



**FUZEL YAĞI KULLANILAN HCCI BİR MOTORDA ÇALIĐMA
PARAMETRELERİNİN YANIT YÜZEY METODU İLE OPTİMİZASYONU**

Hüseyin Orhun GÜRSOY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Hüseyin Orhun GÜRSOY

26/01/2023

FUZEL YAĞI KULLANILAN HCCI BİR MOTORDA ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN YANIT YÜZEY METODU İLE OPTİMİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin Orhun GÜRSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Teknolojik gelişmelere rağmen içten yanmalı motorlardaki egzoz emisyon değerlerinin azaltılması ve termik verimin artması eş zamanlı olarak istenilen seviyede gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple akademik kuruluşlar ve otomotiv sektörü tarafından içten yanmalı motorlarda yeni yanma modelleri, alternatif yakıt kullanımı, değişken supap zamanlaması ve sıkıştırma oranları gibi çalışma parametrelerinin değiştirilmesiyle çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, fuzel yağı/n-heptan karışımı yakıt (F30) ile HCCI (homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli) yanma modunda çalışan bir motorun minimum emisyon ve maksimum performans elde edilmesi amacıyla YYM (Yanıt Yüzey Metodu) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan F30 yakıt karışımı %30 fuzel yağı ve %70 n-heptan yakıtın hacimsel olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Deney setlerinin belirlenmesi, yanıt parametrelerinin model denklemlerinin oluşturulması ve optimizasyonun gerçekleştirilmesi işlemleri YYM yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya ait tüm deneyler Ricardo Hydra marka araştırma motorunun yer aldığı test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Değişken parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri sırasıyla, 800-1400 rpm motor hızı, 1,9-2,7 lamda değeri ve 11 - 13 sıkıştırma oranı olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda optimum girdi parametreleri 981 rpm motor hızı, 1,9 lamda değeri, 11 sıkıştırma oranı olarak hesaplanmıştır. Optimum giriş parametrelerine bağlı olarak elde edilen yanıt parametreleri ise; fren özgül yakıt tüketimi 261,628 g/kWh, indike ortalama efektif basınç 4,85 bar, termal verimlilik %31,69, HC emisyonu 395,767 ppm olarak tespit edilmiştir. Söz konusu girdi parametrelerinin önemi ve etkileşimleri, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda YYM yöntemiyle geliştirilen tüm çoklu regresyon modellerinin hem motor performansını hem de egzoz emisyonlarını optimize etmek için başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlemlenmiştir. YYM kullanılarak minimum test sayısı ile motor performansı ve emisyondaki değişimlerin başarılı bir şekilde tahmin edebildiği ortaya konmuştur.

Bilim Kodu : 93003

Anahtar Kelimeler : HCCI, YYM, yanıt yüzey motodu, fuzel yağı, optimizasyon

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Hamit SOLMAZ

OPTIMIZATION OF OPERATING PARAMETERS IN A HCCI ENGINE USING FUSEL OIL BY RESPONSE SURFACE METHOD

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin Orhun GÜRSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Despite technological updates, reducing exhaust emission values in internal combustion engines and increasing thermal efficiency cannot be achieved simultaneously at the desired level. For this reason, various studies are carried out by academic institutions and the automotive sector by changing operating parameters such as new combustion theories, alternative fuel use, variable valve timing and compression ratios in internal combustion engines. In this study, an engine operating in HCCI (Homogeneous filled compression ignition) combustion mode with fusel/n-heptane (F30) was optimized with RSM (Surface Response Method) in order to obtain maximum performance and minimum emissions. The F30 fuel mixture used in the study consists of 30% fusel oil and 70% n-heptane fuel combined by volume. The determination of the experimental sets, the creation of the model equations of the response parameters and the optimization were carried out with the RSM method. All experiments of the study were carried out in a test setup with the Ricardo Hydra brand research engine. The minimum and maximum values of the variable parameters were determined as 800-1400 rpm engine speed, 1,9-2,7 lambda value and 11 - 13 compression ratio, respectively. As a result of the optimization, the optimum input parameters were calculated as 981 rpm engine speed, 1,9 lambda values, and 11 compression ratios. The response parameters obtained depending on the optimum input parameters are; brake specific fuel consumption was 261.628 g/kWh, indicated average effective pressure was 4,85 bar, thermal efficiency was 31,69%, HC emission was 395,767 ppm. The importance and interactions of these input parameters were analyzed using the Analysis of Variance (ANOVA) method. As a result of the study, it has been observed that all multiple regression models developed with the RSM method can be used successfully to optimize both engine performance and exhaust emissions. It has been demonstrated that using the RSM, it can successfully predict the changes in engine performance and emissions with the minimum number of tests.

Science Code : 93003

Key Words : HCCI, RSM, response surface methodology, fusel oil, optimization

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Hamit SOLMAZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve bu çalışmanın fikir aşamasından tamamlanmasına kadar geçen süre boyunca bana yol gösteren, bilgisini ve desteğini eksik etmeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Hamit SOLMAZ'a teşekkürü borç bilirim. Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Tolga KOCAKULAK' a desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Anlayışını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Tutku GÜRSOY'a ve bugünlere gelmemde en büyük katkısı olan aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	3
2.1. HCCI Motorlar ve Tarihçesi	3
2.2. HCCI Motorlarda Emisyon Özellikleri.....	4
2.3 HCCI Motorda Yanma Özelliklerini Etkileyen Etkenler.....	5
2.3.1. Hava giriş sıcaklığı.....	5
2.3.2. Hava / yakıt oranı	5
2.3.3. Motor hızı.....	5
2.3.4. Sıkıştırma oranı	6
2.3.5. Yakıt özellikleri.....	6
2.4. Alternatif Yakıtlar	7
2.4.1. Doğalgaz	7
2.4.2. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)	8
2.4.3. Biyogaz	8
2.4.4. Hidrojen	8
2.4.5. Bitkisel yağlar	9

	Sayfa
2.4.6. Alkoller ve fuzel yağı.....	9
2.5 Literatür Özetleri.....	10
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Yanıt Yüzey Metodu (YYM).....	15
3.2. İstatiksel Tasarım	16
3.3. Deney Düzeneği ve Motoru	18
3.3.1. Dinamometre.....	21
3.3.2. İndikatör sistemi.....	21
3.3.3. Basınç sensörü.....	21
3.3.4. Enkoder	21
3.3.5. Veri toplama kartı	22
3.3.6. Sıkıştırma oranı değişimi	22
3.3.7. Emme havası giriş sıcaklığı değişimi.....	23
3.3.8. Hava / yakıt oranının kontrolü	23
3.3.9. Egzoz gazları analizörü	23
3.3.10. Deney yakıtı	24
3.3.11. Yakıt tüketiminin belirlenmesi.....	24
3.4. Deney Verilerinin Analizi	24
3.4.1. Motor geometrisi.....	25
3.4.2. İndike ortalama efektif basınç ve net işin hesaplanması.....	27
3.4.3. Çevrimsel farklılıkların analizi	29
3.4.4. Termik verim.....	29
3.5. Deney Sonuçlarının YYM ile İşlenmesi	30
4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....	31

	Sayfa
4.1. İndike Ortalama Efektif Basınç (IMEP)	32
4.2. Maksimum Basınç Artış Oranı (MPRR).....	34
4.3. İndike Termik Verim (ITE).....	36
4.4. Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (BSFC).....	38
4.5. CA10	40
4.6. CA50	42
4.7. Yanma Süresi (CD)	44
4.8. Hidrokarbon (HC) Emisyonları.....	45
4.9. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları	47
4.10. Optimizasyon Sonuçları	48
4.11. Optimizasyon Sonuçlarının Doğrulanması	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Değişken giriş parametrelerinin seviyeleri	17
Çizelge 3.2. Tanıtılması gereken 15 adet giriş parametresine bağlı yanıt parametreleri	17
Çizelge 3.3. Deney motoru özellikleri	20
Çizelge 3.4. Kontrol panelindeki değişkenlerin ölçüm hassasiyetleri ve aralığı	20
Çizelge 3.5. Basınç sensörü özellikleri	21
Çizelge 3.6. Enkoder özellikleri.....	22
Çizelge 3.7. Şim kalınlığına bağlı sıkıştırma oranındaki değişimler	23
Çizelge 3.8. Egzoz gaz analizörü teknik özellikleri.....	24
Çizelge 3.9. Deney yakıtı özellikleri.....	24
Çizelge 3.10. YYM deney seti sonuçları	30
Çizelge 4.1. YYM parametrelerine ait F-value ve P-value değerleri	31
Çizelge 4.2. Matematiksel modelin katsayıları.....	32
Çizelge 4.3. Yanıt parametrelerine ait R^2 değerleri.....	32
Çizelge 4.4. Optimizasyon Kriterleri ve Sonuçları.....	49
Çizelge 4.5. Optimizasyon sonuçları doğrulaması ve hata payı	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Çalışmanın akış şeması.....	15
Şekil 3.2. Test düzeneği şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.3. Kapalı indikatör diyagramı	27
Şekil 4.1. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş IMEP haritası (lambda 2,3).....	33
Şekil 4.2. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş IMEP haritası (sıkıştırma oranı 12).....	34
Şekil 4.3. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş MPRR haritası (lambda 2,3)	35
Şekil 4.4. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş MPRR haritası (sıkıştırma oranı 12).....	36
Şekil 4.5. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş ITE haritası (lambda 2,3)	37
Şekil 4.6. Labmda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş ITE haritası (sıkıştırma oranı 12).....	37
Şekil 4.7. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş BSFC haritası (lambda 2,3)	39
Şekil 4.8. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş BSFC haritası (sıkıştırma oranı 12).....	39
Şekil 4.9. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA10 haritası (lambda 2,3).....	41
Şekil 4.10. Labmda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA10 haritası (sıkıştırma oranı 12)	41
Şekil 4.11. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA50 haritası (lambda 2,3).....	43
Şekil 4.12. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA50 haritası (sıkıştırma oranı 12)	43
Şekil 4.13. Sıkıştırma ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CD haritası (lambda 2,3).....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CD haritası (sıkıştırma oranı 12)	45
Şekil 4.15. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş HC haritası (lambda 2,3).....	46
Şekil 4.16. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş HC haritası (sıkıştırma oranı 12)	46
Şekil 4.17. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CO haritası (lambda 2,3).....	47
Şekil 4.18. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CO haritası (sıkıştırma oranı 12)	48
Şekil 4.19. Optimizasyonun desirability oranı.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
ε	Sıkıştırma oranı
θ	Krank mili açısı
λ	Krank mili yarıçapının biyel kolu uzunluğuna oranı
$\bar{X}$	Ortalama efektif basınçların ortalamasını
Q_{LHV}	Yakıtın alt ısı değeri, kJ/kg
η_T	Termik verim, %
σ_{imep}	50 çevrimin İMEP değerlerinin sapması
D	Silindir çapı, m
dV	Hacim değişimi, m ³
H	Kurs boyu, m
L	Biyel kolu uzunluğu, m
m	Silindir içi dolgu kütlesi, kg
m_y	Bir çevrimde silindire giren yakıt miktarı, kg/çevrim
P	Silindir basıncı, Pa
r	Krank milinin yarıçapı, metre
$S(\theta)$	Krank mili açısına bağlı pistonun aldığı yol
V_c	Yanma odası hacmi, m ³
V_k	Kurs hacmi, m ³
V_s	Toplam silindir hacmi, m ³
$W_{brüt}$	Net iş, J
W_{net}	Brüt iş, J
W_{pomp}	Pompalama işi, J

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AÖN	Alt ölü nokta
BMEP	Fren ortalama efektif basınç, kPa
BSFC	Fren özgül yakıt tüketimi
CA10	Kümülatif ısı dağılımının % 10'nun krank açısı
CA50	Kümülatif ısı dağılımının % 50'sinin krank açısı
CD	Yanma süresi
CI	Sıkıştırma ile ateşlemeli
CO	Karbonmonoksit
CO2	Karbondioksit
CR	Sıkıştırma oranı
ESAA	Egzoz supabı açılma avansı
ESKG	Egzoz supabı kapanma gecikmesi
F30	%30 fuzel / %80 n-heptan karışımı yakıt
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli
ITE	İndike termik verim
İMEP	İndike ortalama efektif basınç
İSAA	Emme supabı açılma avansı
İSKG	Emme supabı kapanma gecikmesi
KA	Krank mili açısı
LHV	Alt ısı değer
MPRR	Maksimum basınç artış oranı
NO_x	Azotoksit
RON	Araştırma oktan sayısı
SI	Buji ile ateşlemeli
YYM	Yanıt yüzey metodu

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar modern endüstri ve toplumun çok önemli bir parçasıdır. Milyonlarca araç sayesinde gerçekleştirilen taşımacılık ve ulaşım olmasaydı şu anki yaşam standartlarımıza ulaşamazdık. Günümüzde dünyada en yaygın kullanılmakta olan içten yanmalı motor çeşitleri sıkıştırma ile ateşlemeli (Compression Ignition-CI) ve buji ile ateşlemeli (Spark Ignition-SI) motorlardır. Teknolojik güncellemelere rağmen içten yanmalı motorlardaki egzoz emisyon değerlerinin azaltılması ve termik verimin artması eş zamanlı olarak gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple akademik kuruluşlar ve Otomotiv sektörü tarafından içten yanmalı motorlarda yeni yanma teorileri, alternatif yakıt kullanımı, değişken supap zamanlaması ve sıkıştırma oranları gibi çalışma parametrelerinin değiştirilmesiyle çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar (HCCI) bu çalışmaların bir ürünüdür.

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli motor, SI ve CI motorlarındaki avantajları bir araya toplamaktadır. Termik verimi yüksek ve emisyon değerleri düşük olabilecek bir potansiyele sahip HCCI motorlar bu özellikleri ile yeni yanma modu olarak ön plana çıkmaktadır [1-3].

SI motorlarda hava/yakıt karışımı(dolgu) yanma odasında veya emme manifoldu içerisinde hazırlanmak ve hazırlanan dolgu homojen bir yapıda sıkıştırma zamanı sonunda bujiden çıkan kıvılcım ile ateşlenmektedir. SI motorlar, buji ile ateşleme sayesinde yanmanın kontrol edilebilmesi, daha kolay tutuşma özelliği ve ilk harekete geçişin kolay olması sebebiyle sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak vuruntu sebebiyle sıkıştırma oranının arttırılamaması SI motorların gelişimi önündeki en büyük engeldir. Ayrıca SI motorlarda motor yükü ve motor hızı silindir içine alınan hava/kayıt karışımının ayarlanması ile sağlanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı SI motorlarda termik verim düşüktür. SI motorlar emisyon açısından incelendiğinde yanmamış hidrokarbon emisyonlarının yüksek olduğu görülmektedir [1].

CI motorlarda ise yalnızca hava, emme zamanında silindir içerisine tek başına alınır ve sıkıştırma zamanı sonunda basıncı ve sıcaklığı artan havanın üzerine yakıt püskürtülür. Kızgın hava üzerine püskürtülen yakıt kendiliğinden tutuşur. CI motorlarda silindir içine

hava tek başına alındığı için sıkıştırma oranı SI motorlara göre daha yüksektir. Ayrıca hava/yakıt karışım dolgusu herhangi bir ayarlamaya maruz kalmadığı için termik verimleri yüksektir. Yakıt basınçlı ve sıcak hava üzerinde direk püskürtüldüğü için karışım heterojendir. Emisyon açısından azotoksit (NO_x) ve is emsiyonları yüksektir [2].

HCCI motorlarda yanma teorisi SI motorlarda olduğu gibi sıkıştırma zamanından önce hava/yakıt karışımının homojen olarak hazırlanıp silindir içerisine alınması ve CI motorlardaki gibi sıkıştırma zamanında karışımın basınç ve sıcaklığı artırılarak kendi kendine tutuşması metoduna dayanmaktadır. HCCI motorlarda yanma alev cephesi olmadığı için silindirin her bölgesinde yanma aynı anda başlamaktadır. Bu nedenle yanma süresi kısa ve yanmanın verimi daha yüksek olmaktadır. HCCI motorlar yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabildiği için termik verimleri de yüksektir [3].

İçten yanmalı motorlarda kullanılan fosil kökenli yakıt rezervlerinin yakın gelecekte tükenme ihtimali ve gelecekte tüm dünyanın ihtiyacının karşılamayacak duruma gelecek olması, fiyatlardaki istikrarsızlıklar, kullanım sonucu çevreye verilen zararlar ve temininde yaşanan belirsizlikler sebebiyle, günümüzde petrol bazlı yakıtlara alternatif yakıtların geliştirilmesi üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda Doğalgaz, Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG), Biyogaz, Hidrojen, Biyodizel, Alkoller ve Fuzel yağının yaygın olarak kullanılan başlıca alternatif yakıt kaynakları olduğu gözlemlenmektedir.

Bu çalışmada, fuzel/n-heptan karışımı yakıt (F30) ile HCCI (Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli) yanma modunda çalışan bir motorun minimum emisyon ve maksimum performans elde edilmesi amacıyla YYM (Yanıt yüzey Metodu) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Literatürde SI motorlarda farklı alkol tiplerinin kullanımı ile alakalı YYM ile yapılan optimizasyon çalışmaları olmakla birlikte fuzel yağı ile ilgili YYM optimizasyon çalışması son derece azdır. Çalışmada kullanılan F30 yakıt karışımı %30 fuzel yağı ve %70 n-heptan yakıtın hacimsel olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Deney setlerinin belirlenmesi, tepki parametrelerinin model denklemlerinin oluşturulması ve optimizasyonun gerçekleştirilmesi işlemleri YYM yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya ait tüm deneyler HCCI modunda çalıştırılabilen tek silindirli, sıkıştırma oranı, yakıt püskürtme miktarı, giriş havası sıcaklığı gibi çalışma parametreleri değiştirilebilen Ricardo Hydra marka araştırma motorunun yer aldığı test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR

2.1. HCCI Motorlar ve Tarihçesi

Literatürde HCCI motorlara ilişkin olarak yapılan ilk çalışmalar Onishi ve Noguchi tarafından 1979 yılında yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda HCCI birden farklı isim ile adlandırılmıştır. Onishi, yaptığı çalışmada HCCI yanmayı, “ATAC” (Active Thermo-Atmosphere Combustion) olarak adlandırmış ve içten yanmalı motorlarda yeni bir yanma yöntemi olarak bahsetmiştir. Noguchi, çalışmasından kendiliğinden ateşleme yapan yanma yöntemini “TS” (Toyota – Soken) olarak adlandırmıştır. Çalışmalarda iki zamanlı benzinli bir motorda kendiliğinde ateşlemeye neden olan ortamı hazırlayarak emisyonlarda azalma, ses ve titreşimde azalma ve yakıt ekonomisinde iyileşme sağlamışlardır [4,5].

HCCI yanmasını dört zamanlı motorla uygulanması ise 1983 yılında Najt ve Foster tarafından yapılan deneylerde görülmektedir. Farklı motor hızlarında farklı yakıtlar kullanarak yaptıkları deney sonuçlarında emme havasını giriş sıcaklığının arttırılması gerektiğini gözlemlenmişlerdir [6].

