

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİSMİ YALITILMIŞ BİR BUJİ ATEŞLEMELİ
MOTORDA BUHAR ENJEKSİYONU ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İdris CESUR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adnan PARLAK
Ortak Danışman : Prof. Dr. İsmet ÇEVİK

Ocak 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİSMİ YALITILMIŞ BİR BUJİ ATEŞLEMELİ
MOTORDA BUHAR ENJEKSİYONU ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İDRİS CESUR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Bu tez 29/01 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



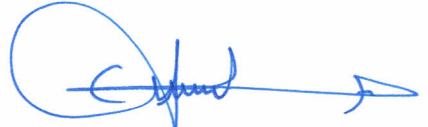
Prof. Dr. Adnan PARLAK

Jüri Başkanı



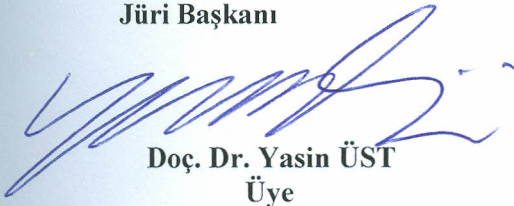
Doç. Dr. Halit YAŞAR

Üye



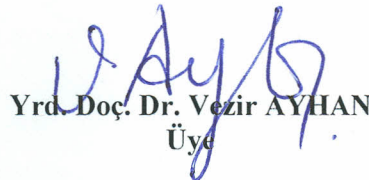
Doç. Dr. Cengiz DENİZ

Üye



Doç. Dr. Yasin ÜST

Üye



Yrd. Doç. Dr. Vezir AYHAN

Üye

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince çalışmalarımı teşvik eden, her türlü yardımlarını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Adnan PARLAK' a minnet borçluyum. Elektronik Buhar Püskürtme Sistemi' nin geliştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Barış BORU' ya, deneyler sırasında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Vezir AYHAN' a ve teorik modelin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Güven GONCA' ya teşekkür ederim. Pistonların seramik malzeme ile kaplama işlemini gerçekleştiren SENKRON makine teşekkür ederim. Tez çalışmam, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü tarafından “2012-05-04-012”, “2010-05-04-008” ve “2010-50-02-014” numaralı projeler ile desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı SAKARYA BAPK' a teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

İdris CESUR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. İçten Yanmalı Motorlarda Seramik Kaplama Uygulamaları.....	4
1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Su-Buhar Uygulamaları.....	9
BÖLÜM 2.	
BENZİN MOTORLARINDA KİRLETİCİ EMİSYONLAR.....	16
2.1. Benzin Motorlarında Kirletici Emisyonlar.....	16
2.1.1. Hidrokarbon emisyonları.....	17
2.1.2. Karbon monoksit emisyonları.....	18
2.1.3. Azot oksit emisyonları.....	19
2.1.4. Karbondioksit emisyonları.....	20
2.2. Motor Çalışma Karakteristikleri ve Yapısal Özelliklerin Emisyonlara Etkisi.....	20
2.2.1. Hava fazlalık katsayısı.....	20
2.2.2. Ateşleme avansı.....	22
2.2.3. Devir sayısı.....	22
2.2.4. Egzoz karşı basıncı.....	23

2.2.5. Supap bindirmesi.....	23
2.2.6. Emme manifoldu basıncı.....	24
2.2.7. Yanma odası yüzey sıcaklıkları.....	24
2.2.8. Havadaki nem oranı.....	25
2.2.9. Supap zamanlaması.....	25
2.2.10. Yanma odası yüzey / hacim oranı.....	26
2.2.11. Sıkıştırma oranı.....	26
2.2.12. Yanma odası şekli.....	26
2.3. Buji Ateşlemeli Motorlarda Kirletici Emisyonlar İçin Alınan Önlemler.....	27
2.3.1. Seramik kaplama yöntemi.....	27
2.3.2. Motora su-buhar gönderilmesi.....	29
2.3.3. Alternatif yakıt kullanımı.....	32
BÖLÜM 3.	
TEORİK MODEL.....	33
3.1. Döndürme Momenti ve Efektif Güç.....	44
3.2. Özgül Yakıt Sarfıyatı.....	46
3.3. Efektif Verim.....	47
3.4. NO Emisyonu.....	48
3.5. Silindir Basıncı.....	49
3.6. Net Isı Yayılmı.....	50
3.7. Silindir İçi Sıcaklık.....	51
BÖLÜM 4.	
MATERYAL VE METOD.....	52
4.1. Elektronik Kontrollü Buhar Püskürtme Sistemi.....	52
4.1.1. Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi tasarımı.....	52
4.1.2. Enjektör parametrelerinin tespiti.....	57
4.1.3. Deney motorunun EKBPS için revizyonu.....	62
4.2. Plazma Kaplama Sistemi.....	63
4.3. Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarının Belirlenmesi.....	66
4.3.1. Araştırmada kullanılan ölçme donanımları.....	66

4.3.1.1. Deney düzeneği.....	66
4.3.1.2. Deney motoru.....	67
4.3.1.3. Dinamometre.....	68
4.3.1.4. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi.....	69
4.3.1.5. Hava debisinin ölçümü.....	71
4.3.1.6. Sıcaklık ölçümleri.....	72
4.3.1.7. Emisyon ölçümü.....	73
4.3.1.8. Motor hızı ölçümü.....	73
4.4. Egzoz Enerjisinden Buhar Üretimi İçin Yapılan İşlemler.....	74
4.4.1. Atık ısı kazanı	74
4.4.2. Motor emme hattına buhar enjektörünün konumlandırılması.	74
4.5. Silindir Basıncının Ölçülmesi.....	75
4.6. Deney Yöntemi.....	77
4.7. Belirsizlik analizi.....	79
4.8. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller.....	82
4.8.1. Döndürme momenti ve efektif güç.....	82
4.8.2. Efektif verim.....	83
4.8.3. Ortalama efektif basınç.....	83
4.8.4. Özgül yakıt sarfiyatı.....	84
4.8.5. Hava debisi ölçümü.....	84

BÖLÜM 5.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	85
5.1. Buhar Enjeksiyonu ve TBC Kaplamanın Motor Performans ve Egzoz Emisyonlara Etkisi.....	85
5.1.1. Buhar enjeksiyonu ve TBC kaplamanın optimum çalışma koşullarını ki kare testi ile tespiti.....	85
5.1.2. Farklı TBC kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun motor performansına etkileri.....	87
5.1.2.1. Buhar püskürtmenin döndürme momenti üzerine etkisi.....	87
5.1.2.2. Buhar püskürtmenin efektif güç üzerine etkisi.....	91

5.1.2.3. Buhar püskürtmenin özgül yakıt sarfiyatı üzerine etkisi.....	95
5.1.2.4. Buhar püskürtmenin efektif verim üzerine etkisi.....	99
5.1.2.5. Buhar püskürtmenin egzoz gaz sıcaklığı üzerine etkisi.....	103
5.1.2.6. Buhar püskürtmenin volümetrik verim üzerine etkisi	104
5.1.3. Farklı TBÇ kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun silindir basıncı ve sıcaklık değişimine etkisi.....	105
5.1.4. Farklı TBÇ kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun emisyon karakteristikleri üzerine etkisi.....	110
5.1.4.1. Buhar püskürtmenin NO _x emisyonları üzerine etkisi.....	110
5.1.4.2. Buhar püskürtmenin HC emisyonu üzerine etkisi.....	114
5.1.4.3. Buhar püskürtmenin CO emisyonu üzerine etkisi.....	119
5.1.4.4. Buhar püskürtmenin CO ₂ emisyonu üzerine etkisi...	121
5.2. TBÇ Kaplı Motorda Yakıt Olarak Alkol+Benzin Karışımlarının Kullanılması ve Bu Yakıtlara Buhar Enjeksiyonunun Motor Performans ve Egzoz Emisyonları Üzerine Etkisi.....	123
BÖLÜM 6.	
GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	136
KAYNAKLAR.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	160

SİMGELER VE KISALTMALAR

A_x	: Sistematik belirsizliklerin toplamı
A_b	: Yanmış gazlar için silindir ısı transfer alanı
A_u	: Yanmamış gazlar için silindir ısı transfer alanı
a_y	: Viebe katsayısı
B	: Silindir çapı, m
B_x	: Rastgele belirsizlik
b_e	: Özgül yakıt sarfiyatı, g/kWh
$C_{p,b}, C_{p,u}$: Yanmış ve yanmamış bölgedeki gazların özgül ısıları
CO	: Karbon monoksit
CO_2	: Karbondioksit
d_H	: Orifis çapı, mm
F	: Fren terazi kuvveti, kg
h_b, h_u	: Yanmış ve yanmamış bölgedeki gazların özgül entalpileri
h_{tr}	: Isı transfer katsayısıdır
h_1	: Kaçak dolgu entalpisi
H_s	: Zaman aralığının başlangıcı
H_c	: Zaman aralığının sonu
HC	: Hidrokarbon
H_2O	: Su buharı
H_u	: Yakıtın alt ısıl değeri, kJ/kg
$K\%$: Buhar kütlelerinin toplam yakıt külesine oranı
i	: Devirdeki çevrim sayısı
L	: Moment kolu uzunluğu, m
M_y	: Yakıtın moleküler ağırlığı
M_b	: Buharın moleküler ağırlığı

M_d	: Döndürme momenti, Nm
m_y	: Yakıt kütlesi
m_h	: Hava kütlesi
m_a	: Viebe katsayısı
$m_{buhar,1-derece}$: Enjektörün bir derecede püskürttüğü buhar miktarı, mg
n	: Motor devri, d/d
N	: Tekrarlı ölçmelerin sayısı
N_2	: Azot
NO_x	: Azot oksit
O_2	: Oksijen
P_{me}	: Ortalama efektif basınç
\bar{P}	: Ortalama basınç
P_i	: İndike güç, kW
p_{mi}	: Ortalama indike basınç
P_e	: Efektif güç, kW
R	: Direnç, ohm
h	: Stroke boyu, m
\bar{S}_p	: Ortalama piston hızı, m/s
SO_2	: Kükürt dioksit
T_b	: Yanmış bölge sıcaklığı, K
T_u	: Yanmamış bölge sıcaklığı, K
T_w	: Silindir cidar sıcaklığı, K
$\pm t_{v,99} S_{\bar{x}}$: Ölçümün ortalamasındaki rasgele belirsizlik
t_a	: Enjektör açılma gecikmesi zamanı, ms
t_k	: Enjektör kapanma gecikmesi zamanı, ms
t_s	: Enjektöre uygulanan sinyal süresi, ms
t_p	: Enjektör püskürtme süresi, ms
$t_{1-derece}$: Motorun 1 dereceyi alma zamanı, ms
t	: Serbestlik derecesi
u_R	: Toplam belirsizlik
U	: Giren havanın hızı, m/s

v_b, v_u	: Yanmış ve yanmamış bölgedeki gazların özgül hacimleri
V_H	: Toplam silindir hacmi, m ³
V_c	: Ölü hacim
W_e	: Bir çevrimdeki iş
x	: Yanma kesri
y	: Püskürtülen buharın mol kesri
z	: Silindir sayısı
λ	: Hava fazlalık katsayısı
η_v	: Volümetrik verim
η_e	: Efektif verim
ΔV	: Tüketilen yakıt hacmi
Δ_h	: Yanma entalpisi
Δt	: Yakıt tüketme süresi, s
Δh_H	: Manometredeki akışkan yüksekliği, mmSS
ε	: Krank yarıçapının biyel uzunluğuna oranı
$\Gamma(n)$: Gamma fonksiyonu
γ	: Özgül ısılar oranı
τ	: Zaman sabiti
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
AÖN	: Alt ölü nokta
ADC	: Analog-dijital çevirici
BPO	: Buhar püskürtme oranı
BO	: Buhar oranı
CaO-ZrO ₂	: Kalsiyum oksit zirkonyum dioksit
CaZrO ₃	: Kalsiyum zirkonyum tetraoksit
DAQ	: Data Acquisition Card
EKBPS	: Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi
EGR	: Egzoz gazı resürkilasyonu
E15	: %85 Benzin+%15 Etanol karışımlı yakıt
H/Y	: Hava-yakıt oranı
KMA	: Krank mili açısı
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı

MgO-ZrO ₂	: Magnezyum oksit zirkonyum dioksit
M15	: % 85 Benzin+% 15 Metanol karışimli yakıt
NiCrAl	: Nikel krom alüminyum
PSZ	: Kısmi stabilize zirkonyum
PM	: Partikül madde
Pb	: Kurşun bileşigi
ÖYS	: Özgül yakıt sarfiyatı
STD	: Standart motor
SCR	: Seçici katalitik dönüştürücü
TBÇ	: Termal bariyer çember
ÜÖN	: Üst ölü nokta
YSZ	: Yitriya stabilize zirkonyum
Y ₂ O ₃	: Yitrium oksit
ZrO ₂	: Zirkonyum oksit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Eşdeğerlik oranının egzoz gazları emisyonu üzerine etkisi.....	21
Şekil 2.2.	Buji ateşlemeli motorlarda STD ve kaplamalı duruma göre piston üst yüzey sıcaklık dağılımı	28
Şekil 2.3.	Motor yükü ve su oranına bağlı olarak efektif verimdeki değişim.....	29
Şekil 3.1.	Döndürme momenti değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	44
Şekil 3.2.	Efektif güç değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	45
Şekil 3.3.	Özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	46
Şekil 3.4.	Efektif verim değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	47
Şekil 3.5.	NO emisyon değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	48
Şekil 3.6.	Silindir basınç değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	49
Şekil 3.7.	Net ısı yayılımı değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	50
Şekil 3.8.	Silindir içi sıcaklık değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.1.	EKBPS'ye ait blok diyagram.....	53
Şekil 4.2.	EKBPS'yi kontrol etmek amacıyla tasarlanan ara yüz.....	53
Şekil 4.3.	EKBPS'de kullanılan mikro denetleyici ve kontrol devresini içeren kutu.....	54

Şekil 4.4.	EKBPS'nin bir çevriminde gerçekleşen aşamalar.....	56
Şekil 4.5.	Enjeksiyon sinyali (ti) ve püskürtülen yakıt miktarı ölçümü.....	58
Şekil 4.6.	Enjektör parametre tespiti için hazırlanan ara yüz.....	58
Şekil 4.7.	İki farklı enjektör için elde edilen enjektör parametreleri.....	59
Şekil 4.8.	Farklı yakıt hattı basınçları için enjektör parametre değişimi.....	60
Şekil 4.9.	Yakıt enjektörünün RL devresi olarak ifadesi ve bobin akımının zamana göre değişimi.....	60
Şekil 4.10.	2V-2R için RL devresi ve yeni doruk için bobin akımının zamana göre değişimi.....	61
Şekil 4.11.	Standart ve 24V, 2R durumlarındaki enjektör parametre grafiği...	62
Şekil 4.12.	Devir ve açı ölçer (Enkoder).....	63
Şekil 4.13.	Gaz kolu konum sensörü.....	63
Şekil 4.14.	Seramik kaplamalı pistonun görünüşü.....	65
Şekil 4.15.	Deney düzeneği.....	66
Şekil 4.16.	Test düzeneğinin şematik görünümü.....	67
Şekil 4.17.	Deney motoru.....	68
Şekil 4.18.	Deneylerde kullanılan dinamometre ve loadcell.....	69
Şekil 4.19.	Deneylerde kullanılan hassas terazi.....	70
Şekil 4.20.	Anlık yakıt tüketim miktarı tespiti için tasarlanan blok diyagram..	70
Şekil 4.21.	Labview programında anlık yakıt tüketim bilgisini gösteren ara yüz görünümü	71
Şekil 4.22.	Hava debi ölçüm düzeneği.....	72
Şekil 4.23.	Sıcaklık ölçüm düzeneği.....	72
Şekil 4.24.	Emisyon ölçüm cihazı.....	73
Şekil 4.25.	Devir ölçer.....	73
Şekil 4.26.	Atık ısı kazanı ve üzerindeki ekipmanlar.....	74
Şekil 4.27.	Emme manifolduna açılmış enjektör yuvası ve enjektör yuvasına takılmış buhar enjektörü.....	75
Şekil 4.28.	Silindir basınç ölçüm düzeneği.....	76
Şekil 4.29.	Silindir basınç ölçüm düzeneğindeki enkoder bağlantısı.....	76
Şekil 5.1.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak döndürme momentindeki değişim.....	87

Şekil 5.2.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak momentin STD duruma göre değişimi.....	88
Şekil 5.3.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak momentteki değişim.....	90
Şekil 5.4.	Döndürme momenti için faktörlerin ortalama değerleri.....	91
Şekil 5.5.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim.....	92
Şekil 5.6.	Püskürtülen buhar oranına bağlı efektif gücün STD duruma göre değişimi.....	92
Şekil 5.7.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim.....	94
Şekil 5.8.	Efektif güç için faktörlerin ortalama değerleri.....	94
Şekil 5.9.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak ÖYS' deki değişim..	95
Şekil 5.10.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak ÖYS' nin STD duruma göre değişimi.....	96
Şekil 5.11.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ÖYS' deki değişim.....	98
Şekil 5.12.	Özgül yakıt sarfiyatı için faktörlerin ortalama değerleri.....	99
Şekil 5.13.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif verimdeki değişim.....	100
Şekil 5.14.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak efektif verimin STD duruma göre değişimi.....	100
Şekil 5.15.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak Efektif Verimdeki değişim.....	102
Şekil 5.16.	Efektif verim için faktörlerin ortalama değerleri.....	103
Şekil 5.17.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığındaki değişim.....	104
Şekil 5.18.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak volümetrik verimdeki değişim.....	105
Şekil 5.19.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi.....	106
Şekil 5.20.	8mm genişliğinde MgO-ZrO ₂ TBC kaplı pistonda buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi.....	108

Şekil 5.21.	8mm genişliğinde Y_2O_3 TBC kaplı pistonda buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi.....	109
Şekil 5.22.	Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak NO_x emisyonundaki değişim.....	110
Şekil 5.23.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak NO_x ' in STD duruma göre değişimi.....	111
Şekil 5.24.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak NO_x emisyonlarındaki değişim.....	113
Şekil 5.25.	NO_x emisyonları için faktörlerin ortalama değerleri.....	114
Şekil 5.26.	STD ve farklı TBC kaplı pistonlarda soğuk ilk hareket HC emisyonlarındaki değişim.....	115
Şekil 5.27.	Motor devri ve buhar oranına bağlı olarak ölçülen HC değerlerindeki değişimler.....	116
Şekil 5.28.	Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak HC' nin STD duruma göre değişimi.....	116
Şekil 5.29.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim.....	118
Şekil 5.30.	HC emisyonu için faktörlerin ortalama değerleri.....	119
Şekil 5.31.	Buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ölçülen CO değerlerindeki değişimler.....	120
Şekil 5.32.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak CO emisyonundaki değişim.....	120
Şekil 5.33.	CO emisyonu için faktörlerin ortalama değerleri.....	121
Şekil 5.34.	Buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ölçülen CO_2 değerlerindeki değişimler.....	122
Şekil 5.35.	Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak CO_2 emisyonundaki değişim.....	122
Şekil 5.36.	CO_2 emisyonu için faktörlerin ortalama değerleri.....	123
Şekil 5.37.	M15 yakıtlı ve TBC kaplı motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonunun etkileri.....	124
Şekil 5.38.	Farklı yakıtlı TBC kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak momentteki değişim.....	126

Şekil 5.39.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim.....	127
Şekil 5.40.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak ÖYS' deki değişim.....	129
Şekil 5.41.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak efektif verimdeki değişim.....	130
Şekil 5.42.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak NO _x emisyonundaki değişim.....	132
Şekil 5.43.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim.....	133
Şekil 5.44.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak CO emisyonundaki değişim.....	134
Şekil 5.45.	Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak CO ₂ emisyonundaki değişim.....	135

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Dizel motoruna seramik kaplama uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması	5
Tablo 1.2.	Buji ateşlemeli motora seramik kaplama uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması	8
Tablo 1.3.	Dizel motoruna su-buhar uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması	11
Tablo 1.4.	Buji ateşlemeli motora su-buhar uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması	13
Tablo 4.1.	Deney motorunun teknik özellikleri.....	67
Tablo 4.2.	Basınç sensörü ve şarf amplifikatörün teknik özellikleri.....	77
Tablo 4.3.	Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları.....	78
Tablo 4.4.	Deney yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	79
Tablo 4.5.	Deneysel bulguların atılması için Chauvenet kriteri.....	81
Tablo 4.6.	Sistematik ve rastgele hatalara göre hesaplanmış toplam belirsizlikler (% 99 güvenirlilik aralığında).....	82
Tablo 5.1.	Varyans Analizi (ANOVA) Tablosu.....	86

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Buji ateşlemeli motor, Seramik kaplama, Performans, Emisyon, Buhar enjeksiyonu, Atık ısı kazanı

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliğinin kanuni ve çevresel zorunluluklardan dolayı önlenmesi, daha temiz ve daha verimli çalışan motorlar üzerindeki araştırmaları yoğunlaştırmaktadır. Bu amaçla, emisyonları azaltıp, verimi artırıcı yöntemler kullanılmalıdır.

Seramik kaplama uygulamaları ile birlikte; iş ve egzoz enerjisinde artma, soğutma sistemine giden ısının azaltılması, egzoz emisyonları ve motor gürültüsünde azalmalar sağlanmaktadır. Buji ateşlemeli motorlarda HC oluşum mekanizmalarının en önemli kaynaklarından biri de yanma odası cidar (alev sönme bölgesi) sıcaklığının düşük olmasıdır. Bu bölgelerde sıcaklık arttırabildiği oranda HC emisyonlarında azalmalar meydana gelmektedir.

Motora su-buhar gönderilmesi ile birlikte; suyun özgül ısısının yaklaşık olarak havanın özgül ısısından dört kat daha fazla olması maksimum yanma sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Yanma odası maksimum sıcaklığının düşmesi, NO_x emisyonlarında dikkate değer oranlarda azalmalara sebep olmaktadır. Ayrıca su ile birlikte, silindir içerisinde karışımın daha iyi olması, motor yanma veriminin artmasına neden olmakta ve buna bağlı olarak motor performans parametreleri iyileşmektedir.

Bu çalışmada, kısmi yalıtılmış bir buji ateşlemeli motora buhar enjeksiyonun motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, piston üst yüzeyi dışarıdan merkeze doğru 4 ile 8 mm genişliğinde ve 0.5 mm kalınlığında iki farklı Y₂O₃ ve MgO-ZrO₂ seramik malzemeler ile kaplanmıştır. Buhar, egzoz kayıp enerjisinden elde edilip, geliştirilen elektronik kontrollü buhar enjeksiyon sistemi ile emme zamanında, emme manifolduna, yakıt sarfiyatının % 10, % 20 ve % 30 kütle oranlarında püskürtülmüştür. Elde edilen sonuçlar, her bir durum için standart motor verileriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Motor performans parametreleri ile egzoz emisyonlarını optimum yapan buhar oranı, kaplama türü ve devir durumu Ki-Kare yöntemiyle tespit edilmiştir. STD motorda, buhar enjeksiyonun etkileri ayrıca teorik olarak sıfır-boyutlu tek-bölgeli yanma modeli ile incelenmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca seramik kaplamalı motorda farklı yakıt olarak M15-E15 yakıtları kullanılması ve bu yakıtlara buhar enjeksiyonu yapılması durumunda performans ve egzoz emisyonlarındaki değişim incelenmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF STEAM INJECTION IN A PARTIALLY COATED SI ENGINE

SUMMARY

Key Words: Spark ignition engine, Ceramic coating, Performance, Emissions, Steam injection, Waste heat boiler.

Many researches have been carried out concentrating on cleaner and more efficient internal combustion engines due to new legislation about preventing air pollution and environmental obligations. For this purpose, various method of reducing emissions and increasing efficiency are used.

With ceramic coating applications, increased power and exhaust energy, reduced heat of the cooling system, exhaust emissions and engine noise have been achieved. Also in spark ignition engines one of the most important formation mechanisms of hydrocarbon emissions is the flame quenching at the walls. The reductions in HC emissions occur as much as the temperature can be increased in these areas.

Injection of water-steam into the cylinder causes a reduction in the maximum combustion temperature due to the fact that specific heat of water is four times greater than air. Decreasing the temperature of the combustion chamber gives rise to considerable reduction in the amount of the NO_x emissions. Moreover, water steam injection into the cylinder provides better fuel/air blend, increased combustion efficiency and improved engine performance parameters.

In the study, the effects of water steam injection into the cylinder on the engine performance and exhaust emissions has been investigated. In the experiment a spark engine with partially coated piston was used. For this purpose, the top surface of the piston is coated with 4 and 8 mm wide and 0.5 mm thick two different containing material Y₂O₃ and MgO-ZrO₂. Water steam was generated using the heat of exhaust gas and transmitted to the inlet manifold at the inlet period. Water steam was injected at different mass ratios of fuel consumption (10, 20 and 30%) using a custom electronically controlled injector. The results obtained from each test are compared to that of the standard engine. The optimum values of steam rates, coating types and engines speed have been determined by means of chi-square method in terms of engine performance parameters and exhaust emissions. The effect of steam injection on the performance and NO emissions in the STD engine has also been theoretically modeled based on zero-dimensional single-zone burning approach. The results of the model were compared with experimental data. The effects of using M15 and E15 fuels with and without the presence of steam injection on performance and exhaust emissions were investigated by employing the ceramic coated engine.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sanayi ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte artan motorlu taşıtlar, bir yandan insan yaşamını kolaylaştırırken, diğer yandan da çevre kirliliğini beraberinde getirmektedir. Kentsel hava kirliliğinin % 50-60'ını motorlu taşıtlardan yayılan egzoz emisyonlarının oluşturduğu bilinmektedir [1].

Motorlu taşıtlar; egzoz emisyonu, yakıt-yağ buharı, kurşun bileşikleri, asbest ve lastik tozları, aşınma, paslanma ve korozyon sonucu oluşan gaz, sıvı ve katı atıklarla çevreyi kirletmektedir [2]. Motorlu taşıt kirletici emisyonlarının büyük bir bölümü yanma sonucu oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan hidrokarbon (HC) kökenli yakıtların, ideal koşullarda hava ile tam yanması sonucu oluşan ürünler arasında karbondioksit, su buharı ve azot bileşikleri bulunmaktadır. Ancak uygulamada ideal koşulların sağlanamaması nedeniyle tam yanma gerçekleşmemekte ve kirletici bileşenler oluşmaktadır. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan toplam kirleticilerin büyük bir bölümünü oluşturan egzoz gazlarının bileşiminde; parafinler, olefinler ve aromatikler gibi yanmamış hidrokarbonlar, aldehitler, ketonlar, karboksilik asitler gibi kısmen yanmış hidrokarbonlar, CO, NO_x, SO₂, kurşun bileşikleri ve partikül maddeler bulunmaktadır. Egzoz gazında bulunan en etkin, zararlı ve yoğun bileşenler karbon monoksit, hidrokarbon, NO_x ve partikül maddelerdir [3,4].

Egzozdan salınan emisyonların bileşimi, dizel ve buji ateşlemeli motorlarda farklıdır. Herhangi bir önlem alınmamış dizel motoru, benzin motoruna kıyasla daha az çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Ancak gerekli önlemler alındığında çevre kirliliği benzin motorlarında daha etkili bir şekilde azaltılabilmektedir. Bu nedenle taşıtlardaki çevre kirliliği önleme çalışmaları benzin motorlu araçlarda yoğunlaşmaktadır [5].

Buji ateşlemeli motorlardan salınan zararlı emisyonları azaltma çabaları kanuni zorlamalardan ötürü, otomobil şirketleri ve üniversitelerin önemli bir araştırma konusu olmuştur. Hızlı ilerlemeler kaydedilerek emisyon seviyelerinde ciddi azalmalar sağlanmıştır. Bunun için yapılan birçok çalışmada, buji ateşlemeli motorlardan salınan zararlı emisyonların azaltılması için farklı yöntemler geliştirilmiştir [6–10]. Bu yöntemler niteliklerine göre yanma öncesi alınan önlemler, yanma sırasında alınan önlemler ve yanma sonrası alınan önlemler olarak sınıflandırılabilir [11].

- Yanma öncesi alınan önlemler: Kullanılan yakıt bileşiminin kirletici emisyonları azaltıcı yönde hazırlanması (Katkı maddeleri, emülsife yakıt, oksijen yakıtlar, LPG, alkoller vs.).

- Yanma sırasında alınan önlemler: Kirletici bileşenlerin motorda yanma sırasında ve diğer motor içi kaynaklarda oluşumunu azaltmak (Yanma odası şekli, yanma odası yüzey/hacim oranı, termal bariyer kaplama, sıkıştırma oranı, emme manifoldu şekli, supap zamanlaması ve ateşleme sisteminin yapısı, EGR, su-buhar püskürtme, ateşleme avansının değiştirilmesi, vb.).

- Yanma sonrası alınan önlemler: Oluşumuna engel olunamayan kirletici bileşenleri daha sonra egzoz gazı içerisinden temizlemek (Termik reaktör, katalitik konvertör, vb.).

Buji ateşlemeli motorlarda emisyon miktarını etkileyen en önemli parametre hava fazlalık katsayısıdır. Düzgün ve emniyetli çalışmanın sağlanabilmesi için, motorun normalde stokiyometrik karışıma yakın bölgelerde çalıştırılması gerekmektedir. Şekil 2.1' de HFK' ya göre NO, HC ve CO emisyonlarındaki değişimler görülmektedir. Buji ateşlemeli motorlarda emisyon önleme üzerine yapılan çalışmalar genellikle HC emisyonlarının azaltılması üzerine yoğunlaşmıştır. Hidrokarbon emisyonları yakıtın eksik yanması ya da yanmadan dışarı atılması sonucunda oluşan ürünlerdir. [12,13]. HC' ler yanma olayına katılmayarak motordan üretilecek olan işi azalttıklarından dolayı yanma verimini düşürürler ve genelde tahmin edilenden daha büyük bir öneme sahiptirler [14]. Fakat şekilden de

görüldüğü gibi, buji ateşlemeli motorların çalıştırıldığı HFK aralığında NO emisyonlarının miktarı da maksimuma ulaşmaktadır. Dolayısıyla, buji ateşlemeli motorlarda kısmi eksik yanma emisyonlarının (HC, CO) azaltılması çalışmalarının yanında NO emisyonlarında dikkate alınması gerekmektedir. NO_x' lerin oluşumunu etkileyen diğer en önemli parametre ise silindir içerisinde ulaşılan yüksek sıcaklıklardır.

Teorik ve gerçek motor çevrim analizleri ısı veriminin yanma sıcaklığının yükselmesi ile arttığını göstermektedir [15,16]. Buna karşılık, NO_x emisyonlarının azaltılması için sıcaklığın düşürülmesi zarureti verim artışını sınırlandırmakta, hatta zaman zaman verimin düşmesine neden olmaktadır [17,18]. Silindir içi sıcaklığın artışı diğer kirletici bileşenlerden CO ve HC emisyonlarının oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmaktadır. Ancak, silindir içi NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik yöntemler yukarıda bahsedilen emisyonların oksidasyon hızlarını yavaşlatmaktadır. Dolayısıyla NO_x emisyonunu azaltmaya yönelik olarak uygulanan yöntemlerin bir yandan verimin düşürmemesine diğer yandan da diğer kirletici bileşenlerin artışına neden olmaması gerekir.

Su veya buhar püskürtme yöntemi silindir içerisinde (yanma esnasında) alınan etkili NO_x azaltma yöntemlerindedir. Son 20 yılda su, farklı şekillerde pek çok araştırmacı tarafından, içten yanmalı motorlarda yanma verimini arttırmak ve NO_x emisyonlarını azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [19–23].

Ayrıca içten yanmalı motorlarda, performans ve verim artışına ilave olarak kısmi oksitlenmiş yanma ürünlerini azaltmak amacıyla yanma odasına düşük ısı kayıplı seramik malzemeler ile kaplama yapılmaktadır. Motorlarda seramik kaplama ile verim artışı, yanma odası sıcaklıklarının artması ile birlikte olmaktadır. Fakat yanma odası sıcaklıklarının artışı NO_x emisyonlarının oluşum hızını artırmaktadır. Dolayısıyla yukarıda bahsedilen su veya buhar püskürtme yöntemleri ile buji ateşlemeli motorlarda termal bariyer kaplama uygulamalarının birlikte uygulanması, kısmi eksik yanma ürünleri (HC,CO), motor verimi ve NO_x emisyonları açısından optimum iyileşmelerin sağlanabileceği potansiyel bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.1. İçten Yanmalı Motorlarda Seramik Kaplama Uygulamaları

Seramik kaplama uygulamaları ile birlikte, yanma odasından soğutma suyuna iletilen ısının azaltılması ve yakıt dönüşüm veriminin artması sağlanmaktadır [24]. Bununla beraber, motorun daha yüksek sıcaklıkta çalışması, düzgün ve sessiz bir çalışma sağlarken, çok farklı yakıtların kullanımı da söz konusu olabilmektedir. Soğutma sistemine iletilen ısının azalması sonucunda soğutma yükü azaldığı için soğutma sisteminin boyutları küçülmektedir. Silindir içerisindeki yanma sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak CO, HC ve is gibi eksik yanma ürünlerinin azalması sağlanmaktadır [25-35].

Literatürde, buji ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli motorlarda seramik kaplama uygulamaları pek çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Araştırmalar deneysel ve teorik olarak motor performans parametreleri ile emisyon karakteristikleri üzerine yoğunlaşmaktadır [36-48]. Çalışmalarda seramik kaplama uygulamaları motorlara farklı şekillerde uygulanmıştır. Dizel motorları ile yapılan çalışmaların büyük bir kısmında yanma odası elamanlarının tamamı kaplanmıştır[36-37,43-49]. Bazı çalışmalarda ise sadece piston tepesi veya silindir üst kapağına kaplama işlemi uygulanmıştır. Buji ateşlemeli motorlarda ise vuruntu temayülünün yüksek olması nedeniyle yanma odasının tamamının kaplanması yerine çoğunlukla kısmi kaplama uygulamaları kullanılmıştır [49-55].

Dizel motorlarında performans artırmaya yönelik seramik kaplama çalışmalarında, motor momenti, gücü ve efektif verimde artmaların, ÖYS' da ise azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Emisyonlar üzerine yapılan çalışmalarda ise, CO, HC ve PM emisyonlarının azaldığı, ancak artan silindir içi sıcaklığa bağlı olarak NO_x emisyonlarında artmaların olduğu saptanmıştır [36-48].

Kaplamalı motorlarda NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla araştırmacılar, sıkıştırma oranını değiştirmek suretiyle çalışmalar yapmışlardır [40]. Bu çalışmalarda kaplamalı motorda, sıkıştırma oranı düşürülerek güçte fazla bir kötüleşme olmadan NO_x emisyonlarında azalmaların olduğunu ifade edilmiştir. Püskürtme avansı değişiminin incelendiği çalışmalarda ise, püskürtme avansının düşürülmesi ile

ÖYS'de azalma, ısı verim ve egzoz gaz sıcaklıklarında artmaların olduğu tespit edilmiştir. Kaplamanın etkilerini teorik olarak inceleyen çalışmalarda ise silindir içinden silindir yüzeyine olan ısı kaybının azaldığı, egzoz kayıp enerjisinin kullanılabilirliğinin ve silindir içi sıcaklıkların arttığı tespit edilmiştir [41-42].

Dizel motorlarında sadece piston üst yüzeyinin kaplanması ile ilgili yapılan çalışmalarda ise, kaplamalı motorda tutuşma gecikmesi ve kontrolsüz yanma safhası kısılırken toplam yanma süresinin arttığını (% 3-10), tam yük şartlarında kaplamalı motorda ÖYS, motor momenti ve gücünde iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca egzoz gaz sıcaklığında, normal pistonu göre artmaların olduğunu saptamışlardır [44,47]. Tablo 1.1 de dizel motorlarında seramik kaplama uygulamalarının motor performans parametreleri ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini gösteren çalışmaların genel özeti görülmektedir.

Tablo 1.1. Dizel motoruna seramik kaplama uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması

Yazarlar	Kaplama Şekli	Kaplama Malzemesi	Çalışma şekli ve şartları	Performanstaki değişimler	Emisyonlardaki değişimler
Yaşar ve ark. [36]	Yanma odası	Silindir kapağı ve supaplar CaZrO ₃ Pistonlar MgZrO ₃	Tam yük şartları, aşırı doldurma	Hacimsel verim % 1-3 artma, ÖYS %1-6 azalma, Egzoz sıcaklıklarında artma	
Yaşar ve ark. [37]	Yanma odası	Silindir kapağı ve supaplar CaZrO ₃ Pistonlar MgZrO ₃	Tam yük şartlarında deneysel verileri termodinamiğin 1. ve 2. kanununa göre analizi	2. kanun veriminde %2.8 artma, Egzoz gazlarının kullanılabilirlik enerjisinde %5-12 artma	-
Kawamura ve ark. [38]	Yanma odası	MgZrO ₃	Tam yük şartları	Isı kayıplarına % 70 azalma, Sıkıştırma sonu sıcaklığında 200K artma, Tutuşma gecikmesi süresinde 0.6ms azalma	-
Parlak [39]	Yanma odası	MgOZrO ₂	Tam yük şartları	ÖYS% 4.5 azalma, Efektif verim % 1.5 artma	CO %56 azalma NOx % 12 artma

Tablo 1.1. Dizel motoruna seramik kaplama uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması (Devamı)

Parlak ve ark.[40]	Yanma odası	MgOZrO ₂	Tam yük şartları, Değişken sıkıştırma oranı	ÖYS'de artma	NO _x %14 azalma
Parlak ve ark. [41]	Yanma odası	Silindir kapağı ve supaplar CaOZrO ₂ Pistonlar MgOZrO ₂	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları, Ekserji analizi, Değişken püskürtme avansı	Efektif verim %2 artma, Güç %1 artma, Moment%1.2 artma, ÖYS %1-6 azalma, Isıl verim %2 artma, Egzoz gazlarının ekserjisi %3-27 artma	-
Parlak [42]	Yanma odası	Silindir kapağı ve supaplar CaOZrO ₂ Pistonlar MgOZrO ₂	Tam yük şartları, Teorik çalışma, Değişken püskürtme avansı	ÖYS %6 azalma, Isıl verim %2 artma Egzoz sıcaklığı %10.8 artma	-
Ciniviz ve ark.[43]	Silindir kapağı ve supaplar	Silindir kapağı ve supaplar Y ₂ O ₃ ZrO ₂	Tam yük şartları	Motor gücü ve torkunda %6-7 artma, ÖYS %4 azalma, egzoz gaz sıcaklığı %13 artma	NO _x % 20 artma, Duman koyuluğu %10 azalma
Schwarz ve ark. [44]	Piston	ZrO ₂	Tam yük şartları	Tutuşma gecikmesi ve kontrolsüz yanma safhasında kısalma, Yanma süresinde%3-10 artma, ÖYS %3 artma	-
Woods ve ark. [45]	Yanma odası	ZrO ₂	Tam yük şartları	Motor gücü %5.5 artma, ÖYS %5 azalma, Hacimsel verim %5.4 azalma, Soğutmaya giden ısıda %52 azalma	-
Havstad ve ark.[46]	Yanma odası	MgZrO ₃	Tam yük şartları	İndike özgül yakıt sarfiyatı %5-9 azalma, Soğutmaya giden ısı%30 azalma	-
Hejwowski -Weronki [47]	Piston	Al ₂ O ₃ TiO ₂ %92 ZrO ₂ +%8 Y ₂ O ₃	Tam yük şartları	Motor momenti ve gücü %8 artma, ÖYS %15-20 azalma, Egzoz sıcaklığı 200K artma	-
Büyükkaya ve ark.[48]	Yanma odası	Silindir kapağı ve supaplar CaZrO ₂ Pistonlar MgZrO ₃	Tam yük şartları, Değişken püskürtme ve supap zamanlaması	ÖYS %1-6 azalma, Egzoz gaz sıcaklığı 65°C artma,	NO _x %11 azalma, Partikül madde %40 azalma,

Buji ateşlemeli motorlarda yanma odasının tamamının seramik malzeme ile kaplanması durumunda artan yanma odası sıcaklıklarına bağlı olarak vuruñu temayülü artmaktadır. Bu nedenle, yanma odasının tamamının kaplanması yerine kısmi kaplama uygulamaları kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda, sadece piston tepesi, supaplar veya piston tepesinin kısmi kaplanması uygulamalarına rastlanılmaktadır [49–55]. Kaplama sonucu oluşan vuruñunun azaltılmasına yönelik yapılan çalışmaların genelinde vuruñu mukavemeti yüksek alkol-benzin karışımları yakıt olarak kullanılmış ya da motor sıkıştırma oranı azaltılmıştır. Yanma odası elamanlarının bazılarının kaplanması ya da bariyer çemberli piston kullanılan çalışmalarda ise, moment, efektif g ve efektif verimde artmalar, YS’ de azalmaların olduğu tespit edilmiştir. HC ve CO emisyonlarında önemli ölçüde azalmalar gözlemlenirken; NOx emisyonlarında sıcaklık artışına bağlı olarak artmaların olduğu saptanmıştır. Ayrıca buji ateşlemeli motorlarda oldukça yüksek olan soğuk ilk hareket HC emisyonlarının kısmi yalıtılmış motorlarda dikkate değer oranda azaltıldığı saptanmıştır. Tablo 1.2’ de buji ateşlemeli motora uygulanan seramik kaplama çalışmalarının motor performans parametreleri ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini gösteren çalışmaların zet şekli verilmiştir.

Tablo 1.2. Buji ateşlemeli motora seramik kaplama uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması

Yazarlar	Kaplama Şekli	Kaplama Malzemesi	Çalışma şekli ve şartları	Performanstaki değişimler	Emisyonlardaki değişimler
Assanis ve ark. [49]	Piston	YSZ	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	Efektif güçte %18 artma, ÖYS %10 azalma	-
Poola ve ark. [50]	Yanma odası	PSZ	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları, Metanol+benzin karışımları	Efektif güçte artma, ÖYS azalma	-
Parlak ve ark.[51]	Piston	MgOZrO ₂	Tam yük şartları, Değişken sıkıştırma oranı, Metanol+benzin karışımları(M15-B85)	Efektif güçte %7.6 artma (7:2, M15), ÖYS %3.4 artma (8:2, M15)	HC %50 azalma (8:2, SO, M15), Soğuk ilk hareket HC azalma
Cerit ve ark.[52]	Piston	MgOZrO ₂	Tam yük şartları, Teorik çalışma, Değişken sıkıştırma oranı	Piston yüzey sıcaklıkları 100°C artma, Efektif güçte %3.5 artma, ÖYS %1.2 azalma	Soğuk ilk hareket HC %43 azalma
Chan ve Khor [53]	Piston	YSZ	Tam yük şartları	ÖYS %6 azalma, Silindir içi basınçta artma, Egzoz gaz sıcakları azalma	HC emisyonları azalma
Chan [54]	Piston	%25 ZrO ₂ - %75 Y ₂ O ₃	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	Silindir içi pik basıncında artma, ÖYS %4 azalma, Egzoz gaz sıcakları azalma	CO,10 Nm yük ve 2800 d/d'da %1,25 azalma, HC 20ppm azalma, NOx 1450 ppm artma
Kumar ve Nagarajan [55]	Piston, Emme ve egzoz supapları	Al ₂ O ₃	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları, %80benzin+%20etil alkol	Motor momenti ve gücünde artmalar (E20),	HC %48 azalma(Kısmi yük şartları), CO % 50 azalma (Kısmi yük şartları)
Kapsız ve ark.[56]	Piston	MgO-ZrO ₂	Tam yük şartları	Düşük devirlerde moment ve güçte %10 artma, Yüksek devirlerde moment ve güçte %5-10 azalma, Volümetrik verim azalma	Soğuk ilk hareket HC %35-80azalma, HC azalma,

1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Su-Buhar Uygulamaları

Motora su ilavesi ile birlikte, yakıt-hava karışımı ve silindire doldurulan yanma ürünlerinin özellikleri değişmektedir. Bu nedenle motorlarda meydana gelen yanma olayının değişmesine bağlı olarak, performans parametreleri ile emisyon oluşum mekanizmaları etkilenmektedir. İçten yanmalı motorlardan özellikle dizel motorlarından çevreye salınan zararlı NO_x emisyonlarının azaltılması için kullanılan yöntemlerden biride silindire su gönderilmesidir. Dizel motoruna su gönderilmesi durumunda NO_x emisyonlarında ciddi oranda azalmalar meydana gelmektedir. Greeves ve ark., [57] teorik çalışmalarında, su damlacıklarının buharlaşması için yakıttan daha fazla ısı çektiğini ve bu sebepten dolayı yanma sonu maksimum sıcaklığın düştüğünü ve buna bağlı olarak da NO_x emisyonlarının azaldığını ifade etmişlerdir. Motor silindirine suyun sevk edilmesi durumunda, sıkıştırma esnasında buhar haline gelen su, yakıt ile temasında yüzey gerilmesinin çok küçük olmasından dolayı, yakıtın çok daha küçük damlacık çaplarına bölünmesine neden olmaktadır. Yakıtın daha küçük damlacık çaplarına bölünmesi yüzey alanını arttırmakta ve yüzey alanının artması da yanma esnasında yakıt ile havanın çok daha iyi karışmasını sağlamaktadır [58]. Silindir içerisinde karışımın daha iyi olması motor yanma veriminin artmasına ve buna bağlı olarak motor performansının iyileşmesini sağlamaktadır.

Su üç farklı şekilde motora gönderilebilmektedir. Bunlar, suyun emülsiyon halinde gönderilmesi, emme havası içerisine fumigasyon yöntemi ve suyun yanma odasına direkt enjeksiyonu şeklinde sınıflandırılabilir. Dizel motorlarında suyun farklı şekillerde kullanılması ile yapılan çalışmalara göre; motor performans parametrelerinden, motor momenti ve efektif gücünde artmaların, ÖYS ise azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Emisyonlar açısından ise; su kullanımı durumunda maksimum alev sıcaklığının düştüğü ve NO_x emisyonlarında dikkate değer oranda azalmaların meydana geldiği ifade edilmektedir [59–63]. Yapılan bazı çalışmalarda ise yakıt-su karışım oranı arttıkça is ve PM emisyonlarında artmanın meydana geldiği ifade edilmektedir. Bedford ve ark [59]. ile Lin ve Wang [60], düşük yüklerde farklı hacimsel su/yakıt oranlarında NO_x ve özgül yakıt sarfiyatında azalmanın meydana geldiğini, buna karşılık yüksek yüklerde aynı karışım

oranlarında, su/yakıt karışım oranları artırıldığında NO_x emisyonunda büyük ölçüde düşme gözlenirken, özgül yakıt sarfiyatında büyük oranda kötüleşmenin gözlendiğini ifade etmişlerdir. Kısmi eksik yanma emisyonlarında ise, bazı çalışmalara göre kötüleşmelerin olduğu söylenmekle beraber çoğunlukla bu emisyonların azaldığını ileri sürmüşlerdir. Çalışmalarda meydana gelen bu farklı sonuçlar, motor çalışma şartları ve temel ayarlar farklılığından ortaya çıktığı söylenebilir. Motora su gönderilmesinin bu olumlu sonuçlarının yanında bazı olumsuz yönleri de mevcuttur. Bunlar, emülsiyon yakıt kullanımında; faz ayrışması, soğuk ilk hareket zorluğu, fumigasyon yönteminde; suyun emme supabı ve metal aksamalarında korozyona neden olması ve direk enjeksiyon yönteminde ise; maliyetlerin yüksek ve uygulamanın zor olması olarak özetlenebilir.

Bu olumsuzlukları bertaraf edebilmek için içten yanmalı motorlarda suyun buhar fazında motor emme havası içerisine püskürtülmesi etkili bir yöntem olarak görülmüş ve ilk olarak Parlak ve ark. ve Ayhan, [64-67] tarafından dizel motorlarında denenmiştir. Çalışmalarında, buharın etkisini hem deneysel hem de teorik olarak değişken yük ve devire göre incelemişlerdir. Bu çalışmalarda, buhar dizel motorlarına emme havası içerisine yakıt sarfiyatının farklı oranlarında elektronik kontrollü enjeksiyon sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Bulgulara göre motor performans parametrelerinde iyileşmeler, NO_x emisyonlarında % 30' un üzerinde azalmalar, is, HC ve CO emisyonlarında ise kayda değer bir değişimin olmadığını belirlemişlerdir. Tablo 1.3' de dizel motorlarına su ve buhar gönderilmesinin motor performans parametreleri ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini gösteren çalışmaların sonuçları özet olarak verilmiştir.

Tablo 1.3. Dizel motoruna su-buhar uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması

Yazarlar	Metod	Oran (%)	Çalışma şekli ve şartları	Performanstaki değişimler	Emisyonlardaki değişimler
Bedford ve ark. [59]	Direkt su püskürtme	%30, %45	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	ÖYS azalma	NOx %24.1 azalma (%44 yükte, %30 su), NOx %46.1 azalma (%86 yükte%45 su)
Lin ve Wang [60]	Emülsife yakıt	%10,20	Tam yük şartları	ÖYS azalma,	NOx % 1-24 azalma, CO azalma
Greeves ve ark. [57]	Emülsife yakıt	% 80	Teorik çalışma	-	NOx azalma, PM artma
Abu-Zaid [61]	Emülsife yakıt	% 5, 10, 15 ve %20	Tam yük şartları	Efektif verim %3.5 artma, Tork ve güçte artma, Egzoz sıcaklığı %5.1 azalma	-
Lif ve Holmberg [58]	Emülsife yakıt	%15, %35	Tam yük şartları	Yanma veriminde artma	-
Wang ve Chen [62]	Emülsife yakıt		Teorik ve deneysel çalışma	Tutuşma gecikmesi azalma	-
Canfield [68]	Emülsife yakıt	%30,40, 45	Tam yük şartları, Teorik çalışma	Adyabatik alev sıcaklığı %5.7 azalma	NO azalma CO artma
Armas ve ark. [69]	Emülsife yakıt	% 10	Tam yük şartları	Efektif verim artma	NOx %46 azalma, HC azalma, CO azalma, PM azalma
Ishida ve Donahue [70,71]	Emülsife yakıt	%10-50	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	ÖYS azalma (kısmi yük şartı), ÖYS artma (tam yük şartları)	NOx azalma (kısmi yük şartı), İS azalma (kısmi yük şartı), NOx azalma (tam yük şartları), İS artma (tam yük şartları)
Sarvi ve ark. [72]	Direkt su püskürtme	%10-50	Tam yük şartları	-	NOx % 50azalma, HC azalma, CO artma, İS artma
Chadwell ve Dingle [73]	Direkt su püskürtme	%10-30	Tam yük şartları	Efektif güç ve verimde artma	NOx %40 azalma, CO azalma, PM azalma, HC artma
Watanabe ve ark. [74]	Emülsife yakıt	%10,%20	Teorik çalışma	Suyun sebep olduğu mikro patlamaları incelemiştir.	-

Tablo 1.3. Dizel motoruna su-buhar uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması (Devamı)

Crookes ve ark. [75]	Emülsife yakıt (biyodizel +su)	% 10		ÖYS azalma	NOx azalma
Murthy ve ark.[76]	Buhar püskürtme	Kontrol-süz buhar püskürtme	Tam yük şartları, Biyodizel	Güç artma, Isıl verim artma, Egzoz sıcaklığı azalma, ÖYS artma, Güç artma(biyodizel), ÖYS azalma(biyodizel) Egzoz sıcaklığı azalma(biyodizel)	NO azalma, İs artma, İs azalma (biyodizel),
Ocampo-Barrera [77]	Emülsife yakıt	% 10, %25	Tam yük şartları	Tutuşma sıcaklığı azalma,	-
Park ve ark. [78]	Emülsife yakıt	%0-20	Tam yük şartları	ÖYS artma	NOx %2.6-9.5 azalma, İs artma
Bardan ve ark. [79]	Emülsife yakıt	%0, 10, 15, 20, 25 ve 30	Tam yük şartları	Efektif güç artma, Moment artma, Efektif verim %5 artma	NOx azalma
Dani [80]	Emülsife yakıt	%5-%7	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	ÖYS %2-3 azalma, Efektif verim azalma(tam yük şartları), Efektif verim artma(kısmi yük şartları)	NOx %30-50 azalma(tam yük şartları), HC artma(tam yük şartları), HC azalma(kısmi yük şartları)
Kanan ve Udayakuma [81]	Emülsife yakıt	% 10-%20	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	Efektif verim artma, ÖYS artma	NOx %25 azalma, HC azalma
Ayhan [82]	Emülsife yakıt	%5,%10, %15 ve %20	Tam yük şartları	ÖYS azalma, Efektif verim artma, Efektif güç ve moment azalma, Egzoz sıcaklığı azalma	NOx %27 azalma, İs % 40 azalma, Hc azalma, CO azalma
Parlak ve ark. [64]	Buhar enjeksiyon	%5-%40	Tam yük şartları, Biyodizel	Efektif güç ve moment %3 artma, Efektif verim %3 artma, ÖYS %5 azalma	NOx %33 azalma,
Ayhan ile Parlak [65-67]	Buhar enjeksiyon	%5-%40		Efektif güç ve moment %3 artma, Efektif verim %3 artma, ÖYS %5 azalma	NOx %33 azalma,

Araştırmacılar tarafından dizel motorlarına su gönderme teknikleri çok fazla uygulanmış olmasına karşın buji ateşlemeli motorlarda az sayıda çalışma yapılmıştır. Buji ateşlemeli motorlarda su kullanımı yapılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, yakıt olarak yanma sonu sıcaklığı benzinden daha yüksek olan yakıtların kullanıldığı görülmektedir. Bu tür yakıtların motorlarda kullanılması durumunda silindir içi maksimum yanma sıcaklığı artmakta ve buna bağlı olarak NO_x emisyon miktarı da artmaktadır. Yapılan bu çalışmalarda su, artan NO_x emisyonlarının azaltılması amacıyla kullanılmıştır. Gaz yakıt kullanılması ile saptanan bulgulara göre, motor performans parametrelerinde iyileşmeler, NO_x emisyonlarında ise azalmaların olduğu belirlenmiştir. HC ve CO emisyonlarında ise standart duruma göre bir değişimin olmadığını belirlemişlerdir. Benzin yakıtı üzerine su püskürtülmesi durumunda ise efektif verim ve efektif güçte artmalar, ÖYS’de ise azalmalar tespit etmişlerdir. Emisyonlar açısından ise NO_x, HC ve CO emisyonlarında azalmalar saptamışlardır. Tablo 1.4’ de buji ateşlemeli motora su gönderilmesinin motor performans parametreleri ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini gösteren çalışmaların genel özeti verilmiştir.

