

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU ÖN PÜSKÜRTME
STRATEJİLERİNİN PERFORMANS VE EMİSYON
AÇISINDAN OPTİMİZASYONU

Murat GÜLER

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Programı

Danışman

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU ÖN PÜSKÜRTME
STRATEJİLERİNİN PERFORMANS VE EMİSYON
AÇISINDAN OPTİMİZASYONU**

Murat GÜLER tarafından hazırlanan tez çalışması 16.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özgen AKALIN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Orkun ÖZENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Dizel Motorlarda Çoklu Ön Püskürtme Stratejilerinin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Murat GÜLER



*Aileme,
Canım Eşime
ve
Kızıma*

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin ardından başladığım iş hayatında, çalıştığım içten yanmalı motorlar konusundaki bilgi birikimimi artırmak ve teorik olarak kendimi geliştirmek için çıktığım yolculukta, ülkemizin sayılı üniversitelerinden biri olan Yıldız Teknik Üniversitesi'nde doktora programına girmeme vesile olan Prof. Dr. Şeref Naci ENGİN'e ve tez danışmanım Prof. Dr. Muammer ÖZKAN'a öncelikli olarak teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam esnasında sahip oldukları tecrübe ve bilgi birikimini esirgemeyen ve oluşturduğumuz tartışma ortamlarıyla gelişimime katkı sunan TŪMOSAN Motor ve Traktör Sanayi A.Ş. firmasından Enishan ÖZCAN'a ve Cihan BÜYÜK'e, Ford OTOSAN firmasından Caner HARMAN'a ve İlter HAYIRSEVER'e, Bosch firmasından Özgöl GEDİKLİ'ye, AVL'den Sarper ÖZKAYNAK'a ve TŪBİTAK'tan Tolgahan KAYA'ya minnet duygularımı sunarım.

Çalışmamın dinamometre testlerini yaptığım ve 15 yıldır gururla çalışmakta olduğum TŪBİTAK RUTE Motor Mükemmeliyet Merkezi'ndeki iş arkadaşlarıma ve akademik çalışmalara verdikleri destekten ötürü yöneticilerime de ayrıca teşekkür ediyorum.

Tüm bu yolculuk boyunca manevi olarak beni destekleyen aileme, bunca yıl gösterdiği sabır ve verdiği motivasyon için eşim Vildan GÜLER'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Murat GÜLER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	17
1.3 Hipotez	18
2 İÇTEN YANMALI MOTORUN MODELLENMESİ	20
2.1 Motor Sistemleri	20
2.1.1 Simülasyon Modları	20
2.1.2 Supapların Modellenmesi	21
2.1.3 Portların Modellenmesi	22
2.1.4 Silindir İçindeki Akış	22
2.1.5 Silindir İçindeki Isı Transferi	23
2.1.6 Yakıtın Püskürtülmesi	24
2.1.7 Motor Sürtünmesi ve Yardımcı Yükler	25
2.2 Yanma ve Emisyonlar	27
2.2.1 Giriş ve Tanımlar	27
2.2.2 İki Bölge Yanma Metodolojisi	29
2.2.3 Görünür Isı Açığa Çıkma Metodolojisi	31
2.2.4 Öngörülü ve Öngörülü Olmayan Yanmanın Karşılaştırılması ..	32
2.2.5 Öngörülü Yanma Modelleri	34
2.2.6 Öngörülü Yanma Modellerinin Kalibrasyonu	35
2.2.7 Egzoz Emisyonları	36
2.3 Motor Modelinin Oluşturulması	38
2.3.1 Krank Sistemi	39

2.3.2	Silindir	42
2.3.3	Supap Bağlantısı (Emme Supapı için).....	46
2.3.4	Supap Bağlantısı (Egzoz Supapı için)	48
2.3.5	Emme Portu	49
2.3.6	Egzoz Portu	51
2.3.7	Emme Manifoldunun Modellenmesi	53
2.3.8	Egzoz Manifoldunun Modellenmesi.....	54
2.3.9	Çoklu Püskürtme Profili Bağlantısı	55
2.3.10	Ortam Sonlandırma.....	58
3	MOTOR TESTLERİ VE MODEL KALİBRASYONU	60
3.1	Deney Ekipmanlarının Özellikleri	60
3.1.1	Dinamometre	60
3.1.2	Yakıt Tüketimi Ölçüm Cihazı.....	61
3.1.3	Yakıt Şartlandırma Cihazı.....	62
3.1.4	Yanma Havası Şartlandırma Cihazı	62
3.1.5	Motor Yağı Şartlandırma Cihazı	63
3.1.6	Blow By Ölçüm Cihazı	63
3.1.7	Emme Havası Debisi Ölçüm Cihazı.....	64
3.1.8	Duman Ölçer	65
3.1.9	İs Ölçer ve Şartlandırma Ünitesi	65
3.1.10	Opaklık Ölçer	66
3.1.11	Egzoz Emisyonları Ölçüm Sistemi.....	66
3.1.12	Silindir İçi Basınç Ölçüm Sistemi	69
3.1.13	Test Sistemi Otomasyon Programı.....	70
3.2	Motor Mod Testleri ve Model Kalibrasyonu	71
3.3	Kısmi Yük Testleri ve Yanma Modeli Kalibrasyonu	78
4	MOTOR VE ÇOKLU ÖN PÜSKÜRTME PARAMETRELERİNİN PERFORMANS VE EMİSYONA ETKİLERİ	127
4.1	Parametre Etkilerinin İnceleneceği Motor Çalışma Noktalarının Belirlenmesi.....	127
4.2	Çoklu Ön Püskürtme ve Motor Çalışma Parametrelerinin Değişimi.....	131
4.2.1	1.Ön Püskürtmenin Miktarının Değişimi.....	132
4.2.2	1.Ön Püskürtmenin Açısının Değişimi.....	139
4.2.3	2.Ön Püskürtmenin Miktarının Değişimi.....	146

4.2.4	2.Ön Püskürtmenin Açısının Değişimi.....	153
4.3	Tüm Çoklu Ön Püskürtme Parametresi Değişimlerinde Aynı Sınır Koşullarının Kullanılması	160
4.4	Çoklu Ön Püskürtme Parametrelerinin Performans ve Emisyona Etkileri.....	168
4.4.1	1.Ön Püskürtme Miktarının Performans ve Emisyona Etkileri	168
4.4.2	1.Ön Püskürtme Açısının Performans ve Emisyona Etkileri...	170
4.4.3	2.Ön Püskürtme Miktarının Performans ve Emisyona Etkileri	172
4.4.4	2.Ön Püskürtme Açısının Performans ve Emisyona Etkileri...	174
5	DENEY MATRİSİ VE OPTİMİZASYON	176
5.1	Deney Matrisi Oluşturulması.....	176
5.2	Optimizasyon Çalışması	189
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	220
	KAYNAKÇA	223
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	227

SİMGE LİSTESİ

F_M	Ana Yanma Oranı
D_M	Ana Yanma Süresi
E_M	Ana Yanma Üssü
F_T	Art Yanma Oranı
D_T	Art Yanma Süresi
E_T	Art Yanma Üssü
S_i	Duyarlılık Değeri
$h_{f,i}$	Enjekte Edilen Yakıt Entalpisi
$m_{f,i}$	Enjekte Edilen Yakıt Kütlesi
C	FMEP Sabit Kısım
h_a	Hava Entalpisi
m_a	Hava Kütlesi
η_{eff}	İndike Verim
P_{max}	Maksimum Silindir Basıncı
$Speed_{mp}$	Ortalama Piston Hızı
$MPSF$	Ortalama Piston Hızı Faktörü
$MPSSF$	Ortalama Piston Hızının Karesi Faktörü
F_p	Ön Karışım Oranı
D_p	Ön Karışım Süresi
E_p	Ön Karışım Üssü
SOI	Püskürtme Başlangıcı
p	Silindir Basıncı
x_i	Standartlaştırılmış Faktörler
a_i	Standartlaştırılmış Regresyon Katsayıları
y	Standartlaştırılmış Yanıtlar
PF	Tepe Silindir Basıncı Faktörü
ID	Tutuşma Gecikmesi
WC_M	Vibe Ana Yanma Sabiti
WC_T	Vibe Art Yanma Sabiti
WC_p	Vibe Ön Karışım Sabiti
h_f	Yakıt Entalpisi
m_f	Yakıt Kütlesi
LHV_i	Yakıtın Alt Isıl Değeri
e_u	Yanmamış Bölge Enerjisi
V_u	Yanmamış Bölge Hacmi
Q_u	Yanmamış Bölge Isı Transfer Hızı
m_u	Yanmamış Bölge Kütlesi
e_b	Yanmış Bölge Enerjisi
V_b	Yanmış Bölge Hacmi
Q_b	Yanmış Bölge Isı Transfer Hızı
m_b	Yanmış Bölge Kütlesi
CE	Yanmış Yakıt Oranı

KISALTMA LİSTESİ

AHHR	Apparent Heat Release Rate / Görünür Isı Açığa Çıkış Hızı
BMEP / OFEB	Brake Mean Effective Pressure / Ortalama Fren Efektif Basıncı
BSFC / ÖYT	Brake Specific Fuel Consumption / Özgül Yakıt Tüketimi
CFD	Computational Fluid Dynamics / Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CLD	Chemiluminescence Detector
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
COV	Coefficient of Variation / Varyasyon Katsayısı
DI	Direct Injection / Doğrudan Enjeksiyon
DoE	Design of Experiment / Deney Matrisi
ECFM-3Z	3 Zones Extended Coherent Flame Model
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
FID	Flame Ionization Detector
FMEP	Friction Mean Effective Pressure / Sürtünme Ortalama Efektif Basıncı
FSN	Filter Smoke Number / Filtre Kurum Değeri
GDI	Gasoline Direct Injection / Doğrudan Benzin Enjeksiyonu
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HRR	Heat Release Rate
HSDI	High Speed Direct Injection / Yüksek Hızlı Doğrudan Enjeksiyon
IMEP / OİEB	Indicated Mean Effective Pressure / Ortalama İndike Efektif Basıncı
IRD	Infrared Detector
KMA	Krank Mili Açısı
LHV	Lower Heating Value / Alt Isıl Değer
LNT	Lean NO _x Trap
MFB50	Yakıtın 50% Miktarının Yandığı Krank Açısı
qMI1	Ana Püskürtme Miktarı
PhiMI1	Ana Püskürtme Avansı
NEDC	New European Driving Cycle / Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi
NO _x	Nitrik Oksit
NSGA-III	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
PFP / MSiB	Peak Firing Pressure / Maksimum Silindir İçi Basıncı
PhiMI1	Ana Püskürtme Açısı
PhiPi1	1.ön Püskürtme Açısı
PhiPi2	2.ön Püskürtme Açısı
qMI1	Ana Püskürtme Miktarı
qPI1	1.ön Püskürtme Miktarı
qPI2	2.ön Püskürtme Miktarı
PMD	Paramagnetic Detector
RMS	Root Mean Square / Ortalama Karekök

SCR	Selective Catalytic Reduction / Seçici Katalitik İndirgeme
TDC / ÜÖN	Top Dead Center / Üst Ölü Nokta
THC	Toplam Hidrokarbon
TPA	Three Pressure Analysis / Üç Basınç Analizi
VGT	Variable Geometry Turbine / Değişken Geometrilili Türbin



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	GT-Power kullanılarak oluşturulan dizel motor modeli.....	38
Şekil 2.2	Silindir ve krank ölçüleri.....	41
Şekil 2.3	Piston ölçüleri.....	45
Şekil 2.4	Modellenen pistondan alınan ölçümler.....	45
Şekil 2.5	Emme supapı kalkış eğrisi.....	47
Şekil 2.6	Emme supapı boşaltma katsayısı eğrisi.....	47
Şekil 2.7	Egzoz supapı kalkış eğrisi.....	49
Şekil 2.8	Egzoz supapı boşaltma katsayısı eğrisi.....	49
Şekil 2.9	Enjektör püskürtme haritası.....	57
Şekil 2.10	Püskürtme debisi eğrileri.....	57
Şekil 3.1	Motor Test Sistemi Şematiği.....	60
Şekil 3.2	1500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	73
Şekil 3.3	2000 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	73
Şekil 3.4	2250 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	74
Şekil 3.5	2500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	74
Şekil 3.6	2750 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	75
Şekil 3.7	3000 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	75
Şekil 3.8	3500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	76
Şekil 3.9	3600 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	76
Şekil 3.10	4500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları.....	77
Şekil 3.11	Emme hava debisi deney ve simülasyon sonuçları.....	77
Şekil 3.12	Nokta#1 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	84
Şekil 3.13	Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	84
Şekil 3.14	Nokta#3 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	85
Şekil 3.15	Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	85
Şekil 3.16	Nokta#5 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	86
Şekil 3.17	Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	86
Şekil 3.18	Nokta#7 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	87
Şekil 3.19	Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	87
Şekil 3.20	Nokta#9 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	88
Şekil 3.21	Nokta#1 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	88
Şekil 3.22	Nokta#2 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	89
Şekil 3.23	Nokta#3 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	89
Şekil 3.24	Nokta#4 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	90
Şekil 3.25	Nokta#5 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	90
Şekil 3.26	Nokta#6 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	91
Şekil 3.27	Nokta#7 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	91
Şekil 3.28	Nokta#8 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	92
Şekil 3.29	Nokta#9 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.....	92
Şekil 3.30	Ortalama indike efektif basınç deney ve simülasyon sonuçları.....	93
Şekil 3.31	Maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	93
Şekil 3.32	Fren torku deney ve simülasyon sonuçları.....	94
Şekil 3.33	Fren gücü deney ve simülasyon sonuçları.....	94
Şekil 3.34	Özgül yakıt tüketimi deney ve simülasyon sonuçları.....	95
Şekil 3.35	Manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.....	95
Şekil 3.36	Ortalama türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.....	96

Şekil 3.37	Motoru giren ortalama taze hava debisi deney ve simülasyon sonuçları.....	96
Şekil 3.38	Motoru giren ortalama iş gazı debisi deney ve simülasyon sonuçları.....	97
Şekil 3.39	Girişim hızı çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi.	98
Şekil 3.40	Girişim hızı çarpanı değerinin ısı açığa çıkış hızına etkisi.	99
Şekil 3.41	Girişim hızı çarpanı değerinin silindir içi sıcaklığa etkisi.....	99
Şekil 3.42	Tutuşma gecikmesi çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi.	100
Şekil 3.43	Tutuşma gecikmesi çarpanı değerinin ısı açığa çıkış hızına etkisi.....	101
Şekil 3.44	Tutuşma gecikmesi çarpanı değerinin silindir içi sıcaklığa etkisi.....	101
Şekil 3.45	Ön karışımli yanma hızı çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi.....	102
Şekil 3.46	Ön karışımli yanma hızı çarpanı değerinin ısı açığa çıkış hızına etkisi.	103
Şekil 3.47	Ön karışımli yanma hızı çarpanı değerinin silindir içi sıcaklığa etkisi.....	103
Şekil 3.48	Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi. .	104
Şekil 3.49	Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değerinin ısı açığa çıkış hızına etkisi.	105
Şekil 3.50	Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değerinin silindir içi sıcaklığa etkisi.	105
Şekil 3.51	Nokta#1 ve Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	106
Şekil 3.52	Nokta#3 ve Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	106
Şekil 3.53	Nokta#5 ve Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 3.54	Nokta#7 ve Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 3.55	Nokta#9 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.	108
Şekil 3.56	Tüm noktaların ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.	108
Şekil 3.57	Tüm noktaların silindir içi sıcaklık deney ve simülasyon sonuçları.	109
Şekil 3.58	Tüm noktaların ortalama indike efektif basınç ve maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.	109
Şekil 3.59	Tüm noktaların fren torku ve fren gücü deney ve simülasyon sonuçları...	110
Şekil 3.60	Tüm noktaların özgül yakıt tüketimi ve manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.....	110
Şekil 3.61	Tüm noktaların motora giren taze hava debisi ve türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.	111
Şekil 3.62	Tüm noktaların toplam iş gazı debisi ve igr çıkış sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.....	111
Şekil 3.63	Tüm noktaların NO _x ve is konsantrasyonları deney ve simülasyon sonuçları.	112
Şekil 3.64	Tüm noktaların maksimum basınç artış hızı ve motor gürültüsü deney ve simülasyon sonuçları.....	112
Şekil 3.65	Nokta#1 ve Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	118
Şekil 3.66	Nokta#3 ve Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	118
Şekil 3.67	Nokta#5 ve Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	119
Şekil 3.68	Nokta#7 ve Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	119
Şekil 3.69	Nokta#9 ve Nokta#10 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.....	120
Şekil 3.70	Nokta#11 ve Nokta#12 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları...	120
Şekil 3.71	Tüm noktaların ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları.	121
Şekil 3.72	Tüm noktaların ortalama indike efektif basınç ve maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları.	121
Şekil 3.73	Tüm noktaların fren torku ve fren gücü deney ve simülasyon sonuçları...	122
Şekil 3.74	Tüm noktaların özgül yakıt tüketimi ve manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.....	122

Şekil 3.75	Tüm noktaların motora giren taze hava debisi ve türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.	123
Şekil 3.76	Tüm noktaların toplam iş gazı debisi ve egr çıkış sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları.	123
Şekil 3.77	Tüm noktaların nox ve is konsantrasyonları deney ve simülasyon sonuçları.	124
Şekil 3.78	Tüm noktaların maksimum basınç artış hızı ve motor gürültüsü deney ve simülasyon sonuçları.	124
Şekil 4.1	NEDC çevrimi boyunca motor devri grafiği.	127
Şekil 4.2	NEDC çevrimi boyunca motor indike torku grafiği.	128
Şekil 4.3	Motorun NEDC çevrimindeki çalışma modları.	128
Şekil 4.4	Motorun NEDC çevrimi boyunca çalışma noktaları haritası.	129
Şekil 4.5	Motorun sabit hız çalışma noktaları.	129
Şekil 4.6	Sabit hız çalışma noktalarının histogram analizi.	130
Şekil 4.7	Histogram sonuçlarına göre ilk 10 noktanın sabit hız çalışma noktaları içindeki yerleri.	131
Şekil 4.8	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki silindir basıncı.	133
Şekil 4.9	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki ısı açığa çıkış hızı.	133
Şekil 4.10	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki silindir sıcaklığı.	134
Şekil 4.11	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki püskürtme debileri.	134
Şekil 4.12	1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları.	135
Şekil 4.13	1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları.	135
Şekil 4.14	1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları.	136
Şekil 4.15	1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO _x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO _x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları. ...	136
Şekil 4.16	%27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	137
Şekil 4.17	%17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	137
Şekil 4.18	%27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	138

Şekil 4.19	%17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	138
Şekil 4.20	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki silindir basıncı.	140
Şekil 4.21	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki ısı açığa çıkış hızı.	140
Şekil 4.22	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki silindir sıcaklığı.	141
Şekil 4.23	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki püskürtme debileri.	141
Şekil 4.24	1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları.	142
Şekil 4.25	1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları.	142
Şekil 4.26	1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları.	143
Şekil 4.27	1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO _x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO _x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları. ...	143
Şekil 4.28	%27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	144
Şekil 4.29	%17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	144
Şekil 4.30	%27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	145
Şekil 4.31	%17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	145
Şekil 4.32	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki silindir basıncı.	147
Şekil 4.33	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki ısı açığa çıkış hızı.	147
Şekil 4.34	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki silindir sıcaklığı.	148
Şekil 4.35	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki püskürtme debileri.	148
Şekil 4.36	2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları.	149

Şekil 4.37	2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları.	149
Şekil 4.38	2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları.....	150
Şekil 4.39	2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO _x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO _x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları. ...	150
Şekil 4.40	%27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	151
Şekil 4.41	%17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	151
Şekil 4.42	%27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	152
Şekil 4.43	%17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri.	152
Şekil 4.44	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki silindir basıncı	154
Şekil 4.45	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki ısı açığa çıkış hızı	154
Şekil 4.46	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki silindir sıcaklığı	155
Şekil 4.47	EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki püskürtme debileri.....	155
Şekil 4.48	2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları.....	156
Şekil 4.49	2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları	156
Şekil 4.50	2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları.....	157
Şekil 4.51	2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO _x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO _x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları	157
Şekil 4.52	%27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri	158

Şekil 4.53	%17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri	158
Şekil 4.54	%27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri	159
Şekil 4.55	%17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri	159
Şekil 4.56	Aynı sınır koşullarının kullanımının sonuçlara etkisi.	161
Şekil 4.57	OİEB sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması.....	163
Şekil 4.58	MSİB sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması. ...	164
Şekil 4.59	MFB50 sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması.	165
Şekil 4.60	ÖYT sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması.....	165
Şekil 4.61	NO _x sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması.	166
Şekil 4.62	İs sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması.....	167
Şekil 4.63	1.ön püskürtme miktarının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı.	168
Şekil 4.64	1.ön püskürtme açısının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı.	170
Şekil 4.65	2.ön püskürtme miktarının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı.	172
Şekil 4.66	2.ön püskürtme açısının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı.	174
Şekil 5.1	Faktör duyarlılık analizi sonuçları.	177
Şekil 5.2	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin OİEB üzerindeki etkisi.....	178
Şekil 5.3	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MSİB üzerindeki etkisi.	179
Şekil 5.4	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MFB50 üzerindeki etkisi.....	179
Şekil 5.5	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki etkisi.	180
Şekil 5.6	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin ÖYT üzerindeki etkisi.	180
Şekil 5.7	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO _x emisyonu üzerindeki etkileri. ...	181
Şekil 5.8	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin is emisyonu üzerindeki etkileri.	182
Şekil 5.9	Spearman korelasyon katsayıları tablosu.....	182
Şekil 5.10	Durum sayısı artırılmış bağıl duyarlılık analizi sonuçları.	185
Şekil 5.11	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin OİEB üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	185
Şekil 5.12	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MSİB üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	186
Şekil 5.13	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MFB50 üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	186
Şekil 5.14	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	187
Şekil 5.15	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin özgül yakıt tüketimi üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	187
Şekil 5.16	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO _x emisyonu üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	188
Şekil 5.17	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin is emisyonu üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması.	188
Şekil 5.18	426 durum ile elde edilen spearman korelasyon katsayıları tablosu.	189