Yüksek yüklerde meydana gelen kontrolsüz yanma sonucu oluşan vuruntular ve yüksek motor hızlarında meydana gelen kısmi yanmalardan dolayı, HCCI yanması ancak uygun yük ve motor hızlarında kullanılabilir. Bu sebeple yüksek ve tam yüklerde halen CI ve SI yanma kullanımı devam etmektedir.

HCCI yanma modunun sağladığı avantajlardan faydalanabilmek için bu yanma moduna özgü yakıt karışımları ve yanma zamanının kontrolünü sağlamak için muhtelif mekanizmaların geliştirilmesi hususunda araştırma ve çalışmalar halen devam etmektedir [7,8].

HCCI motorlarda öne çıkan iki önemli özellik vardır. Birincisi hava / yakıt karışımının silindir içerisinde homojen oluşması, ikincisi bu karışımın sıkıştırma etkisi ile oluşan ısı sonucunda kendi kendine tutuşarak silindirin her yerinde eşit şekilde aynı anda yanmaya başlamasıdır. Bu iki özellik sayesinde NO_x ve is emisyonları diğer içten yanmalı motorlara göre çok daha düşük seviyelerde olmaktadır.

Eğer teorik olarak planlanan mükemmel bir homojen karışım meydana gelir ise, klasik dizel tutuşmadaki belirli bir yere püskürtülen yakıtın tutuşması aksine, sıkıştırma zamanında yükselen basınç ve sıcaklı sayesinde yanma eş zamanlı olarak tüm yanma odasında aynı anda gerçekleşir. Bu sayede buji ile ateşlemeli motorlarda oluşan alev cephesi önündeki yüksek sıcaklıklar oluşmayacaktır. Yüksek sıcaklıkta alev cephesi oluşmayacağı için azotoksit emisyonu büyük miktarda azalacaktır. Ayrıca karışım homojen olduğu için yakıtın zenginleştiği bölgeler olmayacağından is partiküllerinin oluşumu azalacaktır [9].

2.2. HCCI Motorlarda Emisyon Özellikleri

HCCI motorlarda yanma işlemi yanma odasının her yerinde aynı anda gerçekleştiği için, yanma sonunda yüksek sıcaklık bölgeleri oluşmamaktadır. Hava miktarının fazla olması sebebi ile yanma odasında yanma sonundaki gaz sıcaklıkları azalmakta olup, gaz sıcaklığı (1800K) belirli bir seviye altında tutulabildiği için açığa çıkacak NO_x emisyonları azalmaktadır.

NO_x oluşum mekanizması 3 farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar ısı NO_x oluşumu, yanma sonu gaz sıcaklığına bağlı oluşmaktadır. Anlık NO_x oluşumu, yakıt alev cephesinde bir anda oluşmaktadır. Yakıt NO_x oluşumu, yakıt içeriğinde bulunan azotun oksitlenmesi ile oluşmaktadır. HCCI motorlar fakir karışımlar ile çalışabildiği için hem yakıt tüketimi azalmakta hem de katalitik konvertere sahip SI motorlara göre daha düşük NO_x emisyonu oluşumu görülmektedir. Fakir karışımda gerçekleşen HCCI yanmasında yanma sonu gaz sıcaklığı düşmesine bağlı olarak oksijen ve azot molekülleri arasındaki oksidasyon yavaşlamaktadır. Bu sayede düşük sıcaklıkta oluşan yanma ile NO_x emisyonu azalmaktadır. SI ve CI motorlarına göre HCCI motorlardaki yanma çok fakir karışımlarda meydana gelebildiği için silindir içi gaz sıcaklıkları düşük olmakta ve bu durum HC emisyonlarını arttırmaktadır. Yanma sonu gaz sıcaklığının düşük olması, daha soğuk olan silindir duvarında alevin sönmesine neden olmaktadır. Bu durum oksidasyon reaksiyonlarına engel olmakta ve eksik yanmanın bir ürünü olan CO emisyonlarına sebep olmaktadır. HCCI yanmada silindir içerisindeki hava / yakıt karışımının tam homojen hazırlanmaması durumunda silindir duvarları yüzeyinde zengin karışımlar oluşabilmektedir. Bu sebeple yanmanın tamamlanamaması neticesinde is oluşumu görülmektedir [10-13].

2.3. HCCI Motorlarda Yanma Özelliklerini Etkileyen Etkenler

2.3.1. Hava giriş sıcaklığı

HCCI motorlarda silindir içerisindeki hava / yakıt dolgusu sıkıştırma zamanı sonunda kendiliğinden tutuşma şartlarını iyileştirmek için sıkıştırma zamanı başlangıcında dolgunun sıcaklığı arttırılmaya çalışılmaktadır. Dolgunun sıcaklığının arttırılma işlemi giriş hava sıcaklığının (emme havası) ısıtılması veya yanma sonrası oluşan sıcak yanma ürünlerinin bir kısmın silindir içerisinde tutarak gerçekleştirilmektir. Her iki durumda da silindir içerisindeki sıcaklık yükseltilerek yakıtın tutuşması için ihtiyaç duyduğu aktivasyon enerjisi sağlanmaktadır. Emme hava sıcaklığının ayarlanması HCCI yanma modunda tutuşma zamanının kontrol edilmesi için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Hava giriş sıcaklığının arttırılması, tutuşma gecikmesini azaltarak yanmanın daha erken krank açılarında gerçekleşmesini sağlamaktadır. Giriş havası sıcaklığının çok yükseltilmesi durumunda, yanma işlemi sıkıştırma zamanının erken safhalarında meydana gelerek piston üzerinde negatif iş yaparak termik verimin düşmesine sebep olacaktır [14,15].

2.3.2. Hava/yakıt oranı

HCCI motorları hava fazlalığına ihtiyaç duyduğu için gaz kelebeği tam açık konumda çalışabilmektedir. Bu sayede SI motorlara göre daha fakir karışımlarda çalışarak yakıt tüketiminde azalmaya ve motor veriminde artışa neden olmaktadır. Agarwal ve Muarya tarafında yapılan çalışmalarda karışım fakir kullanıldıkça maksimum silindir içi basıncının düştüğü görülmüştür. Karışım zenginleştikçe yanma sonu basıncının ve silindire verilen enerjinin arttığı, bunun sonucunda vuruntun da arttığı gözlemlenmiştir [16].

2.3.3. Motor hızı

HCCI yanmada motor hızı arttıkça silindir içerisine alınan hava / yakıt karışımının homojenize olması için gereken süre azalmaktadır. Bununla beraber motor hızı arttıkça silindir içerisindeki türbülans artmakta ve yanma daha erken ve hızlı gerçekleşmektedir. Sonuç olarak yüksek motor hızlarında tekleme, motor gücünde ve veriminde azalmaya neden olabilmektedir. Bu sebeple motor hızı arttıkça kendiliğinden yanma olasılığının azaldığı söylenebilir [17].

2.3.4. Sıkıştırma oranı

HCCI motorlarda yanma işlemi kendiliğinden tutuşma ile gerçekleştiği için sıkıştırma oranı HCCI yanması için büyük önem taşımaktadır. Sıkıştırma oranı doğrudan sıkıştırma sonu basıncı ile ilişkili olduğu için sıkıştırma oranındaki değişim hem maksimum silindir basıncı hem de karışımın tutuşma zamanını etkilemektedir. SI motorlarda vuruntu problemi sebebiyle sıkıştırma oranı sınırlandırılmaktadır. Bu sebeple CI motorlara göre ısı verimleri daha düşüktür. HCCI motorlarda CI motorlarda olduğu gibi yanma kendiliğinde olduğu için sıkıştırma oranı arttırılabilmekte ve ısı veriminde artmaktadır.

Pedersen ve arkadaşları (2007) DME (Dimetil eter) yakıtı kullanarak HCCI bir motorda farklı motor hızlarında ve farklı sıkıştırma oranlarında deneyler gerçekleştirmiştir. Üç farklı sıkıştırma oranının ısı yayılım oranı ve silindir içi basıncı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıkıştırma oranındaki artış ile birlikte maksimum silindir içi basıncı zirve değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Isı yayılım oranında ise sıkıştırma oranının artması ile birlikte hem ana tutuşmanın hem de soğuk alev tutuşmasının daha erken gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sıkıştırma oranının artması ile birlikte silindir içerisindeki karışımın yoğunluğu artmakta ve zirve silindir içi sıcaklığı yükselmektedir. Bu durumda tutuşma gecikmesini öne çekmektedir [18, 19].

Machrafi ve arkadaşları HCCI motorda referans yakıtlar kullanarak, emme havası giriş sıcaklığı, sıkıştırma oranı ve eşdeğerlik oranının tutuşma sürecine etkilerini incelemiştir. Yapılan deneyler neticesinde sıkıştırma oranının artması ile birlikte tutuşma gecikmesi süresinin azaldığı gözlemlenmiştir [20].

2.3.5. Yakıt özellikleri

HCCI yanma modunda yanma işlemi, hava/yakıt dolgusunun sıkıştırma sonunda kendiliğinden tutuşması ile gerçekleştiği için yakıt seçiminin hem tutuşma kontrolü hem de motor tasarımı açısından önemi çok büyüktür. HCCI motorlarda düşük yakıt tüketimi, minimum emisyon ve düzgün yanma elde edebilmek için uygun tutuşma zamanında yakıtın kendiliğinden tutuşmasını sağlamak gerekir. Kendi kendine tutuşma zamanı, silindir içindeki sıcaklığa, basınca, sıkıştırma öncesi dolgu oranına, silindir içerisindeki hava/yakıt dolgusu ve art gazı karışımının kinetik reaksiyonlarının iyi olmasına bağlıdır [7].

HCCI motorlar yüksek yüklere çıktığında vuruntu ihtimalinin artması nedeniyle çoğunlukla kısmi yüklerdeki çalışma şartları ile sınırlı kalmaktadır. Yüksek yüklerde vuruntu ile ilişkili olarak basınç artış oranı ve yanma oranı çok yükselerek motor çalışma gürültüsü kabul edilemez seviyelere yükselmektedir. Bu sebeple HCCI motorlar araçlarda kullanılmak istendiğinde çok modlu bir motor olarak çalıştırılabilmektedir. Motor boşta ve çok düşük yüklerde iken SI veya CI moda, orta yüklerde iken HCCI yanma modunda ve yüksek yüklerde ise tekrardan SI veya CI modunda çalıştırılmaktadır. Bu çok modlu çalışmada, bütün çalışma bölgeleri için farklı yakıt karakteristiklerine ihtiyaç duyulmaktadır [21,22].

Diğer yakıtlar ile düzgün bir şekilde karışabilme özelliğine sahip olan benzin HCCI yanma modunda yaygın olarak kullanılabilir. Bu sebeple dizel yakıtı göre benzin HCCI yanma moduna daha uygun bir yakıttır [23].

Machrafi ve Cavadias tarafından yapılan çalışmada HCCI motorda 95 oktan benzin, izooktan ve n-heptan yakıt ve PRF95 yakıtların kendi kendine tutuşma durumları incelenmiştir. HCCI yanmasının üç aşamalı bir yanma olduğu ve bu aşamaların soğuk alev, tutuşma öncesi ve son tutuşma bölgesi olarak adlandırmışlardır. Ayrıca fakir karışımlarda bile yüksek oktanlı benzinin kendi kendine tutuşabildiğini görmüşlerdir [24].

2.4. Alternatif Yakıtlar

İçten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı, sadece buji ile ateşlemeli motorlarda değil dizel motorlarda veya her iki motorda da kullanmaya uygundur. Kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı içten yanmalı bir motorda kullanımı uygun olan alternatif yakıtlar aşağıda belirtilmiştir.

2.4.1. Doğalgaz

İçten yanmalı motorlarda ilave bir işleme ihtiyaç duymadan kullanılabilen tek alternatif yakıt türüdür. Petrol yakıtlarda olduğu gibi rafine işlemine gerek duymamakta olup yer kabuğu içerisinde kullanılabilir bir hale gelmiş bulunmaktadır. Yapısında yüksek oranda CH₄ (metan) gazı bulunmaktadır. Yapısını oluşturan diğer bileşenler ise propan, etan, azot, bütan ve karbondioksittir. Bu bileşenler haricinde çok düşük oranlarda helyum ve hidrojen

sülfid bileşenleri de yapısında bulunabilmektedir. Yüksek oranda sahip olduğu metan gazı sayesinde enerji değeri yüksektir. Doğalgaz, revize işlem gören petrol bazlı yakıtlara göre, mevcuttaki rezervlerinin yeterliliği, fiyatının daha düşük olması ve daha temiz yanması sebebiyle alternatif yakıtlar içerisinde ön plana çıkmaktadır [25,26].

2.4.2. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)

LPG yapı olarak propan, bütan ve izomerleri gibi hidrokarbonlardan veya bunların belirli orandaki karışımlarından meydana gelmektedir. Yüksek basınç ile sıkıştırıldıktan sonra sıvı olarak depolanabilmektedir. Setan sayısının düşük olması sebebiyle dizel motorlarda kullanım tercih edilmemektedir. LPG'nin yaklaşık 112 gibi yüksek oktan sayısına sahip olması, emisyon değerleri dizel ve benzin yakıtları ile karşılaştırıldığında daha düşük olması, karbon birikintisi meydana getirmemesi, yakıt maliyetinin dizel ve benzine göre daha ucuz olması gibi özellikleri içten yanmalı motorlarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. LPG yakıt kullanımı sadece LPG yakıtı ile çalışan araçların imal edilmesiyle değil, diğer araçların LPG yakıt kullanımına uygun hale getirilmesini sağlayan sistem montajı ile de sağlanmaktadır. Benzin yakıtı kullanan araçların LPG sistemine dönüştürülmesi özel parçaların sisteme monte edilmesi ile gerçekleştirilmektedir [27].

2.4.3. Biyogaz

Hayvan, insan ve bitki atıkları gibi çeşitli organik maddelerin oksijensiz ortamlarda fermentasyonu neticesinde oluşan yanıcı gaz karışımıdır. Yapı olarak karbondioksit ve metandan oluşmaktadır. Rengi ve kokusu olmamakta beraber havadan daha hafiftir. Tek tür organik atık kullanılarak üretildiği gibi birden fazla organik atığın belirli oranda birleşiminden de üretilebilmektedir. Hava ile yaklaşık olarak 1/7 oranında biyogaz karıştırıldığında tam yanma gerçekleşmektedir. 110 gibi yüksek bir oktan sayısına sahiptir. SI motorlarda herhangi bir katkı maddesine ihtiyaç duymadan direk kullanılabilir. Ayrıca yapısında bulunan metan gazının saflaştırılması sağlanarak da kullanılmaktadır [28].

2.4.4. Hidrojen

Doğada en çok bulunan element türü olmasına rağmen, hafif olması sebebiyle atmosfere yükselerek serbest kaldığı için yeryüzünde serbest halde bulunması çok zordur.

Yeryüzünde diğer elemenler ile bileşik yapmış bir yapıda bulunmaktadır. Kokusu olmayan ve görünmeyen bir gazdır. Yanma ısısı yüksek olmakla beraber zehirleyici bir etkisi bulunmamaktır [29].

En önemli avantajı hava / yakıt oranları için tutuşma sınırının oldukça geniş olmasıdır. Hidrojenin herhangi bir karışım olmadan direk içten yanmalı motorlarda kullanımında bazı sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Bu sorunlar, sıcaklığa ve sıkıştırma oranına bağlı olarak erken ateşleme (vuruntu) ve yakıtın geri tutuşmasıdır [30,31].

Hidrojen tek başına içten yanmalı motorlarda kullanıldığında ortaya çıkacak olan bu sorunlar iyileştirilene kadar, hidrojen benzin ile karıştırılarak kullanabilmekte ve bu sayede hidrojenin avantajlı özelliklerinden yararlanılabilmektedir.

2.4.5. Bitkisel yağlar

Hayvansal veya bitkisel kökenli yağların katalizör kullanılarak bir alkol ile beraber reaksiyona girmesi sonucu elde edilmektedirler. Bu yöntem ile üretilen ve günümüzde en yaygın kullanılan yakıtlardan biri biyodizel yakıtıdır.

Dizel motor türlerinde motorine katılarak veya tek başına saf olarak da kullanılmaktadır. Biyodizel, setan sayısının ve ısıl değerinin yüksek olması, dizel yakıt ile karıştırıldığında emisyon değerlerini iyileştirmesi, dizel motorda yapısal olarak bir değişime ihtiyaç duyulmaması, maliyet olarak daha ucuz olması, üretiminin kolay olması sebebiyle ön plana çıkmaktadır.

2.4.6. Alkoller ve fuzel yağı

Alkoller, R - OH (alkil) genel formülüne sahiptir ve alkanlardan (C_nH_{2n+2}) bir hidrojenin çıkarılıp, yerini hidroksil (-OH) grubunun almasıyla oluşan organik bileşiklerdir. Benzin ile belirli oranda karıştırılarak veya uygun yanma değerine sahip ise tek başına kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yaygın olarak kullanılan alkoller etanol ve metanoldür [32].

Fuzel yağı, etil alkol üretiminde damıtma işlemi sırasında yan ürün (ikincil madde) olarak elde edilmektedir ve amil alkollerin doğal kaynağıdır. Bu yan ürün, fermantasyonda kullanılan maddenin cinsine göre sarı ve koyu kahverengiye kadar değişen, keskin, hoş olmayan ve öksürtücü bir kokuya sahip sıvıdır. Ülkemizde şeker üretiminde köpük söndürücü ve ispiro yapımında kullanılmakta olup büyük çoğunluğu atılmaktadır [33].

Şeker endüstrisinde, genel olarak, 1000 litre etil alkol üretilirken 1-11 litre fuzel yağı yan ürün olarak elde edilmektedir. Bu yan ürün ülkemizde yeteri kadar değerlendirilemediği için ortaya çıkacak kirliliğin boyutu önem kazanmaktadır [34].

2.5. Literatür Özetleri

Polat(2015), 4 zamanlı ve 4 silindirli direk benzin enjeksiyonlu değişken supap zamanlamalı turbolu bir motordan dönüşüm yapılmış olan deney motorunda, n-heptan, RON20 ve RON40 yakıtlarının HCCI yanması üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. HCCI motoru çalışma aralığı 800 ve 1800 rpm arasında tutmuş, 40,60,80,100°C emme havası sıcaklıklarındaki üç farklı yakıtta, farklı hava fazlalık katsayılarında deneyler yapmıştır. Süpersarjın ve enjeksiyon basıncının yanma üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla enjeksiyon başlama açısı ve emme manifoldu basınçları da değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde, emme hava basıncının artması ile birlikte HCCI yanma aralığının genişlediği, IMEP ve BMEP değerlerinin arttığı, efektif özgül yakıt tüketiminin azaldığı, özellikle yüksek emme hava basınçlarında motorun çok daha fakir karışımlarda çalışabildiği görülmüştür. Ancak yüksek emme hava basıncının, silindir içi maksimum basıncını ve basınç artış oranını arttırdığı için yüksek yüklerde vuruntulu yanmaları arttırdığı ortaya konmuştur [7].