Tablo 1.4. Buji ateşlemeli motora su-buhar uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisini inceleyen çalışmaların karşılaştırılması

Yazarlar	Metod	Oran (%)	Çalışma şekli ve şartları	Performanstaki değişimler	Emisyonlardaki değişimler
Lanzafame [20]	Su püskürtme	%0-15	Tam yük şartları Teorik çalışma	Efektif verim artma,	NO _x azalma
Subramanian ve ark. [83]	Su püskürtme	0-6 kg/h	Tam yük şartları, Hidrojen yakıtlı motor	Efektif güç artma, Termal efektif verim artma	NO azalma
Özcan ve ark.[84]	Su püskürtme	% 12.5, 25, 33 ve % 50	Tam yük şartları, LPG yakıtlı motor	Termik verim %2.7 artma, ÖYS %4 azalma, Kayıp ısı azalma	-
Soysal ve ark. [85]	Su püskürtme	% 5, % 6.25, % 7.5, % 8.75 ve % 11.25	Tam yük şartları, Kısmi yük şartları	Efektif güç %7 artma(tam yük şartları), ÖYS % 6 azalma (tam yük şartları)	HC %25 azalma (tam yük şartları), CO %30 azalma (tam yük şartları)
Özcan ve ark. [86]	Su püskürtme	%20-%50	Tam yük şartları, LPG yakıtlı motor		NO _x %35 azalma, CO sabit HC sabit

Buji ateşlemeli motorlarda alkol benzin karışımlarının yakıt olarak kullanılması; alkollerin (Metanol ve Etanol) oktan sayılarının benzine göre yüksek olması motor gücü ve verimi açısından daha yüksek sıkıştırma oranlarında motorun çalıştırılabilmesine olanak sağlamaktadırlar. Ayrıca alkollerin gizli buharlaşma ısıları benzine göre daha yüksektir. Yakıt tanecikleri sıvı fazdan buhar fazına geçerken çevreden aldıkları ısı nedeniyle giren hava sıcaklığını düşürmekte bu sayede volümetrik verimin iyileşmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda alkoller, yanma odası sıcaklığını düşürerek kendi kendine tutuşma eğilimini ve NO_x emisyonlarını azaltmaktadırlar. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak saf alkol kullanılması için yakıt sisteminde bazı modifikasyonlara ihtiyaç vardır. Bu yüzden alkoller düşük oranlarda (%0-20) yakıtlara karıştırılarak motorda herhangi bir modifikasyon yapılmadan kullanılabilir. Literatürde, motorlarda herhangi bir modifikasyon yapmadan motor performans parametreleri ile yakıt ekonomisi açısından optimum alkol yakıt oranı M15 olarak tespit edilmiştir [26,51,87-88].

Seramik kaplı buji ateşlemeli motorlarda, yanma odası sıcaklığının artmasına bağlı olarak vuruşu temayülü artmaktadır. Artan vuruşu temayülünü azaltmak amacıyla motorlarda yakıt olarak oktan sayısı yüksek alkol benzin karışımları kullanılmaktadır. Parlak ve ark. [51] tarafından yapılan çalışmada; TBC kaplı pistonda STD duruma göre yanma odası sıcaklıkları yükselmekte ve yükselen yanma odası sıcaklıklarına bağlı olarak vuruşu temayülü artmaktadır. Artan vuruşu temayülünü azaltmak için TBC kaplı motorda M15 yakıtı kullanmışlardır. TBC kaplı motorda salınan soğuk ilk hareket HC emisyonu ile tam yükte salınan HC emisyonlarında kayda değer oranlarda azalmalar tespit etmişlerdir. Ayrıca motor performans parametrelerinde iyileşmeler saptamışlardır.

Mevcut literatür içerisinde buji ateşlemeli motorlarda buhar enjeksiyonun etkilerini elektronik kontrollü olarak inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, kısmi yalıtılmış bir buji ateşlemeli motora buhar enjeksiyonun motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, piston üst yüzeyi dışarıdan merkeze doğru 4 ile 8 mm genişliğinde ve 0.5 mm kalınlığında iki farklı Y₂O₃ ve MgO ile stabilize edilmiş ZrO₂ (MgO- ZrO₂) seramik malzemeler ile kaplanmıştır. Buhar, egzoz kayıp enerjisinden elde edilip, geliştirilen

elektronik kontrollü buhar enjeksiyon sistemi ile emme zamanında, emme manifolduna, yakıt sarfiyatının % 10, % 20 ve % 30 kütleli oranlarında püskürtülmüştür. Elde edilen sonuçlar, her bir durum için standart motor verileriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Motor performans parametreleri ile egzoz emisyonlarını optimum yapan buhar oranı, kaplama türü ve devir durumu Ki-Kare yöntemiyle tespit edilmiştir. STD motorda, buhar enjeksiyonun etkileri ayrıca teorik olarak sıfır-boyutlu tek-bölgeli yanma modeli ile incelenmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca seramik kaplamalı motorda farklı yakıt olarak M15-E15 yakıtları kullanılması ve bu yakıtlara buhar enjeksiyonu yapılması durumunda performans ve egzoz emisyonlarındaki değişim incelenmiştir.

BÖLÜM 2. BENZİN MOTORLARINDA KİRLLETİCİ EMİSYONLAR

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesi üzerine yapılan çalışmalar, yürürlüğe giren sınırlandırmalar ve çevre üzerindeki tehditler nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Günümüzde taşıt kaynaklı kirletici emisyonlar üzerine yapılan çalışmaların etkili bir şekilde sonuçlandırılabilmesi için, kirletici emisyonların oluşum mekanizmalarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir.

2.1. Benzin Motorlarında Kirletici Emisyonlar

İçten yanmalı motorlarda, teorik tam yanma sonucu egzozdan atılan yanma ürünleri CO₂, H₂O ve N₂'den oluşmaktadır. Karbon dioksit (CO₂) doğrudan çevre ve insan sağlığına üzerinde zararlı etkilere sahip değildir. Ancak yanma sonucunda üretilen CO₂ 'nin yaklaşık %50' si atmosferde birikerek CO₂ konsantrasyonunu artırmaktadır. Atmosferde mevcut olan CO₂ miktarı hava şartlarını etkileme özelliği bulunduğundan, bu artış sonucunda "sera etkisi" olarak adlandırılan atmosferin giderek ısınmasına yol açmaktadır [89]. İçten yanmalı motorlarda, uygulamada yanmanın tam olmaması ve ısı ayrışma (moleküllerin parçalanması) nedeniyle tam yanma ürünü olarak çıkan egzoz gazlarına yanı sıra çevreye zarar veren kirletici bileşenler de salmaktadır. Bu bileşenler; NO_x, karbon monoksit (CO) ve yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonlardır [90]. İnsan ve canlılar üzerine etkilerinden dolayı NO_x, karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonları buji ile ateşlemeli motorlarda tehdit altında bulunan kirleticiler sınıfına girmektedir [91-93]. Taşıtlardaki kirletici emisyonun en büyük kaynağı motor içinde yanma sonucu oluşan egzoz gazlarıdır. Yanma sonucu egzozdan atılan zararlı emisyonlar: hidrokarbon, karbon monoksit, azot oksitler, kükürt dioksit (SO₂), partiküller ve kurşun bileşikleridir [65,94]. Benzin motorlarında yanma sonucu egzozdan çevreye salınan zararlı emisyonlar ve oluşum mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1. Hidrokarbon emisyonları

Hidrokarbonlar, yakıtın eksik yanması veya tam olarak tutuşamaması nedeniyle direkt olarak dışarı atılması sonucu meydana gelmektedir. Benzin motorlarında yaklaşık olarak motora giren yakıt miktarının % 1–1.5' ini oluşturmaktadır. Egzozdan salınan HC emisyonlarının yaklaşık yarısı oksijenle hiç reaksiyona girmeyen çiğ yakıt, diğer yarısını ise yakıtın oksijenle kısmi reaksiyonu sonucu oluşan bileşenlerden oluşmaktadır [6,95]. Benzin motorlarında değişken çalışma şartları: H/Y oranı, ateşleme avansı gibi faktörler tam olarak kontrol edilemediği için yanma kalitesi düşer ve yakıtın bir kısmı ya da tamamı yanmadan egzozdan dışarı atılmaktadır. Bu gibi durumlarda motordan salınan HC emisyonları artmaktadır. [32,96]. Ayrıca buji ateşlemeli motorlarda yanmamış hidrokarbon emisyonlarının oluşmasına neden olan motor yapısal özelliklerinin sebep olduğu silindirinde yakıtın yakılamamasına ya da sönmesine neden olan farklı birkaç kaynağı daha mevcuttur.

Sıkıştırma ve yanma esnasında artan silindir basıncı, silindir içerisindeki yanmamış gazların bir kısmını yanma odasındaki çiziklere ve piston çevresel boşluğuna girmeye zorlamaktadır. Bu yanmamış karışım bölgesi, alevin ulaşamayacağı kadar dar bir bölge olduğundan yanma işlemine katılmamaktadır. Bu boşlukları dolduran yanmamış karışım genişleme ve egzoz işlemi esnasında yanmadan dışarı atıldığı için hidrokarbon emisyonunun birinci kaynağını oluşturmaktadır [97].

Diğer bir kaynak ise, yanma odası cidarlarıdır (alev sönme bölgesi). Alevin silindir duvarına ulaşmasıyla alev soğuduğu ve yanma tam gerçekleşmediği için silindir cidarlarında yanmamış ve kısmen yanmış yakıt-hava karışımında oluşan bir soğuma filmi oluşur. Silindir cidarlarının temiz ve pürüzsüz olması durumunda bu ince film tabakası (≤ 0.1 mm) hızlı bir şekilde yanmasına karşın cidarların pürüzlü olması HC emisyonlarında aşırı bir artmaya neden olmaktadır [98–100].

HC emisyonlarının üçüncü kaynağı, silindir duvarlarında piston ve muhtemelen silindir başlığı üzerinde kalan ince yağ filminden kaynaklanmaktadır. Bu yağ katmanları sırasıyla yanmadan önce ve sonra yakıt hidrokarbon bileşenlerini absorbe

etmekte ve böylece yakıtın bir kısmının yanma işlemine katılmadan yanma odasından atılmasına sebep olmaktadır [10,28,100-102].

Motorlarda HC emisyonlarını dördüncü kaynağı ise, yanmanın özellikle yavaş seyrettiği geçici motor çevrimlerinde hava/yakıt oranı, ateşleme zamanı ve EGR oranının tam ayarlanmaması sebebiyle yanmanın tam olarak gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır [100-103].

Son olarak HC emisyonlarının en önemli kaynağı soğuk ilk hareket HC emisyonlarıdır. Özellikle katalitik konvertörün aktif olmadığı soğuk ilk hareket esnasında açığa çıkan HC emisyonları toplam HC emisyonlarının % 60' ını oluşturmaktadır. Motor soğuk koşullarda çalıştırıldığında konvertör sıcaklığı aktif metallerin aktivasyonunu sağlayacak kadar yüksek olmamaktadır. Bu nedenle yüksek miktarda HC okside olmadığından dışarı atılmaktadır. Konvertör sıcaklığı yükseldikçe (motorun ısınma süresine bağlı olarak) HC emisyonlarında % 93-95' i temizlenebilmektedir. Egzoza atılan toplam HC emisyonların azaltılması en etkili yolu 180 saniyedeki HC emisyonlarını düşürmektir [100-103].

HC emisyonları özellikle motor yükünden fazlasıyla etkilenmektedir. Tam yükte çalışan motor boşta veya kısmi yükte çalışan motora göre daha az HC üretir. Çünkü yükün artışı ile birlikte silindire giren yakıt miktarı artmakta, sıcaklıkların artması ile reaksiyon hızlanmakta ve sonuçta yanmamış HC azalmaktadır [104].

2.1.2. Karbon monoksit emisyonları

İçten yanmalı motorlarda CO emisyonu, yanma odası içerisinde yeterli oksijenin olmamasından kaynaklanmaktadır. Yanma odası içerisine oksijen tümüyle yetersiz olacağı gibi bölgesel olarak da yetersiz olabilir. CO emisyonları, motor çalışma karakteristiklerinden HFK, ateşleme zamanı, sıkıştırma oranı, motor devri ve püskürtme zamanına bağlı olarak değişmektedir [105,106].

İçten yanmalı motorlarda silindir içerisinde CO oluşmasının sebeplerinden biri de 'ayırışma' ya da 'disosiasyon' olayıdır. Yüksek yanma sıcaklıklarında yanma ürünleri

olan CO₂ ve H₂O parçalanarak element durumuna dönüşürler ve bu dönüşme sırasında ısı emerler [107–108].

2.1.3. Azot oksit emisyonları

İçten yanmalı motorlarda azot oksitlerin oluşumunu etkileyen parametreler; yanma odasındaki yüksek sıcaklık ve hava/yakıt oranı, kimyasal reaksiyonun hızı ve zamanıdır. Sıcaklıktaki artış ile ortamda yeterli oksijenin bulunması halinde NO_x miktarı artar. Stokiyometrik karışımın bir miktar fakir tarafında ($\lambda=1-1,1$) NO_x oluşumu maksimum iken, karışım zenginleşip fakirleştikçe NO miktarı da azalır [10, 109-110]. Azot ve oksijen gazlarının değişik moleküllerinin birleşmesi ile NO, NO₂, N₂O, N₂O₃ vb. gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ki bunların hepsine birden “Azot oksitler” denir ve NO_x olarak ifade edilir.

Yanma esnasında meydana gelen NO_x konsantrasyonu üzerinde yeterli zamanın olduğu takdirde, iki faktörün ağırlıklı etkisi bilinmektedir. Bunlar, yanma odasında ulaşılan maksimum sıcaklık ve hava-yakıt oranıdır. Yanma sonu sıcaklık 1800 °C’ e ulaştığında, karışım içindeki hava iyonize olmakta ve açığa çıkan azot tekrar oksijen ile birleşerek NO_x emisyonlarını oluşturmaktadır. Kimya kinetiği çalışmalarında, NO ve diğer azot oksitlerin alev sıcaklığındaki artışa bağlı olarak arttığı belirtilmiştir [111]. NO oluşumuna ilişkin tepkime kinetiği Zeldovich mekanizması ile aşağıdaki gibi açıklanmıştır [112-113].



Burada alev içerisinde O₂' nin ayrışması ile serbest kalan oksijen atomları azot molekülleri ile zincirleme reaksiyona girerek NO oluşturmaktadır [114].

Kimyasal denge hesapları sonucu saptanan NO_x miktarı, motordaki yanma koşullarında elde edilen miktar ile uyuşmamaktadır. Çünkü motor çalışma koşullarında yanma ürünlerinin kimyasal dengeye ulaşması için yeterli zaman

bulunmamaktadır. Kimyasal denge durumunda diğeri bir sapma da yanmış gazların soğuması sırasında gerçekleşir. Sıcaklığın düşmesinin iki nedeni vardır. Birincisi genişleme, diğeri ise yüksek sıcaklıktaki gazın hava veya daha soğuk yanmış gaz ile karışmasıdır. Sıcaklığın düşmesi ile NO_x ' lerin tekrar N_2 ve O_2 ' ye ayrışması beklenirken, reaksiyon hızının düşük sıcaklıklarda çok düşük olması nedeniyle bu reaksiyonlar da yavaşlar. Böylece daha yüksek sıcaklıklarda elde edilmiş olan NO_x miktarları dondurulmuş olur. Başlangıçta, NO_x miktarı reaksiyon hızlarının denge durumundaki koşulları sağlayacak kadar fazla olmaması (reaksiyon hızının sonlu olması) nedeniyle denge durumuna göre düşük olmaktadır. Belli bir zaman aralığından sonra ise, sıcaklıkların düşmesi sonucunda reaksiyonlar donar ve egzoz gazları içerisindeki miktar daha önce erişilen maksimum sıcaklık miktarına orantılı bir seviyede kalır. Çünkü azot oksitlerin oluşumu ayrıca reaksiyon hızına ve reaksiyonların tamamlanması için mevcut zamana bağlıdır [65,115].

2.1.4. Karbondioksit emisyonları

Karbondioksit doğrudan insan ve çevre sağlığı üzerinde zararlı etkilere sahip olmayan bir emisyonudur. Ancak CO_2 yanma sonucu atmosfere en çok salınan bir gaz olduğu için sera etkisi yapan bir gazdır. İçten yanmalı motorlarda CO_2 bir tam yanma ürünüdür. Gerçekte havadaki oksijen ile yakıttaki hidrokarbonlar karışır ve tamamen yanar, böylece CO_2 ve H_2O oluşur. CO_2 'in sera etkisini azaltmak motorlarda kullanılan toplam yakıt miktarını azaltmaktan geçmektedir [116-119].

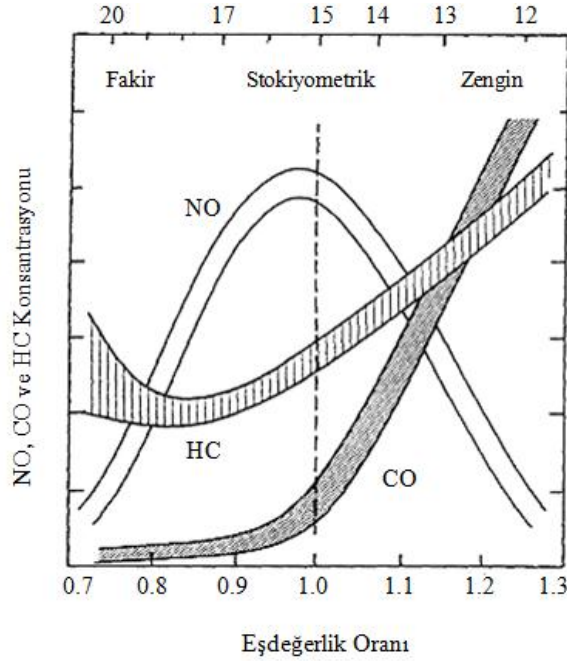
2.2. Motor Çalışma Karakteristikleri ve Yapısal Özelliklerin Emisyonlara Etkisi

2.2.1. Hava fazlalık katsayısı

Benzin ve dizel motorlarında hava fazlalık katsayısının (HFK) değişimi, emisyon oluşum miktarını önemli ölçüde etkilemektedir (Şekil 2.1). Benzin motorlarında ilk hareket, ivmelenme, maksimum güç gibi bazı çalışma durumları hariç HFK' nın stokiyometrik değerler civarında tutulması, karışımın tüm yanma odasında homojen olması, bütün silindirlere gönderilen yakıt ve hava miktarının eşit olması ve çevrimden çevrime farklılıklar bulunmaması amaçlanmıştır. Benzin motorlarında,

maksimum güç alınabilmesi için HFK' nın 0.9 değerlerinde, ekonomik çalışabilmesi için de HFK' nın 1.1 değerlerinde çalışması gerekmektedir. HFK' nın 1.15 den fakir olduğu karışım oranlarında, özel sistemler kullanılmadığında tutuşma güvenliği sağlanamayacaktır. Ancak CO emisyonların azaltılması için HFK' nın mümkün olduğu kadar arttırılması gerekmektedir. Bu durumda CO emisyonu CO₂ emisyonuna dönüşümü için yeterli oksijen sağlanacaktır. HC emisyonu da artan HFK ile yanmanın tamamlanması için yeterli oksijen sağlandığı için azalmaktadır. Ancak belli bir değerin üzerine çıkıldığında çok fakir karışımlarda alevin sönmesi söz konusu olduğundan, artan HFK ile HC emisyonları tekrar artış gösterecektir [106].

HFK' nın değişimi yanma sırasında ulaşılan sıcaklıkları etkilerken aynı zamanda yanma odasında mevcut oksijen miktarını da belirlemektedir. NO_x' lerin oluşumu hem sıcaklığın hem de mevcut oksijen miktarının fonksiyonu olduğu için HFK ' dan önemli ölçüde etkilenmektedir. Karışım fakirleşmesi sonucu yanma sıcaklığı düştüğü için, karışım zenginleştirilmesi sonucu da oksijen konsantrasyonu azaldığı için NO_x emisyonu azalma göstermektedir. Ancak NO_x emisyonu HFK' nın 1.1 olduğu değerde maksimum olmaktadır [120-122].



Şekil 2.1. Eşdeğerlik oranının egzoz gazları emisyonu üzerine etkisi

2.2.2. Ateşleme avansı

Benzin motorlarında ateşleme avansının değişimi sonucu motorun gücü, soğutma suyuna giden ısı miktarı ve egzoz gaz sıcaklığı değişmekte ve sonuç olarak motor performansını etkilemektedir. Bu durum HC, CO ve NO_x emisyonlarını doğrudan etkilemektedir. Ateşleme avansının arttırılması ile yanma odası sıcaklık ve basıncı artmaktadır. Bunun sonucu olarak alev sönme bölgesi küçülecektir. Ancak gene de egzoz gazları sıcaklığı düştüğü için, egzoz sürecinde oksidasyon azalacağından toplam HC emisyonu artış gösterecektir[106].

Ateşleme zamanının CO emisyonu üzerinde etkisi oldukça azdır. Ateşlemenin çok geç yapılması sonucunda yanmanın tamamlanması için yeterli zaman bulunamayacağından, yanma bitmeden egzoz supabı açılacak ve daha oksidasyon işlemi tamamlanmadan CO gazları dışarı atılacaktır. Ancak ateşleme avansı bir miktar önceye alındığında hala çok sıcak olan egzoz gazları sıcaklıkların etkisi ile CO ile okside olacak ve CO emisyonlarında bir düşüş görülecektir. Ateşleme avansı daha fazla arttırıldığında ise CO emisyonu sabit bir şekilde kalacaktır.

NO_x için ise ateşleme zamanının etkisi fakir karışımlarda daha fazla, zengin karışımlarda ise daha az etkili olmaktadır. Ancak ateşleme avansının arttırılması NO_x emisyonunu arttırıcı doğrultuda etki etmektedir. Bu etki ateşleme avansının artışı ile birlikte maksimum basıncın artmasına yol açmaktadır. Maksimum basıncın artması NO_x artıcı bir etkendir. Stokiyometrik karışımlarda ise ateşleme avansı arttıkça NO_x emisyonları artmaktadır [123-124].

2.2.3. Devir sayısı

Motorun dönme sayısının artması, yanma odasındaki akışkan hareketlerini hızlandırmakta ve türbülans hareketleri artmaktadır. Bunun sonucu olarak benzin motorlarında cidar yakınındaki alev sönme bölgeleri ve alevin ilerlemesinde karşılaşılan sorunlar azalmakta ve daha iyi karışım sağlanmaktadır. Sonuç olarak motor dönme sayısının artması ile yanma iyileşeceğinden, HC emisyonlarında azalma olacaktır. Ayrıca egzoz kanalındaki türbülansın artması ile daha iyi karışım

sağlanması sonucu, egzoz gazları arasında bulunan yanmamış HC' lerin oksidasyonu da artış gösterecek ve HC emisyonu azalacaktır.

Devir sayısının değişimi CO emisyonuna etki etmemektedir. Çünkü CO' lerin oksidasyonu normal egzoz sıcaklıklarında karışımın iyiliği ile kontrol edilmekte olmayıp kinetik olarak sınırlıdır. Dönme sayısının artması sonucu artan türbülans miktarı alev hızını da artırmakta olduğundan, ısı kayıpları azalmakta ve sonuç olarak yanma odası sıcaklıkları artmaktadır. Ateşleme avansının sabit kalması şartıyla devir sayısı arttıkça, yanma süreci, sıcaklık ve basıncın kısmen düşük olduğu genişleme strokuna doğru kaymakta ve bu sayede NO_x' ler daha düşük seviyelerde olmaktadır [106,125].

2.2.4. Egzoz karşı basıncı

Egzoz karşı basıncının artışı sonucunda, silindirde bir önceki çevrimden kalan artık gazların miktarı da artar. Artık gazlar, yanma odası içerisinde yeni dolguyu seyreltecek kadar fazla etkiye sahip değil ise, HC emisyonu azalma gösterir.

Egzoz supabın kapanmasına yakın, cidardaki alev sönme tabakasının piston tarafından kazınması sonucu egzoz gazlarının bu bölümdeki HC konsantrasyonunu artırmaktadır. Zengin karışımlarda, yetersiz oksijen nedeniyle oluşan HC miktarı, alev sönme bölgesinden kaynaklanan HC miktarına oranla daha fazla olduğu için karşı basıncın etkisi de daha az olmaktadır. Aynı zamanda zengin karışım oranlarında alevin ilerlemesi açısından sorun bulunmadığı için egzoz karşı basıncındaki artış sonucu karışımın seyreltilmesi HC emisyonunda bir miktar azalmaya neden olacaktır. Ancak fakir karışımlarda, karışım daha da seyreltilmesi sonucu yanma açısından sorun çıkacağından HC emisyonu bu durumda artacaktır [106].

2.2.5. Supap bindirmesi

Benzin motorlarında emme ve egzoz supaplarının birlikte açık kalması durumunda, önce bir miktar egzoz gazı emme kanalına kaçacak ve daha sonra bu gazlar tekrar

emilen taze dolgu ile yanma odasına sokulacaktır. Böylece supap bindirmesi sonucunda HC emisyonlarında azalma olacaktır. Bu azalma nedeni, artık gazlarda çok az artış olmakta ve egzoz gazlarının yanmamış HC' leri içeren son kısmı yanma odasında kalarak yanmaktadır. Supap bindirme süresi fazla verilir ise yanmanın tamamlanması açısından sorun teşkil edeceğinden HC emisyonlarında artış olacaktır [106].

Supap bindirmesi zamanı, NO_x emisyonlarını da doğrudan etkilemektedir. Supap bindirme açısı arttırıldığında NO_x emisyonlarında önemli derecede azalma olmaktadır. Azalma nedeni emme ve egzoz supabın açık kalma süresi fazla olduğundan yanma odasına fazla miktarda yanmış gazlar dolmakta, bu sayede yanma sıcaklıklarını düşürmektedir. Karışım oranı sabit tutulduğu sürece, supap bindirmesinin CO emisyonu üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır.

2.2.6. Emme manifoldu basıncı

Benzin motorlarında silindire giren dolgu miktarı gaz kelebeği konumuna bağlı olarak ayarlanmaktadır. Gaz kelebeği konumu, emme manifoldu basıncını değiştirerek emisyonları etkilemektedir. Düşük emme manifoldu basınçlarında yanma başlangıcı ve alevin ilerlemesi açısından sorunlar bulunmaktadır. Bu nedenle HC konsantrasyonu artış gösterir. Ancak tutuşma sorunlarının bulunduğu durumlarda CO emisyonu azalmaktadır. Emme manifoldu basıncı artmasıyla, dolgu debisi artmaktadır. Bunun sonucu olarak hem CO hem de HC debisinde bir artış görülür. Ateşleme avansı değiştirilmeden emme manifoldu basıncının arttırılması durumunda, yanma daha geç tamamlanacaktır. Bu durumda yanmanın son kısımları genişleme zamanında gerçekleşeceği için sıcaklıklar düşecek ve NO_x emisyonu azalacaktır. Ancak genelde ateşleme avansı değiştirildiğinden NO_x emisyonu da basıncın artışı ile birlikte artış gösterir[106].

2.2.7. Yanma odası yüzey sıcaklıkları

Yanma odası cidar sıcaklıklarının değişimi motorun soğutma sistemi ile ilgilidir. Soğutma suyu sıcaklıkları artması sonucu, soğutma suyuna giden ısı miktarı azalır ve

yanma odası sıcaklığı artış gösterir. Bu durumda alev sönme bölgesi azalacağından HC ve CO emisyonları azalır. Ancak bu arada sıcaklıkların yükselmesi nedeniyle NO_x emisyonu artış gösterir[106].

2.2.8. Havadaki nem oranı

Karışım içerisindeki nem miktarı artışı, maksimum alev sıcaklığını düşüreceği için NO_x oluşumu da azalacaktır. Nem oranının değişimi, HC ve CO emisyonu üzerinde fazla bir etki sahip olmamakla beraber, NO_x emisyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [106].

2.2.9. Supap zamanlaması

Supap zamanlaması yanma koşullarını etkilediğinden, egzoz gazları emisyonlarını direkt etkilemektedir. Zamanından önce egzoz supabının açılması durumunda, yanma tamamlanmadan dışarı atılacağından HC ve CO emisyonunda artış olacaktır. Erken açılmayı karşılayacak şekilde, gücün sabit tutulabilmesi amacıyla dolgunun bir miktar arttırılması sonucu, sıcaklık ve basınç artacağından NO_x emisyonu da artar. Bu durumda ayrıca dolgu debisinin artışı sonucu HC ve CO emisyonu artış gösterir. Egzoz supabının kapanma zamanını erkene alınması HC emisyonunu önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Egzoz supabı kapanma zamanını sonraya alınması da HC emisyonunun azalmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan standart zamanına göre supabın erken ya da geç kapanması durumunda azalan egzoz gaz sıcaklıklarına ve artık gaz miktarındaki değişime bağlı olarak NO_x emisyonları azalmaktadır. Egzoz supabı kapanış zamanlaması, CO emisyonu üzerinde belirgin bir etkiye sahip değildir [14,106, 126-129].

Emme supabının kapanma zamanının değiştirilmesi HC, CO ve NO_x emisyonları üzerinde belirgin bir etki yapmaktadır. Emme supabının düşük yüklerde erken kapanması gaz sıcaklıklarını düşüreceğinden NO_x emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca HC emisyonları da bu düşük yüklerde düşük olmaktadır [130].

2.2.10. Yanma odası yüzey / hacim oranı

Yanma odası yüzey/hacim oranı direkt olarak HC ve NO_x emisyonlarını etkilemektedir. Yanma odası cidarlarının alanı büyüdükçe, cidarlara yakın bölgelerde alev sönme bölgelerini arttıracak buda HC emisyonlarının artmasına yol açacaktır. Yüzey/hacim oranı büyüdükçe alev sönme bölgesi büyür ve yanmamış HC emisyonu artar. Yüzey/hacim oranının artırılması ile soğutma suyuna giden ısı transferi artacağından NO_x emisyonunda düşme olacaktır. Motora ait çap, strok gibi büyüklüklerin oranları aynı tutularak motor boyutları küçültüldüğünde, yüzey/hacim oranı artacaktır. Aynı şekilde, sıkıştırma oranının ve silindir sayısının artırılması, strok hacminin azaltılması durumunda yüzey/hacim oranı da artacaktır [108].

2.2.11. Sıkıştırma oranı

Sıkıştırma oranı, NO_x ve HC emisyonları üzerinde etkilidir. Sıkıştırma oranının artması, yanma sonu sıcaklıklarının artmasına neden olacağından NO_x emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Fakat bu artış HC emisyonların azalmasına sebep olur. Sıkıştırma oranının azaltılması durumunda ise, yüzey/hacim oranı azalacağından HC emisyonlarında azalmaya sebep olacaktır [106].

2.2.12. Yanma odası şekli

Emisyonlar ve motor performans parametrelerini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Sıkıştırma oranı sabit tutulduğunda, yanma odası şekli yüzey/hacim oranını önemli derecede değiştirecektir. Yanma odası şekli yüzey sıcaklıklarını, alev sönme bölgesinin kalınlığını etkileyerek hem HC hem de NO_x emisyonlarını etkileyecektir. Ayrıca pistonun üst yüzeyi ile kompresyon segmanı arasında kalan piston çevresel boşluğu alev sönme bölgesini oluşturmaktadır. Bu alan HC emisyonlarını doğrudan arttırmaktadır [106].

2.3. Buji Ateşlemeli Motorlarda Kirletici Emisyonlar İçin Alınan Önlemler

Motorlu taşıtlarda egzoz emisyonlarının kontrolünde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlar yanma öncesi alınan önlemler, yanma sırasında alınan önlemler ve yanma sonrası alınan önlemler olarak sıralanmaktadır.

Yanma öncesi alınan önlemler, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, alternatif yakıt kullanımı gibi yöntemlerdir. Buji ateşlemeli motorlarda, kirletici emisyonları azaltmak için katkı maddeleri, emülsife yakıt, LPG, alkoller, hidrojen gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Yakıt kalitesinin artırılması, yakıt tüketimini azalttığı gibi egzozdan çıkan zararlı emisyon miktarlarının da azalmasına neden olmaktadır. Yakıt bileşiminde yapılacak değişiklikler ile egzoz gazlarındaki CO, NO_x ve HC' lerin azaltılması amaçlanmaktadır.

Yanma sırasında alınan önlemler çoğunlukla yapısal nitelikli önlemlerdir. Buji ateşlemeli motorlarda motor tasarımına ilişkin çeşitli parametrelerin değişimi egzoz gazları içerisindeki HC, CO ve NO_x miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametreler yukarıda izah edilmiştir.

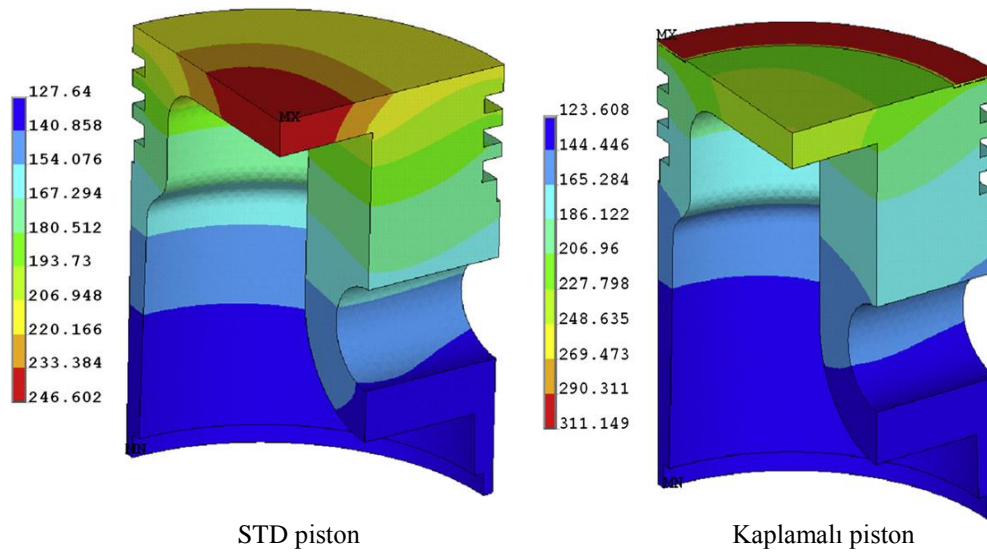
Yanma sonrası alınan önlemler ise oluşumuna engel olunamayan kirletici bileşenlerin daha sonra egzoz gazları içinde temizlenmesidir. Bu işlemi termik reaktör ve katalitik konvertör gibi elemanlar yapmaktadır [14,131].

2.3.1. Seramik kaplama yöntemi

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliğinin, kanuni ve çevresel zorunluluklardan dolayı daha temiz ve daha verimli çalışan motorlar üzerindeki araştırmaları yoğunlaştırmaktadır. Bu amaçla, emisyonları azaltıp, verimi arttırmak için termal bariyer kaplama uygulamaları kullanılabilir.

Buji ateşlemeli motorlarda kısmi seramik kaplama uygulamaları, özellikle kısmi eksik yanma ürünlerinin azaltılması için araştırmacılar tarafından etkili bir yöntem olarak görülmektedir. İşlemin uygulanmasıyla yanma odası yüzey sıcaklıkları

artmakta, HC emisyonlarının oksidasyon hızları artarak emisyon seviyelerinde azalmalar kaydedilebilmektedir. HC emisyonlarının en önemli oluşum kaynakları; silindir içerisi dar çizik ve boşluklar; piston çevresel boşluğu, segman boşlukları; yanma odası cidarlarıdır (alev sönme bölgeleri). Bu kaynaklardan oluşan HC emisyonlarının azaltılması amacıyla, piston tepesi kısmi olarak kaplanmaktadır. Kaplama işlemi piston dış cidarlarına yakın bölgede belirli bir kalınlık ve değişik ısı kapasiteli malzemelerle yapılmaktadır. Bu uygulama ile özellikle alev sönme bölgelerine yakın piston tepesinde, sıcaklıkların yükselmesiyle, piston çevresel ve segman boşluklarından kaynaklanan HC emisyonları dikkate değer oranda azaltılması sağlanabilmektedir [51-99]. Şekil 2.2' de Cerit ve ark.[52], tarafından kısmi yalıtılmış bir buji ateşlemeli motorda piston üst yüzeyine seramik malzeme ile kaplanması sonucu STD ve kaplamalı duruma göre piston üst yüzey sıcaklık dağılımını gösteren bir teorik çalışma sonucu görülmektedir. Şekilde STD pistonda maksimum sıcaklık pistonun orta kısmında oluşurken, kaplamalı pistonda ise pistonun dış çevresel kısmında oluşmaktadır.



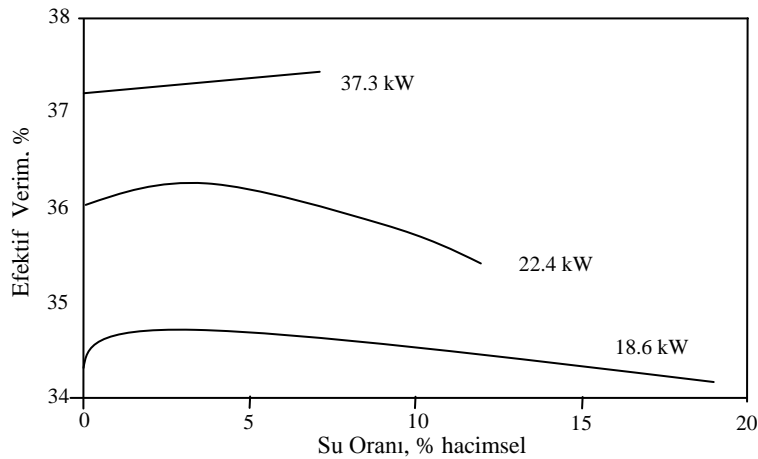
Şekil 2.2. Buji ateşlemeli motorlarda STD ve kaplamalı duruma göre piston üst yüzey sıcaklık dağılımı [52]

CO emisyonlarında ise kısmi kaplama yöntemi ile birlikte azalmalar görülmektedir. Fakat artan gaz sıcaklıkları silindir içi sıcaklıkların yükselmesine sebep olduğundan NOx emisyonlarında artmalar olmaktadır.

2.3.2. Motora su-buhar gönderilmesi

İçten yanmalı motorlardan çevreye salınan kirletici emisyonların azaltmak amacıyla silindirine su gönderme yöntemleri kullanılmaktadır. Motora su gönderilmesi ile dizel ve benzin motorlarından çevreye salınan zararlı NO_x , HC ve CO emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır. Dizel ve benzin motoruna su gönderilmesi durumunda NO_x emisyonlarında ciddi oranda azalmalar meydana gelmektedir. [106].

Motor silindirine suyun sevk edilmesi durumunda, sıkıştırma esnasında buhar haline gelen su, yakıt ile temasında yüzey gerilmesinin çok küçük olmasından dolayı, yakıtın çok daha küçük damlacık çaplarına bölünmesine neden olmaktadır. Yakıtın daha küçük damlacık çaplarına bölünmesi yüzey alanını arttırmakta ve yüzey alanının artması da yanma esnasında yakıt ile havanın çok daha iyi karışmasını sağlamaktadır [58]. Silindir içerisinde karışımın daha iyi olması motor yanma veriminin artmasına ve buna bağlı olarak motor performansının iyileşmesini sağlamaktadır. Şekil 2.3' de yük durumu ve su miktarına bağlı olarak efektif verimdeki değişim görülmektedir.



Şekil 2.3. Motor yükü ve su oranına bağlı olarak efektif verimdeki değişim [65]

Suyun motora gönderilmesi yaygın olarak üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- Su - yakıt karışımı (emülsife yakıt),
- Suyun giriş havasına fumigasyonu
- Suyun silindir içersine direkt enjeksiyonu, şeklindedir.

Emülsife yakıtlar motora gönderilen yakıt içersine suyun belirli oranlarda karıştırılması ile oluşmaktadır. Bu yakıtlar motorun yakıt sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Emülsife yakıtın hazırlanması iki şekilde olmaktadır. Birincisi, yakıt ile suyun belirli oranlarda doğrudan karıştırılması, diğeri ise yakıt ve suyun bir stabilizatör ya da surfektant (Span, Tween vb.) kullanılarak karıştırılması şeklindedir. Emülsife yakıtlarda stabilizatör maddelerinin kullanılması, yakıt ile suyun yoğunluk farkından dolayı meydana gelecek faz ayrışmasını ve suyun yakıt sisteminde yol açabileceği korozyon ve aşınma problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Stabilizatör kullanımı durumunda su yakıt içersine hapsedilmektedir.

Suyun giriş havasına fumigasyonu yöntemi; motorun emme havası içersine su ilavesi olarak yapılmaktadır. Ishida ve ark. [70], motor emme manifolduna püskürtülen su miktarı, birim hava başına kütleli olarak % 1 artırıldığında NO_x emisyonlarında % 20 civarında azalmanın olduğunu ifade etmektedirler. Ancak, bu yöntemde emme manifolduna gönderilen suyun miktarı önemlidir. Püskürtülen suyun tamamı emme havası içersinde buharlaşmadığı takdirde, sıvı haldeki su silindir yüzeylerine çarparak yağ filminin bozulmasına yol açmaktadır [71]. Bu durum, emme supabında korozyona, silindir cidarında ise aşınmaların hızlanmasına neden olabilmektedir [132]. Fumigasyon yönteminde suyun emme supabı açık olduğu zaman diliminde yapılması önemli bir unsurdur. Eğer, emme supabı kapalı durumda su püskürtülürse, supap arkasında su birikmesi ve buna bağlı olarak korozyon oluşacaktır.

Suyun motora gönderilme yöntemlerinden sonuncusu ise suyun direkt olarak yanma odasına gönderilme yöntemidir. Suyun yanma odasına sevki bir enjektör vasıtası ile olmaktadır. Direkt enjeksiyon sisteminde su silindire farklı şekillerde gönderilmektedir. Bunlardan biri ayrı bir enjektörle suyun yanma odasına

püskürtülmesi, diğeri ise mevcut yakıt enjektörü kullanılarak suyun püskürtülmesidir. Ayrıca diğeri bir yöntem ise yakıt püskürtme anında elektronik olarak yakıt ve su hattının kontrol edilmesidir. Burada, silindire püskürtme kademeli olarak (yakıt-su-yakıt gibi) yapılabilmektedir. Sistemde yakıtın basılması için yüksek basınç pompasından hariç, su içinde yüksek basınca sahip ayrı bir pompa mevcuttur. Elektronik siviçerle yakıt ve su akışı elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmektedir.

Motor silindirine suyun gönderilmesi amacıyla kullanılan tekniklerin, motor emisyonları ve performans üzerine olumlu etkilerinin yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Motorda emulsife yakıt kullanımı sırasında yakıt sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmaz ise, su yüzdesi belirli bir değerin üzerine çıkarılamamakta ve NO_x seviyesindeki azalma miktarı sınırlı olmaktadır. Fumigasyon yönteminde ise, su emme periyodunda motora enjekte edilmektedir. Bu durumda püskürtülen su oranının motora giren hava içerisinde tamamının buharlaşabileceği miktarda ayarlanması gerekir. Aksi takdirde su silindir içerisinde ve supap mekanizmasında aşınma ve korozyona neden olacaktır. Direkt enjeksiyon sisteminde suyun yanma odasına gönderilmesi aşınma ve korozyon problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Ancak, sistemin oluşturulması ileri teknoloji gerektirdiğinden dolayı maliyetinin çok yüksek olması dezavantajdır [65,132- 133].

Bu olumsuzluklardan dolayı motor silindirine suyun buhar fazında gönderilmesi etkili bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Buhar emme havası içerisine enjekte edilmekte ve bu şekilde silindire doldurulmaktadır. Buhar enjeksiyonu, yanma üzerine olan etkilerinden dolayı motor emisyon değerlerinde ve performans parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Su buharının buharlaşma esnasında ısı kapasitesinden dolayı havaya göre daha çok ısı çekmesi yanma sonu sıcaklıkları düşürmekte ve NO_x emisyonlarında azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca, yüzey gerilmesinin yakıttan daha küçük olmasından dolayı ısınma periyodunda yakıttan daha erken buharlaşmasına bağlı olarak silindir içerisinde mikro-patlamların olduğu literatüre bağlı olarak söylenebilir. Bu etki yakıt hava karışımının daha iyi karışmasına neden olup, yanma veriminin artmasına neden olabilmektedir. Bu sayede artan yanma verimine bağlı olarak silindir içi maksimum

sıcaklıklar azaltılmış olsa da yakıt hava karışımının daha iyi yanmasından dolayı HC emisyonlarında da azalmalar sağlanabilmektedir. Ayrıca, yanma sonu ulaşılan yüksek sıcaklarda, tam yanma ürünü olan CO₂ üzerine ısı çekerek ayrışmakta ve kısmi eksik yanma ürünü olan CO'ya dönüşmektedir. Sıcaklıkların düşürülmesi, ayrışma reaksiyon hızını azaltarak, yanma veriminin artmasıyla birlikte CO emisyonlarında da olumlu neticeler alınabilmektedir.

2.3.3. Alternatif yakıt kullanımı

Metil alkol (CH₃OH), odundan damıtma yöntemiyle elde edilebildiği gibi sentetik olarak katalizör ile beraberinde karbon monoksit ve hidrojenden de üretilebilmektedir. Etil alkol (C₂H₅OH), karbonhidratların fermantasyonu ile hazırlanmaktadır. Alkollerin oktan sayıları benzine göre daha yüksektir. Benzine göre yüksek oktan sayısına sahip olmaları nedeniyle motor gücü ve verimi açısından daha yüksek sıkıştırma oranlarında motorun çalıştırılabilmesine olanak sağlarlar. Sıkıştırma oranı, ateşleme zamanı ve hava/yakıt oranı gibi çeşitli motor parametreleri optimum seviyede tutularak, standart benzin motoruna göre daha yüksek moment ve güç elde edilebilir.

Metanolün ve etanolün gizli buharlaşma ısıları benzinin gizli buharlaşma ısısından daha yüksektir. Örneğin metanolün gizli buharlaşma ısısı benzinin gizli buharlaşma ısısından yaklaşık 3,4 kat daha yüksektir. Alkollerin bu özelliği, buji ile ateşlemeli motorlarda çıkış gücü için bir avantaj sağlar. Yakıt tanecikleri sıvı fazdan buhar fazına geçerken çevreden aldıkları ısı nedeniyle giren hava sıcaklığını düşürmekte bu sayede volümetrik verimin iyileşmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda alkoller, yanma odası sıcaklığını düşürerek kendi kendine tutuşma eğilimini ve NO_x emisyonlarını azaltmaktadırlar. Metanolün ve etanolün benzine göre daha düşük alev sıcaklığının olması, yanmanın iyileşmesine ve yanma ürünleri içerisinde NO_x ve CO'nun azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca alkoller, sera etkisini önemli ölçüde etkileyen CO₂ emisyonlarında azalmalara neden olmaktadır. Alkoller, benzin yakıtının aksine daha az yanmamış hidrokarbon üretir.

BÖLÜM. 3 TEORİK MODEL

Bu çalışmada, bir benzin motoruna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda; efektif güç, moment, ÖYS, efektif verim ve NO emisyonunda meydana gelen değişimler teorik olarak analiz edilmiştir. Teorik analizinde sıfır-boyutlu tek bölgeyi yanma modeli kullanılmıştır. Silindir içerisinde, enerjinin korunumu eşitliği diferansiyel formda aşağıdaki şekilde yazılabilir [134].

$$m \frac{du}{d\theta} + u \frac{dm}{d\theta} = -\frac{dQ_b}{d\theta} - \frac{dQ_u}{d\theta} - p \frac{dV}{d\theta} - \frac{dm_1}{d\theta} h_1 \quad (3.1)$$

Burada m_1 ve h_1 sırasıyla kaçak dolgu kütlesi ve kaçak dolgunun entalpisidir. Denklemin sol tarafındaki ilk terim giren enerji oranı, ikinci terim ise krank açısına bağlı olarak yakıt kütlesidir. Yanmış ve yanmamış bölgeden ısı transferi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{Q}_b = h_r A_b T_{bw} \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_u = h_r A_u T_{uw} \quad (3.3)$$

Burada h_r yanmış ve yanmamış bölgedeki ısı transfer katsayısıdır ve her iki bölge için aynı değeri almaktadır. A_b ve A_u yanmış ve yanmamış gazlar için silindirin ısı transfer alanıdır. $T_{uw} = T_u - T_w$ ve $T_{bw} = T_b - T_w$, T_b , T_u ve T_w yanmış bölgedeki, yanmamış bölgedeki ve silindir cidarındaki sıcaklıklardır [134]. Krank açısına bağlı strok hacmi değişimi;

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi}{8} B^2 S \sin \theta \left[1 + \varepsilon \frac{\cos \theta}{(1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.4)$$

Diferansiyel denklemi çözmek için modelde aşağıdaki ifade kullanılmıştır. Giren enerji;

$$\frac{du}{d\theta} = c_p - \frac{Pv}{T} \left(\frac{\partial \ln v}{\partial \ln T} \right)_p \frac{Dt}{d\theta} - v \left[\frac{\partial \ln v}{\partial \ln T} + \frac{\partial \ln v}{\partial \ln P} \right]_T \frac{dP}{d\theta} \quad (3.5)$$

Segmanlardan kartere zaman bağlı (krank açısı) yanmış gaz sızıntısı;

$$\frac{dm_1}{d\theta} = \frac{C_m}{\omega} \quad (3.6)$$

Burada; C soğutucu akışkana giden kayıp enerji haricinde silindir içerisindeki diğer tüm kayıpları tanımlar. ω ise açılal hızdır. Silindir içerisindeki kütle dengesi ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$m = m_y + m_f \quad (3.7)$$

Burada; m_y ve m_h sırasıyla püskürtülen yakıtın ve havanın kütesidir. Denklem 3.7' deki eşitlik diferansiyel formda yazılırsa;

$$\frac{dm}{d\theta} = \frac{dm_y}{d\theta} + \frac{dm_h}{d\theta} \quad (3.8)$$

Modelde sıkıştırma başlangıcından genişleme zamanı sonuna kadar olan periyotta diferansiyel denklem sistemini içeren hesaplamalar kullanılmıştır. Krank açısına bağlı basınç, yanmış ve yanmamış gaz sıcaklıkları, iş, kaçak dolgu ısı ve kayıp ısı miktarı sırasıyla (3.9)-(3.16) arasındaki denklemlerle verilmiştir [135].

$$\frac{1}{m} \left(\frac{dV}{d\theta} + \frac{VC}{\omega} \right) + h_{rr} \frac{A_{cyl}}{\omega m} \left(\frac{v_b}{C_{p,b}} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \sqrt{x} \frac{T_b - T_w}{T_b} + \frac{v_u}{C_{p,u}} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} (1 - \sqrt{x}) \frac{T_u - T_w}{T_u} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{-(v_b - v_u) \frac{dx}{d\theta} - v_b \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \left[\frac{dx}{d\theta} - \frac{(x - x^2)C}{\omega} \right]}{x \left[\frac{v_b^2}{C_{p,b} T_b} \left(\frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \right)^2 + \frac{v_b}{P} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln P} \right] + (1 - x) \left[\frac{v_u^2}{C_{p,u} T_u} \left(\frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \right)^2 + \frac{v_u}{P} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln P} \right]} \quad (3.10)$$

Burada, x yanmış gaz kesri, A_{cyl} ise silindirin ısı transfer alanı ($A_b + A_u$).

$C_{p,b}, C_{p,u}, v_b, v_u, h_b, h_u$ sırasıyla, yanmış ve yanmamış bölgedeki gazların sabit hacimdeki özgül ısı, özgül hacim ve özgül entalpileridir.

$$\frac{dT_b}{d\theta} = - \frac{h_{rr} A_{cyl} \sqrt{x} (T_b - T_w)}{\omega m C_{p,b} x} + \frac{v_b}{C_{p,b}} \frac{\partial \ln v_b}{\partial \ln T_b} \frac{dP}{d\theta} + \frac{(h_b - h_u)}{x C_{p,b}} \left[\frac{dx}{d\theta} - \left(x - x^2 \frac{c}{\omega} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$\frac{dT_u}{d\theta} = - \frac{h_{rr} A_{cyl} (1 - \sqrt{x}) (T_u - T_w)}{\omega m C_{p,u} (1 - x)} + \frac{v_u}{C_{p,u}} \frac{\partial \ln v_u}{\partial \ln T_u} \frac{dP}{d\theta} \quad (3.12)$$

$$\frac{dW}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} \quad (3.13)$$

$$\frac{dH_1}{d\theta} = \frac{C_m}{\omega} \left[(1 - x^2) h_u + x^2 h_b \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{dQ_1}{d\theta} = \frac{h_{rr}}{\omega} A_{cyl} \left[\sqrt{x} (T_b - T_u) + (1 - \sqrt{x}) T_u - T_w \right] \quad (3.15)$$

Hohenberg ısı transfer katsayısı [136]:

$$h_{rr} = C_1 V^{-0.06} P^{0.8} (x T_b + (1 - x) T_u)^{-0.4} (\bar{S}_p + C_2)^{0.8} \quad (3.16)$$

Burada \bar{S}_p ortalama piston hızı $C_1=130$ ve $C_2=1.4$

$$x = 1 - e^{-a_v \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right)^{(n_a+1)}} \quad (3.17)$$

$$\frac{d_x}{d\theta} = a_v \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right)^{m_a} \left(\frac{m_a + 1}{\theta_b} \right) e^{-a_v \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right)^{(m_a+1)}} \quad (3.18)$$

x yanma kesri olarak verilir. Yanmanın başlangıcında 0, bitişinde 1 olur. a_v ve m_a Viebe katsayılarıdır. Viebe katsayısı deneylerde kullanılan motor özelliklerine uygun olarak belirlenmiştir. θ , anlık krank açısı, θ_s yanmanın başladığı krank açısı ve θ_b yanma süresinin krank açısı olarak ifade edilir.

Yukarıda verilen denklemleri çözmek için modifiye edilmiş RATES ve STATE kodları kullanılmıştır. Isı yayılımı, silindir içi basınç ve silindir içi sıcaklık değerleri yukarıdaki bağıntılar kullanılarak matlab programında yazılan kodlar vasıtasıyla hesaplanmıştır [134,137]. Döndürme momenti, efektif güç, efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatı aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$\frac{dW_e}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} \quad (3.19)$$

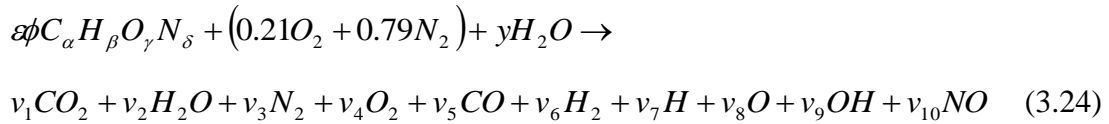
$$P_e = \frac{W_e V}{120} \quad (3.20)$$

$$M_d = \frac{P_e * 9550}{N} \quad (3.21)$$

$$\eta_e = \frac{W_e}{m_y H_u} = \frac{P_e}{m_y H_u} \quad (3.22)$$

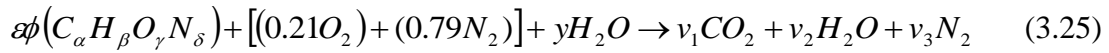
$$Be = \frac{m_y}{W_e / 3.6 * 10^6} \quad (3.23)$$

NO emisyonları reaksiyon kinetiği açısından bulunmaktadır. NO emisyonları on adet yanma ürününü (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , CO , H_2 , H , O , OH , NO) göz önüne alınarak genişletilmiş Zeldovich mekanizması kullanılarak hesaplanmıştır [10]. Bu çalışmada Olikara ve Borman tarafından geliştirilen iki koda (FARG ve ECP) H_2O ilavesi yapılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilen kodlar kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir [137-139].



Gonca tarafından geliştirilen programda kullanılan yanma reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir [137–139].

