble (2015). Study on the phase relation between ion current signal and combustion phase in a HCCI combustion engine, *Proceedings of the Combustion Institute, ScienceDirect*, 35, 3097–3105.

11. Butt, R., Chen, Y., Mack, J., Saxena, S., Dibble, R. (2014). Improving Ion Current of Sparkplug Ion Sensors in HCCI Combustion Using Sodium, Potassium, and Cesium Acetates: Experimental and Numerical Modeling, *ScienceDirect*, 35, 3107-3115.

12. Strandh, P., Christensen, M., Bengtsson, J., Johansson, R., et al. (2003). Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 104271: 2688-3627.

13. Duman, M., Şahin, F., Solmaz, H., S., Yılmaz, E. (2017). Bir HCCI Motorda İyon Akımının Ölçülmesi. 8. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumunda sunuldu (IATS'17), Elazığ, 2949-2958.

14. Kumar, P., Rehman, A. (2014). Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Combustion Engine- A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 11(47-67).

15. Fathi, M., Jahanian, O., H. Shahbakhti, M. (2017). Modeling and Controller Design Architecture for Cycle-by-Cycle Combustion Control of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines- A Comprehensive Review, *Energy Conversion and Management, Elsevier*, 139(1-19).

16. Yao, M., Zheng, Z., Liu, H. (2009). Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines, *Progress in Energy and Combustion Science, Elsevier,* 35(398-437).

17. Hairuddin, A., Wandel, A., Yusaf, T. (2014). An Introduction to a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 7(1042-1052).

18. Munoz, R. (2006). *The Performance of a Dual Fuel HCCI Engine*, Master's Thesis, Lund Institute of Technology, Sweden.

19. Tanaka, S., Ayala, F., Keck, J., Heywood, J. (2002). Two-stage Ignition in HCCI Combustion and HCCI Control by Fuels and Additives, *Combustion and Flame, Elsevier,* 132(219-239).

20. Hakansson, A. (2007). *CA50 Estimation on HCCI Engine Using Engine Speed Variations*, Master's Thesis, Lund Institute of Technology, Sweden.

21. Matyl, K., Rychter, T. (2003). HCCI Engine- Prelimary Analysis, *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, 10(3-4).

22. Onishi, S., Jo, S., Shoda, K., Jo, P., et al. (1979): "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) – A New Combustion Process for Internal Combustion Engines", *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 790501.

23. Ruijsscher, L., Eelbode, A. (2014). *Performing in Cylinder Heat Flux Measurements for HCCI Combustion*, Master's Thesis, Ghent University, Belgium, 60-80.

24. Türkcan, A. (2013). *Direkt Püskürtmeli HCCI Bir Motorda Püskürtme Parametrelerinin Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 50-80.

25. Charalambides, A. (2012). *Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines*, http://dx.doi.org/10.5772/55807

26. Ruizhi, S., Tiengang, H. (2007). Effects of Compression Ratio on the Combustion Characteristics of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China.* 1(4), 463-467.

27. Zhang, C. H., Pan, J. R., Tong, J. J., Li, J. (2011). Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion. *Procedia Environmental Sciences,* 11, 1119-1127.

28. Maurya, R. K., Agarwal, A. K. (2011). Experimental Investigation On The Effect Of Intake Air Temperature and Air–Fuel Ratio On Cycle-To-Cycle Variations Of HCCI Combustion and Performance Parameters. *Applied Energy,* 88, 1153-1163.

29. Calam, A., İçingür, Y. (2018). Hava Fazlalık Katsayısı ve Oktan Sayısı Değişiminin HCCI Yanma Karakteristiklerine ve Motor Performansına Etkileri, *Journal of Polytechnic*, doi:10.2339/politeknik.444377.

30. Hunicz, J. (2014). An Experimental Study of Negative Valve Overlap Incejtion Effects and Their Impact on Combustion in a Gasoline HCCI Engine. *Fuel,* 117, 236-250.

31. Megaritis, A., Yap, D., Wyszynski, M.L. (2007). Effect of Water Blending on Bioethanol HCCI Combustion with Forced Induction and Residual Gas Trapping, *Energy*, 32(12), 2396-2400.