Chun-hua ve diğerleri(2011), HCCI motorda etanol, metanol ve benzin yakıtlarını kullanarak deney yapmışlardır. Emme havası giriş sıcaklığı ve karışım yoğunluğunun HCCI yanma karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hava giriş sıcaklığı arttıkça silindir maksimum basıncının da arttığı gözlemlenmiştir. Benzinle yapılan deneylerde emme havası giriş sıcaklığı arttıkça HC ve CO emisyonlarında azalma meydana geldiği, NO_x emisyonunda da bir miktar artış meydana geldiği görülmüştür. Karışım fakirleştğinde ise HC ve CO emisyonlarının arttığı görülmüştür. Üç yakıt arasında en düşük HC emisyon değerinin metanol ile elde edildiği gözlemlenmiştir [35].

Abdel-Rahman ve arkadaşları (1997), yaptıkları çalışmada hacimce etanol oranı %10, %20, %30 ve %40 olan etanol-benzin karışımlarını farklı sıkıştırma oranlarında deneyerek motor performansına etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda, benzine etanol katmanın oktan ayısında artışa neden olduğu, etanolün buharlaşma ısısının benzine nazaran daha yüksek olması sebebiyle etanol eklenmesinin karışımların ısıl değerini düşürdüğü için motor performansını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir [36].

Wu ve arkadaşları (2003), yaptıkları çalışmada %0, %5, %10, %20 ve %30 içeren benzin/etanol karışımlarının, farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde motor performansı ve emisyon etkilerini incelemişlerdir. E30 (%30 etanol içeren karışım) karışımında yapılan deneyde motor momentinin %4 oranında arttığı ayrıca karışımdaki alkol miktarı arttıkça CO,HC ve CO₂ emisyonlarının azaldığının gözlemlemişlerdir [37].

Calam, (2010) fuzel yağı ile kurşunsuz benzin karışımından hazırlanan yakıtlar (F5, F10, F20, F30 ve F50) ile buji ateşlemeli bir motorda motor performansları ve egzoz emisyonlarının incelenmesi üzerine deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyleri dört zamanlı, tek silindirli, enjeksiyonlu ve buji ile ateşlemeli motorda gerçekleştirmiştir. Deneylerde %5, %10, %20, %30 ve %50 fuzel yağı içeren fuzel yağı/kurşunsuz benzin karışımlarını kullanılmıştır. Motor hızı 1500 – 5000 rpm aralığında ve ateşleme avansı 10-24° KMA aralığında tutularak deneyler yapılmıştır. En yüksek motor momentine F10 yakıt kullanıldığında ulaşıldı (33,53 Nm) , 24° ateşleme avansında, 1500 ve 2000 rpm motor hızlarında tüm yakıtlarda vuruşu nedeniyle ölçüm yapılamadığını gözlemlemiştir. HFK'nın 1, motor tam yük konumunda, 24° ateşleme avansı şartlarında gerçekleştirilen deneylerde, tüm yakıtlarda en yüksek motor momentinin 3500 rpm motor devrinde elde edildiğini, 1500 ve 2000 rpm motor devirlerinde vuruşu sebebiyle ölçüm yapılamadığını belirtmiştir. Avans değeri düştükçe yakıtlar arasındaki farklılıklarında ortaya çıktığı, 10° ateşleme zamanlamasının F0 yakıtına göre F5 yakıtında motor momentinin %4,86 artarken, F50 yakıtında %11,76 daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Motorun tam yük şartlarında, HFK'nın 1 olduğu, değişken motor devirlerinde, 24°'lik ateşleme avansında yapılan deneylerde özgül yakıt tüketiminin, karışımdaki fuzel yağı miktarına bağlı olarak artık gösterdiğini ortaya koymuştur. Fuzel yağının alt ısıl değerinin kurşunsuz benzinden daha düşük olması sebebiyle, hazırlanan karışımda fuzel yağı miktarı arttıkça karışımın ısıl değerinin azaldığı ve yakıt tüketiminin artış gösterdiğini belirtmiştir. Motordan aynı miktarda güç elde edebilmek için daha fazla fuzel yağı/kurşunsuz benzin

karışımına ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir. Motorun tam yük konumunda, HFK'nın 1 ve ateşleme zamanlamasının 24° olduğu durumda, motor hızına bağlı olarak HC emisyonlarının tüm yakıtlarda artan motor hızıyla beraber azaldığını gözlemlemiştir. F0 yakıtına göre fuzel yağı/kurşunsuz benzin karışımları incelendiğinde HC emisyonları artış gösterdiği, en yüksek artışın F50 yakıtında ortalama %39,64 ile gerçekleştiğini ortaya koymuştur. [38].

Topgül (2006), yaptığı çalışmada 15 Kw gücünde dört zamanlı, tek silindir, buji ateşlemeli, sıkıştırma oranı değiştirilebilir, Hydra marka bir test motorunda, %10, %20, %40 ve %60 oranında etanol içeriğine sahip kurşunsuz benzin karışımları kullanmıştır. Yaptığı deneylerde farklı motor yükleri ve devirlerinde, sıkıştırma oranı, hava fazlalık katsayısı, ateşleme zamanı ve emme havası sıcaklığı değişimlerinin emisyon ve motor performansına etkilerini incelemiştir. Düşük motor devri ve yüksek sıkıştırma oranlarında, karışımdaki etanol miktarına bağlı olarak motor performansının arttığını gözlemlemiştir. Etanol-benzin karışımları kullanıldığında ısı kayıplarının, kurşunsuz benzine oranla azaldığını tespit etmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlar arasında E60 yakıtının en iyi vuruntu direncine sahip olduğu ve daha yüksek silindir basıncına ulaştığını ortaya koymuştur [32].

Fang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada(2015), tek silindirli bir motordan alınan veriler ile RCCI yanma modunda yüksek ve düşük motor yükünde birkaç temel motor emisyon parametresinin deneysel olarak optimize edilmesi için yanıt yüzeyi yöntemi (YYM) kullanılmıştır. YYM tarafından oluşturulan optimizasyon verileri incelendiğinde, başlangıç noktalarına göre NO_x ve kurum emisyonları düşük yük durumunda %79 ve %50, yüksek yük durumunda ise %72 ve %27 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük yük koşulunda HC ve CO emisyonları arasında bir değişim gözlemlenmezken, yüksek yük koşulunda optimizasyon işleminden sonra HC ve CO emisyonlarının her ikisinde de azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yapılan bu çalışma motor parametreler arasındaki karmaşık ilişkilere rağmen, azaltılmış deneysel veriler ile YYM kullanılarak RCCI motordaki emisyonların azaltılmasının ilişkin önemli verilere ulaşılabileceği ortaya konmuştur [39].

Babagiray ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (2022), farklı valf kaldırma yüksekliklerinin HCCI yanma performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerinin

incelendiği ve YYM ile optimum çalışma koşulları analiz edilmiştir. Tüm girdi değişkenlerinin efektif torku olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Maksimum efektif torkun, 1300 rpm motor devri, 1 lamda değeri, 90°C giriş havası sıcaklığında 18,63 Nm olduğu gözlemlenmiştir. Emme valfi kaldırma yüksekliğinin 3,5 mm'den 5,5mm ye yükseltilmesiyle fren özgül yakıt tüketiminin azaldığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, YYM kullanılarak oluşturulan modellerin HCCI motorunun performansı ve egzoz emisyonları hakkında iyi bir tahmin sağlayabileceği sonucuna varılmıştır [40].

Yaman ve arkadaşları (2021), yanıt yüzey metodu ile optimizasyon yaptıkları çalışmada, en düşük emisyon ve en yüksek performans için optimum metanol oranı ile motor yükünü belirlemişlerdir. YYM optimizasyonunda kullanılan gerekli veriler, %0, %10 ve %20 olan üç farklı metan oranı ve 6, 8, 10, 12 ve 14 kg olan 5 farklı motor yükü ile yapılan deneyler ile elde edilmiştir. En düşük emisyon ve en yüksek performansın metanol oranının %7 ve motor yükünün 12 kg olduğu çalışma şartlarında gerçekleştiği tespit etmişlerdir. Elde edilen regresyon sonuçları tüm yanıtlar için %90'dan büyük bir R^2 değerlerine sahip olduğu, bu nedenle oluşturulan YYM modelinin, farklı motor yüklerindeki SI motorlarda metanol oranının etkisini doğru bir şekilde verebilme yeteneğine sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Yakıtta metanol ilave edilmesinin genel anlamda emisyon değerlerinde iyileşme sebep olduğu ama az da olsa performansta düşüşe sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Metanol yakıt karışımlarının kullanıldığı buji ile ateşlemeli motorun YYM ile %6'nın altında bir hata oranıyla başarılı bir şekilde optimize edilebileceğini ortaya koymuşlardır [41].

Awad ve arkadaşları(2017), buji ile ateşlemeli bir motorda farklı nem miktarlarına sahip fuzel yağı benzin karışımlarının performans ve emisyonu bağlı optimum karışım oranlarını belirlemek için YYM metodunu kullanmışlardır. FAWE20 (%80 benzin, %20 fuzel) yakıtının optimal karışım olduğu tespit edilmiştir. Fuzel yağındaki nem miktarının azaltılmasıyla, fren termal verimliliği ve NO_x emisyonunda artış, fren özgül yakıt tüketimi(BSFC), HC ve CO emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Fosil yağdaki nem miktarının azaltılmasıyla önceye kıyasla fuzel yağı ısı değerinde %13 oranında iyileşme elde edilmiştir [42].

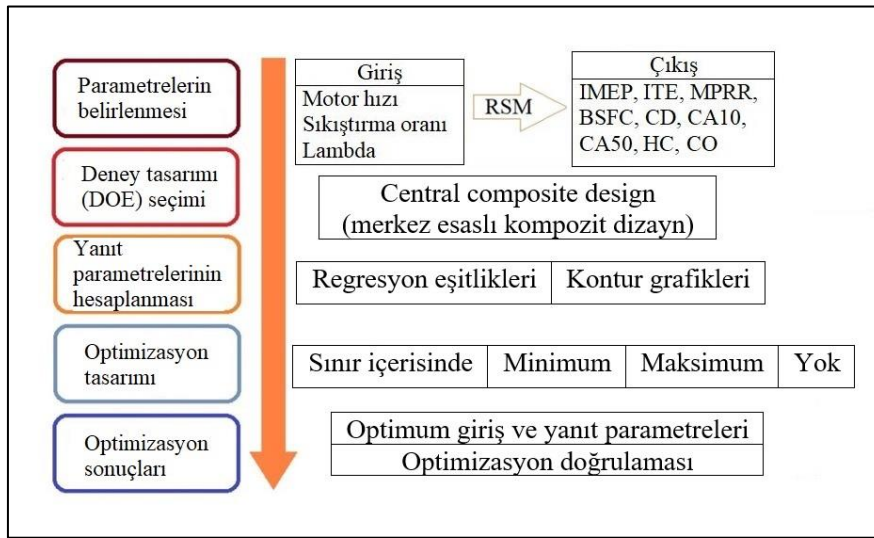
Solmaz(2015), çalışmasında buji ateşlemeli bir motorda 2500 rpm ve dört farklı motor yükünde fuzel yağının performans, emisyon ve yanma karakteristikleri incelemiştir.

Silindir içi basınçlar, ısı yayılım oranları, alev gelişimi ve alev yayılma süreleri, toplam yanmış kütleinin %50'sine karşılık gelen krank açıları, motor torku, fren özgül yakıt tüketimleri, CO, HC ve NO_x emisyonları da incelenmiştir. Fuzel yağının su içeriği ve düşük ısıl değerinin yanmayı kötüleştirdiği, alev gelişme ve alev yayılma sürelerinin uzadığı ve sonuç olarak motor performansını düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, fuzel yağı kullanımı CO ve HC emisyonlarını sırasıyla %21 ve %25'e kadar arttırdığı gözlemlenmiştir. Fuzel yağının daha kötü yanma performansı nedeniyle NO_x emisyonlarının yaklaşık %31 oranında azaldığını ortaya koymuştur [43].

Solmaz(2020), çalışmasında fuzel yağının HCCI motorda yanma ve performans özelliklerine etkisini referans yakıtlar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yakıt karışımı(Fuzel40) %37,5 fuzel yağı ve %62,5 n-heptan yakıt karışımında oluşmaktadır. Referans yakıt olarak ve aynı oktan sayısını elde etmek için RON40 kullanılmış olup deneyler, 350 K sabit giriş havası sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Motor çalışması, BSFC, egzoz emisyonu, CA50 ve ITE haritaları ve 11, 12 ve 13 sıkıştırma oranında her motor devrinde tekleme ve vuruş limitleri incelenmiştir. Düşük ısıtma değerine rağmen Fusel40 yakıtının HCCI motor için performans kaybına neden olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca 13 sıkıştırma oranında SOC ve CA50'nin daha iyi konumlandırılması sayesinde daha yüksek fren torku ve minimum BSFC 228,6 g/kWh değerinin elde edildiği ortaya konmuştur. RON40 yakıtı ile 12 sıkıştırma oranı ve 2,9 lambda değerinde maksimum ITE %44,6 olarak elde edilmiş ve Fuzel40 yakıtında HCCI motorunun geniş çalışma aralığı için RON40'tan daha yüksek ısıl verim sağlandığı gözlemlenmiştir. İndike termik verim RON40 için %26-44 aralığında iken, Fusel40 için %30 ile %43 aralığında olduğu tespit edilmiştir [44].

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada F30 karışım yakıtın, HCCI motor üzerinde, motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değerine bağlı olarak yanıt parametrelerinin araştırılması deneysel ve istatistiksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın içeriğini belirten akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir [45].



Şekil 3.1. Çalışmanın akış şeması

3.1. Yanıt Yüzey Metodu (YYM)

Yanıt yüzey Metodu (YYM) ilk olarak Box ve Wilson (1951) tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır. YYM'nin temelleri ve onun temel felsefesi birçok makalede ve bir dizi ders kitabında tartışılmaktadır. YYM, süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için yararlı olan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir araya gelmesinden oluşmaktadır.

Bir işlem içerisindeki birden fazla girdi değişkeninin, işlemin performans ölçütlerini veya kalite özelliklerini etkilediği durumlarda YYM yaygın olarak kullanılmaktadır. İşlemdeki performans ölçütleri veya kalite özellikleri yanıt (Response) olarak adlandırılmaktadır. Girdi değişkenleri bazen bağımsız değişken olarak da adlandırılmaktadır ve işlemi yapın kişinin kontrolündedir. YYM minimum deney sonucu kullanılarak maksimum bilgi elde edilmesini sağlamaktadır [46]. YYM, ihtiyaç duyulan deneysel çalışma sayısını önemli

ölçüde azaltmakta ve model yapısına bağlı olarak, değerler arasındaki bağlantının etkisini de belirleyebilmektedir.

Doğru tahmin yapabilmek ve deneysel sonuçlar için 2. dereceden bir polinom modelinin tepki regresyonu kullanılmaktadır. Böyle bir modelin davranışı, aşağıda belirtilen eşitlik 3.1’de açıklandığı gibi ikinci dereceden bir denklem kullanılarak kontrol edilir.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.1)$$

Burada β_0 sabit, β_i doğrusal katsayı ve β_{ij} etkileşim katsayısıdır. i ve j sırasıyla doğrusal ve ikinci dereceden katsayılarıdır. ϵ rastgele test hatası, k faktör sayısı, y tahmin edilen yanıt, x_i ve x_j ise bağımsız faktörlerdir.

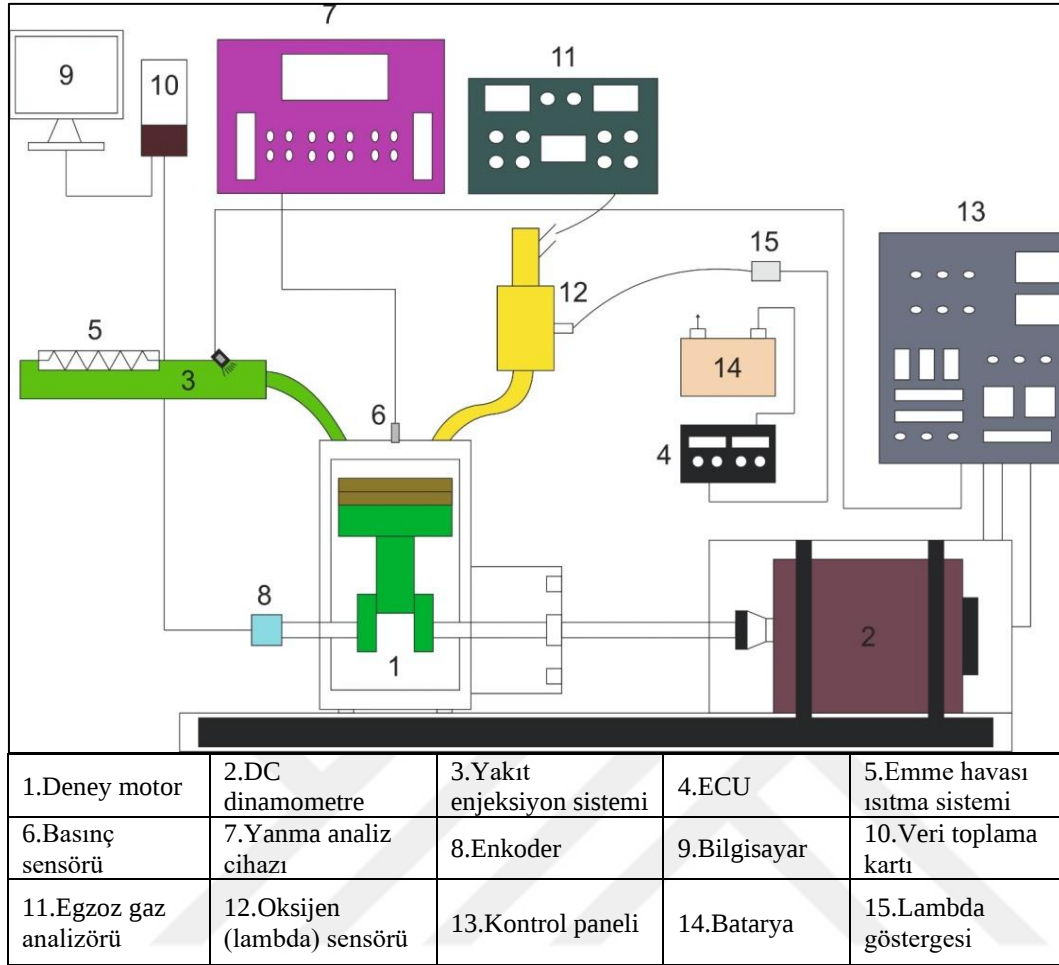
3.2. İstatiksel Tasarım

Bu çalışmada, maliyet, zaman faktörlerinin iyileştirilerek, verilerin optimizasyonuna imkân tanınmasından dolayı YYM kullanımı gerçekleştirilmiştir. YYM ile birlikte deney sayılarında azalış gerçekleştirilirken daha geniş çalışma parametreleri için sonuç elde edilebilmektedir. Daha geniş sonuçların elde edilmesine karşın deney sayısındaki azalıştan dolayı çalışma süresi de azaltılmaktadır. Bunlara ek olarak değişken parametrelerinin optimizasyonu da gerçekleştirilebilmektedir [47,48]. YYM yöntemi farklı yazılım programları ortamında uygulanabilmektedir. Bu çalışmada YYM, Design Expert Pro 11 ortamında uygulanmıştır. Tasarım yöntemi olarak yüksek güvenilirliğe sahip “Central Composite Design”(CCD) kullanılmıştır. Motor hızı 800 ile 1400 rpm, sıkıştırma oranı 11 ile 13 ve lambda değeri ise 1,9 ile 2,7 değerleri arasında yer almaktadır. Dizayn alfa değeri 1 olarak kabul edilmiştir. Değişken giriş parametrelerinin seviyeleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelgede 3.1’ de belirtilen motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değeri aralıkları deney motorumuzun çalışma aralığı dikkate alınarak belirlenmiştir.