Tam yanma koşullarında $\phi = 1$ iken;



Kimyasal eşitlikten karbon (C) dengesi;

$$v_1 = \varepsilon\alpha \quad (3.26)$$

Hidrojen (H) dengesi;

$$v_2 = \frac{\varepsilon\beta}{2} + y \quad (3.27)$$

Azot (N) dengesi;

$$v_3 = \frac{\varepsilon\delta}{2} + 0.79 \quad (3.28)$$

Oksijen (O) dengesi;

$$2v_1 = \varepsilon\gamma + 0.21 \cdot 2 + y - v_2 \quad (3.29)$$

$$v_1 = \frac{\varepsilon\gamma}{2} + 0.21 + \frac{y}{2} - \frac{\varepsilon\beta}{4} - \frac{y}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{v_1}{\alpha}$$

$$v_1 = \frac{v_1\gamma}{2\alpha} + 0.21 - \frac{v_1\beta}{4\alpha}$$

$$v_1 \left(1 - \frac{\gamma}{2\alpha} + \frac{\beta}{4\alpha} \right) = 0.21$$

$$(\varepsilon\alpha) \left(1 - \frac{\gamma}{2\alpha} + \frac{\beta}{4\alpha} \right) = 0.21$$

$$\varepsilon = \frac{0.21}{\left(\alpha - \frac{\gamma}{2} + \frac{\beta}{4} \right)}$$

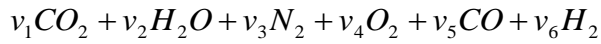
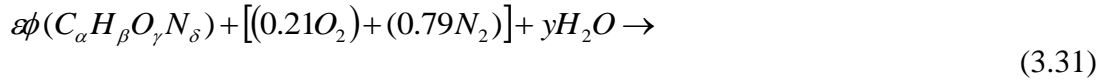
Burada y püskürtülen buharın mol kesridir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$y = \frac{K_{\%} M_y}{M_b} \quad (3.30)$$

Burada M_y ve M_b toplam yakıt ve buharın moleküler ağırlığıdır. $K_{\%}$ ise buhar kütlesinin toplam yakıt kütlesine oranıdır ve aşağıdaki tanımlanır.

$$K_{\%} = \frac{m_y}{m_b} \quad (3.31)$$

Eksik yanma koşullarında $\phi < 1$ ve $T \leq 1000$ K iken;



Karbon (C) dengesi;

$$v_1 = \varepsilon\phi\alpha \quad (3.33)$$

Hidrojen (H) dengesi

$$v_2 = \frac{\varepsilon\phi\beta}{2} + y \quad (3.34)$$

Azot (N) dengesi;

$$v_3 = \frac{\varepsilon\phi\delta}{2} + 0.79 \quad (3.35)$$

Oksijen (O) dengesi;

$$\varepsilon\phi\gamma + 2*0.21 + y = 2v_1 + v_2 + 2v_4 \quad (3.36)$$

$$\varepsilon\phi\gamma + 0.42 + y = 2\varepsilon\phi\alpha + \frac{\varepsilon\phi\beta}{2} + y + 2v_4$$

$$v_4 = \frac{\varepsilon\phi\gamma}{2} + 0.21 - \frac{\varepsilon\phi\beta}{4} - \varepsilon\phi\alpha \quad v_4 = -\phi 0.21 + 0.21$$

$$v_5 = 0 \quad v_6 = 0$$

Eksik yanma koşullarında $\phi > 1$ ve $T \leq 1000$ K iken ($v_4=0$). Denklem 3.32' de;

Karbon (C) dengesi;

$$v_1 = \varepsilon\phi\alpha - v_5 \quad (3.37)$$

Hidrojen (H) dengesi;

$$v_2 = \frac{\varepsilon\phi\beta}{2} + y - v_6 \quad (3.38)$$

Azot (N) dengesi;

$$v_3 = \frac{\varepsilon\phi\delta}{2} + 0.79 \quad (3.39)$$

Oksijen (O) dengesi;

$$\phi\varepsilon\gamma + 2*0.21 + y = 2v_1 + v_2 + v_5 \quad (3.40)$$

$$\phi\varepsilon\gamma + 0.42 + y = 2(\phi\varepsilon\alpha - v_5) + \frac{\phi\varepsilon\beta}{2} + y - v_6 + v_5$$

$$\phi\varepsilon\gamma + 0.42 = 2\phi\varepsilon\alpha - 2v_5 + \frac{\phi\varepsilon\beta}{2} - v_6 + v_5$$

$$\phi\varepsilon\gamma + 0.42 - 2\phi\varepsilon\alpha + v_5 - \frac{\phi\varepsilon\beta}{2} = -v_6 \Leftrightarrow \phi\varepsilon\left(\gamma - 2\alpha - \frac{\beta}{2}\right) + 0.42 + v_5 = -v_6$$

$$\phi \frac{0.21}{\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right)} \left(\gamma - 2\alpha - \frac{\beta}{2}\right) + 0.42 + v_5 = -v_6$$

$$\phi*0.21 - 2 + 0.42 - v_5 = -v_6 \quad v_6 = 0.42(\phi - 1) - v_5$$

$$\phi\varepsilon\gamma + 2*0.21 + y = 2v_1 + v_2 + v_5 \quad \phi\varepsilon\gamma + 0.42 + y - (2\phi\varepsilon\beta - 2v_5) = v_2 + v_5$$

$$v_2 = \phi\varepsilon(\gamma - 2\alpha) + 0.42 + y + v_5$$

$$K = \frac{v_2 v_5}{v_1 v_6}; v_5 = \frac{K v_1 v_6}{v_2} \quad (3.41)$$

$$v_5 = \frac{K(\phi\varepsilon\alpha - v_5)(0.42(\phi - 1) - v_5)}{0.42 + \phi\varepsilon(\gamma - 2\alpha) + y + v_5} \quad (3.42)$$

$$z_1 = \phi \epsilon \alpha \quad (3.43)$$

$$z_2 = 0.42(\phi - 1) \quad (3.44)$$

$$z_3 = 0.42 + \phi \epsilon (\gamma - 2\alpha) + y \quad (3.45)$$

$$v_5 = \frac{K(z_1 - v_5)(z_2 - v_5)}{z_3 + v_5} \quad (3.46)$$

$$z_3 v_5 + v_5^2 - K(z_1 z_2 - z_1 v_5 - z_2 v_5 + v_5^2) = 0 \quad (3.47)$$

$$v_5^2(1 - K) + (z_1 + z_2)Kv_5 - Kz_1 z_2 + z_3 v_5 = 0 \quad (3.48)$$

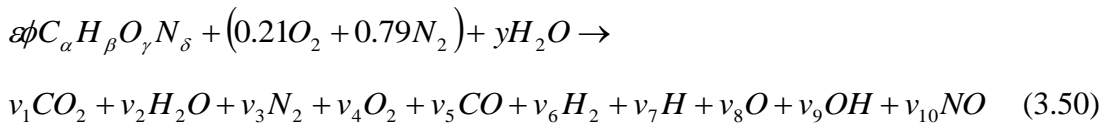
Kökler $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ bağlantısıyla bulunur.

$$a = 1 - K$$

$$b = (\phi \epsilon \alpha + 0.42(\phi - 1))K + \phi \epsilon (\gamma - 2\alpha) + 0.42 + y \quad (3.49)$$

$$c = -K \phi \epsilon \alpha [0.42(\phi - 1)]$$

Eksik yanma koşullarında $\phi < 1$ ve $T \geq 1000$ K iken;



$$\phi \alpha = (y_1 + y_5)NY \quad (3.51)$$

$$\phi \beta + 2y = (2y_2 + 2y_6 + y_7 + y_9)NY \quad (3.52)$$

$$\phi \gamma + 2 * 0.21 + y = (2y_1 + y_2 + 2y_4 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10})NY \quad (3.53)$$

$$\varepsilon\phi\gamma + 2*0.79 = (2y_3 + y_{10}) \quad (3.54)$$

Burada NY toplam mol sayısıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$NY = \sum_{i=1}^{10} v_i v e \sum_{i=1}^{10} y_i - 1 = 0 \quad (3.55)$$

$$y_2 + 2y_6 + y_7 + y_9 - (y_1 + y_5) \frac{\varepsilon\phi\beta + 2z}{\varepsilon\phi\alpha} = 0 \quad (3.56)$$

$$2y_1 + y_2 + 2y_4 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10} - \frac{\varepsilon\phi\gamma + 2*0.21 + z}{\varepsilon\phi\alpha} (y_1 + y_5) = 0 \quad (3.57)$$

$$2y_3 + y_{10} - \frac{\varepsilon\phi\gamma + 2*0.79}{\varepsilon\phi\alpha} (y_1 + y_5) = 0 \quad (3.58)$$

Yanma ürünlerinin mol kesirleri y_3, y_4, y_5 ve y_6 ' ya bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$y_7 = c_1 y_6^{1/2}, y_8 = c_2 y_4^{1/2}, y_9 = c_3 y_4^{1/2} y_6^{1/2}, y_{10} = c_4 y_4^{1/2} y_3^{1/2}, y_2 = c_5 y_4^{1/2} y_6, y_1 = c_6 y_4^{1/2} y_5 \quad (3.59)$$

$$c_1 = \frac{K_1}{p^{1/2}}, c_2 = \frac{K_2}{p^{1/2}}, c_3 = K_3, c_4 = K_4, c_5 = K_5 p^{1/2}, c_6 = K_6 p^{1/2}$$

K değerleri denge sabitleridir ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$\log K_i = A \ln \left(\frac{T}{1000} \right) + \left(\frac{B}{T} \right) + C + (DT) + (ET^2) \quad (3.60)$$

A, B, C, D ve E değerleri JANAF tablolarından alınan katsayılarıdır. 1000 K' in altındaki sıcaklıklar modifiye edilmiş FARG kodu ile 1000 K' in üzerindeki sıcaklıklar ise modifiye edilmiş ECP kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [137].

Hız sabiti;

$$k = A_A T^{BA} e^{-\frac{E_A}{T}} \quad (3.61)$$

NO oluşum hızı [$\text{mol cm}^{-3} \text{s}^{-1}$] aşağıdaki şekilde bulunur [10];

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \frac{2R_1(1-\alpha^2)}{1 + \frac{\alpha R_1}{R_2 + R_3}} \quad (3.62)$$

Burada; $\alpha = \frac{[\text{NO}]}{[\text{NO}]_e}$ ve []_e eşitlik konsantrasyonunu ifade eder. 3.62 nolu eşitlikte

kullanılan diğer sabitler de aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$R_1 = k_{+1} [\text{N}_2]_e [\text{O}_2]_e = k_{-1} [\text{NO}]_e [\text{N}]_e \quad (3.63)$$

$$R_2 = k_{+2} [\text{O}_2]_e [\text{N}]_e = k_{-2} [\text{NO}]_e [\text{O}]_e \quad (3.64)$$

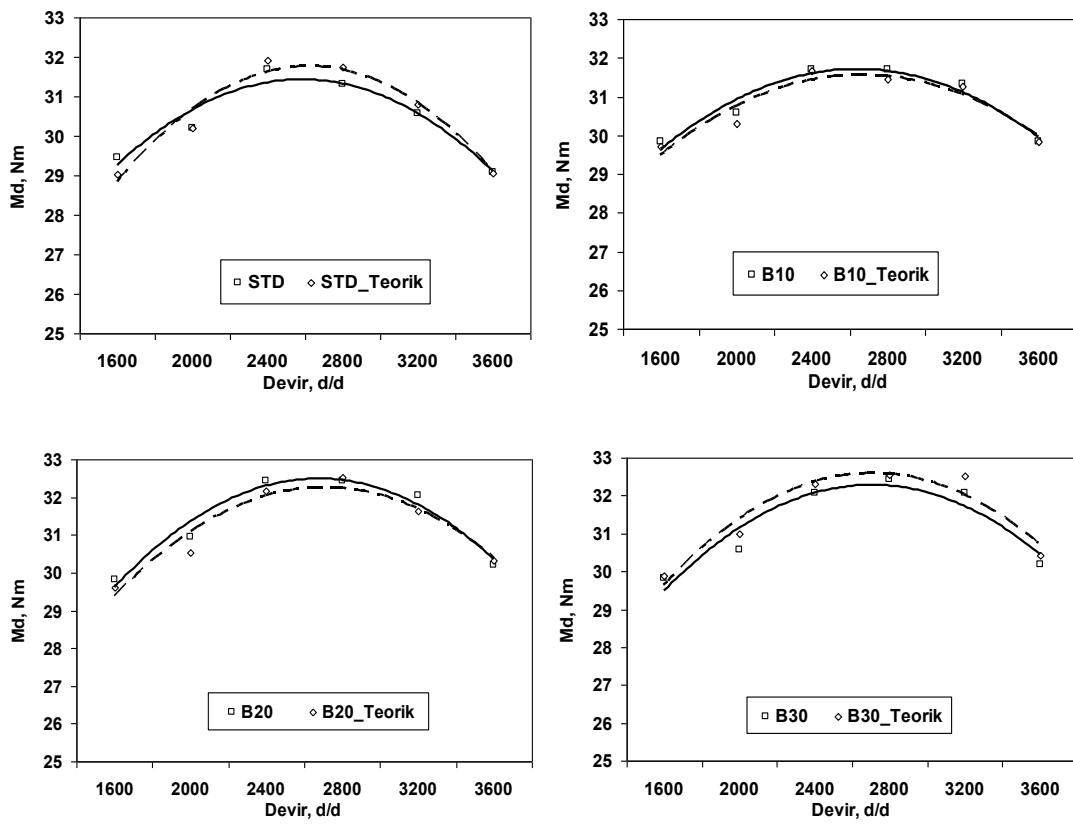
$$R_3 = k_{+3} [\text{OH}]_e [\text{N}]_e = k_{-3} [\text{NO}]_e [\text{H}]_e \quad (3.65)$$

Teorik modelde dolgu karışımı her zaman homojen alınmıştır. Termodinamik özellikler, gaz kaçağı ve artık gaz kesri sabit bir orandadır. Hava ve yakıt ideal karışım halindedir.

Bu çalışmada, bir benzin motoruna su buharı enjeksiyonun motor performans ve NO emisyonu üzerine etkilerini araştırmak amacıyla sıfır-boyutlu tek bölgeli yanma modeli kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verileri, teorik model ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Teorik modelde STD, % 10, % 20 ve % 30 buhar enjeksiyonu için hesaplamalar yapılmıştır.

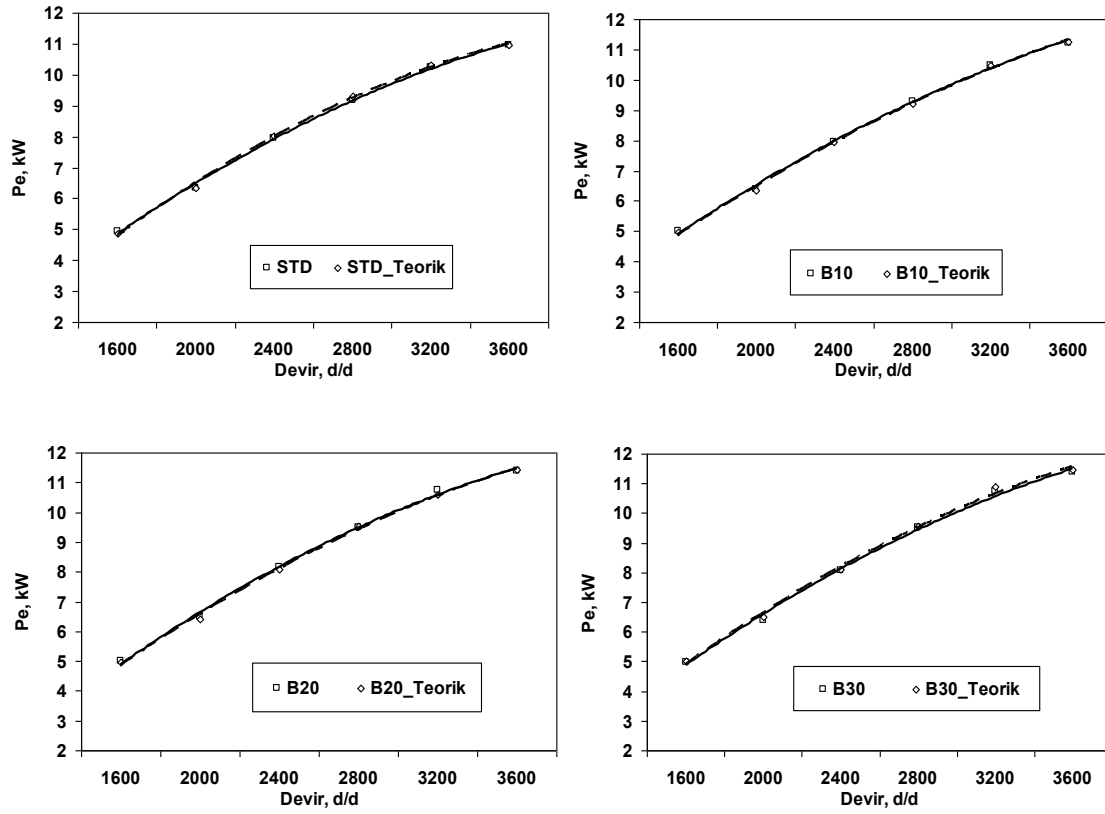
3.1. Döndürme Momenti ve Efektif Güç

Tam yük şartlarında, deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verileri ile teorik model sonucu elde edilen model verileri Şekil 3.1 ile Şekil 3.8 arasında karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3.1’de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen döndürme momenti değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.1. Döndürme momenti değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

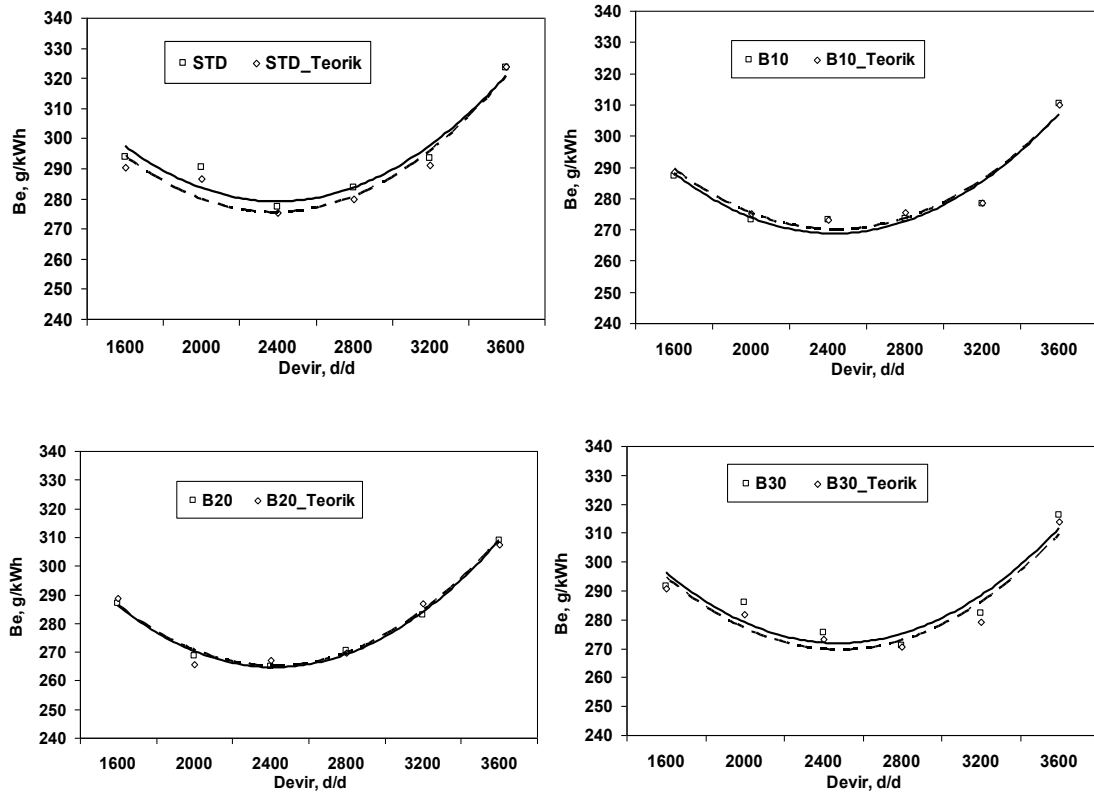
Şekil 3.2’de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen efektif güç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2. Efektif güç değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.2. Özgül Yakıt Sarfıyatı

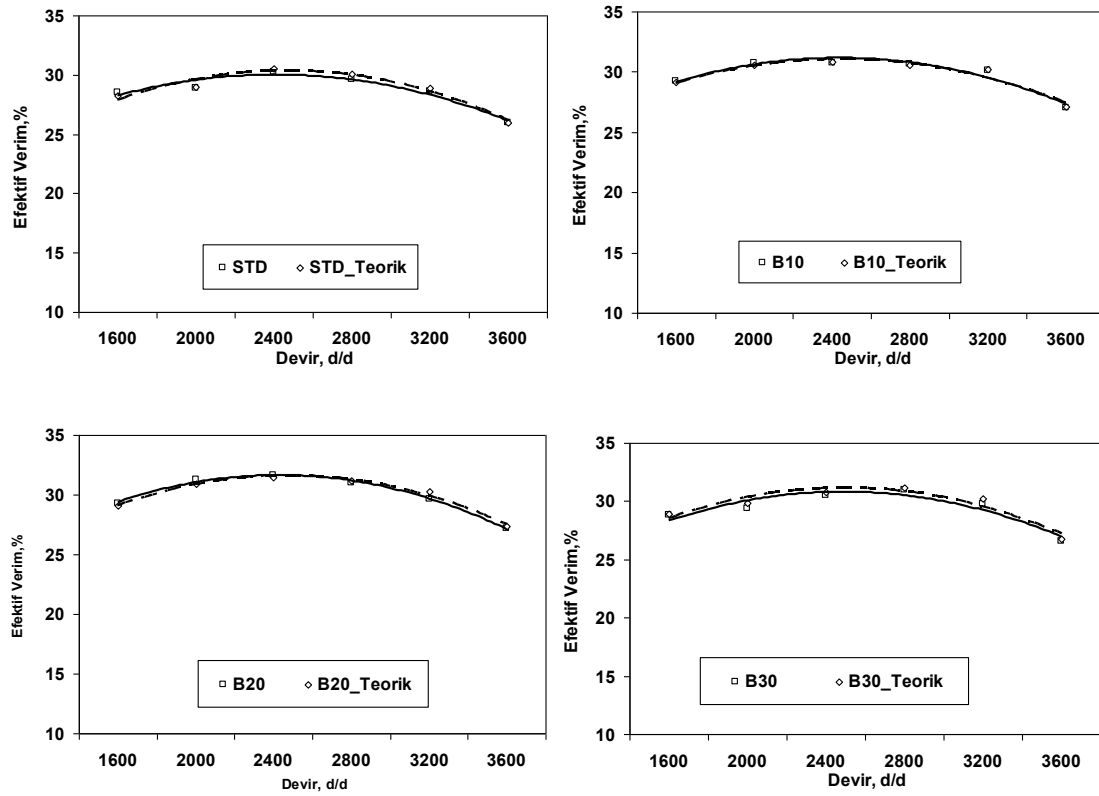
Şekil 3.3’de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen özgül yakıt sarfıyatı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3. Özgül yakıt sarfıyatı değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.3. Efektif Verim

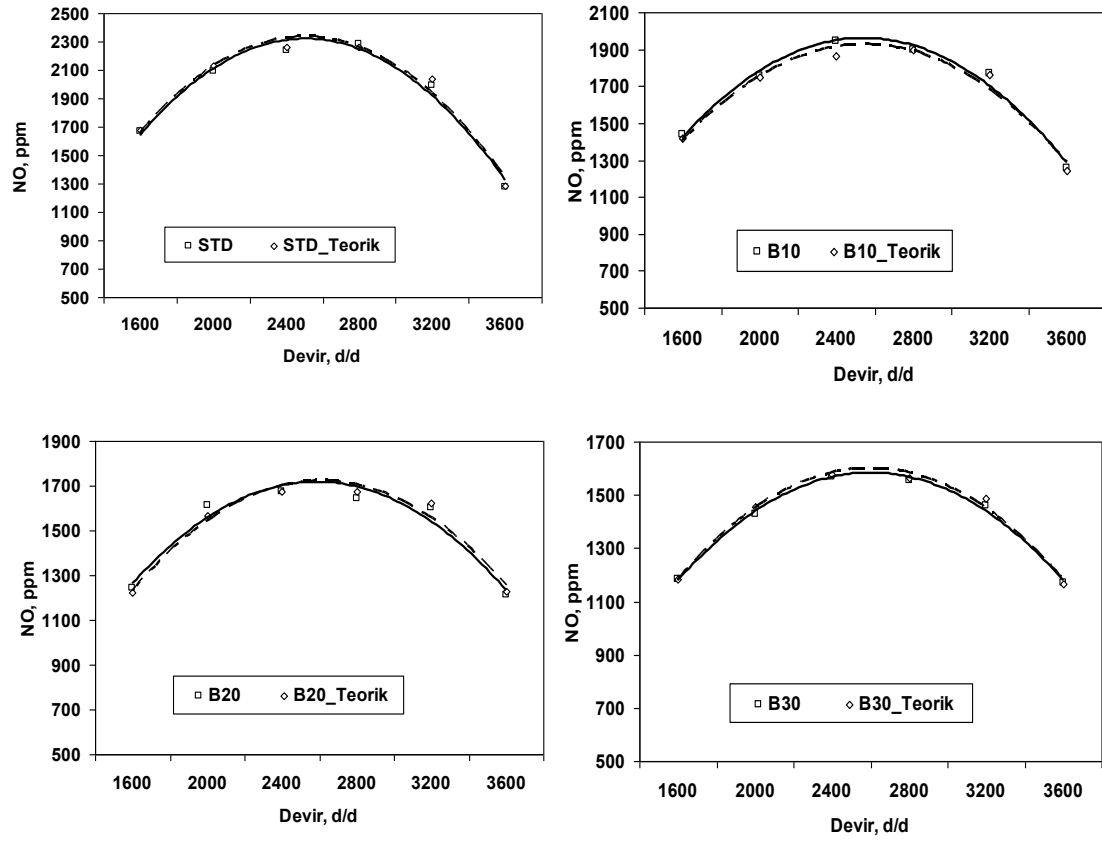
Şekil 3.4' de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen efektif verim değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4. Efektif verim değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.4. NO Emisyonu

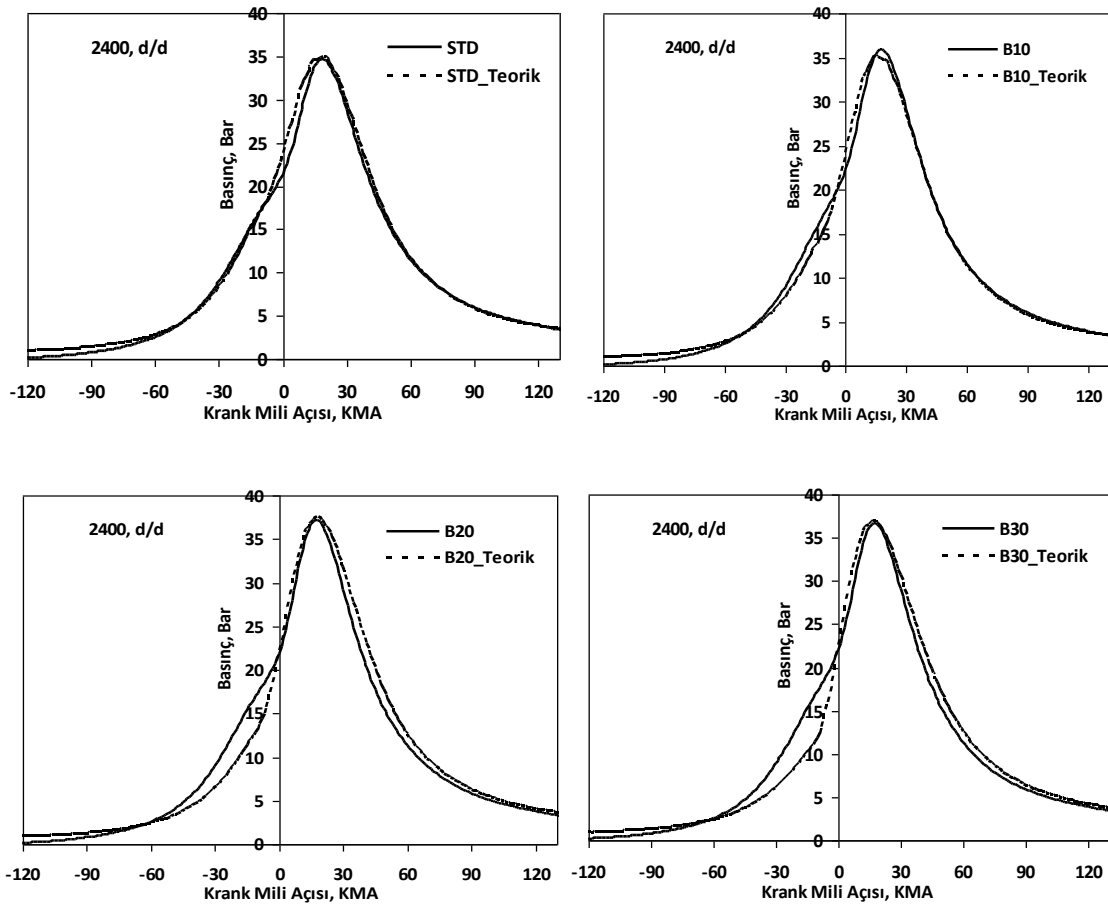
Şekil 3.5’ de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen NO emisyon değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5. NO emisyon değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.5. Silindir Basıncı

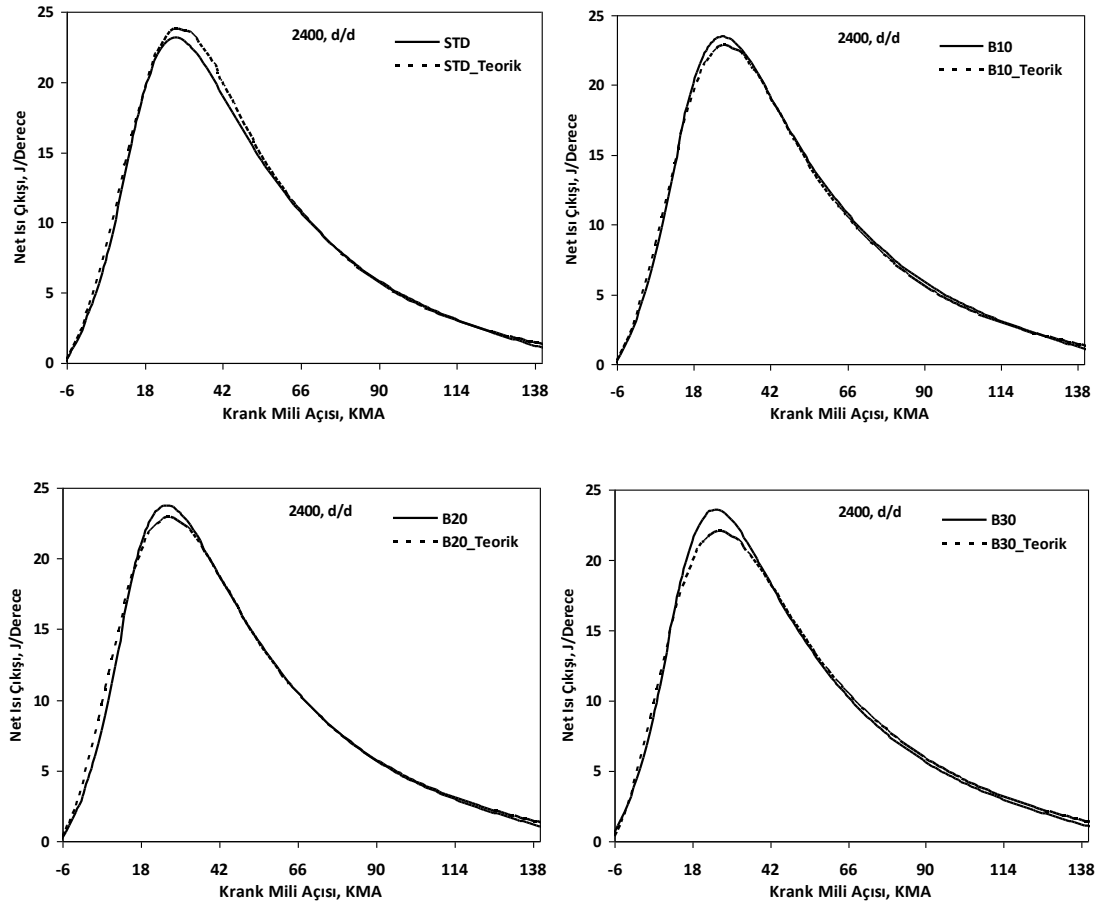
Şekil 3.6' da deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen silindir içi basınç değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada, silindir içi basınç ölçümü motorun maksimum moment verdiği 2400 d/d gerçekleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.6. Silindir basınç değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.6. Net Isı Yayılmı

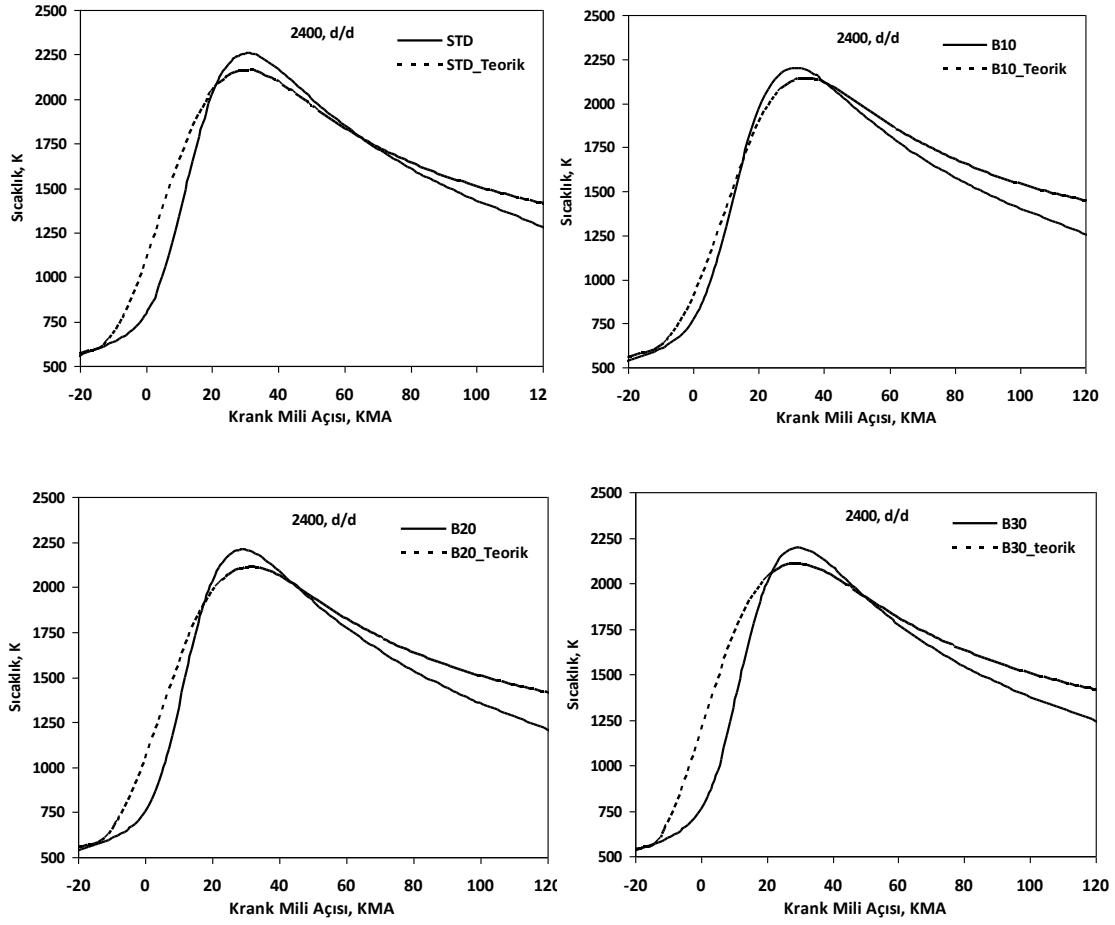
Şekil 3.7’ de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen net ısı yayılımı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 2400 d/d’ da geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7. Net ısı yayılımı değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

3.7. Silindir İçi Sıcaklık

Şekil 3.8’ de deneysel ve teorik çalışma sonucu elde edilen silindir içi sıcaklık değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 2400 d/d’ da geliştirilen teorik modelden elde edilen model verilerinin deneysel çalışma sonucu elde edilen deney verilerine yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. Silindir içi sıcaklık değerlerinin teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

4.1. Elektronik Kontrollü Buhar Püskürtme Sistemi

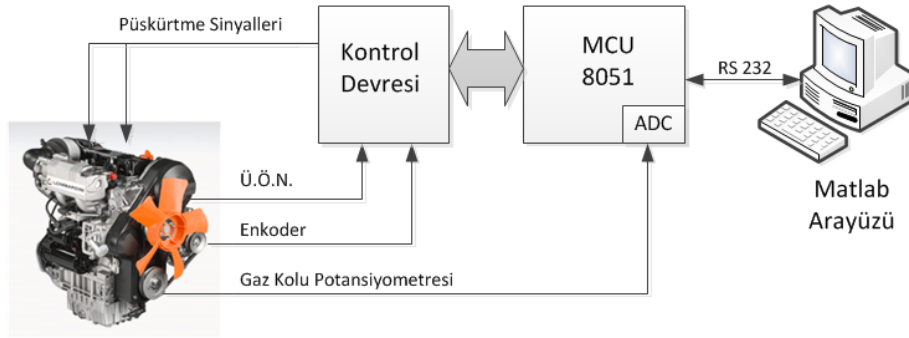
İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt vb. maddelerin hassas bir şekilde verilebilmesi için kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada egzoz enerjisinden elde edilen buharın emme zamanında, emme supabının arkasına püskürtülmesi için elektronik kontrollü bir buhar püskürtme sistemi (EKBPS) kullanılmıştır. Bu EKBPS'i daha önce 101M269' nolu TÜBİTAK projesinde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu Elektronik Kontrollü Buhar Püskürtme Sistemi (EKBPS) geliştirilip, deney motoru için uyarlanarak kullanılmıştır [140-141].

4.1.1. Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi tasarımı

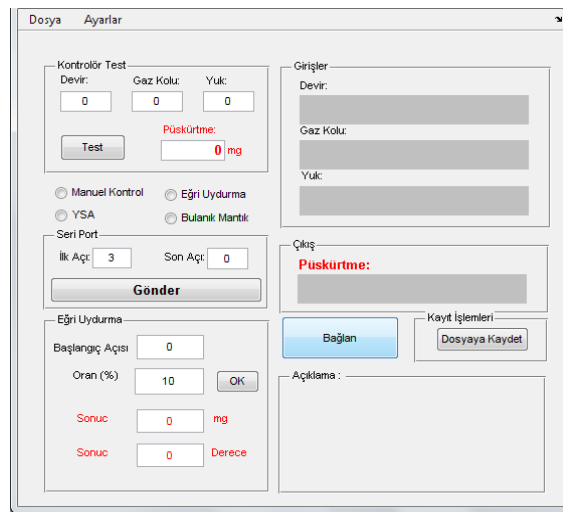
Alternatif yakıtların motorda kullanımı tek bir parametreye lineer olarak bağımlı olmaması nedeniyle püskürtme sinyalinin mekaniksel olarak tespiti mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, EKBPS' de motor üzerinden gaz kolu konumu, motor devri ve ÜÖN konumunu algılamak ve buhar püskürtme için kullanılan enjektörü kontrol etmek için 8051 ailesinden Silabs 80C51F120 mikro denetleyici içeren bir elektronik devre tasarlanmıştır. Ayrıca buhar miktarını tespit etmek ve enjeksiyon sinyal süresini hesaplamak için bilgisayar ortamında bir yazılım hazırlanarak mikro denetleyici ile RS232 protokolü üzerinden haberleşmeleri sağlanmıştır.

EKBPS'de, püskürtme sinyali değerinin anlık olarak kontrolünün gerçekleşmesinde ve elektriksel işaretleri okuma-kontrol işaretini üretme işlemlerini mikro denetleyici üstlenmektedir. Mikro denetleyiciden gelen motor çalışma durum verilerine göre buhar miktarını ve püskürtme sinyali süresini hesaplayacak yazılım Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. İhtiyaç duyulan kütleli buhar miktarı her bir turda deney motorunun deneysel yolla elde edilen yakıt haritası üzerinden bilgisayar yazılımı ile

hesaplanmaktadır. Bu tespit edilen buhar miktarını uygulamak için enjektöre uygulanması gereken püskürtme sinyal süresi sistemde kullanılan enjektöre ait enjektör parametreleri üzerinden hesaplanarak mikro denetleyiciye gönderilmektedir. Bilgisayar ile sistemde kullanılan mikro denetleyici seri port (RS232 seri haberleşme protokolü) kullanılarak haberleştirilmiş ve senkronize çalışmaları mikro denetleyici ve bilgisayar programları sayesinde sağlanmıştır. Kullanıcıya pratik kullanım imkânı sağlamak, çalışma sırasında verileri izleyebilmek ve verileri kayıt altına alabilmek amacı ile bir görsel kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ara yüz vasıtası ile sistemin kumandası yapılmıştır. EKBPS'ye ait blok diyagram Şekil 4.1' de, kontrol ara yüzü ise Şekil 4.2'de ve görülmektedir.



Şekil 4.1. EKBPS' ye ait blok diyagram



Şekil 4.2. EKBPS' yi kontrol etmek amacıyla tasarlanan ara yüz

Bu çalışmada, buhar miktarı gerçek zamanlı olarak deney motoru yakıt sarfiyat değerlerinin yüzdesel oranlarında tespit edilerek motora gönderilmiştir. Çalışma sırasında anlık olarak çalışma koşullarını ve bu koşullara göre tüketilen anlık yakıt sarfiyatını belirlemek amacıyla motor devir ve gaz kolu konum bilgisi mikro denetleyici tarafından çalışma sırasında izlenmektedir. Devir bir enkoder veya endüktif metal yaklaşım sensörü ile gaz kolunun açısal konumunu ise bir potansiyometre ile kolaylıkla ölçülebilmektedir. Bilindiği üzere gaz kolu konumu ve motora uygulanan yük, motor devrini belirlemektedir. Gaz kolu konumuna göre devir çıkışı değerlendirildiğinde motor yükü hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bu nedenle devir ve gaz kolu konumu, çalışma koşullarını ve anlık yakıt sarfiyatını tespit etmek için yeterli olmaktadır. Gaz kolu konumunu okumak için araçlarda kullanılan bir gaz kolu potansiyometresi kullanılmıştır. Devir bilgisi ve krank konumunu açısal olarak tespit etmek için mutlak enkoder kullanılmıştır. Mikro denetleyici yazılımı ile her motor turunda devir ve gaz kolu konumu güncellenerek her biri için 2 bayt olmak üzere RS232 üzerinden bilgisayara gönderilmektedir. Mikro denetleyici ile bilgisayar arasında veri transferinin doğru olarak yapılabilmesini mümkün kılmak amacıyla bir haberleşme protokolü oluşturulmuştur. Şekil 4.3' de EKBPS' de kullanılan mikro denetleyici ve kontrol devresini içeren kutunun şematik görünümü görülmektedir.



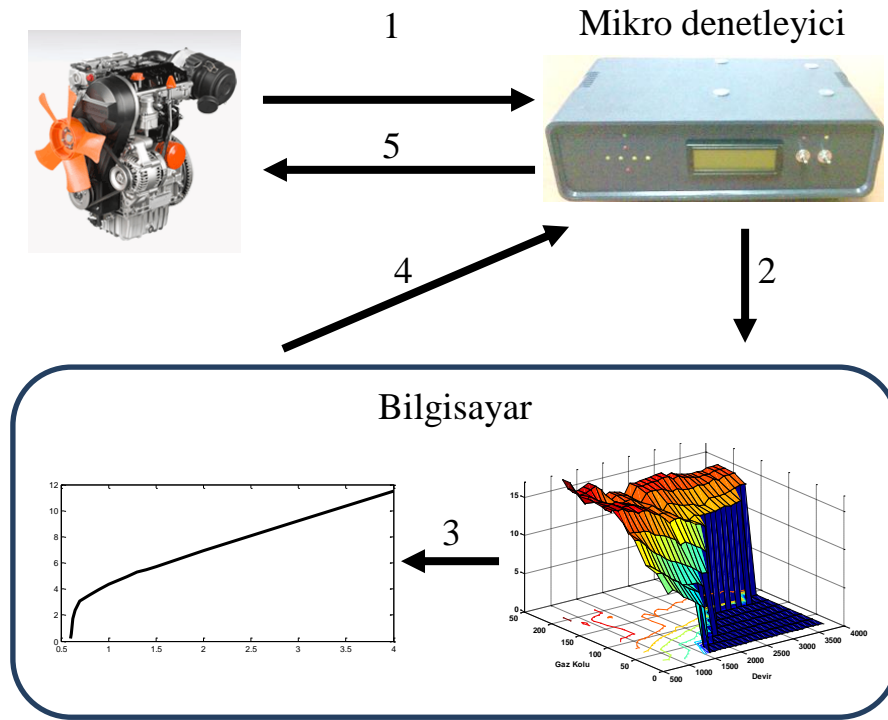
Şekil 4.3. EKBPS' de kullanılan mikro denetleyici ve kontrol devresini içeren kutu

Bilgisayar yazılımı, daha önceden deneysel yolla elde edilerek yüklenmiş olan motor yakıt sarfiyat haritasından enterpolasyon (ara değerlendirme) ile o anki gaz kolu ve devir

bilgisine karşı gelen yakıt tüketim miktarını tespit etmektedir. Tespit edilen yakıt miktarı, kullanıcı tarafından ara yüze girilen buhar yüzdesi ile çarpılarak buhar miktarı hesaplanmaktadır. Bu buhar miktarı için gerekli enjeksiyon sinyal süresi ve zamanlaması daha önceden deneysel olarak elde edilen enjektör parametre eğrisi üzerinden tespit edilmektedir. Mili saniye cinsinden bu süre mikro denetleyiciye gönderilmektedir. Mikro denetleyici, ÜÖN sensörü ve mutlak enkoder yardımıyla istenilen avans açısında ve emme zamanında enjeksiyon sinyalini enjektöre uygulamaktadır.

EKBPS' nin bir çalışma çevriminde gerçekleşen aşamalar Şekil 4.4.' de yer almaktadır. Bu aşamalar:

1. Mikrodenetleyici tarafından, gaz kolu potansiyometresi ve enkoder vasıtası ile devir ve gaz kolu konumunun ölçülmesi,
2. Gaz kolu konum ve devir bilgisinin RS 232 üzerinden bilgisayara gönderilmesi,
3. Matlab yazılımında, kullanıcı tarafından girilen buhar oranı yakıt tüketim haritası üzerinden tespiti ve püskürtülecek buhar miktarının hesaplanması,
4. Bu buhar miktarı için püskürtme süresinin enjektör parametreleri üzerinden tespit edilerek mikro denetleyiciye gönderilmesi,
5. Mikro denetleyici tarafından enkoder ve ÜÖN sensörü ile belirlenen emme zamanı konumuna uygun olarak püskürtme sinyalinin oluşturulması.



Şekil 4.4. EKBPS' nin bir çevriminde gerçekleşen aşamalar

Yukarıda da belirtildiği gibi 101M269 nolu TÜBİTAK projesinde geliştirilen bu EKBPS 1 ila 4 silindirli benzinli ve dizel motorlarda kullanılabilecek bir yapıda hazırlanmıştır. EKBPS' nin farklı bir motora uyarlanması istendiğinde motor yakıt sarfiyat haritasının ve enjektör parametrelerinin Matlab yazılımına girilmesi gerekmektedir. EKBPS' nin bu çalışmadaki deney motoruna uyarlanması için öncelikle deney motoru üzerinden deneysel yolla yakıt haritası ölçülmüştür. Deneysel olarak yakıt haritasının ölçümü için tam yük ve kısmi yük koşullarında 100 d/d aralıklar ve gaz kolu 10 eşit parçaya bölünüp her bir devir ve gaz kolu konumuna göre motor deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasında; her koşul için bir motor çevriminde harcanan kütleli yakıt miktarı ölçülmüştür. Yakıt haritasının tespit edilmesinin ardından ihtiyaç duyulan buhar püskürtme miktarını karşılayacak enjektör seçimi yapılmış ve enjektör parametreleri Matlab yazılımına girilerek deney motoruna hazır hale getirilmiştir.

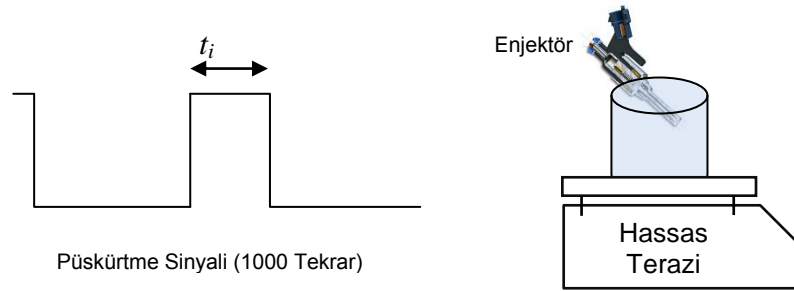
4.1.2. Enjektör parametrelerinin tespiti

EKBPS, günümüzde elektronik kontrollü benzin enjeksiyon sistemlerinde kullanılan bobin sargılı tip enjektörleri kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Bilindiği üzere bobin sargılı enjektörlerde bobin kontrollü selenoidlerden kaynaklanan bir açılma gecikme zamanı (t_0) mevcuttur. Bu gecikme iki kısımda ele alınabilir; mekaniksel gecikme ve bobinden kaynaklanan gecikmedir. Mekaniksel gecikme, bobin tarafından elektro manyetik kuvvetin oluşturması ardından yakıt yolunun açılması için geçen süre olarak özetlenebilir. Bobinden kaynaklanan gecikme ise bobinin akıma karşı gösterdiği zorluktan kaynaklanmaktadır. Bobin değerine bağlı olarak akım belli bir süre sonra maksimum değerine ulaşmaktadır. Akımın maksimum değeri ulaşması ile istenilen elektro manyetik kuvvet elde edilebilmektedir. Enjektör, elektriksel olarak seri RL devresi şeklinde düşünülebilir.

Bu gecikmeler sebebiyle, yakıt yolunun açılabilmesi için geçen süre, bobin sargılı enjektöre uygulanan sinyal süresi ile püskürtülen yakıt miktarı arasında lineer bir ilişki olmamasına sebep olmaktadır [142-143]. Bu nedenle istenilen miktarda buhar enjeksiyonunun yapılabilmesi için enjektör sinyal-miktar ilişkisinin doğru tespit edilmesi önemlidir. Buhar oranı, mevcut yakıt sarfiyatının kütleli olarak %10 ila %30 oranında iki silindirli buji ateşlemeli motora püskürtülmektedir. Fakat deneylerde kullanılan buji ateşlemeli motor, yakıt sarfiyatının düşük olduğu düşünüldüğünde az miktarlarda enjeksiyona imkân tanıyan bir enjektörün tercih edilmesi gerekliliği açıktır. Bu amaçla piyasadan temin edilen çok farklı tip enjektör parametreleri tespit edilerek EKBPS ve deney motoruna en uygun enjektör tercih edilmeye çalışılmıştır.

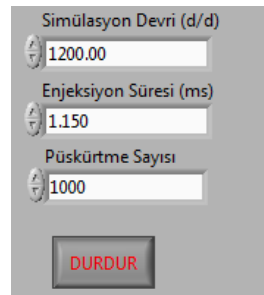
Enjektör parametrelerinin tespiti deneysel olarak yapılmıştır. Deneylerde enjektör parametre tespiti için yakıt (benzin ya da dizel) yerine su kullanılmıştır. Enjektör yakıt girişi sabit basınç altında tutularak değişik sürelerde sinyal uygulamak suretiyle her sinyal süresine karşılık püskürtülen yakıt miktarı tespit edilmiştir. Yakıt miktarının ölçümü 0.1 mg hassasiyete sahip bir hassas terazi vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil 4.5’de enjeksiyon sinyali ve enjektör parametreleri ölçümü verilmiştir.

Ölçümden kaynaklanan hataları minimize etmek amacıyla her sinyal süresi (t_i) 1000 kez enjektöre uygulanmış ve sonuçta toplam yakıt miktarı 1000'e bölünerek ortalama değer tespit edilmiştir. Enjeksiyon süreleri küçük adım aralıklarıyla arttırılarak enjektöre uygulanmış, bu sayede enjeksiyon sinyal süresi – püskürtülen yakıt miktarı ilişkisi hassas bir şekilde deneysel olarak ölçülmüştür.



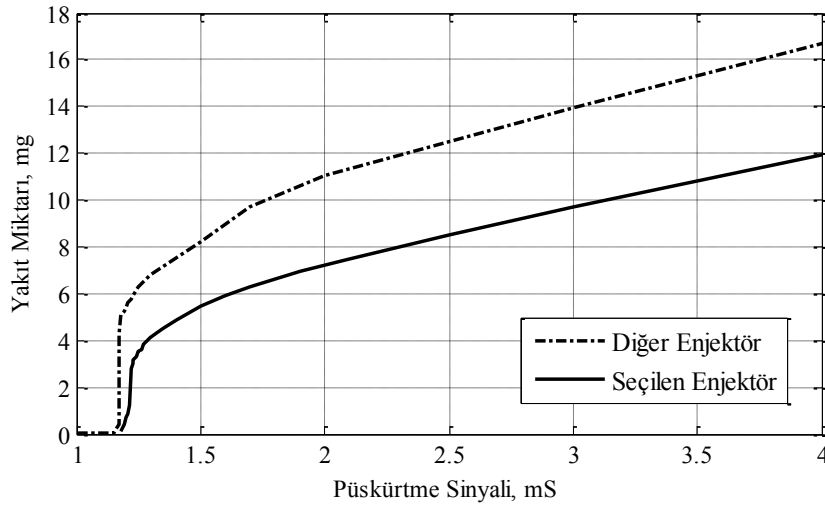
Şekil 4.5. Enjeksiyon sinyali (t_i) ve püskürtülen yakıt miktarı ölçümü

Enjektör parametrelerinin tespiti sırasında enjeksiyon sinyali süresini ve adedini mümkün olan en yüksek doğrulukla üretmek amacıyla DAQ kartı ve Labview programlama ortamından faydalanılmıştır. Labview'de oluşturulan bir program ve ara yüz vasıtasıyla istenilen püskürtme sinyali süresi ve adedi hassas bir şekilde ayarlanabilmiştir. Hazırlanan programda enjeksiyon sinyal süresi ve adedinin yanı sıra çalışma koşullarına en yakın şartları oluşturabilmek amacıyla püskürtme sinyali frekansını belirleyecek devir girişi de yer almaktadır. Örneğin 1200 d/d çalışma devri düşünüldüğünde, motor bir çevrimini 100 msn'de tamamlamaktadır. 1200 d/d girişi yapıldığında, DAQ kartı tarafından 100 msn periyoda sahip enjeksiyon sinyali belirtilen adet kadar üretilerek program sonlanmaktadır. Şekil 4.6.' da enjektör parametre tespiti için hazırlanan ara yüz görülmektedir.