Şekil 5.19	Fren gücü için hata fonksiyonu ve NO _x emisyonu grafiği.	194
Şekil 5.20	Pareto tasarımlarının fren gücü hata fonksiyonu - NO _x emisyonu sonuçları.	206
Şekil 5.21	Optimizasyonda uygulanan 1.ön püskürtme miktarı değişimleri.	209
Şekil 5.22	Optimizasyonda uygulanan 1.ön püskürtme açısı değişimleri.	209
Şekil 5.23	Optimizasyonda uygulanan 2.ön püskürtme miktarı değişimleri.	210
Şekil 5.24	Optimizasyonda uygulanan 2.ön püskürtme açısı değişimleri.	211
Şekil 5.25	Optimizasyonda her tasarım setinde elde edilen NO _x emisyonu değerleri.	211
Şekil 5.26	Optimizasyonda her tasarım setinde elde edilen fren gücü değerleri.	212
Şekil 5.27	NO _x emisyonu değerlerinin çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimi ile ilişkisi.	213
Şekil 5.28	Fren gücü değerlerinin çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimi ile ilişkisi.	214
Şekil 5.29	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO _x emisyonu üzerindeki bağıl duyarlılık analizi.	215
Şekil 5.30	Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki bağıl duyarlılık analizi.	216
Şekil 5.31	Baz durum ve optimum durumda yapılan püskürtme debi grafikleri.	217
Şekil 5.32	Baz durum ve optimum durumda elde edilen silindir içi basınç grafikleri.	217
Şekil 5.33	Baz durum ve optimum durumda elde edilen ısı açığa çıkış hızı grafikleri.	218
Şekil 5.34	Baz durum ve optimum durumda elde edilen yanma hızı grafikleri.	219
Şekil 5.35	Baz durum ve optimum durumda elde edilen yanan yakıt miktarı grafikleri.	219

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Krank sistemi parametreleri	39
Tablo 2.2	Sürtünme ortalama efektif basıncının elde edilmesi	41
Tablo 2.3	Silindir geometrisi şablonu parametreleri	41
Tablo 2.4	Akışkan başlangıç şartı şablonu parametreleri.....	42
Tablo 2.5	Silindir parametreleri	42
Tablo 2.6	Akışkan başlangıç şartı şablonu parametreleri.....	43
Tablo 2.7	Silindir duvar sıcaklığı şablonu parametreleri	43
Tablo 2.8	Silindir içi ısı transferi şablonu parametreleri.....	44
Tablo 2.9	Silindir içi akış şablonu parametreleri	44
Tablo 2.10	Piston çanağı şablonu parametreleri	45
Tablo 2.11	Dizel çoklu püskürtme yanma şablonu parametreleri.....	46
Tablo 2.12	Supap bağlantısı (emme supapı için) parametreleri	46
Tablo 2.13	Supap bağlantısı (egzoz supapı için) parametreleri.....	48
Tablo 2.14	Emme portunun modellenmesi aşamaları	50
Tablo 2.15	Emme portu parametreleri	50
Tablo 2.16	Egzoz portunun modellenme aşamaları	51
Tablo 2.17	Egzoz portu dirsek kısmı parametreleri.....	51
Tablo 2.18	Egzoz portu düz boru kısmı parametreleri	52
Tablo 2.19	Emme manifoldu duvar sıcaklığı çözücüsü parametreleri.....	53
Tablo 2.20	Emme manifoldunun modellenmesi aşamaları.....	54
Tablo 2.21	Egzoz manifoldu duvar sıcaklığı çözücüsü parametreleri	54
Tablo 2.22	Egzoz manifoldunun modellenmesi aşamaları	55
Tablo 2.23	Çoklu püskürtme profili bağlantısı parametreleri	56
Tablo 2.24	Dolgu ortam sonlandırma parametreleri	58
Tablo 2.25	Egzoz ortam sonlandırma parametreleri	58
Tablo 3.1	AVL DynoSpirit 370/4.5-8 FK özellikleri.	61
Tablo 3.2	Yakıt tüketimi ölçüm cihazı özellikleri.	61
Tablo 3.3	Yakıt şartlandırma cihazı özellikleri.	62
Tablo 3.4	Yanma havası şartlandırma cihazı özellikleri.....	63
Tablo 3.5	Motor yağı şartlandırma cihazı özellikleri.	63
Tablo 3.6	Blow by ölçüm cihazı özellikleri.....	64
Tablo 3.7	Emme havası debisi ölçüm cihazı özellikleri.....	64
Tablo 3.8	Duman ölçer özellikleri.....	65
Tablo 3.9	İs ölçer ve şartlandırma ünitesi özellikleri.	65
Tablo 3.10	Opaklık ölçer özellikleri.....	66
Tablo 3.11	Egzoz emisyonları ölçüm sistemi özellikleri.	68
Tablo 3.12	Silindir içi basınç ölçüm sistemi özellikleri.....	70
Tablo 3.13	Motor mod simülasyon parametreleri.	72
Tablo 3.14	Kısmi yük çalışma noktalarındaki motor çalışma parametrelerinin değişimi.	79
Tablo 3.15	Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli motor çalışma parametreleri.	80
Tablo 3.16	Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli deney ölçüm sonuçları.	82
Tablo 3.17	DIPulse parametreleri kalibrasyon deney matrisi aralıkları.....	98
Tablo 3.18	Girişim hızı çarpanı değişim değerleri.....	98
Tablo 3.19	Tutuşma gecikmesi çarpanı değişim değerleri.....	100
Tablo 3.20	Ön karışımli yanma hızı çarpanı değişim değerleri.....	102

Tablo 3.21	Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değişim değerleri.....	104
Tablo 3.22	Kontrol amaçlı koşulan deney noktalarındaki motor çalışma parametreleri.	114
Tablo 3.23	Kontrol amaçlı koşulan noktalardaki deney ölçüm sonuçları.	116
Tablo 4.1	Motorun çalışma modlarındaki süreleri ve yüzdeleri.	128
Tablo 4.2	Sabit hız noktalarının histogram analizi sonuçları.	130
Tablo 4.3	Çoklu ön püskürtme ve motor çalışma parametrelerinin değişimi.	132
Tablo 4.4	Çoklu ön püskürtme parametreleri değişimlerinde kullanılan değişken sınır şartları değerleri.	160
Tablo 4.5	1.ön püskürtme miktarı değişimi için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması.....	161
Tablo 4.6	2.ön püskürtme miktarı değişimi için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması.....	162
Tablo 4.7	1.ön püskürtme açısı için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması.....	162
Tablo 4.8	2.ön püskürtme açısı için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması.....	163
Tablo 4.9	1.ön püskürtme miktarı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları.	169
Tablo 4.10	1.ön püskürtme açısı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları.	171
Tablo 4.11	2.ön püskürtme miktarı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları.	173
Tablo 4.12	2.ön püskürtme açısı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları.	175
Tablo 5.1	Deney matrisi çalışmasında kullanılan parametreler ve değişimleri.	176
Tablo 5.2	Yapılan 2. deney matrisi çalışması değişim aralıkları.....	184
Tablo 5.3	Araştırma alanı faktörleri ve limitleri.	190
Tablo 5.4	Baz durum çoklu ön püskürtme parametreleri ve çıktı sonuçları.	191
Tablo 5.5	Çoklu hedefli optimizasyon parametreleri.....	191
Tablo 5.6	Faktör sayısı ve önerilen popülasyon boyutu.	193
Tablo 5.7	Genetik algoritma çalışma parametreleri.....	193
Tablo 5.8	Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar.....	195
Tablo 5.9	Pareto tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar.....	207
Tablo 5.10	Optimizasyon öncesi ve sonrasında elde edilen parametre setleri ve sonuçları.....	208
Tablo 5.11	NO _x emisyonu üzerinde optimizasyon ve deney matrisi ile elde edilen duyarlılık değerleri.	215
Tablo 5.12	Fren gücü üzerinde optimizasyon ve deney matrisi ile elde edilen duyarlılık değerleri.	216
Tablo 5.13	Baz durum ile optimum durumun karşılaştırılması.	216

Dizel Motorlarda Çoklu Ön Püskürtme Stratejilerinin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu

Murat GÜLER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Dizel motorlarda çoklu püskürtme veya bölünmüş püskürtme stratejileri giderek ağırlaşan emisyon standartlarına uyum sağlanması açısından oldukça büyük potansiyele sahiptir. Bu tip stratejiler hem emisyon hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmakta hem de motor gürültüsünü azaltarak sürüş konforuna da katkı sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında da iki ön püskürtme ve bir ana püskürtmenin uygulandığı stratejilerin motor performansı ve emisyonları açısından optimizasyonunda kullanılmak üzere bir motor modeli oluşturulması ve oluşturulan model ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Termodinamik motor modelinin oluşturulması için GT-Suite programı kullanılmıştır. Öncelikle hava yolunun kalibrasyonu gerçekleştirilen motor modelinde daha sonra kullanılan öngörülü yanma modeli tek bir noktada kalibre edilmiş ve diğer tüm işletme koşullarında aynı yanma modeli kullanılarak simülasyon sonuçları valide edilmiştir.

Çoklu ön püskürtme parametrelerindeki değişimlerin motor performansına ve emisyonlara etkileri termodinamik model ile yapılan simülasyonlar ile ortaya koyulmuş ve sebepleri irdelenmiştir. Yapılan bağıl duyarlılık analizi ve Spearman korelasyon katsayıları analizleri ile performans ve emisyon değerleri üzerinde en etkili parametre 2. ön püskürtme miktarı olurken en az etkili parametre ise 2. ön püskürtme açısı olmuştur. Oluşturulan termodinamik model, seçilen bir işletme şartında çoklu ön püskürtme parametrelerinin optimizasyonu için kullanılmış ve genetik algoritmanın kullanıldığı optimizasyon çalışmasında fren gücü korunurken NO_x emisyonlarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Optimum olarak bulunan çoklu ön püskürtme parametreleri ile NO_x emisyonunda 25% oranında azalma elde edilirken, fren gücü 0,7% oranında artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu püskürtme, motor modelleme, NO_x emisyonlarının azaltılması, doğrudan püskürtmeli dizel motor, genetik algoritma

Performance and Emission Optimization of Multiple Pilot Injection Strategies in Diesel Engines

Murat GÜLER

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Multiple injection or split injection strategies in diesel engines have great potential to comply with increasingly stringent emission standards. Such strategies both facilitate the achievement of emission targets and contribute to driving comfort by reducing engine noise. In this thesis, it is aimed to create an engine model to be used in the optimization of the strategies in which two pilot injections and one main injection are applied in terms of engine performance and emissions and to carry out an optimization study with the created model.

GT-Suite software was used to create the thermodynamic engine model. First of all, the airpath of the engine was calibrated then the predictive combustion model used in the engine model was calibrated at a single point and the simulation results were validated using the same combustion model in all other operating conditions.

The effects of changes in multiple pilot injection parameters on engine performance and emissions have been demonstrated by simulations made with a

thermodynamic model, and the reasons have been examined. With the relative sensitivity analysis and Spearman correlation coefficient analysis, the most effective parameter on performance and emission values was the 2nd pilot injection quantity, while the least effective parameter was the 2nd pilot injection timing. The created thermodynamic model was used for the optimization of multiple pilot injection parameters at a selected operating point, and in the optimization study using genetic algorithm, it was aimed to minimize NO_x emissions while maintaining brake power at that point. With the optimum multiple pilot injection parameters, a 25% reduction in NO_x emission was achieved, while the brake power increased by 0,7%.

Keywords: Multiple injection, engine modeling, reduction of NO_x emissions, direct injection diesel engine, genetic algorithm

1.1 Literatür Özeti

Giderek ağırlaşan emisyon regülasyonları, araç üreticilerini daha yeni teknolojiler geliştirmeye ve daha fazla ek sistemler kullanmaya zorlamıştır. Avrupa'da Eylül 2014'te yürürlüğe giren ve Ocak 2020'de Euro 6d şeklinde güncellenen emisyon regülasyonu ile dizel motorlarda özellikle NO_x , partikül ağırlığı ve partikül sayısı emisyonlarına, benzinli motorlarda ise partikül sayısı emisyonuna çok düşük limitler getirilmiştir [1]. Bu kirleticilerdeki kısıtlamalar, 2025 yılında yürürlüğe girmesi muhtemel olan Euro 7 standartları ile daha da zorlaşacak ve özellikle CO_2 emisyonlarının azaltılmasını hedefleyecektir [2]. ICCT tarafından yapılan bir modelleme çalışmasında, Euro 7 NO_x emisyonu limitleri oldukça zorlaştırmış ve gerçek yol sürüş şartlarında filo ortalamasını, binek araçlar için 15 mg/km, hafif ticari araçlar için ise 23 mg/km olarak tanımlamıştır. NO_x emisyonlarının önümüzdeki 30 yıl boyunca kademeli olarak 2020 seviyelerine göre binek araçlar için 88%, ağır ticari araçlar için ise 82% azalacağı öngörülmektedir [3]. İnsan sağlığı ve çevre açısından en zararlı kirleticiler olarak görülen NO_x ve partikül emisyonlarının azaltılmasına yönelik geliştirilen teknolojiler, hem silindir içerisinde gelişen yanma olayına etki edilmesi hem de yanmış gazların silindirden çıktıktan sonra kimyasal işlemlere tabi tutulması yönünde olmuştur. Egzoz gazının belirli oranlarda tekrar silindir içine gönderilmesine dayanan EGR yöntemi ve silindir içerisindeki maksimum yanma sıcaklıklarını düşüren ön püskürtme kullanımı yanma olayını etkilerken, LNT (Lean- NO_x trap), SCR (Selective Catalytic Reduction) yöntemleri de yanmış egzoz gazlarına etki edilerek NO_x emisyonunun azaltılmasını sağlamaktadır. Bir motor çevriminde çoklu püskürtme uygulanması, homojen bir yakıt ve hava karışımının oluşturulmasını sağlayarak emisyonlarının azaltılmasına, silindir içi basınç artış hızının düşürülerek NO_x emisyonlarının ve motor gürültüsünün azaltılmasına katkı sağlamıştır. Bu avantajlara ek olarak NO_x ile is arasındaki ve NO_x ile özgül yakıt tüketimi arasındaki ödünleşmelerin kabul edilebilir bir aralığa indirgenmesine ve bu

esnada fren termal veriminin korunmasını veya artırılmasını mümkün kılmıştır [4] [5] [6]. Gelişen enjektör teknolojileri ve püskürtme sistemleri, daha yüksek püskürtme basınçları ve çok daha hızlı açılma ve kapanma süreleri ile birbirine çok yakın küçük püskürtmelerin yapılabilmesi de sağlanmıştır [7].

Tiegang Fang vd. [8], tek silindirli HSDI (High Speed Direct Injection) dizel optik araştırma motorunda, çoklu püskürtme stratejisi kullanılarak, püskürtme açısı ve püskürtme basınçlarının yanma üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada 70° ve 150° uç açısına sahip iki farklı enjektör kullanılmıştır. Çalışma 1500 d/d motor devrinde, ilk püskürtme -40° KMA (Krank Mili Açısı) püskürtme avansı ile ve ikinci püskürtme 5 bar OİEB (Ortalama İndike Efektif Basınç) sağlayacak kadar -8° KMA püskürtme avansı ile yapılmış, 600 ve 1000 bar ray basınçları test edilmiştir. Sonuç olarak, 150° uç açısına sahip enjektör ile ve daha yüksek püskürtme basınçlarında daha az is oluşumu ile PCCI (Premixed Charge Compression Ignition) yanmaya benzeyen daha homojen bir alev elde edilmiştir. 70° uç açısına sahip enjektör ile silindir duvarlarında oluşan yakıt filminin oluşturduğu zengin karışım bölgeleri sebebiyle daha düşük NO_x emisyonları oluşmuştur. Her iki püskürtme açısı için de, püskürtme basıncının artırılması NO_x emisyonlarını yükseltmiştir.

Ming Zheng vd. [9], yaptığı çalışmada çoklu püskürtme stratejileri kullanılarak homojenliğin artırılması ve bunun düşük ve kısmi yüklerde düşük NO_x ve is oluşumuna katkısını incelemiştir. Homojenliğin sağlanması için çevrim başına her bir silindire 8 püskürtmeye kadar çıkmıştır. Bu çalışma ile HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) motorda kullanılabilecek minimum HC ve CO oluşumunu sağlayan çoklu püskürtme stratejilerinin belirlenmesi de hedeflenmiştir. Çalışma 4 silindirli 4 stroklu 2,0 L Ford Duratorq Puma Diesel motorda gerçekleştirilmiştir. Düşük yükteki HCCI modunda yapılan testlerde, 1200 bar ray basıncı, 1200 d/d, 3 bar OİEB, 0% EGR (Exhaust Gas Recirculation), 24°C ve 1 bar (mutlak) T_{giriş} ve P_{giriş} şartlarında 260° KMA'dan başlayarak 10° KMA aralıklarla 7 adet püskürtme ve 350° KMA'da 8. püskürtme yapılmıştır. Daha sonra ise 240° KMA'dan başlayarak 5° KMA aralıklarla 7 adet püskürtme ve 330° KMA'da 8. püskürtme yapılmıştır. Kısmi yükteki HCCI modunda ise 260° ve 288° KMA'ında 2 adet erken püskürtme ve son püskürtme 335° KMA'ında yapılmıştır. Sırasıyla 45%, 55% ve 61% EGR kullanılmıştır. HCCI modunda yapılan geç püskürtmeli

testlerde 1450 d/d motor devrinde, 70 kPa dolgu basıncı ile, 50% EGR kullanılarak, 4 püskürtme 315°, 325°, 335° ve 360° KMA'nda ve ilk 3 püskürtme 320 μ s, son püskürtme 400 μ s yapılmıştır. Sonuç olarak; düşük yükteki HCCI modu ultra düşük NO_x ve is emisyonu sağlayamamıştır. Çünkü homojen bir karışım oluşturmak için silindir içine gönderilen yakıtın miktarının çok olmasına rağmen son püskürtme yapıldığında neredeyse sıfır tutuşma gecikmesiyle geç fakir homojen karışım oluşumuna vakit kalmamıştır ve NO_x oluşumu normal strateji ile benzer olmuştur. Bu oluşumun sağlanması için son püskürtmenin avansı artırılmış ve miktarı azaltılmıştır. Bu durumda NO_x azalımı sağlanmıştır. Böylece tüm test noktalarında 12 ppm civarında NO_x ve 1 FSN civarında is elde edilmiştir ve karışım oluşumu için de süre kalmıştır. 45% EGR'li durumda yakıt ÜÖN'dan (Üst Ölü Nokta) oldukça önce kendi kendine tutuşmuştur. 340° KMA'nda yanma başladığı için yeterince karışım sağlanmamış ve yüksek is oluşmuştur. 55% EGR ile yanmanın başlangıcı geciktirilmiş ve homojen karışımın oluşumuna zaman tanınmıştır. EGR'nin artırılması is oluşumuna zıt etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Oksijen konsantrasyonunun azalması isin artmasına, karışım oluşumu için yeterli zaman olması ise olmaktadır. Burada yeterli zamanın olması oksijen azlığını kompanse etmiş ve is azalmıştır. Ayrıca EGR'nin artırılması ile yanma fazı üst ölü noktaya yaklaştırılarak sıkıştırma işi azaltılmıştır. EGR 61%'e artırıldığında hem emisyonda hem de performans karakteristiğinde iyileşme olmuştur. Yanma fazı daha da ertelenmiş ve maksimum HRR (Heat Release Rate) ÜÖN'dan sonra oluşmuştur. Fakat bu durumda HC 100 ppm'den 5000 ppm'e yükselmiştir. Kullanılabilir oksijen oranını artırarak CO'nun azaltılmasını sağlamak için dolgu basıncı 50 kPa'dan 75 kPa'a yükseltilmiştir. CO'nun azaltılması için ayrıca geç püskürtme stratejisi uygulanmış ve HCCI yanmada eksik yanma sonucu oluşan CO yok edilmiştir. NO_x emisyonu, HCCI geç püskürtme modunda, sadece ana püskürtmede oluşan kadar oluşmuş ve artan yüklerle artmamıştır. Burada ön püskürtmelerin geç yanma üzerinde bir iç EGR etkisi yaptığı söylenebilir. CO emisyonu HCCI geç püskürtme modunda sadece HCCI moda göre çok daha düşüktür. Is emisyonu ise HCCI geç püskürtme modunda 2,5 FSN olmuştur.

Su Han Park vd. [10], biodizel yakıtının çoklu püskürtme stratejisindeki yanma ve emisyon karakteristikleri ile sprey karakteristiklerini incelemiştir. Tek silindirli

doğal emişli doğrudan püskürtmeli dizel motorda gerçekleştirilmiş olan çalışmadaki testler sprej demetinin çıkışı ile ilgili inceleme için tek püskürtmede 60 MPa ve 120 MPa ray basınçlarında, 10 mg yakıt, ÜÖN'da, -10° ve -20° KMA'nda, 1400 d/d motor devrinde, çoklu püskürtmede ise 120 MPa ray basıncında, 3 mg+7 mg ve 5 mg+5 mg püskürtme miktarlarıyla, ilk püskürtme -30°, -20° ve -10° KMA'nda ve ikinci püskürtme ÜÖN'da olacak şekilde 1400 d/d motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Spreyin silindir içindeki hareketinin incelenmesi için 120 MPa ray basıncında, tek püskürtme stratejisi ile ve ÜÖN'da, -10° ve -25° KMA'nda yapılan püskürtmeler ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, biodizelin -25° KMA'nda püskürtülmesi ile sprej piston çanağının kenarını hedef almış ve bu sebeple dağılarak oyuk ve boşluklara akmıştır. -30° KMA'nda yapılan tek püskürtmede silindir basıncı ve HRR önemli oranda düşmüştür. Bu durumda püskürtme yapılan sprejin büyük bir kısmı silindir içindeki boşluklara (segman boşlukları, piston silindir boşluğu, enjektör dış boşlukları) dolmuş ve OİEB düşüş göstermiştir. Eksik yanma sebebiyle de is, HC ve CO emisyonları yükselmiştir. Çoklu püskürtme durumları tek püskürtmeden daha yüksek OİEB ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte ön püskürtmede daha az püskürtme yapılan çoklu püskürtme durumunda da daha yüksek OİEB elde edilmiştir. Bunun nedeni ikinci püskürtmenin yanma süresinin daha uzun sürmesi olmuştur. Daha yüksek OİEB'ye sebep olan daha uzun yanma süresi genişleme strokunda elde edilen işin de daha çok olmasına neden olmuştur. Egzoz emisyonları açısından, çoklu püskürtme modunda püskürtme aralıklarının kısılması is, HC ve CO emisyonlarını azaltırken, NO_x emisyonlarını yükseltmiştir.