3.3. Deney Düzenegi ve Motoru

Bu çalışmadaki deneyler Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümündeki, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı'nda bulunan test motorunda gerçekleştirilmiştir. SI motorun HCCI motora dönüşümü için sıkıştırma oranı, tek silindirli, yakıt püskürtme miktarı, emme havası giriş sıcaklığı gibi çalışma parametreleri değiştirilebilen Ricardo Hydra marka araştırma motoru üzerinde modifikasyonlar yapılmıştır. HCCI yanmasını incelemek amacıyla silindir kapağına monte edilmiş silindir içi basınç sensörü ve indikatör sistemi kullanılmıştır. Ham olarak elde edilen silindir içi basınç verileri MATLAB programında hazırlanan bir yazılım sayesinde işlenmiş ve yanma analizi gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegi Şekil 3.2'de şematik olarak görülmektedir.

Çalışmaya ait tüm deneyler HCCI motor içeren test düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı test düzenegi şekil 3.2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere deney düzenegi üzerinde HCCI motor, dinamometre, silindir içi basınç sensörü, yakıt tankı, hassas terazi, yakıt enjeksiyon sistemi, egzoz gaz ölçüm cihazı, encoder, emme havası ısıtıcısı, elektronik kontrol üniteleri ve izleme monitörleri mevcuttur. Elektronik kontrollü yakıt enjeksiyon sistemi ile yakıt enjeksiyonu direkt emme manifolduna gerçekleştirilmiştir. Deneylerde giriş hava sıcaklığı 350 K, soğutma sıvısı sıcaklığı 363 K ve yağlama yağı sıcaklığı ise 358 K sıcaklık değerlerinde sabit olacak şekilde elektronik olarak kontrol edilmiştir. Tüm deneyler aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Test düzeneği şematik gösterimi

Çizelge 3.3’de test düzeneğinde kullanılan Ricardo Hydra marka araştırma motorunun özellikleri ve çalışma aralıkları belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Deney motoru özellikleri

Marka	Ricardo Hydra
Silindir Sayısı	1
Silindir Çapı	80,26 (mm)
Kurs	88,9 (mm)
Maksimum Motor Hızı	5400 (rpm)
Maksimum Gücü	15(kW)
Sıkıştırma Oranı	5:1 - 13:1
Supap Yapısı	İki düşey supap ve kam mili üstte
Yakıt Tipi	Port
İSAA	ÜÖN'ya 12 derece kala
İSKG	AÖN'dan 56 derece sonra
ESAA	AÖN'ya 56 derece kala
ESKG	ÜÖN'dan 12 derece sonra
Emme SKM	5,5 (mm)
Egzoz SKM	3,5 (mm)

Kontrol paneli üzerine bulunan potansiyometre ile motor hızı ayarlanmaktadır. Emme manifolduna püskürtme gerçekleştiren yakıt enjektörünün açık kalma süresi kontrol paneli üzerinden kontrol edilmekte ve bu sayede hava/yakıt oranı ayarlanabilmektedir. Dinamometre kontrol panelinde motor hızı, emme havası giriş sıcaklığı, motor soğutma suyu sıcaklığı, yağlama yağı sıcaklığı da kontrol edilebilmektedir. Deneyler yapılmadan önce kontrol paneli üzerinden motorun devirdaim pompası ve yağ pompası çalıştırılmaktadır. Ünite üzerinde yer alan dijital ve analog göstergelerde anlık olarak ölçülen motor momenti değerleri okunabilmektedir. Ayrıca dijital ve analog göstergeler üzerinden anlık olarak ölçümü yapılan motor momenti değeri okunabilmektedir. Kontrol paneli üzerinden ölçülen motor momenti ve hızının ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri Çizelge 3.4 verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kontrol panelindeki değişkenlerin ölçüm hassasiyetleri ve aralığı

	Aralık	Hassasiyet
Motor Hızı (rpm)	0 - 7000	1
Motor Torku (Nm)	0 - 80	0,01
Ateşleme Avansı	ÜÖN'dan 70° KA önce	1° KA

3.3.1. Dinamometre

Deneylerde McClure marka 6500 rpm devirde 30 kW gücünde frenleme yapabilen elektrikli tip dinamometre deney motorunun yüklenebilmesi için kullanılmıştır. Aynı zamanda elektrik motoru olarak da kullanılabilir.

3.3.2. İndikatör sistemi

Silindir içerisindeki basıncın ölçümü test motorunda kullanılan indikatör sistemi ile sağlanmıştır. Kullanılan indikatör sistemi enkoder, basınç sensörü, veri toplama kartı, indikatör cihazı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Silindir kapağı üzerinde yer alan basınç sensöründen alınan analog sinyaller National Instrument marka veri toplama kartı sayesinde dijital sinyale dönüştürülerek bilgisayara kaydedilmektedir. Cussons marka P4410 model indikatör cihazı da silindir içi basınç sinyallerini toplayarak yükseltilmesinde kullanılmıştır.

3.3.3. Basınç sensörü

İçten yanmalı motorun yanma analizinin gerçekleştirilebilmesi için krank mili açısına bağlı silindir içi basınç verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada silindir içi basınç değerinin ölçümü silindir kapağına monte edilen Kistler 6121 marka basınç sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Basınç sensörü teknik özellikleri Çizelge 3.5’de görülmektedir.

Çizelge 3.5. Basınç sensörü özellikleri

Kistler 6121	
Ölçüm aralığı	0 – 250 (bar)
Hassasiyet	14,7 (pC/bar)
Sıcaklık Aralığı	-50 °C / +350 °C
Tolerans	0,5 (+/- %)

3.3.4. Enkoder

Krank mili üzerine monte edilmiş enkoder sayesinde veriler elde edilmektedir. Enkoder krank milinin pozisyonunu belirlerken B sinyali, üst ölü noktaya gelindiğinde ise z sinyali üretmektedir. Krank milinin her 0,36°’lik açısında enkoder bir sinyal üretmektedir. Bu

sayede krank milinin pozisyonu bilgisayara kaydedilmektedir. Enkoderin krank miline oldukça hassas bir şekilde bağlanmıştır. Krank mili 0,01 mm hassasiyete sahip bir komparatör ile ÜÖN'ya ayarlanmış ve enkoder +5V olan ÜÖN sinyalini ürettiği anda enkoder krank miline sabitlenmiştir. Bu sayede ÜÖN'lar arasındaki bir çevrime ait veriler bilgisayara kaydedilen veriler içerisinde tespit edilebilmektedir. Çizelge 3.6'de enkodere ait teknik özellikler görülmektedir.

Çizelge 3.6. Enkoder özellikleri

Opkon Marka Encoder	
Gövde yarıçapı	25(mm)
Mil yarıçapı	4 (mm)
Besleme gerilimi	5(V DC)
Her turda üretilen sinyal sayısı	1000
Çıkış tipi	Line Driver
Sıcaklık aralığı	-20 / 80(°C)
Maksimum çalışma devri	4000 rpm

3.3.5. Veri toplama kartı

Analog yapıdaki silindir içi basınç sinyalleri National Instrument USB 6259 marka model veri toplama kartı (DAQ) sayesinde dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Motorun her devrinde enkoder 1000 sinyal üretebilmekte ve 0,36° krank açısı aralıklarla silindir içi basınç sinyalleri dijital olarak kaydedilmektedir.

3.3.6. Sıkıştırma oranı değişimi

Motor bloğunun altına konulan farklı kalınlıklara sahip şimler sayesinde deney motorunun sıkıştırma oranı değiştirilebilmektedir. Çizelge 3.7' de farklı şim kalınlıklarına bağlı olarak sıkıştırma oranındaki değişimler görülmektedir.

Çizelge 3.7. Şim kalınlığına bağlı sıkıştırma oranındaki değişimleri

Şim Kalınlığı (mm)	Sıkıştırma Oranı
24,274	5
19,827	6
16,862	7
14,744	8
13,156	9
11,921	10
10,932	11
10,124	12
9,45	13

3.3.7. Emme havası giriş sıcaklığı değişimi

Yapılan tüm deneyler boyunca motor yağı sıcaklığı ve motor soğutma suyu sıcaklığı sabit tutulmuştur. Motor gereken çalışma sıcaklığına ulaşana kadar beklenmiş ve deneyler bu şartlarda yapılmıştır. Emme manifoldu üstünde bulunan rezistans vasıtası ile giriş hava sıcaklığının artışı sağlanmıştır. Bu rezistansın kontrolü, kontrol paneli üzerinden kumanda edilmiştir. Aynı zamanda emme manifoldu üzerinde ısıtıcıdan sonra, K tipi termokupl monte edilmiş ve bu sayede giriş hava sıcaklığının ölçümü gerçekleştirilmiştir.

3.3.8. Hava/yakıt oranının kontrolü

Deney motorunda Farklı hava / yakıt oranları kullanılarak kararlı bir HCCI çalışma aralığı belirlenmeye çalışılmıştır. Kontrol paneli üzerinde 100 eşit parçaya bölünmüş 10 turlu bir potansiyometre ile enjektörün açık kalma süresi ayarlanabilmektedir. Yakıt miktarının değişimi sonrasında egzoz gaz analizöründe yer alan gösterge panelinden hava/yakıt oranı ayarlanmıştır.

3.3.9. Egzoz gazları analizörü

Sun MGA 1500 marka model emisyon ölçüm cihazı kullanılarak egzoz gazlarının ölçümü sağlanmıştır. Bu cihaz CO, HC, CO₂, NO, O₂ emisyonları, hava/yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı ölçümünü yapabilmektedir. Analiz cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Egzoz gaz analizörü teknik özellikleri

	Aralık	Hassasiyet
CO (%)	0 - 14	0,001
HC (ppm)	0 - 9999	1
NO _x (ppm)	0 - 5000	1
CO ₂ (%)	0 - 20	0,1
O ₂ (%)	0 - 25	0,01
Lambda	0 - 4	0,001

3.3.10. Deney yakıtı

Bu çalışmada F30 yakıt karışımı kullanılmıştır. F30 yakıt karışımı %30 fuzel yağı ve %70 n-heptan yakıtın hacimsel olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Fuzel yağı ve n-heptan yakıtı ait RON (araştırma oktan sayısı), LHV (alt ısı değeri), oksijen, yoğunluk ve kaynama noktası değerleri Çizelge 3.9’ da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Deney yakıtı özellikleri

	Fuzel Yağı	n-heptan
RON	106.8	0
Yoğunluk (15.4°C-kg/m ³)	847	695
LHV (kJ/kg)	29536	44466
Kaynama Noktası (K)	395-411	371
Oksijen (%)	30.32	0

3.3.11. Yakıt tüketiminin belirlenmesi

Deney düzeneğinde yakıt enjeksiyonu emme manifolduna püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Yakıt tüketiminin hesaplanması ve hava/yakıt oranının sabit tutulması için kontrol paneli üzerinde yer alan yakıt kontrol bölümündeki 100 eşit parçaya bölünmüş bölüntüler kullanılmıştır. Bu sayede enjektör püskürtme karakteri ve yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Kontrol paneli üzerinden yakıtın püskürtülme miktarı 1,0 pozisyonuna alınarak motor devri sabit tutulmuştur. 0,01 gram hassasiyete sahip teraziye konulan yakıt deposundan 60 saniye boyunca çalışan motorun tükettiği yakıt verisi kaydedilmiştir.

3.4. Deney Verilerinin Analizi

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin bazıları matematiksel eşitlikler yardımı ile çözümlenirken bazıları ise direkt olarak kullanılmaktadır. Emisyon verileri egzoz emisyon

cihazından okunmakta olup herhangi bir çözümleme gerekmemektedir. Krank mili açısına bağlı olarak elde edilen silindir içi basınç verisinin yanma analizi ve net işin hesaplanabilmesi amacı ile çözümlenmesi gerekmektedir. Deney sürecinde 1 çevrimde 200 silindir içi basınç verisi elde edilmektedir. Çevrimsel farklılıkların en aza indirgenmesi amacı ile 50 çevrime ait ham verilerin ortalaması alınmıştır. Elde edilen bu veriler MATLAB ortamında oluşturulan model üzerinde çözümlenmiştir.

Basınç verisi sayısı, motorun özellikleri ve sınırları, silindir duvarındaki sıcaklık, enkoder verisi, yakıtın alt ısı değerleri, enkoder verisi, emme havası ve giriş havasının yoğunluğu, egzoz gazının sıcaklığı, yakıt ve hava tüketimi, motor devri programa giriş verisi olarak tanımlanmıştır.

Hazırlanan program sayesinde 50 çevrimin ortalamasıyla elde edilen ve krank açısına bağlı elde edilmiş kurs ve yanma odası hacmi, silindir içi basıncı, anlık silindir hacmi ve birinci türevi, anlık net iş ve ısı dağılımı, anlık silindir içi sıcaklık tahmini, anlık silindir içi basıncının birinci ve ikinci türevi, anlık ısı transferi yüzey alanı, anlık ısı transfer miktarı, anlık ısı transfer katsayısı, bir çevrimde tüketilen havanın kütlesi, hacimsel verim, indike ortalama efektif basınç, net iş, CA10 ve CA50 değerleri toplam yanma süresi, indike termik ve yanma verimi, indike güç hesaplatılarak kaydedilmiştir.

3.4.1. Motor geometrisi

Isı dağılımı, net iş, ortalama çevrim basıncı, ısı transfer miktarı ve bazı motor performans değerleri hesaplanabilmesi için silindir içi hacminin ve türevinin krank açısına bağlı değişiminin hesaplanması gerekmektedir. Krank açısına (θ) bağlı olarak pistonun aldığı yol ve anlık olarak değişen silindir hacmi aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Eş. 3.2, 3.3 ve 3.4’de Kurs, yanma odası ve toplam silindir hacminin hesaplanması görülmektedir.

$$V_k = \frac{\pi \times D^2}{4} \times H \quad (3.2)$$

$$V_c = \frac{V_k}{\varepsilon - 1} \quad (3.3)$$

$$V_s = V_k + V_c \quad (3.4)$$

Bu eşitliklerde;

V_k : Kurs hacmi, m^3

V_c : Yanma odası hacmi, m^3

V_s : Toplam silindir hacmi, m^3

H : Kurs boyu, m

ε : Sıkıştırma oranı

D : Silindir çapı, m

Pistonun aldığı yol için;

$$S = L + r - r \times \cos\theta - L \times \cos\beta \quad (3.5)$$

Eş. 3.5. yazılabilir. Aşağıda trigonometrik dönüşümü yapılarak $\cos\beta$ ifadesinin θ cinsinden karşılığı hesaplanabilir.

$$L \times \sin\beta = r \times \sin\theta \quad (3.6)$$

$$\sin\beta = \frac{r}{L} \times \sin\theta \quad (3.7)$$

$$\sin^2\beta + \cos^2\beta = 1 \quad (3.8)$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\beta} \quad (3.9)$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L} \times \sin\theta\right)^2} \quad (3.10)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$S(\theta) = L + r - r \times \cos\theta - L \times \left(\sqrt{1 - \left(\frac{r}{L} \times \sin\theta\right)^2}\right) \quad (3.11)$$

$$S(\theta) = r \times \left((1 - \cos\theta) + \frac{1}{\lambda} - \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \sin^2\theta} \right) \quad (3.12)$$

Eşitlikler elde edilir. Bu eşitliklerde;

L : Biyel kolunun uzunluğu, metre

r : Krank milinin yarıçapı, metre

θ : Krank mili açısı,

λ : Krank mili yarıçapının biyel kolu uzunluğuna oranı,

$S(\theta)$: Krank mili açısına bağlı pistonun aldığı yol, metre'dir.

Krank mili açısına bağlı anlık silindir hacmi ise;

$$V = V_c + \frac{\pi \times D^2}{4} \times S(\theta) \quad (3.13)$$

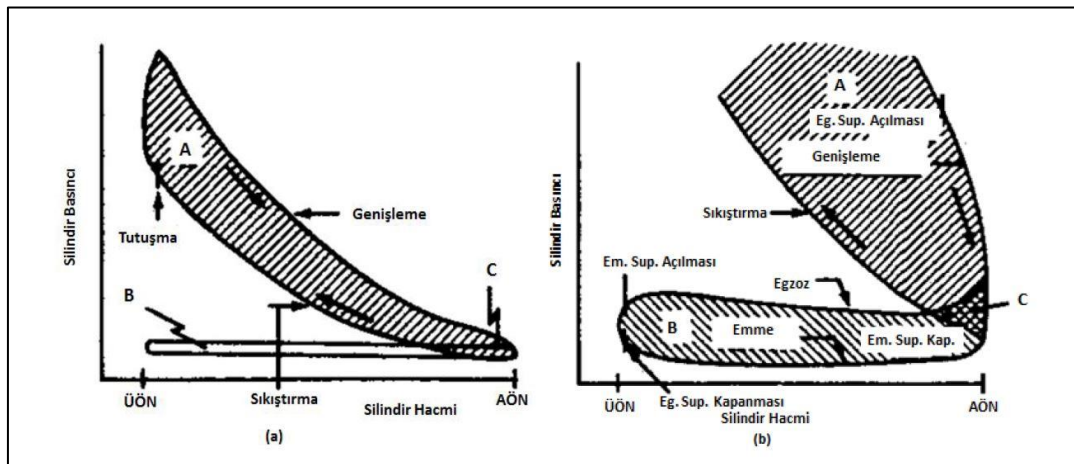
Şeklinde ifade edilebilir. Silindir hacminin krank açısına bağlı birinci derece türevi için bu eşitliğin türevi alındığında;

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times \left(r \sin\theta + \frac{\cos\theta \times \sin\theta}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \sin^2\theta}} \right) \quad (3.14)$$

Eşitliği elde edilir.

3.4.2. İndike ortalama efektif basınç ve net işin hesaplanması

Her çevrimde elde edilen indike ortalama efektif basınç (İMEP) ve net iş, silindir içi basınç değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. İMEP değeri, silindir sayısı, hacmine ve motor hızına bağlı olmadığı için motor veriminin belirlenmesinde temel bir değer olarak kullanılmaktadır [49,50]. Motorun gerçek çevrimdeki gücünü verebilmesi için bir kurs boyunca piston üzerine etki eden sabit basınca indike ortalama efektif basınç denir.



Şekil 3.3. Kapalı indikatör diyagramı [49].

Şekil 3.3' de silindir hacmine bağlı silindir basıncının değişimi görülmektedir. Kapalı indikatör diyagramda altta kalan alan pistonu etkileyen iş olarak tanımlanmaktadır. Bu sebep ile çevrim boyunca yapılan iş;

$$W = \oint P \times dV \quad (3.15)$$

Eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Burada;

W : İş, J

dV : Hacim değişimi m^3

P : Silindir basıncı, Pa olarak ifade edilmektedir.