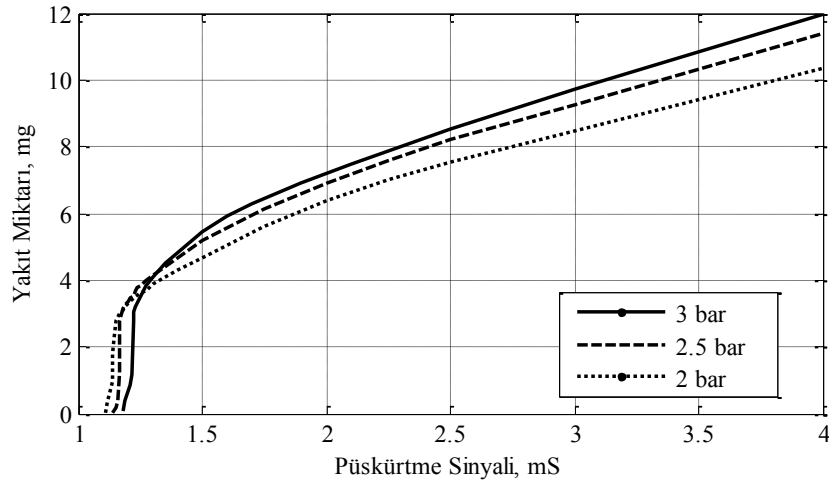
Şekil 4.6. Enjektör parametre tespiti için hazırlanan ara yüz

Piyasada bulunan enjektörler motorlara yakıtın tamamını püskürtmek üzere tasarlanmışlardır. Oysaki bu çalışma ile yakıt tüketiminin %10'u ile %30'u arasında bir değer uygulanmak istenmektedir. Bu nedenle enjektör seçiminde karşılaşılan en büyük sorun; az miktarda yakıt püskürtülmesine imkân tanıyacak bir enjektör bulunmasıdır. Bu amaçla birçok enjektör denenerek düşük yakıt kütlesi bandında çalışabilen bir enjektör tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.7' de 3 bar basınç altında tercih edilen uygun bir enjektör ile farklı bir enjektör için enjeksiyon süresi-yakıt miktarı grafiği verilmiştir. Tercih edilen enjektör daha yüksek bir açma gecikmesine sahip olsa da düşük yakıt miktarlarının uygulanmasına imkân tanımaktadır.



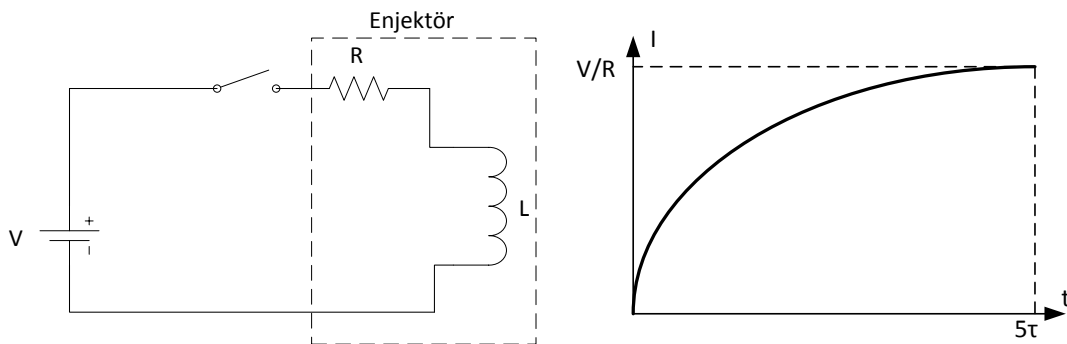
Şekil 4.7. İki farklı enjektör için elde edilen enjektör parametreleri

Şekil 4.7' de verilen grafikte ölçümler, yakıt hattı 3 bar basınçta sabitlenerek elde edilmiştir. Yakıt hattı basınç değeri enjektör parametre eğrisi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bu nedenle enjektör parametre tespiti sırasında kullanılan basınç değeri ile çalışma sırasında kullanılan buhar basınç değeri aynı olmalıdır. Şekil 4.8' de tercih edilen enjektör için farklı yakıt basınçlarında elde edilen enjektör parametreleri yer almaktadır. Motora buhar enjeksiyonu 133°C, ve 3 bar basınçta buhar kullanıldığı için 3 bar altındaki enjektör parametre eğrisi dikkate alınmıştır.



Şekil 4.8. Farklı yakıt hattı basınçları için enjektör parametre değişimi

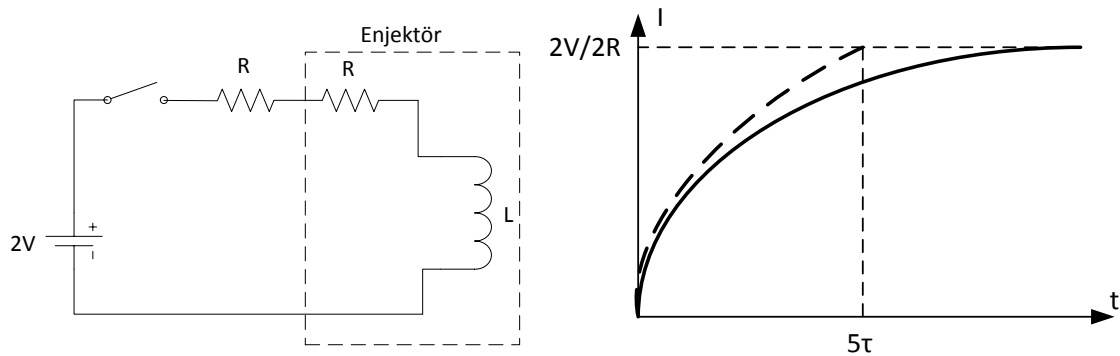
En uygun olarak tespit edilen enjektör parametre eğrisine dikkat edilecek olursa; % 10 (2-3mg) oranında buhar püskürtmeye uygun olmadığı gözlemlenmektedir. Piyasada bu buhar oranını uygulayabilecek bir enjektör bulunamaması sebebiyle Şekil 4.8' de verilen parametrelere sahip enjektörün elektriksel gecikmesinin azaltılması düşünülmüştür. Bobin sargılı enjektör içeriği bir RL devresi gibi düşünülebilir [144]. Enjektör mekanizminden kaynaklanan gecikmeye müdahale edilemeyecektir. Oysaki enjektör içerisindeki RL devresinin de bir elektriksel gecikmesi vardır. Enjektörün bir RL devresi olarak gösterimi ve devreye gerilim uygulanmasının ardından zamana göre bobin akımının değişimi grafiksel olarak Şekil 4.9' da verilmiştir.



Şekil 4.9. Yakıt enjektörünün RL devresi olarak ifadesi ve bobin akımının zamana göre değişimi

RL devrelerinde akımın sıfırdan maksimum değerine ulaşması için geçen süre 5τ 'dur. Burada τ zaman sabiti olarak bilinmekte ve RL devrelerinde bobin ve direnç değerlerinden $\tau=L/R$ bağıntısı ile elde edilebilmektedir. Bu bağıntıdan yola çıkarak enjektöre seri olarak bir direnç ilave edilecek olursa paydada bulunan R değeri büyüyeceği için zaman sabiti düşecektir. Bu mantık ile tercih edilen enjektörün R direnci ölçülmüş ve aynı değerinde bir direnç seri olarak enjektöre bağlanmıştır ($\tau=L/(2\cdot R)$). Bu sayede τ zaman sabiti yarıya indirilmiş olacaktır.

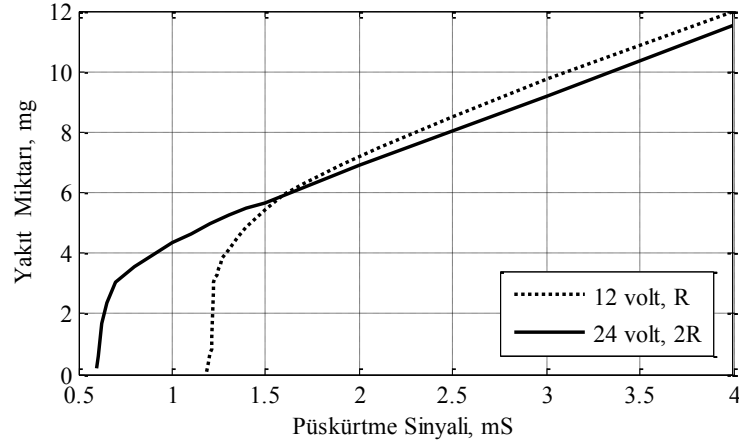
Enjektörün açılması için gerekli olan elektromanyetik kuvvet ise bobinden geçen akıma bağlıdır. Bobin üzerinden geçen akım ($I=V/R$) V/R bağıntısıyla bulunmaktadır. Toplam R değeri 2 katına çıkarıldığında bobin maksimum akımı yarıya düşürerek gerekli elektromanyetik kuvveti sağlayamayacaktır. Enjektör bobin akımını sabit tutmak amacıyla 12 V gerilim değeri de iki katına çıkarılarak akımın aynı değerde kalması sağlanmıştır. Gerilimin 24V'a ve R kadar seri direnç ilave edilerek ortaya çıkan elektriksel devre ve akım değişimi aşağıda verilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. 2V-2R için RL devresi ve yeni dorum için bobin akımının zamana göre değişimi

24V Enjektör gerilimi 2R durumu için enjektör parametre tespiti yapılmış ve öngörüldüğü gibi enjektör açma gecikmesinin küçüldüğü görülmüştür. Şekil 4.11'de standart enjektör ve gerilim 24V'a yükseltilerek ve R direnci bağlanarak elde edilen enjektör parametre grafiği yer almaktadır. Bu grafikte de görüldüğü üzere 24V besleme ve seri direnç bağlanan enjektör parametresi EKBPS ile çalışmak için daha uygundur. Bu parametre tespitinin ardından 36V ve 3R için parametre tespiti yapılmış fakat enjektör parametresinin mekaniksel gecikme etkisiyle iyileşmediği

tespit edilmiştir. Bu çalışmada standart enjektör yerine 24V besleme ve enjektöre R kadar seri direnç bağlanarak kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Standart ve 24V-2R durumlarındaki enjektör parametre grafiği

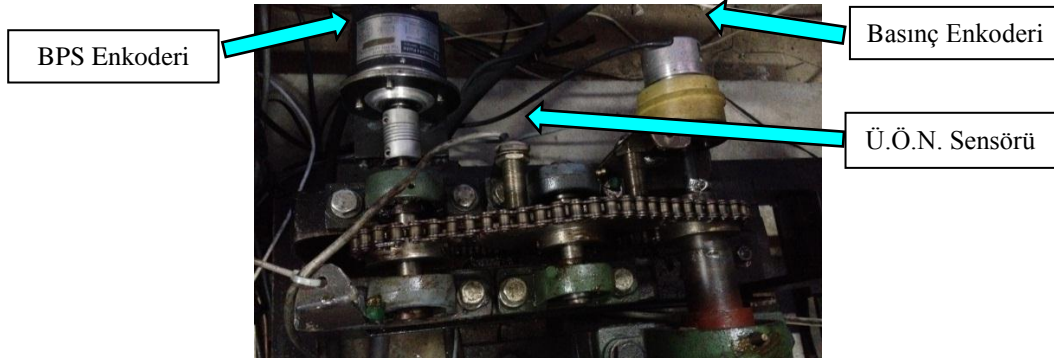
4.1.3. Deney motorunun EKBPS için revizyonu

EKBPS motor üzerinden devir, gaz kolu konumu ve üst ölü nokta sensör bilgilerine göre çalışmaktadır. Sistemin düzgün çalışabilmesi için enkoder, gaz kolu potansiyometresi ve üst ölü nokta sensörü deney düzeneğine uygun bir şekilde bağlanmalıdır.

Motor devir bilgisinin algılanması için absolute enkoder kullanılmıştır. Aynı zamanda kullanılan enkoder ile anlık açı değeri ölçülebilmektedir. Çalışma sırasında üst ölü nokta tespiti ve buhar püskürtme avansının doğru şekilde kontrolü aynı enkoder sayesinde sağlanmıştır. Şekil 4.12' de motor çıkış miline bağlanmış olan enkoder görülmektedir.

Deneyleerin gerçekleştirildiği benzin motoru 4 zamanlı bir benzin motorudur. Bu yüzden motorun bir çevrimi iki krank turunda gerçekleşmektedir. Bu nedenle, emme zamanındaki üst ölü noktanın tespiti için krank mili devrini yarıya düşürecek bir dişli-zincir düzeneği geliştirilmiştir. Dişli-zincir düzeneği üzerine yerleştirilen sensörden alınan sinyal, mikro işlemcide enkoderdan gelen üst ölü nokta bilgisiyle eşleştirilerek emme zamanındaki üst ölü nokta bilgisi belirlenmektedir. Şekil 4.12'

da motor emme zamanının tespiti için yapılan dişli-zincir düzeneği ve üst ölü nokta sensörü görülmektedir.



Şekil. 4.12. Devir ve açı ölçer (Enkoder)

Motor gaz kolu konumunun ölçülmesi için gaz kolu potansiyometresi kullanılmıştır. Gaz kolu potansiyometresi analog çıkış voltajı, gaz kolu konumuna göre lineer olarak değişmektedir. Kontrol düzeneği tasarım aşamasından önce motor üzerinden gaz kolu konumu alt ve üst sınırları tespit edilmiştir. Şekil 4.13' de motor gaz koluna bağlanmış durumdaki potansiyometrenin resmi görülmektedir.



Şekil 4.13. Gaz kolu konum sensörü

4.2. Plazma Kaplama Sistemi

Plazma sprey tekniğindeki ana düşünce; pahalı olmayan bir ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektedir. İşlem iyonize

olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Plazma kaplama sistemi;

- Sprey tabancası (plazma üfleci),
- Güç ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Soğutma ünitesi,
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

Sprey tabancası, kaplam ünitesinin en önemli çalışma ünitesidir. Anot olarak saf Cu ve katot olarak da %2 ThO₂ katkılı W' ın kullanıldığı tabancada plazma, bu ki elektrot arasındaki elektrik arkında plazma gazlarının iyonizasyonu ile elde edilir. Kullanılan plazma gazları, katodun etrafından ve aynı zamanda nozul görevini de gören anodun içerisinden geçirilir. Doğru akım arkı, genellikle yüksek frekans akışı ile başlar ve elektrotlar ile devam eder. Katot boyunca verilen plazma gazı, bu ark içerisinde ısıtılmakta ve plazma sıcaklığına erişen gaz, nozul anottan plazma alevi olarak püskürtülmektedir. Ark akımı ve voltajı, anot/katot dizaynı, gaz akış hızı ve gaz bileşimi gibi değişkenlere bağlı olarak değişmektedir. Ark genelde, anot-katot temasıyla ateşlenir. Uygulamada nötr plazma gerektiği için, anot boş bir nozul şeklinde dizayn edilmiş ve ark devresinin nozul içinde tamamlanması sağlanmıştır. Böylece, serbest halde elde edilen plazma, elektrik akımını iletmektedir. Kaplama işleminde gerçekleşen bütün olaylar (disosiasyon, iyonizasyon, plazma hali gibi) sprej tabancası içerisinde meydana gelmektedir.

Tabancaya beslenen plazma gazları, yüksek gerilim veya yüksek frekans yardımıyla tutuşturulur. Plazma gazları, kaplama tozları, çalışma voltajı ve arkı ile ilgili bütün ayarlamalar kontrol ünitesinde manüel olarak veya bilgisayar yardımıyla yapılır.

Plazma alevindeki hareket esnasında yüzey gerilimi nedeniyle küresel şekle sahip oldukları düşünülen erimiş partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptıklarında ısıl ve kinetik enerjilerini kaybederek deforme olurlar ve sonra 5-15 µm kalınlığında lameller şeklinde katılaşırlar. Deformasyon miktarı ve dolayısıyla lamellerin şekli;

erimiş partiküllerin viskozitesi ve ısıtılabilirliği, toz granülitesi ve ana malzeme yüzeyinin karakteri gibi birçok faktöre bağlıdır.

Atmosferik plazma kaplama yöntemi dezavantajı, plazma jeti içerisine havanın girerek, plazmanın soğumasına ve hızının yavaşlamasına neden olması, metalik tozların oksidasyona uğramasıdır. Argon koruyucu atmosferinde gerçekleştirilen plazma spreyde tozun oksidasyona uğraması önlenmektedir.

Kaplama tozlarının plazma gazı içerisinden geçirilerek ergimiş halde kaplanacak malzeme üzerine püskürtülmesi “Plazma Püskürtme Tekniği” adını alır. Plazma kaplama tekniğinde, kaplanacak toz bir gaz eşliğinde gönderilmektedir

Bu çalışmada, bir buji ateşlemeli motorda piston tepesi üzerine piston dış çaptan merkeze doğru 4 ile 8 mm genişliğinde 0,5 mm derinliğinde kaplama yapılmıştır. Seramik malzeme olarak iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlar; $MgO-ZrO_2$ ile Y_2O_3 seramik malzemeleridir. Şekil 4.14’ de $MgO-ZrO_2$ seramik malzeme kaplanmış piston resmi görülmektedir. Kaplama kalınlığının 0, 20 mm’ sini ara yüz, geriye kalan 0,30 mm’ sini de seramik malzeme oluşturmaktadır. Kaplama plazma püskürtme tekniği ile yapılmıştır [95, 145-146].



Şekil 4.14. Seramik kaplamalı pistonun görünüşü

Seramik kaplama öncesi kaplanacak yüzey temizlenmiş daha sonra seramik kaplamanın metalik malzemeye uygun şekilde bağlanması için metalik malzeme pürüzlendirilmiştir. Uygun şekilde pürüzlendirilme yüzeye kum püskürtülerek

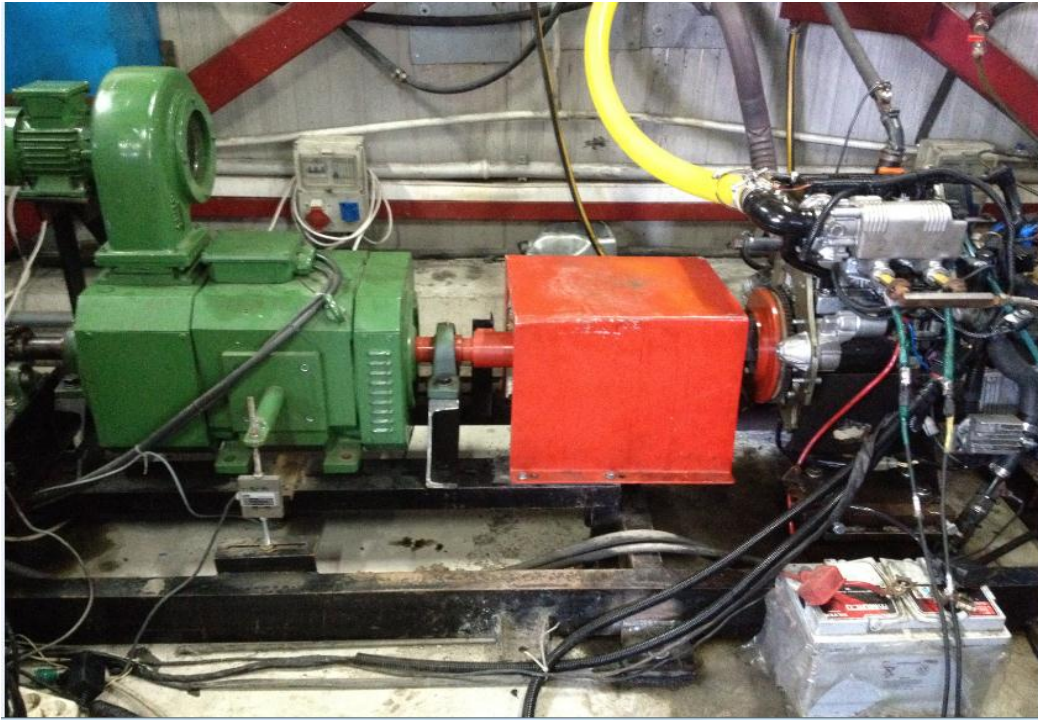
yapılmıştır. Ara yüz (ara bağlayıcı) olarak Ni-Al tozu, seramik olarak da Y_2O_3 (Yitria) ile $MgO-ZrO_2$ tozları kullanılmıştır. Seçilen ara yüz elemanı kullanılan piston malzemesi ile seramik malzeme için en uygun olanıdır. Pistonlar SENKRON MAKİNA tarafından kaplanmıştır.

4.3. Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarının Belirlenmesi

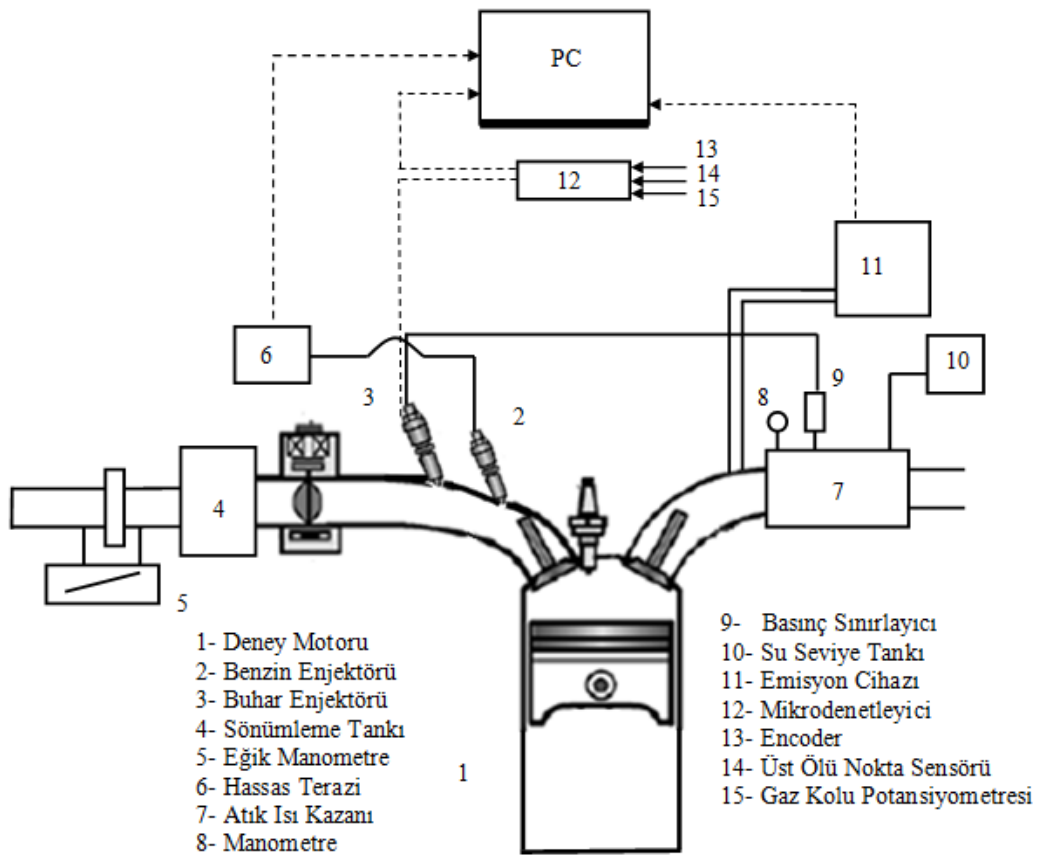
4.3.1. Araştırmada kullanılan ölçme donanımları

4.3.1.1. Deney düzeneği

Deneyler Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Anabilim Dalı Deney Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.15' de ve Şekil 4.16' da görülmektedir.



Şekil 4.15. Deney düzeneği



Şekil 4.16. Test düzeneğinin şematik görünümü

4.3.1.2. Deney motoru

Deneylerde, çift silindirli, enjeksiyonlu, doğal emişli, dört stroklu ve su soğutmalı Lombardini marka bir buji ateşlemeli benzin motoru kullanılmıştır. Tablo 4.1’ de, deney motorunun teknik özellikleri, Şekil 4.17’ de deney motorunun şekli verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney motorunun teknik özellikleri

Motor Tipi	Lombardini
Piston Çapı [mm]	72
Strok [mm]	62
Silindir Sayısı	2
Strok Hacmi [dm ³]	0,505
Güç, [kW]	15
Sıkıştırma Oranı	10,7
Soğutma Tipi	Su
Yakıt Tipi	Enjeksiyonlu



Şekil 4.17. Deney motoru

4.3.1.3. Dinamometre

Deneyle, 4000 d/d 'da maksimum 20 kW güce sahip bir elektrikli dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. Motor tarafından üretilen gücün tespiti için dinamometre koluna 0,01 kg hassasiyetinde S tipi Loadcell bağlanmış ve deneyle başlamadan önce Loadcellin kalibrasyonu hassas bir şekilde yapılmıştır. Şekil 4.18' de dinamometrenin ve dinamometre koluna bağlantısı yapılan Loadcell' in şekli görülmektedir.



Şekil 4.18. Deneylerde kullanılan dinamometre ve loadcell

4.3.1.4. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi

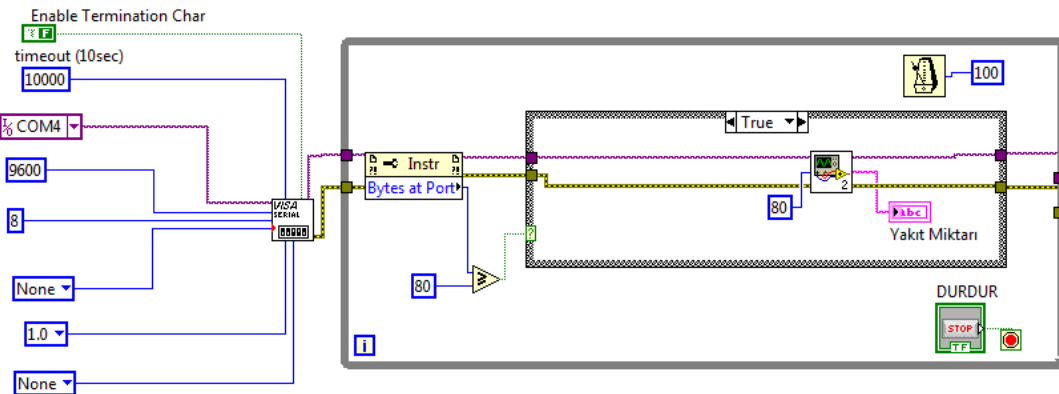
Motorun harcadığı yakıt sarfiyatının belirlenmesinde Dikomsan marka 0,01g hassasiyetli 3 kg kapasiteli bir elektronik terazi kullanılmıştır. Şekil 4.19' de hassas terazinin şekli görülmektedir. Motorun ihtiyacı olan yakıt miktarını göndermek için yakıt sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem elektrikli bir pompa, basınç saati ve ayarlı regülatörden oluşmaktadır. Deney motorun katalog bilgilerine bakılarak yakıt basıncı 3,5 bar olarak belirlenmiş ve her deney esnasında 3,5 barlık basınçlı yakıt motora gönderilmiştir. Basınç miktarı regülatör ile ayarlanmış ve kontrol amaçlı olarak sisteme konulan basınç saati ile deney esnasında kontrolü sağlanmıştır. Yakıt ölçüm düzeneği motora uzak ve titreşimlerden etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu sayede kararlı bir ölçüm sağlanmıştır.



Şekil 4.19. Deneylerde kullanılan hassas terazi

Yakıt tüketiminin hassas bir şekilde ölçülmesi için elektronik kontrollü bir ölçüm düzeneği tasarlanmıştır. Yakıt ölçümünde kullanılan terazi bilgisayara RS 232 bağlantısı ile haberleşmektedir. Tasarlanan bir Labview programı ile deney esnasında anlık yakıt tüketimini belirlenmektedir. Programa ilk önce deneylerde yakıt tüketiminin ne kadar sürede ölçüleceği girilmektedir. Test süresi kullanıcı tarafından girildikten sonra “Veri Al” butonuna basılarak veriler bilgisayara kaydedilmektedir. Test süresi tamamlandıktan sonra program test başlangıcında okuna değer ile test bitiminde okunan değer farkını almakta ve test süresine bölerek anlık yakıt sarfiyatını belirlemektedir. Bu sayede deneysel çalışmada insandan kaynaklanan hatalar minimize edilmiştir.

Şekil 4.20’ de anlık yakıt tüketim miktarını hesaplamak için tasarlanan blok diyagram, Şekil 4.21’ de ise anlık yakıt tüketim bilgisi ile yakıt tankında bulunan yakıt miktarını gösteren Labview programında tasarlanan ara yüz ekran çıktısı görülmektedir.



Şekil 4.20. Anlık yakıt tüketim miktarı tespiti için tasarlanan blok diyagram

The screenshot shows a Labview program interface with the following elements:

- Yakıt Miktarı**: A text input field.
- Anlık Yakıt Tüketimi(g/s)**: A text input field containing the value '0'.
- Kayıt Yeri**: A file path input field containing 'D:\'.
- Dosya Adı**: A file name input field containing 'olcum'.
- Deney Süresi (s)**: A numeric input field containing '120'.
- VERİ AL**: A red button with white text.

Şekil 4.21. Labview programında anlık yakıt tüketim bilgisini gösteren ara yüz görünümü

4.3.1.5. Hava debisinin ölçümü

Deneysel sırasında emme havasının ölçülmesinde akışın daimi olabilmesi için hava sönümlenme tankı, keskin kenarlı lüle ve eğik manometreden oluşan sistem kullanılmıştır. Sistemin görünüşü Şekil 4.22’ de görülmektedir.

Motor hava debisinin tayini, motor deneylerinin en çok değişken ihtiva eden ve dikkat isteyen ölçümlerden biridir. Gerçekten böyle bir ölçümde atmosfer şartları, sistem geometrisi ve motorun düzenli çalışmasına kadar birçok faktör ölçme ve hesaplama detaylarına dahil edilmektedir. Buna karşılık hava debisi, motorun performansını ve emisyon karakteristiklerinin belirlenmesinde en önemli unsur olmaktadır [147].

Hava-yakıt oranı, hava fazlalık katsayısı ve hacimsel verim gibi yanma olayının detayları, emisyon özellikleri ve müsaade edilebilir çalışma sınırları hususunda yeterli bilgi elde edebilmek için hava debisinin mutlaka bilinmesi gerekir. Dolayısıyla hava miktarının hassas bir şekilde ölçülmesi deney sonuçlarının gerçekçi olması bakımından son derece önemlidir [2, 148].

Akışın daima olması kaydıyla hava debisinin ölçümünde en sıhhatli netice keskin kenarlı lüle ve eğik manometreden oluşan sistemle alınmaktadır. Deneyde kullanılacak olan hava tankının kapasitesi motor hacminin 50 katından daha az olmamalıdır [149]. Darbelerin daha fazla olması sebebiyle tek silindirli motorlarda

iki ayrı tankın; 2 silindirli motorlarda 100×silindir toplam hacmi büyüklüğünde bir tankın kullanılması tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.22. Hava debi ölçüm düzeneği

4.3.1.6. Sıcaklık ölçümleri

Deneyle sırasında ortam sıcaklığı, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığı, egzoz gaz sıcaklığının ölçülebilmesi için NiCr-Ni tip termokupullar kullanılmış ve bunlar Şekil 4.23' de görülen Elimko 680 marka 32 kanallı bir sıcaklık göstergesine bağlanmıştır.



Şekil 4.23. Sıcaklık ölçüm düzeneği

4.3.1.7. Emisyon ölçümü

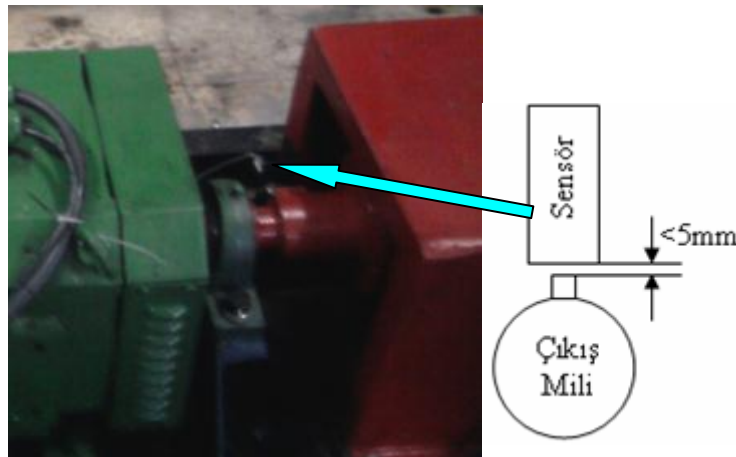
Çalışmada emisyon ölçümü için Şekli 4.24' de görülen MRU Delta 1600 L marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO₂, NO, NO_x ve HC gazlarının egzozdaki miktarlarını yüzde (%) ve ppm (milyonda bir) olarak vermektedir.



Şekil 4.24. Emisyon ölçüm cihazı (MRU Delta 1600L)

4.3.1.8. Motor hızı ölçümü

Deneysel esnasında motor devrini ölçmek için ENDA marka gösterge ve sensörü kullanılmıştır. Şekil 4.25' de devir sensörü ve bağlantı şekli görülmektedir. Sensör 5mm' den daha az bir mesafede ölçüm yapmaktadır. Mil üzerine bu amaçla bir kama kaynatılmıştır. Sensörün kamayı (çıkıntıyı) dakikadaki görme sayısı 1 d/d hassasiyetinde gösterge tarafından verilmektedir.

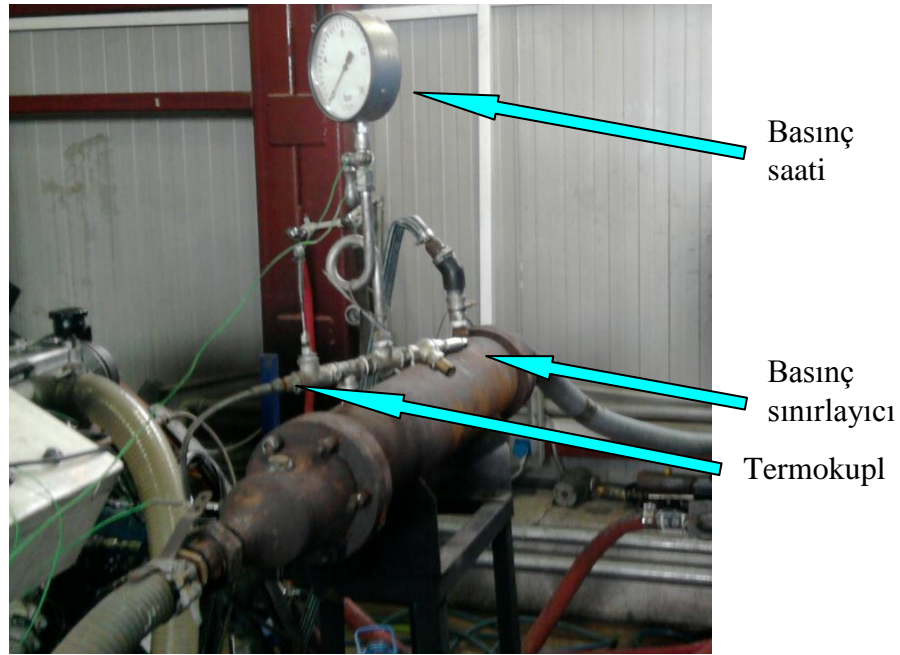


Şekil 4.25. Devir ölçer

4.4. Egzoz Enerjisinden Buhar Üretimi İçin Yapılan İşlemler

4.4.1. Atık ısı kazanı (Eşanjör)

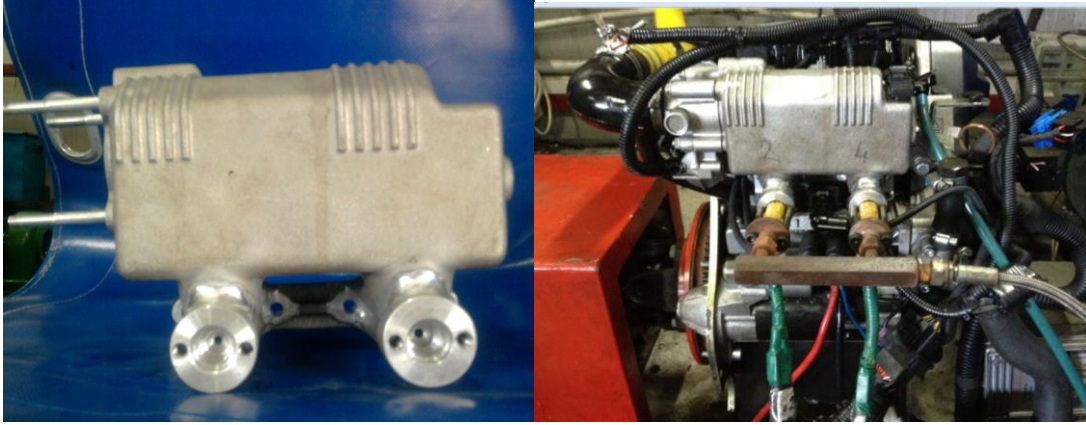
Egzoz kayıp ısısından buhar elde etmek amacı ile motorun egzoz devresine Şekil 4.26' de görülen karşıt akışlı ısı değiştiricisi bağlanmıştır. Isı değiştiricinin boyutları 15 mm iç çapında, üçken dizili ve 24 adet bakır borudan oluşmakta olup 1 m boyunda ve 16 litre su tutma kapasitesindedir.



Şekil 4.26. Atık ısı kazanı ve üzerindeki ekipmanlar

4.4.2. Motor emme hattına buhar enjektörünün konumlandırılması

Çalışmada, buhar motora emme periyodunda enjekte edilmiştir. Bu sebeple buhar enjektörünün konumu ve yerleştirilmesi çalışma açısından önem arz etmektedir. Enjektör, emme manifoldu üzerine püskürtülen buharın emme supabının hemen arkasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Buhar enjektörünün emme manifolduna takılmış hali ve buhar enjektörü Şekil 4.27' de görülmektedir.



Şekil 4.27. Emme manifolduna açılmış enjektör yuvası ve enjektör yuvasına takılmış buhar enjektörü

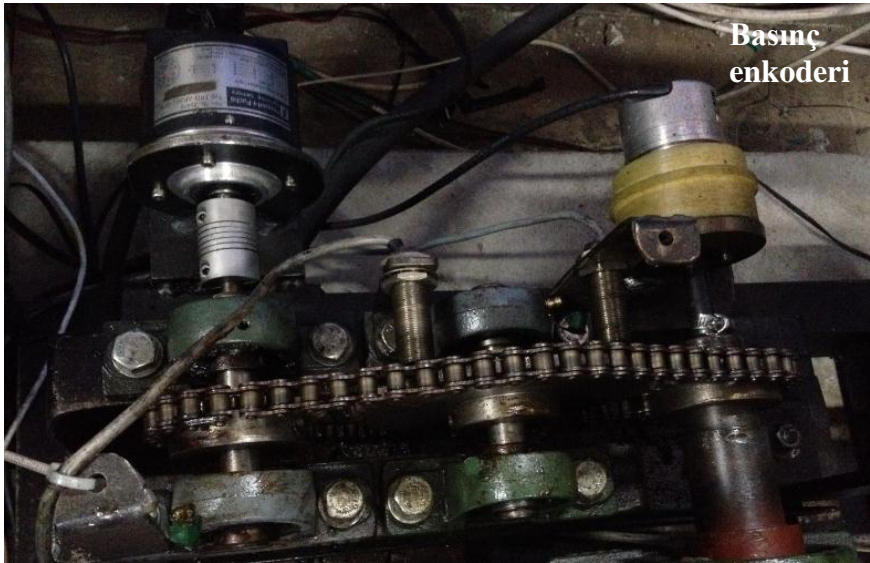
4.5. Silindir Basıncının Ölçülmesi

Silindir basıncının ölçümünde AVL marka GH13Z-24 model buji ateşlemeli bir piezo-elektrik sensör ve Kistler 5011B model şarj amplifikatörü kullanılmıştır. Veri aktarımı ve analizi dört kanallı SMETEC marka kanal başına 1 Mbyte veri aktarma hızına sahip Combi Combustion Indication Sytem kullanılmıştır. Silindir basıncı ölçümünde açıl konumu belirlemek için Heidenhain ROT426 model 3600 pals/tur özelliğine sahip bir enkoder sisteme bağlanmıştır. Şekil 4.28' de silindir basıncının ölçümünde kullanılan ölçme elemanlarının resimleri görülmektedir.

Silindir basınç verisinin eldesinde açıl konumu belirlemek için enkoder kullanılmıştır. Bağlama işlemi direkt motor çıkış mili yerine dinamometre milinin çıkış miline bağlanmış ve bağlama işlemi motor titreşimlerinden etkilenmesini önlemek için esnek bir bağlantı türü olan kaplin kullanılmıştır. Şekil 4.29' da sistemde kullanılan enkoder ve kaplin bağlantı resmi görülmektedir.



Şekil 4.28. Silindir basınç ölçüm düzeneği



Şekil 4.29. Silindir basınç ölçüm düzeneğindeki enkoder bağlantısı

Basınç sensörünün ve sinyal şartlandırıcının teknik özellikleri, Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Basınç sensörü ve şarj amplifikatörün teknik özellikleri

Silindir İçi Basınç Sensörü (AVL GH13Z-24, piezo-elektrik sensör)	
Ölçüm Aralığı (bar)	0-250
Hassasiyeti	16 pC/bar ve +/- % 0.3
Kararlı Çalışma Aralığı (oC)	-40-400 °C
Doğal Frekans (kHz)	115
Aşırı Yükleme (bar)	300
Şarj Amplifikatörü (5011B)	
Çıkış Gerilimi (V)	+/- 10
Maksimum Filtreleme (kHz)	30
Sapma (pC/s; mV/s)	-0.02
Ölçüm Adımı (mV)	0.5

4.6. DeneY Yöntemi

Deneylere başlamadan önce motorun genel kontrolleri yapılmıştır. Motor çalıştırılmadan önce soğutma kulesi şebeke suyu ile tamamen doldurulmuştur. Ölçüme başlamadan önce motor önce 10 dk. rölantide, daha sonra 2/3 yükte yarım saat çalıştırılarak rejim sıcaklığına getirilmiştir. Frenleme yükü, motor devri, yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarının ölçümüne geçilmeden önce motorun kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Motor kararlı hale geldikten sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir. Soğutma suyu çıkış sıcaklığı 70 °C' de sabit tutulmuştur. Su debisi rotometre vasıtasıyla ölçülmüştür.

Deneyler tam yük şartlarında 1600 ile 3600 d/d arasında 400 d/d aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

Deney yapılan tüm noktalarda motor devri, frenleme yükü, yakıt tüketimi, hava debisi ölçümü, ortam sıcaklığı ve nemi, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları ve debisi, egzoz gazı sıcaklığı ve emisyon ölçümü, ayrıca buhar enjeksiyonlu deneylerde bunlara ilave olarak buhar basıncı ve sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlere göre motor performans ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir. Tablo 4.3' de motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazlarına ait hassasiyetler verilmiştir.

Tablo 4.3. Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları

Ölçülen parametreler	Birim	Ölçüm aralığı	Ölçme aleti	Ölçüm hassasiyeti
Motor devri	d/d	0-9999	Dijital takometre	1 d/d
Egzoz sıcaklığı	°C	0-1000	Ni-Cr-Ni	1 °C
Soğutma suyu giriş-çıkış ve ortam sıcaklığı	°C	0-999	Fe-Konst.	1 °C
Buhar sıcaklığı	°C	0-999	Fe-Konst.	1 °C
Yakıt tüketim zamanı	s	-	Labview	0,001s
Fren terazi kuvveti	Kg	0-100	Elektrik Freni	0,01 Kg
Hava tüketim miktarı	mmSS	0-100	Eğik manometre	1 mm
Karbon monoksit	%	% 0-15,0	MRU Delta 1600 L	% ± 0,055
Karbon dioksit	%	% 0-20,0	MRU Delta 1600 L	% 0,5-5
Hidrokarbon	ppm	0-2000	MRU Delta 1600 L	±12 ppm
Azot oksit	ppm	0-3000	MRU Delta 1600 L	± 5 ppm

Karşılaştırma açısından deneyler ilk önce STD piston ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra egzoz atık ısısından elde edilen su buharı emme zamanında, emme manifolduna ve emme supabı açık iken motor yakıt sarfiyatının kütleli olarak % 10, % 20, ve % 30 oranlarında motora enjekte edilmiştir. Daha sonra sırasıyla aynı işlemler 4 mm MgO-ZrO₂, 4 mm Y₂O₃, 8 mm MgO-ZrO₂ ve 8 mm Y₂O₃ kaplı pistonlar için gerçekleştirilmiştir. Her bir pistonu yakıt sarfiyatının kütleli olarak % 10, % 20, ve % 30 oranlarında buhar püskürtülmüştür. Her bir pistonu her bir buhar püskürtme oranı için deneyler tekrarlanarak motor performans ve emisyon değerleri ölçülmüştür.

Deneylerin ikinci aşamasında benzin yakıtına farklı oranlarda metil ve etil alkol karıştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, piston üst yüzeyine farklı kalınlık ve farklı seramik malzeme ile kaplanması durumunda, motor performansı açısından en iyi sonuç 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ seramik malzeme ile kaplı pistonu elde edilmiştir. Benzin içersine farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) alkol karıştırarak motor performans açısından optimum karışım oranı belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda hem metil hem de etil alkolde en iyi motor torku ve gücünü veren sonuç M15 (%85 Benzin+%15 Metil Alkol) ve E15 (%85 Benzin+%15 Etil Alkol) karışimli yakıtlarda elde edilmiştir. Bu sebeple, elde edilen bu yakıtlara farklı oranlarda (%10, %20 ve %30) buhar enjeksiyonu yapılmıştır. Tablo 4.4'de

deneysel olarak kullanılan benzin, etil alkol ve metil alkolün kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Deneysel yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri [150-151]

Yakıt Özellikleri	Benzin	Etanol	Metanol
Kimyasal formülü	C ₈ H ₁₈	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ OH
Moleküler kütle (g/mol)	95-120	46.07	32.04
Yoğunluk (g/cm ³ 20°C)	0.72-0.76	0.790	0.792
Alt ısı değeri (kJ/kg)	44300	26900	20100
Stokiyometrik Hava/Yakıt oranı	14.6	9	6.46
Oksijen ağırlığı (%)	-	34.73	49.94
Araştırma oktan sayısı	95	108.6	108.7
Motor oktan sayısı	85	89.7	88.6
Tutuşma sıcaklığı (°C)	228-470	363	455
Kaynama noktası (°C)	27-225	78.3	64.5
Buharlaşma gizli ısı (kJ/kg)	1.4-7.6	3.5-15	5.5-36.5

4.7. Belirsizlik analizi

Deneysel olarak hesaplanan ana büyüklüklerin doğruluğu, ölçüm cihazlarının hassasiyetleri olduğu kadar ölçümler esnasında ortaya çıkan farklı faktörlerden kaynaklanabilir. Bu çalışmada, ölçüm esnasında kullanılan cihazların belirsizlikleri ve ölçümden kaynaklanan belirsizlikler belirsizlik analizi ile hesaplanmıştır.

Deneysel olarak her ölçüm noktasında 5 deneyin ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalamaların standart sapması hesaplanarak şüpheli verilerin atılması ya da tekrar edilerek güvenilir limiti içerisine sokulabilmesi için *Chauvenet kriterine* tabi tutulmuştur. Tek bağımsız parametrenin ölçümünde ölçümün ortalamasındaki belirsizlik,

$$S_{\bar{x}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada N tekrarlı ölçmelerin sayısını, σ ölçümün standart sapmasını, $S_{\bar{x}}$ ölçüm yapılan büyüklüğün ortalamasındaki belirsizliğini ifade etmektedir. Sistematik belirsizliğin olmadığı durumda sonlu sayıdaki verinin ortalaması

$$x_i = \bar{x}_m \pm t_{v,95} S_{\bar{x}} = x_m \pm B_{xi} \quad (4.2)$$

olarak verilmektedir. Burada, $\pm t_{v,95} S_{\bar{x}}$ ölçümün ortalamasındaki rasgele belirsizliği göstermektedir. Başka bir ifade ile verilen güvenilirlik aralığındaki kesinliği ifade etmektedir. t, serbestlik derecesi v ye bağlı P% güvenilirlik aralığının bir göstergesidir. Serbestlik derecesi $v=N-1$ bağıntısıyla ifade edilir.

Performans parametreleri pek çok bağımsız değişkenler içerdiğinden ortalamadaki belirsizlik artar. Değişkenlerin ortalama üzerindeki etkileri toplam belirsizlik olarak verilir.

x_i bağımsız değişkenin sistematik belirsizliği A_{xi} ve ölçüm esnasında ortaya çıkan rastgele belirsizlik B_{xi} olmak üzere toplam belirsizliği içeren doğru ortalama değer,

$$R = \bar{R} \pm u_R \quad (4.3)$$

olur. Burada \bar{R} ölçümün ortalama değerini göstermektedir. Sistematik ve rastgele belirsizlik birlikte dikkate alındığında toplam belirsizlik u_R ,

$$u_R = \pm [A_x^2 + (t_{v,95} B_x)^2]^{1/2} \quad (4.4)$$

olur. Üretim esnasında ortaya çıkan sistematik belirsizliklerin toplamı A_x ,

$$A_x = \left(\sum_{i=1}^N [\theta_i A_{xi}]^2 \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

Burada θ_i duyarlılık indeksidir. Deneyle esnasında ortaya çıkan rastgele belirsizlikler toplamı B_x ise aşağıdaki gibi olur.

$$B_x = \left(\sum_{i=1}^N [\theta_i B_{xi}]^2 \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

Şüpheli verilerin kontrolü için tekrar sayısına göre hazırlanmış Chauvenet kriteri Tablo 4.5’ de görülmektedir [65].

Tablo 4.5. Deneysel bulguların atılması için Chauvenet kriteri

Tekrarlı ölçüm sayısı	$ d_i / \sigma$
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81

Kriterin kullanılabilmesi için, öncelikle yapılan deneye ait σ standart sapma ve bütün bulgulara ait d_i sapmaları bilinmelidir. Bundan sonra her bir deneysel bulgu, Tablo 4.5’ deki kriter değeri ile karşılaştırılmalıdır. Eğer eldeki deneysel bulgulara ait oranlardan bazıları bu kriter değerinden büyük ise, bu bulgular değerlendirme dışı bırakılmalıdır.

Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler birbirinden bağımsız olduğunda, bağımlı değişkenin toplam belirsizliği kısmi diferansiyel yöntemine göre hesaplanabilir. Tablo 4.6’ de hesaplanan toplam belirsizlikler görülmektedir. Hesaplanan tüm parametrelerdeki toplam belirsizlik benzer şekilde hesaplanır. Yapılan ölçümde tüm değerler Chauvenet kriteri’ ne uymaktadır.

Tablo 4.6. Sistematik ve rastgele hatalara göre hesaplanmış toplam belirsizlikler (% 99 güvenirlilik aralığında)

Parametreler	Sistematik belirsizlikler, \pm
Yük, N	0.1
Devir, d/d	1.0
Zaman, s	0.1
Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$	1
Yakıt tüketimi, g	0.01
NO _x , ppm	5
CO, %	0.06
HC, ppm	12
CO ₂ , %	0.5
	Toplam Belirsizlik, %
Özgül Yakıt sarfiyatı, g/kWh	1.2
Moment, Nm	1.0
Efektif güç, kW	1.3

4.8. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller

İçten yanmalı motorlarda, krank mili devrine bağlı olarak ölçülen güç, moment ve yakıt sarfiyat değerlerine motor karakteristikleri denilmektedir. Değişik yük ve devirlerde bu değerlerde meydana gelen değişimler eğrilerle gösterilir. Bu değişimleri gösteren eğriye karakteristik eğri adı verilir. Bu eğriler motorun gerçek çalışma şartlarındaki performansı hakkında önemli bilgiler verir. Motor performansının tespiti amacı ile yapılan deneysel çalışmalarda doğrudan bulunamayan değerler, performans karakteristiklerini veren denklemlerle hesaplanır. Motor deneylerinde ölçülen büyüklükler genellikle döndürme momenti, devir sayısı, yakıt debisi, emme havası debisi, ortam sıcaklığıdır. Bu büyüklükler vasıtasıyla hesaplanan en önemli performans karakteristikleri ise efektif güç, döndürme momenti, ortalama efektif basınç ve özgül yakıt sarfiyatıdır [146].

4.8.1. Döndürme momenti ve efektif güç

Motor döndürme momenti ve güç hesaplamalarında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Motor tarafından oluşturulan döndürme momenti ve üretilen güç aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır [146].

$$M_d = F.L \quad (4.7)$$

$$P_e = \frac{2\pi.F.L.n}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (4.8)$$

Burada;

M_d = Döndürme momenti (Nm),

F = Fren terazi kuvveti (N),

L = Moment kolu uzunluğu (m),

P_e = Efektif güç(kW),

n = Motor devri (d/s).

4.8.2. Efektif verim

Efektif verim, motor milinden alınan işin silindire verilen enerjiye oranı şeklinde tarif edilir;

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_y \cdot H_u} \quad (4.9)$$

4.8.3. Ortalama efektif basınç

Ortalama efektif basınç motorun gerçek çevrimdekine eşdeğer bir P_e gücünü vermesi için bir strok boyunca pistona etkimesi gereken sabit basınç olarak ifade edilir. W_e (Nm/çev.), çevrim işi ve V_H (m^3), toplam strok hacmi olmak üzere ortalama efektif basınç [146]:

$$p_{me} = \frac{W_e}{V_H} = \frac{P_e}{n_\ç \cdot V_H} \quad (4.10)$$

Burada;

p_{me} = Ortalama efektif basınç (N/m^2),

P_e = Efektif güç (kW),

$n_\ç$ = Çevrim sayısı, $n_\ç = n \cdot i$ (çevrim/s),

4.8.4. Özgül yakıt sarfiyatı

Birim zamanda birim güç başına harcanan yakıt miktarına özgül yakıt sarfiyatı denir. Laboratuvar şartlarında bir motorun yakıt sarfiyatını deney tesisatında hacimsel olarak ölçmek mümkündür. Belli çalışma şartlarında motorun Δt (s) zaman aralığında tükettiği yakıtın hacmi $\Delta V(\text{cm}^3)$ olsun. Yakıtın yoğunluğu ρ_y (g/cm^3) ise, Özgül yakıt sarfiyatı, b_e ; [146].

$$b_e = \frac{3600 \cdot \Delta V \cdot \rho_y}{P_e \cdot \Delta t} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_y}{P_e} \quad (4.11)$$

olarak bulunur.

4.8.5. Hava debisi ölçümü

Motorun çalışması sırasında hava/yakıt oranını bulabilmemiz için motora giren hava miktarını bilmemiz gerekmektedir. Hava debisi ölçümü için, hava sönümleme tankı, orifis ve eğik manometre kullanılmaktadır. Testin yapılan motora hava girişi ile sönümleme tankının bağlantı şekli, servis halindeki motorun hava giriş bağlantı şekline mümkün olduğu kadar benzemelidir. Bu, hem volümetrik verim hem de pompalama kayıpları açısından, girişteki basınç plakalarının motor performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Hava sönümleme tankı motorun dalgalı çalışmasını önler, eğik manometre ve orifis basınç farkından dolayı motora giren hava miktarını verir [146].

$$\dot{m}_H = 7,182 d_H^2 \sqrt{(\Delta h_H)} \quad (4.12)$$

Burada;

d_H : Orifis çapı (mm)

Δh_H : Manometredeki akışkan yüksekliği (mmSS).