Mohammad Reza Herfatmanesh vd. [11], ön ve ana püskürtmenin iki eşit miktarda ve farklı miktarlarda yapıldığı durumlardaki, karışım oluşumu, yanma ve emisyonları incelemiştir. Tek silindirli HSDI dizel optik araştırma motorunda yapılan çalışmada 1500 d/d'de iki kademeli püskürtme, püskürtme dalga genişlikleri 50/50% alınarak, değişken bekleme zamanları ile kısmi yük çalışma koşullarında test edilmiştir. Birinci püskürtme -25°, -20°, -15° ve -10° KMA'nda, ikinci püskürtme ise hep ÜÖN'da yapılmıştır. Ön ve ana püskürtmeler eşit yakıt miktarı verecek şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra ise ikinci püskürtmenin enerjilenme süreleri değiştirilerek ve aynı püskürtme ve bekleme zamanları

kullanılarak testler yapılmıştır. İki aşamalı püskürtme ile tek aşamalı püskürtmeye göre NO_x ve is emisyonlarında anlık azalma görülmüştür. Ancak is emisyonlarında yanmakta olan bölgeye yapılan ikinci püskürtme ve bunun miktarının artması is oksidasyonunu azaltmış ve is emisyonlarını artırmıştır.

Muammer Özkan vd. [12], 4 silindirli Ford 1,8 L dizel motorunda, termal ve ekserjetik verimleri, soğutma kayıpları ve ekserjiyi, ara soğutucu kayıpları ve ekserjiyi, motor bloğu ısı kayıpları ve ekserjiyi deneysel sonuçlardan hesaplamıştır. NO_x düşüşünü açıklamak için soğutma ve egzoz kayıpları, ısı yayılım hızı ve yanma sıcaklıkları Boost programı kullanılarak hesaplanmıştır. Testlerde manifold basıncı VGT (Variable Geometry Turbine) ile aynı tutulmuştur. Motor üç farklı püskürtme stratejisi ile çalıştırılmıştır. Birincisi 2000 d/d motor devrinde 50% yükte, 120 MPa ray basıncı, 200 kPa dolgu basıncı, toplam yakıt miktarı 25 mg/strok ve püskürtme zamanı -10° KMA olan tek püskürtme stratejisi, diğerleri ise toplam yakıt miktarının 6%'sının ön, 94%'ünün ana püskürtme olacak şekilde ve ön püskürtme avanslarının -20° ve -25° KMA olduğu çoklu püskürtme stratejileridir. Sonuç olarak tek püskürtmede HRR diğerlerine göre çok daha yüksektir ve dolayısıyla yanma sıcaklıkları da daha yüksek olmuştur. Ön püskürtme silindir sıcaklıklarını artırarak yanma sıcaklıklarının düşmesini sağlamıştır. Tek püskürtmedeki daha yüksek yanma sıcaklıkları soğutma suyundan olan kaybı artırmış ancak egzoz sıcaklığını azaltarak egzozdan olan kaybı azaltmıştır. Ön püskürtme NO_x emisyonlarını azaltmıştır ve avansın artırıldığı durumda NO_x emisyonları en fazla düşüşü göstermiştir. En yüksek termal ve ekserjetik verim tek püskürtmede elde edilmiştir. Ön püskürtme fren işini azaltmış ve avans arttıkça da verim azalmıştır. Ön püskürtme stratejileri ve ön püskürtme avansının artırılması egzoz kayıplarını artırmıştır.

Hyun Kyu Suh [13], NO_x azaltmaya yönelik olarak düşük sıkıştırma oranlı bir motorda tek ana, tek ön ve ana püskürtme ile iki ön ve ana püskürtme yapıldığı durumda motor performansı ve emisyonların değişimini incelemiştir. Ayrıca bu çalışmada düşük sıkıştırma oranlı dizel motorun soğuk başlangıç durumunun iyileştirilmesine de çalışılmıştır. Tek silindirli yüksek basınçlı doğrudan püskürtmeli dizel motorunda gerçekleştirilen çalışmada testler; 800 d/d motor devrinde, 27 MPa ray basıncında, 0,1 MPa egzoz geri basıncı ile tek püskürtme -

5° KMA'nda 6 mg yakıt püskürtülerek, tek ön ve ana püskürtme stratejisinde -20° KMA'nda 1 mg ön ve -5° KMA'da 5 mg ana püskürtme yapılarak, iki ön ve ana püskürtme stratejisinde ise -30° ve -20° KMA'nda 1'er mg ön ve -5° KMA'da 4 mg ana püskürtme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; tek püskürtme stratejisinde diğer püskürtme stratejilerine göre daha yüksek yanma basıncı ve ısı açığa çıkış hızı elde edilmiştir. Tek ön ve ana püskürtme stratejisinde maksimum ısı açığa çıkış hızı 27,8%, maksimum yanma basıncı ise tek püskürtmeye oranla 3,2% oranında azalmıştır. İki ön ve ana püskürtme stratejisinde ise maksimum ısı açığa çıkış hızı 47,2% oranında azalırken, maksimum yanma basıncı tek püskürtmedeki seviyelere yükselmiştir. Bunun nedeni iki ön püskürtmedeki ön karışımli zengin dolgunun tek ön püskürtmeden daha hızlı yanmasıdır. İki ön püskürtmenin yapıldığı durumda tek püskürtmeye göre 2,1% oranında OİEB artmıştır. OİEB'nin değişim katsayısı (COV), tek ön püskürtmede 33,5% ve iki ön püskürtmede 5,7% azaltmıştır. Bu durumda iki ön püskürtme yanma verimini iyileştirmiş ve düşük sıkıştırma oranlı motorun çoklu püskürtme stratejileri ile daha stabil çalışması sağlanmıştır. Çoklu püskürtme stratejilerinde yanma sıcaklıklarının düşmesi sebebi ile CO oksidasyonu azalmış ve CO konsantrasyonu yükselmiştir. Çoklu püskürtme stratejileri, ana püskürtmenin tam yanma sürecini uzatarak yanma prosesinden kalan yanmamış HC'ların azalmasını sağlamıştır. NO_x emisyonlarında iki ön püskürtme yapıldığı durumda elde edilen 58,9% azalma ile kayda değer bir düşüş elde edilmiştir. Bu durumun sebebi, düşük sıcaklıktaki iş gazının, püskürtme sayısının artırılması ile silindir içerisinde daha yaygın bir şekilde bulunması ve NO_x oluşumunun baskılanmış olmasıdır. İş emisyonları her iki çoklu püskürtme stratejisinde yanma odasındaki dolgu havasının kullanımının artması sebebi ile 25% oranında azalmıştır.

Raouf Mobasheri vd. [14], yaptığı çalışmada ön, art ve çoklu püskürtme stratejilerinin EGR ile birlikte motor performansı ve emisyon oluşumu üzerine etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla ileri düzeyde CFD (Computational Fluid Dynamics) simülasyonları gerçekleştirmiştir. NO_x ve is oluşumu için detaylı modeller ile ECFM-3Z (3 Zones Extended Coherent Flame Model) yanma modelinin geliştirilmiş versiyonu birleştirilmiştir. Çalışma 6 silindirli Caterpillar 3401 HD motorda gerçekleştirilmiştir. Testler 1600 d/d motor devrinde ve farklı

miktarlarda püskürtmenin yapıldığı farklı bekleme zamanlarına sahip 24 farklı bölünmüş ve çoklu püskürtme stratejileri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ön püskürtme yapılmadan ana püskürtmenin bölünmesi, erken ön püskürtmeli çoklu püskürtme yapılması ve çoklu püskürtme durumunda ana püskürtmenin 2 ve 3'e bölünmesi şeklinde stratejiler uygulanmıştır. Bölünmüş püskürtme stratejisinde, 0% ve 10% EGR oranı için, -9° KMA'ndan başlayarak tek püskürtme, püskürtmeler arası 10°-20°-25°-30° KMA olacak şekilde 70% ve 30% olarak bölünmüş iki ana püskürtme, aynı bekleme zamanları ile 80% ve 20% olarak bölünmüş iki ana püskürtme ve yine aynı bekleme zamanları ile 90% ve 10% olarak bölünmüş iki ana püskürtme olarak bu strateji denenmiştir. Ön püskürtmeli çoklu püskürtme stratejisinde ise ana püskürtmenin bölünmesi stratejisine ek olarak -30,075°KMA'nda toplam püskürtmenin 5%'lik kısmı bazen ana püskürtmenin ilk kısmından bazen ikinci kısmından azaltılarak gerçekleştirilmiştir. Çoklu püskürtmenin bölünmüş püskürtme ile birlikte uygulandığı durumda ise, yine aynı ön püskürtme miktarı ve zamanı ile ana püskürtme 40%-40%-15% olacak şekilde 3'e ve 25%-25%-25% ve 20% olacak şekilde 4'e bölünerek ve püskürtmeler arası 4° KMA ve son püskürtme bekleme zamanı 25°KMA olacak şekilde uygulanmıştır. Sonuç olarak, çalışma NO_x ve isin kontrol edilmesinde EGR ile çoklu püskürtmenin birlikte kullanılmasının faydalı olduğunu ortaya koymuştur. EGR pik silindir sıcaklıklarını düşürerek NO_x azaltılmasında etkili olsa da, yüksek sıcaklıktaki zengin karışım bölgelerini artırarak isin artmasına da sebep olmaktadır. Çoklu püskürtme kullanılarak bu bölgelerde oluşan is miktarı önemli oranda azaltılmaktadır. Çoklu püskürtme karışım oluşumunu iyileştirirken silindirdeki karışımı fakirleştirerek is oluşumuna sebebiyet veren zengin karışım bölgelerini azaltılmaktadır. Tek püskürtmeye kıyasla, bölünmüş püskürtme NO_x ve isin azaltılmasında oldukça etkili olmuştur. Yine de en iyi emisyon azaltıcı etkinin sağlanabilmesi için her bir püskürtmede yapılan püskürtme miktarı ve bekleme zamanları her çalışma noktası için optimize edilmelidir. Çoklu püskürtme stratejileri üzerine yapılan çalışmalar ana püskürtme ile birlikte kullanılan ön püskürtmenin is azaltımında oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca ön püskürtme ile birlikte kullanılan art püskürtmenin genişleme strokundaki

difüzyonlu yanma sırasındaki is oksidasyonunu artırarak is oluşumunu azalttığı görülmüştür.

Nilesh Gajarlaware vd. [15], yapılan çalışmada iki farklı sıkıştırma oranındaki çoklu püskürtme stratejilerinin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Testler 18,5:1 ve 16,5:1 olmak üzere iki farklı sıkıştırma oranı için 2,2 L hacmindeki, 4 silindirli doğrudan püskürtmeli, ortak hat yakıt sistemine sahip bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. 2600 d/d motor devrinde ve 84 Nm yükte gerçekleştirilen çalışmada ön püskürtme ile ana püskürtme arası 1000 μ s ile 3000 μ s arasında ve ön püskürtme miktarı ise 1 mg/strok ile 4 mg/strok arasında değiştirilmiştir. EGR oranı, ray basıncı, ana püskürtme avansı, dolgu basıncı ve hava giriş sıcaklığı tüm testlerde sabit tutulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda sıkıştırma oranının değiştirilmesi oluşan kirletici emisyonların miktarları haricinde emisyon oluşum davranışı açısından benzer özellikler gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sıkıştırma oranının azaltılması ile NO_x emisyonunun azalması temel olarak düşen yanma sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca en yüksek sıcaklık bölgeleri NO_x oluşum bölgesi olmaktan fazlasıyla uzaklaşmıştır. HC ve CO oluşumu sıkıştırma oranına bakılmaksızın benzer oluşum davranışı göstermektedir. Bununla birlikte 16,5:1 sıkıştırma oranı, ön püskürtmenin ana püskürtmeden uzaklaşması ve miktarının artması ile HC ve CO emisyonlarında aşırı bir yükselme sergilemiştir. Bunun nedeni sıkıştırma strokundaki düşük sıcaklıktaki aşırı fakir karışım oluşumudur ve yakıtın yanamamasına sebep olmaktadır. Düşürülen sıkıştırma oranı, NO_x ve isin azaltılması için iyi bir yöntemdir ancak yükselen HC ve CO emisyonları dizel oksidasyon katalistinin performansının artırılmasını gerektirmektedir. Is oluşumu püskürtmeler arası sürenin 1500 μ s ve ön püskürtme miktarının 3,5 mg/strok olduğu durumda yükselmiştir. Her iki sıkıştırma oranında da aynı durum gözlenmiş fakat 18,5:1 sıkıştırma oranında daha yüksek is oluşmuştur. Bunun ana nedeni sıkıştırma stroku sürecindeki ön püskürtmenin içine yapılan ana püskürtmenin oluşturduğu lokal zengin karışım bölgeleridir. 16,5:1 sıkıştırma oranında elde edilen daha düşük is emisyonu daha düşük NO_x elde etmek için daha fazla EGR oranına müsaade etmektedir. Böylece aynı seviyede is emisyonu elde edilmesine rağmen 16,5:1 sıkıştırma oranında daha da düşük NO_x seviyelerine ulaşılabilecektir.

Alternatif olarak aynı is emisyonu için yapılacak iki ön püskürtme gürültüyü önemli ölçüde azaltılabilecektir. 16,5:1 sıkıştırma oranında özgül yakıt tüketimi daha yüksektir. Bunun ana nedeni karışımın etkili bir şekilde yanmasını sağlayan yüksek sıcaklığın silindir içerisinde oluşamamış olmasıdır.

Nik Rosli Abdullah vd. [16], gerçekleştirdikleri çalışmada ön püskürtme zamanlamasının EGR ile birlikte değiştirilmesinin NO_x ve is üzerine etkilerini ortak hatlı yakıt sistemine sahip modern bir V6 motorda incelemiştir. Çalışma 30 Nm ve 55 Nm olmak üzere iki farklı yük seviyesinde, 2000 d/d motor devrinde, 40% EGR ile ve $-1,4^\circ$ KMA sabit ana püskürtme avansı ile gerçekleştirilmiştir. Ön püskürtme zamanlaması -9° , -12° , -15° KMA'nda geç püskürtme olarak, -19° , -21° , -24° KMA'nda orta püskürtme olarak ve -27° , -30° KMA'nda erken püskürtme olarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki yük seviyesinde de benzer oluşum özellikleri gösteren is emisyonu, geciken ön püskürtme ile artmış, -19° KMA'nda ve bundan sonraki daha erken yapılan püskürtmelerde ise düşüş göstermiştir. NO_x emisyonu ise ön püskürtme geciktikçe düşmüş -19° KMA'ndan sonra yapılan püskürtmelerde ise yükselme göstermiştir. -19° ve -21° KMA NO_x emisyonları için en iyi ön püskürtme avanslarıdır.

Qiang Fang vd. [17], yapmış olduğu çalışmada doğrudan püskürtmeli HCCI modu, emme strokunda yapılan erken ön püskürtme ve üst ölü noktaya yakın yapılan ana püskürtme ile elde etmiştir. Ön püskürtme miktarının ve EGR oranının HCCI yanmaya ve emisyonlara olan etkilerini incelemiştir. Çalışma 1450 d/d motor devrinde, 0,15 MPa ve 0,3 MPa BMEP için 80 MPa ray basıncı, 0,45 MPa ve 0,6 MPa BMEP için 85 MPa ray basıncı kullanılarak, dolgu basınçları 4 yükte sırasıyla 116 kPa, 120 kPa, 128 kPa ve 140 kPa olacak şekilde yapılmıştır. Ön püskürtmenin miktarının motor emisyon ve performansına olan etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla devir, yük ve ana püskürtme avansı sabit tutularak, 0% EGR ile -340° KMA'nda 0'dan 10 mm^3 'e kadar (0-3-5-7-8-9-9,5 mm^3) değişen ön püskürtme miktarları 0,3 MPa ve 0,6 MPa BMEP yük seviyeleri için uygulanmıştır. Emme sürecinde enjekte edilen ön püskürtmeli ısı açığa çıkış hızı grafiğinde, soğuk alev aşaması, HCCI yanmanın sıcak alev aşaması ve sıkıştırılmalı yanmanın difüzyonlu yanma aşaması bulunmaktadır. HCCI yanmanın EGR ile etkilerinin incelenebilmesi amacıyla, aynı çalışma koşulları için 15% ve 25% oranında EGR

uygulanmıştır. Sonuç olarak, ön püskürtme miktarının artışı NO_x emisyonlarını azaltmıştır. NO_x emisyonları HCCI yanma modunda azalırken difüzyonlu yanma modunda artmaktadır ve ön püskürtme miktarının artışı HCCI yanma kısmını artırmaktadır. Fakat belirli bir ön püskürtme miktarından sonra NO_x emisyonu biraz artmaktadır. İS emisyonu sürekli düşük seviyelerde kalmaktadır. CO ve HC emisyonları ise ön püskürtme miktarı artıkça eksik yanmadan ötürü yükselmektedir. NO_x emisyonları düşük seviyedeki EGR ile EGR kullanılmayan duruma göre oldukça fazla düşmüştür ancak İS emisyonu yükselmiştir. NO_x emisyonu 120 ppm'in altında ve İS emisyonu da $0,5 \text{ m}^{-1}$ (opasite ölçümü) seviyelerinde tutularak düşük emisyonlara ulaşılmıştır. EGR ve ön püskürtme miktarı arttıkça yakıt tüketimi az da olsa artmaktadır. Ön püskürtme miktarı arttıkça pik silindir basıncı ve basınç artış hızı hafifçe yükselmiştir. Ön püskürtme miktarının artışıyla çevrimler arasındaki varyasyonda azalmaktadır. Ön püskürtme miktarı daha da artırıldığında çevrimler arasındaki varyasyon artmaya başlamaktadır. Fakat çevrimler arasındaki varyasyon EGR eklendiğinde düşmektedir. HCCI ve doğrudan püskürtmeli yanma pik silindir basıncı, basınç artış hızı ve çevrimler arasındaki varyasyon ile sınırlıdır. Düşük emisyon ve düşük yakıt tüketimi için optimum EGR oranları ve ön püskürtme miktarları bulunmaktadır.

Tow T.C. vd. [18], ağır ticari doğrudan püskürtmeli bir motorda partikül ve NO_x emisyonlarının azaltılması için bir çalışma yapmış ve tek püskürtme, çift püskürtme ve üç püskürtme yapılan stratejileri karşılaştırmışlardır. Caterpillar 3406 doğrudan püskürtmeli elektronik olarak kontrol edilen ortak hatlı yakıt sistemine sahip ağır ticari motorun tek silindirli versiyonunda yapılan çalışmalar 1600 d/d motor devrinde 25% ve 75% yükte gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, çift püskürtmede tek püskürtmeye göre NO_x emisyonları artmazken partikül emisyonlarında üç kat azalma elde edilmiştir. 75% yükte yapılan testlerde özgül yakıt tüketimi ise 2.5% oranında artmıştır. Üç püskürtme yapılan strateji ile ise 75% yükte yine NO_x emisyonlarında artış görülmezken, partikül emisyonları yarıya inmiş ve özgül yakıt tüketimi 1,5% artmıştır. 25% yükte ise partikül emisyonlarında 40%, NO_x emisyonlarında 16% azalma elde edilmiş, özgül yakıt tüketimi ise 1% oranında artmıştır.

Zhiyu Han vd. [19], is ve NO_x azaltma mekanizmalarını nümerik olarak incelemiş ve yanma prosesini KIVA-II kodu ile simüle etmişlerdir. Çoklu püskürtme stratejilerinin kullanıldığı yanma prosesindeki öngörüler RNG k- ϵ türbülans modeli ile elde edilmiştir. Türbülanslı yanma modeli deneysel veri ile oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda, spreyin uç kısmında oluşan ve is oluşuna sebep olan zengin karışım bölgeleri çoklu püskürtmeler ile dağıtılmış ve bir sonraki püskürtme sırasında daha fakir bir yanmanın oluşumu sağlanmıştır. Ayrıca NO_x azaltımında çoklu püskürtme stratejilerinin geciktirilmiş tek püskürtme ile benzer sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Ikegami M. vd. [20], yakıt püskürtme oranının şekillendirilmesinin egzoz emisyonları üzerine etkilerini incelemek amacıyla yenilikçi bir yakıt püskürtme sistemi kullanmışlardır. Yapılan çalışma ile yakıt püskürtme oranının egzoz emisyonları üzerinde önemli etkisi olduğu gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar yüksek hızlı doğrudan püskürtmeli tek silindirli, akışa oldukça fazla burgu hareketi verebilen ve derin bir piston oyuğuna sahip yanma odalı, 0,857 litrelik dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Testler 900 d/d ve 1800 d/d motor devirlerinde, 0,64 eşdeğerlik oranı ile orta yükte ve 0,84 eşdeğerlik oranı ile yüksek yüklerde yapılmıştır. Çalışma sonucunda 900 d/d motor devrinde, en düşük püskürtme oranları en yüksek is ve HC emisyonlarına sebep olmuştur. En düşük NO_x seviyeleri ise, uzun bir püskürtme aralığı ile yapılan en düşük ön püskürtme miktarında elde edilmiştir. 1800 d/d motor devrinde, tüm emisyonlar için aynı davranış gözlemlenirken, miktarları önemli oranda değişmiştir. Ön püskürtme, yanma periyodunun uzamasına sebep olduğu için is emisyon konsantrasyonunu artırmıştır. Sonuçlar başlangıçtaki püskürtme oranı ve ön püskürtme miktarının azaltılmasının, NO_x emisyonlarını ve motor gürültüsünü azalttığını göstermiştir. Ortalama püskürtme oranının artırılması ise is emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır.

Nishimura vd. [21], tek silindirli doğal emişli doğrudan püskürtmeli dizel bir motorda, yakıt püskürtme oranının değişiminin yanma, emisyonlar, motor gürültüsü ve yakıt tüketimi üzerine etkilerini, ön püskürtme ve püskürtme oranını değiştirerek ve özellikle yanmanın başlangıcı üzerine odaklanarak çalışmışlardır. Sonuç olarak, ön püskürtme yapılan durumda tek püskürtme yapılan duruma göre

daha yumuşak bir ısı açığa çıkma hızı elde edilmiş ve ön püskürtmeyle tutuşmanın daha iyi kontrol edilebildiği görülmüştür. Ön püskürtme NO_x ve gürültünün azaltılması için oldukça iyi bir yöntemdir ancak daha iyi motor performansı için optimize edilmelidir. Püskürtme basıncının kontrol edilmesi NO_x ve motor gürültüsünün azaltılması için etkili olmasına rağmen ön kontrolsüz yanma fazının yavaşlaması sebebi ile karışım oluşumunun kötüleşmesinden dolayı is emisyonunu artırmıştır.