Net işin hesaplanması için brüt işten pompalama işini çıkarmak gerekmektedir. Şekil 3.3'de B alanı ile C alanını toplandığında pompala işi, A alanı ile C alanı toplandığında ise brüt iş elde edilmektedir. Pompalama işinde, emme zamanındaki silindir içerisindeki basınç, egzoz zamanındaki basınçtan küçük olması durumunda B alanı pozitif kabul edilmekte. Bu durum normal emişli motorlarda olmaktadır. Emme zamanı silindir içi basıncının, egzoz zamanındaki basınçtan büyük olması durumunda ise B alanı negatif kabul edilmekte. Bu durum ise turbo emişli motorlarda olmaktadır. Net iş A alanı ile B alanının farkıyla elde edilmektedir.

Dolayısı ile net iş;

$$W_{net} = W_{brüt} + W_{pomp} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

İMEP değeri, işin kurs hacmine bölünmesi ile bulunmaktadır. Aşağıdaki Eş. 3.17 ve 3.18'de $imep_{brüt}$ ve $imep_{net}$ değerleri hesaplanmıştır.

$$imep_{brüt} = \frac{W_{brüt}}{V_k} \quad (3.17)$$

$$imep_{net} = \frac{W_{net}}{V_k} \quad (3.18)$$

3.4.3. Çevrimsel farklılıkların analizi

Silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık farklılıkları, karışımın kompozisyonundaki değişimi çevrimsel farklılıklara sebep olmaktadır. HCCI yanma modunda, yanma esnasında yanma odasının tümünde oluşan hızlı ve ani ısı dağılımı çevrimsel farklılıkların artmasına sebep olmaktadır. Bununla beraber yüksek devir / yüklerde meydana gelen vuruntu ve düşük yüklerde oluşan ateşlememe problemi çevrimden çevrime oluşan farklılıkları arttırmaktadır. Varyans katsayısı değerinin %10'u geçmemesi literatürde motorun kararlı çalışması için istenilen değer kabul edilmektedir. Bu değer HCCI modunda yanma için kritik bir değer kabul edilmektedir [49].

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{\bar{X}} \times 100 \quad (3.19)$$

IMEP varyans katsayısı Eş. 3.19 ile hesaplanmıştır.

σ_{imep} : 50 çevrimin ortalama efektif basınç değerlerinin sapması

$\bar{X}$: ortalama efektif basınçların ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler aşağıdaki Eş. 3.20 ve Eş 3.21 'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n_i} \quad (3.20)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n_i - 1)} \quad (3.21)$$

3.4.4. Termik verim

Termik verim net işin harcanan enerji miktarına oranı ile hesaplanmaktadır [51]. Silindir içerisine püskürtülen yakıtın yanması neticesinde ortaya çıkan enerji Eş. 3.22 'deki gibi hesaplanmıştır.

$$H_{yakıt} = m_y + Q_{LHV} \quad (3.22)$$

$H_{yakıt}$:Yakıtın yanması neticesinde açığa çıkan enerji, kJ

m_y : tek çevrimde silindir içine gönderilen yakıt miktarı, kg/çevrim

Q_{LHV} : yakıtın alt ısı değeri, kJ/kg

Termik verim hesabı ise Eş.3.23' deki gibi hesaplanmıştır.

$$\eta_T = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{izooktan} \times Q_{LHV\ izooktan} + \dot{m}_{n-heptan} \times Q_{LHV\ n-heptan}} \quad (3.23)$$

η_T : Termik verim, %

$\dot{m}_{izooktan}$ ve $\dot{m}_{n-heptan}$: tek çevrimde silindire püskürtülen yakıt miktarları, kg

$Q_{LHV\ izooktan}$ ve $Q_{LHV\ n-heptan}$: yakıtların alt ısı değerleri

3.5. Deney Sonuçlarının YYM ile İşlenmesi

Deney setinde belirtilen giriş parametrelerine bağlı 15 adet deney seti gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu 15 adet deney seti sonuçlarına bağlı hesaplanan yanıt parametreleri Çizelge 3.10'da yer almaktadır.

Çizelge 3.10. YYM deney seti sonuçları

MH (rpm)	SO	(λ)	IMEP (bar)	ITE (%)	MPRR (bar/ka)	BSFC (g/kWh)	CA10 (ka)	CA50 (ka)	CD (ka)	HC (ppm)	CO (%)
800	13	1.9	3.489	21.83	14.465	249.48	-5.04	-3.96	21.2	393	0.39
800	13	2.7	2.825	37.63	3.3783	282.77	0	3.24	28.4	469	0.14
1100	13	2.3	2.867	39.26	2.8665	280	1.26	4.86	32.3	445	0.098
1400	13	2.7	2.231	32.35	3.2187	290.74	7.92	14.4	33.3	481	0.288
1400	13	1.9	3.256	33.26	14.534	298.36	3.6	5.76	25.2	438	0.066
800	12	2.3	3.686	31.04	9.1858	248.95	0	2.88	26.6	455	0.094
1100	12	2.3	3.507	32.39	6.8358	268.08	4.5	8.28	28.1	423	0.103
1100	12	2.7	2.679	36.52	1.4257	288.62	5.22	14.94	34.2	454	0.212
1100	12	1.9	4.082	36.52	12.868	251.76	1.8	4.14	25.2	393	0.063
1400	12	2.3	2.998	28.34	2.659	272.9	9.72	18.36	35.3	468	0.253
800	11	2.7	3.44	29.15	1.5567	292.91	6.48	17.28	35.6	486	0.267
800	11	1.9	5.017	29.58	10.245	251.46	1.08	3.6	25.9	418	0.085
1100	11	2.3	3.89	30.56	2.0827	283.74	8.1	17.28	34.6	442	0.153
1400	11	1.9	4.296	25.19	4.2289	288.22	9.72	20.88	34.2	459	0.121
1400	11	2.7	2.55	19.84	1.6348	337.29	14.76	26.28	40.7	613	0.505

4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, deneysel ve istatistiksel yöntemler entegre bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma sürecinde deneysel ve istatistiksel sonuçlar elde edilmiştir. F-value'nin yüksek olması o yanıt parametresi için değişken parametrenin etkisinin büyük olduğunu göstermektedir. Değişken ve yanıt parametrelerine bağlı P-value ve F-value değerleri, değişken parametrelerin etki oranlarını ve önemlilik durumlarını belirtmektedir. P-value'nin 0,05'ten küçük olması model teriminin "significant" olduğunu göstermektedir. Değişken ve yanıt parametrelerine bağlı F-value ve P-value değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. YYM yanıt parametrelerine ait F-value ve P-value değerleri

Yanıt Parametreler	A: Motor Hızı		B: Sıkıştırma Oranı		C: Lambda	
	F-value	P-value	F-value	P-value	F-value	P-value
IMEP	151,69	< 0,0001	317,73	< 0,0001	638,37	< 0,0001
ITE	4,54	0,0590	38,91	< 0,0001	7,45	0,0212
MPRR	4,61	0,0573	10,24	0,0095	59,56	< 0,0001
BSFC	60,74	< 0,0001	6,33	0,0306	54,26	< 0,0001
CA10	924,83	< 0,0001	520,22	< 0,0001	267,19	< 0,0001
CA50	156,41	< 0,0001	148,42	< 0,0001	83,32	< 0,0001
CD	24,16	0,0006	23,94	0,0006	41,86	< 0,0001
HC	14,62	0,0034	9,57	0,0114	41,72	< 0,0001
CO	3,92	0,0758	1,32	0,2776	28,07	0,0003

YYM yönteminde regresyon eşitlikleri türetilmektedir. Bu eşitlikler girdisi yapılan değişken parametrelerine bağlı yanıt parametrelerinin tahmini için kullanılmaktadır. Regresyon denklemleri ANOVA modeline ait quadratik dereceden türetilmiştir. Eşitlik 4.1' de kullanılan denklem görülmektedir.

$$\beta_0 + \beta_1.A + \beta_2.B + \beta_3.C + \beta_4.A.B + \beta_5.A.C + \beta_6.B.C + \beta_7.A^2 + \beta_8.B^2 + \beta_9.C^2 \quad (4.1)$$

Her bir çıktı için ayrı sabit değer β_0 , motor hızının katsayısı β_1 , sıkıştırma oranının katsayısı β_2 ve Lambda değerinin katsayısı ise β_3 ile ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında her bir yanıt parametresi için oluşturulan ikinci dereceden matematiksel modelin tüm katsayıları Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Matematiksel modelin katsayıları

Katsayı	Giriş P.	IMEP (bar)	ITE (%)	MPRR (bar/ka)	BSFC (g/kWh)	CA10 (ka)	CA50 (ka)	CD (ka)	HC (ppm)	CO (%)
β_0		+3.46	+35.94	+6.14	+266.69	+4.39	+8.82	+29.15	+424.84	+0.102
β_1	A	-0.312	-1.02	-1.26	+16.19	+4.32	+6.26	+3.07	+23.80	+0.025
β_2	B	-0.452	+3.00	+1.87	-5.23	-3.24	-6.10	-3.06	-19.25	-0.014
β_3	C	-0.641	+1.31	-4.51	+15.31	+2.32	+4.57	+4.05	+40.20	+0.068
β_4	A × B	+0.097	+2.48	+0.73	-3.04	-0.045	-0.675	-0.567	-13.87	-0.056
β_5	A × C	-0.066	-2.58	+0.73	-4.16	-0.135	-0.855	-0.297	+6.63	+0.084
β_6	B × C	+0.204	+2.70	-1.39	-8.10	-0.135	-0.405	-0.117	-12.87	-0.074
β_7	A ²	-0.055	-5.38	+0.82	-3.67	+0.638	+0.981	+0.211	+33.91	+0.071
β_8	B ²	-0.019	-0.161	-2.62	+17.27	+0.458	+1.43	+2.66	+15.66	+0.023
β_9	C ²	-0.017	-2.01	+2.05	+5.59	-0.711	-0.098	-1.05	-4.09	+0.035

Regresyon analizi ile elde edilen R^2 doğrulama değerleri, kurulan matematiksel modelin doğruluğunu göstermektedir. Çizelge 4.3’de tüm yanıt parametreleri için elde edilen R^2 doğrulama değerleri görülmektedir. Kontrol edilebilen giriş parametreleri olan motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değerinin, yanıt parametresi olan indike termik verimin oluşmasında %95,71 etki göstermektedir ve geriye kalan %4,29’lık kısım ise kontrol edilemeyen faktörleri temsil etmektedir. Diğer yanıt parametreleri için elde edilen R^2 değerleri de güven aralığı içerisinde yer aldığı için matematiksel modelin doğruluğu kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3. Yanıt parametrelerine ait R^2 değerleri

R^2 (%)	IMEP (bar)	ITE (%)	MPRR (bar/ka)	BSFC (g/kWh)	CA10 (ka)	CA50 (ka)	CD (ka)	HC (ppm)	CO (%)
	99,16	95,71	89,83	94,73	99,42	97,57	90,71	90,70	93,61

Tüm parametreler için sıkıştırma oranı-motor hızı ve lambda-motor hızı değerlerine ait kontur grafikler oluşturulmuş olup, detaylıca değerlendirmesi yapılmıştır. HCCI yanma modunda, silindir içerisindeki hava/yakıt karışımı sıkıştırma sonucu kendiliğinden tutuştuğu için sıkıştırma oranı HCCI yanması için önemli bir parametre kabul edilmektedir.

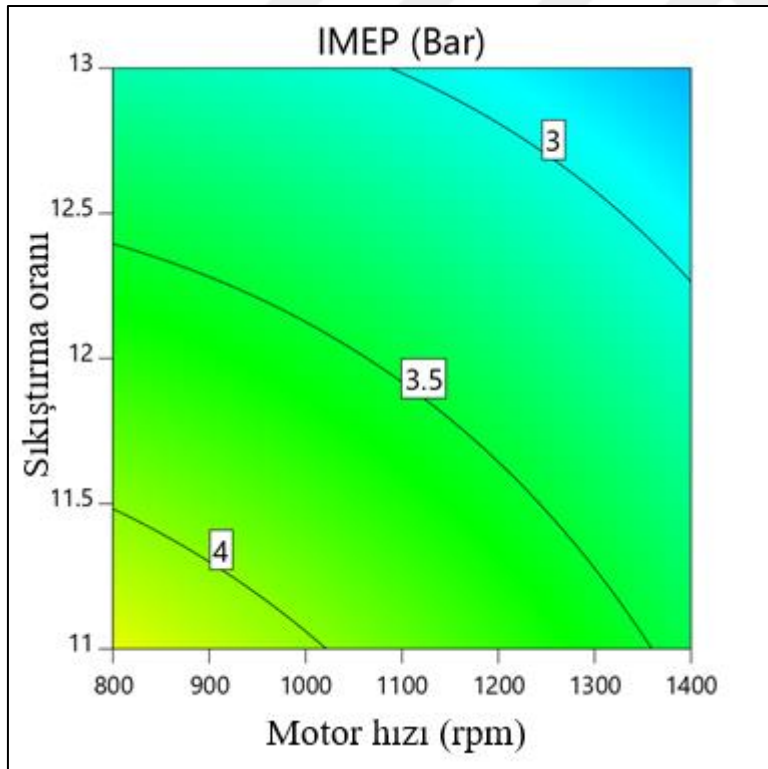
4.1. İndike Ortalama Efektif Basınç (IMEP)

Şekil 4.1 ve 4.2’de IMEP değerlerinin motor hızı, sıkıştırma oranı ve hava fazlalık katsayısına bağlı değişimleri görülmektedir. Motor hızı arttıkça çevrim süresi azalarak silindir içine alınan dolgu miktarında azalma gerçekleşmektedir. Silindir içine alınan

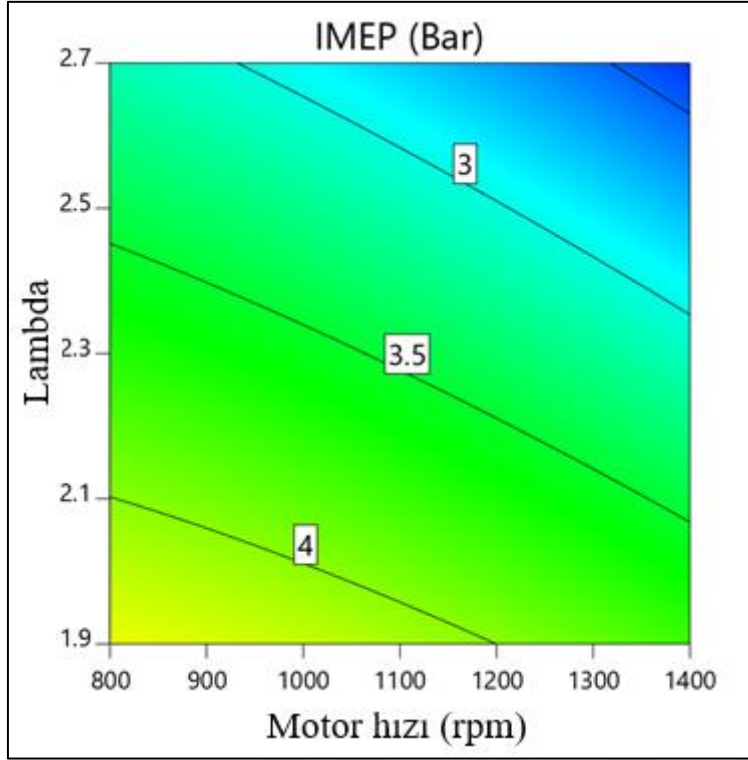
dolgunun azalması yanma sonucunda oluşan ısı ve basınç değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, motor hızının artışı ile IMEP değerinde azalma gözlemlenmiştir.

HCCI motorda sıkıştırma oranının artması ile birlikte IMEP değerinde artış gözlemlenmesi beklenmektedir. Bu çalışmada sıkıştırma oranının artışı IMEP değerinin azalmasına neden olmuştur. Sıkıştırma oranının artması silindir içi dolgu basıncının ve sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Belirli bir seviyenin üzerinde gerçekleşen artış yanmanın fazla avans ile gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu durumun IMEP değerinde azalmaya neden olduğu düşünülmektedir.

Lambda değerinde gerçekleşen azalma ile IMEP değerinde sürekli olarak artış gerçekleştiği görülmektedir. Karışımın zenginleşmesi silindir içerisinde daha fazla ısıнын açığa çıkmasına, maksimum silindir içi basıncın artmasına ve böylelikle piston tarafından yapılan net işe bağlı olarak IMEP değerinin artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.1. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş IMEP haritası (lambda 2,3)



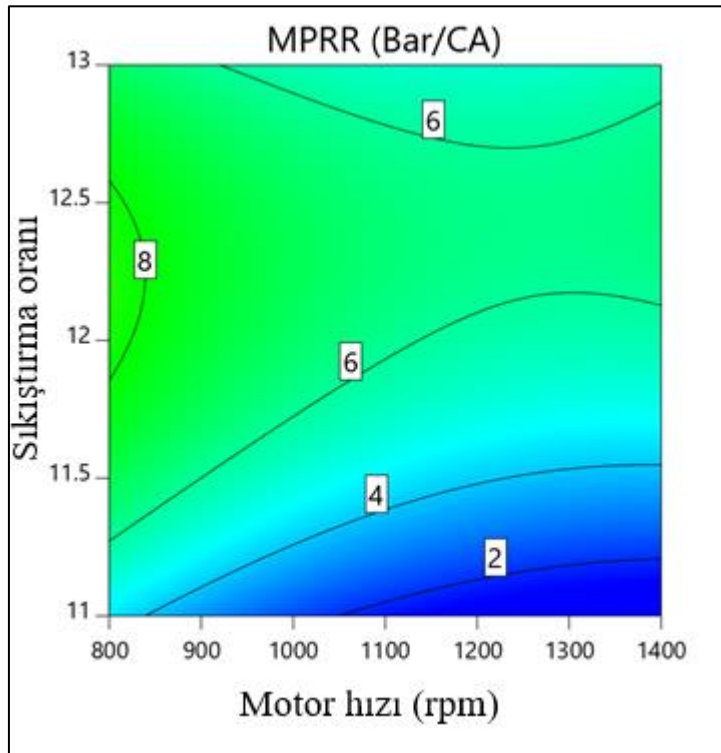
Şekil 4.2. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş IMEP haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.2. Maksimum Basınç Artış Oranı (MPRR)

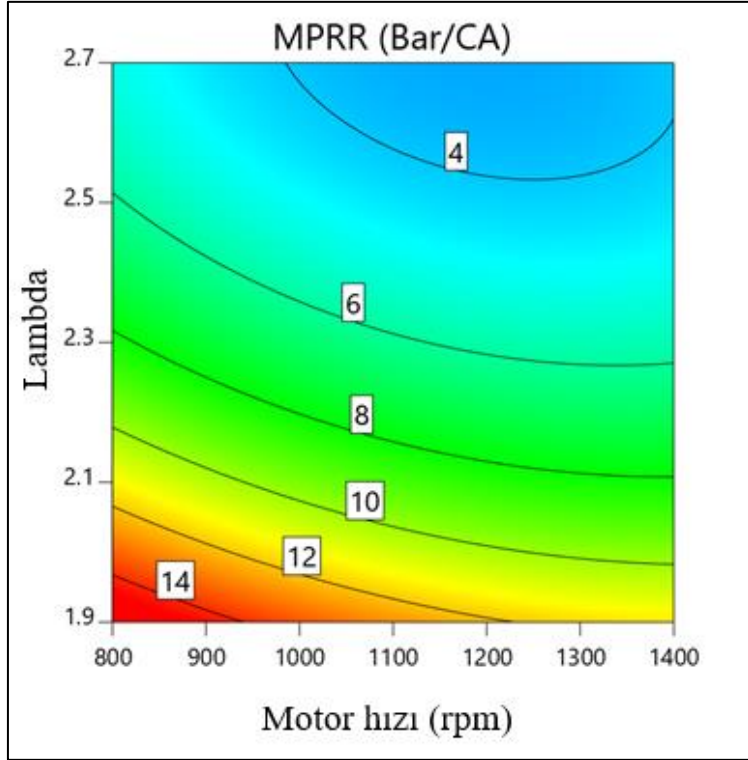
Basınç artış oranı krank açısı başına piston üzerine uygulanan basıncı ifade etmektedir ve içten yanmalı motorlarda basınç artış oranının 10 bar/KA üzerinde olması aşırı vuruntuyu ifade etmektedir [9]. Şekil 4.3 ve 4.4’de MPRR değerlerinin sıkıştırma oranı ve lambdaya bağlı değişimleri görülmektedir.