BÖLÜM 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneylere başlamadan önce motor ayar karakteristikleri fabrika değerlerinde ayarlanmıştır. Deney motoru için test edilecek minimum ve maksimum devir aralıkları tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada, STD ve piston üst yüzeyine farklı çap ve malzemelerde termal bariyer kaplanmış (TBC) motora, emme zamanında supabının tam arkasına konumlandırılmış selanoid enjektör ile buhar enjeksiyonunun motor performans parametreleri ve emisyon karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın diğer bir aşamasında TBC motorda M15 ve E15 (M15; %15 Metanol-%85 Benzin, E15; %15 Etanol-%85 Benzin karışımı) yakıtları kullanılması durumunda farklı oranlarda buhar enjeksiyonunun etkileri de ayrıca deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde püskürtülen buhar miktarları, motorun bir çevrimde tükettiği yakıt miktarının kütleli olarak %10 (B10), %20 (B20) ve %30 (B30) oranlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar % 95 ile % 99,9 güven aralığı dikkate alınarak Ki Kare Testi' ne tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, motor performans ve emisyon değerleri için optimum buhar püskürtme oranı, motor devri ve en uygun kaplama türünü veren şartlar belirlenmiştir.

5.1. Buhar Enjeksiyonu ve TBC Kaplamanın Motor Performans ve Egzoz

Emisyonlara Etkisi

5.1.1. Buhar enjeksiyonu ve TBC kaplamanın optimum çalışma koşullarını Ki

Kare testi ile tespiti

Tam yük şartlarında gerçekleştirilen motor performans parametreleri ve emisyon değerleri açısından optimum “motor devri, farklı çaplar ve farklı seramik malzemelerle kaplanmış motor (kaplama türü) ve buhar oranı” nı veren deney şartlarının belirlenmesinde Ki Kare yöntemi kullanılmıştır. Tablo 5.1 varyans analizi

(ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Varyans analizi sonuçlarına göre, motor performans parametreleri ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerine motor devri, kaplama ve buhar oranının etkileri farklı güven aralıkları (%95, %99, %99.9) için incelenmiştir.

Tablo 5.1. Varyans Analizi (ANOVA) Tablosu

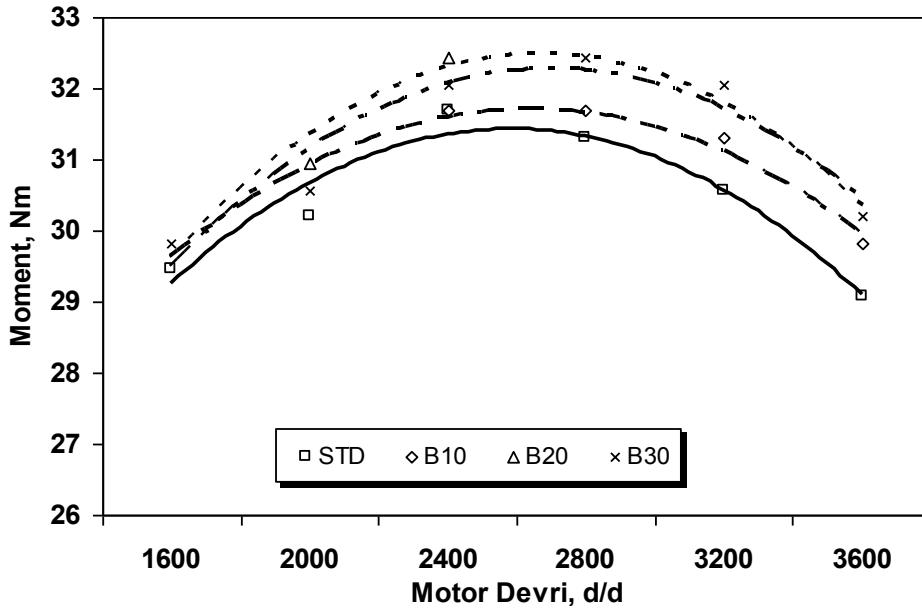
	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı <i>S</i>	Serbestlik Derecesi <i>f</i>	Kareler Ortalaması	F_{teorik}
MOMENT	[A] Devir	120,81	5	24,16	169,83***
	[B] % Buhar Oranı	12,48	3	4,16	29,25***
	[C] Kaplama	13,38	4	3,35	23,51***
	Toplam	146,67	12,00	12,22	
	e	15,22	107,00	0,14	
GÜÇ	[A] Devir	562,74	5	112,55	8112,36***
	[B] % Buhar Oranı	0,92	3	0,31	22,06***
	[C] Kaplama	1,11	4	0,28	20,02***
	Toplam	564,77	12,00	47,06	
	e	1,48	107,00	0,0138736189	
ÖYS	[A] Devir	23376,71	5	4675,34	230,83***
	[B] % Buhar Oranı	1836,72	3	612,24	30,23***
	[C] Kaplama	842,25	4	210,56	10,40***
	Toplam	26055,69	12,00	2171,31	
	e	2167,19	107,00	20,25	
EFEKTİF VERİM	[A] Devir	245,47	5	49,09	196,06***
	[B] % Buhar Oranı	19,95	3	6,65	26,55***
	[C] Kaplama	9,92	4	2,48	9,90***
	Toplam	275,34	12,00	22,94	
	e	26,79	107,00	0,25	
NO _x	[A] Devir	11306063,11	5	2261212,60	0,03
	[B] % Buhar Oranı	8773913192,63	3	2924637730,88	35,68***
	[C] Kaplama	1183594,91	4	295898,73	0,003
	Toplam	8786402850,54	12,00	732200237,55	
	e	8770151233,02	107,00	81964030,22	
HC	[A] Devir	733383,81	5	146676,76	147,42***
	[B] % Buhar Oranı	184469,67	3	61489,89	31,07***
	[C] Kaplama	29747,59	4	7436,90	43,37***
	Toplam	888105,90	12,00	74008,82	
	e	1078594,46	107,00	10080,32	
CO	[A] Devir	29,07	5	5,81	132,94***
	[B] % Buhar Oranı	0,25	3	0,08	1,92**
	[C] Kaplama	1,40	4	0,35	7,99***
	Toplam	30,72	12,00	2,56	
	e	4,68	107,00	0,04	
CO ₂	[A] Devir	19,75	5	3,95	102,63***
	[B] % Buhar Oranı	0,33	3	0,11	2,85**
	[C] Kaplama	0,87	4	0,22	5,65***
	Toplam	20,95	12,00	1,75	
	e	4,12	107,00	0,04	

* % 95 Güven aralığı **% 99 Güven aralığı ***% 99,9 Güven aralığı.

5.1.2. Farklı TBC kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun motor performansına etkileri

5.1.2.1. Buhar püskürtmenin döndürme momenti üzerine etkisi

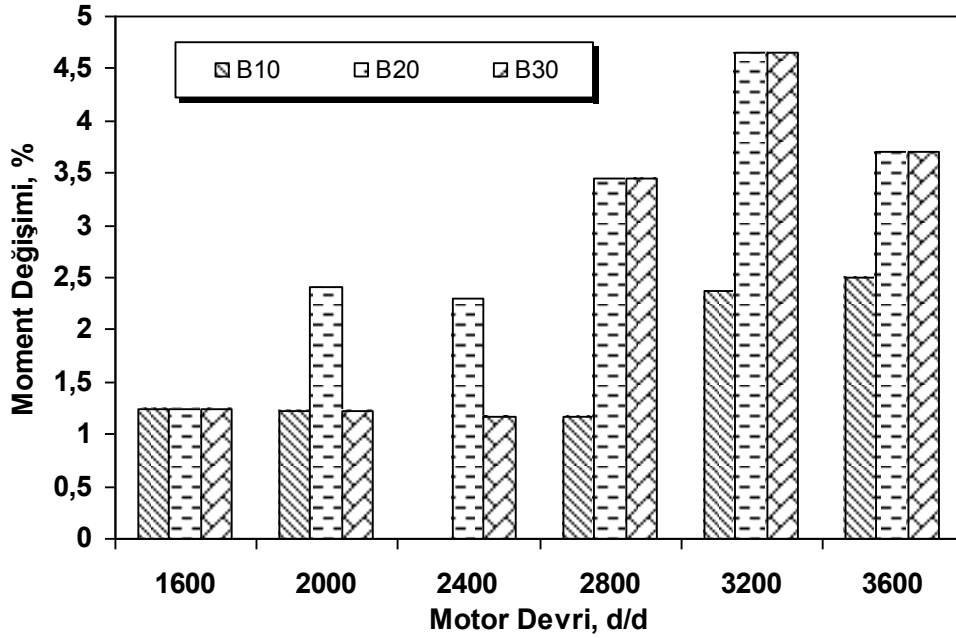
Egzoz enerjisinden elde edilen buharın bir benzin motoruna, emme periyodunda yakıt sarfiyatının % 10, % 20 ve % 30' u oranlarında püskürtülmesinin motor döndürme momenti üzerine etkileri Şekil 5.1' de görülmektedir. Şekil 5.2' de aynı şartlarda çalışan motor moment değerlerinin standart motor verilerine göre yüzde değişimleri verilmiştir. STD motora farklı oranlarda buhar püskürülmesi durumunda elde edilen moment değerleri tüm motor devirlerinde standart değere göre daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak döndürme momentindeki değişim

Standart motorun maksimum momenti 2400 d/d' da 31.68 Nm olarak ölçülmüştür. Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ise, aynı motor devrinde maksimum moment B20' de buhar oranında ulaşılmış ve bu şartlardaki moment değeri 32.43 Nm olarak ölçülmüştür. Motorun emme manifolduna buhar püskürtülmesi durumunda momentteki artışların maksimum değerleri B10 buhar oranında 3200 d/d' da % 2.38, B20 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65 ve B30 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65 olarak tespit edilmiştir. Motor deneylerinde

momentteki maksimum belirsizlik %1 olarak belirlenmiştir. Bu durumda buhar püskürtülmesi ile elde edilen moment değişimleri belirsizlik sınırının üzerindedir.



Şekil 5.2. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak momentin STD duruma göre değişimi

Motor momentindeki bu artış, buharın 3 bar basınç altında yaklaşık 133 °C sıcaklıkta bulunması ve bu sıcaklıkta motora püskürtülmesi, standart yakıt kullanılmaya göre, motora ilave bir entalpi girişine neden olması şeklinde yorumlanabilir. Aynı zamanda, silindir içerisine gönderilen su damlacıklarının (buharın) yakıt ile temasında yüzey gerilmesinin çok küçük olmasına, yakıtın çok daha küçük damlacıklarına bölünmesine neden olduğu, artan yüzey alanı nedeniyle yanma esnasında yakıtın hava ile çok daha iyi karıştığı, aynı zamanda suyun mikro patlamalarla yanma hızını arttırdığı literatüre dayalı olarak söylenebilir [57-58, 62, 65-67].

Şekil 5.3' de pistonun üst yüzeyine farklı çaplar ve farklı seramik malzemelerle kaplanmış motora buhar enjeksiyonu yapılması durumunda momentindeki değişim görülmektedir. Pistonun üst yüzeyine dış çaptan merkeze doğru 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda STD motora göre düşük devirlerde momentte artış, yüksek devirlerde ise momentte azalmalar görülmüştür.

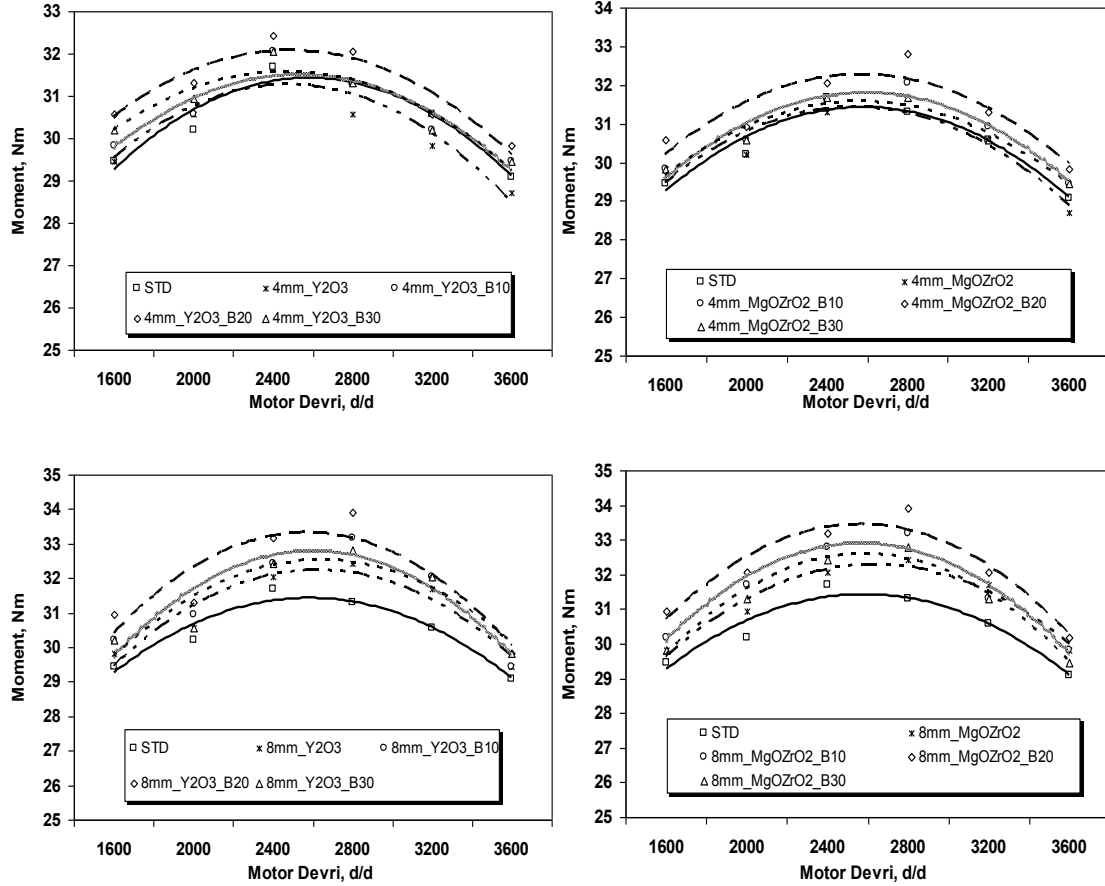
Ancak bu değişimler belirsizlik sınırlarında kaldığı için çok anlamlı değildir. Fakat TBÇ kaplı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda motorun tüm devir aralıklarında momentte artmalar tespit edilmiştir. STD motora göre momentteki maksimum artış değerleri B10 buhar oranında 3600 d/d' da % 1.26, B20 buhar oranında 1600 d/d' da % 3.65 ve B30 buhar oranında 1600 d/d' da % 1.25 olarak tespit edilmiştir.

Pistonun üst yüzeyine 8 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi kaplanması durumunda STD motora göre tüm devirlerde momentte artmalar görülmüştür. Maksimum artma oranı 2800 d/d' da % 3.44' dür. Bu TBÇ pistonuna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu gerçekleştirildiğinde momentte TBÇ motora göre tüm devirlerde artmalar gözlenmiştir. STD motora göre maksimum artış değerleri B10 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.61, B20 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.69 ve B30 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.54 olarak saptanmıştır. TBÇ kaplamalı motora göre ise momentteki maksimum artış % 20 buhar püskürtme oranında 2800 d/d' da % 4.39' dir. STD motora göre TBÇ motorda moment artışının nedeni, ısı kayıplarının azalması ve yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden dolayı olduğu literatüre dayalı olarak söylenebilir [51, 56, 96, 99-100].

Pistonun üst yüzeyine 4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik malzemesi ile kaplanması durumunda STD motora göre sadece 3600 d/d hariç tüm devir aralıklarında momentte artış gözlenmiştir. Maksimum artış oranı 1600 d/d da % 1.25' dir. Bu artış oranı hesaplanan belirsizlik değerinde olduğundan değişimler hata sınırlarında kalmaktadır. Farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise, tüm devirlerde motor momentinde artış tespit edilmiştir. STD motora göre motor momentindeki maksimum artış oranları, % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 2.32, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.54 ve % 30 buhar oranında 1600 d/d' da % 2.46 olarak saptanmıştır.

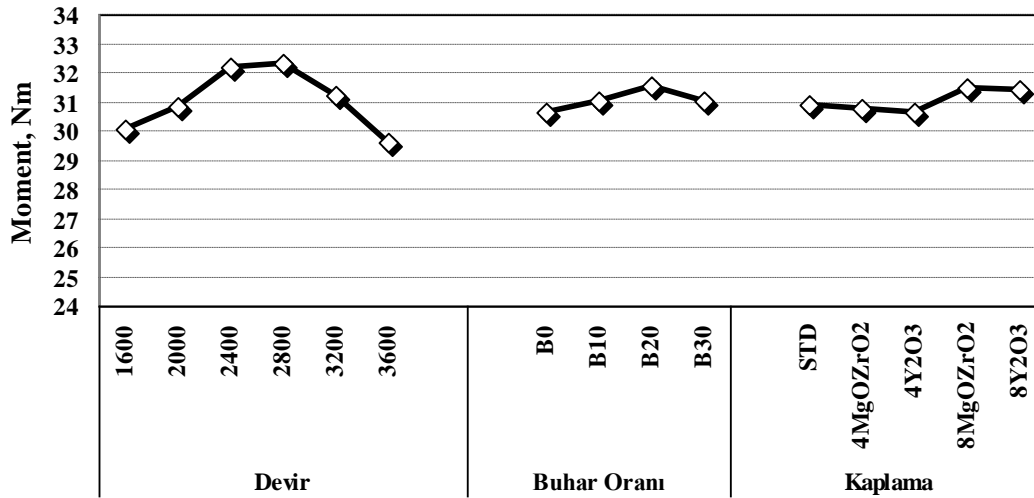
Pistonun üst yüzeyi 8 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik malzemesi ile kaplanması durumunda STD motora göre momentte tüm devirlerde artış olmaktadır. Maksimum artma 3200 d/d' da % 3.52' dir. Bu TBÇ pistonuna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda hem STD hem de kaplamalı motora göre momentte artmıştır.

STD motora göre maksimum artış değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.61, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.69 ve % 30 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65' dir. TBC kaplamalı motora göre ise momentteki maksimum artış % 20 buhar püskürtme oranında 2800 d/d' da % 4.39' dur.



Şekil 5.3. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak momentteki değişim

Şekil 5.4' de Ki Kare testi sonuçlarına göre, motor devri, buhar oranı ve kaplama türünün motor döndürme momenti üzerine etkileri görülmektedir. Momenti maksimum yapan en iyi sonuç % 99.9 güven aralığında 2400 d/d, B20 püskürtme oranı ve 8 mm MgO-ZrO₂ kaplamalı motor şartlarında elde edilmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta (4mm ya da 8 mm genişliğinde) kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler (Y₂O₃ ya da MgO-ZrO₂) kullanılmasının motor momenti üzerine fazla etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.

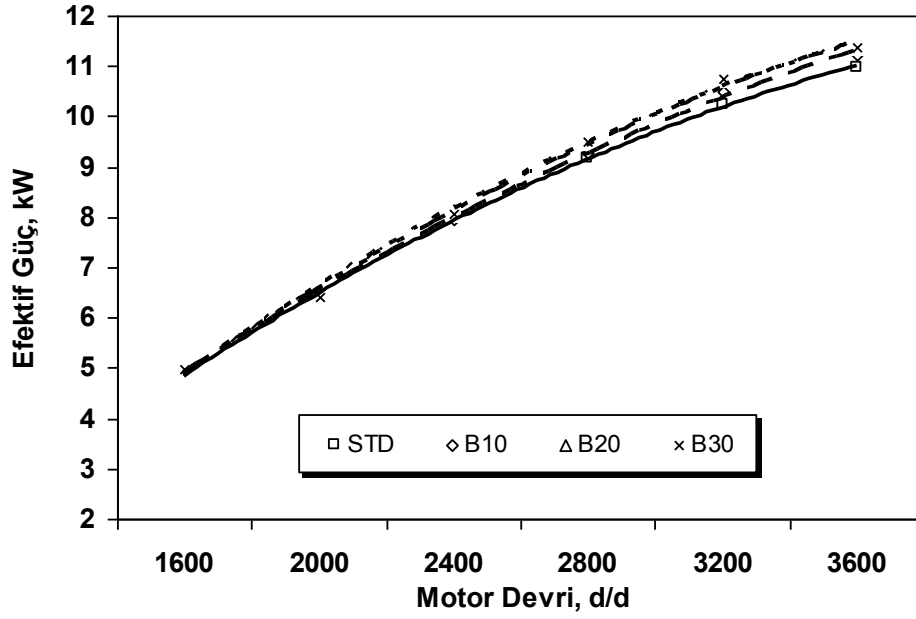


Şekil 5.4. Döndürme momenti için faktörlerin ortalama değerleri

5.1.2.2. Buhar püskürtmenin efektif güç üzerine etkisi

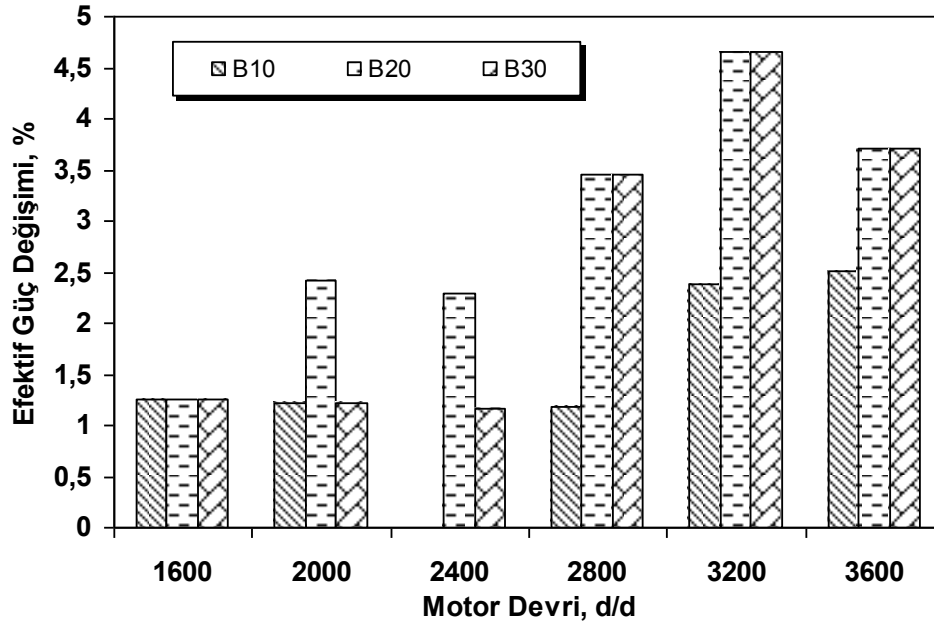
Motora emme zamanında, emme periyodunda yakıt sarfiyatının kütsel olarak % 10, % 20 ve % 30 oranlarında buhar püskürtülmesinin efektif güç üzerine etkileri Şekil 5.5' de görölmektedir. Şekil 5.6' da ise aynı şartlarda çalışan motorda güç değerlerinin standart motor verilerine göre yüzde değışimleri görölmektedir.

Motora farklı oranlarda buhar püskürölmesi durumunda elde edilen efektif güç değeri tüm motor devirlerinde standart değere göre daha yüksektir. Motorun standart şartlarda çalışması durumunda maksimum güç 3600 d/d' da 10.95 kW olarak ölçölmüştür. Motora buhar püskürtölmesi durumunda maksimum güçte 3600 d/d' da % 20 ve % 30 buhar oranlarında ulaşılmış ve bu şartlardaki güç değeri 11.37 kW olarak ölçölmüştür. Buhar püskürtölmesi durumunda güçteki artışların maksimum değeri % 10 buhar oranında 3200 d/d' da % 2.38, % 20 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65 ve % 30 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65 olarak ölçölmüştür. Buhar enjektisi durumunda motor efektif gücündeki artma değeri hesaplanan belirsizlik değeri (% 1.3) üzerindedir.



Şekil 5.5. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim

Buhar püskürtülmesi durumunda döndürme momentinin artmasına neden olan benzer sebeplerden dolayı motor efektif gücünde de artmalar meydana gelmiştir.



Şekil 5.6. Püskürtülen buhar oranına bağlı efektif gücün STD duruma göre değişimi

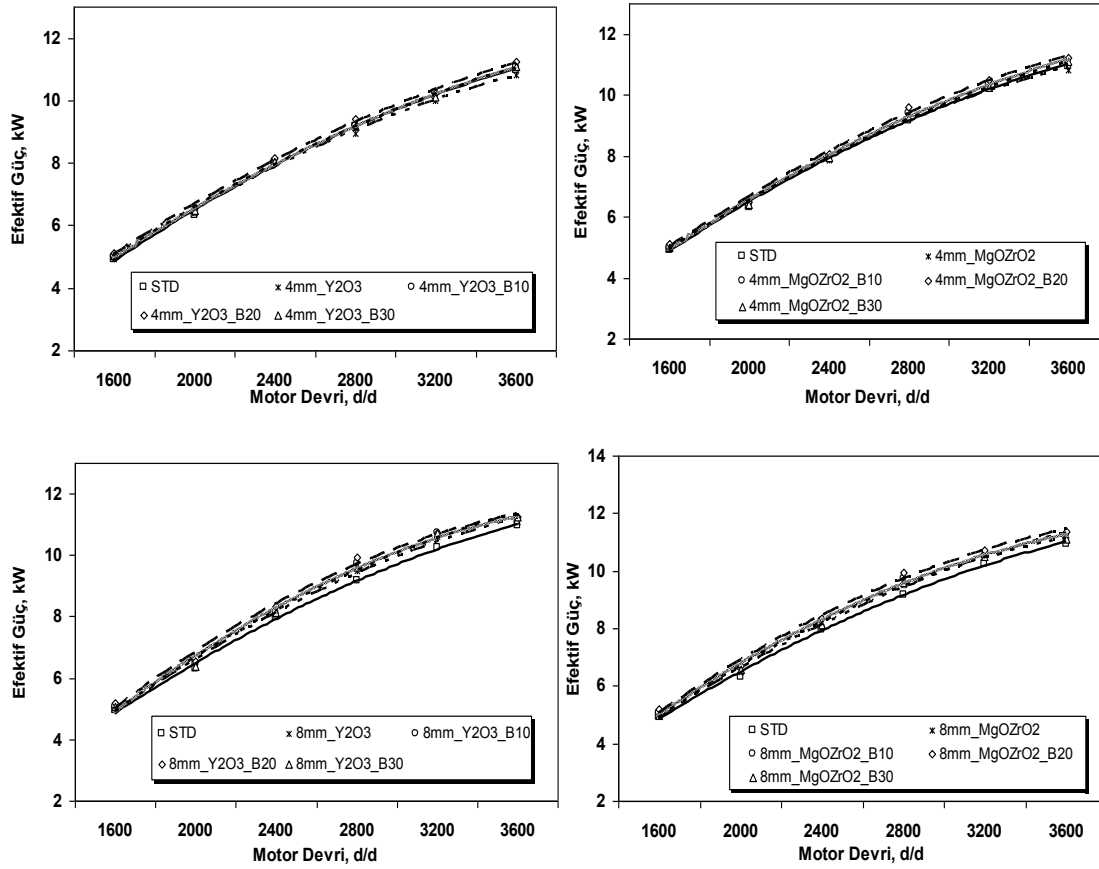
Şekil 5.7' de pistonun üst yüzeyine farklı çap ve seramik malzemelerle kaplanmış motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda efektif güçteki

değişim görülmektedir. 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik kaplı pistonda STD motora göre düşük devirlerde efektif güçte artış, yüksek devirlerde ise azalmalar görülmüştür. Ancak bu değişimler belirsizlik sınırlarında kaldığı için çok anlamlı değildir. Fakat TBC kaplı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda motorun tüm devir aralıklarında efektif güçte artmalar tespit edilmiştir. Efektif güçteki maksimum artış değerleri STD duruma göre % 10 buhar oranında 3600 d/d' da % 1.26, % 20 buhar oranında 1600 d/d' da % 3.65 ve % 30 buhar oranında 1600 d/d' da % 1.25 olarak tespit edilmiştir.

8 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik kaplı pistonda tüm devirlerde efektif güçte artmalar görülmüştür. Maksimum artma 2800 d/d' da % 3.44' dür. Bu TBC pistona farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda hem STD hem de kaplamalı motora göre efektif güçte artış gözlenmiştir. STD motora göre maksimum artış değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.61, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.69 ve % 30 buhar oranında 3200 d/d' da % 4.65 olarak saptanmıştır.

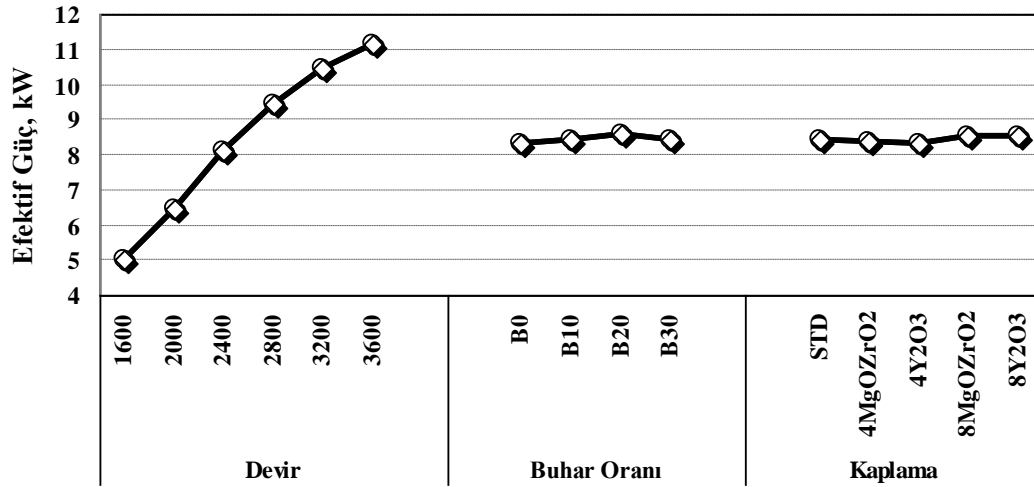
4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı pistonda STD motora göre sadece 3600 d/d hariç tüm devir aralıklarında efektif güç artış gözlenmiştir. Maksimum artış oranı 1600 d/d da % 1.25' dir. Bu artış oranı hesaplanan belirsizlik değerinde olduğundan değişimler hata sınırlarında kalmaktadır. Farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise tüm devirlerde STD motora göre efektif güçte artış tespit edilmiştir. STD motora göre maksimum artış oranları, % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 2.32, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.54 ve % 30 buhar oranında 1600 d/d' da % 2.46 olarak saptanmıştır.

8mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı pistonda efektif güçte tüm devirlerde artış olmaktadır. Maksimum artma 3200 d/d' da % 3.52' dir. Bu TBC pistona farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda hem STD hem de kaplamalı motora göre efektif güçte artmıştır. STD motora göre maksimum artış değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.61, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.69 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.54' dür.



Şekil 5.7. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim

Ki Kare yöntemi kullanılarak optimum çalışma şartlarının belirlenmesi amacı ile yapılan deneysel tasarımda % 99.9 güven aralığına göre, faktör değerlerinin efektif güç üzerine etkileri Şekil 5.8’ de görülmektedir. Efektif gücü maksimum yapan en iyi sonuç % 99.9 güven aralığında 3600 d/d, B20 buhar püskürtme oranında ve 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ kaplamalı motor şartlarında elde edilmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler kullanılmasının efektif güç üzerine fazla etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.

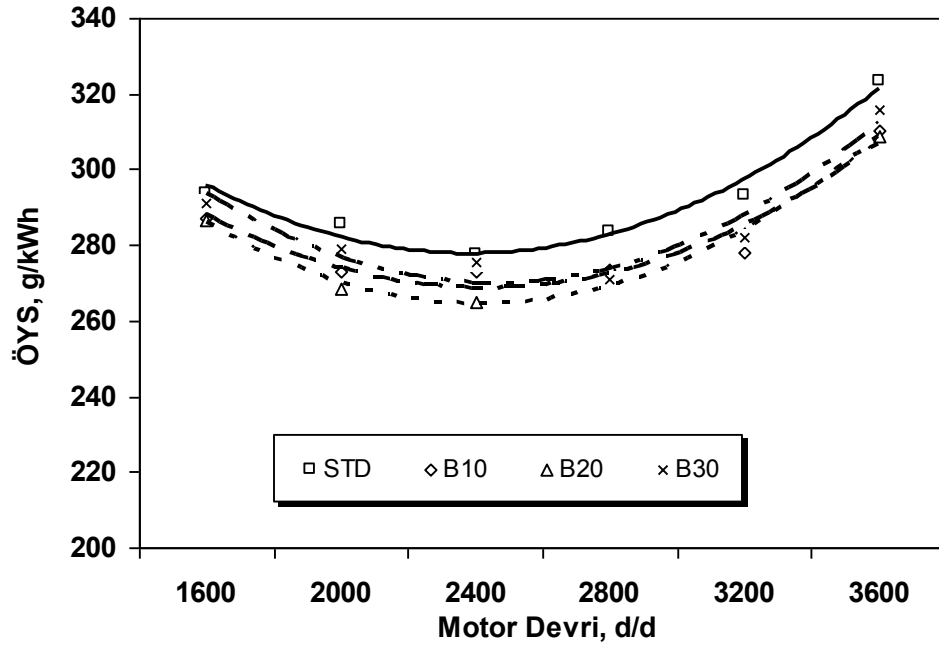


Şekil 5.8. Etkif güç için faktörlerin ortalama değerleri

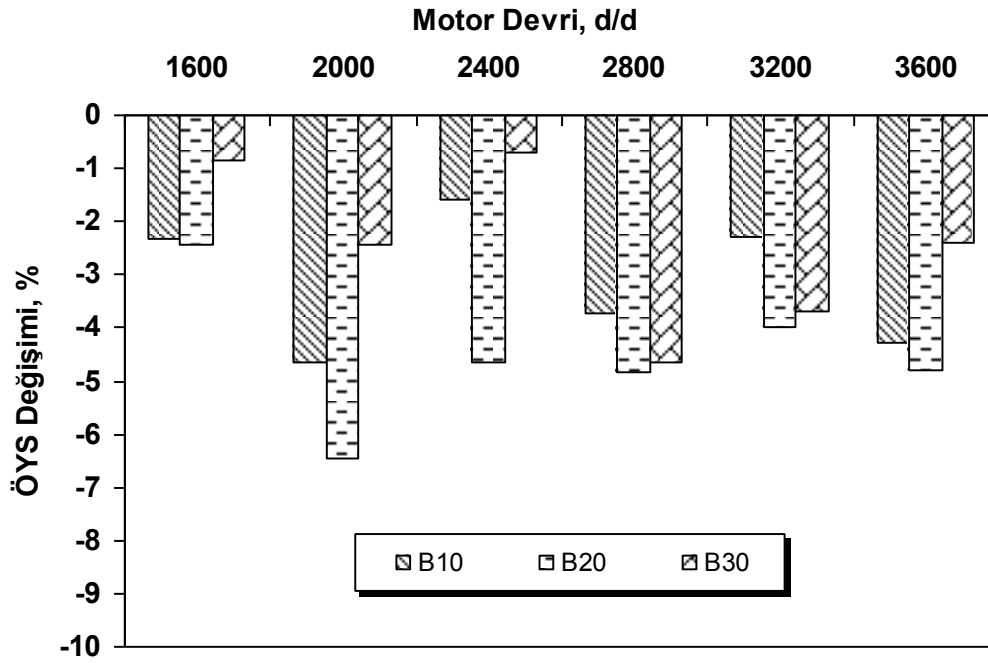
5.1.2.3. Buhar püskürtmenin özgül yakıt sarfiyatı üzerine etkisi

Motora, emme periyodunda buhar gönderilmesinin özgül yakıt sarfiyatına etkileri Şekil 5.9' da görülmektedir. Şekil 5.10' da ise aynı şartlarda çalışan motorda özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin standart motor verilerine göre yüzde değişimleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, motora buhar püskürtülmesi durumunda özgül yakıt sarfiyatında tüm buhar oranlarına azalmalar görülmektedir. ÖYS' deki maksimum azalma % 20 buhar püskürtme oranında gerçekleşmiştir. Standart motorda en düşük özgül yakıt sarfiyatı 2400 d/d' da 277.36 g/kWh iken % 20 buhar püskürtme oranında 2400 d/d' da 265.05 g/kWh olarak elde edilmiştir.

Motora farklı oranlarında buhar püskürtülmesi durumunda ÖYS' deki maksimum azalma miktarları, % 10 buhar oranında 2000 d/d' da % 4.65, % 20 buhar oranında 2000 d/d' da % 6.44 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.63 olarak ölçülmüştür. ÖYS için hesaplanan belirsizlik değeri % 1.2' dir. Tüm buhar püskürtme oranında elde edilen değişimler belirsizlik değerinin üzerindedir.



Şekil 5.9. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak ÖYS' deki değişim



Şekil 5.10. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak ÖYS' nin STD duruma göre değişimi

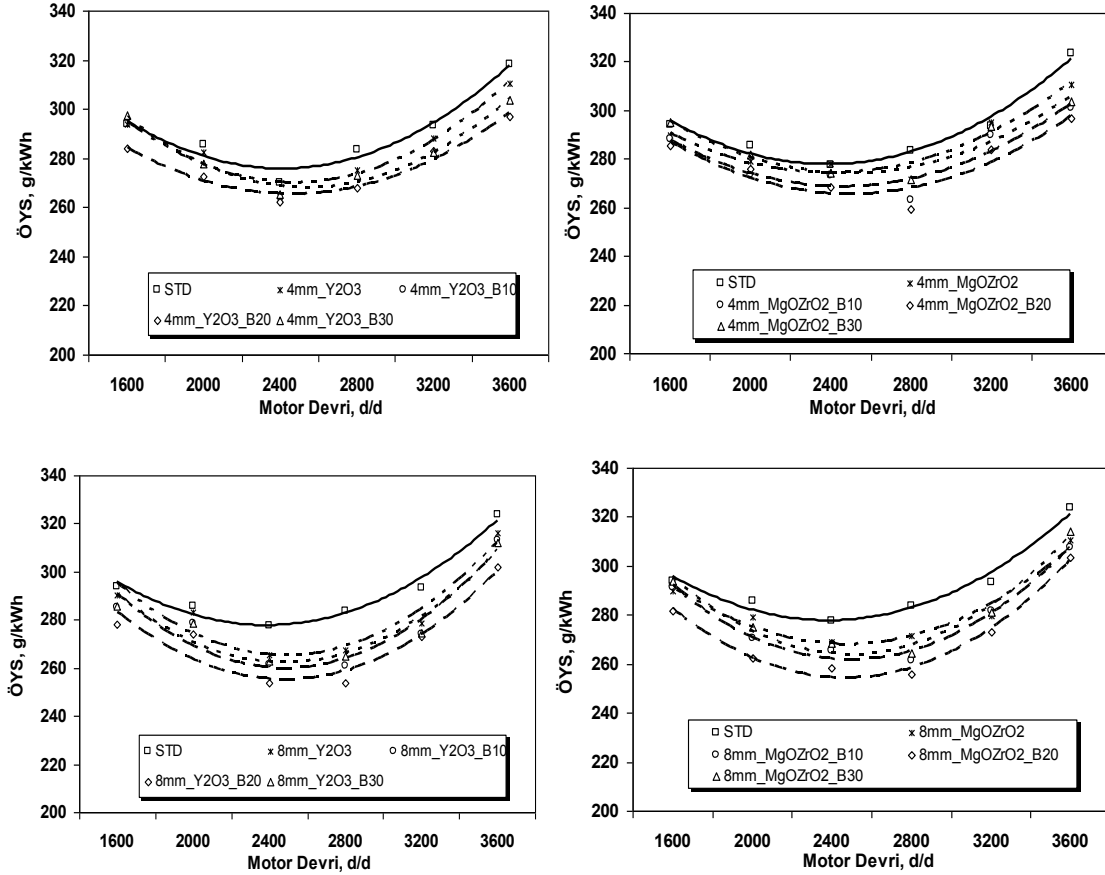
Şekil 5.11' de farklı TBÇ kaplamalı pistonlara farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ÖYS' de meydana gelen değişimler görülmektedir. Pistonun üst yüzeyi 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda ÖYS' de STD motora göre tüm devirlerinde azalmalar tespit edilmiştir. Bu pistonun STD motora göre ÖYS' deki maksimum azalma miktarı 3600 d/d' da % 2.40' dır. TBÇ pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması ile birlikte de tüm devirlerde ÖYS' de azalmalar görülmüştür. STD motora göre ÖYS' de maksimum azalma değerleri % 10 buhar oranında 3600 d/d' da % 4.45, % 20 buhar oranında 3600 d/d' da % 5.31 ve % 30 buhar oranında 3600 d/d' da % 4.82 olarak tespit edilmiştir.

Pistonun üst yüzeyi 8 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda tüm devirlerde ÖYS' de azalmalar görülmüştür. ÖYS' de maksimum azalma 2800 d/d' da % 5.34 olduğu tespit edilmiştir. Bu TBÇ pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise, TBÇ pistonu göre ÖYS' de azalma gözlenmiştir. STD motora göre maksimum azalma değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.10, % 20 buhar oranında 2400 d/d' da % 9.29 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.79 olarak saptanmıştır.

4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı motor ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde ÖYS' de STD motora göre tüm devirlerde azalmalar gözlenmiştir. Maksimum azalma oranı 2800 d/d da % 3.20' dir. TBÇ pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise tüm devirlerde TBÇ pistonu göre ÖYS' de azalmalar tespit edilmiştir. STD motora göre maksimum azalma oranları, % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.19, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.7 ve % 30 buhar oranında 3600 d/d' da % 5.53 olarak saptanmıştır.

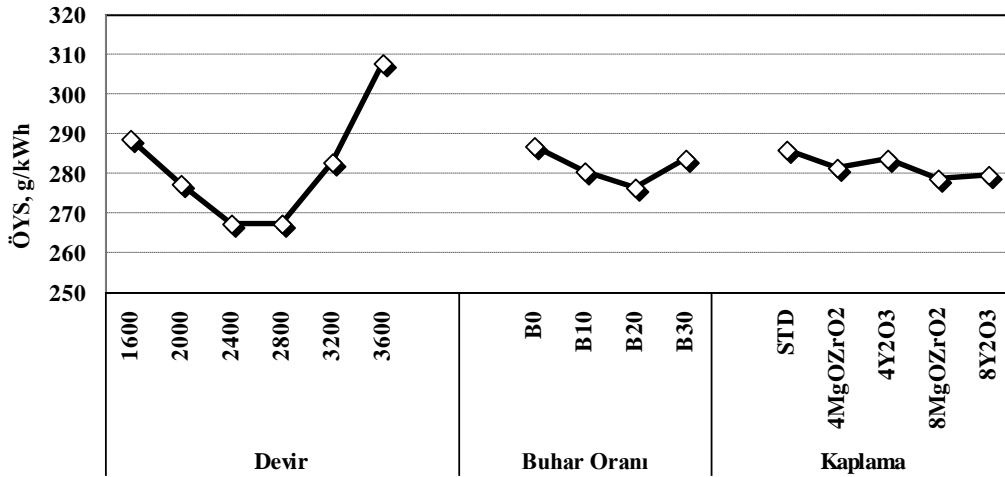
8 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı motor ile elde edilen deney sonuçlarına göre ÖYS' de tüm devirlerde azalmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Maksimum azalma oranı 3200 d/d' da % 5.94 olarak saptanmıştır. TBÇ pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda TBÇ pistonu göre tüm motor devirlerinde ÖYS azalmıştır. STD motora göre maksimum azalma değerleri

% 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.22, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 9.66 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.85 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.11. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ÖYS' daki değişim

Şekil 5.12' de ÖYS üzerine etki eden faktörlerin ortalama değerleri görülmektedir. Motor devri, buhar oranı ve kaplama türü dikkate alınarak yapılan Ki kare testine göre, % 99.9 güven aralığı dikkate alındığında 2400 d/d, B20 buhar püskürtme oranı ve 8 mm MgO-ZrO₂ seramik malzeme ile kaplı pistonun ÖYS açısından optimum olduğu tespit edilmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler kullanılmasının özgül yakıt sarfiyatı üzerine fazla etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.



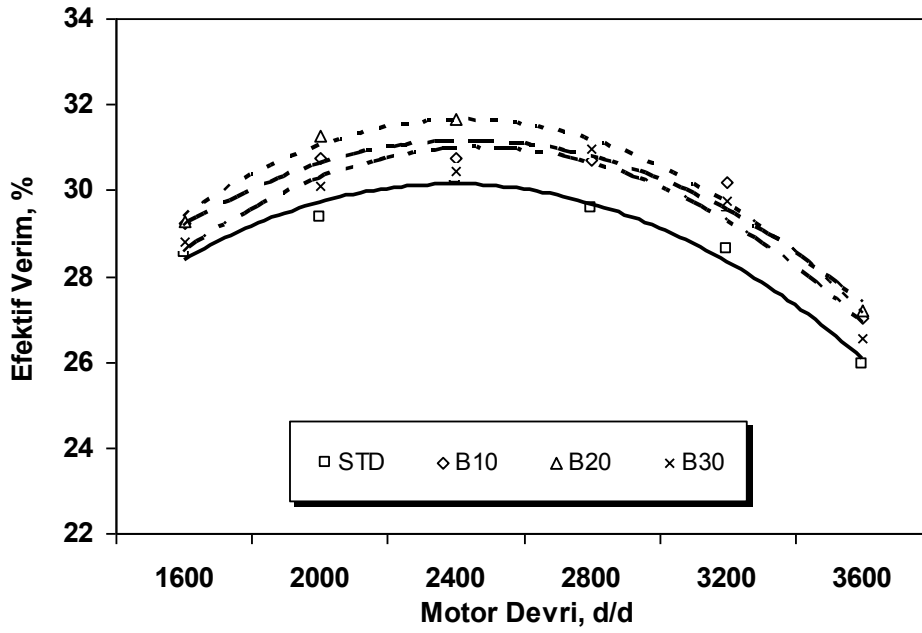
Şekil 5.12. Özgül yakıt sarfiyatı için faktörlerin ortalama değerleri

5.1.2.4. Buhar püskürtmenin efektif verim üzerine etkisi

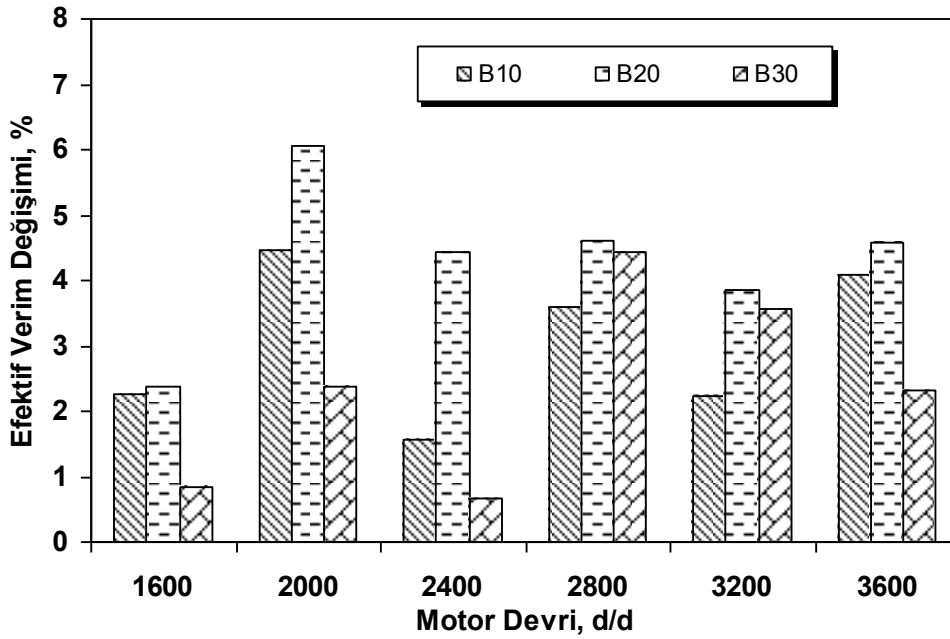
Şekil 5.13' de motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda tam yük şartlarındaki efektif verim değerleri verilmiştir. Şekil 5.14' de ise motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda elde edilen efektif verim değerlerinin STD değerlere göre yüzde değişimleri görülmektedir.

Deneylerin gerçekleştirildiği devirlerde püskürtülen tüm buhar oranlarında efektif verimde standart değerlere göre artmalar olmuştur. Motorun STD şartlarda çalıştırılması durumunda efektif verimde elde edilen maksimum değer 2400 d/d' da % 30.25 olarak ölçülmüştür. Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ise, aynı motor devrinde maksimum efektif verim B20 buhar püskürtme oranında % 31.65 olarak saptanmıştır.

Buhar oranlarına bağlı olarak efektif verimdeki maksimum artma oranları, B10' da 3600 d/d' da % 4.09, B20' de 2000 d/d' da 6.05 ve B30' da 2800 d/d' da % 4.42 şeklinde hesaplanmıştır.



Şekil 5.13. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif verimdeki değişim



Şekil 5.14. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak efektif verimin STD duruma göre değişimi

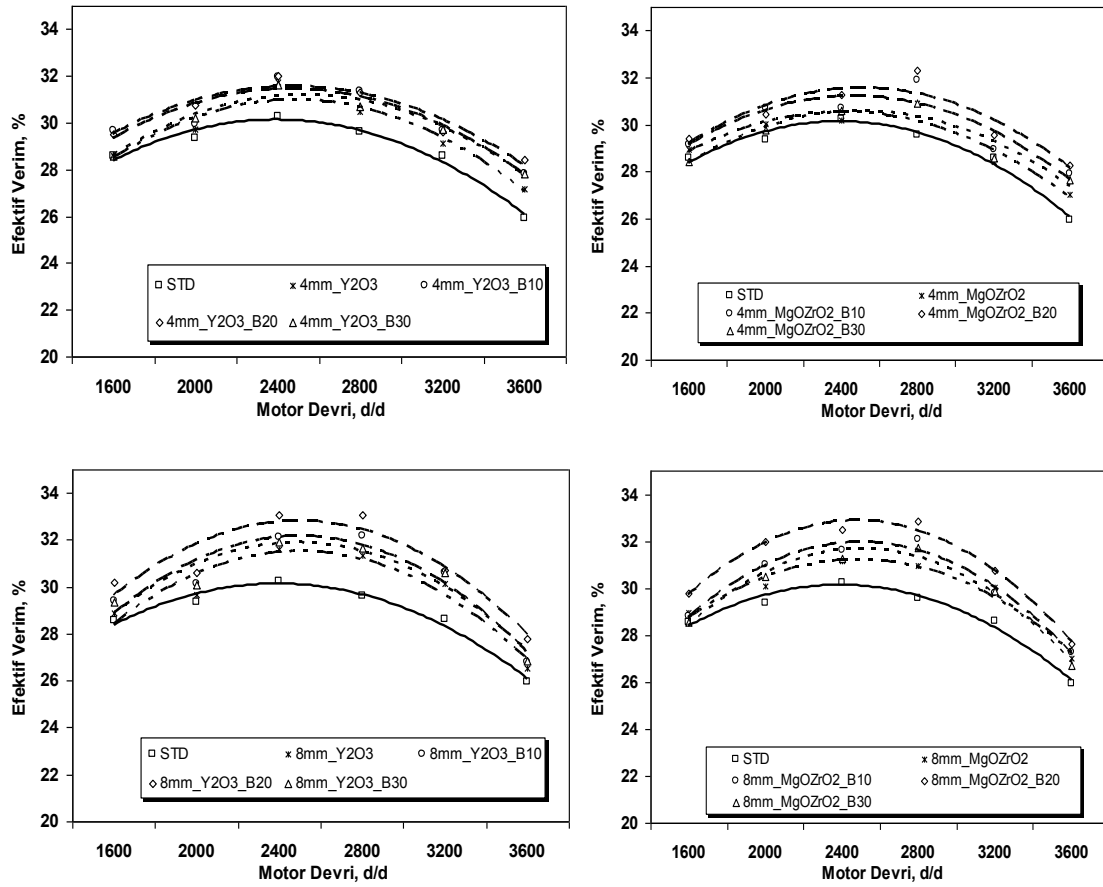
Şekil 5.15' de STD motora göre piston üst yüzeyinin iki farklı genişlikte ve iki farklı seramik malzeme ile kaplanması ve bu dört farklı TBÇ pistonuna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda efektif verimde meydana gelen değişimler görülmektedir. Pistonun üst yüzeyine 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzeme ile

kaplanması durumunda elde edilen efektif verim değerleri STD motor verileriyle karşılaştırıldığında tüm test devirlerinde artmaların olduğu saptanmıştır. TBC' li pistonla efektif verimde maksimum artma miktarı 2400d/d' da % 2.34' dür. Bu TBC pistonla farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise tüm motor devirlerinde STD duruma göre efektif verimde daha fazla iyileşmeler elde edilmiştir. STD motora göre efektif verimdeki maksimum artma değerleri % 10 buhar oranında 3600 d/d' da % 4.26, % 20 buhar oranında 3600 d/d' da % 6.05 ve % 30 buhar oranında 3600 d/d' da % 4.60 olarak tespit edilmiştir.

Pistonun üst yüzeyi 8 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda tüm devirlerde STD motora göre efektif verimde artmalar görülmüştür. Efektif verimdeki maksimum artma oranı 2800 d/d' da % 5.07' dir. Bu TBC pistonla farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise, TBC piston standart verilerine göre efektif verimde artmalar gözlenmiştir. STD motora göre maksimum artma değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.70, % 20 buhar oranında 2400 d/d' da % 8.59 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 5.48 olarak saptanmıştır.

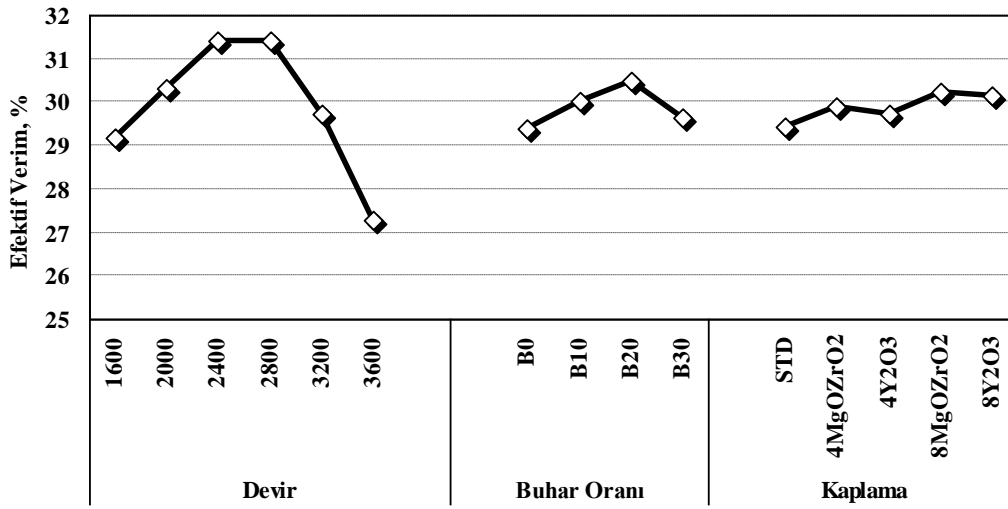
Pistona 4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik malzeme ile kaplanması durumunda STD motora göre tüm devirlerde efektif verimde artmalar gözlenmiştir. Maksimum artma oranı 2800 d/d da % 3.10' dur. TBC pistonla farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise tüm devirlerde TBC pistonla göre efektif verimde artmalar tespit edilmiştir. STD pistonla göre maksimum artma oranları, % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 4.93, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.28 ve % 30 buhar oranında 3600 d/d' da % 5.24 olarak saptanmıştır.