32. Karagiorgis, S., Collings, N., Glover, K., Coghlan, N. (2006). Residual Gas Fraction Measurement and Estimation on a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Utilizing the Negative Valve Overlap Strategy. *Society of Automotive Engineers International Technical Papers*, 2006-01-3276.

33. Çınar, C., Uyumaz, A., Polat, S., Yılmaz, E., Can, Ö., Solmaz, H. (2016). Combustion and Performance Characteristics of an HCCI Engine Utilizing Trapped Residual Gas Via Reduced Valve Lift, *Applied Thermal Engineering*, 100, 586-594.

34. Dec, J. E. (2009). Advanced compression-ignition engines—understanding the incylinder processes, *Proceedings of the Combustion Institute,* 32: 2727–2742

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

36. Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y., Aijoshizawa, E. (2001). Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards, *Society of Automotive Engineers Technical Paper,* Paper No: 2001-01-0200,

37. Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., Ma, T. (2001). Experimental Studies on Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion of Gasoline in a 4-Stroke Engine, *Society of Automotive Engineers Technical Paper,* Paper No: 2001- 01-1030

38. Peng, Z., Zhao, H., Ladommatos, N. (2003). "Effects of Air/Fuel Rates on HCCI Combustion of n-heptane, a Diesel Type Fuel", *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, Paper No: 2003-01-0747,

39. Yaşar, H. (2016). Homojen Karışımlı Sıkıştırma Ateşlemeli (HCCI) Bir Motorun Tek-Bölgeli Modelleme Yöntemi Kullanılarak Analizi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bil. Der.* 20. 3(1), 659-665.

40. H.Aulin, P. Bentioulis, P. Tunestål, J. Hyvönen, and B. Johansson (2007). Improving Ion Current Feedback for HCCI Engine Control, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 2007-01-4053.

41. Chauhan, H., Preksha, K., Dabhi, S., Trivedi, V. (2015). A Technical Review of HCCI Combustion in Diesel Engine, *IJIRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology*,1(10), 2349-6010.

42. Mehresh, P., Souder, J., Flowers, D., Riedel, U., Dibble, R. (2005). Combustion Timing in HCCI Engines Determined by Ion-sensor: Experimental and Kinetic Modeling, *Proceedings of the Combustion Institute, Elsevier,* 30 (2701-2709).

43. Jr, G., Chen, J., Dibble, R. (2009). The Effects of Intake Pressure, Fuel Concentration, and Bias Voltage on the Detection of Ions in a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine, *ScienceDirect*, 32, 2877–2884.

44. Liu, Y., Li, L., Ye, J., Deng, J., Wu, Z. (2015). Ion Current Signal and Characteristics of Ethanol/ Gasoline Dual Fuel HCCI Combustion, *Fuel, Elsevier,* 166(42-50).

45. Byttner, S., Holmberg, U. (2008). *Closed-Loop Control of EGR Using Ion Current*, Proceedings of the 27th IASTED International Conference, Innsbruck, Austria.

46. Vressner, A., Strandh, P., Hultqvist, A., Tunestal, P., et al. (2004). Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine, *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 2004-01-0934.

47. Abdelgawad, M. (2012), *Combustion Timing Control of Natural Gas HCCI Engines Using Physics-Based Modeling and LQR Controller*, Master's Thesis, Texas A & M University, ABD, 25-60.

48. Baumgarter, C. (2006). Mixture formation in internal combustion engines, *Springer, Heat and Mass transfer series*, Berlin, 253-278

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : ATAY, Merve

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 28.06.1993, Altındağ

Medeni hali : Evli

e-mail : mrvdmn213@gmail.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Çankaya Üniversitesi / Mekatronik Mühendisliği	2016
Lise	Aydınlıkevler Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	TÜBİTAK Bilgem	Araştırmacı
2017-2017	Atılım Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Duman, M., Şahin, F., Solmaz, H., Polat, S., Yılmaz, E. (2017). *Bir HCCI Motorda İyon Akımının Ölçülmesi*. 8. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumunda sunuldu (IATS'17), Elâzığ, 2949-2958.

Hobiler

Yüzme, Bağlama çalmak, Dans



GAZİ GELECEKTİR...