Motor hızındaki artış MPRR değerinde azalmaya neden olmuştur. Bunun nedeninin silindir içine alınan dolgunun azalması sonucu anma sonu basınç ve sıcaklığının düşmesi olarak değerlendirilmektedir. Sıkıştırma oranının artışı MPRR değerinde artışa neden olmuştur. Çünkü sıkıştırma oranının artmasıyla sıkıştırma zamanı sonunda yanmanın başlamasıyla birlikte açığa çıkan basınç da artış göstermektedir. Bu durum HCCI çalışmasının vuruntu sınırına yaklaşmasına sebep olmaktadır. Özellikle sıkıştırma oranı 12 seçildiğinde lambdanın 2’nin altına düşmesiyle birlikte MPRR değerlerinin kabul edilemeyecek şekilde 10’un üzerine çıktığı Şekil 4.4’de görülmektedir.

HCCI motorlarda karışımın fakirleştirilmesi daha yavaş yanmaya sebep olduğundan ve basınç artış oranını düşürdüğünden motora zarar vermeyi önlemektedir. Şekil 4.4’de görüleceği üzere lambda değerinin artması beklendiği gibi MPRR değerinde azalmaya sebep olmuştur. Fakat fakir karışım şartlarında IMEP azalmaktadır. Zengin karışım bölgesinde ise basınç artış oranının yüksek olması IMEP’in maksimum değerini sınırlandırmaktadır.



Şekil 4.3. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş MPRR haritası (lambda 2,3)



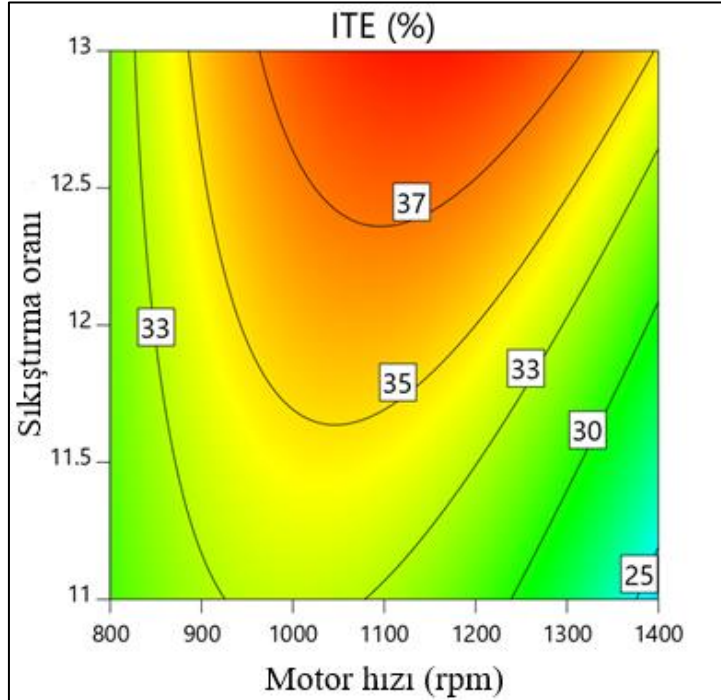
Şekil 4.4. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş MPRR haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.3. İndike Termik Verim (ITE)

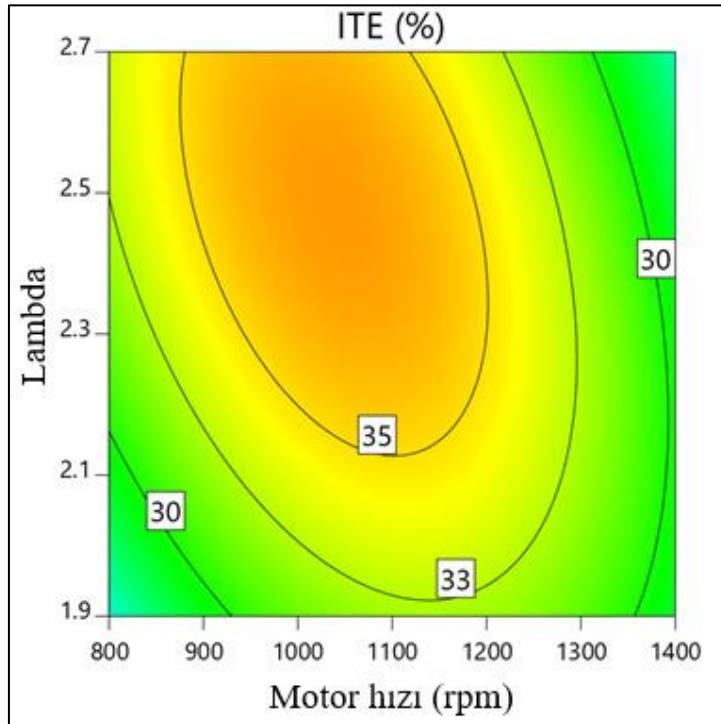
İndike termik verim silindir içerisine alınan yakıtın enerjisinin ne kadarlık bir kısmının faydalı hale dönüştürülebildiğinin bir göstergesidir. Şekil 4.5’de motor hızı ve sıkıştırma oranının ITE üzerindeki etkisi görülürken, Şekil 4.6’da ise ITE’nin motor hızı ve lambdaya bağlı değişimi gösterilmiştir. İndike termik verimin lambda değerinin 1,9’dan daha fakir bir karışım olan 2,3 değerine kadar artış gösterdiği ve 2,3 değerinde sonra karışımın aşırı fakirleşmesi ile termik verimin yeniden düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir. Termik verimi etkileyen en önemli faktörlerden birisi CA50 açısının gerçekleştiği yerdir. Yüksek termik verim elde edebilmek için CA50 açısının ÜÖN’den 8-10° KA sonra gerçekleşmesi gerektiği literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir [49].

CA50 açısının gerçekleştiği 8-10° KA aralığındaki motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değerlerine karşılık ITE haritası incelendiğinde bu aralıkta termik verimin en yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi, silindir içerisine sürülen yakıtın ne kadarının faydalı işe dönüştürülebildiğinin bir göstergesi olduğundan, motorun termik

verimi ile doğrudan alakalıdır. En düşük BSFC değerinin elde edildiği 12 sıkıştırma oranında, termik veriminde en yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş ITE haritası (lambda 2,3)



Şekil 4.6. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş ITE haritası (sıkıştırma oranı 12)

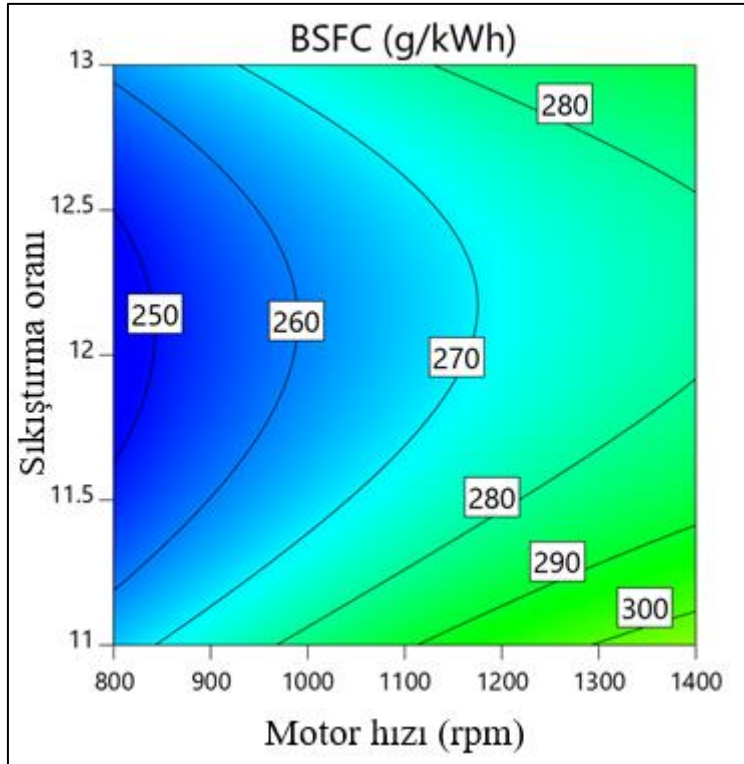
4.4. Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (BSFC)

Şekil 4.7’de BSFC’nin motor hızı ve sıkıştırma oranına bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 4.8’de ise motor hızı ve lambdaya bağlı BSFC değişimi verilmiştir. Motor hızındaki artış ile silindir içine alınan dolgu azalmış ve kendiliğinden tutuşma için verilen avansla gecikme yaşanmıştır. Bu durum BSFC değerinin yükselmesine neden olmuştur. Sıkıştırma oranının artışı ile BSFC değerinde sabit bir artış veya azalış gözlemlenmemiş olup sıkıştırma oranının 12 olması durumunda en düşük BSFC değeri elde edilmiştir. Sıkıştırma oranının artması ile yanma avansında düzensizliğe neden olmuştur.

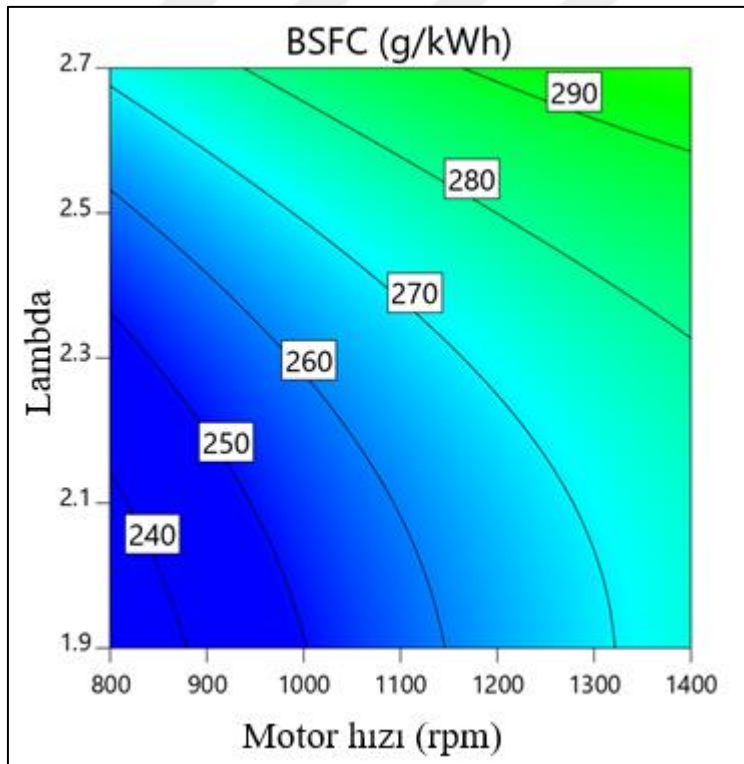
Sıkıştırma oranının azalması ile birlikte HCCI yanmada tutuşmanın başlaması için gerekli basınç ve sıcaklık değerlerine düşük avans değerlerinde ulaşılmıştır. Gerçekleşen bu düzensizlik termik verimde azalmaya bunun paralelinde BSFC değerinde artışa neden olmuştur.

Bu çalışmada lambda değerinin artışı ile BSFC değerinde artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin fakir karışımlarda yanma sonu gaz sıcaklığının azalması neticesinde kendiliğinden tutuşmanın gerçekleşeceği gaz sıcaklıklarına ulaşamaması olduğu düşünülmektedir. Bunun sonucunda yakıtın tamamı yanmaya iştirak edememekte ve BSFC artış göstermektedir.

Özgöl yakıt tüketimi, silindir içerisine sürülen yakıtın ne kadarının faydalı işe dönüştürülebildiğinin bir göstergesi olduğundan, motorun termik verimi ile doğrudan alakalıdır. En düşük BSFC değerinin elde edildiği 12 sıkıştırma oranında, termik veriminde en yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş BSFC haritası (lambda 2,3)



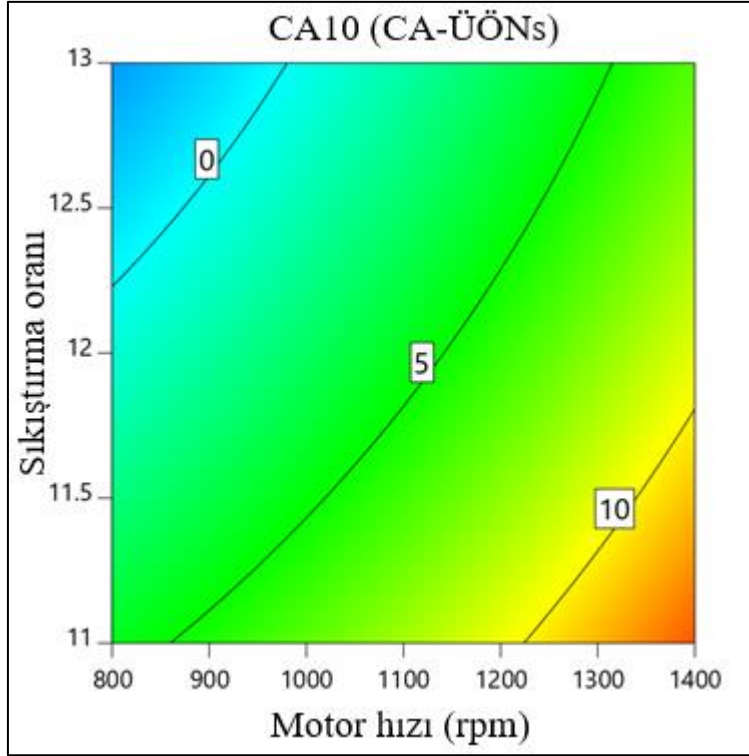
Şekil 4.8. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş BSFC haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.5. CA10

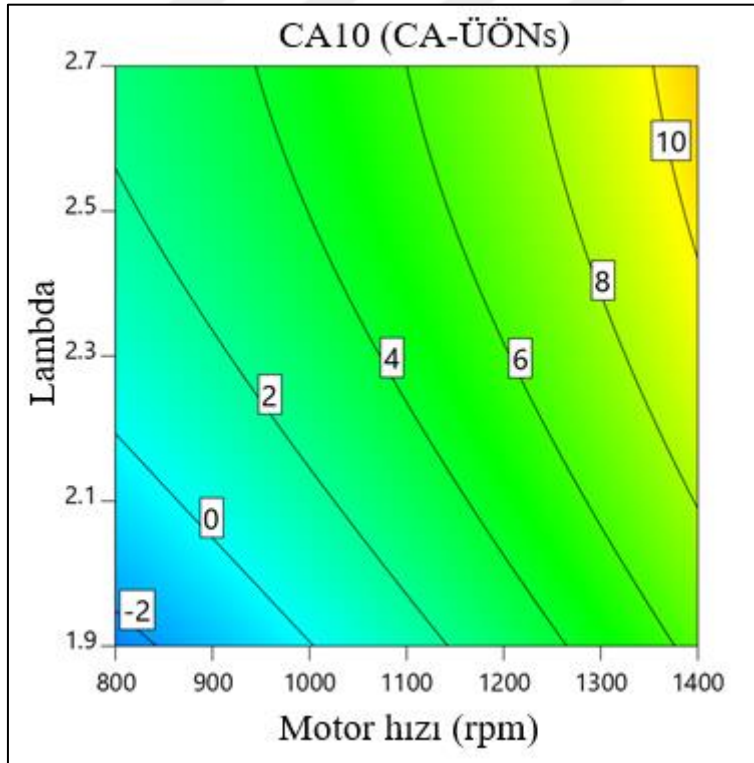
CA10 değeri yanmanın %10'unun gerçekleştiği krank mili açısı olarak tanımlanmaktadır. Bu değer yanma başlangıcı olarak ta kabul edilebilmektedir. CA10 değeri, sıkıştırma oranı, motor hızı ve lambda değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.9 ve 4.10'da CA10 değerlerinin motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambdaya bağlı değişimi gösterilmiştir. Burada verilen CA10 değerleri krank açısı cinsinden üst ölü noktadan sonraki açı değerini ifade etmektedir (CA-ÜÖNs). HCCI motorda yanma olayında kendiliğinden ateşleme sağlanmaktadır. Bu nedenle motor ve dolgu sıcaklık parametreleri önemli etkiye sahiptir. Motor hızındaki artış CA10 değerinin artmasına başka bir ifadeyle yanma başlangıcının gecikmesine neden olmuştur. Yanma başlangıcının ÜÖN'dan çok geç gerçekleşmesi yanma fazının gecikerek motor veriminin düşmesine ve özgül yakıt tüketiminin artmasına da neden olmaktadır. Motor hızı arttıkça silindire alınan dolgunun silindir duvarları tarafından ısıtılarak kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşabilmesi için gerekli olan zaman azaldığından yanma başlangıcı gecikmektedir. Başka bir ifadeyle motor hızı arttıkça dolgunun ısıtılabilmesi için gerekli süre azalmaktadır. Ancak sıkıştırma oranının artmasıyla bunun bir miktar tolere edildiği ve yanma başlangıcının daha erken krank açılarına alındığı görülmektedir.

Sıkıştırma oranının artışı ile CA10 değerinde azalma gözlemlenmiştir. Sıkıştırma oranının artması silindir içi sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklık değerinde artışa neden olmaktadır. Artan sıcaklık değeri yakıt hava karışımı dolgusunun daha kolay tutuşmasına ve yanmanın daha erken başlamasına neden olmuştur.