Schommers vd. [22], yaptıkları çalışmada yakıt sisteminde bulunan yüksek basınç pompası, enjektörler ve ortak hattın çoklu püskürtme stratejilerindeki kullanımını değerlendirmişlerdir. Çalışmanın ana amacı, yükseltilmiş ray basıncının farklı nozül geometrileri ile motor performansı üzerine etkilerini incelemektir. EGR ile donatılmış tek silindirli dizel motorda yapılan deneysel çalışmalar, tam yükte, kısmi yükte ve düşük motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, kısmi yük koşullarında yüksek EGR kullanımı NO_x ve is azaltımında önemli yararlar sağlamıştır. Yüksek ray basıncında ve daha düşük nozül debisinde is yoğunluğu azalmış ve NO_x emisyonunda değişim gözlenmemiştir. Yüksek ray basınçlarında is emisyonlarını 40-60% oranında azaltma potansiyeli saptanmıştır.

Badami M., Millo F. vd. [23], ön püskürtme miktarının ve zamanlamasının is, NO_x , motor gürültüsü ve yakıt tüketimi üzerine etkilerini binek bir araç üzerinde incelemişlerdir. 4 silindirli, EGR ile donatılmış doğrudan püskürtmeli dizel motorda yapılan deneysel çalışmalar, 1500 d/d motor devri ve 5 bar OİEB’de, 2000 d/d motor devri ve 2 bar OİEB’de ve 200 d/d motor devri ve 8 bar OİEB’de gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışma noktalarında ön püskürtme miktarı toplam püskürtmenin 15%’ine kadar ve ön püskürtme zamanlaması ise 32° ile 1° KMA arasında değiştirilmiştir. Sonuç olarak, ön püskürtme miktarı artırılarak yanma enerjisi artırıldığında yanma odasında ana püskürtme öncesinde daha yüksek basınç ve sıcaklık elde edilmiş ve NO_x emisyonları yükselmiştir. Ayrıca ön karışımli fazın kısalması sebebi ile is emisyonları yükselmiş ve motor gürültüsü azalmıştır.

Benajes, Molina vd. [24], yaptıkları çalışma ile yanma prosesinin geliştirilmesinde ön ve art püskürtmelerin etkilerini incelemiş ve motor verimi ile emisyon oluşumu üzerine sonuçlar ortaya koymuşlardır. Araştırmaları ısı açığa çıkma hızı ile motor

performansı ve emisyon oluşumu arasındaki ilişki üzerine yapılan çalışmaları birleştirici niteliktedir. Her bir çalışma noktasında ön ve art püskürtme miktarları 12 mg/strok ile 20 mg/strok arasında yapılırken, ön ve art püskürtmenin ana püskürtme ile olan bekleme zamanları da değiştirilmiştir. Deneyler 1,8 litrelik tek silindirli ağır ticari motor üzerinde European Steady State Test Cycle (ESC) çevriminden alınan dört farklı çalışma noktasında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, ön püskürtme stratejisi ile is emisyonunda az bir limit aşımı ile yakıt tüketiminin azaltılması mümkün olmuştur. Ancak motor çalışma modlarının çoğunda NO_x emisyonlarında artış görülmüştür. Art püskürtme yapılması durumunda ise NO_x emisyon limitleri ve yakıt tüketimi için sınırlar aşılmadan verimli bir is azaltımı sağlanmıştır. Düşük yüklerde ön püskürtmenin zamanlaması ve miktarı NO_x ve is konsantrasyonu üzerinde önemli etkiye sahip olmuştur. Art püskürtme miktarı artırıldığında yakıt tüketiminin yüksek miktarda arttığı görülmüştür. Ayrıca art püskürtme stratejisi eklendiğinde is emisyonlarında azalma görülmüştür.

Mallamo F., Badami M. vd. [25], yaptıkları çalışmada ortak hat sisteminin yol dışı dizel bir motorda uygulanması üzerine çalışmış ve ana püskürtme, tek ön püskürtme, çift ön püskürtme ve art püskürtme olmak üzere 4 farklı püskürtme stratejisini test etmişlerdir. 4 stroklu 2 silindirli doğrudan püskürtmeli dizel motor üzerinde yapılan çalışmalar, ISO 8178 – C1 çevriminin birinci ve beşinci modlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çoklu püskürtme kullanımının yakıt tüketimini artırmadan, partikül madde ve motor gürültüsünün azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Tek ön ve iki ön püskürtmenin temel etkisi, ana püskürtmenin yanmasının daha yavaş olması ve basıncın daha yavaş yükselmesi sebebi ile motor gürültüsü ve NO_x seviyelerindeki azalma olmuştur. Art püskürtme ise oksidasyon prosesinin tamamlanmasına yaptığı katkı ile partikül emisyonlarının azalmasında etkili olmuştur.

Badami, Mallamo vd. [26], çoklu püskürtme stratejilerinin yanma ve emisyonların oluşumu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada ön-ön-ana ve ön-ana-art püskürtme stratejileri çalışılmış ve binek bir araçtaki is, NO_x , motor gürültüsü ve özgül yakıt tüketimi olan etkileri araştırılmıştır. Farklı ön püskürtme avansları ve art püskürtme miktarları ile zamanlamaları denenmiştir. Sonuç olarak, ön-ön-ana

püskürtme stratejisi motor gürültüsü ve yakıt tüketiminin azaltılmasında toplamda iki püskürtme yapılan duruma göre daha etkili olmuş ancak emisyonlarda artış görülmüştür. Ön-ana-art püskürtme stratejisi is azaltımında son derece etkili olmuştur fakat art püskürtme zamanlamasının doğru olarak seçilmesi son derece önemlidir. Raydaki ve püskürtme hatlarındaki basıncın dalgalanması analiz edilerek çoklu püskürtme karakteristiğini değiştirdiği gösterilmiştir.

Hotta, Inoyashi vd. [27], yüksek hızlı doğrudan püskürtmeli dizel motorda çoklu püskürtme stratejilerinin egzoz emisyonları ve motor performansına olan etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar EGR ile donatılmış, süper şarjlı tek silindirli motorda gerçekleştirilmiş ve erken ön püskürtme, yakın ön püskürtme ve art püskürtme stratejileri denenmiştir. Çalışmada farklı motor devirlerinde ve farklı ön püskürtme miktarları ile düşük, orta ve yüksek yüklerde testler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, orta yük koşullarında erken püskürtmenin küçük parçalara bölünmesi motor gürültüsünü azaltmıştır. Ayrıca erken püskürtmenin bölünmesi silindir duvarına yapışan yakıt miktarını düşürmüştür. Düşük yük ve düşük hız koşullarında, erken ön püskürtme is emisyonlarını düşürürken HC emisyonlarını önemli ölçüde artırmıştır. Sonuçlar NO_x artışının önüne geçebilmek için ön püskürtme miktarının $1 \text{ mm}^3/\text{strok}$ 'dan daha az olması gerektiğini göstermiştir. Art püskürtme ile is, HC ve yakıt tüketiminde düşüş gözlenmiştir.

Hardy ve Reitz [28], ağır ticari motorda çoklu püskürtme stratejisi kullanılarak kısmi ön karışimli yanmanın araştırılması üzerine çalışmışlardır. Değerlendirilen parametreler; ön püskürtme avansı, ön püskürtme süresi, ana püskürtme avansı, ön-ana-art püskürtme stratejisi ve çift ön püskürtmeli ana püskürtme stratejisi ve art püskürtme stratejileridir. Yapılan çalışmadaki çoklu püskürtme stratejileri, ön karışimli yanma fazını artırırken difüzyonlu yanma fazını azaltarak silindirdeki yanma modlarını değiştirmiştir. Giriş dolgu basınçlı, EGR ile donatılmış ve egzoz geri basıncının kontrol edildiği tek silindirli Caterpillar Scote 3401 ağır ticari motorda gerçekleştirilen çalışmalar, 57% yükte ve 1737 d/d motor devrinde yapılmıştır. Motorda bulunan yakıt püskürtme sistemi Caterpillar 300B HEUI sistemi olup en fazla 4 püskürtme yapabilmektedir. Sonuç olarak daha erken

yapılan ön püskürtmeler NO_x ve HC emisyonlarını azaltmış, partikül, CO ve özgül yakıt tüketimini artırmıştır. Ön püskürtme süresinin artırılması özgül yakıt tüketiminin düşüş göstermesine, CO, partikül, NO_x ve HC emisyonlarında önemli bir değişim yaşanmamasına sebep olmuştur. Daha erken yapılan ana püskürtmeler ise CO, özgül yakıt tüketimi ve partikülleri azaltırken NO_x ve HC emisyonlarını artırmıştır. Ön-ana-art püskürtme stratejisi, ön-ana püskürtme stratejisine göre emisyonları düşürmüştür.

Carrlucci vd. [29], dizel motorlarda yanmanın geliştirilmesi için erken püskürtme stratejilerinin kullanımını araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ön ve ana, erken püskürtme ve ana, erken ön ve ana püskürtme stratejileri çalışılmıştır. 4 silindirli süper şarjlı doğrudan püskürtmeli dizel bir motorda yapılan çalışmada 5 Nm düşük yükte ve 900 d/d motor devrinde, 32 Nm orta yükte ve 1400 d/d motor devrinde ve 80 Nm yüksek yükte ve 2000 d/d motor devrinde çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, orta yük koşullarında, en uzun püskürtme aralıklı ve geciktirilmiş ana püskürtmeli erken ön püskürtme stratejisi en düşük NO_x emisyonlarını üretirken özgül yakıt tüketimi hafifçe artmış ve opasite değerleri elde edilen en düşük değerlere yakın olarak çıkmıştır. Yüksek yük koşullarında ise, ön-ana püskürtme stratejisi en iyi sonuçları vermiştir. Düşük yük koşullarında ise erken ana püskürtme stratejisi en iyi sonuçları göstermiştir.

Ehleskog vd. [30], yüksek hızlı doğrudan püskürtmeli dizel bir motorda çoklu püskürtme stratejilerinin egzoz emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada ana püskürtme iki, üç ve dörde bölünerek test edilmiş ve NO_x , CO, HC ve partikül madde emisyonları ile tork ve silindir basınçları tek püskürtme ile kıyaslanmıştır. Ayrıca püskürtme sayılarının yanı sıra püskürtmeler arasındaki bekleme zamanları da araştırılmıştır. Tek silindirli araştırma motorunda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, ana püskürtmenin ikiye bölünmesi partikül ve CO emisyonlarını azaltırken yakıt verimini ve NO_x emisyonlarını yükseltmiştir. Çift püskürtme stratejilerinin kullanılması ısı açığa çıkma hızını düşürmüştür ve yanma süresini değiştirmeden yanmanın daha sonraki aşamalarında açığa çıkan ısı artmasını sağlamıştır. Püskürtme sayıları üç ve dörde yükseldiğinde NO_x emisyonları düşmüş fakat partikül madde, CO ve HC emisyonları yükselmiştir.

Payri F. vd. [31], 15:1 düşük sıkıştırma oranlı doğrudan püskürtmeli dizel bir motorun soğuk başlangıç şartlarında 900 d/d'deki rölanti çalışma şartlarında çoklu püskürtme stratejileri uygulanmasının yanma davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. 4 stroklu tek silindirli 0,365 litrelik dizel motorda tek ön ve ana püskürtme ile çift ön ve ana püskürtme stratejileri denenmiştir. Çalışma sonucunda, çoklu püskürtmenin motor ilk çalıştırıldığı anlarda yanmayı iyileştirdiği görülmüştür. Çalışma tek 5 mg/strok miktarındaki ön püskürtmenin iki orta büyüklükte ön püskürtme olarak yapılmasının toplam ısı açığa çıkışını artırdığını göstermiştir. İkinci ön püskürtmeden kaynaklanan ön karışimli yanma, yanma verimini artırmış, toplam ısı açığa çıkışı artmış ve OİEB yükselmiştir.

Thurnheer T. vd. [32], ağır ticari dizel bir motorda, ön-ana, ana-art ve tek ana püskürtme stratejilerini araştırmışlardır. Çalışmada motor devri, EGR oranı, yük ve hava yakıt oranı sabit tutulmuş, ön e art püskürtme miktarları ve püskürtme zamanlamaları değiştirilmiştir. 4 stroklu 6 silindirli EGR ve turbo şarjlı ağır ticari dizel motorda yapılan çalışma sonucunda, ön püskürtme avansının artırılmasının yanma verimini düşürdüğü görülmüştür. Referans nokta ile kıyaslandığında ön püskürtme NO_x emisyonlarını artırmıştır. Daha küçük ön püskürtme miktarları is ve partikül emisyonlarını azaltmıştır. Ana püskürtmenin -19° KMA'da yapılması yanmanın en optimal yerde oluşmasını sağlamıştır. Art püskürtmenin zamanı ve miktarı yama merkezini ve pik ısı açığa çıkma hızını etkilememiştir. Ayrıca art püskürtme ile egzoz sıcaklığı yükselmiştir.

Motor üreticileri rekabetin giderek arttığı küresel pazarda, hedefledikleri pazarın emisyon regülasyonlarına uyum sağlamaya ve geliştirme çalışmalarını en kısa zamanda ve en az maliyetle yapılmasına çalışmaktadırlar. Pazarların ve regülasyonların giderek sıkılaştıran emisyon ve yakıt tüketimi talepleri ile motorların kompleksitesi artmakta bu da kalibre edilen parametre sayısını artırmaktadır. Özellikle püskürtme sistemi ile ilgili püskürtme sayısı, püskürtmelerin miktarları ve zamanlamaları ve ray basıncı parametrelerinin motor deneyleri ile kalibre edilmesi test odalarında harcanan zaman ve bütçenin oldukça artmasına neden olmaktadır [33]. Bu nedenle motorun hedeflenen emisyon değerlerini sağlarken (is limiti, emisyon limitleri, vb.), istenen performans değerlerine (maksimum tork, güç ve yakıt tüketimi) ulaştırılması süreci, modelleme çalışmaları ile

hızlandırılarak kalibrasyonlar üretilmesi ve bu kalibrasyonların model ile tekrar tekrar denenmesi, hem test maliyetlerini düşürecek hem de geliştirme sürelerini kısaltacaktır. Termodinamik motor modelleri akışkanlar dinamiği simülasyonları ve stokastik reaktör modellerle karşılaştırıldığında en kısa hesaplama sürelerine sahip modellerdir [34][35]. Termodinamik motor modellerinin hızlı hesaplama süreleri, karmaşık çoklu hedefli optimizasyon problemlerinin çözümünde önemli avantajlar sağlamıştır. Meta modeller oluşturmak için yüksek sayıda test verisine ihtiyaç duyan yapay sinir ağları ve optimum Pareto çözümlerini sunan NSGA genetik algoritmaları da ayrıca çalışılmıştır [36][37]. NSGA-II algoritması fren gücü maksimize edilirken, özgül yakıt tüketimi, partikül ağırlığı, NO_x, CO ve CO₂ emisyonlarının minimize edilmesi için kullanılmıştır [38]. Genetik algoritma tabanlı optimizasyon araçları, araştırmacılara ve motor tasarımcılarına çoklu hedefler içeren problemler için, motor test odalarında yapılan deneylerle dahi bulunması çok kolay olmayan Pareto çözümlerini sunmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Dizel motorlarda uygulanmakta olan ön ve art püskürtme stratejilerinin birden farklı motor yük ve hız şartı için gerek motor performansı gerekse egzoz emisyonları açısından optimizasyonu yapılarak, bu şartlar altında uygulanması gerekli olan stratejiler için geçerli olan püskürtme zamanlarının ve püskürtme miktarlarının korelasyonunun belirlendiği Doktora çalışması 2012 yılı içinde tamamlanmıştır. Sonuçlar birden fazla ön püskürtme yapılan stratejilerin emisyon ve motor gürültüsünü azaltma açısından yararlı olacağını göstermiştir. Bu nedenle, yürütülmekte olan yeni doktora çalışmasında birden fazla ön püskürtme uygulanan stratejilerin optimizasyonunda kullanılmak üzere model oluşturulması amaçlanmaktadır.

Gelişen dizel motor teknolojisi, dünya üzerinde sınırları daralan emisyon standartlarını karşılamak için, önce yüksek basınçlı ortak hat püskürtme sistemlerini geliştirmiş ancak emisyon regülasyon sınırlarının daha da daralması ve yakın gelecekte daha da daralacak olması sebebiyle karışım teşkili ve yanma prosesi üzerindeki kontrolü daha kolay hale getiren ve dizel motor sistemleri üzerinde gerek performans gerekse emisyon değerleri açısından belirgin bir katkısı

olan fazla püskürtme teknolojisi geliştirilmiştir. Aynı çevrim içerisinde sisteme sokulan yakıt miktarı sabit kalmak kaydıyla, yakıtın ön ve ana püskürtmeler şeklinde sisteme sokulmasıyla özellikle emisyon açısından iyileştirici sonuçlar elde edilmiştir. Temel uygulamada hali hazırda ön püskürtme azot oksit kirletici emisyonlarının ve yanma gürültüsünün azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Ancak emisyon standartlarının baskısı elektronik püskürtmenin sağladığı imkanlardan daha fazla yararlanmayı gerektirmiştir. Günümüz teknolojisi ile aynı çevrim içerisinde yakıtın iki veya daha fazla faza bölünerek sisteme sokulması ve özellikle kirletici emisyonlar açısından iyileştirmeler elde etmek mümkündür. Ancak bu aşamada ön püskürtme sayısı, basıncı, miktarları ile ana püskürtme zamanlaması ve fazlar arasında uygulanacak sürenin optimizasyonu önem arz etmektedir. Bu alanda literatürde yapılmış olan çalışmalarda genel olarak çalışmacılar tarafından önceden belirlenmiş olan bir motor yük şartında, ön ve art püskürtme önceden belirlenmiş sabit kütleli değerlerde ve zamanlarda fazlara bölünerek sisteme sokulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir. Ancak motor işletme şartlarının gerek yük ve gerekse motor hızı açısından değişken olduğu göz önüne alındığında farklı yük şartları ve motor hızlarında sonuçların belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle belirlenen farklı yük ve hız şartlarında, ön püskürtmelerin performans ve emisyonlar üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılacak referans motor testlerinin sonuçları ve literatür kullanılarak oluşturulacak motor modeli çalışmanın amacı doğrultusunda motor kalibrasyonunun optimizasyonu için kullanılacaktır.

1.3 Hipotez

Dizel motorlarda çoklu ön püskürtme stratejileri emisyon ve motor gürültüsü açısından önemli faydalar oluştururken NO_x ile is emisyonları ve NO_x ile özgül yakıt tüketimi arasındaki ödünleşmenin kabul edilebilir bir aralığa indirgenmesine olanak sağlamaktadır. Tez çalışmasında bu olgu ile bağlantılı olarak çoklu ön püskürtme stratejileri kullanılarak NO_x ve is emisyonlarının aynı anda azaltılması ve NO_x emisyonları azaltılırken fren gücünün korunması veya daha da artırılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

Optimizasyon probleminin çözülmesi aşamasında, değişken parametrelerin doğrulanmış motor modeline girilmesi ve doğru sonuçlar üretmesi ancak geniş bir motor çalışma aralığında doğrulanmış motor modelleri ile mümkündür. Bu tez çalışmasında oluşturulan motor modelinde öngörülü yanma modeli kullanılması, motorun değişken devir ve yük şartlarında ve değişken ön püskürtme parametrelerine karşı dayanıklı olması ve tutarlı sonuçlar üretmesi açısından önemlidir. Böylece motor modellerinin en önemli kısmı olan yanma fenomeni öngörülü olarak modellenmiş olacak ve değişken parametrelere karşı kendini adapte edebilecektir. Motorun seçilen işletme şartlarındaki ve ön püskürtme parametrelerindeki değişimleri içeren toplam 90 noktada yapılan motor dinamometre testlerinin sonuçları, sadece bir noktanın verileri kullanılarak kalibre edilen öngörülü yanma modelinin ürettiği simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve öngörülü yanma modeli kullanımının faydaları ortaya koyulmuştur.

Optimizasyon problemlerinin bir çoğu deterministik yöntemlerle çözülmeye çalışılırken bu tez çalışmasında dörtten fazla değişken parametreye sahip ve doğrusal olmayan sistemler için kullanımı gerek zaman ve bilgisayar gücü gerekse de ulaşılan sonuçların global minimum olmaları açısından faydalar sağladığı öngörülen genetik algoritma kullanılmıştır. Çoklu hedefli optimizasyon probleminde genetik algoritma kullanımının sonuçlar ve sonuçlara ulaşma süresi açısından performansı incelenmiştir.

İÇTEN YANMALI MOTORUN MODELLENMESİ

İçten yanmalı motor modelleme çalışmaları GT-Power simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GT-Power programı motor sistemlerinin hem statik hem de dinamik şartlardaki davranışlarının önceden belirlenmesinde kullanılmaktadır. Simülasyon çıktıları herhangi bir parametrenin ortalaması, maksimumu veya minimumu olacak şekilde tek bir değer olarak veya krank açısı veya zamana bağlı değişkenler olarak üretilebilmektedir. Bu parametreler; motor volumetrik verimi, güç, tork, tüm geçişlerdeki debiler ve akışkan hızları, sistemdeki iş gazının her bir eleman içindeki sıcaklığı ve basıncı, boru ve dağıtım sistemlerinin duvar sıcaklıkları, dizel ve benzin yanma hızları, benzinli motor NO_x ve vuruntu başlangıçları ve dayanımı, dizel motor NO_x ve is emisyonları, egzoz arıtma sistemi kimyası, ısı transferi ve anlık gürültü olarak özetlenebilir.

2.1 Motor Sistemleri

GT-Power simülasyon programında, tipik bir içten yanmalı motor “silindir” ve “krank sistemi” nesneleri ve “supap” ile “enjektör” bağlantı nesneleri kullanılarak modellenmektedir. “Silindir” ve “krank sistemi” motorun temel geometrisinin ve özelliklerinin tanımlanması için kullanılmaktadır. Her iki nesne de motordaki yanma ve ısı transferi hesaplamaları için daha detaylı bilgilere ihtiyaç duyan alt referans nesneler ile bağlantılıdır. Silindirler emme ve egzoz manifoldlarına “supap” bağlantıları ile bağlanırlar. Farklı tip ve karakteristikteki supaplar için tanımlanmış birçok bağlantı bulunmaktadır.