Motora 8 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı piston takıldığında tüm deney devirlerinde efektif verimde artmaların olduğu saptanmıştır. STD motora göre maksimum artma oranı 3200 d/d' da % 5.60' dır. TBC pistonla farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda TBC pistonla göre tüm motor devirlerinde efektif verimde artmalar olmuştur. STD motora göre maksimum artma değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.89, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 8.81 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 6.41 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.15. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak Efektif Verimdeki değişim

Optimum çalışma şartlarının belirlenmesi amacı ile yapılan Ki Kare testinde, % 99.9 güven aralığına göre faktörlerin ortalama değerlerinin efektif verime etkileri Şekil 5.16' da görülmektedir. Efektif verimini maksimum yapan sonucun % 99.9 güven aralığında, 2400 d/d, B20 buhar püskürtme oranında ve pistonun üst yüzeyinin 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ seramik malzemesi ile kaplanması durumunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler kullanılmasının efektif verim üzerine fazla etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.

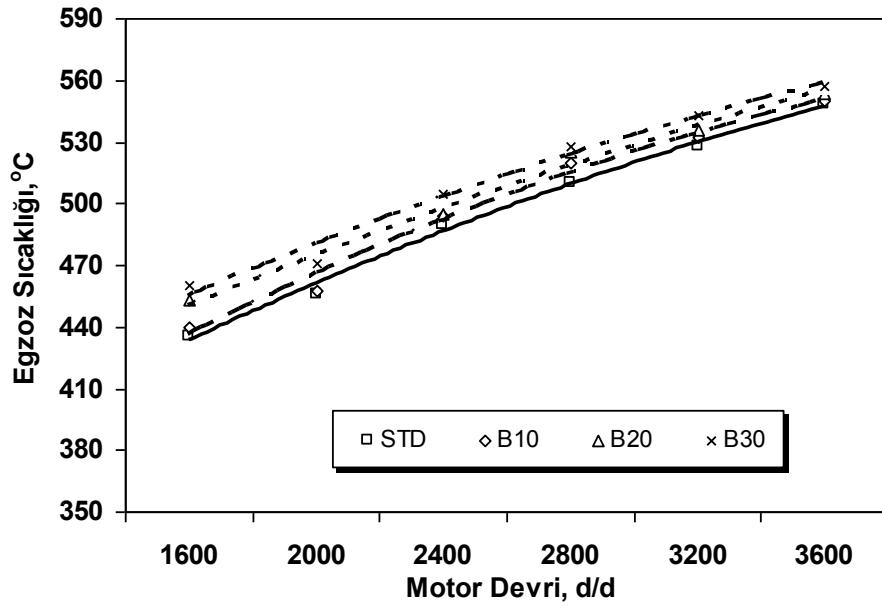


Şekil 5.16. Efektif verim için faktörlerin ortalama değerleri

5.1.2.5. Buhar püskürtmenin egzoz gaz sıcaklığı üzerine etkisi

Motora tam yük şartlarında, farklı (B10, B20 ve B30) oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda egzoz gaz sıcaklığındaki değişimler motor devrine bağlı olarak Şekil 5.17' de verilmiştir. Motora püskürtülen tüm buhar oranlarında egzoz gaz sıcaklığında standart verilere göre artmaların olduğu görülmüştür.

Motora püskürtülen buhar yüzdesi arttıkça egzoz sıcaklığının artmasının nedeni; Yanma ürünleri içerisindeki su buharının yüzdesine bağlı olarak maksimum yanma sıcaklığının düşmesidir. Bu yanma sonu sıcaklığının düşmesi, yanma odasında gerçekleşen yanma hızının yavaşlamasına sebep olmaktadır. Bu yanma hızının yavaşlaması STD motora göre yanmanın daha geç sürede tamamlanmasına neden olmaktadır. Bu sebeple buhar püskürtülmesi ile birlikte yanma genişleme stroku boyunca devam etmektedir. Bu da egzoz sıcaklıklarının artmasına sebep olmaktadır.

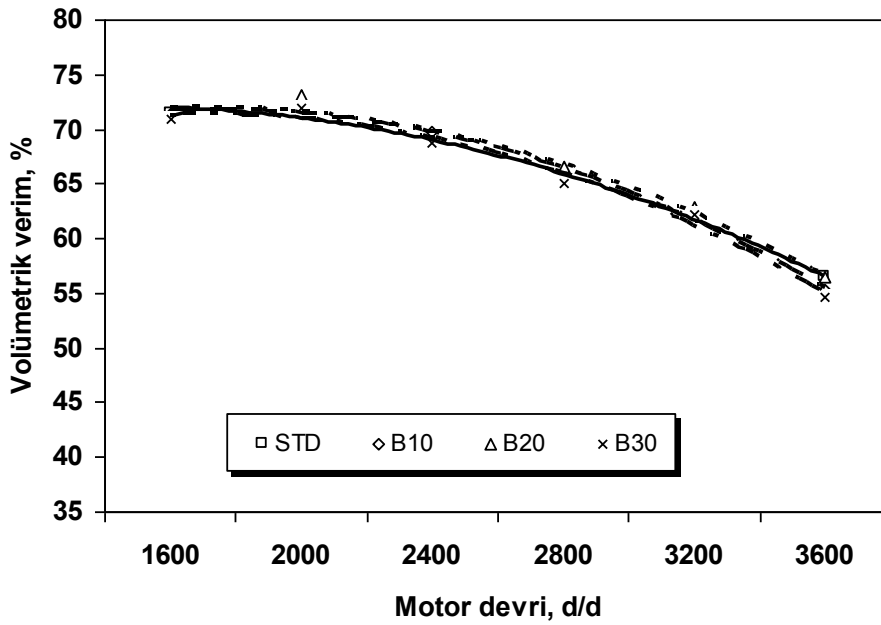


Şekil 5.17. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığındaki değişim

5.1.2.6. Buhar püskürtmenin volümetrik verim üzerine etkisi

Şekil 5.18' de motorun emme manifolduna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda hacimsel verimdeki değişimler karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tam yük şartlarında deneylerin gerçekleştirildiği tüm buhar oranlarında volümetrik verimde, standart değerlere göre artma ya da azalma yönünde gözlenebilir bir değişim meydana gelmemiştir.

Standart şartlarda ölçülen maksimum volümetrik verim 2000 d/d' da % 72 dir. Buhar püskürtme durumunda da verim değeri aynı devirde % 72 olarak bulunmuştur. Çalışmada buhar emme kanalına 3 bar basınç altında püskürtülmüştür. Volümetrik verimi etkilememesi için emme supabının hemen arkasına ve emme supabı açık durumda iken püskürtme gerçekleştirilmiştir. Püskürtme başlangıcı pistonun ÜÖN' dan 5 derece sonra başlatılmıştır. Bu sebeplerden dolayı volümetrik verimde dikkate değer bir değişim meydana gelmemiştir.



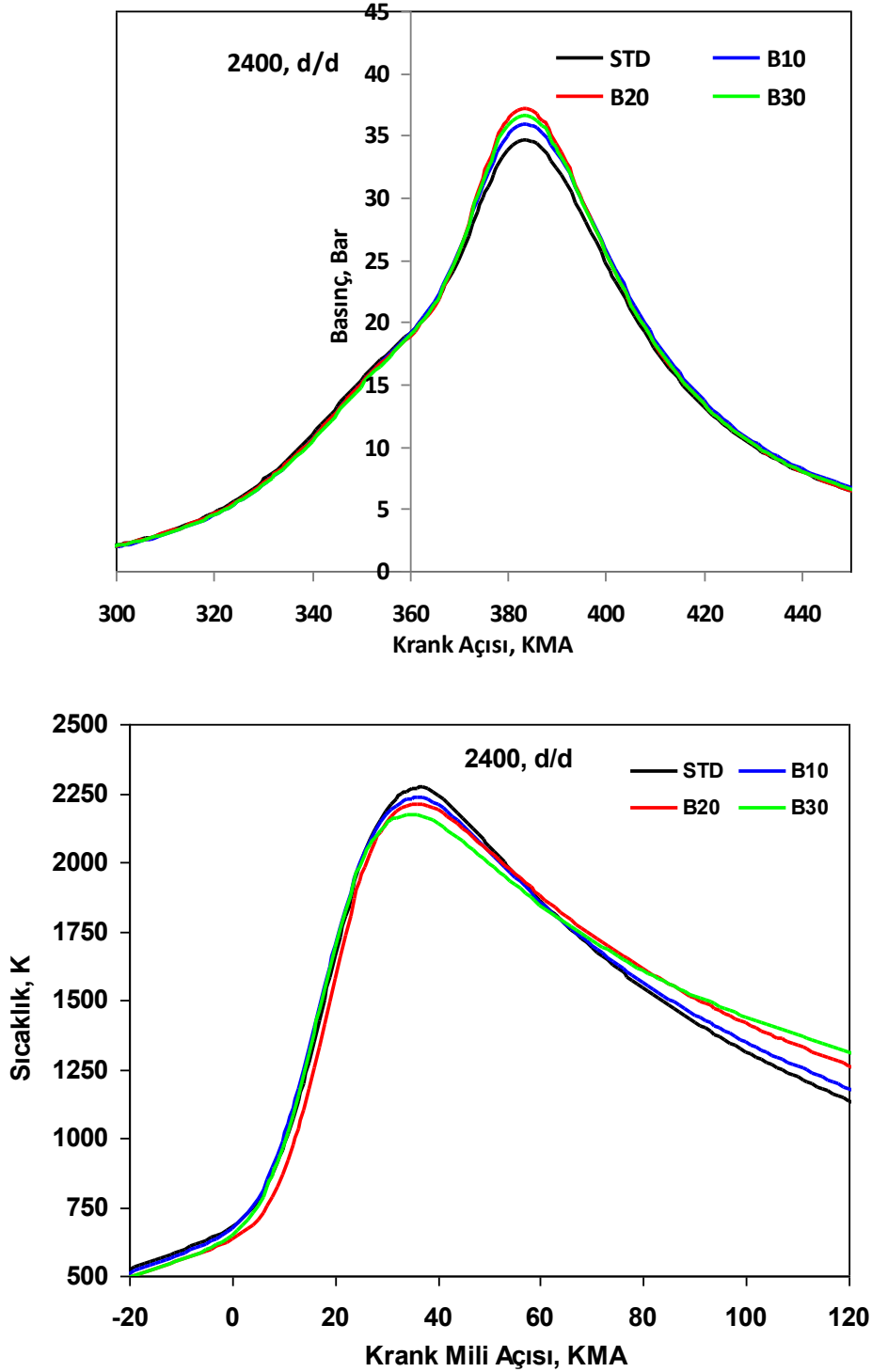
Şekil 5.18. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak volümetrik verimdeki değişim

5.1.3. Farklı TBC kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun silindir basıncı ve sıcaklık değişimine etkisi

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda elde edilen basınç değerleri ile silindir içi sıcaklık değerlerinin krank açısına bağlı olarak değişimi Şekil 5.19' da görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi maksimum efektif gücün elde edildiği B20 buhar oranında maksimum basınç değeri elde edilmiştir. Literatürde [58, 62], silindir içerisine gönderilen su damlacıklarının mikro patlamalarla yakıtın standart duruma göre çok daha küçük damlacıklara bölünmesiyle yanma veriminin iyileştiği vurgulanmaktadır. Basınç grafikleri incelendiğinde tüm buhar oranlarında (B10, B20 ve B30) bu etkinin sonucu olarak basıncın standart duruma göre arttığı görülmektedir. Motor efektif güç ve verimindeki artışın nedeni bu karışım oranında mikro patlamalara bağlı olarak yanma veriminde meydana gelen iyileşmeden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca standart motora kıyasla basınç artışının yüksek seyretmesi pozitif işte artışa neden olduğu için efektif güç artmaktadır. Ancak grafiklerden toplam yanma süresinin de uzadığı anlaşılmaktadır.

Silindir içi sıcaklık dağılımında ise, minimum NO_x emisyonlarının elde edildiği B30 buhar püskürtme oranında ise minimum silindir içi sıcaklık değeri tespit edilmiştir.

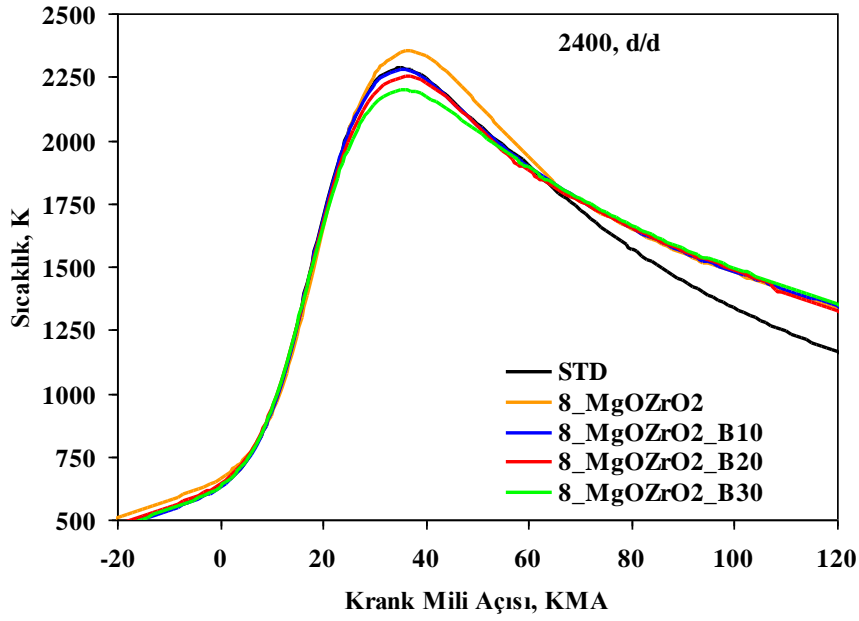
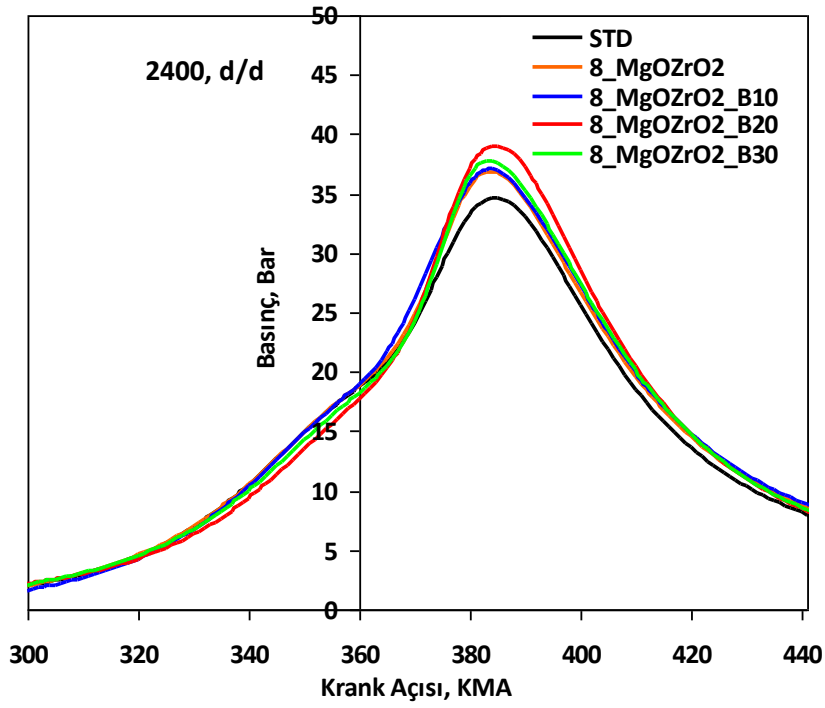
Silindir içi sıcaklıklarının düşmesinin nedeni: suyun ısı kapasitesinin havaya göre daha yüksek olması ve bu yüzden havaya göre üzerine daha fazla ısı çekmesinden kaynaklanmaktadır.



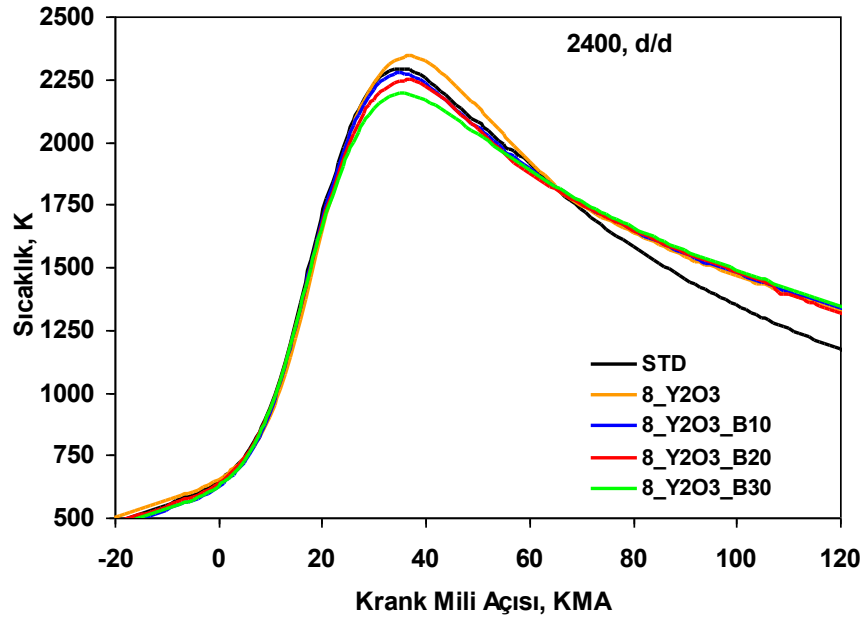
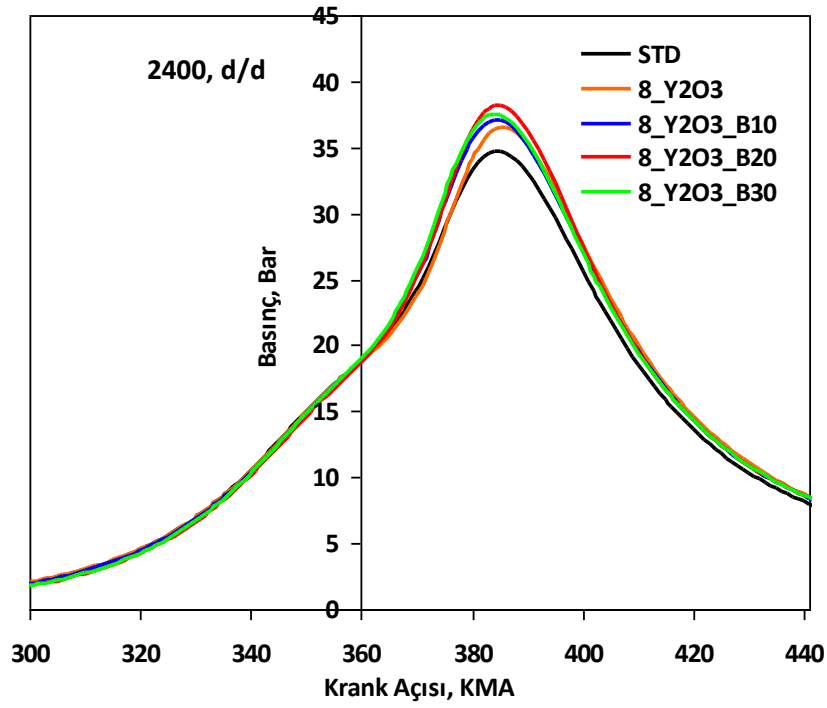
Şekil 5.19. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21' de sırasıyla pistonun üst yüzeyine 8mm genişliğinde MgO-ZrO₂ ve Y₂O₃ farklı seramik malzemeleri ile kaplanması ve farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda silindir içi basınç ve sıcaklık değişimi görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi hem pistonun üst yüzeyine seramik malzeme ile kaplanması hem de buhar enjeksiyonu ile silindir içi basınç değerleri STD değerlere göre artmaktadır. Silindir içi basıncın artmasının nedeni: buhar enjeksiyonu ve kaplama ile birlikte yanma veriminin artmasına bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Buhar enjeksiyonu yapılması durumunda en iyi sonuç her iki piston içinde % 20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir.

Silindir içi sıcaklık dağılımına bakıldığında ise STD duruma göre her iki kaplama durumunda da artmalar görülmektedir. Fakat bu pistonlara farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda, silindir içi sıcaklıklarda azalmaların olduğu hesaplanmıştır. Kaplamalı pistonlara buhar enjeksiyonu yapılması durumunda en iyi sonuç her iki piston için %30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Buhar enjeksiyonu ile silindir içi sıcaklıklarının düşmesinin nedeni: suyun ısı kapasitesinin havaya göre daha yüksek olmasından dolayı, üzerine daha fazla ısı çekmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Silindire yakıt/hava karışımının dolumu esnasında emme kanalına buhar püskürtülmesi durumunda yanma ürünleri karışımının standart duruma göre özgül ısılarına bağlı olarak ısı kapasiteleri artmaktadır. Yanma ürünlerinin ısı kapasitesinin artması motor silindir içi maksimum yanma sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 5.20. 8mm genişliğinde MgO-ZrO₂ TBC kaplı pistonda buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi

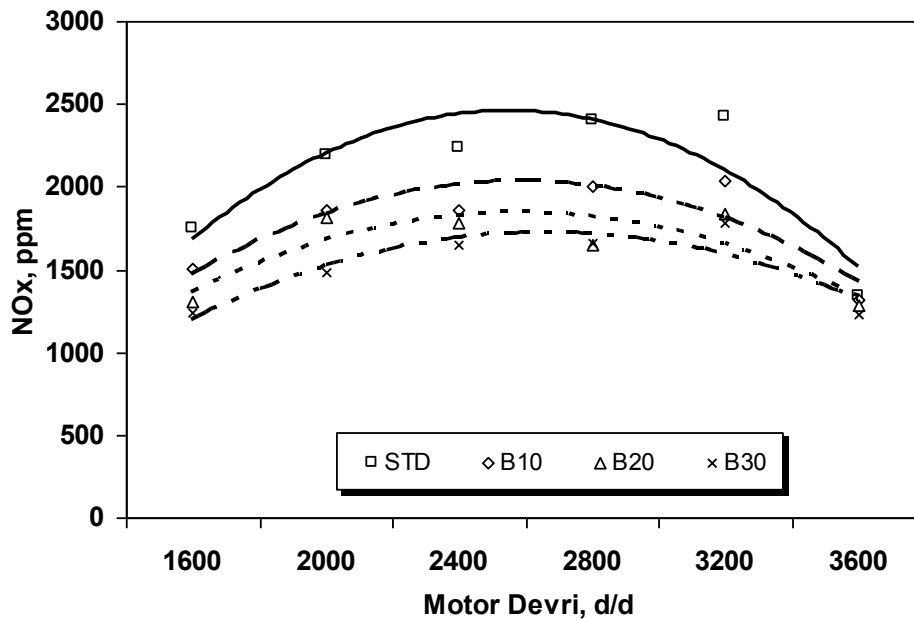


Şekil 5.21. 8mm genişliğinde Y_2O_3 TBÇ kaplı pistonda buhar oranına bağlı olarak silindir basınç ve sıcaklık değişimi

5.1.4. Farklı TBC kaplamalı motorda buhar enjeksiyonun emisyon karakteristikleri üzerine etkisi

5.1.4.1. Buhar püskürtmenin NO_x emisyonları üzerine etkisi

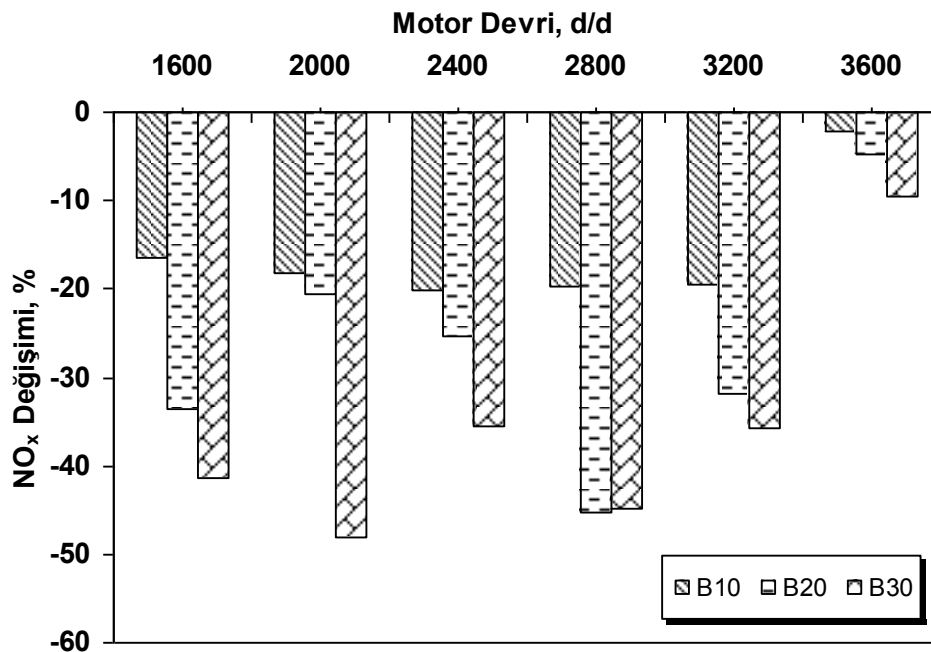
Tam yük şartlarında bir benzin motoruna emme zamanında emme manifolduna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda NO_x emisyonundaki değişimler Şekil 5.22' de görülmektedir. Şekil 5.23' de ise farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen NO_x emisyonunun standart değerlere göre yüzde değişimleri görülmektedir. Motora buhar püskürtülmesi durumunda NO_x emisyonlarında standart değerlere göre dikkate değer oranda azalmalar kaydedilmiştir. NO_x emisyonundaki maksimum azalma değeri % 30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Standart motor maksimum NO_x değeri 3200 d/d' da 2427 ppm iken B30 durumunda maksimum değer ise aynı devirde 1787 ppm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.22. Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak NO_x emisyonundaki değişim

Motorun emme manifolduna buhar püskürtülmesi durumunda NO_x emisyonlarındaki azalmaların maksimum değerleri % 10 buhar oranında 2400 d/d' da % 20, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 45 ve % 30 buhar oranında ise 2000 d/d' da % 48 olarak tespit edilmiştir.

İçten yanmalı motorlarda, NO_x emisyon reaksiyonları HFK ve yanma sonu ulaşılan sıcaklıklardan oldukça etkilenmektedir. Tam yük şartlarında gerçekleştirilen motor deneylerde, test edilen devir sayılarında volümetrik verimde dikkate değer değişimler olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda NO_x emisyonlarının değişimine etki eden tek parametre yanma sonu ulaşılan yüksek sıcaklıklardır. Motora buhar enjeksiyonu gerçekleştirildiğinde püskürtülen su buharının ısı kapasitesinin yüksek olmasından dolayı NO_x emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır. Şekil 5.19-21’ de silindir içi basınç verisine bağlı olarak hesaplanan yanma sonu sıcaklık değerleri incelendiğinde motora püskürtülen buhar oranına bağlı olarak yanma sonu ulaşılan maksimum sıcaklıklarda azalmaların olduğu görülmektedir. Suyun özgül ısısı yaklaşık olarak havanın özgül ısısından dört kat yüksektir. Silindire dolun esnasında motora giren havanın içerisine buhar püskürtülmesi durumunda yanma ürünleri karışımının standart duruma göre özgül ısılarına bağlı olarak ısı kapasiteleri atmaktadır. Yanma ürünlerinin ısı kapasitesinin artması motor silindir içi maksimum yanma sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Yanma sonu maksimum sıcaklığın düşmesi NO_x emisyonu oluşum hızını yavaşlattığından dolayı buhar enjektörü durumunda motordan salınan NO_x emisyon değerlerinde azalmalar görülmüştür.



Şekil 5.23. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak NO_x ' in STD duruma göre değişimi

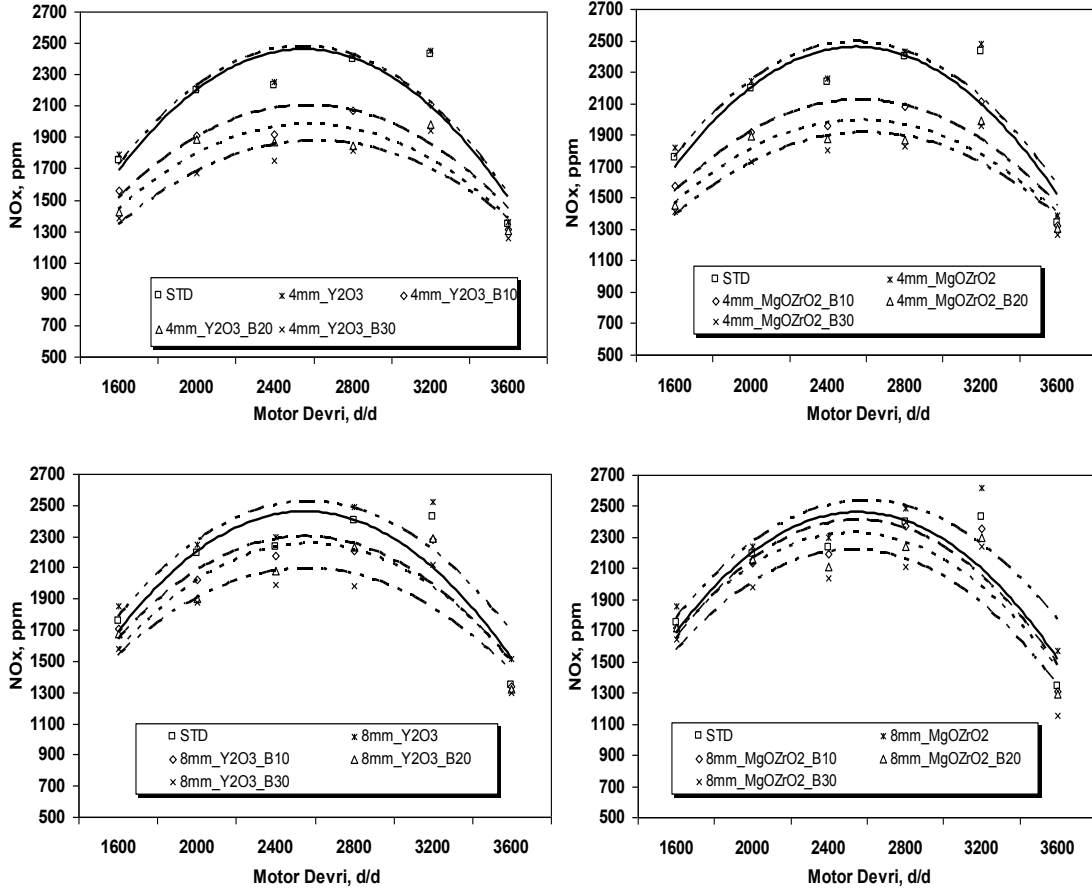
Şekil 5.24' de pistonun üst yüzeyine farklı çaplar ve farklı seramik malzemelerle kaplanmış motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda NO_x emisyonundaki değişimler görülmektedir. Pistonun üst yüzeyine 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda STD motora göre tüm devirlerde artmalar görülmüştür. Maksimum artma oranı 1600 d/d' da % 2.10' dur. NO_x emisyonlarının artmasının nedeni, yanma odasında ısı rezervi yüksek seramik malzemelerin etkisiyle yanma odası sıcaklıklarının artmasından kaynaklanmaktadır. Fakat TBC kaplı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda kaplamasının olumsuz etkilediği NO_x emisyonlarında tüm devir aralıklarında azalmalar tespit edilmiştir. STD motora göre NO_x emisyonlarındaki maksimum azalış değerleri % 10 buhar oranında 2400 d/d' da % 16.53, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 30.1 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 32.32 olarak tespit edilmiştir.

Piston üst yüzeyine 8 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemesi kaplanması durumunda STD motora göre tüm devirlerde NO_x emisyonlarında artmalar görülmüştür. Maksimum artma oranı 3600 d/d' da % 10.10' dur. Bu TBC kaplı motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda STD motora göre NO_x emisyonlarında azalmalar gözlemlenmiştir. STD motora göre maksimum azalış değerleri % 10 buhar oranında 2800 d/d' da % 8.62, % 20 buhar oranında 2000 d/d' da % 15.47 ve % 30 buhar oranında 2000 d/d' da % 20.87 olarak saptanmıştır.

Şekil 5.24' de pistonun üst yüzeyine 4 mm genişliğinde MgO-ZrO_2 seramik malzemesi ile kaplanması durumunda STD motora göre tüm devir aralıklarında NO_x emisyonlarında artmalar gözlenmiştir. Maksimum artış oranı 1600 d/d da % 3.67' dir. Fakat farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ise tüm devirlerde NO_x emisyonlarında azalmalar tespit edilmiştir. STD motora göre NO_x emisyonlarında maksimum azalma oranları, % 10 buhar oranında 2800 d/d' da %15.14, % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 28.42 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d' da % 31.46 olarak saptanmıştır.

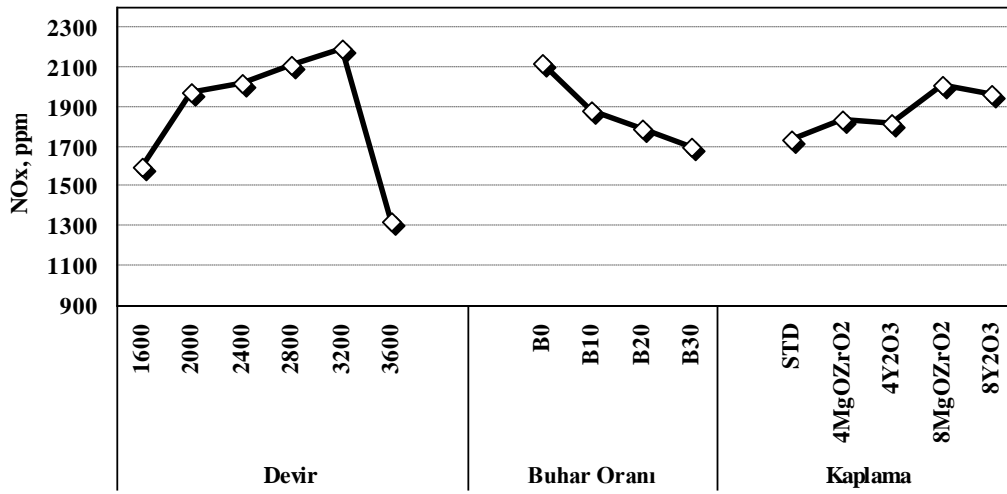
Motorda 8 mm genişliğinde MgO-ZrO_2 kaplı piston kullanılması durumunda STD motora göre NO_x emisyonlarında tüm devirlerde artış olmaktadır. Maksimum artma 3600 d/d' da % 14.67' dir. Bu TBC pistonuna farklı oranlarda buhar enjeksiyonu

yapılması durumunda ise STD motora göre NO_x emisyonlarında azalmalar görülmüştür. STD motora göre maksimum azalma değerleri % 10 buhar oranında 3200 d/d’ da % 3.12, % 20 buhar oranında 2800 d/d’ da % 7.14 ve % 30 buhar oranında 2800 d/d’ da % 13.55’ dir.



Şekil 5.24. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak NO_x emisyonlarındaki değişim

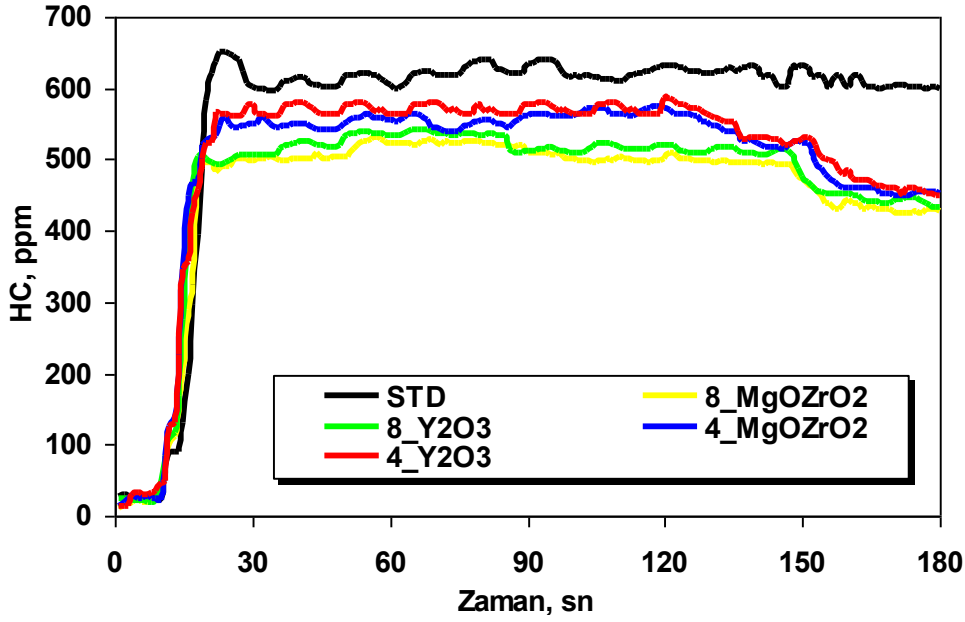
Optimum çalışma şartlarının belirlenmesi amacı ile yapılan Ki Kare testinde, % 99.9 güven aralığına göre faktörlerin ortalama değerlerinin NO_x emisyonları üzerine etkileri Şekil 5.25’ de görülmektedir. NO_x emisyonu minimum yapan sonucun %99.9 güven aralığında, 3600 d/d, B30 buhar püskürtme oranında ve STD pistonda elde edilmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler kullanılmasının NO_x emisyonu üzerine belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 5.25. NO_x emisyonları için faktörlerin ortalama değerleri

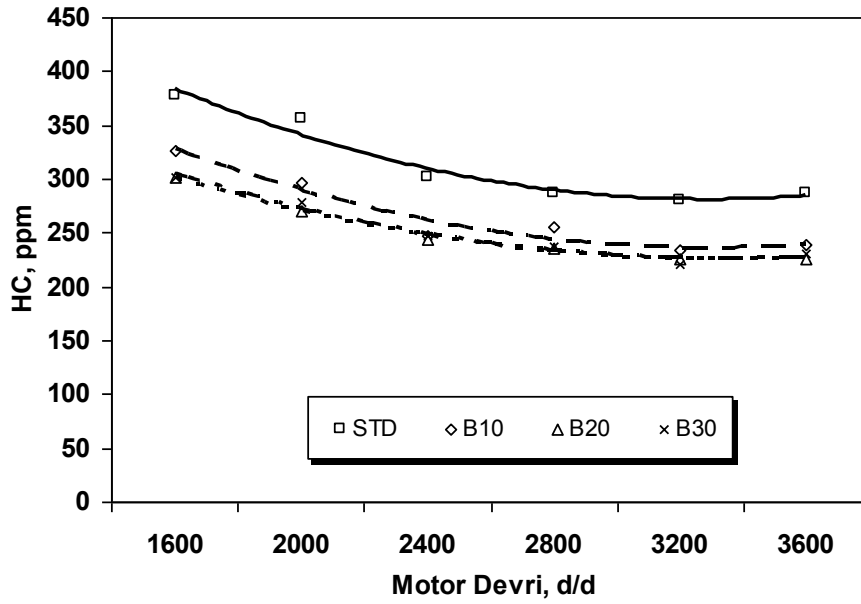
5.1.4.2. Buhar püskürtmenin HC emisyonu üzerine etkisi

Şekil 5.26' da STD ve piston üst yüzeyine iki farklı genişlik ve seramik malzeme ile kaplanması durumunda soğuk ilk hareket HC emisyonlarındaki değişim görülmektedir. Motorun soğuk ilk hareket HC emisyon değerlerinin ölçümü, ilk hareket sonrası 180 sn zaman periyodunda gerçekleştirilmiştir. Bu zaman periyodunda gerçekleştirilen deneyler neticesinde STD duruma göre motorda TBC piston kullanılması durumunda soğuk ilk hareket HC emisyonlarında kayda değer oranda azalmalar görülmüştür. İlk 20-180 sn arasındaki kaydedilen değerlerin ortalaması alınarak elde edilen sonuçlara göre soğuk ilk hareket HC emisyonları karşılaştırıldığında STD duruma göre 4 mm Y₂O₃ kaplı pistonda % 12.78, 4 mm MgO-ZrO₂ kaplı pistonda % 15.40, 8 mm Y₂O₃ kaplı pistonda % 22.18 ve 8 mm MgO-ZrO₂ kaplı pistonda ise % 25.33 azalma tespit edilmiştir.

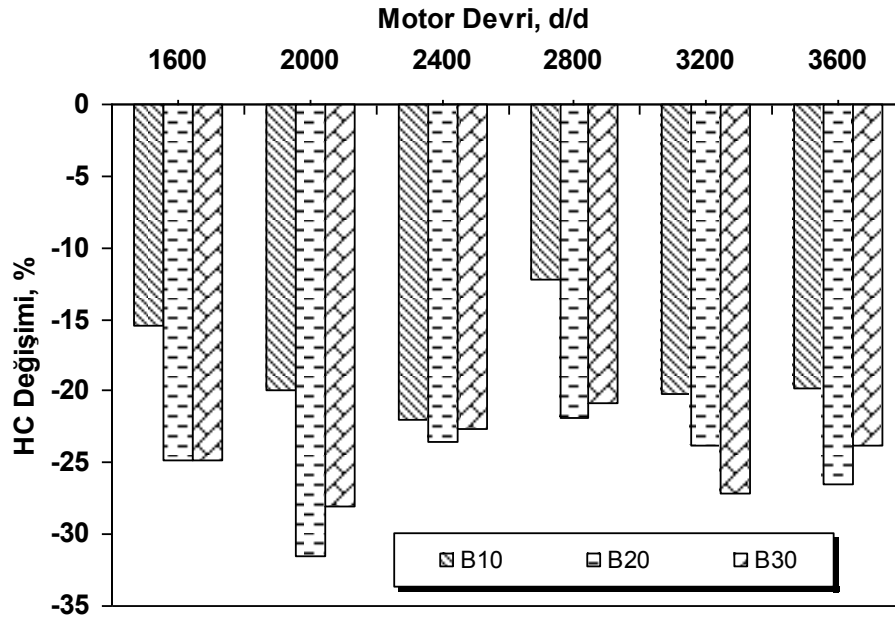


Şekil 5.26. STD ve farklı TBC kaplı pistonlarda soğuk ilk hareket HC emisyonlarındaki değişim

Tam yük şartlarında çalışan bir benzin motoruna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonundaki değişimler Şekil 5.27’ de görülmektedir. Şekil 5.28’ de ise, farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen HC emisyonunun standart değerlere göre yüzde değişimleri görülmektedir. Motora buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonlarında standart değerlere göre dikkate değer oranda azalmalar kaydedilmiştir. HC emisyonundaki maksimum azalma değeri % 20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Standart motorun maksimum HC değeri 1600 d/d’ da 377 ppm iken B20 durumunda maksimum değer aynı devirde 302 ppm olarak ölçülmüştür. Motorun emme manifolduna buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonlarındaki maksimum azalma değerleri % 10 buhar oranında 2400 d/d’ da % 21.94, % 20 buhar oranında 2000 d/d’ da % 31.57 ve % 30 buhar oranında ise 2000 d/d’ da % 28.08 olarak tespit edilmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda silindir içerisine gönderilen su damlacıklarının, yakıtın çok daha küçük damlacıklarına bölünmesine neden olduğu, artan yüzey alanı nedeniyle yanma esnasında yakıtın hava ile çok daha iyi karıştığı, aynı zamanda suyun mikro patlamalarla yanma hızını arttırdığı literatürde ifade edilmiştir [57- 58, 62, 65-67].



Şekil 5.27. Motor devri ve buhar oranına bağlı olarak ölçülen HC değerlerindeki değişimler



Şekil 5.28. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak HC' nin STD duruma göre değişimi

Şekil 5.29' da iki farklı genişlik ve seramik malzeme ile kaplanmış TBC pistonlu motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu gerçekleştirilmesi durumunda, HC emisyonlarında meydana gelen değişimler görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, TBC pistonların kullanılması durumunda ve motora buhar püskürtülmesi ile HC

emisyollarında STD değerlere göre dikkat çekici oranlarda azalmalar tespit edilmiştir. 4 mm genişliğinde Y_2O_3 TBC' li motorda, STD durumu göre HC emisyonlarındaki maksimum azalma oranı 3200 d/d' da % 22.06 olarak tespit edilmiştir. Bu kaplamalı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonlarındaki maksimum azalma oranları % 10 buhar oranında 2000 d/d' da %27.58, % 20 buhar oranında 2000 d/d' da % 33.47 ve % 30 buhar oranında ise 3200 d/d' da % 31.53 olarak saptanmıştır.

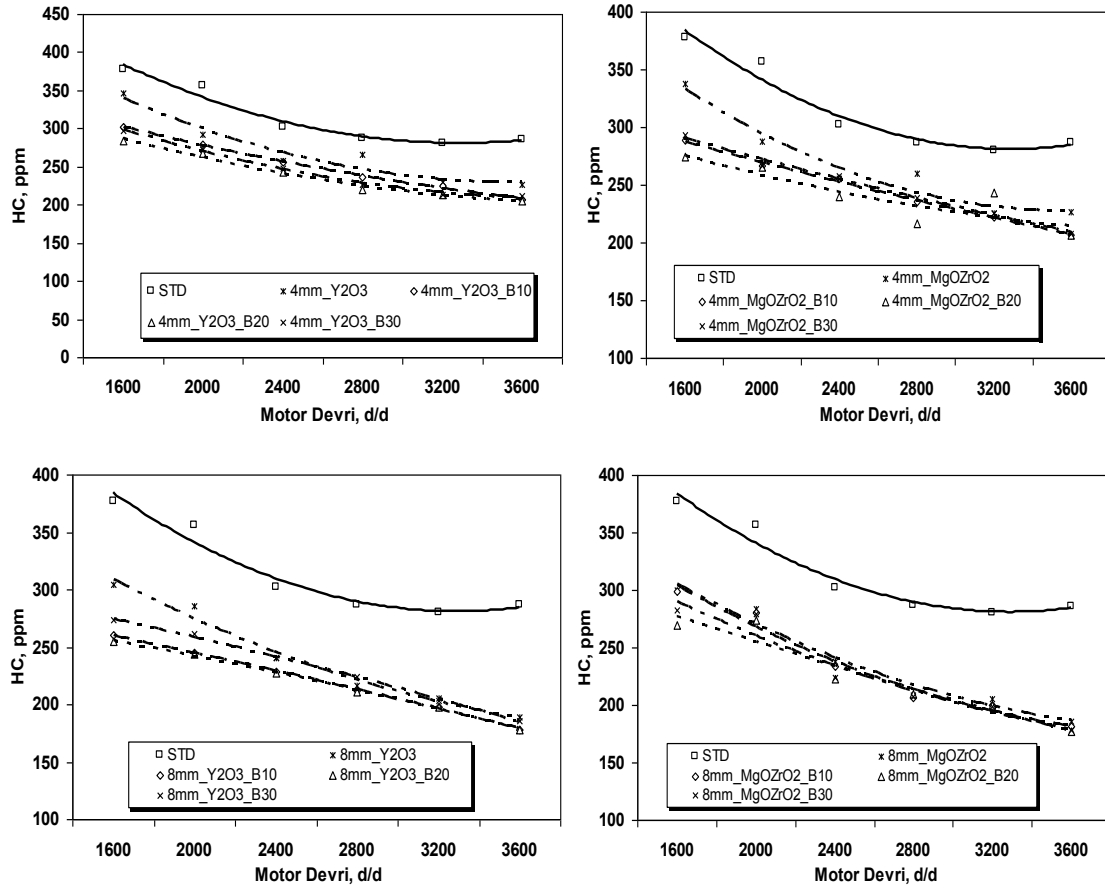
8 mm genişliğinde Y_2O_3 TBC' li motorda ise, STD durumu göre maksimum azalma oranı 3200 d/d' da % 36.44 olarak tespit edilmiştir. Bu kaplamalı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumundaki maksimum azalma oranları % 10 buhar oranında 1600 d/d' da % 45.17, % 20 buhar oranında 1600 d/d' da % 47.84 ve % 30 buhar oranında ise 1600 d/d' da % 38.17 olarak tespit edilmiştir.

4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ kaplamalı TBC' li motorda, STD durumu göre HC emisyonlarındaki maksimum azalma oranı 3200 d/d' da % 24.25 olarak tespit edilmiştir. Bu kaplamalı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumundaki maksimum azalma oranları % 10 buhar oranında 2000 d/d' da % 33.35, % 20 buhar oranında 1600 d/d' da % 37.71 ve % 30 buhar oranında ise 2000 d/d' da % 33.82 olarak saptanmıştır.

8 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ kaplamalı TBC' li motorda ise, STD durumu göre maksimum azalma oranı 2800 d/d' da % 37.31' dir. Bu kaplamalı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumundaki maksimum azalma oranları % 10 buhar oranında 3200 d/d' da % 40.13, % 20 buhar oranında 3200 d/d' da % 46.48 ve % 30 buhar oranında ise 3200 d/d' da % 41.09 olarak tespit edilmiştir.

İçten yanmalı motorlarda HC emisyonlarının kaynakları incelendiğinde bir tanesinin de alev sönme bölgeleri olduğu görülmektedir. Alev sönme bölgelerinde soğuyarak yanamayan yakıt-hava karışımları ile segman üst boşluklarında biriken yakıt-hava karışımları HC emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Piston tepesine seramik malzemelerle yapılış TBC sayesinde seramik malzemelerin ısı rezerv edebilme kabiliyetinin yüksek olması gaz ve cidar sıcaklıklarını artırmaktadır. Buda alev

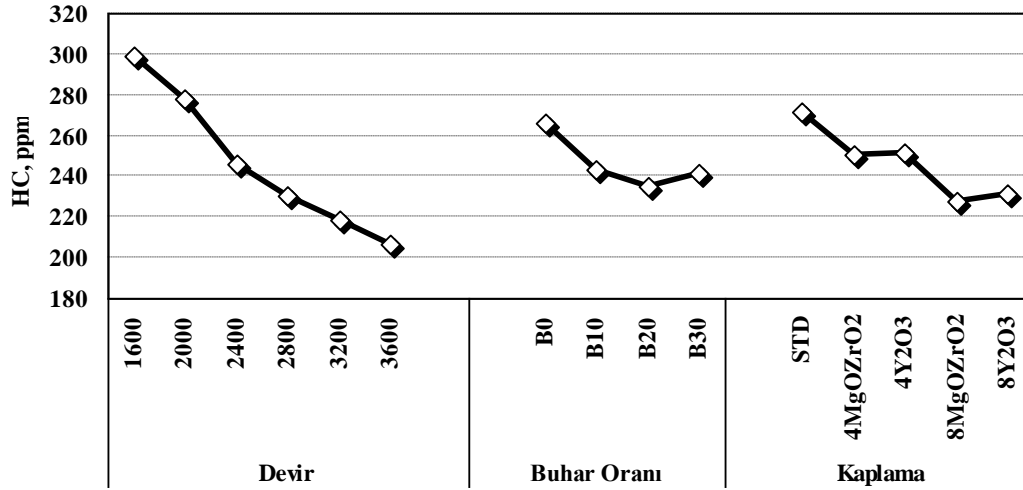
sönme bölgelerinde oluşan yakıt hava karışımlarının sönmeden oksitlenebilmesini aynı zamanda segman üst boşluklarından kaynaklanan HC emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca sıcaklığın artmasına bağlı olarak meydana gelen yanma denklemleri daha yüksek sıcaklıklarda oluşmakta dolayısıyla yanma kalitesi ve verimi artmaktadır. Yanmanın iyileşmesine bağlı olarak motorlardan kaynaklanan zararlı HC emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır [51-52, 99-100].



Şekil 5.29. Farklı TBÇ kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim

Şekil 5.30' da Ki kare testine göre faktörlerin ortalama değerlerinin HC emisyonu üzerine etkileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi HC emisyonu için en uygun şartlar 3600 d/d, B20 buhar püskürtme oranı ve 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ TBÇ kaplamalı pistonda elde edilmiştir. Fakat şekil incelendiğinde, aynı çapta kaplama yapılan pistonlar için farklı seramik malzemeler kullanılmasının HC emisyonu üzerine belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Şekilde aynı çapta farklı

seramik malzeme kullanılması ile elde edilen deney sonuçları birbirlerine göre yakın sonuçlar vermiştir.

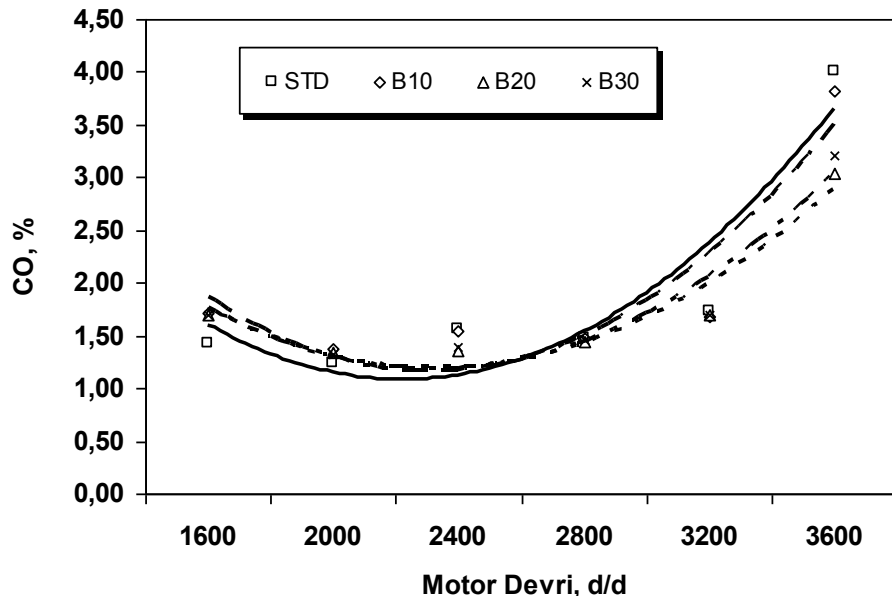


Şekil 5.30. Püskürtülen buhar oranına bağlı olarak HC' un STD duruma göre değişimi

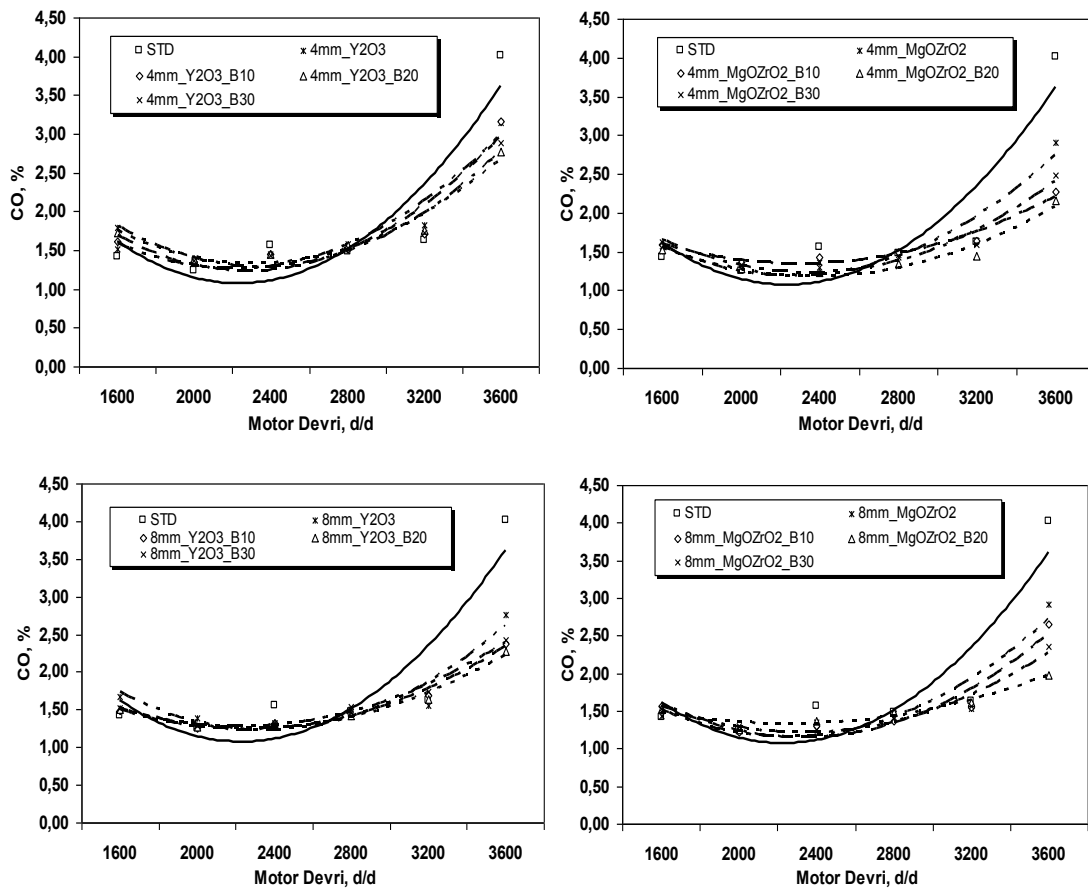
5.1.4.3. Buhar püskürtmenin CO emisyonu üzerine etkisi

Şekil 5.31' de tam yük şartlarında test edilen bir benzin motoruna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda açığa çıkan CO emisyonlarının standart şartlarda ölçülen değerlerle karşılaştırılması görülmektedir. Motora buhar püskürtülmesi durumunda CO emisyonlarında düşük devirlerde (1600 ve 2000 d/d) STD duruma göre artma olurken, yüksek devirlerde (2400, 2800, 3200 ve 3600 d/d) azalmalar gözlemlenmiştir. Standart şartlarda ölçülen maksimum CO değeri 3600 d/d' da % 4.02 olarak tespit edilmiştir. Standart durumda CO emisyonun maksimum olduğu motor hızında minimum CO emisyon değeri % 20 buhar püskürtme oranında saptanmıştır. % 20 buhar püskürtme oranında CO emisyon değeri % 3.04 olarak kaydedilmiştir.