HCCI motor da yanmanın gerçekleşebilmesi için belirli bir sıcaklığa ulaşılması gerekmektedir. Silindir içine alınan dolgunun fakirleşmesi ile yanma sonu sıcaklığı düşmektedir. Bu durum da lambda değerinin artışı CA10 değerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 4.9. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA10 haritası (lambda 2,3)



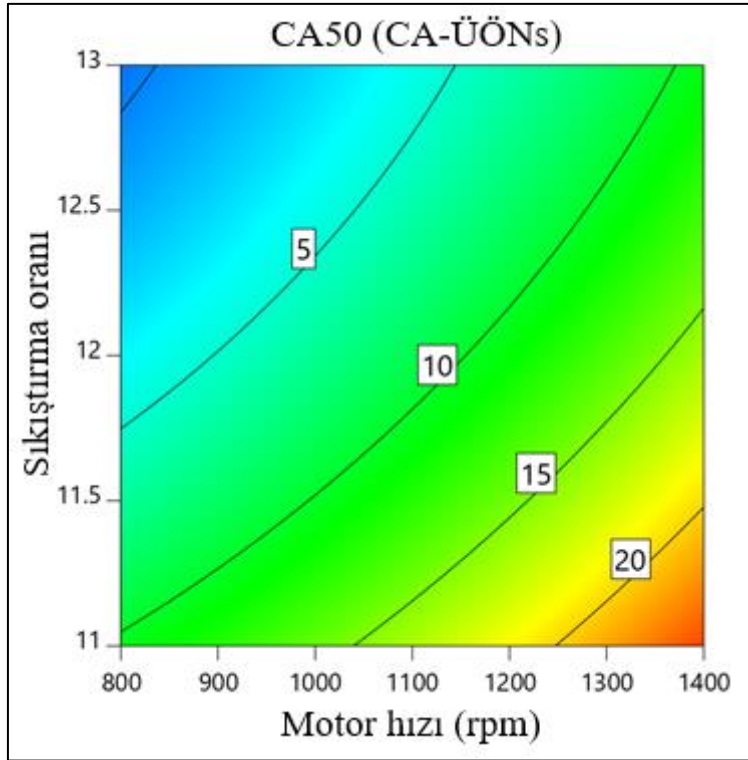
Şekil 4.10. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA10 haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.6. CA50

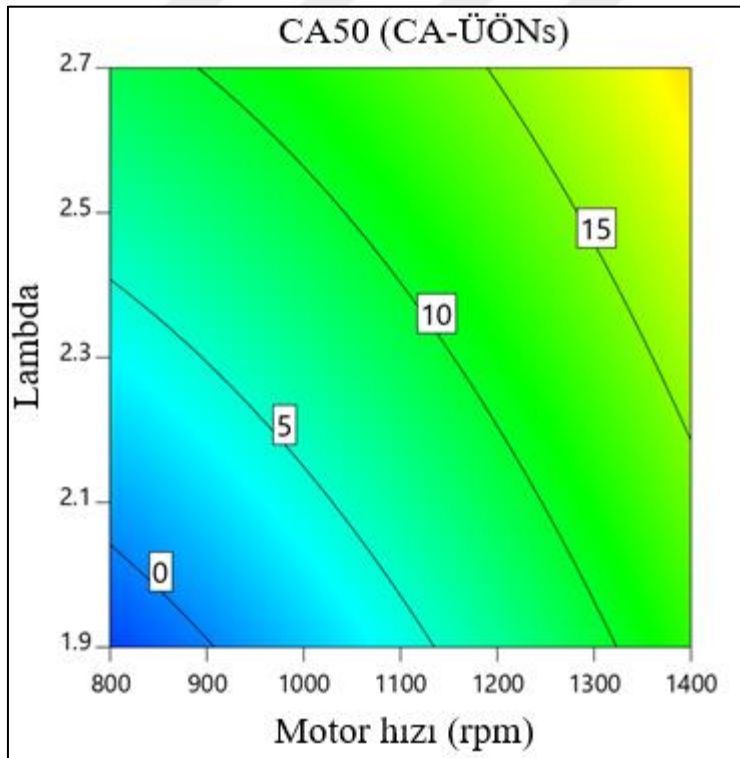
Termik verimi etkileyen en önemli faktörlerden birisi CA50 açısının gerçekleştiği yerdir. Yüksek termik verim elde edebilmek için CA50 açısının ÜÖN'dan 8-10° KA sonra gerçekleşmesi gerektiği literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir [49].

Motor değişken parametrelerine bağlı olarak CA50 değerinde gerçekleşen artış ve azalışlar, CA10 değerinde gerçekleşen değişimle benzer davranışlar sergilemiştir. Şekil 4.11 ve 4.12'de motor hızına bağlı olarak sıkıştırma oranı ve lambdanın CA50 üzerindeki etkileri sırasıyla görülmektedir. Bu iki grafikte verilen CA50 değerleri ÜÖNs krank açısını ifade etmektedir. Motor hızındaki artış CA50 değerinin artmasına neden olmuştur. Sıkıştırma oranının artışı ile tutuşma başlangıcında avans gerçekleşmiş ve CA50 değerinde azalma gözlemlenmiştir. Karışımın zenginleşmesi ile CA50 açısının daha erken krank açılarındaki gerçekleştiği görülmüştür. Karışımın fakirleşmesi sonucunda ise CA50 açısının 15 dereceye kadar arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum motor verimini azaltmakta ve özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır.

CA50 açısının ÜÖN'dan önce oluşması, açığa çıkan ısı enerjisinin ve yüksek basıncın pistonun aksi yönünde bir kuvvet oluşturmaya ve dolayısıyla piston tarafından yapılacak olan net işin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum ise indike termik verimin azalmasını sağlamaktadır. Pistonun ÜÖN'yı aşip genişleme zamanının başladığı krank açılarındaki indike termik verimin maksimum seviyelere ulaştığı görülmüştür. CA50 açısının gerçekleştiği 8-10° KA aralığındaki motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değerlerine karşılık ITE haritası incelendiğinde bu aralıkta termik verimin en yüksek seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA50 haritası (lambda 2,3)

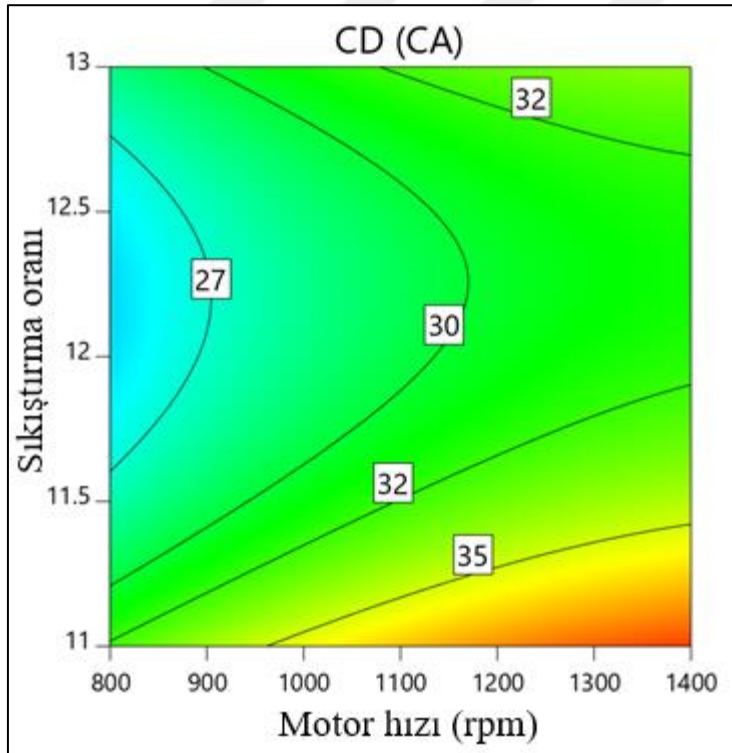


Şekil 4.12. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CA50 haritası (sıkıştırma oranı 12)

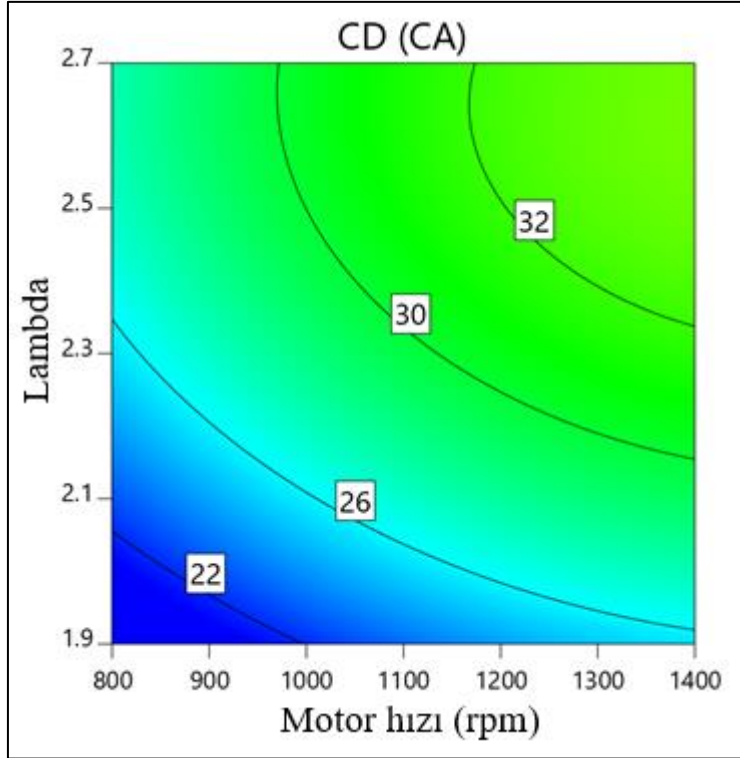
4.7. Yanma Süresi (CD)

Şekil 4.13 ve 4.14 yanma süresinin motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambdaya bağlı değişimini göstermektedir. Motor hızının artması silindir içi basınç değerinde azalma ve buna bağlı olarak sıcaklık değerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum ile birlikte yanma olayı zorlaşarak yanma süresi değerinin artmasına neden olmuştur. Sıkıştırma oranının artışı ile gerçekleşen silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerindeki artış CD değerinde sabit bir artışa veya azalışa sebep olmadığı görülmüştür. Sıkıştırma oranının 12 olması durumunda en düşük CD değeri elde edilmiştir.

Lambda değerinin artması ile yanma süresinin uzadığı gözlemlenmiştir. Hava fazlalık katsayısı arttıkça yanma sonu gaz sıcaklığı azalmakta ve daha uzun süren sürüngen bir yanma görülmektedir. Fakir karışımlarda yanma odasının genelinde silindir içi gaz sıcaklığı azaldığı için kendiliğinden gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları daha geç tamamlanmaktadır.



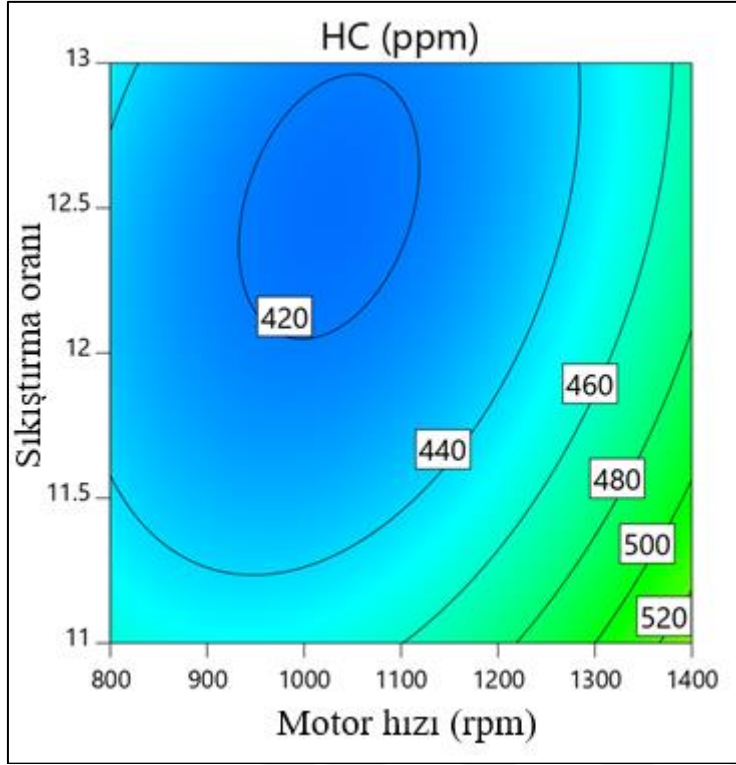
Şekil 4.13. Sıkıştırma ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CD haritası (lambda 2,3)



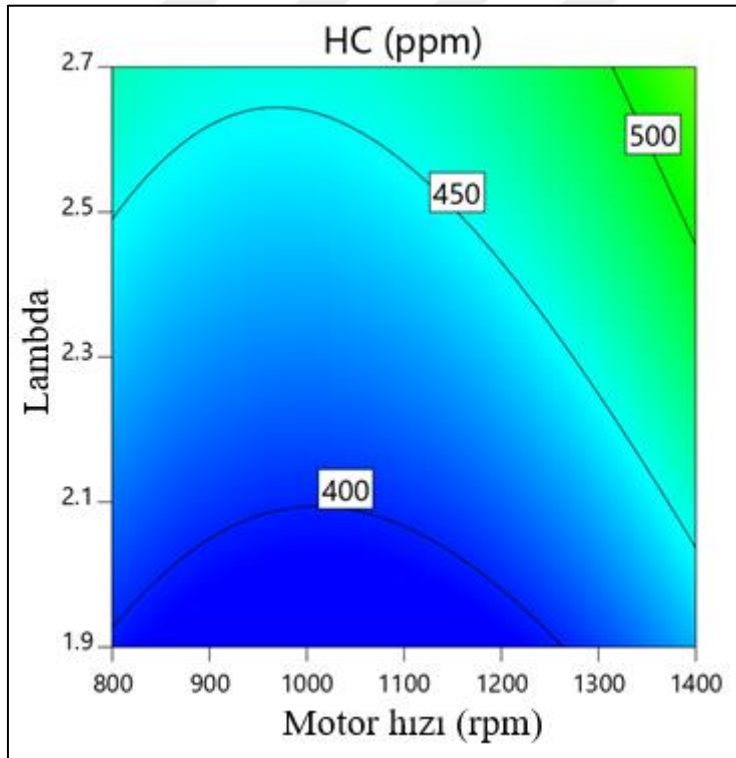
Şekil 4.14. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CD haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.8. Hidrokarbon (HC) Emisyonları

HC emisyonlarının oluşumunun en büyük sebepleri oksijen eksikliği ve yanma sonucu sıcaklığının düşük olmasıdır. Şekil 4.15 ve 4.16'da HC emisyonlarının motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambdaya bağlı değişimi görülmektedir. Motor hızı arttıkça çevrim süresi azalarak silindir içine alınan dolgu miktarında azalma gerçekleşmektedir. Silindir içine alınan dolgunun azalması yanma sonucunda oluşan ısı ve basınç değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte motor hızı arttıkça silindirde kalan art gaz miktarı da artmakta ve yanma reaksiyonu kötüleşmektedir. Bu sebeple motor hızındaki artış HC emisyon değerinin artmasına neden olmuştur. Sıkıştırma oranının artması ile birlikte yanma sonucu açığa çıkan gazların sıcaklığı düşük sıkıştırma oranındaki yanmaya göre daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple sıkıştırma oranı artışı HC emisyon değerinde iyileşmeye neden olmaktadır. Lambda değerinin artışı ile ortalama yanma sonucu sıcaklığında düşüş yaşanmıştır. Buna bağlı olarak HC emisyon değerinde artış gözlemlenmiştir.



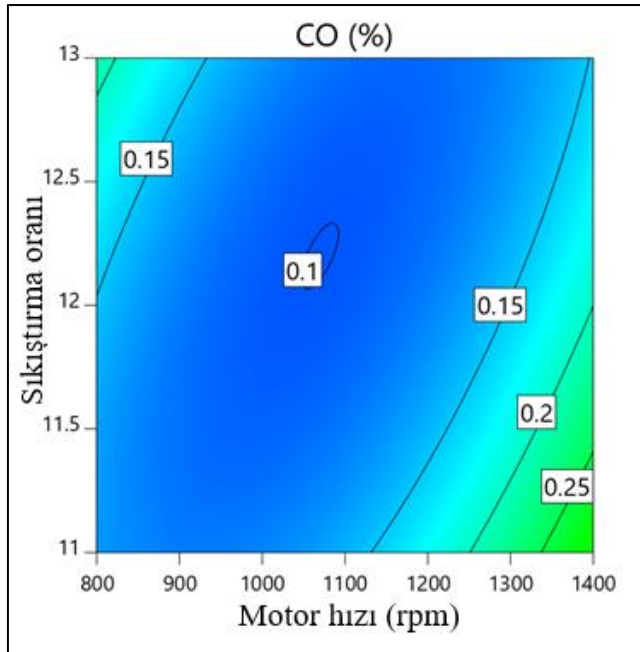
Şekil 4.15. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş HC haritası (lambda 2,3)



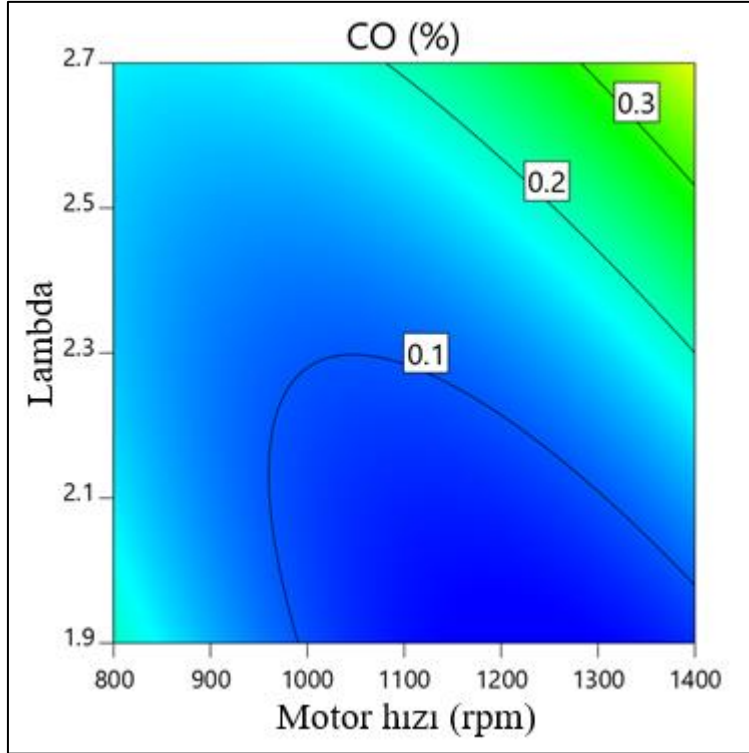
Şekil 4.16. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş HC haritası (sıkıştırma oranı 12)

4.9. Karbonmonoksit (CO) Emisyonları

HCCI motorlarda CO emisyonu silindir içerisinde gerçekleşen yanmanın eksik olması durumunda oluşmaktadır. HCCI yanmada CO emisyonları genellikle yanma sonu gaz sıcaklığı ve kimyasal reaksiyona bağlı değişmektedir. Kimyasal reaksiyonda etkili olan unsur ise silindirde bulunan oksijen konsantrasyonudur. Şekil 4.17’de CO emisyonlarının motor hızı ve sıkıştırma oranına bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.18’de ise motor hızı ve lambdanın CO emisyonları üzerindeki etkileri görülmektedir. Yanma sonu sıcaklığının artması CO emisyonunun iyileşmesine neden olmaktadır. Ancak motor hızı arttıkça silindire alınan dolgunun azalması ve silindirde kalan art gaz miktarının artması yanma sonu sıcaklıklarını düşürmekte ve oksidasyon reaksiyonunun yarım kalmasına neden olmaktadır. Motor hızındaki artış ile beraber yanma sonu sıcaklığının düşmesi CO emisyon değerinin artmasına neden olmuştur. Sabit devirde sıkıştırma oranının artışı ile CO emisyon değerlerinin önemli miktarda değişmediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni aynı devirde silindire alınan oksijen konsantrasyonunun sabit kalmasıdır. Ancak yüksek motor devirlerinde sıkıştırma oranının artmasının yanma sonu sıcaklığını yükseltmesi nedeniyle CO emisyonlarında azalma gerçekleştiği görülmektedir. En düşük CO emisyon değeri %0,1 ile sıkıştırma oranının 12 ve motor hızının 1100 rpm olduğu noktada gerçekleşmiştir. Lambda değerinin artışı CO emisyon değerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 4.17. Sıkıştırma oranı ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CO haritası (lambda 2,3)