2.1.1 Simülasyon Modları

GT-Power programında kullanılan denklem çözücüler hem hız modunda, verilen bir hız için fren torkunun hesaplanmasında hem de yük modunda verilen bir yük için motor devrinin çözülmesinde kullanılarak performansın belirlenmesini sağlamaktadır. Kullanıcı simülasyon modunu “krank sistemi” nesnesinin içinden belirlemektedir.

2.1.1.1 Hız modu

Hız modu içten yanmalı motor simülasyonlarında özellikle sabit şartlardaki durumda en yaygın kullanılan moddur. Kullanıcı, hızı hem sabit bir değer olarak hem de bir referans nesneye bağlı değişken olarak girebilmektedir. Bu yöntem, yük modundaki çalışmada krank şaft hızının sabit bir değere oturması için gerekli süreyi ortadan kaldırarak, simülasyon için seçilen süre boyunca sonuçların daha hızlı elde edilmesini sağlamaktadır.

2.1.1.2 Yük modu

Yük modu, kullanıcının motora karşı bir yük uygulamasını veya motoru bir araç modeline entegre edebilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemde motorun öngörülen fren torku, motora uygulanan yük ve motorun ataleti hesaba katılarak motor hızı hesaplanmaktadır. Motora sabit değerde bir yük veya dinamik bir fonksiyon kullanılarak modellenen yük uygulanabilmektedir. Yük modu motorun yüklere verdiği cevabın incelenebilmesine de olanak sağlamaktadır. Ancak bu simülasyonlarda istenilen sonuçların elde edilebilmesi için çok sayıda tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple öncelikle modelin hız modunda kalibre edilmesi daha sonra yük modunun kullanılması önerilmektedir.

2.1.2 Supapların Modellenmesi

Supaplar herhangi bir “supap” şablonu kullanılarak modellenenebilir. Yaygın tipteki supaplar için (kam tahrikli supaplar, selenoid supaplar, vb.) farklı şablonlar bulunmaktadır. “Kam tahrikli supap” bağlantısı motorun modellenmesinde en yaygın kullanılan supap şablonudur. Kam açılarına karşılık gelen supap kalkış profili ve akış karakteristiklerine ilişkin bilgiler girilir. Supap kalkış miktarına bağlı olarak değişen akış katsayıları kullanılarak supap akış alanı tanımlanır. Genel olarak akış katsayıları silindir kafasından alınan akış ölçümleri ile hesaplanmaktadır. Önemli olan nokta, akış katsayısını hesaplamak için kullanılan referans çapın, “supap” bağlantı nesnesine girilen referans çap ile aynı olmasıdır.

2.1.3 Portların Modellenmesi

Supaplara bağlanan emme ve egzoz portları borular ve akış çatalları ile geometrik olarak modellenenebilir. Bununla birlikte özellikle dikkat edilmesi gereken aşağıdaki hususlar bulunmaktadır:

- Supapların akış katsayıları belirli bir basınç farkı için yapılan debi ölçümlerinden hesaplanmaktadır. Bu ölçümler supapların kullanılacağı motora özgü silindir kafası içerisinde yapılmaktadır. Portların şekli (çap daralmaları ve dirsekler), yüzey pürüzlülüğü ve supapların saplarından dolayı oluşan basınç kayıpları bu ölçümler ile kolaylıkla ayırt edilememektedir. Bu nedenle supapların akış katsayıları portlardan kaynaklanan akış kayıplarını da içermektedir. Simülasyonlarda portlardan kaynaklanan kayıpların ikinci defa dahil edilmesini önlemek amacıyla, portları modellemek için kullanılan sürtünme katsayısı ve borular ile akış çatallarındaki basınç kayıp katsayıları 0,0 olarak ayarlanmalıdır. Portların giriş ve çıkış çapları aynı ve bu çap manifoldların silindir kafasına bağlandığı noktadaki çap ölçüsü olmalıdır. Böylece daralma veya genişleme kaynaklı kayıplar doğru olarak modellenenebilecektir.
- Portların silindir kafası içerisinde bulunan kısımları döküm olduğu için sıcaklıkları motorun soğutma sistemi tarafından belirlenir. Bu nedenle, bu sıcaklıkların belirlenmesi ve belirlenmiş duvar sıcaklığı opsiyonu kullanılarak termal denklem çözücünün devre dışı bırakılması uygulanabilir. Eğer port duvar sıcaklıkları bilinmiyorsa tam yükte giriş portları için 450 K ve egzoz portları için 550 K sıcaklık yaklaşımlarının kullanılması uygun görünmektedir. Bu yüksek sıcaklık değerleri supapların sıcak arka kısımlarından olan ısı transferini temsil etmek için kullanılmaktadır.

2.1.4 Silindir İçindeki Akış

2.1.4.1 Silindir İçindeki Hız ve Türbülans Yoğunluğu

Silindir içerisindeki akışın hız ve türbülans yoğunluğunun modelde uygulanabilmesi veya öngörülebilmesi için “silindir içi akış” şablonu kullanılabilir. Bu modelin sonuçları “silindir içi ısı transferi” referans şablonu içinde bulunan akıştaki ısı transfer modelinde ve “benzin türbülanslı yanma” ve “dizel jet yanma” gibi öngörülü yanma modellerinde kullanılmaktadır. Silindir içindeki akış modeli

silindiri çoklu bölgelere bölmektedir: Merkezdeki çekirdek bölge, sıkıştırma alanı, kafa girintileri bölgesi ve piston çanağı bölgesi. Her bir bölgede her bir zaman adımı için silindir geometrisi, piston hareketi ve supaplardan silindire giren ve çıkan gazların debileri hesaba katılarak ortalama radyal hız, eksenel hız ve girdap hızı hesaplanmaktadır. Bu hızlar akış ısı transfer modelinde kullanılmaktadır.

2.1.4.2 Girdap ve Karışma

Girdap ve karışma hareketleri “silindir içi akış” şablonu kullanılarak öngörülebilir. Bu öngöründe hesaplamaya etki eden en önemli faktörler akışkanların supaplar üzerinden silindire girişi esnasında üretilen girdap ve karışma hareketleridir. İlk motor çevrimi sırasında girdap ve karışma “silindir içi akış” referans nesnesi içinde başlatılır. İlk çevrimden sonra supap nesnelerinin içinde tanımlanan girdap ve karışma katsayıları kullanılarak silindir içindeki gazlara uygulanan girdap ve karışma torkları hesaplanır. Genel olarak girdap ve karışma katsayılarının artırılması supaplardan geçen akışta oluşan girdap ve karışma hareketinin oluşumunu artırırken türbülans oluşumunu azaltmaktadır.

2.1.5 Silindir İçindeki Isı Transferi

“Silindir” ve “krank sistemi” nesneleri içindeki ısı transferi “silindir içi ısı transferi” ve “silindir duvar sıcaklığı” referans nesnelerinin kombinasyonu ile modellenmektedir. “Silindir içi ısı transferi” nesnesi kullanıcıya silindir içindeki ısı transfer katsayılarının hesaplanması için istediği ısı transfer modelini seçmesine izin vermektedir. Silindir kafası, duvarları ve piston sıcaklıklarının hesaplanabilmesi için üç “silindir duvar sıcaklığı” nesnesinden biri kullanılabilir.

2.1.5.1 Isı Transfer Katsayıları

“Silindir içi ısı transferi” referans nesnesi kullanıcıya silindir içerisindeki ısı transfer katsayılarının hesaplanmasını sağlayan ısı transferi modellerinin tanımlanmasını sağlamaktadır. Oluşturulan motor modelinde WoschniGT ısı transferi modeli kullanılmıştır. WoschniGT silindir içerisindeki ısı transferinin girdap hareketi olmayan klasik Woschni korelasyonuna yakın bir formül ile hesaplanmasıdır [39]. En önemli fark her iki supapın da açık olduğu esnadaki ısı transfer katsayılarının değişmesi ve emme supapı üzerinden hızla giren hava ile egzoz supapı üzerinden

hızla geri akan havanın ısı transferini artırmasıdır. Bu seçenek ölçülen bir girdap verisi olmadığı zaman önerilmektedir.

2.1.5.2 Duvar Sıcaklıklarının Hesaplanması

Hem “silindir duvar sıcaklığı” hem de “ayrıntılı silindir içi duvar sıcaklığı” silindir kafası, piston ve silindir duvarlarının sıcaklıklarının girilmesi için kullanılabilir. Eğer silindir sıcaklıkları yoksa tam yükte genellikle silindir kafası için 550-600 K, piston için 550-600 K ve silindir için 400 K sıcaklık değerleri kullanılabilir.

2.1.6 Yakıtın Püskürtülmesi

Yakıt “enjektör” bağlantı elemanlarından birinin silindire bağlanması ile silindirin içine püskürtülebilir.

2.1.6.1 Yakıtın Buharlaşması

Her bir enjektörde buharlaşan yakıt miktarı parametresi kullanılarak püskürtmenin hemen ardından buharlaşan sıvı yakıt oranı belirlenebilir. Buharlaşma püskürtülen yakıtın buharlaşma ısısına göre değişir ve hava/yakıt buharı/sıvı yakıt karışımı üzerinde soğutucu bir etkiye neden olur. Buharlaşan yakıt silindir içerisinde zaten var olan diğer gazların (hava, vb.) yerini alacaktır.

2.1.6.2 Silindir İçine Doğrudan Püskürtme

Silindir içine doğrudan püskürtmenin modellenmesi için “enjektör” parçası “silindir” parçasına bağlanır. Silindir içerisindeki sıvı yakıtın tamamının silindir gazları içinde buharlaştığı varsayılmıştır. Bu varsayımla, gazdan ısı çekilir ve bir soğutma etkisi oluşmuş olur.

Eğer silindir parçası içinde “dizel çoklu püskürtme yanma” veya “dizel jet yanma” referans nesneleri çalıştırılırsa, sıvı yakıtın buharlaşması yanma modelinin bir parçası olarak öngörülür.

Eğer silindir parçası içinde “yakıtın buharlaşması”, “dizel çoklu püskürtme yanma” veya “dizel jet yanma” nesnelerinden herhangi biri çalıştırılmazsa, yakıtın kalanı yanma bölgesine girer girmez buharlaşacaktır. Yanma sürekli olarak belirli kütleli oranlardaki yakıt buharı ve sıvı yakıt tükettiğinden, normalleştirilmiş

yanma hızında kalan sıvı yakıtın buharlaşması gerçekleşecektir. Püskürtülen yakıtın buharlaşma ısısı salınan yanma enerjisi hesaplanırken dikkate alınacaktır.

2.1.6.3 Yakıt Püskürtme Şablonları

Yakıt püskürtme için modelde “çoklu püskürtme profili” bağlantı şablonu kullanılmıştır. Bu püskürtme bağlantısı periyodik bir basınç veya debi profiline sahip çoklu püskürtme yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlantı “püskürtme profili” bağlantısına benzemekte fakat uygun özelliklerde birçok profilin tanımlanmasına da imkan vermektedir. Örneğin, ön, ana ve art püskürtmeye özgü profiller tanımlanabilir ancak bu profiller üst üste gelemez. Bu şablon bir sıvının herhangi bir silindir veya boru içine püskürtülmesinde kullanılabilir ancak çoğunlukla doğrudan püskürtmeli dizel motorlarda kullanılmaktadır.

2.1.7 Motor Sürtünmesi ve Yardımcı Yükler

Motorun mekanik sürtünmesinin modellenmesi amacıyla “Chenn-Flynn motor sürtünmesi” referans nesnesi kullanılmaktadır. Su pompası, radyatör fanları gibi yardımcı yüklerden kaynaklanan kayıplar “Chenn-Flynn motor sürtünmesi” referans nesnesi ile birleştirilebilir veya bu yardımcı yüklerin çektikleri tork biliniyorsa “krank sistemi” parçasına “tork” veya “güç” parçaları kullanılarak ayrı olarak da modellenabilmektedir. GT-Power motor sürtünmesini hesaplamak için Chen-Flynn modelini kullanmaktadır.

$$FMEP = C + (PF * P_{max}) + (MPSF * Speed_{mp}) + (MPSSF * Speed_{mp}^2) \quad (2.1)$$

FMEP Sürtünme Ortalama Efektif Basıncı

P_{max} Maksimum Silindir Basıncı

$Speed_{mp}$ Ortalama Piston Hızı

C FMEP Sabit Kısım

PF Tepe Silindir Basıncı Faktörü

MPSF Ortalama Piston Hızı Faktörü

MPSSF Ortalama Piston Hızının Karesi Faktörü

Bu ampirik ifade toplam motor sürtünmesini maksimum silindir içi basıncı, ortalama piston hızı ve ortalama piston hızının karesinin bir fonksiyonu olarak modellemektedir. Tipik bir motor için yaklaşık sürtünme değerlerinin elde edileceği önerilen katsayılar bulunmaktadır. Yine de laboratuvar testlerinde elde edilen sürtünme değerleri mevcut ise bu katsayıların belirlenmesinde kullanılabilirler. Sürtünmenin ölçülmesi için yaygın olarak kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Biri dinamometrenin motor modda çalıştırıldığı ölçüm yöntemi diğeri ise silindir basıncından hesaplanan indike tork ile fren torkunun karşılaştırılmasıdır.

2.1.7.1 Dinamometre Motor Mod Torkundan Sürtünmenin Elde Edilmesi

Dinamometre motor mod torku, motor dinamometre üzerinde sabit durumda yakıt püskürtmesi yapılarak çalıştırılıyorken, yakıt püskürtmesinin aniden kesilmesi ve motorun dönmeye devam edebilmesi için gerekli olan gücün ölçülmesi ile elde edilmektedir. Bu test motorun tüm işletme devir aralığında gerçekleştirilir. Bazen bu ölçüm sürtünme torku olarak adlandırılır fakat bu tam olarak doğru bir tanımlama değildir. Çünkü ölçüm esnasında motora uygulanan tork, motorun o esnada dolgu değişiminden dolayı pompalama kayıplarını ve sıkıştırma ve genişleme strokunda silindir duvarlarından olan ısı kayıplarını da içermektedir. Bu nedenle sürtünme için elde edilen ölçümler simülasyonda kullanılmadan önce pompalama ve ısı transferi kayıpları motor mod torkundan çıkarılmalıdır.

2.1.7.2 İndike Tork Ölçümünden Sürtünmenin Elde Edilmesi

Motor sürtünmesi, ölçülen silindir basıncından indike torkun hesaplanması ve bu ölçülen indike torkun fren torkundan çıkarılması ile ölçülebilir. Kalan miktar mekanik sürtünme ve yardımcı yüklerin torklarının toplamıdır.

Bu yöntem motor çevrimi süresince yüksek basınç ve sıcaklık değerleri sebebiyle tam olarak doğru silindir basıncı ölçümleri alınmasının zor olması sebebiyle tavsiye edilmemektedir. Bununla birlikte sürtünme torkunun, fren torku ile indike tork arasındaki fark olmasından dolayı, indike tork ölçümündeki küçük bağlı hatalar, sürtünme torkunda büyük hatalara neden olmaktadır. Ayrıca silindir

basıncı ölçümü farklı silindirlerin ortalaması ise silindirden silindire olan değişim ölçülen torku ciddi oranda etkileyecektir. Bu nedenlerden ötürü sürtünmenin indike tork yöntemi yerine motor mod torkundan hesaplanması önerilmektedir.

2.2 Yanma ve Emisyonlar

2.2.1 Giriş ve Tanımlar

İyi kalibre edilmiş bir modele ulaşmak için motordaki yanmanın düzgün bir şekilde uygulanması son derece önemlidir. Bu amaçla öncelikle bazı tanımların yapılması gerekmektedir.

- **Yanma** GT-Power programında yanma belirli miktardaki yanmamış yakıt ve havanın entalpileri ile birlikte silindir içinde yanmamış bir bölgeden yanmış bölgeye transferi, yakıt-hava karışımındaki kimyasal enerjinin açığa çıkması ve yanma ürünlerinin ve konsantrasyonlarının hesaplanması olarak tanımlanmaktadır.

- **Yanma Hızı** Silindir içerisinde gerçekleşen yanma prosesindeki anlık yakıt tüketim hızıdır. GT-Power simülasyonunda bu hız, yakıt ve hava moleküllerinin yanmamış bölgeden yanmış bölgeye transfer olma ve reaksiyonlara katılmaya başlama hızıdır. Bu yanma hızı seçilen yanma modeline göre doğrudan programa girilebilir veya öngörülebilir.

- **Isı Açığa Çıkma Hızı** Yakıt molekülleri içindeki enerjinin silindir içerisinde ısı enerjisine dönüşme hızıdır. Bu miktar yanma hızından farklıdır çünkü denge denklemlerine giren yakıt hava karışımı anlık olarak son yanma ürünlerine kadar parçalanmaz. Eğer tam yanma gerçekleşmeden önce bazı ara yanma ürünleri oluşursa, yakıtın içindeki enerjinin bir kısmı sonraki bir zamana kadar çıkamayacaktır. Bu ısı açığa çıkma hızının yanma hızının gerisinde kalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte silindir içerisindeki yakıt hava karışımı homojen değil ise yanan karışımın eşdeğerlik oranı sabit olmayacaktır. Birim yakıt miktarı başına açığa çıkan enerji, eşdeğerlik oranı ve sıcaklık değişimi ile değişmekte ve ısı açığa çıkma hızı ile yanma hızı arasındaki farkın oluşmasına sebep olmaktadır. GT-Power’da ısı açığa çıkma hızı bir girdi olarak kullanılmaz sadece görünür ısı açığa çıkma hızı simülasyonun çıktısı olarak elde edilir.

- **Görünür Yanma Hızı** Bu ifade bir simülasyonda ölçülen silindir basıncının tekrar üretilebilmesi için öngörülü olmayan yanma modellerinin kullanıldığı durumda simülasyona girilen yanma hızıdır. Görünür yanma hızı ifadesi GT-Power’a özgü bir ifade olup her iki yöndeki yanma hesaplamalarında (yanma hızından basınç veya basınçtan yanma hızı hesaplanması) kullanılmaktadır. GT-Power’da silindir basıncından görünür yanma hızının hesaplanması için iki farklı araç bulunmaktadır.

- **Görünür Isı Açığa Çıkma Hızı** Silindir basıncı ölçümleri referans alınarak hesaplanan anlık ısı enerjisi açığa çıkma hızıdır. Gerçek ısı açığa çıkma hızını belirlemek silindir içindeki kimyasal kompozisyonun anlık olarak bilinmesindeki zorluk sebebiyle mümkün değildir. Bu nedenle ısı açığa çıkma hızı silindir basınç ölçümlerinden elde edilmektedir. Silindir basıncından ısı açığa çıkma hızının hesaplanması için bazı basitleştirici kabuller yapılmalıdır. Bu kabullerden ötürü hesaplanan ısı açığa çıkma hızı gerçek ısı açığa çıkma hızından farklı olacaktır ve bu nedenle de “görünür” olarak ifade edilecektir.

- **İleri Yönde Yanma Hesaplaması** Simülasyonda yanma hızının giriş olduğu ve sonuç olarak da silindir basıncının elde edildiği yanma hesaplamasıdır. Bu GT-Power simülasyonlarında normal olarak kullanılan yöntemdir. Yakıt (ve hava) yanmamış bölgeden yanmış bölgeye yanma hızı ile belirlenen şekilde transfer edilir ve yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin sonucu olarak silindir basıncı elde edilir.

- **Geri Yönde Yanma Hesaplaması** Simülasyonda silindir basıncının giriş olarak kullanılması ile ileri yönlü çalışmada aynı silindir basıncının elde edilmesini sağlayacak görünür yanma hızının sonuç olarak elde edildiği yanma hesaplamasıdır. GT-Power’da geri yönde yanma hesaplaması ile ileri yönde yanma hesaplaması aynı yöntemle yapılmaktadır. Hesaplamanın her adımında, yanmamış bölgeden yanmış bölgeye geçen yakıt miktarı, ölçülen silindir basıncı ile öngörülen silindir basıncı eşleşene kadar itere edilir.

- **Öngörülü Yanma** Yanma hızının modele girilen basınç, sıcaklık, eşdeğerlik oranı, art gaz miktarı, vb. parametreler kullanılarak öngörülmesi ve daha sonra simülasyonda kullanılmasıdır.

- **Öngörülü Olmayan Yanma** Yanma hızının simülasyona doğrudan girildiği yanma modelidir. Öngörülü olmayan yanma modellerinde yanma hızı art gaz miktarı, silindir basıncı, vb. değişkenlerden bağımsızdır. Hava ve yakıt basitçe önceden belirlenen şekilde yanar.

- **Tek Bölgeli Yanma** Silindir içinin tamamının tek bir bölge olarak kabul edildiği yanma modelidir. Tek bölgeli yanma modeli sadece “HCCI yanma”dır.

- **İki Bölgeli Yanma** Silindir içinin yanmış ve yanmamış bölge olarak ikiye ayrıldığı yanma modelidir. GT-Power’daki bütün yanma modelleri “HCCI yanma”, “dizel çoklu püskürtme yanma” ve “dizel jet yanma” hariç iki bölgelidir. İki bölgeli yanma modelinde her iki bölge normalde ayrı sıcaklık bölgeleri olarak modellenirler ancak opsiyonel olarak her iki bölgenin aynı sıcaklıkta olması sağlanabilir.

- **Çok Bölgeli Yanma** Her biri ayrı sıcaklığa sahip birkaç yanmamış ve yanmış bölgeden oluşan yanma modelidir. Öngörülü dizel yanma modeli “dizel çoklu püskürtme yanma” yanmamış ana bölge, yanmamış sprey bölgesi ve yanmış sprey bölgesi olmak üzere 3 bölgelidir. Öngörülü dizel yanma modeli “dizel jet yanma” ise 500’e kadar ana bölgeye ayrılabilir ve her bir ana bölge de kendi içinde yanmamış sıvı yakıt bölgesi, yanmamış hava yakıt karışımı bölgesi ve yanmış gaz bölgesi olmak üzere 3 bölgeye ayrılmaktadır.

- **Denge Kimyası** Yanma ürünleri konsantrasyonlarının bulunduğu sıcaklık ve basıncın uzun süre sabit kaldığı durumdaki konsantrasyonlara eşit olduğu varsayılarak hesaplanması yöntemidir. GT-Power silindir içindeki yanma ürünlerinin öngörüsünde eğer belirli ürünlerin belirlenmesinde farklı yöntemler seçilmemişse bu yöntemi kullanmaktadır.