Şekil 5.32' de iki farklı genişlik ve seramik malzeme kaplamalı TBÇ' li motora yakıt sarfiyatının farklı oranlarında buhar püskürtülmesi durumunda CO emisyonlarının değişimi görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi pistonların üst yüzeyinin seramik malzeme ile kaplanması ve bu kaplamalı motora buhar püskürtülmesi durumunda, STD motora buhar püskürtülmesi durumuna benzer trend elde edilmiştir.

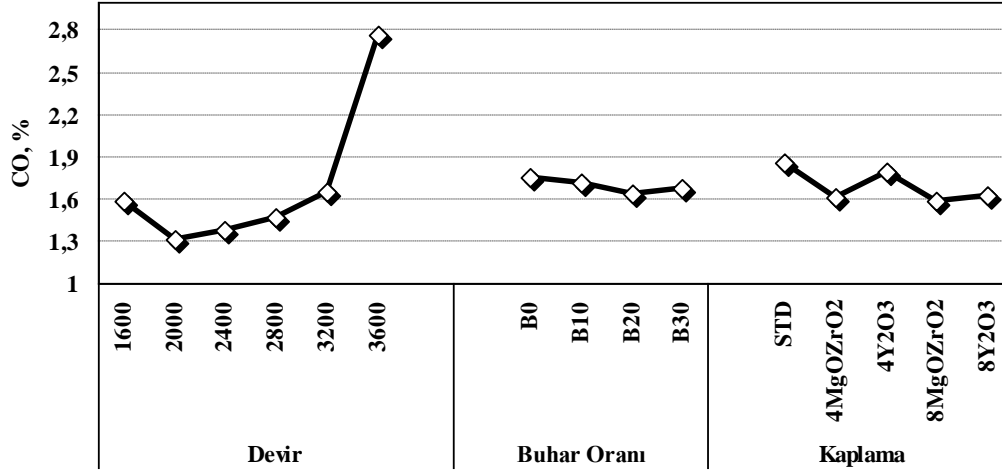


Şekil 5.31. Buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ölçülen CO değerlerindeki değişimler



Şekil 5.32. Farklı TBÇ kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak CO emisyonundaki değişim

Şekil 5.33’ de CO emisyonu üzerine faktör seviyelerinin ortalama değerleri görülmektedir. Tablo 5.1 incelendiğinde motora püskürtülen buhar oranının CO emisyonu üzerine % 99, kaplamanın ise % 99.9 güven aralıklarında etkisi görülmüştür. Yapılan Ki Kare testi sonucunda CO emisyonu için optimum çalışma şartlarının 2000 d/d, % 20 buhar püskürtme oranı ve 8 mm MgO-ZrO₂ kaplamalı TBÇ motorda elde edilmiştir.

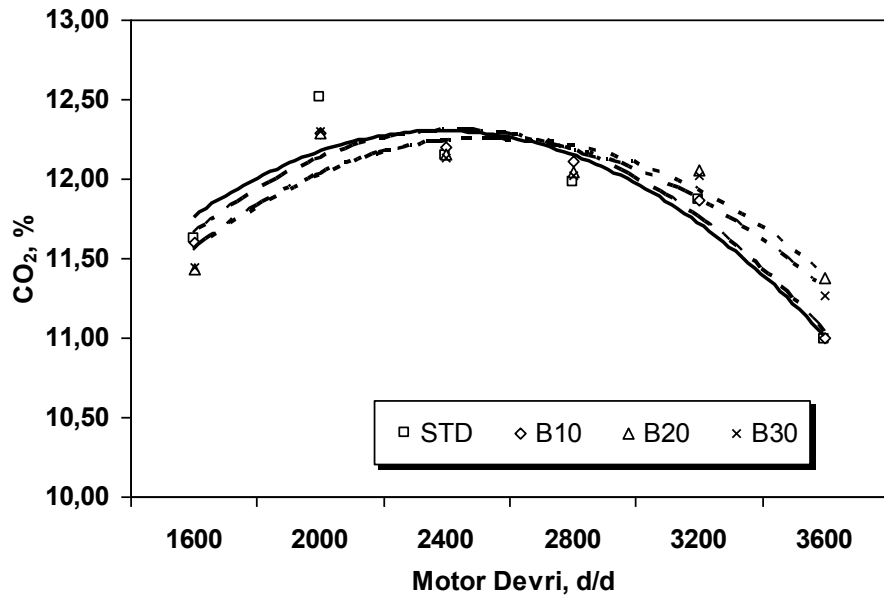


Şekil 5.33. CO emisyonu için faktörlerin ortalama değerleri

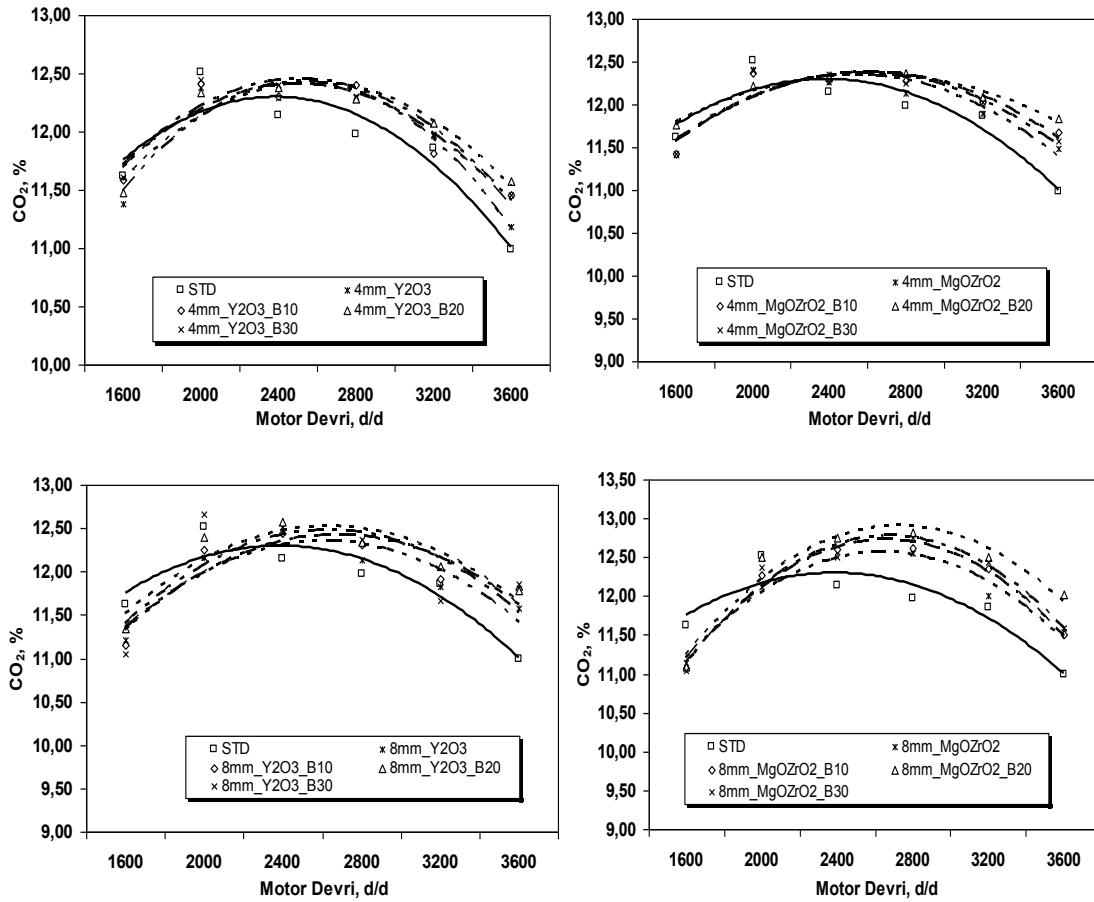
5.1.4.4. Buhar püskürtmenin CO₂ emisyonu üzerine etkisi

Şekil 5.34’ de tam yük şartlarında çalıştırılan bir benzin motoruna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda açığa çıkan CO₂ emisyonlarının standart şartlarda ölçülen değerlerle karşılaştırması görülmektedir.

Motora buhar püskürtülmesi durumunda CO₂ emisyonlarında düşük devirlerde (1600 ve 2000 d/d) STD duruma göre azalma olurken, yüksek devirlerde (2400, 2800, 3200 ve 3600 d/d) artmalar gözlenmiştir. Standart şartlarda ölçülen maksimum CO₂ değeri 2000 d/d’ da % 12.51, buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen maksimum CO₂ değeri ise 2000 d/d’ da % 12.30’ dur. Standart şartlarda CO₂ emisyonun maksimum olduğu 3600 d/d’ da STD durumda CO₂ değeri % 10.99 iken % 20 buhar püskürtme oranında bu değer % 11.38 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.35’ de görüldüğü gibi benzer durumlar TBÇ’ li motora buhar enjeksiyonu yapılması durumunda da elde edilmiştir.

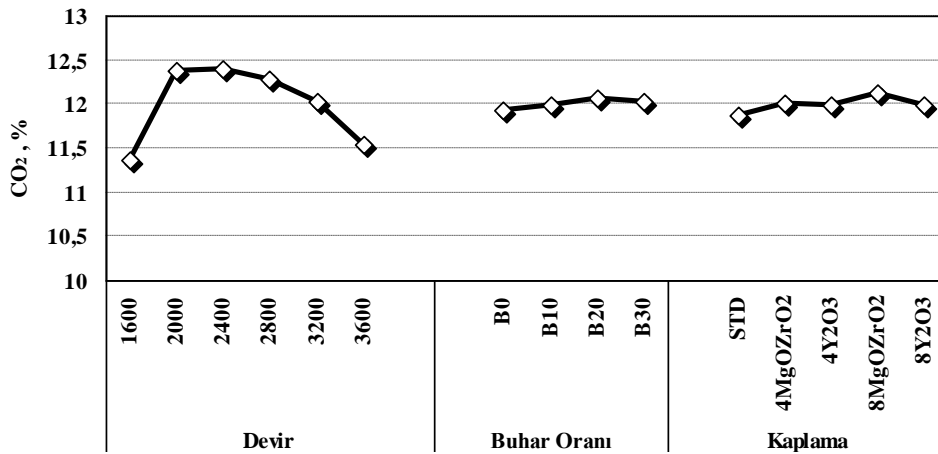


Şekil 5.34. Buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak ölçülen CO₂ değerlerindeki değişimler



Şekil 5.35. Farklı TBC kaplı pistonda buhar oranı ve motor devrine bağlı olarak CO₂ emisyonundaki değişim

Şekil 5.36' da CO₂ emisyonu üzerine faktör seviyelerinin ortalama değerleri görülmektedir. Ki kare istatistik yöntemi ile yapılan çalışma neticesinde elde edilen varyans analizi sonuçları tüm parametreler için Tablo 5.1' de verilmiştir. Tablo incelendiğinde motora püskürtülen buhar oranını ve kaplamanın sırasıyla CO₂ emisyonu üzerine % 99 ve % 99.9 güven aralıklarında etkisi görülmektedir. CO₂ emisyonu için belirlenen optimum çalışma şartları 1600 d/d, STD piston ve buhar püskürtme yapılmadığı durumda elde edilmiştir.



Şekil 5.36. CO₂ emisyonu için faktörlerin ortalama değerleri

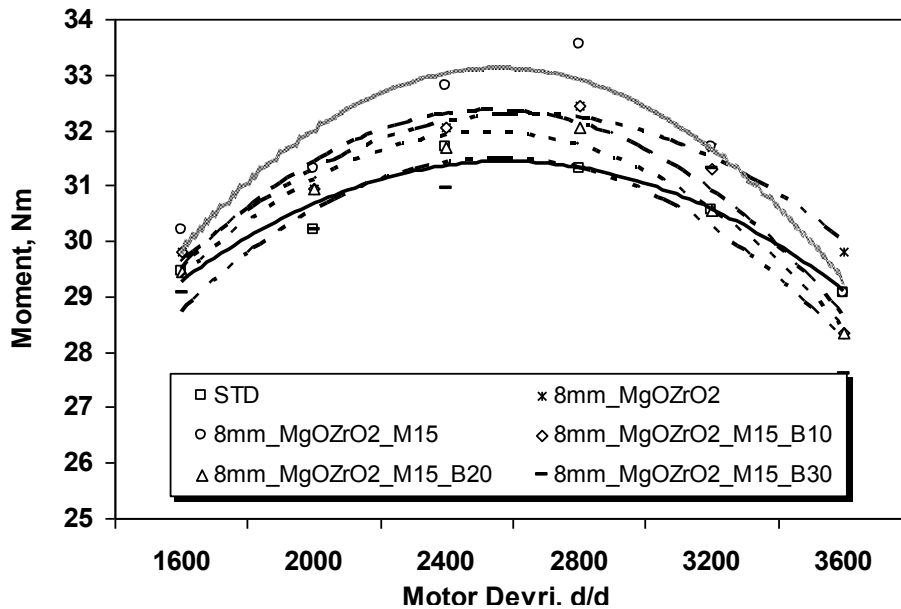
5.2. TBC Kaplı Motorda Yakıt Olarak Alkol+Benzin Karışımlarının

Kullanılması ve Bu Yakıtlara Buhar Enjeksiyonunun Motor Performans ve Egzoz Emisyonları Üzerine Etkisi

Çalışmada ayrıca, yakıt olarak alkol+benzin karışımları kullanılan seramik kaplı bir benzin motoruna buhar enjeksiyonun etkileri araştırılmıştır. 4 farklı TBC pistonu kullanılarak tam yük şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, motor performansı açısından en iyi sonuç 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ TBC' li motorda elde edilmiştir. Bu sebeple, alkol+benzin karışımlarının yakıt olarak kullanıldığı benzin motoruna buhar enjeksiyonun motor performans ve emisyonlar üzerine etkileri bu TBC' li piston için deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, benzin içerisine farklı oranlarda metil ve etil (%5, %10, %15 ve %20) alkoller karıştırarak deneyler ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre motor performans açısından optimum karışım oranı belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda en iyi motor torku ve gücünü veren sonuç M15 (%85 Benzin+%15 Metil Alkol) ve E15 (%85 Benzin+%15 Etil Alkol) karışımli yakıtlarda elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise elde edilen bu yakıtlara farklı oranlarda (%10, %20 ve %30) buhar enjeksiyonu yapılmıştır. Şekil 5.37' de M15 yakıtlı motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda motor momentindeki değişimler görülmektedir. Şekil incelendiğinde TBC kaplı motorda M15 yakıtı kullanılması durumunda STD ve TBC kaplamalı motor verilerine göre momente artmalar görülmektedir. Fakat TBC' li motorda M15 yakıtı kullanılarak farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda, motor momentinde bir miktar azalmalar kaydedilmiştir. Ancak TBC' li M15 yakıtlı motorda emisyonlar ve performans açısından optimum sonuçları veren buhar püskürtme oranı % 10 olarak tespit edilmiştir. Optimum buhar oranı belirlendikten sonra motor performans ve egzoz emisyonları bu buhar püskürtme oranı için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneyler E15 yakıtlı olarak da tekrarlanmış ve optimum buhar oranı bu yakıtta da B10 olarak tespit edilmiştir.

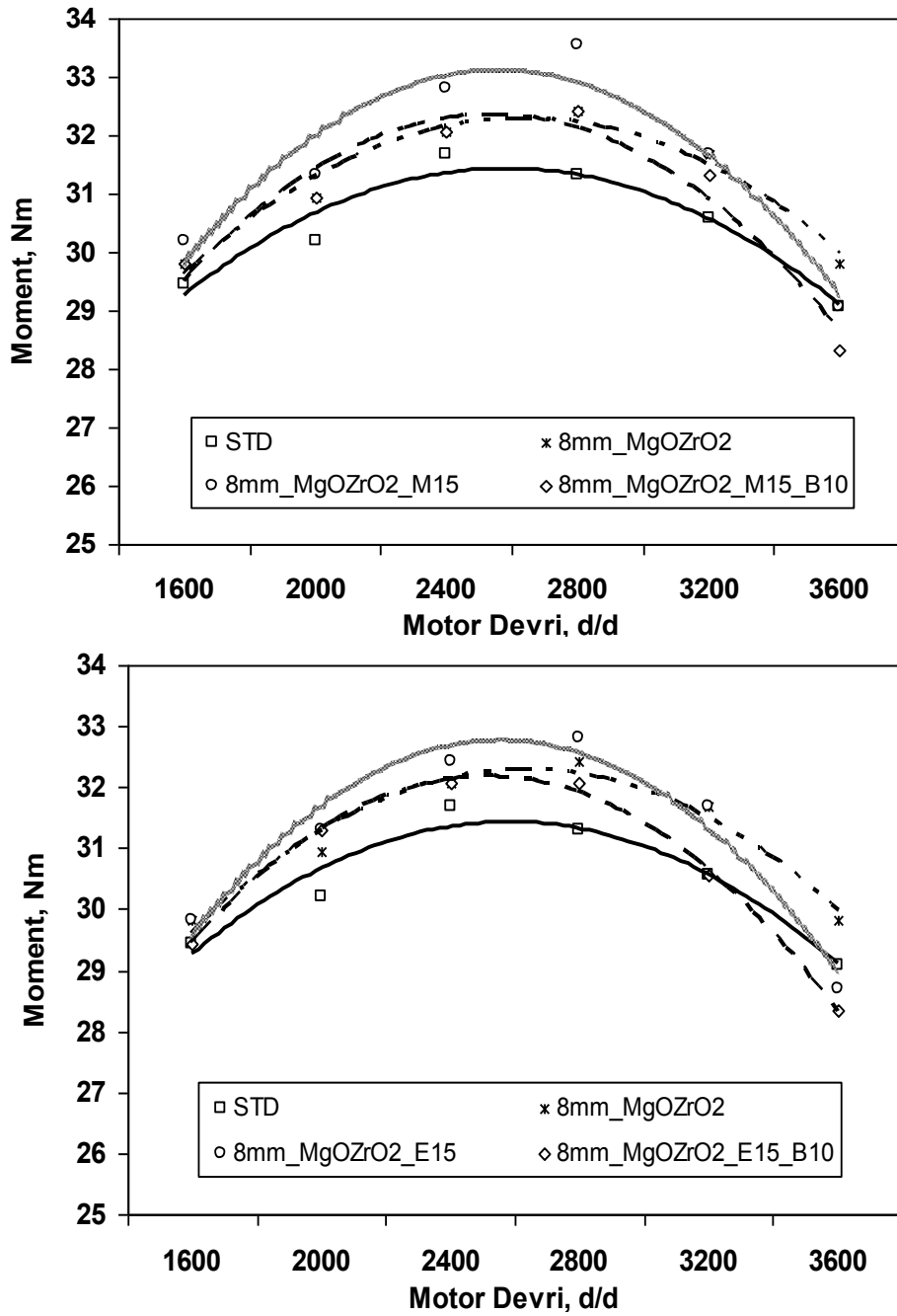


Şekil 5.37. M15 yakıtlı ve TBC kaplı motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonun etkileri

Şekil 5.38’ de M15-E15 yakıtı kullanılan TBC’ li bir motora % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda motor momentindeki değişimlerin STD motor ile karşılaştırılması görülmektedir. TBC kaplı motorda, M15 ve E15 yakıtı kullanılması durumunda STD ve kaplamalı motora göre motor momentinde da artmalar görülmektedir. M15 yakıtı için; STD duruma göre maksimum artma oranı 2800 d/d’ da % 5.6 iken TBC kaplı duruma göre maksimum artma oranı 2400 d/d’ da % 2.2’ dir. E15 yakıtı için; STD duruma göre maksimum artma oranı 2800 d/d’ da % 4.5 iken TBC kaplı duruma göre maksimum artma oranı 2400 d/d’ da % 1.1’ dir.

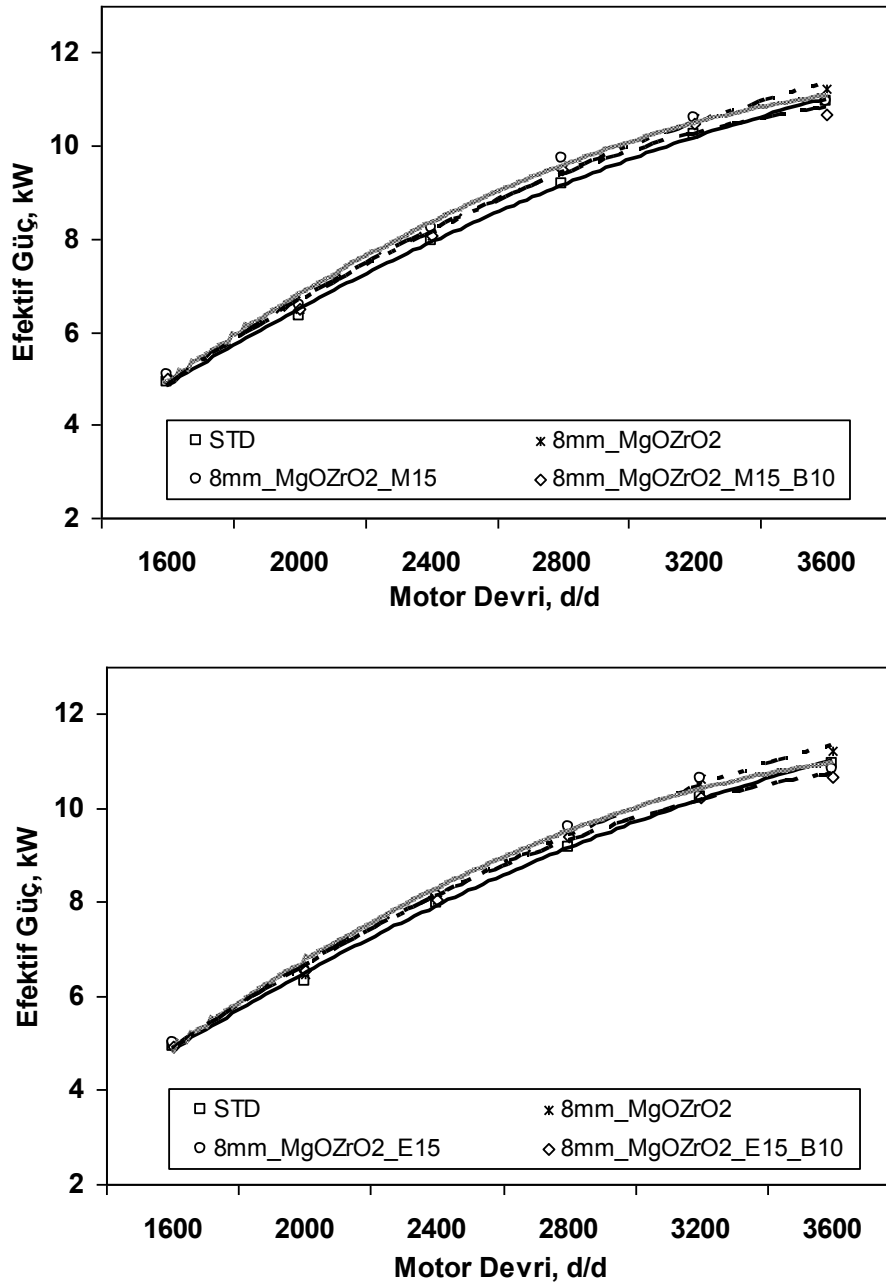
Alkollerin gizli buharlaşma ısısı çok yüksek olması emme manifoldunda buhar fazına geçerken, benzine göre yaklaşık 4 kat daha fazla ısı çekmesine neden olmaktadır. Bu durum volümetrik verimi artırıcı rol oynamaktadır. Ayrıca alkollerin oksijen içeriyor olması yanma veriminin iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Volümetrik verim ve yanma verimindeki iyileşmeler motor performansında artmalara neden olmaktadır.

TBC’ li motorda M15-E15 yakıtlarına % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda momentte bir miktar azalmalar görülmektedir. Azalma miktarları sırasıyla 3600 d/d ve 3200 d/d’ da % 2.6, % 3.6’ dır. Ancak bu şartlarda elde edilen moment değerleri standart motor verilerinden yüksektir. Alkollerin kullanılması durumunda, alkolün buharlaşmasıyla emme hattında meydana gelen sıcaklık düşmesi motorun emme kanalından silindire dolumu esnasında standart duruma göre dolgu miktarında iyileşmelere neden olmaktadır. Fakat buhar enjeksiyonu, emme hattına 133 °C sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Momentteki azalmanın nedeni, alkollün emme kanalındaki soğuma etkisini, buhar enjeksiyonu ile birlikte dolgu sıcaklığında bir miktar artmalara neden olması, bu etki dolgu miktarında alkol yakıtlara göre bir miktar kötüleşmeye neden olabilmektedir.



Şekil 5.38. Farklı yakıtlı TBC kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak momentteki değişim

Şekil 5.39' da TBC pistonda M15-E15 yakıtı kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda efektif güçteki değişimler görülmektedir. TBC kaplı motorda M15-E15 yakıtlarının kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar püskürtülmesi durumunda elde edilen efektif güç değerlerinde meydana gelen değişimler motor momentinden elde edilen sonuçlar ile aynıdır.



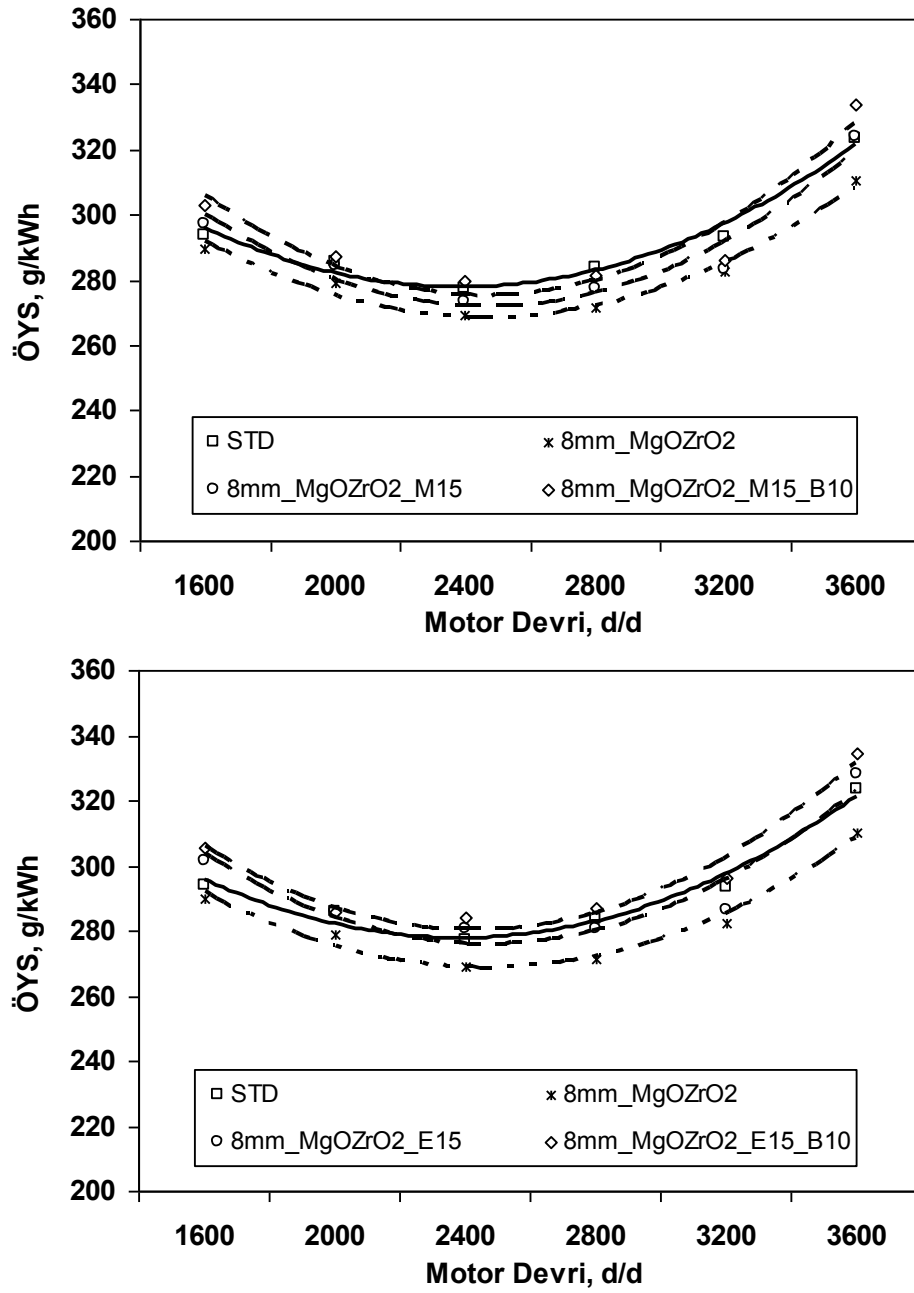
Şekil 5.39. Farklı yakıtlı TBC kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim

Şekil 5.40' da, M15-E15 yakıtlı, TBC pistonlu bir benzin motoruna % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ÖYS' deki değişimler görülmektedir. M15-E15 yakıtlarının TBC' li motorda kullanılması durumunda, benzin yakıtlı TBC' li motora göre ÖYS' da artmalar görülmektedir. M15 yakıtı için; TBC kaplı motora göre maksimum artma oranı 3600 d/d' da % 4.1' dir. E15 yakıtı için maksimum artma

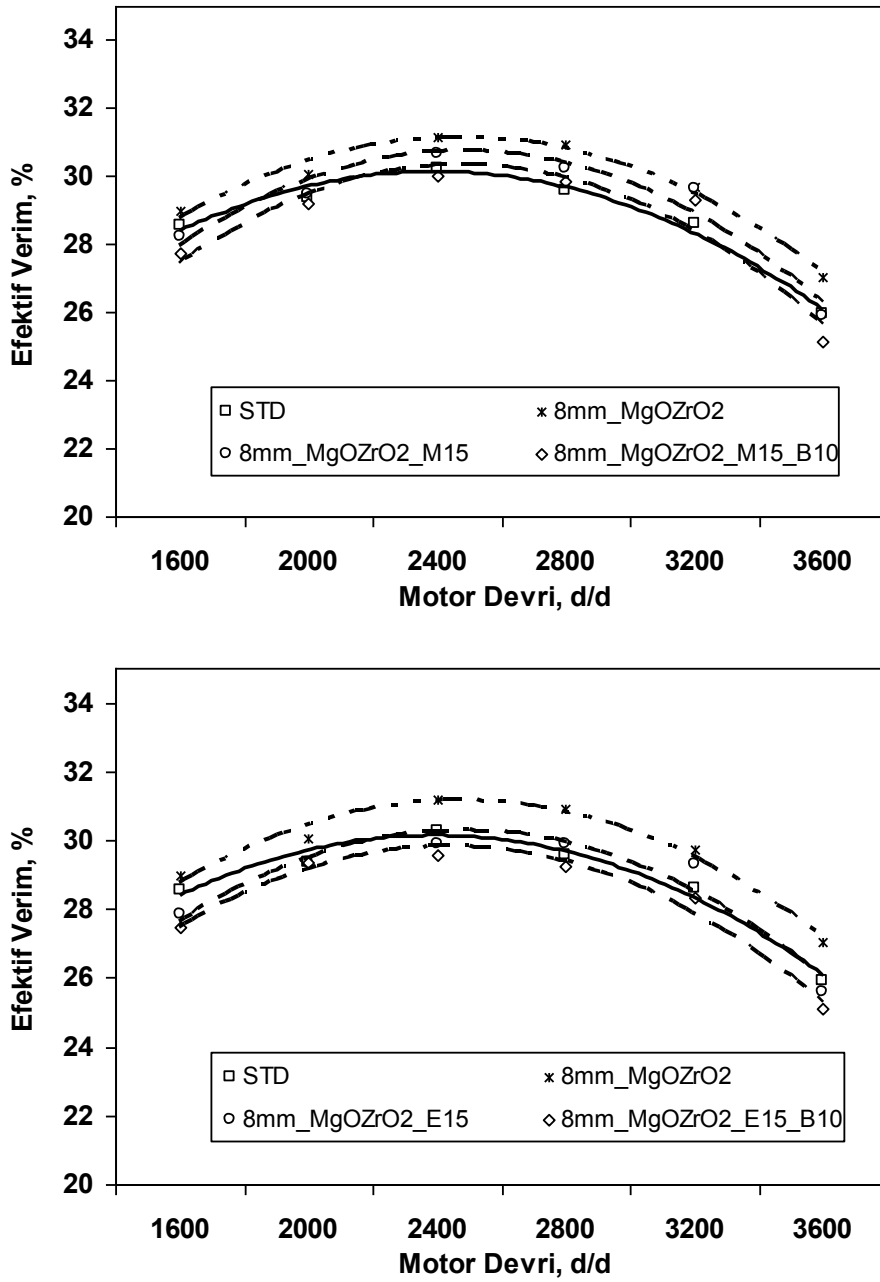
oranı ise 3600 d/d' da % 5.3' dür. ÖYS' de meydana gelen artmaların nedeni; alkol yakıtlarının ısı değerleri benzine kıyasla daha düşük olmasındandır.

TBÇ' li ve M15-E15 yakıtlı motora % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ÖYS' de TBÇ' li M15-E15 yakıtlı motora göre artmalar görülmektedir. Maksimum artma oranları sırasıyla; 3600 d/d % 3, 3200 d/d' da ise % 3.3' dür.

Şekil 5.41' de M15-E15 yakıtlı, TBÇ pistonlu bir benzin motoruna % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda efektif verimdeki değişimler görülmektedir. M15-E15 yakıtlarının TBÇ' li motorda kullanılması durumunda, benzin yakıtlı TBÇ' li motora göre efektif verimde azalmalar görülmektedir. Alkol karışımı yakıtların motorda kullanılması durumunda TBÇ' li motora göre efektif verimdeki maksimum azalma miktarı M15 yakıtı için 3600 d/d' da 4.3, E15 yakıtı için bu değer 3600 d/d' da % 5.6 olarak kaydedilmiştir. Alkol karışımı yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu gerçekleştirilmesi durumunda her iki yakıt içinde efektif verimde azalmalar olmaktadır. M15-E15 yakıtlarına göre maksimum azalma miktarı sırasıyla; 3600 d/d' da % 3.1, 3200 d/d' da % 3.4 olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.40. Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak ÖYS'ndeki değişim

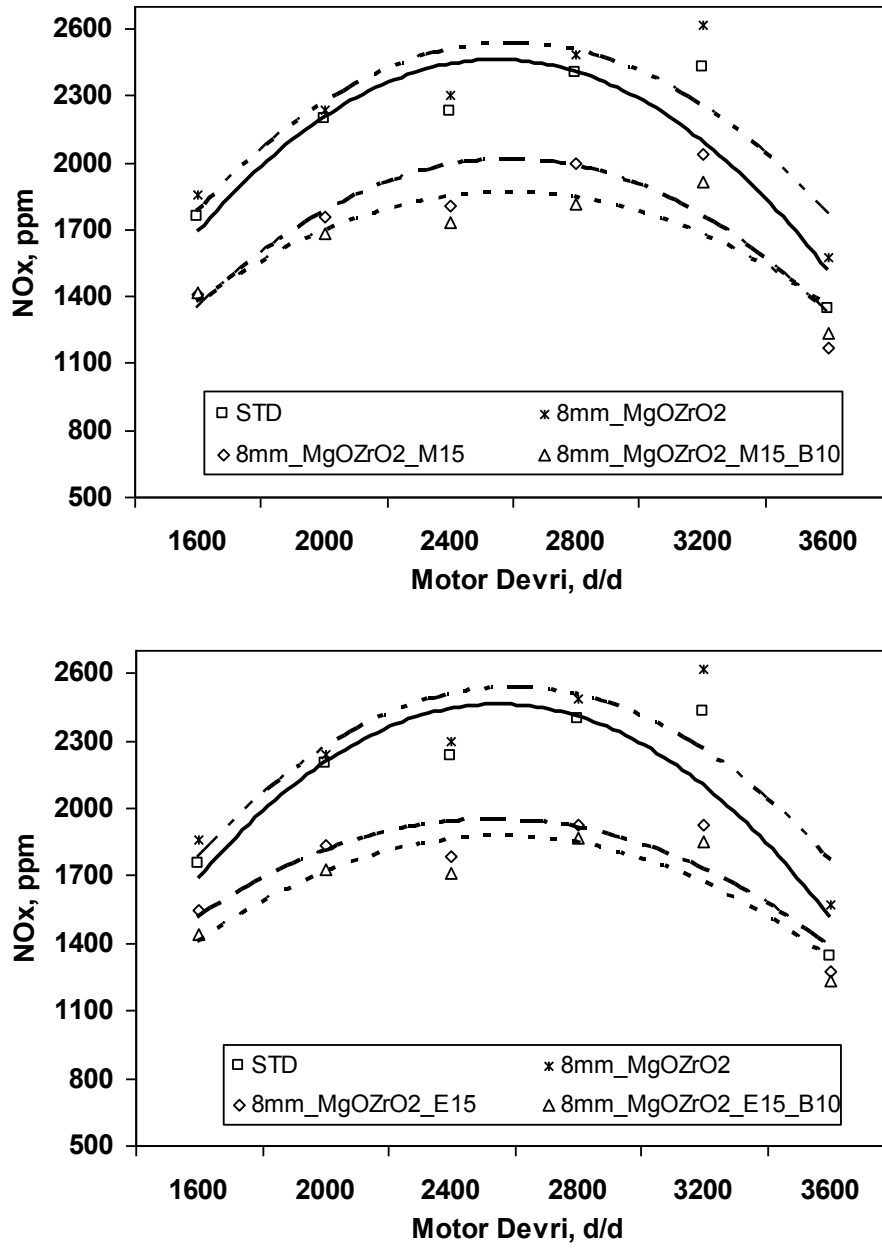


Şekil 5.41. Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak efektif verimdeki değişim

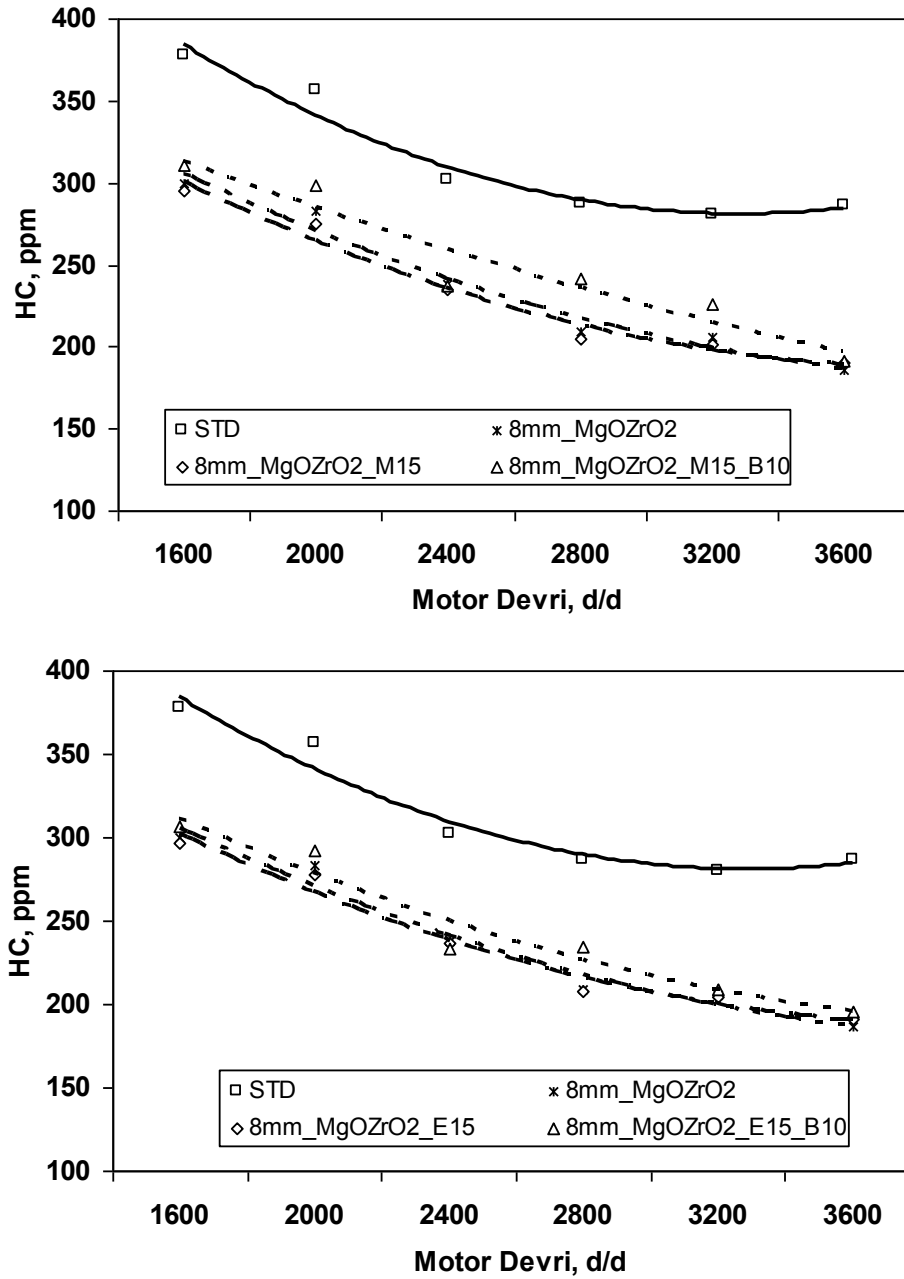
Şekil 5.42' de TBÇ kaplı pistonda M15-E15 yakıtı kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda NO_x emisyonundaki değişimler STD ve TBÇ motor verileri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde, piston üst yüzeyine kaplama yapıldığında STD duruma göre NO_x emisyonlarında artmalar görülmektedir. İçten yanmalı motorlarda NO_x oluşumunu etkileyen en büyük

etkenlerden biri yanma sonu ulaşılan yüksek sıcaklık değerleridir. Piston tepesine ısı rezervi yüksek malzemelerle yapılan TBC uygulaması ile silindir içi sıcaklıklar artmakta ve buna bağlı olarak NO_x emisyonlarında artmalar görülmektedir. TBC' li motorda yakıt olarak M15-E15 kullanılması durumunda deneylerin gerçekleştirildiği tüm devir sayılarında STD ve TBC' li motora göre NO_x emisyonlarında dikkate değer oranlarda azalmalar görülmektedir. NO_x emisyonlarında M15-E15 yakıtları ile birlikte TBC' li pistonlara göre maksimum azalma oranları sırasıyla; 3600 d/d' da % 34.4, 3200 d/d' da % 35.2' dir. NO_x emisyonlarının azalma nedeni; alkol yakıtlarının gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması yanma sonu sıcaklıklarını düşürmesine ve buna bağlı olarak artan NO_x emisyonlarının azalmasına sebep olmaktadır. M15-E15 yakıtlı ve TBC' li motora % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda NO_x emisyonlarında M15-E15 yakıtlarına göre tüm devir aralıklarında azalmalar olmaktadır. M15-E15 yakıtlarına göre maksimum azalma miktarı sırasıyla; 3200 d/d' da % 6.8, 2000 d/d' da % 6.2' dir. Buhar enjeksiyonu ile birlikte yanma ürünlerinin ısı kapasiteleri artmakta ve buna bağlı olarak silindir içi maksimum yanma sıcaklıklarında azalmalar sağlanabilmektedir. Yanma sonu maksimum sıcaklığın düşmesi NO_x emisyonu oluşum hızını yavaşlattığından dolayı motordan salınan NO_x emisyon değerlerinde azalmalar görülmüştür.

Şekil 5.43' de TBC' li motorda M15-E15 yakıtları kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda HC emisyonundaki değişimler görülmektedir. Şekilde, TBC' li motorda M15-E15 yakıtları kullanılması, STD motor verileri ile TBC piston verilerine göre karşılaştırıldığında HC emisyonlarında azalmalar kaydedilmiştir. HC emisyonlarında M15-E15 yakıtları ile birlikte TBC' li pistonlara göre maksimum azalma oranları sırasıyla; 2000 d/d' da % 3, 2000 d/d' da % 1.89' dur. Fakat M15-E15 yakıtlı TBC' li motora % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda TBC' li motor verileri ile göre karşılaştırıldığında HC emisyonlarında bir miktar artmalar tespit edilmiştir. B10 buhar püskürtme oranında, M15-E15 yakıtlarına göre maksimum artma değerleri sırasıyla; 3200 d/d' da % 11.3 ve 2800 d/d' da % 11.7' dir.



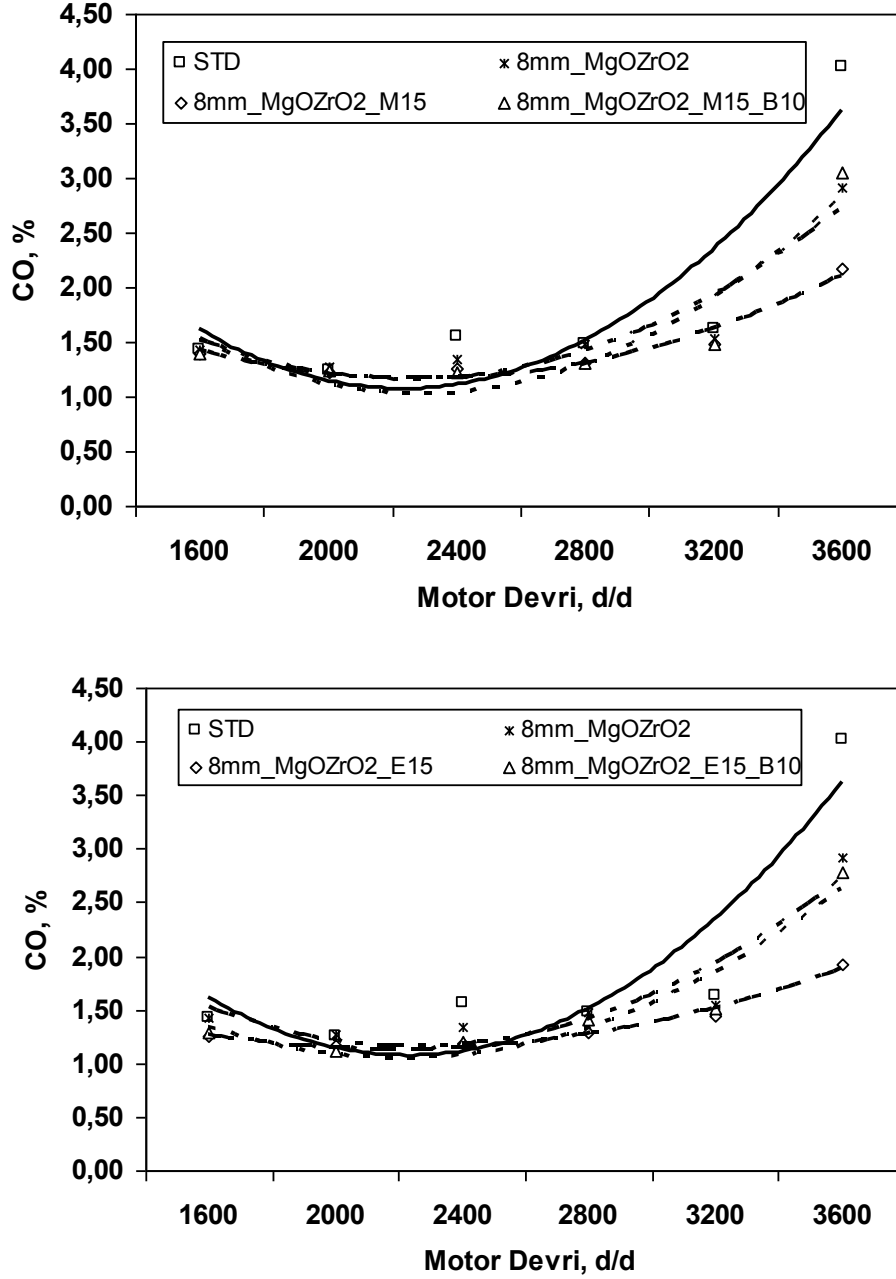
Şekil 5.42. Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak NOx emisyonundaki değişim



Şekil 5.43. Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim

Şekil 5.44' de TBÇ pistonlu motorda M15-E15 yakıtlarının kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda CO emisyonundaki değişimlerin STD motor verileriyle karşılaştırılması görülmektedir. TBÇ' li motorda M15-E15 yakıtlarının kullanılması durumunda CO emisyonlarında azalmalar saptanmıştır. M15-E15 yakıtlı motora %10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda

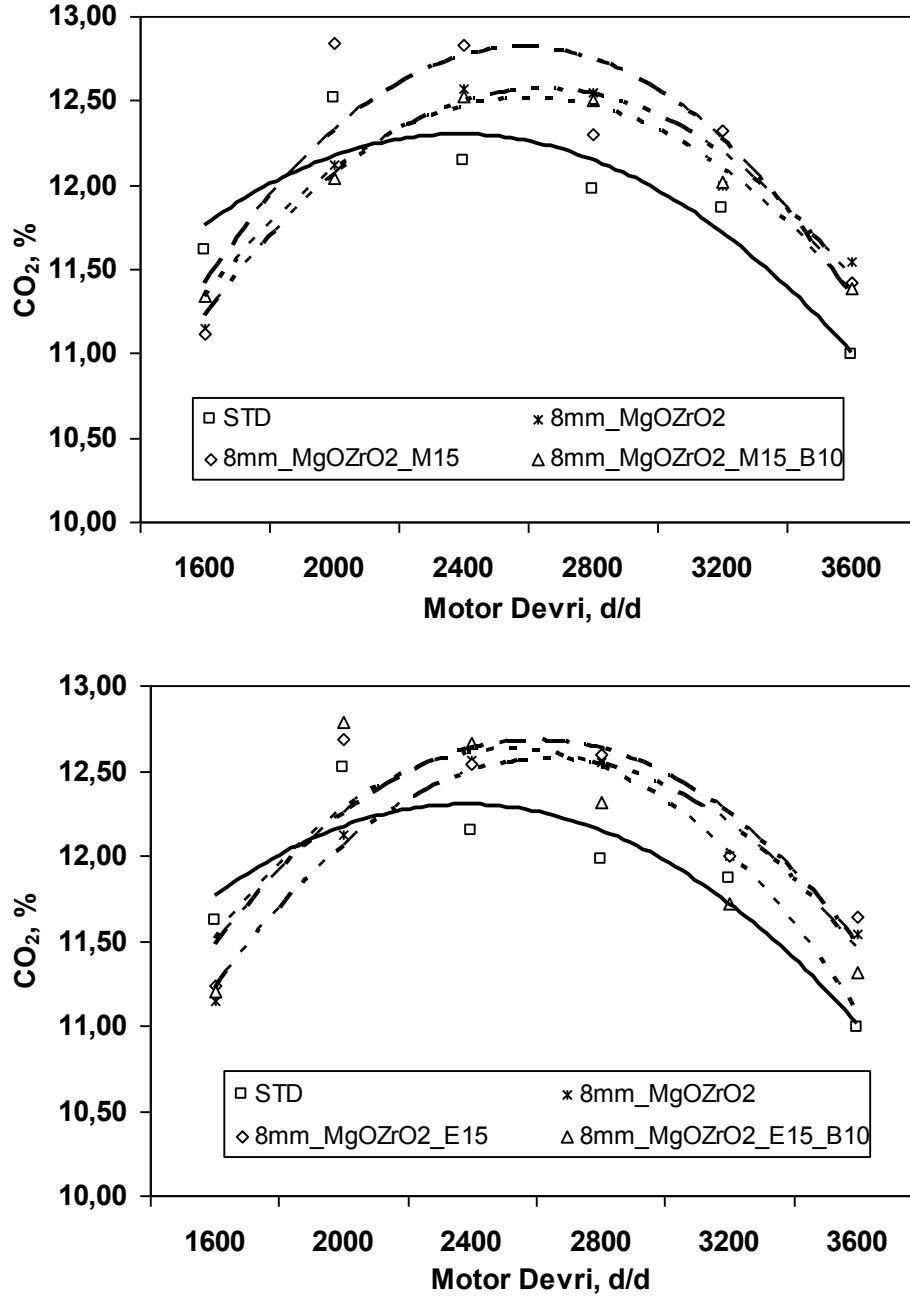
CO' de artmalar olurken, STD ve TBÇ' li motor verilerine göre azalmalar meydana gelmektedir.