Şekil 4.18. Lambda ve motor hızına bağlı YYM yöntemi ile elde edilmiş CO haritası (sıkıştırma oranı 12)

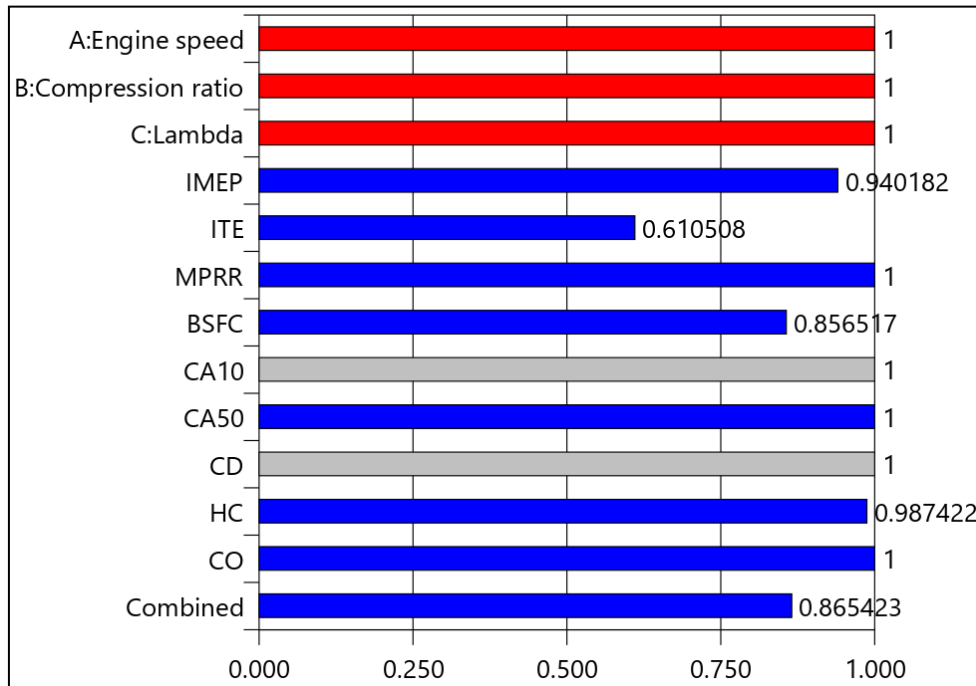
4.10. Optimizasyon Sonuçları

Hedeflenen yanıt parametrelerine ulaşmak için gerekli olan optimum giriş parametre değerleri optimizasyon sonrası belirlenmiştir. Motor hızı, sıkıştırma oranı ve lambda değişken parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri sırasıyla 800-1400 rpm, 11-13 ve 1,9-2,7 olarak istatistiksel tasarımda Çizelge 3.1' de belirlemiştir. Optimizasyon için IMEP değeri maksimum, ITE değeri maksimum, MPFR değeri sınır içerisinde (1-8), BSFC değeri minimum, CA50 değeri sınır içerisinde (7-11) ve emisyon değerleri ise minimum hedeflenecek şekilde belirlenmiştir. CA10 ve CD yanıt parametrelerinin hedeflenen belirli bir değeri olmadığı için optimizasyona dâhil edilmemiştir. Yapılan optimizasyon sonrası değişken parametrelerden motor hızı 981 rpm, sıkıştırma oranı 11 ve lambda değeri 1,9 olarak hesaplanmıştır. Optimizasyon kriterleri ve optimize edilmiş yanıt parametre değerleri Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.4. Optimizasyon Kriterleri Ve Sonuçları

Parametreler	Amaç	Alt Limit	Üst Limit	Optimum Değerler
A: Motor Hızı	Sınır içerisinde	800	1400	981
B: Sıkıştırma Oranı	Sınır içerisinde	11	13	11
C: Lambda	Sınır içerisinde	1,9	2,7	1,9
IMEP (bar)	Maksimum	2,2305	5,0167	4,85
ITE (%)	Maksimum	19,84	39,26	31,696
MPRR (bar/ka)	Sınır İçerisinde (1-8)	1,4257	14,5339	8
BSFC (g/kWh)	Minimum	248,952	337,294	261,628
CA10 (ka)	Yok	-5,04	14,76	3,255
CA50 (ka)	Sınır İçerisinde (7-11)	-3,96	26,28	8,38
CD (ka)	Yok	21,24	40,68	28,156
HC (ppm)	Minimum	393	613	39,767
CO (%)	Minimum	0,0625	0,505	0,948

Desirability değeri yapılan optimizasyonun performans değerlendirmesini yapmak için kullanılmaktadır[52]. Bu değer 1'e yaklaştıkça ideal sonuca doğru ilerlenmektedir [53]. Bu çalışmaya ait parametrelerin ve birleştirilmiş desirability değerleri Şekil 4.10'da görülmektedir. Yanıt parametrelerine ait desirability değerleri incelendiğinde ortalama değerin 0.865423 olduğu görülmektedir. Desirability değerlerinin 1'e yakın olması optimizasyon sonuçlarının hedeflenen değere çok yakın olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4.19. Optimizasyonun Desirability Oranı

4.11. Optimizasyon Sonuçlarının Doğrulanması

YYM ile belirlen optimum yanıt değerlerinin doğrulanabilmesi adına, YYM ile belirlenen optimum giriş parametre değerleri ile deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucunda elde edilen yanıt parametreleri çizelge 4.5.'te YYM ile belirlenen optimum yanıt parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda YYM ile belirlenen optimum yanıt parametreleri ile deney sonucunda tespit edilen yanıt parametrelerin arasındaki hata payı belirlenmiştir. Ortalama hatanın %9 oranında gerçekleştiği ve kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.5. Optimizasyon sonuçları doğrulaması ve hata payı

Parametreler	YYM ile belirlenen optimum yanıt değerleri	Deney sonucunda belirlenen optimum yanıt değerleri	Hata Oranı (%)	Ortalama Hata Oranı (%)
IMEP	4,85	4,82	0,62	9,03
ITE	31,696	38,18	16,98	
MPRR	8	9,27	13,70	
BSFC	261,628	261,516	0,04	
CA10	3,255	3,6	9,58	
CA50	8,38	7,56	10,84	
CD	28,156	27,36	2,90	
HC	395,767	366	8,13	
CO	0,948	0,8	18,5	

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fuzel/n-heptan karışımı yakıt (F30) ile HCCI yanma modunda çalışan bir motorun minimum emisyon ve maksimum performans elde edilmesi amacıyla Desing Expert programı kullanılarak yanıt yüzey metodu (YYM) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. YYM optimizasyonu için gereken girdi parametreleri 3 farklı motor hızı (800, 1100, 1400 rpm), 3 farklı sıkıştırma oranı (11, 12, 13) ve 3 farklı lambda (1,9 – 2,3 – 2,7) değerinde yapılan deneylerden alınmıştır.

Optimizasyon sonucunda optimum girdi parametreleri 981 rpm motor hızı, 1,9 lambda değeri, 11 sıkıştırma oranı olarak hesaplanmıştır. Optimum giriş parametrelerine bağlı olarak elde edilen yanıt parametreleri ise; fren özgül yakıt tüketimi 261,628 g/kWh, indike ortalama efektif basınç 4,85 bar, termal verimlilik %31,696, HC emisyonu 395,767 ppm olarak tespit edilmiştir. Söz konusu girdi parametrelerinin önemi ve etkileşimleri, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. YYM yöntemi ile elde edilen optimum girdi parametre değerleri ile deney yapılarak optimum yanıt parametreleri doğrulaması ve hata payı hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda YYM yöntemiyle geliştirilen tüm çoklu regresyon modellerinin hem motor performansını hem de egzoz emisyonlarını optimize etmek başarılı bir şekilde kullanılabileceği gözlemlenmiştir. YYM ile gerçekleştiren optimizasyon sonuçlarına göre motorun ideal çalışma parametreleri belirlenerek bu parametrelere göre doğrulama deneyi gerçekleştirildiğinde parametrelerin yüksek doğrulukla tahmin edilebildiği belirlenmiştir. Ortalama hatanın %9 oranında gerçekleştiği ve kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

YYM kullanılarak minimum test sayısı ile motor performansı ve emisyondaki değişimlerin başarılı bir şekilde tahmin edebildiği ortaya konmuştur. Farklı yakıt oranları ve farklı yakıt tipleri için YYM yöntemi ile optimizasyon çalışması yapılarak en uygun alternatif yakıt tipi ve karışım oranları belirlenebilir. Özellikle HCCI gibi alternatif düşük sıcaklık yanma modlarında yanma kontrolü rijit olarak gerçekleştirilemediği için motorun optimum çalışma bölgesinin belirlenmesi için çok fazla sayıda deney gerçekleştirilerek çalışma haritalarının çıkartılması gerekmektedir. YYM ile bu deney sayıları azaltılarak zamanda ve maliyetlerde tasarruf elde edilebilir.



KAYNAKLAR

1. Cinar, C., Ozer, C., Sahin, F. and Yucesu, H.S. (2010). Effects of premixed diethyl ether (DEE) on combustion and exhaust emissions in a HCCI-DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 360-365.
2. Özer, C. (2012). *Bir DI dizel motorda etanol ön karışımli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyonlar üzerine etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-3, 9-10.
3. Ma, J., Lü, X., Ji, L. and Huang, Z. (2008). An experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(9), 1235-142.
4. Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., and Kato, S. (1979). Active Thermo-Atmospheric Combustion (ATAC)--A New Combustion Process for Internal Combustion Engines, *SAE Transactions*, 790501, 1851-1860.
5. Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., and Takeuchi, Y. (1979). A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. *SAE Transactions*, 790840, 2816-2828.
6. Najt, P. M., and Foster, D. E. (1983). Compression-ignited homogeneous charge combustion. *SAE Transactions*, 830264, 964-979.
7. Polat, S. (2015). *HCCI bir motorda çalışma parametrelerinin yanmaya etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-16.
8. Johansson, B. (2007). Homogeneous charge compression ignition: the future of IC engines. *International Journal of Vehicle Design*, 44(1/2), 1-19.
9. Zhao, H. (2007). *HCCI and CAI Engines For The Automotive Industry*. England: Woodhead Publishing Limited, 19-509.
10. Munoz, R. V. (2006). *The Performance Of a Dual Fuel HCCI Engine*, Master Thesis, Department of Energy Science Lund Institute of Technology, Lund, 8-64.
11. Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., and Ma, T. (2001). Experimental studies on controlled auto-ignition (CAI) combustion of gasoline in a 4-stroke engine. *SAE Transactions*, 1062-1075.
12. Stanglmaier, R. H., Li, J., and Matthews, R. D. (1999). The effect of in-cylinder wall wetting location on the HC emissions from SI engines. *SAE transactions*, 533-542.
13. Baumgarter, C. (2006). *Mixture formation in internal combustion engines*. Berlin: Springer, 253-278.

14. Ikemoto, M., Kojima, Y., and Iida, N. (2005). *Development of the control system using EGR for the HCCI engine running on DME* (No. 2005-32-0062). SAE Technical Paper.
15. Sun, Y., Shuai, S. J., Wang, J. X., and Wang, Y. J. (2003). *Numerical simulation of mixture formation and combustion of gasoline engines with multi-stage direct injection compression ignition (DICI)* (No. 2003-01-1091). SAE Technical Paper.
16. Maurya, R. K., Agarwal, A. K. (2011). Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogenous charge compression ignition (HCCI) combustion engine. *Applied Energy*, 88, 1169-1180.
17. Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., and Takeuchi, Y. (1979). A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. *SAE Transactions*, 2816-2828.
18. Pedersen, T. D., and Schramm, J. (2007). *A study on the effects of compression ratio, engine speed and equivalence ratio on HCCI combustion of DME* (No. 2007-01-1860). SAE Technical Paper.
19. Aichlmayr, H. T., Kittelson, D. B. and Zachariah, M. R. (2002). Miniature free-piston homogeneous charge compression ignition engine-compressor concept-Part II modeling HCCI combustion in small scales with detailed homogeneous gas phase chemical kinetics. *Chemical Engineering Science*, 57(19), 4173-4186.
20. Machrafi, H., and Cavadiasa, S. (2008). An experimental and numerical analysis of the influence of the inlet temperature, equivalence ratio and compression ratio on the HCCI auto-ignition process of primary reference fuels in an engine. *Fuel Processing Technology*, 89(11), 1218-1226.
21. Dec, J. E. (2002). *A computational study of the effects of low fuel loading and EGR on heat release rates and combustion limits in HCCI engines* (No. 2002-01-1309). SAE Technical paper.
22. Thring, R. H. (1989). *Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines*. Society of Automotive Engineering, Paper No: 892068.
23. Zhao, H. (2007). *HCCI and CAI Engines For The Automotive Industry*. England: Woodhead Publishing Limited, 19-509.
24. Machrafi, H., and Cavadias, S. (2008). Three-stage autoignition of gasoline in an HCCI engine: An experimental and chemical kinetic modeling investigation. *Combustion and Flame*, 155, 557-570.
25. Yücesu, H. S., (1991). *Doğalgazın benzin motorlarında kullanımı amaca uygun gaz karıştırıcının tasarımı ve imalatı*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-13.
26. Bayka, D. (2007). *Doğalgazın taşıtlarda yakıt olarak kullanımı*. III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, Ankara, 9-11.

27. Akyaz, S. (2007). *Benzin-tersiyer bütül alkol ve benzin-naftalin karışımlarının buji ateşlemeli motorun performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 8-16.
28. Koca, A. (2007). Yenilenebilir Bir Enerji Kaynağı: Biyogaz. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 5(3), 32-35.
29. Ciniviz, M., Haşımoğlu, C., ve Uçar, G., (2002). Günümüzde içten yanmalı motorlarda hidrojen yakıtının kullanılması, *Selçuk Üniversitesi On-Line Dergisi*, 1(3), 1-9.
30. Kim, Y. T. Kim, J. M., Lee, J. T., and Lee, S. Y. (1992). A study on developing the hydrogen fueled engine of the direct injection method, *KHES*, 1-15.
31. Jorach, R. Enderle, C., Decker, R., (1997). Development of low-NO_x truck hydrogen engine with high specific power output, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22, 423-427.
32. Topgül, T. (2006). *Buji ile ateşlemeli motorlarda etil alkol-benzin karışımı kullanımında optimum çalışma parametrelerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-44.
33. Welsh, F. W. (1989). Williams, R.E., Lipase mediated production of flavor and fragrance esters from fusel oil, *Journal of Food Science*, 54:1565-1568
34. Güvenç, A., Aydoğan, Ö., Kapucu, N., Mehmetoğlu, Ü., (2007). Fuzel yağından izoamil asetat üretimi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(4), 801-808.
35. Chun-hua, Z., Jiang-ru, P., Juan-Juan, T. and Jing, L. (2011). Effects Of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient On Combustion Characteristics and Emissions Of HCCI Combustion, *Procedia Environmental Sciences*, 11, 1119-1127.
36. Abdel-Rahman, A. A., Osman, M. M., (1997). Experimental investigation on varying the compression ratio of SI engine working under different ethanol-gasoline fuel blends, *International Journal of Energy Research*, 21, 31-40.
37. Wu, C. W. Chen, R. H., Qu, J. Y. and Lin, T. H., (2003). The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanolgasoline blended fuels, *Atmospheric Environment*, 38, 7093-7100.
38. Calam, A. (2010). *Fuzel Yağının Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Yakıt Karışımı Olarak Kullanılmasının Motor Performansı ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
39. Fang, W., Kittelson, D. B., and Northrop, W. F. (2015). Optimization of reactivity-controlled compression ignition combustion fueled with diesel and hydrous ethanol using response surface methodology. *Fuel*, 160, 446-457.

40. Babagiray, M., Kocakulak, T., Ardebili, S. M. S., Solmaz, H., Çınar, C., and Uyumaz, A. (2022). Experimental and statistical investigation of different valve lifts on HCCI combustion, performance and exhaust emissions using response surface method. *Energy*, 244, 123184.
41. Yaman, H., Yeşilyurt, M. K., Uslu, S. (2021). Buji Ateşlemeli Bir Motorda Yüksek Performans ve Düşük Emisyon Elde Etmek Amacıyla Kullanılacak Optimum Metanol Oranının Cevap Yüzey Metodu ile Belirlenmesi, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(3), 346-358.
42. Awad, O. I., Mamat, R., Ali, O. M., Azmi, W. H., Kadirgama, K., Yusri, I. M., Yusaf, T. (2017). Response surface methodology (RSM) based multi-objective optimization of fusel oil -gasoline blends at different water content in SI engine. *Energy Conversion and Management*, 150, 222–241.
43. Solmaz, H., (2015). Combustion, performance and emission characteristics of fusel oil in a spark ignition engine. *Fuel Processing Technology*, 133, 20-28.
44. Solmaz, H., (2020). A comparative study on the usage of fusel oil and reference fuels in an HCCI engine at different compression ratios. *Fuel*, 273, 117775.
45. Singh, D. K., and Tirkey, J. V. (2022). Performance optimization through response surface methodology of an integrated coal gasification and CI engine fuelled with diesel and low-grade coal-based producer gas. *Energy*, 238, 121982.
46. William, J. H. and William, G. H. (1966). A Review of Response Surface Methodology. *Technometrics* , 8(4), 571-590.
47. Singh, Y., Sharma, A., Tiwari, S., and Singla, A. (2019). Optimization of diesel engine performance and emission parameters employing cassia tora methyl esters-response surface methodology approach. *Energy*, 168, 909-918.
48. Sharma, P., and Sharma, A. K. (2021). Application of response surface methodology for optimization of fuel injection parameters of a dual fuel engine fuelled with producer gas-biodiesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.
49. Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engines fundamentals* (First edition). New York: McGraw-Hill, 503-506.
50. Atkins, R. D. (2009). *An introduction to engine testing and development* (First edition). USA: Society of Automotive Engineering International, 177-179, 182-185.
51. Uyumaz, A. (2014). *Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli bir benzin motorunda supap kalkma miktarının yanma ve performans etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 99-104, 120-121, 127-166.
52. Pereira, L. M. S., Milan, T. M., and Tapia-Blácido, D. R. (2021). Using Response Surface Methodology (RSM) to optimize 2G bioethanol production: A review. *Biomass and Bioenergy*, 151, 106166.

53. Manimaran, R., Mohanraj, T., Venkatesan, M., Ganesan, R., and Balasubramanian, D. (2022). A computational technique for prediction and optimization of VCR engine performance and emission parameters fuelled with *Trichosanthes cucumerina* biodiesel using RSM with desirability function approach. *Energy*, 124293.







Gazili olmak ayrıcalıktır