- **Kimyasal Kinetikler** Yanma ürünlerinin konsantrasyonları belirlenirken ara ürünlerin reaksiyonlarında geçen zamanın dikkate alınmasıdır. Bu yöntem özellikle NO_x emisyonları hesaplanırken kullanılmalıdır. Bununla birlikte CO emisyonlarının öngörüsünde sonuçları iyileştirdiği gösterilmiştir.

2.2.2 İki Bölgeli Yanma Metodolojisi

GT-Power’daki bütün yanma modelleri “HCCI yanma”, “dizel çoklu püskürtme yanma” ve “dizel jet yanma” hariç iki bölgelidir. GT-Power simülasyonlarında yanma aşağıdaki yolla ilerlemektedir:

- Yanmanın başlangıcında (benzinli motorlarda bujinin ateşlenmesi veya dizel motorlarda püskürtmenin gerçekleşmesi) silindir yanmamış bölge ve yanmış bölge olarak ikiye ayrılır. Başlangıç anında bir önceki çevrimden kalan art gazlar ve EGR ile gelen egzoz gazı da dahil olmak üzere silindir içindeki tüm bileşenler yanmamış bölgededir.
- Her bir zaman adımında, bir miktar yakıt hava karışımı yanmamış bölgeden yanmış bölgeye transfer edilir. Yanmış bölgeye transfer edilen yakıt-hava karışımı miktarı yanma hızı olarak tanımlanmaktadır. Bu yanma hızı modele girilebilir veya model tarafından hesaplanabilir.
- Yanmamış yakıt ve hava hesaplanan zaman adımında yanmamış bölgeden yanmış bölgeye transfer edildikten sonra, yanmış bölgenin tamamı için kimyasal denge hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplama o anda yanmış bölgede bulunan her bir bileşenin tüm atomlarını (C, H, O, N) hesaplamaya katar ve yanma ürünlerinden 11 tanesinin (N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , CO , H_2 , N , O , H , NO , OH) denge konsantrasyonlarına ulaşır. Bu ürünlerin denge konsantrasyonları yanmış bölgenin o andaki sıcaklığından önemli oranda etkilenmekte basıncından ise daha az derecede etkilenmektedir.
- Yanmış bölgenin yeni kompozisyonunun elde edilmesinin ardından her bir bileşenin iç enerjisi hesaplanmaktadır. Daha sonra bütün bileşenlerin iç enerjileri toplanarak tüm yanmış bölgenin enerjisi elde edilmiş olur. Enerjinin korunumu prensibi ile yeni yanmamış bölge ve yanmış bölge sıcaklıkları ile silindir basıncı elde edilir.

İki bölgeli modelde aşağıdaki enerji denklemleri ayrı ayrı her bir zaman adımında her bir bölge için çözülmektedir.

Yanmamış Bölge:

$$\frac{d(m_u e_u)}{dt} = -p \frac{dV_u}{dt} - Q_u + \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right) + \frac{dm_{f,i}}{dt} h_{f,i} \quad (2.2)$$

m_u Yanmamış Bölge Kütlesi

V_u Yanmamış Bölge Hacmi

m_f Yakıt Kütlesi

Q_u Yanmamış Bölge Isı Transfer Hızı

m_a Hava Kütlesi

h_f Yakıt Entalpisi

$m_{f,i}$ Enjekte Edilen Yakıt Kütlesi h_a Hava Entalpisi

e_u Yanmamış Bölge Enerjisi $h_{f,i}$ Enjekte Edilen Yakıt Entalpisi

p Silindir Basıncı

Yanmış Bölge:

$$\frac{d(m_b e_b)}{dt} = -p \frac{dV_b}{dt} - Q_b - \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right) \quad (2.3)$$

b harfi yanmış bölgeyi ifade etmektedir.

Yanmamış bölge için yukarıda verilen enerji denkleminde sırasıyla basınç işi, ısı transferi, yanma ve enjekte edilen yakıtın entalpisi ifadeleri yer almaktadır. Denklemdaki üçüncü ifade olan yanma ifadesi anlık yakıt tüketimi veya yanma hızını (dm_f/dt) içermektedir.

2.2.3 Görünür Isı Açığa Çıkma Metodolojisi

Görünür ısı açığa çıkma hızı “silindir” parçasının sonucu olarak anlık olarak değişiminin incelenebileceği şekilde alınmaktadır. Bu sonuç silindir basıncına bağlı olarak hesaplanan yanma sonucu açığa çıkan ısıyı ortaya koymaktadır. Görünür ısı açığa çıkışının diğer simülasyon parametrelerine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır ve tamamen simülasyon sonrası hesaplama çıktısıdır. Isı açığa çıkışının hesaplanması için farklı yöntemler bulunmakla birlikte yöntemlerin aynı olduğu bilindiği sürece farklı araçlarla yapılan ısı açığa çıkma hızlarının karşılaştırılmasına gerek yoktur.

Yöntem tek bölgeli enerji denklemi kullanmaktadır.

$$\frac{d(m_{tot} e_{tot})}{dt} = -p \frac{dV_{tot}}{dt} - Q_{tot} \quad (2.4)$$

tot kısaltması toplam silindiri (yanmış ve yanmamış) ifade etmektedir.

Bu analizde enjekte edilen yakıttan gelen entalpi ihmal edilmiştir. Yukarıdaki denklem ısı açığa çıkma hızı için çözüldüğünde eşitliğin solundaki iç enerji ifadesi, duyulur enerji değişimini içeren bir ifade (s harfi ile) ile oluşum ısısındaki değişimi içeren ifade (f harfi ile) şeklinde bölünmesi gerekmektedir.

$$\frac{d(m_{tot}e_{tot})}{dt} = \frac{d(m_{tot}e_{tot,s})}{dt} + \frac{d(m_{tot}e_{tot,f})}{dt} \quad (2.5)$$

Duyulur enerji, o anki basınç, sıcaklık ve kompozisyondaki iç enerji ile aynı kompozisyon ve basınç ile fakat 298 K referans sıcaklıktaki iç enerji arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.

$$\frac{d(m_{tot}e_{tot,f})}{dt} = -p \frac{dV_{tot}}{dt} - Q_{tot} - \frac{d(m_{tot}e_{tot,s})}{dt} \quad (2.6)$$

Eşitliğin solunda kalan ifadenin ısı açığa çıkma hızı ile toplam yakıt enerjisinin çarpımına eşit olduğu kabul edilmektedir.

$$\frac{d(m_{tot}e_{tot,f})}{dt} = AHHR * m_{f,tot} * LHV_i \quad (2.7)$$

LHV_i yakıtın toplam eşdeğerlik oranındaki ve silindir içindeki o andaki basınç ve sıcaklıktaki alt ısı değeri, $m_{f,tot}$ ise toplam yakıt kütlesidir.

Böylece görünür ısı açığa çıkma hızı için aşağıdaki ifade elde edilmiş olur.

$$AHHR = \frac{\left(-p \frac{dV_{tot}}{dt} - Q_{tot} - \frac{d(m_{tot}e_{tot,s})}{dt}\right)}{m_{f,tot} * LHV_i} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki ifade her bir zaman adımında silindir basıncı sonucu elde edildikten sonra o zaman adımında girdi olarak kullanılacak şekilde çözülür. Diğer bir ifadeyle, ısı açığa çıkışının hesaplanması, ileri yönlü yanma sonuçlarının girdi olarak kullanıldığı simülasyon sonrası bir işlemdir.

2.2.4 Öngörülü ve Öngörülü Olmayan Yanmanın Karşılaştırılması

Modellenen motor tipi için kullanılabilecek birçok yanma modeli olması sebebiyle duruma en uygun yanma modelinin seçilmesi önem arz etmektedir. Bu konuda ilk verilmesi gereken karar yanma modelinin öngörülü, öngörülü olmayan veya yarı öngörülü model olup olmayacağıdır. Bu durum tamamlanan motor modelinin kullanım amacına göre belirlenmektedir.

Öngörülü olmayan model basitçe yanma hızının krank açısının bir fonksiyonu olarak simülasyona girildiği modeldir. Bu önceden belirlenen yanma hızı profili,

silindir içindeki koşullardan bağımsız olarak ve silindir içerisinde verilen yanma hızını sağlayacak kadar yakıt olduğu varsayılararak uygulanacaktır. Bu nedenle yanma hızı art gaz miktarı, püskürtme avansı gibi etkenlerden etkilenmeyecektir. Bu durum eğer modelin kullanım amacı yanma hızını üzerinde küçük etkiye sahip bir değişkenin incelenmesi ise uygundur.

Bununla birlikte modelin kullanım amacı yanma hızı üzerinde doğrudan ve önemli etkiye sahip bir değişkenin incelenmesi ise öngörölü olmayan modellerin kullanılması iyi bir seçim olmayacaktır. Böyle durumlarda öngörölü veya yarı öngörölü modeller kullanılması incelenen değişkendeki değişimin yanma hızı üzerindeki etkilerinin anlaşılması açısından daha uygun olacaktır. Dizel bir motorda püskürtme zamanı ve profilinin etkilerinin incelendiği bir çalışmada anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için öngörü kabiliyeti olan modeller kullanılmalıdır.

Teoride bütün simülasyonlar için en uygun yanma modeli öngörölü yanma modelleridir. Bununla birlikte bazı durumlarda pratik nedenlerden dolayı öngörölü olmayan yanma modellerini tercih etmek de avantajlıdır. Öncelikle öngörölü modeller modele göre değişmekle birlikte oldukça yavaştırlar. Hesaplamalardaki karmaşıklık hesaplama sürelerini oldukça uzatmaktadır. İkinci olarak öngörölü modeller ile tam doğru sonuçlar elde edilebilmesi için ölçüm sonuçları ile kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden ötürü eğer uygun ise öngörölü olmayan modellerin kullanımı, sadece gerekliyse öngörölü yanma modellerinin kullanılması önerilmektedir.

Yarı öngörölü yanma modeli öngörölü yanma modeline iyi bir alternatif olabilmektedir. Yarı öngörölü yanma modelleri yanma hızını önemli ölçüde etkileyen değişkenlere karşı duyarlıdır ve bu değişkenlerdeki değişimlere uygun cevaplar üretmektedir fakat bu cevabı üretmek için fiziksel bir model kullanmamaktadır. Bunun yerine, tablo değerleri veya önemli değişkenlere göre uygun Vibe parametrelerini hesaplayan diğer yöntemlerle belirlenen yanma hızının sisteme girildiği, öngörölü olmayan model metodolojisi uygulanmaktadır. Bu modeller çok daha hızlı çalışmakta ve bazı durumlarda öngörölü modellerden daha doğru sonuçlar üretmektedir.

2.2.5 Öngörülü Yanma Modelleri

2.2.5.1 Doğrudan Püskürtmeli Dizel Çoklu Püskürtme Modeli

Bu yanma modeli doğrudan püskürtmeli dizel motorda tek ve çoklu püskürtmedeki yanma hızlarını ve emisyonları öngörmektedir. Bu modelin temel yaklaşımı yakıtın enjekte edilmesi, buharlaşması, çevresindeki gazlarla karışması ve yanmasını izlemektir. Bu nedenle anlamlı sonuçlara ulaşabilmek için tam doğru bir püskürtme profili kesinlikle gerekmektedir. DIPulse modeli silindir basınç analizinden hesaplanan yanmanın eşleştirilmesi için kalibre edilmelidir.

Silindirin içeriği üç termodinamik bölgeye ayrılmakta ve her bir bölge kendi sıcaklık ve kompozisyonuna sahip olmaktadır. Yanmamış ana bölge emme supapı kapandığı anda silindir içeriğinin tümünü, yanmamış sprej bölgesi enjekte edilen yakıtı ve sürüklenen iş gazını, yanmış sprej bölgesi ise yanma ürünlerini kapsamaktadır. DIPulse modeli püskürtme ve yanma sırasında gerçekleşen bazı fiziksel proseslerinde modellenemediği alt modelleri içermektedir. “Dizel çoklu püskürtme yanma” şablonunda kalibrasyon için kullanılabilecek dört parametre bulunmaktadır.

- **Yakıt Püskürtme** - Birbiri ardına gelen her püskürtme olayı bir püskürtme sinyali olarak tanımlanmakta ve her bir sinyal diğer sinyallerden ayrı bir şekilde izlenmektedir. İstenilen sayıda püskürtme sinyali oluşturulabilir ve ön, ana ve art püskürtme için özel bir ayırım gerektirmemektedir. Enjekte edilen yakıt yanmamış sprej bölgesine eklenmektedir.
- **İlerleme** - Silindir içine püskürtülen sprej ilerledikçe, sprej demetine karışan yanmamış ve yanmış çevre gazları sebebiyle yavaşlamaktadır. Yakıt püskürtmelerinin karışması bu ilerleme mekanizması ile gerçekleşmektedir. İlerleme hızı, ampirik bir sprej girişim kuralına momentumun korunumu kanunu uygulanarak belirlenmekte ve **Girişim Hızı Çarpanı** parametresi ile değiştirilebilmektedir.
- **Buharlaşma** - Yakıt çevre gazları ile karıştıkça ısınarak buharlaşmaktadır.
- **Karışma** - Buharlaşan yakıt ve püskürtmeyle birlikte ilerleyen iş gazı türbülanslı bir şekilde karışmaktadır.

- **Tutuşma** - Her bir püskürtmedeki karışım Arrhenius ifadesi ile modellenen bir tutuşma gecikmesi modeline sokulmakta ve bu model **Tutuşma Gecikmesi Çarpanı** ile değiştirilebilmektedir.

- **Ön Karışımli Yanma** - Dizel motorlarında silindir içersine püskürtölmüş ve hava ile karışmış olan yakıtın ani olarak tutuşması ile gerçekleşen süreç ve hemen sonrası ön karışımli yanma olarak tanımlanmaktadır. Bu yanmanın hızının kinetik olarak sınırlandığı kabul edilmekte ve **Ön Karışımli Yanma Hızı Çarpanı** parametresi ile değiştirilebilmektedir.

- **Karışım Kontrollü Yanma** - Ön karışımli yanma safhasının ardından yakıt, yanan alevin ve yanma ürünlerinin içersine doğru püskürtölmeye devam ederek karışmaya ve yanmaya devam etmektedir. Bu sürece karşım kontrollü yanma veya difüzyonlu yanma adı verilmekte ve bu yanmanın hızı **Karışım Kontrollü Yanma Hızı Çarpanı** parametresi ile değiştirilebilmektedir.

2.2.6 Öngörölü Yanma Modellerinin Kalibrasyonu

Öngörölü yanma modelleri yanma prosesindeki fiziğı modelleyerek yanma hızının öngörölmesini sağlamaktadır. Böylece model, girdilerinde herhangi bir değışikliğı gerek kalmadan değışen çalışma koşullarına göre otomatik olarak ayarlama yapabilecektir. Öngörölü yanma modelleri bazı basitleştirmeler ve kabuller içerdüğinden, motorda gerçekleşen yanma ile tam olarak eşleşebilmesi için bazı fiziksel sabitlerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu kalibrasyon prosesinin amacı geniş bir çalışma aralığında en iyi eşleşmeyi sağlayacak tek bir set model sabitlerinin bulunmasıdır. Bu amaçla izlenecek adımlar aşağıda listelenmiştir.

- **1.Adım:** Gerekli ölçüm verilerinin toplanması
- **2.Adım:** Ölçülen yanma hızlarının ve silindir başlangıç şartlarının hesaplanması ve ölçüm ile model sonuçlarının karşılaştırılması
- **3.Adım:** Öngörölü yanma kalibrasyon modelinin oluşturulması
- **4.Adım:** Yanma modeli sabitlerinin belirlenmesi için parametrik çalışma gerçekleştirilmesi
- **5.Adım:** Sonuçların analiz edilmesi ve optimum sabit setinin belirlenmesi
- **6.Adım:** Doğrulama simölasyonunun çalıştırılması

2.2.7 Egzoz Emisyonları

GT-Power egzoz emisyonlarını ve vuruntuyu modelleme yeteneğine sahiptir ve denge kimyasını kullanarak 11 çeşit yanma ürününün (N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , CO , H_2 , N , O , H , NO , OH) öngörüsünü yapabilmektedir.

2.2.7.1 NO_x

Bütün GT-Power yanma modelleri NO_x konsantrasyonlarının hesaplanmasında kullanılabilmektedir. Bu seçenek yanma modelinde “silindir içi NO_x ” referans nesnesi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. NO_x emisyonları genişletilmiş Zeldovich mekanizması kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaların sonuçları, silindirde tutulan kütleyle (hava miktarı, EGR oranı, tutulma oranı), yakıt hava oranına ve yanma hızına çok duyarlıdır. Bu nedenle öncelikle bu sonuçların gerçek ölçüm sonuçları ile iyi bir şekilde örtüşmesi sağlanmalı ve daha sonra simülasyonda elde edilen NO_x değerleri ile ölçüm değerleri kıyaslanmalıdır. NO_x emisyonları silindir içinde oluşan maksimum sıcaklıktan fazlasıyla etkilenmektedir ve bu nedenle maksimum silindir sıcaklığının hesaplanmasında oldukça kötü performans gösteren tek sıcaklık bölgesi yanma yerine iki sıcaklık bölgesi yanma hesaplamaları kullanılmalıdır. Model farklı çalışmalarda kullanılmadan önce “silindir içi NO_x ” referans şablonu içindeki parametre kullanılarak simüle edilen NO_x emisyonları gerçek ölçüm sonuçları ile eşleşecek şekilde kalibre edilmelidir. Standart kimyasal denge denklemleri ve “silindir içi NO_x ” referans şablonu kullanılarak öngörülen NO_x emisyonları sadece NO emisyonlarını içermektedir.

2.2.7.2 CO_2

Bütün GT-Power yanma modelleri CO_2 konsantrasyonlarını hesaplamaktadır. CO_2 emisyonu yakıttaki hidrokarbonların yanması sonucu oluşan birincil üründür ve otomatik olarak hesaplanmaktadır.

2.2.7.3 CO

Bütün GT-Power yanma modelleri denge modeli kullanarak CO konsantrasyonlarını hesaplamaktadır. Bu seçenek yanma modelinde “silindir içi

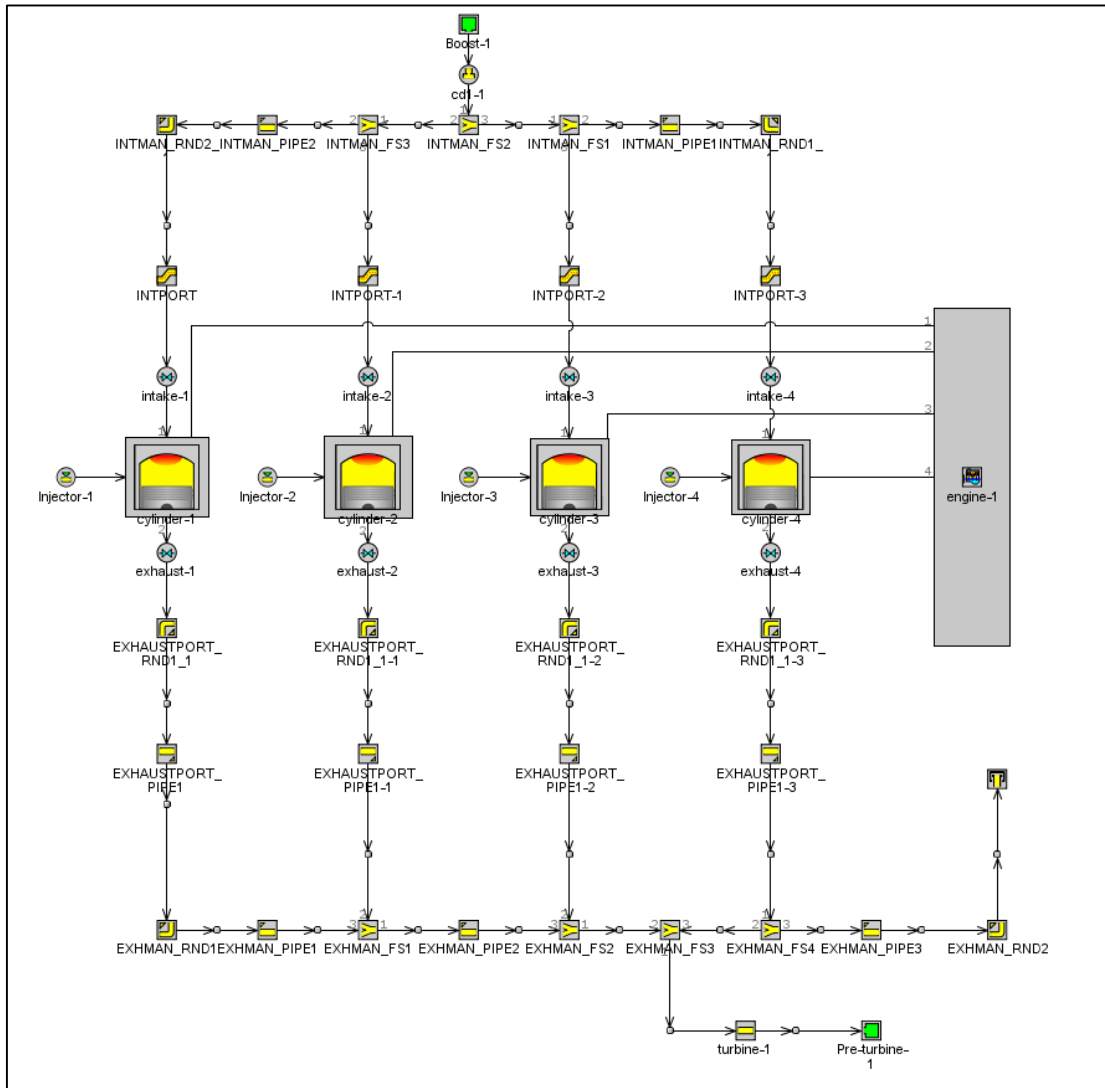
CO” referans nesnesi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu modelin kullanımı yanma hesaplamalarının iki sıcaklık bölgesi olarak yapılmasını gerektirmektedir.