Şekil 5.44. Farklı yakıtlı TBÇ kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak CO emisyonundaki değişim

Şekil 5.45' de TBÇ' li pistonda M15-E15 yakıtı kullanılması ve bu yakıtlara % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda CO₂ emisyonundaki değişimlerin STD ve TBÇ' li motorlara göre değişimleri görülmektedir. TBÇ' li motorda yakıt olarak

M15-E15 yakıtları kullanıldığında CO₂ emisyonlarında TBC' li ve standart motor verilerine göre artmalar saptanmıştır. TBC' li motora % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda, M15-E15 yakıtlarına göre CO₂ azalmalar olurken, STD ve TBC' li motor verilerine göre artmaların olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.45. Farklı yakıtlı TBC kaplı motorda buhar enjeksiyonu ve motor devrine bağlı olarak CO₂ emisyonundaki değişim

BÖLÜM 6. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kısmi yalıtılmış buji ateşlemeli bir motora buhar enjeksiyonun motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, piston üst yüzeyi dışarıdan merkeze doğru 4 ile 8 mm genişliğinde ve 0.5 mm kalınlığında iki farklı seramik malzeme (Y_2O_3 ve $MgO-ZrO_2$) ile kaplanmıştır. Buhar, egzoz kayıp enerjisinden elde edilip, geliştirilen elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi ile emme zamanında, emme manifolduna, yakıt sarfiyatının % 10, % 20 ve %30 kütle oranlarında gerçekleştirilmiştir. Tam yük şartlarında elde edilen deney sonuçları, motor performans parametreleri ve egzoz emisyonlarını optimum yapan buhar oranı, kaplama türü ve motor devir sayısı Ki-Kare yöntemiyle tespit edilmiştir.

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda döndürme momenti ve efektif güç değerlerinde, tüm buhar püskürtme oranlarında, standart motor verilerine göre artmalar tespit edilmiştir. Moment ve efektif güçte maksimum artma % 20 buhar oranında ve % 4.65 olarak belirlenmiştir.

Motorda TBC' li pistonların kullanılması durumunda, döndürme momenti ve efektif güçte aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzemeli TBC' li piston kullanılması durumunda, motor momenti ve efektif güçte standart piston göre, düşük devirler artma, yüksek devirlerde ise azalmalar tespit edilmiştir. Ancak, bu değişimler belirsizlik sınırlarında kaldığı için artma ya da azalma yönündeki değişimler çok anlamlı değildir. Bu piston farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ise, tüm buhar oranlarında moment ve güçte artmalar meydana gelmekle birlikte, en iyi sonuç B20' de elde edilmiştir. Standart piston göre maksimum artış oranı 1600 d/d' da % 3.65 olarak tespit edilmiştir.

4 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik malzeme kaplı TBC' li pistonlarda elde edilen veriler standart motor verileriyle karşılaştırıldığında, 3600 d/d hariç tüm deney

devirlerinde moment ve güçte artmaların olduğu belirlenmiştir. Maksimum artış oranı 1600 d/d' da % 1.25 olarak saptanmıştır. Ancak, motor momenti ve efektif güçteki belirsizlik sınıra bakıldığında bu değişimler belirsizlik sınırlarında kaldığı için çok anlamlı değildir. Bu pistonu farklı oranlarda buhar püskürtüldüğünde ise, tüm buhar püskürtme oranlarında moment ve güç değerinde STD değerlere göre artmalar meydana gelmiştir. Maksimum artma miktarı % 20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Bu buhar püskürtme oranı için artış miktarı 2800 d/d' da %4.54 olduğu tespit edilmiştir.

8 mm genişliğindeki Y_2O_3 seramik malzemeli TBÇ' li pistonun motorda kullanılması durumunda, motor moment ve güç değerlerinde tüm devir aralıklarında STD motor verilerine göre artmaların olduğu tespit edilmiştir. Maksimum artma oranı 2800 d/d' da % 3.44' dür. Bu pistonu farklı oranlarda buhar püskürtüldüğünde standart duruma göre tüm buhar oranlarında moment ve efektif güçte artmalar elde edilmiştir. Maksimum artış oranı % 20 buhar oranında 2800 d/d' da % 7.69' dur.

Kaplama malzemesi olarak $MgO-ZrO_2$ kullanılan 8 mm genişlikli TBÇ' li pistonun kullanılması durumunda, standart motor değerlerine göre moment ve efektif güçte tüm motor devirlerinde artmalar gözlenmiştir. Maksimum moment ve güçteki artış miktarı 3200 d/d' da % 3.52 olarak kaydedilmiştir. Bu pistonu farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ise, tüm buhar oranlarında elde edilen moment ve güç değerleri standart motor verilerinden daha yüksek bulunmuştur. Moment ve efektif güçte maksimum artma % 20 buhar oranında ve % 7.69 olarak saptanmıştır.

Optimum çalışma şartlarının belirlenmesi için Ki Kare testi uygulanmış ve % 99.9 güven aralığına göre, efektif gücün 3600 d/d, B20 buhar püskürtme oranında ve 8 mm $MgO-ZrO_2$ kaplamalı TBÇ' li pistonu; momentin ise, 2400 d/d, B20 püskürtme oranı ve 8 mm $MgO-ZrO_2$ kaplamalı TBÇ pistonlu motor şartlarında maksimuma ulaştığı görülmüştür.

Motora püskürtülen tüm buhar oranlarında özgül yakıt sarfiyatında standart motor verilerine göre azalmalar tespit edilmiştir. Maksimum azalma miktarı % 20 buhar püskürtme oranında 2000 d/d' da % 6.44' dir.

Piston üst yüzeyi 4 mm genişliğinde Y_2O_3 seramik malzeme ile kaplanmış TBC' li pistonun motorda kullanılması durumunda ÖYS' de STD motora göre tüm devirlerinde azalmalar tespit edilmiştir. ÖYS' deki maksimum azalma miktarı 3600d/d' da % 2.40 olarak ölçülmüştür. Bu pistonu farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ÖYS' de tüm buhar püskürtme oranlarında azalmalar kaydedilmiştir. Maksimum azalma miktarı B20 buhar püskürtme oranında % 5.31 olmuştur.

4 mm genişlikli $MgO-ZrO_2$ kaplı pistonda, ÖYS' de standart motor verilerine göre tüm devirlerde azalmalar tespit edilmiştir. Maksimum azalma oranı 2800 d/d da % 3.20 olarak ölçülmüştür. Bu pistonlu motora farklı oranlarda buhar püskürtmesi durumunda ise ÖYS' de tüm oranlarda azalmalar kaydedilmiştir. Maksimum azalma miktarı B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiş ve bu orandaki ÖYS değerinin STD duruma göre yüzde değişimi % 6.7' olarak saptanmıştır.

8 mm genişliğinde kaplama yapılması durumunda: Y_2O_3 kaplı pistonda standart motor verilerine göre ÖYS tüm devirlerde azalmıştır. ÖYS' de maksimum azalma oranı 2800 d/d' da % 5.34' dür. Bu kaplı pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması sonucunda ÖYS' de tüm buhar oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. En iyi sonuç B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiş olup, maksimum azalma oranı % 9.29 olarak tespit edilmiştir. $MgO-ZrO_2$ seramik kaplı pistonda ise; ÖYS tüm motor devirlerinde azalmıştır. Maksimum azalma oranı 3200 d/d' da % 5.94' dür. Farklı oranlarda buhar püskürtmesi durumunda ise ÖYS' de azalmalar kaydedilmiştir. Maksimum azalma miktarı % 20 buhar püskürtme oranı için 2800 d/d' da % 9.66' tır.

Özgül yakıt sarfıyatı açısından Ki Kare testi analiz sonuçları, % 99.9 güven aralığında incelendiğinde, optimum çalışma şartlarının 2400 d/d, B20 buhar püskürtme oranı ve 8 mm $MgO-ZrO_2$ seramik malzeme ile kaplı TBC' li pistonda elde edildiği görülmüştür.

Deneylerin gerçekleştirildiği tam yük şartlarında, motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda efektif verimde standart motor verim değerlerine göre

artmalar görülmüştür. STD motor verilerine göre maksimum artma B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiş ve değişim değerinin % 6.05 olduğu tespit edilmiştir.

Pistonun üst yüzeyi 4 ila 8 mm genişliğinde Y_2O_3 ve $MgO-ZrO_2$ seramik malzemeler ile kaplanmış TBC' li pistonların motora takılması durumunda tüm motor devirlerinde efektif verimde standart efektif verim değerlerine göre artmalar gözlenmiştir. Bu dört farklı TBC' li pistonu farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda efektif verim değerlerinde STD motor verilerine göre artmalar meydana gelmiştir. En iyi sonuç bütün pistonlarda B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Bu dört farklı TBC' li pistonların motora takılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verim değerleri STD motor verileriyle karşılaştırıldığında en iyi sonucun 8 mm genişlikli $MgO-ZrO_2$ kaplı TBC' li pistonu elde edildiği tespit edilmiştir. Maksimum efektif verimdeki artış ve B20 buhar püskürtme oranı için % 8.81 olarak tespit edilmiştir.

Ki Kare testi yönteminde % 99.9 güven aralığında efektif verim açısından saptanan optimum çalışma şartlarının 2400 d/d, B20 buhar püskürtme oranı ve pistonun üst yüzeyinin 8 mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ seramik malzemesi ile kaplanması durumunda gerçekleştiği görülmüştür.

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda standart motor verilerine göre egzoz gaz sıcaklıklarında buhar yüzdesine bağlı olarak artmalar görülmüştür. Buharın yanma sonu sıcaklığını düşürmesinden dolayı reaksiyon hızları yavaşladığı ve toplam yanma süresi uzadığı için yanma egzoz zamanına kadar uzamaktadır. Bu durum egzoz sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Buhar yüzdesindeki artmaya bağlı olarak egzoz sıcaklığının artması bu görüşü doğrulamaktadır.

Emme havası içerisine farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda hacimsel verimde gözlenebilir bir değişim olmamıştır. Buharın emme supabının hemen arkasına ve supabının açık olduğu zaman dilimi içerisinde gönderilmesiyle hacimsel verim kaybının önüne geçildiği anlaşılmaktadır.

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda, elde edilen silindir içi basınç değerleri standart motor verilerine göre püskürtülen buhar oranına bağlı olarak artmaktadır. Silindir içi basınç değerinde maksimum yapan değer B20 buhar püskürme oranında elde edilmiştir. Silindir içi sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise, farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda, standart duruma göre buhar oranına bağlı olarak azalmalar görülmüştür. Minimum silindir içi sıcaklık değeri B30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir.

Piston üst yüzeyi 8 mm genişliğinde farklı iki (Y_2O_3 ve $MgO-ZrO_2$) seramik malzeme ile kaplanması durumunda silindir içi basınç değerlerde artmalar elde edilmiştir. Bu iki kaplı pistonla farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ise STD ve kaplamalı duruma göre silindir içi basınç değerlerinde artmalar gözlenmiştir. Her iki pistonla da en iyi sonuç B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Silindir içi sıcaklık dağılımına bakıldığında ise, STD duruma göre her TBC' li pistonla artmalar görülmüştür. Fakat bu pistonlara farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda silindir içi sıcaklık değerleri düşmektedir. Kaplamalı pistonla buhar enjeksiyonu yapılması durumunda en iyi sonuç her iki piston için de B30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir.

Standart pistonla çalışan benzin motoruna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda, NO_x emisyonlarında dikkate değer oranlarda azalmalar görülmüştür. NO_x emisyonlarındaki maksimum azalma B30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Maksimum azalma miktarı bu buhar püskürtme oranı için 2000 d/d' da % 48 olarak tespit edilmiştir.

Motor pistonun farklı kalınlık ve farklı seramik malzeme ile kaplanması durumunda motordan salınan NO_x emisyonlarında standart motor verilerine göre artmalar görülmüştür. NO_x emisyonlarındaki maksimum artma TBC' li pistonlardan 8 mm genişlikli $MgO-ZrO_2$ kaplı TBC' li piston kullanımında meydana gelmiştir. Maksimum artış oranı 3600 d/d' da % 14.67 olarak ölçülmüştür. NO_x emisyonlarının artmasının nedeni kaplama ile birlikte yanma odası sıcaklıklarının artmasından kaynaklanmaktadır. Fakat kaplamanın olumsuz etkilediği NO_x emisyonları, emme manifolduna buhar enjeksiyonu ile birlikte bertaraf edilmektedir. Bu pistonlarda da

maksimum azalma B30 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. STD duruma göre maksimum azalma miktarları; 4 mm Y_2O_3 TBC' li motorda % 32.32, 4 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ seramik kaplı motorda % 31.46, 8 mm genişliğinde Y_2O_3 TBC' li motorda % 20.87 ve 8 mm MgO-ZrO₂ pistonlu motorda % 13.55 olarak ölçülmüştür.

NO_x emisyonları açısından optimum çalışma şartların belirlendiği Ki Kare testine göre, % 99.9 güven aralığında, 3600 d/d, B30 buhar püskürtme oranı ve STD pistonlu motor olarak tespit edilmiştir.

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonlarında dikkate değer oranlarda azalmalar görülmüştür. HC emisyonlarındaki maksimum azalma B20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir. Maksimum azalma miktarı bu buhar püskürtme oranı için % 31.57' dir.

Motor pistonun üst yüzeyinin farklı kalınlık ve farklı seramik malzeme ile TBC uygulanması durumlarında soğuk ilk hareket HC emisyonlarında dikkate değer oranda azalmalar meydana gelmiştir. Azalmaların nedeni, HC emisyonlarının oluşum mekanizmalarından olan alev sönme bölgelerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Piston tepesine seramik malzemelerle yapılmış TBC sayesinde seramik malzemelerin ısı rezerv edebilme kabiliyetinin yüksek olması gaz ve cidar sıcaklıklarını artırmaktadır. Buda alev sönme bölgelerinde oluşan yakıt hava karışımlarının sönmeden oksitlenebilmesini imkân sağlayarak HC emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır.

Pistonun üst yüzeyinin seramik malzeme ile kaplanması durumunda motordan salınan HC emisyonlarında STD duruma göre azalmalar tespit edilmiştir. 4 mm genişliğinde Y_2O_3 kaplamalı motorda, HC emisyonlarındaki maksimum azalma oranı % 22.06, 4 mm MgO-ZrO₂ kaplamalı TBC motorda % 24.25, 8 mm Y_2O_3 kaplamalı motorda, % 36.44 ve 8 mm MgO-ZrO₂ kaplamalı TBC motorda ise % 37.31 olarak tespit edilmiştir. TBC motorlara farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda HC emisyonlarında meydana gelen değişimler incelendiğinde, STD duruma göre HC emisyonlarındaki maksimum azalma tüm TBC pistonlar için % 20 oranında elde

edilmiştir. Meydana gelen maksimum azalma miktarları: 4 mm Y_2O_3 pistonda % 33.47, 4 mm $MgO-ZrO_2$ de % 37.71, 8 mm Y_2O_3 pistonda 47.84 ve 8 mm $MgO-ZrO_2$ kaplamalı pistonda % 46.48 olarak ölçülmüştür.

HC emisyonları açısından optimum çalışma şartların belirlendiği Ki Kare testine göre, % 99.9 güven aralığında, 3600 d/d, B20 buhar püskürtme oranı ve 8mm genişliğinde $MgO-ZrO_2$ kaplamalı pistonda elde edilmiştir

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda CO emisyonlarında düşük devirlerde (1600 ve 2000 d/d) STD duruma göre artma olurken, yüksek devirlerde (2400, 2800, 3200 ve 3600 d/d) azalmalar gözlenmiştir. STD duruma göre CO emisyonlarının maksimum olduğu devirde minimum CO emisyon değeri % 20 buhar püskürtme oranında elde edilmiştir.

Piston üst yüzeyinin farklı kalınlık ve farklı seramik malzeme ile kaplanması ve bu farklı kaplamalı motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda CO emisyonlarındaki değişim STD motora buhar püskürtülmesi durumuna göre benzer sonuçlar elde edilmiştir. CO emisyonlarında düşük devirlerde artma olurken yüksek devirlerde azalmalar olmaktadır.

CO emisyonlarını minimum yapan çalışma şartları Ki Kare testine göre 2000 d/d, % 20 buhar püskürtme oranı ve 8 mm $MgO-ZrO_2$ kaplama olduğu tespit edilmiştir. Ki Kare testine göre buhar oranı CO emisyonu üzerine % 99, kaplamanın ise % 99.9 güven aralıklarında etkisi olmaktadır.

Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda CO_2 emisyonlarında düşük devirlerde (1600 ve 2000 d/d) STD duruma göre azalma olurken, yüksek devirlerde (2400, 2800, 3200 ve 3600 d/d) artmalar gözlenmiştir. Standart durumda CO_2 emisyonun maksimum olduğu 3600 d/d' da emisyon değeri % 10.99 iken aynı devirde % 20 buhar püskürtme oranında bu değer % 11.38 olarak elde edilmiştir. Motor pistonun dört farklı şekilde kaplanması ve TBC' li motora farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda standart motora buhar enjeksiyon yapılması durumunda elde edilen sonuçlara benzer şekilde sonuçlar elde edilmiştir.

CO₂ emisyonların optimum yapan çalışma şartları incelendiğinde, buhar oranını ve kaplamanın sırasıyla % 99 ve % 99.9 güven aralıklarında CO₂ üzerine etkisi olmaktadır. CO₂ emisyonu için belirlenen optimum çalışma şartları 1600 d/d, STD piston ve standart çalışma durumunda elde edilmiştir.

STD motorda buhar enjeksiyonun etkileri ayrıca teorik olarak sıfır-boyutlu tek-bölgeli yanma modeline göre modellenmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen deney verileri ile teorik modelden elde edilen teorik veriler karşılaştırıldığında birbirlerine göre yakın değerler vermiştir.

Ayrıca seramik kaplamalı motorda yakıt olarak M15-E15 yakıtlarının kullanılması ve bu yakıtlara farklı oranlarda buhar enjeksiyonu yapılması durumunda motor performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Çalışmada, 4 farklı TBC pistonu kullanılarak tam yük şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda, motor performansı açısından en iyi sonuç 8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ TBC' li motorda elde edilmiştir. Bu sebeple, alkol+bezin karışımlarının yakıt olarak kullanıldığı benzin motoruna buhar enjeksiyonun motor performans ve emisyonlar üzerine etkileri bu TBC' li piston motora takılarak deneysel olarak araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında benzin içerisine farklı oranlarda metil ve etil (%5, %10, %15 ve %20) alkoller karıştırarak deneyler ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre motor performans açısından optimum karışım oranı M15-E15 yakıtlarında elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise elde edilen bu yakıtlara farklı oranlarda (%10, %20 ve %30) buhar enjeksiyonu yapılmıştır. TBC' li ve M15-E15 yakıtlı motorda motor performans ve egzoz emisyonları açısından optimum sonucu veren buhar oranı % 10 olarak tespit edilmiştir.

8 mm genişliğinde MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBC' li motorda yakıt olarak M15-E15 yakıtlarının kullanılması durumunda standart motor verilerine göre motor momenti ve efektif güçte artmalar elde edilmiştir. M15-E15 yakıtları için maksimum artma oranları sırasıyla; 2800 d/d' da % 5.6 ve 2800 d/d' da % 4.5' dür. Bu farklı yakıtlara B10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda moment ve efektif güçte azalmalar

olmaktadır. B10 buhar püskürtme oranında M15-E15 yakıtına göre moment ve efektif güçteki maksimum azalma miktarları sırasıyla 3600 d/d ve 3200 d/d' da % 2.6, % 3.6' dir. Fakat standart motor verileri ile karşılaştırıldığında moment ve efektif güç değerlerinde B10 buhar püskürtülmesi ile birlikte artmalar olmaktadır.

8mm genişliğinde MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBC' li pistonda yakıt olarak M15-E15 yakıtlarının kullanılması durumunda kaplamalı motora göre ÖYS' de artmalar görülmektedir. Maksimum artma oranı M15 yakıtı için; 3600 d/d' da % 4.1 ve E15 yakıtı için ise 3600 d/d' da % 5.3' dir. M15-E15 yakıtına % 10 buhar enjeksiyonu yapılması durumunda ÖYS' de artmalar görülmektedir. B10 buhar püskürtme oranında M15-E15 yakıtlarına göre maksimum artma oranları sırasıyla; 3600 d/d % 3, 3200 d/d' da ise % 3.3' dür.

8mm genişlikli MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBC' li pistonda yakıt olarak M15-E15 yakıtlarının kullanılması durumunda efektif verimde azalmalar görülmektedir. TBC kaplı motora göre efektif verimdeki maksimum azalma miktarı M15 yakıtı için 3600 d/d' da 4.3 iken E15 yakıtı için ise bu değer 3600 d/d' da % 5.6' dır. B10 püskürtme oranında her iki yakıt içinde efektif verimde azalmalar olmaktadır. M15-E15 yakıtlarına göre maksimum azalma miktarı sırasıyla; 3600 d/d' da % 3.1, 3200 d/d' da ise % 3.4' dür.

8mm genişlikli MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBC' li pistonda yakıt olarak M15-E15 yakıtları kullanılması durumunda tüm devir aralıklarında STD ve kaplamalı motor verilerine göre NO_x emisyonlarında kayda değer oranda azalmalar görülmektedir. NO_x emisyonlarında M15-E15 yakıtı ile birlikte maksimum azalma oranları sırasıyla; 3600 d/d' da % 34.4, 3200 d/d' da % 35.2' dir. Bu farklı yakıtlara % 10 buhar püskürtülmesi ile birlikte NO_x emisyonlarında M15-E15 yakıtlarına göre tüm devir aralıklarında azalmalar olmaktadır. B10 buhar püskürtme oranında, M15-E15 yakıtlarına göre maksimum azalma miktarları sırasıyla; 3200 d/d' da % 6.8, 2000 d/d' da % 6.2' dir.

8 mm genişlikli MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBC' li pistonda yakıt olarak M15-E15 yakıtları kullanılması durumunda STD motor verileri ile TBC piston verilerine göre

karşılaştırıldığında HC emisyonlarında azalmalar kaydedilmiştir. HC emisyonlarında M15-E15 yakıtları ile birlikte TBÇ' li pistonla göre maksimum azalma oranları sırasıyla; 2000 d/d' da % 3, 2000 d/d' da % 1.89' dur. Fakat M15-E15 yakıtları üzerine % 10 buhar püskürtülmesi durumunda alkol yakıtlarına göre HC emisyonlarında bir miktar artmalar tespit edilmiştir. B10 buhar püskürtme oranında, M15-E15 yakıtlarına göre maksimum artma değerleri sırasıyla; 3200 d/d' da % 11.3 ve 2800 d/d' da % 11.7' dir.

8 mm genişlikli MgO-ZrO₂ seramik kaplı TBÇ' li pistonla yakıt olarak M15-E15 yakıtları kullanılması durumunda CO emisyonlarında azalmalar olmaktadır. % 10 buhar püskürtme oranında ise M15-E15 yakıtlarına göre artmalar olurken, STD ve kaplamalı duruma göre azalmalar olmaktadır. Alkol yakıtlarının motorlarda kullanılması durumunda egzozdan salınan CO₂ emisyonları incelendiğinde, standart ve TBÇ' li piston verileri ile karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarında artmalar saptanmıştır. M15-E15 yakıtları üzerine % 10 buhar püskürtmesi durumunda M15-E15 yakıtına göre azalmalar olurken, STD ve kaplamalı duruma göre artmalar elde edilmiştir.

Buhar püskürtme yöntemi ile yapılan çalışma sonuçları dikkate alındığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Emülsife yakıt kullanılması durumunda karışım yüzdesinin sabit olması nedeniyle, soğuk çalışma ve geçici çalışma koşullarına göre değişiklik yapılamamaktadır. Buhar püskürtme sisteminde püskürtülecek buhar miktarı elektronik olarak esnek bir şekilde kontrol edilebildiğinden geçici çalışma koşullarındaki olumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır. Motora su gönderilmesi ile birlikte yanma sonucunda yoğunlaşan suyun yağlama yağı içerisinde biriktiği ve yağın özelliğini bozarak motordaki çalışan aksamın aşınma hızlarını artırmaktadır. Fakat buhar enjeksiyon sisteminde, yanma odasına gönderilen suyun emme periyodunda iken buhar fazında gönderilmesi sağlanmıştır. Buhar enjeksiyonunun emme supabının açılmasından 50–100 derece sonra gerçekleşmesi nedeniyle pistonun yeteri kadar AÖN' ye ilerlemesi nedeniyle yoğunlaşma probleminin ortadan kalkacağı rahatlıkla söylenebilir. Aynı zamanda geliştirilen sistem elektronik olarak kontrol edildiğinden soğuk çalışma koşullarında

yanma kararlılığı açısından ve motorun yüksüz çalışması nedeniyle buhar enjeksiyonunu tamamen kesilebilme esnekliği sunmaktadır.

Yanma odasına ortam sıcaklığında su püskürtmek, NO_x emisyonunun azaltılmasında önemli olmakla birlikte, püskürtülen suyun yanma odası girişinde ve yanma odasında homojen olarak dağılmama, yağ filmine ve bölgesel korozyona neden olma ve aşırı sıcaklık farkının neden olduğu termal şokun malzemelerin dayanımını azaltma gibi riskleri söz konusudur. Ancak gönderilen su, buhar haline getirildiğinde, buhar yanma odasında homojen olarak dağılacığından su birikmesi, yağ filminin bozulması ve korozyon riski de ortadan kaldırılmıştır. İlaveten buharlaşma için gerekli enerji egzoz enerjisinden sağlandığı için suyun buharlaştırılması için harici enerji kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] CHEVRON, I., Motor Gasolines Technical Review, Chevron Products Company, Chevron USA Inc, 1996.
- [2] BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEŒ, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, T.E.V. Yayınları-3, s., 60-92, Ankara, 1992
- [3] CİNİVİZ, M., HAŞİMOĞLU, C., ÇINAR, C., TOPGÜL, T., Dizel Motorlarındaki Emme Manifoldundaki (CO2) Konsantrasyonunun Egsoz Emisyonlarına Etkileri, 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 2002, 217-224 Ankara.
- [4] WANG, Y., LIN, L., ROSKILLY, A. P., ZENG, S., HUANG, J., HE, Y., HUANG X., HUANG, H., WEI, H., SHANGPING, L. S., YANG, J., An Analytic Study of Applying Miller Cycle to Reduce NOX Emission from Petrol Engine, Applied Thermal Engineering 27, 2007, 1779–1789.
- [5] Çevre vakfı, Motorlu Kara Taşıtlarında Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi Paneli., Ankara Valiliği Çevre Koruma Yayınları, Ankara, 1995.
- [6] CHENG, WK., HAMRIN, D., HEYWOOD, JB., An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines, SAE Technical Paper, 1993, 932708.
- [7] HAMRIN, DA., Modeling of Engine-Out HC Emissions for Prototype Production. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1994
- [8] KARAMANGİL, İ., Benzin Motorlarında HC Emisyonlarının Matematik Modellenmesi. Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2000.
- [9] SCHRAMM, J., SORENSON SC., SAE, Technical Paper, 1990, 902169.
- [10] HEYWOOD, JB., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc., Newyork, 1988.

- [11] KUTLAR, O., ERGENEMAN, M., ARSLAN, H. ve MUTLU, M., Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
- [12] ADAMCZYK, AA., ROTHSCHILD WG., KAİSER EW., The Effect of Fuel and Oil Structure on Hydrocarbon Emissions from Oil Layers During Closed Vessel Combustion. Combustion Science and Technology, 1985, 44:113-124
- [13] BİLGİN, A., DURGUN, O., Taşıt Motorlarında Kirletici Emisyonların Oluşum Mekanizmaları ve Önlenmesi, 5. Yanma sempozyumu, 1998, 196-208.
- [14] CHEVRON. I., Use of Unleaded Gasoline in Cars Designed for Leaded Gasoline, USA Inc., 1996.
- [15] PARLAK, A., The effect of Heat Transfer on Performance of The Diesel Cycle and Exergy of The Exhaust Gas Stream in a LHR Diesel Engine at The Optimum Injection Timing, Energy Conversion and Management 46, 2005, 167–179.
- [16] PARLAK, A., Comparative Performance Analysis of Irreversible Dual and Diesel Cycles Under Maximum Power Conditions, Energy Conversion and Management 46, 2005, 351–359.
- [17] U.S. Environmental Protection Agency, Nitrogen Oxides, Why and How They Are Controlled, EPA, November, 1999.
- [18] ALDAJAH, S., AJAYI, OO., FENSKE, GR., GOLDBLATT, IL., Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Contamination of Diesel Engine Oil on Wear, Elsevier, Wear, 2006, 12. 055.
- [19] DRAYER, FL., Water Addition to Practical Combustion Systems- Concepts and Application, 16th Symposium on Combustion, Cambridge MA, Combustion Institute, Aug., 1976.
- [20] LANZAFAME, R., Water Injection Effects In a Single-Cylinder CFR Engine, SAE, Paper, 1999, 01-0568, 1999.
- [21] LESTZ, SJ., MELTON, RB., RAMBI, EJ., Feasibility of Cooling Diesel Engines by Introducing Water Into the Combustion Chamber, SAE Paper, 1975, 750129.
- [22] LI, Z., SANO, H., TSUKAHARA, M., YOSHIMOTO, Y., NOX Reduction with EGR in a Diesel Engine Using Emulsified Fuel, SAE Paper, 1998, 982490.
- [23] ANDREWS, GE., BARTLE, K.D., PANG, SW., NUREIN, AM., and WILLIAMS, PT., The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels, SAE Paper, 1988, 880348.

- [24] VALDMANIS, E., WULFHORST, DE., The Effects of Emulsified Fuels and Water Induction on Diesel Combustion, SAE Paper, 1970, 700736.
- [25] ÇELİK, HA., Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplamanın Performansa Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1991.
- [26] ASSANIS, D., WIESE K., SCHWARZ, E., BRYZIK, W., The Effects of Ceramic Coatings on Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions, SAE Paper, 1991, 910460.
- [27] KIMURA, S., MATSUI, Y., ITOH, T., Effects of Combustion Chamber Insulation on the Heat Rejection and Thermal Efficiency of Diesel Engines, SAE Paper, 1992, 920543.
- [28] FRANK, RM., HEYWOOD, JB., The Effect of Piston Temperature on Hydrocarbon Emissions from a Spark Ignited Direct-Injection Engine, SAE Paper, 1991, 910558.
- [29] PARKER, D. and BONAR, J., Thermal Barrier Coatings for Diesel Engines: Ten Years of Experience, SAE Paper, 1992, 922438.
- [30] PARLAK, A. ve YAŞAR, H., Düşük Isı Kayıplı Dizel Motorlarında Yapılan Çalışmaların Performans Açısından Değerlendirilmesi, 6. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, İstanbul, 1999.
- [31] AMANN, C., Promises and Challenges of the Low Heat Rejection Diesel, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power”, vol. 110, 1988, 75-482.
- [32] STONE, R., Motor Vehicle Fuel Economy, Macmillan Educational Ltd.,Houndsmills, 1989.
- [33] SCHWARZ, E., REID, M., BRYZIK, W., DANIELSON, E., Combustion and Performance Characteristics of A Low Heat rejection Engine, SAE Paper, 1993, 930988.
- [34] BRYZIK, W., KAMO, R., TACOM/Cummins Adiabatic Engine Program, SAE Paper, 1983, 830314.
- [35] GATAOWSKI, JA., Evaluation of A Selectively-Cooled Single-Cylinder 0.5-L Diesel Engine, SAE, Technical Paper, 1990, 900693.
- [36] YAŞAR, H., BÜYÜKKAYA, E., ÇELİK, V., Application of Thermal Barrier Coating in a Turbocharged DI Diesel Engine ,5.Yanma Sempozyumu, Bursa, 21-23 Temmuz 1996, 460-468.

- [37] YAŞAR, H., PARLAK, A. ve KOLİP, A., Standart ve Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorun Tersinmezlik Kaynaklarının Karşılaştırmalı Analizi, 8. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, 2004, Ankara, 36-47.
- [38] KAWAMURA, H., SEKIYAMA, S. and HIRAI, K., Observation of the Combustion Process in a Heat Insulated Engine”, SAE Paper, 1991, 10462.
- [39] PARLAK, A., The Effects of Partial Suppression of Heat Loss to Coolant on Performance and Exhaust Emission Characteristics of an IDI Supercharged Diesel Engine”, Gazi Üniversitesi FBE Dergisi, cilt 15, no 4, 2002, 867-878.
- [40] PARLAK, A., YAŞAR, H. and ŞAHİN, B., Performance and Exhaust Emission Characteristic of a Lower Compression Ratio LHR Diesel Engine”, Energy Conversion and Management, vol. 44, issue 1, 2003, 63-175.
- [41] PARLAK, A., YAŞAR, H. and ELDOĞAN, O., The Effect of Thermal Barrier Coating on a Turbo-charged Diesel Engine Performance and Exergy Potential of the Exhaust Gas, Energy Conversion and Management, vol. 46, 2005, 489-499.
- [42] PARLAK, A., The Effect of Heat Transfer on Performance of the Diesel Cycle and Exergy of the Exhaust Gas Stream in a LHR Diesel Engine at the Optimum Injection Timing”, Energy Conversion and Management, vol. 46, 2005, 167-179.
- [43] CİNİVİZ, M., HAŞİMOĞLU C., SALMAN MS., AYDIN F., ÖRS İ., Bir Dizel Motorunda Termal Bariyer Kaplamanın Performans Ve Emisyon Parametrelerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi, TEKNOLOJİ, Cilt 10, sayı 3, 2007,223-233.
- [44] SCHWARZ, E., REID, M., BRYZIK, W. and DANIELSON, E., Combustion and Performance Characteristics of a Low Heat Rejection Engine, SAE Paper, 1993, 930988.
- [45] WOODS, M., BRYZIK, W. and SCHWARZ, E., Heat Rejection from High Output Adiabatic Diesel Engine, SAE Paper, 1992, 920541.
- [46] HAVSTAD, PH., GERGIN, IJ., and WADE , W.R., A Ceramic Insert Uncooled Diesel Engine, SAE Paper, 1986, 860447.
- [47] HEJWOWSKI, T., WERONSKI, A., The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance, Vacuum 65, 2002, 427–432.

- [48] BÜYÜKKAYA, E., ENGİN, T., CERİT, M., Effects of Thermal Barrier Coating on Gas Emissions and Performance of a LHR Engine with Different Injection Timings and Valve Adjustments, *Energy Conversion and Management* 47, 2006, 1298–1310.
- [49] ASSANIS, DN. and BADILLO, E., The Effect of Thin Ceramic Coating on Spark-Ignition Engine Performance, SAE Paper, 1990, 900903.
- [50] POOLA, RB., NAGALINGAM, B., GOPALAKRISHNAN, K.V., Performance of Thin-Ceramic-Coated Combustion Chamber with Gasoline and Methanol as Fuels in A Two-Stroke SI Engine, SAE Paper, 1994, 941911.
- [51] PARLAK A., AYHAN V., DENİZ C., KOLİP A., KOKSAL S., Effects of M15 Blend on Performance and Exhaust Emissions of Spark Ignition Engine with Thermal Barrier Layer Coated Piston, *Journal of The Energy Institute*, Vol.81 (2), 2008, 97-1001.
- [52] CERİT, M., AYHAN, V., PARLAK, A., YAŞAR, H., Thermal Analysis of a Partially Ceramic Coated Piston: Effect on Cold Start HC Emission in a Spark Ignition Engine, *Applied Thermal Engineering* 31, 2011, 336-341.
- [53] CHAN, SH., and KHOR, KA., The Effect of Thermal Barrier Coated Piston Crown on Engine Characteristics, *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 9(1) February 2000—103-109.
- [54] CHAN, SH., Performance and Emissions Characteristics of a Partially Insulated Gasoline Engine, *Int. J. Therm. Sci.* 2001, 40, 255–261.
- [55] RAMESH-KUMAR, C., NAGARAJAN, G., Performance and Emission Characteristics of a Low Heat Rejection Spark Ignited Engine Fuelled With E20 ,*Journal of Mechanical Science technology*, Volume 26, Number 4, 2012, 1241-1250.
- [56] KAPSIZ, M., PARLAK, A., AYHAN, V., Hava Soğutmalı Bir Benzin Motorunda Segman Boşlularından Kaynaklanan HC Emisyonlarının Azaltılması, 4. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 28-30 Eylül 2005, Konya, Türkiye.
- [57] GREEVES, G., KHAN, IM., ONION, G., Effects of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emissions, *Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1977, 321–36.
- [58] LIF, A., and HOLMBERG, K., Water-in-Diesel Emulsions and Related Systems, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, 231-239.

- [59] BEDFORD, F., RUTLAND, C., DITTRICH, P., RAAB, A., and WIRELEIT, F., Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion, SAE paper, 2001, 01-2938.
- [60] LIN, CY., and WANG, KH., Effects of Diesel Engine Speed and Water Content on Emission Characteristics of Three-Phase Emulsions, Journal of Environmental Science and Health, Part A 39, No 5, 2004, 1345-1359.
- [61] ABU-ZAİD, M., Performance of Single Cylinder, Direct Injection Diesel Engine Using Water Fuel Emulsion, Energy Conversion and Management 45, 2004, 697-705.
- [62] WANG, CH., CHEN, JT., An Experimental Investigation of the Burning Characteristics of Water-Oil Emulsions, Int. Common Heat Mass Transfer 23(6), 1996,823-34.
- [63] NAZHA, MAA., RAJAKARUNA, H., WAGSTAFF, SA., The Use of Emulsion, Water Induction and EGR for Controlling Diesel Engine Emission, SAE, Technical Paper, 2001, 01-1941.
- [64] PARLAK, A., AYHAN, V., ÜST, Y., ŞAHİN, B., CESUR, İ., BORU, B., NOx Emisyonlarının Azaltılmasında Yeni Bir Yöntem: Elektronik Kontrollü Su Buharı Enjeksiyonu, The 1st Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation, 24-26 November 2010, Istanbul.
- [65] AYHAN, V, Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun NOx Ve İş Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması”, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Temmuz 2009.
- [66] PARLAK, A., AYHAN, V., ÜST, Y., ŞAHİN, B., CEUR, I., BORU, B., KÖKKÜLÜNK, G., New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system, Journal of the Energy Institute 85, 2012, 135-139.
- [67] PARLAK, A., AYHAN, V., ŞAHİN, B., CESUR, I., BORU, B., KÖKKÜLÜNK, G., The Effects of the New Developed Electronic Controlled Steam Injection System on NOx Emissions of a Single Cylinder Diesel Engine, 13th International Conference Maritime Transport and Infrastructure 2011, Riga.
- [68] CANFIELD, CA., Effects of Diesel-Water Emulsion Combustion on Diesel Engine NOx Emission, Master of Science, University Of Florida, 1999.
- [69] ARMAS, O., BALLESTEROS, R., MARTOS, FJ., AGUDELO, JR., Characterization of Light Duty Diesel Engine Pollutant Emissions Using Water-Emulsified Fuel, Fuel 84, 2005, 1011-1018.

- [70] IHSIDA, M., UEKI, H., SAKAGUCHI, D., Prediction of NOX Reduction Rater Due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine, SAE, paper, 1997, 972961.
- [71] DONAHUE, R., Controlling Combustion Using in Cylinder Mixture Preparation, PhD. Thesis, Mechanical Engineering, UW Madison, 2000.
- [72] SARVI, A., KILINEN, P., ZEVENHOVER, R., Emissions from Large-scale Medium-speed Diesel Engines: 3. Influence of Direct Water Injection and Common rail, Fuel Processing Technology 90, 2009, 222-231.
- [73] CADWELL, CJ., DINGLE, PJG., Effect of Diesel and Water Co-injection with Real-Time Control on Diesel Engine Performance and Emissions, SAE, Technical Paper, 2001, 01-1190.
- [74] WARANABE, H., SUSUKI, Y., HARADA, T., MATSUSHITA, Y., AOKI, H., MIURA, T., An Experimental Investigation of the Breakup Characteristics of Secondary Atomization of Emulsified Fuel Droplet, Energy, Vol. 35, 2010, 806-813.
- [75] CROOKES, RJ., NAZHA, MAA., JANOTA, MS., STOREY, T., Investigation into the Combustion of Water/Diesel Fuel Emulsions, SAE Paper No. 800094.
- [76] MURTHY, YVVS., SASTRY, GYK., SATYANARYANA, MRS., Experimental Investigation of Performance and Emissions on low Speed Diesel Engine with Dual Injection of Solar Generated Steam and Pongamia Methyl Ester", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, 2011, 29-33.
- [77] OCAMPO-BARRERA, R., VILLASENOR, R., DIEGO-MARIN, A., An Experimental Study of the Effect of Water Content on Combustion of Heavy Fuel Oil/Water Emulsion Droplets", Combustion and Flame, Vol.126, 2001, 1845-1855.
- [78] PARK, JW., HUH, KY., LEE, JH., Reduction of NO_x, Smoke and Brake Specific Fuel Consumption with Optimal Injection Timing and Emulsion Ratio of Water-Emulsified Diesel", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol 1, 2001, 215:83.
- [79] BARDANA, O., EMEISHB, S., ABU-ZAID, M., ABU-RAHMAA, T., AL-HASANA, M., AL-RAGHEBA, M., Impact of Emulsified Water/Diesel Mixture on Engine Performance and Environment, Int. J. of Thermal & Environmental Engineering Volume 3, No. 1 , 2011-7.

- [80] DANI, D., Reduction Of NO_x In Diesel Engine Using Diesel Water Emulsion, Bachelor of Technology Degree in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Zourkela, 2012.
- [81] KANAN, K., UDAYAKUMA, M., NO_x and HC Emission Control Using Water Emulsified Diesel In Single Cylinder Diesel Engine, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, VOL. 4, NO. 8, 2008.
- [82] AYHAN, V., The Effects of Emulsified Fuel on the Performance and Emission of Direct Injection Diesel Engine, Journal of Energy Engineering, doi:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000097, August 24, 2012. 2012
- [83] SUBRAMANIAN, V., MALLIKARJUNA, JM., RAMESH, A., Effects of Water Injection and Spark Timing on the Nitric Oxide Emissions and Combustion Parametres of a Hydrogen Fuelled Spark Ignition Engine, Internatioanl Journal of Hydrogen Energy 32 , 2007, 1159-1173.
- [84] OZCAN, H., SOYLEMEZ, MS., Thermal Balance of a LPG Fuelled Four Stroke SI Engine with Water Addition, Energy Conversion and Management 47, 2006, 570-581.
- [85] SOYSAL, D., DURGUN, D., Benzin Motorlarında Emme Havasına Su Eklenmesinin Motor Performansına Ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 11. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, 24-24 Haziran2010, Saraybosna.
- [86] ÖZCAN, H., SÖYLEMEZ MS., Experimental Investigation of the Effects of Water Addition on the Exhaust Emissions of a Naturally Aspirated, Liquefied-Petroleum-Gas-Fueled Engine”, Energy and Fuels, 19(4), 2005, 468-1472.
- [87] BECHTOLD, RL., Alternative Fuels Guidebook, Society of Automotive Engineers Inc., 47-56, 1997.
- [88] AL-BAGHDADI, MAS., The safe operation zone of the spark ignition engine working with dual renewable supplemented fuels (hydrogen ethyl alcohol), Renewable Energy, 22 (4): 579-583, 2001.
- [89] STOKES, J., LAKE, TH., CHRISTINE, MJ., DENBRATT, I., Improving the NO_x /Fuel Economy trade-off for Gasoline with teh CCVS Combustion System”, SAE Peper, 1994, 940482.
- [90] PARLAK, A., Katalitik Konverterli Benzin Motorunda Soğuk İlk Hareket Emisyonlarının İncelenmesi ”, SAÜ, FBE, Yüksek Lisans Tezi, 1996.

- [91] ERDURANLI, P., SEKMAN, Y., ÇINAR, C., Buji ile Ateslemeli Degisken Sıkıştırma Oranlı Motorların Egzoz Emisyonları Açısından incelenmesi. Selçuk-Teknik Online Dergisi / ISSN 1302- 6178 Volume 2, 2001, Number: 1.9.
- [92] SEKMEN, Y., Buji ile Ateslemeli Bir Motorda Sıkıştırma Oranının Degistirilebilir Hale Getirilmesi ve Performansa Etkisinin Arastırılması, Gazi Üniv. Fen Bil. Enst., Doktora Tezi, 2003, Ankara.
- [93] DENİZ, T., Buji ateşlemeli bir motorda sıkıştırma oranı değişikliğinin motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [94] BALCI, M., Motorlu Taşıtlarda Kirletici Denetimi, 4. Yanma Sempozyumu, Bursa, 1995, 437-447.
- [95] KAPSIZ, M., Bir Buji Ateşlemeli Motorda Segman Üst Boşluklarından Kaynaklanan HC Emisyonlarının Azaltılması, SAÜ, FBE, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz, 2004.
- [96] AYHAN, V., KAPSIZ, M., PARLAK, A., Buji Ateşlemeli Motorlarda Termal Bariyer Kaplamanın Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, 9. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 16-17 Kasım 2006, Kırıkkale, Türkiye.
- [97] YILDIRIM, AM., Buji Ateşlemeli Motorlarda HC Oluşumuna Neden Olan Mekanizmaların Tanıtımı ve Etkili Parametrelerin İncelenmesi, Yanma ve Hava Kirliliği Sempozyumu III, 1995.
- [98] SORUŞBAY, C., Yakıt Özelliklerinin Egzoz Emisyonlarına Ekisi, Taşıtlardan Kaynaklanan egzoz ve Gürültü Emisyonu Eğitim Semineri Notları, 29-30 Haziran 1995.
- [99] PARLAK, A., AYHAN, V., Effects of Using Piston with Thermal Barrier Layer in Spark Ignition Engine on Performance at WOT and Cold Start HC Emission at Idle, Journal of Energy Institute, Vol. 80, No.4, 2007.
- [100] AYHAN, V., Metanol-Benzin Karışımlarının MgO-ZrO₂ Termal Bariyer Çemberli Bir Motorda Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2006.
- [101] THOMPSON, ND., WALLECE, JS., Effect of Engine Operating Variables and Piston and Ring Parameters on Crevice Hydrocarbon Emission, SAE Paper, 1994, 940480.
- [102] NAMAZIAN, M., and HEYWOOD, JB., Flow in the Piston-Cylinder-Ring Crevices of a Spark-Ignition Engine: Effect on Hydrocarbon Emissions, Efficiency and Power. SAE Paper , 1983, 830088.

- [103] HEYWOOD, JB., Pollutant Formation and Control in SI Engines, Progress Energy Combustion Science, Vol.1,1976, 135-164.
- [104] HAŞİMOĞLU, C., Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eylül, 2005.
- [105] KLEINSCHMIDT, W., Untersuchung des Arbeitsprozesses und NO-NO₂ und CO Bildung in Ottomotoren, Diss, TH Aachen, 1974.
- [106] SORUŞBAY, C., İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonu, Ders Notları, İ.T.Ü., 1999.
- [107] ARSLAN, H., Taşıt Egzoz Emisyonları ve İ.T.Ü. Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvarlarında 1993-1995 Yılları Arasında Yapılan Ölçümlerin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, İstanbul, 1996.
- [108] ERDURANLI, P., SEKMEN, Y., ÇINAR, C., Buji İle Ateşlemeli Değişken Sıkıştırma Oranlı Motorların Egzoz Emisyonları Açısından İncelenmesi, Selçuk-Teknik Online Dergisi / Issn 1302- 6178, Volume 2, Number: 1, Konya, 2001.
- [109] AYHAN, V., CESUR, İ., PARLAK, A., BORU, B., Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun Performansa ve NO_x Emisyonlarına Etkilerinin Araştırılması, Uluslararası 10. Yanma Sempozyumu, Sakarya, 9-10 Ekim 2008.
- [110] KAYTAKOĞLU, S., VAR, F., ÖCAL, SE., Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirlilik ve Giderilme Yöntemleri, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü 3. Ulusal Sempozyumu, Ankara, 1995 143-155.
- [111] FERGUSON, CR., Internal Combustion Engines, John Wiley & Sons Inc., Singapur, 1986.8,119.
- [112] MEHDİYEV, R., İçten Yanmalı Motorların Hesabı ve Geliştirilmesi, Ders Notları 1, İTÜ, İstanbul.
- [113] ZELDOVICH, Y., The Oxidation of Nitrogen in Combustion Explosions”, Acta Physicochemical USSR, Vol. 21,1946, 577-628.
- [114] TÜRK, C., Sabit Kaynaklardan Yayılan Azotoksitlerin Azaltılması ve Giderilmesi, Lisans Tezi, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Müh. Bölümü, 1998.16.
- [115] HAŞİMOĞLU, C., İÇİNGÜR, Y., Dizel Motorlarda Azot Oksit (NO_x) Kontrol Yöntemleri, Selçuk Teknik Online Dergisi, ISSN-1302-6178, Vol. 1, No:2, Konya, 2000.

- [116] CHUNG, SY., OH, SH., Hydrothermal stability of dealuminated mordenite type zeolite catalysts for the reduction of NO by C₃H₆ under lean-burn condition, *Catalysis Today*, 54, pp. 521–529, 1999.
- [117] ÇELİKTEK, İ., Türkiye’de Katalitik Dönüştürücü İhtiyacının Belirlenmesine Yönelik Bir Araştırma, Doktora Tezi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.
- [118] MISHIMA, H., HASHMOTO, K., Selective Catalytic Reduction of NO with NH₃ Over Natural Zeolites and its Application to Stationary Diesel Engine Exhaust, *Applied Catalysis B: Environmental*, 19, 1998, 119-126.
- [119] KALELİ, H., Engine Emissions and Poisoning Effect of Syntetic Oil’s Additives on Catalytic Convertor Using an Engine Dynamometer, *Industrial Lubrication and Tribology*, v.55, n.4, 2003, 162-177.
- [120] SPIGEL, L., SPICHER, U., Mixture Formation and Combustion in a Spark Ignition Engine with Direct Fuel Injection, SAE paper, 1992, 920521.
- [121] DİNLER, N., Benzin Motorlarında Yakıt Olarak LPG Kullanılması ve Katalitik Konvertör Uygulamasının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, sh. 9-91-93, 2001.
- [122] SORUŞBAY, C., GÖKTAN, AG., Motorlu taşıtlardan kaynaklanan çevre kirliliği ve kontrolü, İTÜ 1. Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Sempozyumu, İstanbul, 1993, 157- 166.
- [123] SAKAI, Y., MIYAZAKI H., MUKAI K., The Effect Combustion Chamber Shape on Nitrogen Oxides, SAE paper, 1973, 730154.
- [124] PISCHINGER, F., Entwicklungsrichtungen in der Motortechnik für 2001, 12. Internationales Wiener Motoren-symposiumi Wien, 1991.
- [125] FURUHAMA, S., TATEISHI, Y., Gases in Piston Top-Land Space of Gasoline Engine, Trans. SAEJ NO: 1972.
- [126] STOJEK, D., STIWOROK, A., Valve timing with variable overlap, ISATA, Vol.Paper, 1983, 82071.
- [127] HORIE, K., NISHIZAWA, K., Development of a Four Valve Lean Burn Engine with VTEC-Mechanism. 13.Wiener Motorensymposium, 1992.
- [128] HARA, S., KUMAGAI, Y., MATSUMATO, Y., Application of a Valve Lift and Timing Control System to a Automotive Engine, SAE Paper, 1989, 890681.

- [129] HATANO, K., IIDA, K., HIGASHI, H., MURATA, S., Development of a New Multi-Mode Variable Valve Timing Engine”, SAE Paper, 1993, 930873.
- [130] URATA, J., UMIYAMA, H., SHIMIZU, K., FUJIYOSHI, Y., SONO, H., FUKUO, K., A Study of Vehicle Quipped with Non-Throttling SI Engine with Early Intake Valve Closing Mechanism”, SAE Paper, 1993, 930820.
- [131] DİNLER, N., YÜCEL, N., Benzin ve LPG Kullanılarak İki Farklı Motorun Egzoz Emisyon Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, sh. 242-243, Ankara, 2002.
- [132] ISHIDA, M., CHEN, Z., An Analysis of the Added Water Effect of NO Formation in D.I. Diesel Engines, SAE Paper, 1994, 941691.
- [133] SAMEC, N., KEGL, B., DIBBLE, RW., Numerical and Experimental Study of Water/Oil Emulsified Fuel Combustion in a Diesel Engine, Fuel 81, 2002, 2035–44.
- [134] FERGUSON, CR., KIRKPATRICK, AT., Internal Combustion Engines Applied Thermosciences, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [135] SAFA, A., İçten Yanmalı Motorlarda Proses ve Emisyon Modellemesi, Doktora Tezi, Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [136] HOHENBERG, G., Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations," SAE Technical Paper, 1979, 790825.
- [137] GONCA, G., Investigation of The Effects of Steam Injection into the Supercharged Diesel Engine with Running Miller Cycle on Performance and Emissions, PhD Thesis Progress Report, 2011, Fen Bilimleri Enstitüsü, YTU, İstanbul.
- [138] OLİKARA, C., BORMAN, G., A Computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Applications to the Engines”, SAE Tech.Paper, 1975, 750468.
- [139] GONCA, G., ŞAHİN B., ÜST Y., PARLAK A., SAFA A., A Comparison of Steam Injected Diesel Engine and Miller Cycled Diesel Engine By Using Two Zone Combustion Model, 12. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 2012;16:115-25, Kocaeli, Türkiye.
- [140] BORU, B., AYHAN, V., PARLAK, A., Pistonlu Motorlarda Yakıt Püskürtme Oranının Bulanık Mantık ile Gerçek Zamanlı Olarak Kontrolü, 10. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Sakarya, Ekim, 2008.

- [141] BORU, B., ESKİKURT H.İ., PARLAK. A., A Computer Based Flexible Real Time Fuel Controller System Implement for Four-Cylinder Internal Combustion Engines, International Sustainable Development (ISSD), 2010.
- [142] SHEHATA, MS., Cylinder Pressure Performance Heat Release Specific Heats Ratio and Duration of Combustion for Spark Ignition Engine, Energy, Vol35, No.12, 4710-4725, December, 2010.
- [143] MORO, D., CAVINA, N., PONTI, F., In-Cylinder Pressure Reconstruction Based on Instantaneous Engine Speed Signal, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Paper no, 124, 2002.
- [144] GONCALVES, GSC., NEVES, BAF., SANTO, AVEE., BRQJO, FMP., CALADO. RA., Electronic Control of a Four Stroke Internal Combustion Engine, In Proceedings of the 6th WSEAS, International Conference on Power Systems, pp:267-272, 2006.
- [145] URTEKİN, L., CEYLAN, N., ÖZER, A., SALMAN, S., Motor Segmanı ile Silindir Gömleği Üzerine Seramik Kaplama Çalışmalarına Deneysel Bir Örnek, Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, 2002.
- [146] PARLAK, A., Aşırı Doldurmalı Seramik Kaplı Bir Dizel Motorunda Optimum Püskürtme Avansı ve Sıkıştırma Oranının Deneysel Olarak İncelenmesi, SAÜ, FBE, Doktora Tezi, 2000.
- [147] KASTNER, LJ., The Air box Method of Measuring Air Consumption, proc. I. Mich. E., s. 157, 1947.
- [148] PLINT, M., and MARTYR, A., Engine Testing Theory and Practice, Butterworth-Heinemann Ltd. Linarce House, Jordon Hill, Oxford, 1995.
- [149] WENTWORTH, JT., Combustion Science and Technology, 1971;4;97.
- [150] ÇELİK, MB., ÖZDALYAN, B., ALKAN, F., The Use of Pure Methanol as Fuel at High Compression Ratio in a Single Cylinder Gasoline Engine, Fuel 90(2011) 1591-1598.
- [151] ÇELİK, MB., Experimental Determination of Suitable Ethanol-Gasoline Blend Rate in High Compression Ratio for Gasoline Engine, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 396-404.

ÖZGEÇMİŞ

İdris CESUR, 02.07.1982 de Yozgat' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2000 yılında Sakarya Fatih Teknik Lisesi, Motor Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Otomotiv Öğretmenliğini 2005 yılında bitirdi. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek Lisans Öğrenimini 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Enstitü Ana Bilimde tamamladı. Aynı yıl SAÜ, FBE.' de Doktora Öğrenimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.