2.2.7.4 İs

Sadece “dizel çoklu püskürtme yanma” ve “dizel jet yanma” öngörülü dizel yanma modelleri is konsantrasyonlarının hesaplanmasını sağlayabilirler. Bu şablonlar is konsantrasyonlarının hesaplanması için üç ayrı modelleme seçeneğine sahiptir: Hiroyasu, değiştirilmiş Hiroyasu ve Nagle ve Strickland-Constable. İs konsantrasyonu yüksek doğrulukla öngörülmesi oldukça zor olan bir yanma ürünüdür. Bu nedenle öncelikle gerçek ölçüm sonuçları ile kalibre edilmeli ve ondan sonra ancak tam olarak is konsantrasyonu elde etmek yerine is konsantrasyonunun seviyesi hakkında bilgi sahibi olabilmek için kullanılmalıdır.

2.3 Motor Modelinin Oluşturulması

GT-Power programı kullanılarak 1498 cm^3 hacminde 4 silindirli doğrudan püskürtmeli 8 supaplı maksimum gücü 3600 d/d hızda 88 kW ve maksimum torku 1750-2500 d/d aralığında 270 Nm olan bir dizel motor modellenmiştir. Şekil 2.1’de GT-Power programı kullanılarak oluşturulan motor modeli görülmektedir.



Şekil 2.1 GT-Power kullanılarak oluşturulan dizel motor modeli

Oluşturulan motor modeli dizel motorun emme manifoldu girişi ile egzoz manifoldu çıkışı arasında kalan sistemlerin modelini kapsamaktadır ve bu noktalardaki sınır koşulları “dolgu” ve “türbin öncesi” “ortam sonlandırma” parçaları kullanılarak girilmiştir. Motor modelinde dizel motorun emme ve egzoz manifoldu, emme ve egzoz portları, emme ve egzoz supapları, enjektörler, silindirler ve krank sistemi modellenmiş ve bu parçalar içindeki parametrik veriler

ve fiziksel alt modeller kullanılarak içten yanmalı motorda gerçekleşen yanma olayı simüle edilmiştir.

2.3.1 Krank Sistemi

Bu nesne “krank sistemi” parçasının özelliklerini belirleyerek içten yanmalı motorun krank şaftının kinematiklerinin ve rijit dinamiğinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Rijit dinamik model her piston yüzeyinde oluşan basınç kuvvetinin krank çıkışında torka dönüştürülmesini sağlamaktadır. Çeşitli noktalardaki motor torku (silindir, biyel kolu muylusu, şaft) çıktı olarak üretilmektedir.

Tablo 2.1 Krank sistemi parametreleri

<i>Nesne Adı</i>		<i>Modeldeki Yeri</i>
Krank sistemi		
<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel		
Motor tipi	4-zamanlı	
Hız/Yük Modu Seçimi	Hız	
Motor Devri	[DEVİR]	Parametrik olarak tanımlanmıştır.
Motor Sürtünme Nesnesi veya SOEB	Sürtünme	Chenn-Flynn motor sürtünmesi şablonu kullanılmıştır.
Çevrim başlangıcı	-129°KMA	
Silindir geometrisi		
Silindir geometrisi nesnesi	Geometri	Silindir geometrisi şablonu kullanılmıştır.
Ateşleme sırası		
Silindir numaraları	1-3-4-2	
Yanma faz açıları	0-180-180-180	

2.3.1.1 Chenn-Flynn Motor Sürtünmesi

Bu nesne Chenn-Flynn sürtünme modelinin parametrelerinin girilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu nesnenin parametreleri girilirken motor test düzeneğinde motor belirli bir devirde çalışırken yakıtın birden kesilerek motorun dinamometrede aynı devirde dönmesi için gerekli torkun motor milinden ölçülmesi ile elde edilen tork değerleri kullanılmaktadır. Ancak bu tork değerlerinin içinde motorun pompalama kayıpları ve sıkıştırma ile genişleme strokunda silindir duvarlarından olan ısı kayıpları da bulunmaktadır. Chenn-Flynn sürtünme modelinin sabit kısmının değerlerinin elde edilebilmesi için aşağıdaki yöntem sırası ile uygulanmıştır.

- Motor modelinin tamamı kullanılarak, püskürtme miktarları sıfıra çekilmiştir. Dolayısıyla dinamometrenin motor modda çalıştırıldığı durum simüle edilmiş ve tüm güç, tork, vb. değerler negatif olarak öngörülmüştür.
- “Chenn-Flynn motor sürtünmesi” nesnesi içindeki tüm katsayılar, “maksimum silindir içi basıncı faktörü” hariç sıfır olarak girilmiştir. Silindir basıncının sürtünme üzerindeki etkisini yaklaşık olarak vermek için bu katsayı 0,005 olarak girilmiştir.
- Model içindeki duvar sıcaklıklarının hesaplanmasında kullanılan “duvar sıcaklığı çözücüsü” referans nesnelerinin hepsi kapalı duruma getirilmiş ve kullanılmamıştır.
- Dinamometrenin motor modda çalıştığı durumda motor yağ sıcaklığı ve motor devrine göre değişen sürtünme torku haritasındaki değerler interpolasyon yoluyla elde edilmiş ve bu noktalar için simülasyon çalıştırılmıştır.
- Ölçülen motor mod torkları için fren ortalama efektif basınçları hesaplanmıştır.
- Motor mod simülasyonunda elde edilen fren ortalama efektif basınçları ölçülen fren ortalama efektif basınçlarından çıkarılmıştır ve bu esnada elde edilen negatif değerler pozitif alınmıştır.
- Elde edilen negatif değerler sürtünme ortalama efektif basınçları olup sadece silindir basıncı sebebiyle oluşan sürtünmeyi içermemektedir. Bu etki zaten “maksimum silindir içi basıncı faktörü” ile eklenmektedir.

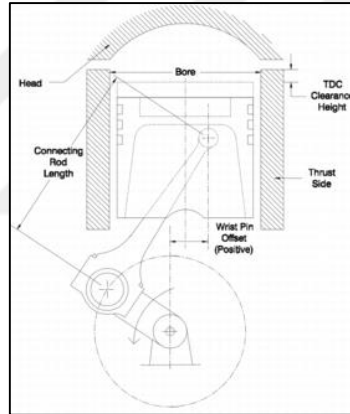
Böylece elde edilen sürtünme ortalama efektif basınçları Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Sürtünme ortalama efektif basıncının elde edilmesi

<i>Motor Devri</i>	<i>Yağ Sıcaklığı</i>	<i>Ölçülen Motor Mod Torku</i>	<i>Ölçülen Motor Mod FOEB</i>	<i>Simülasyondan elde edilen FOEB</i>	<i>Sürtünme Ortalama Efektif Basıncı</i>
d/d	°C	Nm	Bar	Bar	Bar
2250	92	19,55	1,64	2,45	1,13
2750	90	21,20	1,78	2,81	1,41
3250	95	22,40	1,88	3,58	1,95
3600	94	23,17	1,94	4,07	1,98
4000	92	24,53	2,06	4,63	2
4500	91	27,05	2,27	4,81	1,59

2.3.1.2 Silindir Geometrisi

Bu nesne motor silindir ve krankının geometrik ölçülerinin girilmesi için kullanılmaktadır. Motorun silindir ve krankına ait tanımlamalar Şekil 2.2’de ve ölçüler ise Tablo 2.3’de verilmiştir.

**Şekil 2.2** Silindir ve krank ölçüleri**Tablo 2.3** Silindir geometrisi şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Silindir çapı	mm	73,5
Kurs boyu	mm	88,3
Biyel kolu uzunluğu	mm	136,8
Sıkıştırma oranı		16
ÜÖN’da piston kafa mesafesi	mm	0,5
Piston krank kaçıklığı		
Piston pimi krank kaçıklığı	mm	0
Kurs boyu tanımı		2xkrank yarıçapı
ÜÖN konum tanımı		Piston pozisyonu

2.3.1.3 Akışkan Başlangıç Şartı

Bu nesne akış elemanlarındaki başlangıç şartlarını belirlemek için kullanılmaktadır.

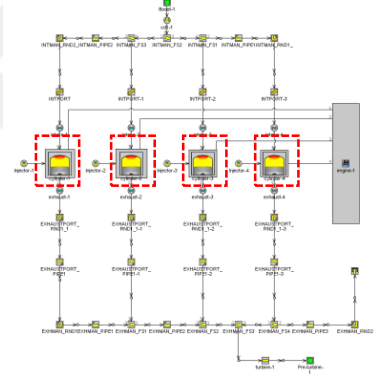
Tablo 2.4 Akışkan başlangıç şartı şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Basınç (Mutlak)	bar	1
Sıcaklık	K	298,15
Akışkan	-	hava

2.3.2 Silindir

Bu nesne motor silindirinin özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 2.5 Silindir parametreleri

<i>Parça Adı</i>		<i>Modeldeki Yeri</i>
Silindir		
<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel		
Başlangıç Şartı Nesnesi	dolgu	Akışkan başlangıç şartı şablonu
Silindir Duvar Sıcaklıkları Nesnesi	sduvar	Silindir duvar sıcaklığı şablonu
Isı Transferi Nesnesi	ısıtr	Silindir içi ısı transferi şablonu
Akış Nesnesi	akış	Silindir içi akış şablonu
Yanma Nesnesi	DIPulse	Dizel çoklu püskürtme şablonu
Ölçülen Silindir İçi Basıncı Nesnesi	-	
Silindir İçi Basınç Analiz Modu	kapalı	

2.3.2.1 Akışkan Başlangıç Şartı

Bu nesne akış elemanı içindeki başlangıç şartlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Krank sistemi nesnesi içindeki akışkan başlangıç şartı nesnesinden farkı simülasyonun başlangıcında silindir içindeki şartların belirlenmesinde kullanılmasıdır.

Tablo 2.6 Akışkan başlangıç şartı şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel			
Basınç (Mutlak)	mbar	[DOLGU BASINCI]	Parametrik tanımlama
Sıcaklık	°C	[DOLGU SICAKLIĞI]	Parametrik tanımlama
Akışkan	-	hava	

2.3.2.2 Silindir Duvar Sıcaklığı

Bu nesne “silindir” ve “krank sistemi” nesneleri tarafından çağrılmakta ve ısı transferi hesaplamalarında silindir iç yüzey sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu şablon ile supap yüzey sıcaklıklarının da belirlendiği kafa sıcaklığı, piston yüzey sıcaklığı ve silindir duvar sıcaklığı belirlenmektedir. Tam yük ve kısmi yük durumları için ayrı ayrı belirlenen sıcaklıklar Tablo 2.7’de görülmektedir.

Tablo 2.7 Silindir duvar sıcaklığı şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer [Tam Yük/Kısmi Yük]</i>
Genel		
Kafa Sıcaklığı	K	550/428,15
Piston Sıcaklığı	K	550/428,15
Silindir Sıcaklığı	K	400/373,15

2.3.2.3 Silindir İçi Isı Transferi

Bu nesne “silindir” parçasından olan ısı transferinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Silindir içerisinde iş gazı ile yanma odası duvarları arasında gerçekleşen ısı transferinin modellenmesinde kullanımı kolay ve endüstriyel olarak da standart hale gelen Woschni modeli kullanılmaktadır.

Tablo 2.8 Silindir içi ısı transferi şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Isı Transfer Modeli	-	WoschniGT
Isı Taşınım Çarpanı	-	1
Kafa/Silindir Çapı Alan Oranı	-	0,9838
Piston/Silindir Çapı Alan Oranı	-	1,52
Isı Radyasyon Çarpanı	-	1
Taşınım Sıcaklığı Değerlendirmesi	-	hibrit

2.3.2.4 Silindir İçi Akış

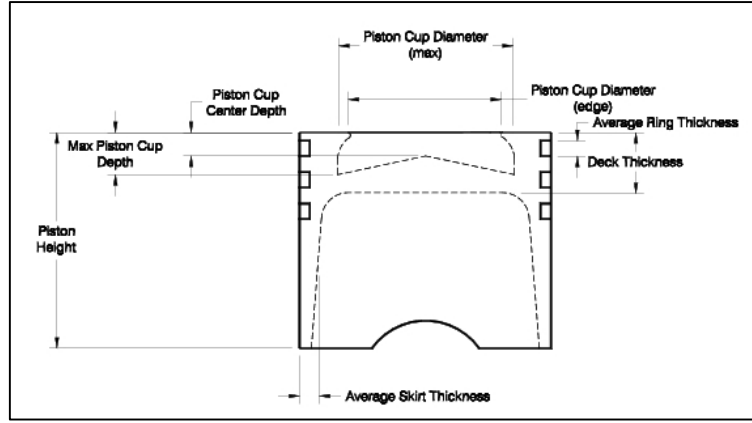
Bu nesne ile silindir içerisindeki akış modellenmekte ve yanma modelleri tarafından kullanılan girdap, karışma ve türbülans hesaplanmaktadır.

Tablo 2.9 Silindir içi akış şablonu parametreleri

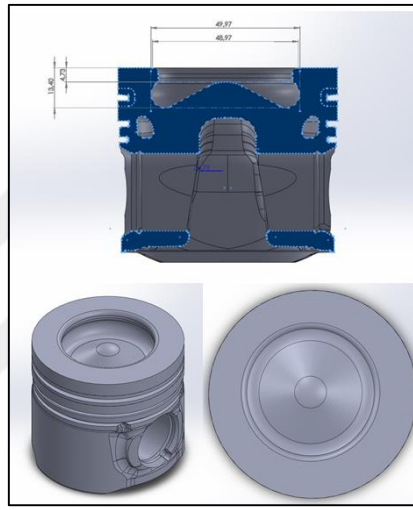
<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Geometri		
Piston Çanağı Nesnesi	çanak	Piston çanağı şablonu
Başlangıç Değeri/Girilen Değer		
Girdap	0,1	
Girdap Tipi	girdap sayısı	
Karışma	0,1	
Karışma Tipi	karışma sayısı	
Türbülans Şiddeti	1	
Türbülans Şiddeti Tipi	Norm. edilmiş türbülans yoğunluğu	
Türbülans Uzunluğu Skalası, Norm. Edilmiş	0,1	
Karışma Seçenekleri		
Karışma Modeli	v70	
Karışma Bozulma Katsayısı 1	0,4	
Karışma Bozulma Katsayısı 2	1,5	
Dağılma Çarpanı	1	

2.3.2.4.1 Piston Çanağı

Bu nesne piston yüzey geometrisinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Modellenen motorun üç boyutlu piston katı modeli ve bu model üzerinden alınarak motor modelinde kullanılan ölçüler Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Piston ölçüleri



Şekil 2.4 Modellenen pistondan alınan ölçümler

Tablo 2.10 Piston çanağı şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Piston Çanağı Çapı	mm	49,97
Maksimum Çaptaki Piston Çanağı Derinliği	mm	13,4
Piston Çanağı Çapı (Piston yüzeyinde)	mm	48,97
Piston Çanağı Merkez Derinliği	mm	4,73

2.3.2.5 Dizel Çoklu Püskürtme Yanma

Bu yanma modeli tek veya çoklu püskürtme yapılan dizel motorlardaki yanma hızının ve emisyonların öngörülmesinde kullanılmaktadır.

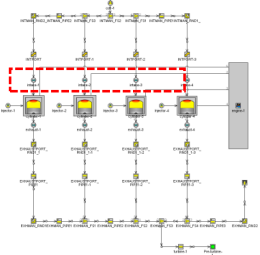
Tablo 2.11 Dizel çoklu püskürtme yanma şablonu parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Model Versiyonu	-	v75
Girişim Hızı Çarpanı	-	1,27
Tutuşma Gecikmesi Çarpanı	-	1,15
Ön Karışım Yanma Hızı Çarpanı	-	1,35
Karışım Kontrollü Yanma Hızı Çarpanı	-	1,28

2.3.3 Supap Bağlantısı (Emme Supapı için)

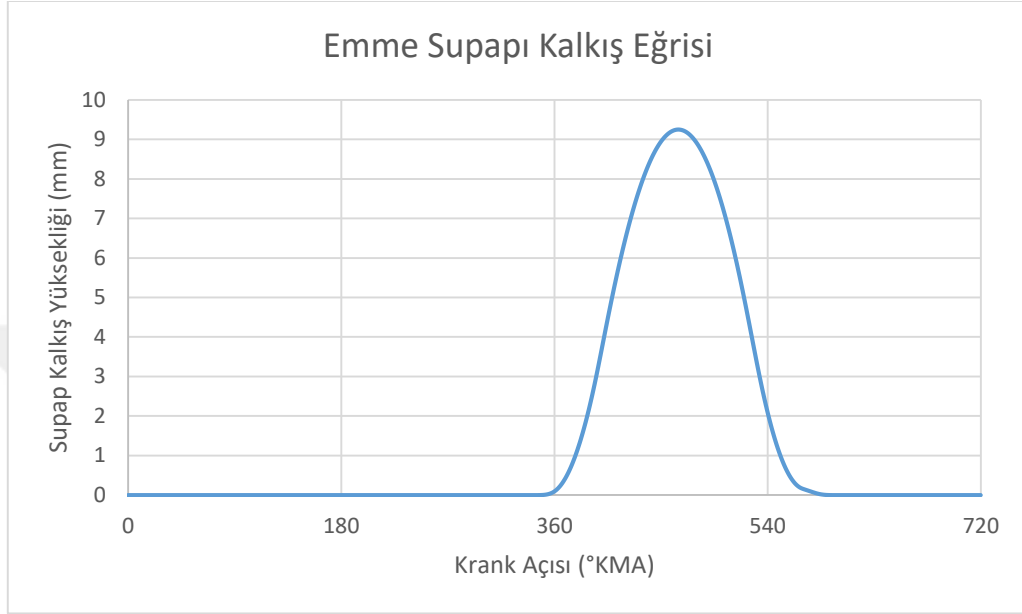
Modellenen içten yanmalı dizel motorda 4 tanesi emme supapı 4 tanesi ise egzoz supapı olmak üzere toplam 8 supap bulunmaktadır. Emme supapının maksimum kalkış yüksekliği 9,25 mm'dir.

Tablo 2.12 Supap bağlantısı (emme supapı için) parametreleri

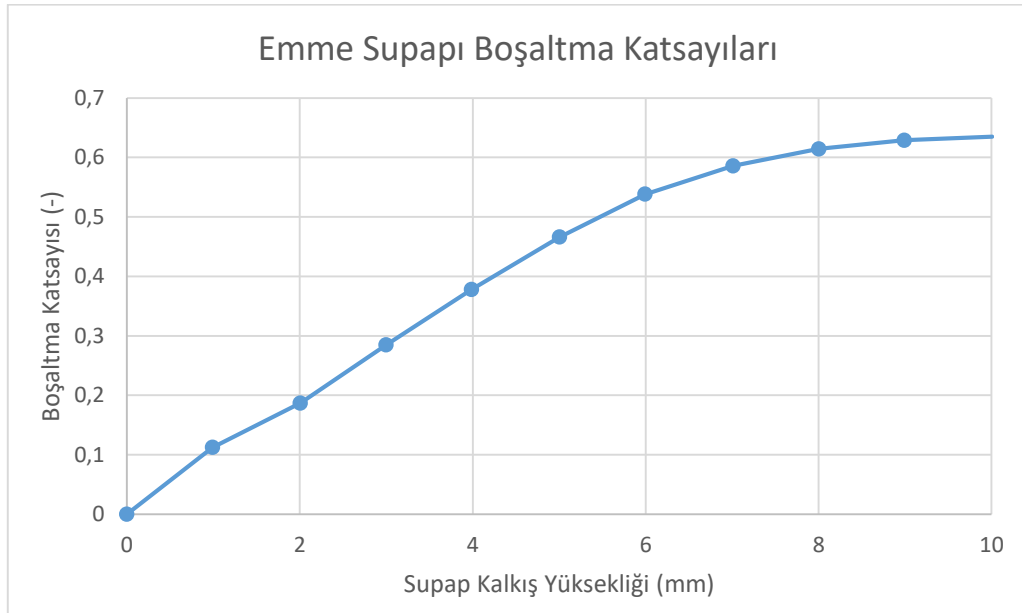
<i>Parça Adı</i>	<i>Modeldeki Adı</i>	<i>Modeldeki Yeri</i>
Supap Bağlantısı	emme	
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Referans Supap Çapı	mm	27,5
Boşaltma Katsayısı Ref. Alan Tanımlaması		sabit
Supap Boşluğu	mm	0
Kam Zamanlaması	Krank Açısı	0
Kam Zamanlaması Başlangıç Referansı		ÜÖN (Yanma)
Kam Zamanlaması Kalkış Dizisi Referansı		Dizi başlangıcı
İleri Ayarlar		
Akış Katsayısı Kalkış Birimi		Kalkış/Çap Oranı
Sabitler		
Akış Alanı Çarpanı		1
Delik Sayısı		1
Açı Çarpanı		0,985

Tablo 2.12 Supap bağlantısı (emme supapı için) parametreleri (devamı)

Kalkış Çarpanı		1
Girdap Katsayısı Çarpanı		1
Karışma Katsayısı Çarpanı		1



Şekil 2.5 Emme supapı kalkış eğrisi

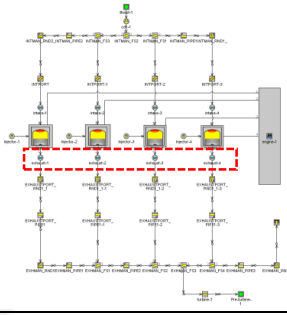


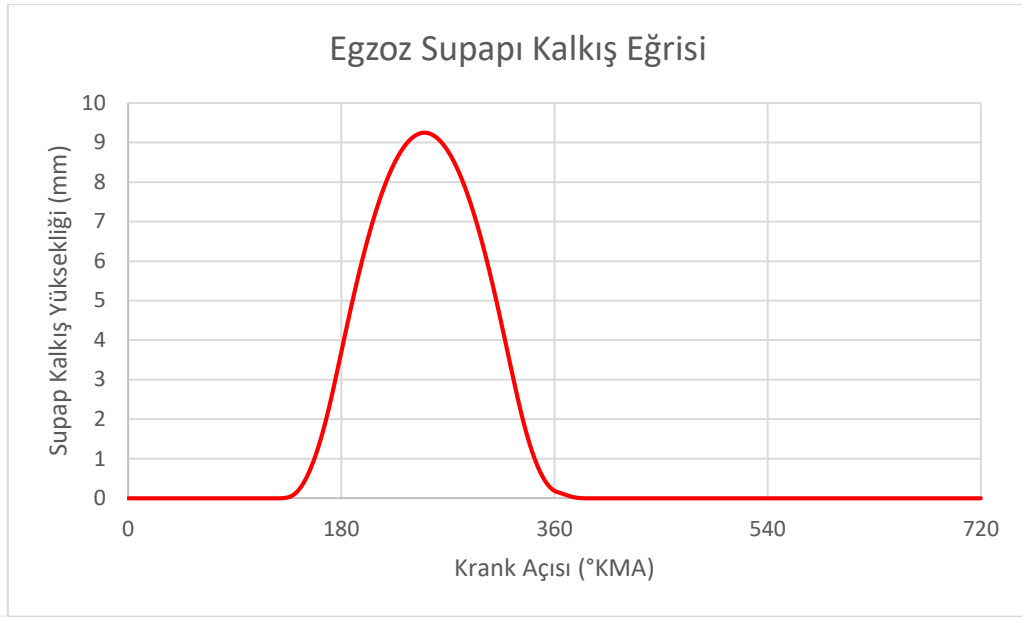
Şekil 2.6 Emme supapı boşaltma katsayısı eğrisi

2.3.4 Supap Bağlantısı (Egzoz Supapı için)

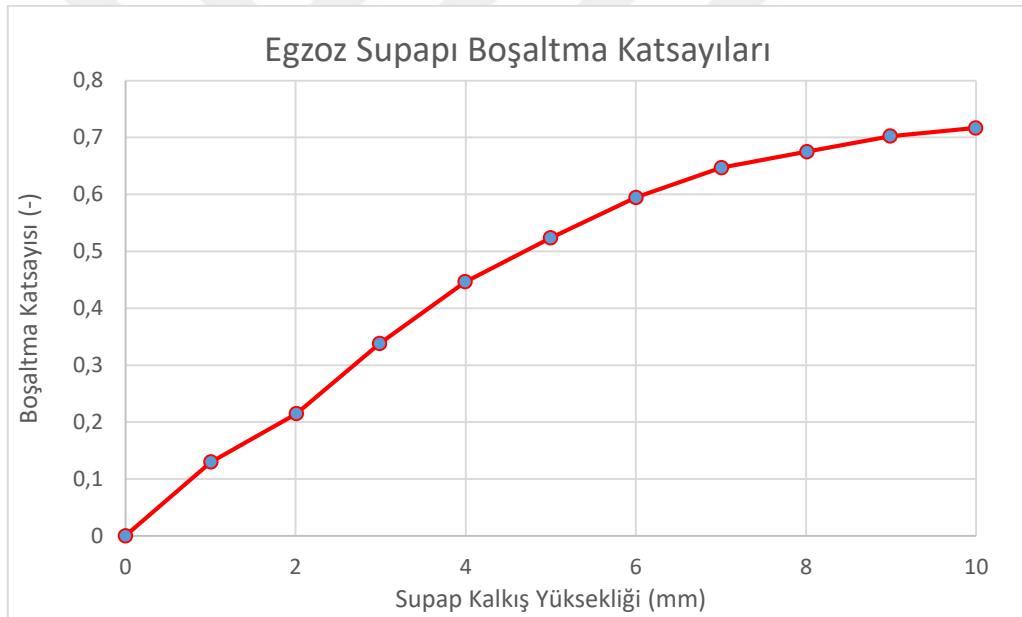
Modellenen içten yanmalı dizel motorda 4 tanesi emme supapı 4 tanesi ise egzoz supapı olmak üzere toplam 8 supap bulunmaktadır. Egzoz supapının maksimum kalkış yüksekliği 9,25 mm'dir.

Tablo 2.13 Supap bağlantısı (egzoz supapı için) parametreleri

<i>Parça Adı</i>	<i>Modeldeki Adı</i>	<i>Modeldeki Yeri</i>
Supap Bağlantısı	egzoz	
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Referans Supap Çapı	mm	24,5
Boşaltma Katsayısı Ref. Alan Tanımlaması		sabit
Supap Boşluğu	mm	0
Kam Zamanlaması	Krank Açısı	0
Kam Zamanlaması Başlangıç Referansı		ÜÖN (Yanma)
Kam Zamanlaması Kalkış Dizisi Referansı		Dizi başlangıcı
İleri Ayarlar		
Akış Katsayısı Kalkış Birimi		Kalkış/Çap Oranı
Sabitler		
Akış Alanı Çarpanı		1
Delik Sayısı		1
Açı Çarpanı		0,99
Kalkış Çarpanı		1
Girdap Katsayısı Çarpanı		1
Karışma Katsayısı Çarpanı		1



Şekil 2.7 Egzoz supapı kalkış eğrisi



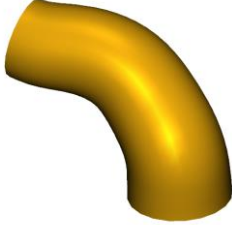
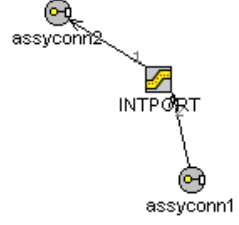
Şekil 2.8 Egzoz supapı boşaltma katsayısı eğrisi

2.3.5 Emme Portu

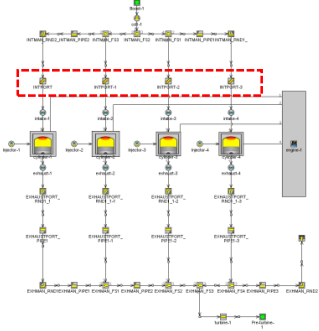
Modellenen içten yanmalı motorun emme portu, egzoz portu, emme manifoldu ve egzoz manifoldu motorun üç boyutlu modeli kullanılarak “.stl” formatında kaydedilmiş ve daha sonra GT-Power programının GEM-3D alt programı kullanılarak geometrik olarak modellenmiştir. Böylece hem parça ölçüleri hem de giriş ve çıkış yüzeyleri arasındaki oryantasyon gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. Portlar modellenirken portlarda basınç kaybı olmadığı kabul

edilmiştir. Basınç kayıpları emme supaplarında boşaltma katsayıları ile modellenmiştir.

Tablo 2.14 Emme portunun modellenmesi aşamaları

CAD Modeli	GEM-3D Modeli	Geometrik Olarak Modellenmiş Parça
		

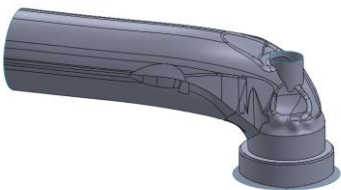
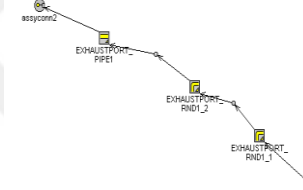
Tablo 2.15 Emme portu parametreleri

Parça Adı	Modeldeki Adı		Modeldeki Yeri	
Emme Portu	Emme Portu			
Parametre	Birim	Değer	Açıklama	
Geometri				
		1	2	3
Giriş Noktasından Uzaklık	mm	0	46,8	89,7
Belirtilen Mesafedeki Çap	mm	27,45	31,2	34,6
Dirsek Yarıçapı	mm	-	42,6	43,1
Dirsek Açısı		-	63	57
Genel				
Ayrıklaştırma Uzunluğu	mm	20		
Başlangıç Şartı Adı		dolgu		
Termal				
Girilen Duvar Sıcaklığı	K	303		
Isı Transfer Çarpanı		1,5		
Basınç Düşümü				
Sürtünme Kaynaklı Basınç Düşümü Yoktur.				

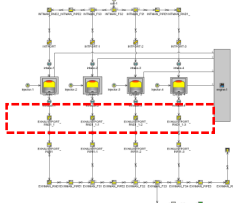
2.3.6 Egzoz Portu

Modellenen içten yanmalı motorun emme portu, egzoz portu, emme manifoldu ve egzoz manifoldu motorun üç boyutlu modeli kullanılarak “.stl” formatında kaydedilmiş ve daha sonra GT-Power programının GEM-3D alt programı kullanılarak geometrik olarak modellenmiştir. Böylece hem parça ölçüleri hem de giriş ve çıkış yüzeyleri arasındaki oryantasyon gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. Portlar modellenirken portlarda basınç kaybı olmadığı kabul edilmiştir. Basınç kayıpları emme supaplarında boşaltma katsayıları ile modellenmiştir. Egzoz portu modellenirken iki parça kullanılmıştır.

Tablo 2.16 Egzoz portunun modellenme aşamaları

CAD Modeli	GEM-3D Modeli	Geometrik Olarak Modelenmiş Parça
		

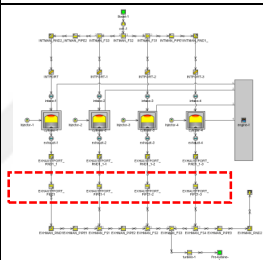
Tablo 2.17 Egzoz portu dirsek kısmı parametreleri

Parça Adı	Modeldeki Adı		Modeldeki Yeri
Egzoz Portu Dirsek Kısım	Egzoz Portu Dirsek Kısım		
Parametre	Birim	Değer	Açıklama
Genel			
Giriş Tarafı Alanı	mm ²	648,1	
Giriş Tarafı Islak Çevresi	mm	90,7	
Çıkış Tarafı Alanı	mm ²	727,8	
Çıkış Tarafı Islak Çevresi	mm	96,2	
Uzunluk	mm	-	
Ayrıklaştırma Uzunluğu	mm	20	
Başlangıç Şartı Adı		egzoz	
Yüzey Pürüzlülüğü için Malzeme		Alüminyum	

Tablo 2.17 Egzoz portu dirsek kısmı parametreleri (devamı)

Dirsek Yarıçapı	mm	58,5	
Dirsek Açısı	derece	18,2	
Termal			
Girilen Duvar Sıcaklığı	K	550	
Isı Transfer Çarpanı		2	
Basınç Düşümü			
Sürtünme Kaynaklı Basınç Düşümü Yoktur.			

Tablo 2.18 Egzoz portu düz boru kısmı parametreleri

<i>Parça Adı</i>	<i>Modeldeki Adı</i>		<i>Modeldeki Yeri</i>
Egzoz Portu Düz Boru Kısmı	Egzoz Portu Düz Boru Kısmı		
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel			
Giriş Tarafı Alanı	mm ²	485,5	
Giriş Tarafı Islak Çevresi	mm	78,5	
Çıkış Tarafı Alanı	mm ²	489	
Çıkış Tarafı Islak Çevresi	mm	78,8	
Uzunluk	mm	42,5	
Ayrıklaştırma Uzunluğu	mm	20	
Başlangıç Şartı Adı		egzoz	
Yüzey Pürüzlülüğü için Malzeme		Alüminyum	
Dirsek Yarıçapı	mm	-	
Dirsek Açısı	derece	-	
Termal			
Girilen Duvar Sıcaklığı	K	550	
Isı Transfer Çarpanı		2	
Basınç Düşümü			
Sürtünme Kaynaklı Basınç Düşümü Yoktur.			

2.3.7 Emme Manifoldunun Modellenmesi

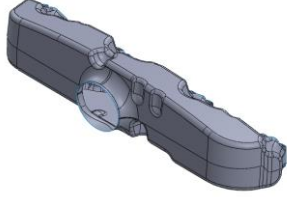
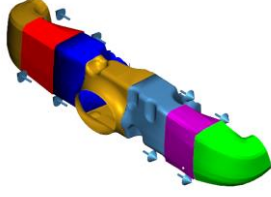
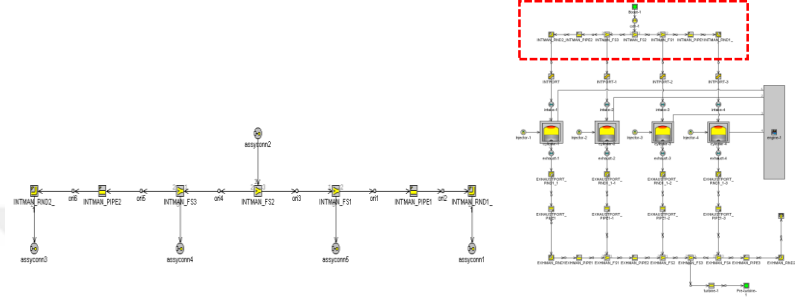
Modellenen içten yanmalı motorun emme manifoldu modellenirken öncelikle manifoldun üç boyutlu modeli elde edilmiş ve daha sonra manifold mümkün olduğunca düzgün kısımlardan oluşan parçalara bölünerek, tüm manifoldun düz borular, dirsekler ve T-Parçalardan oluşacak şekilde ayrıştırılması sağlanmıştır. Daha sonra her bir alt parçanın birbiri ile olan akış geçişleri belirtilerek manifoldun geometrik olarak modellenmesi sağlanmıştır.

Emme manifoldunun iç duvar yüzey sıcaklıklarının hesaplanabilmesi için “duvar sıcaklığı çözücüsü” şablonu kullanılmıştır. Duvar sıcaklığı elemanlar içinden geçen akışkanın özellikleri, elemanın malzeme ve ısı özellikleri ile dış ortam şartlarına ilişkin bilgiler kullanılarak hesaplanmaktadır. “Emme manifoldu iç duvarları” isimli bu şablona ait parametreler Tablo 2.19’da verilmiştir.

Tablo 2.19 Emme manifoldu duvar sıcaklığı çözücüsü parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Dış Ortam Taşınım Sıcaklığı	°C	25
Dış Ortam Taşınım Katsayısı	W/(m ² -K)	5
Yüzey Yayırlık Katsayısı	-	0,9
Cidar Kalınlığı	mm	4,63
Cidar Malzemesi	-	Alüminyum

Tablo 2.20 Emme manifoldunun modellenmesi aşamaları

<i>CAD Modeli</i>	<i>GEM-3D Modeli</i>
	
<i>Geometrik Olarak Modellenmiş Parça</i>	
	

2.3.8 Egzoz Manifoldunun Modellenmesi

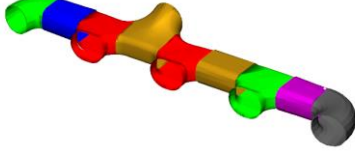
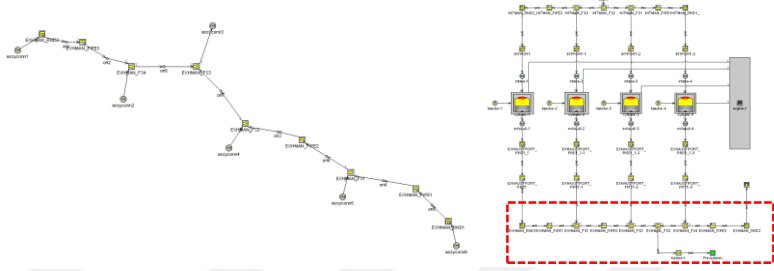
Modellenen içten yanmalı motorun egzoz manifoldu modellenirken öncelikle manifoldun üç boyutlu modeli elde edilmiş ve daha sonra manifold mümkün olduğunca düzgün kısımlardan oluşan parçalara bölünerek, tüm manifoldun düz borular, dirsekler ve T-Parçalardan oluşacak şekilde ayrıştırılması sağlanmıştır. Daha sonra bu her bir alt parçanın birbiri ile olan akış geçişleri belirtilerek manifoldun geometrik olarak modellenmesi sağlanmıştır.

Egzoz manifoldunun iç duvar yüzey sıcaklıklarının hesaplanabilmesi için “duvar sıcaklığı çözücüsü” şablonu kullanılmıştır. Duvar sıcaklığı elemanlar içinden geçen akışkanın özellikleri, elemanın malzeme ve ısı özellikleri ile dış ortam şartlarına ilişkin bilgiler kullanılarak hesaplanmaktadır. “Egzoz manifoldu iç duvarları” isimli bu şablona ait parametreler Tablo 2.21’de verilmiştir.

Tablo 2.21 Egzoz manifoldu duvar sıcaklığı çözücüsü parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Genel		
Dış Ortam Taşınım Sıcaklığı	°C	80
Dış Ortam Taşınım Katsayısı	W/(m ² -K)	20
Yüzey Yayınlılık Katsayısı	-	0,5
Cidar Kalınlığı	mm	3,95
Cidar Malzemesi	-	Demir

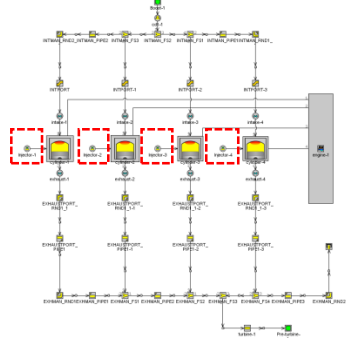
Tablo 2.22 Egzoz manifoldunun modellenmesi aşamaları

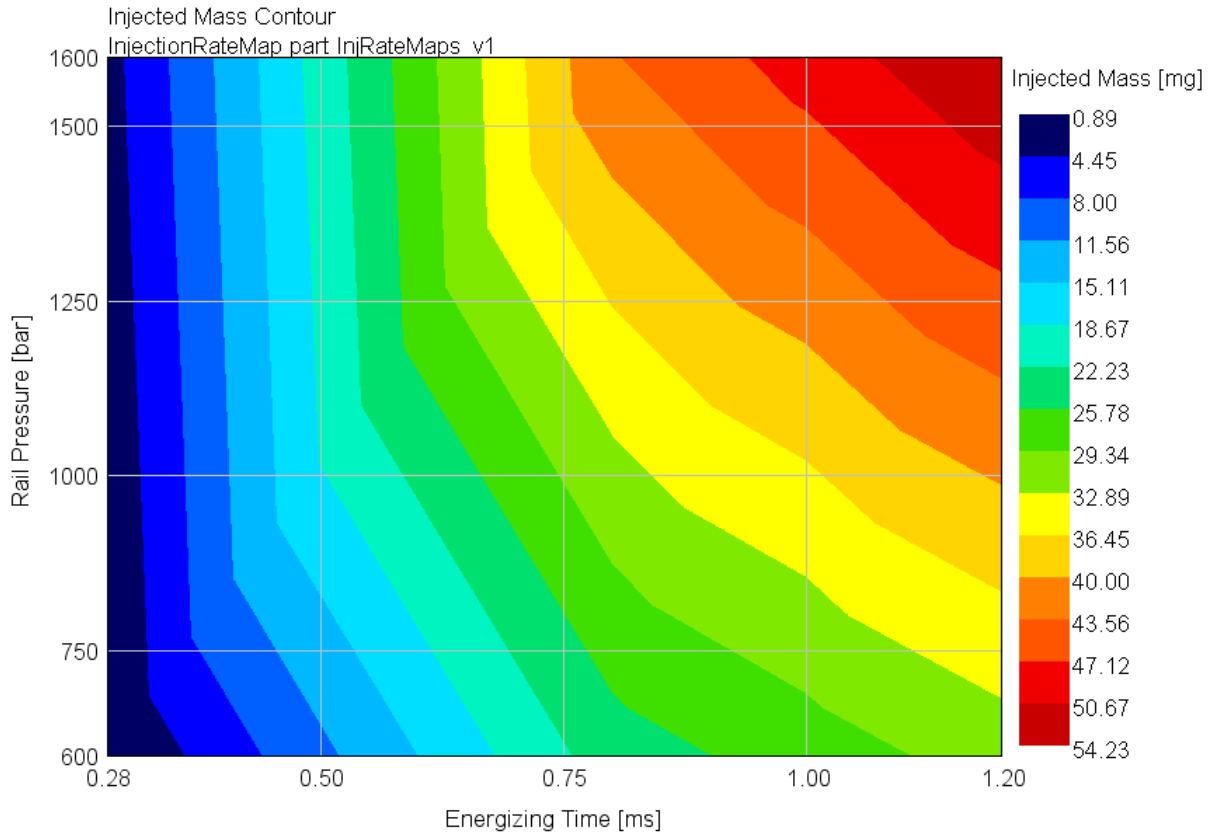
CAD Modeli	GEM-3D Modeli
	
Geometrik Olarak Modellenmiş Parça	
	

2.3.9 Çoklu Püskürtme Profili Bağlantısı

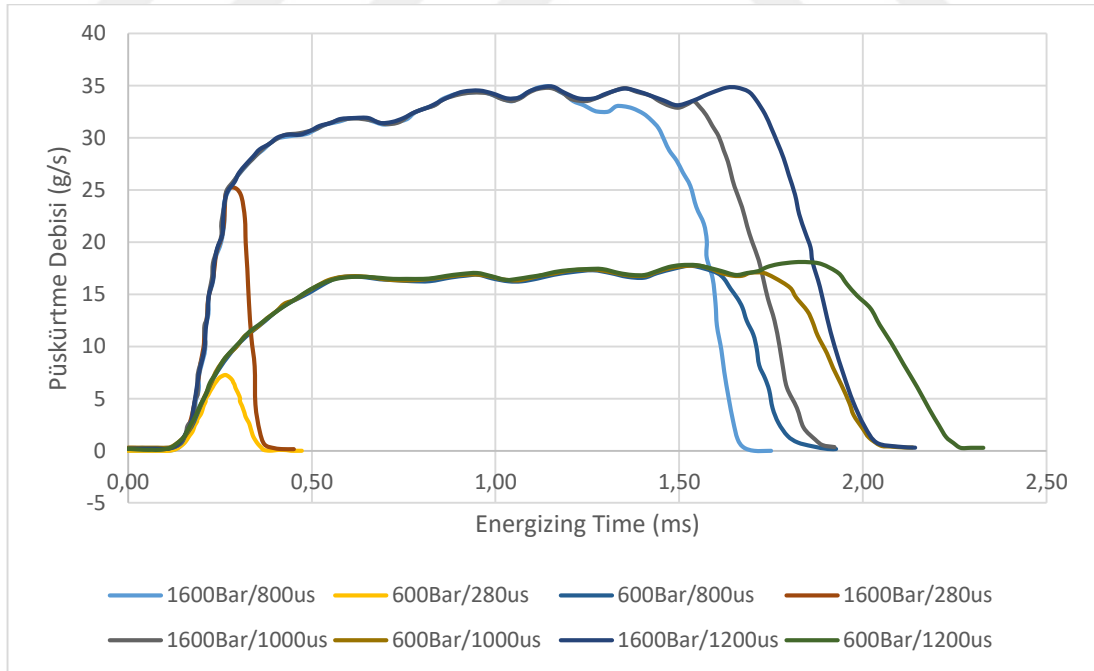
Bu püskürtme bağlantısı periyodik olarak kütleli debi veya basınç profilinde çoklu püskürtme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu şablon içerisinde enjektöre ait basınç ve enerjilenme süresine göre değişen püskürtme oranlarını gösteren eğriler girilmiştir. Bu şablon kullanılarak istenilen sayıda püskürtme yapılabilmektedir. Simülasyonda yapılan püskürtmelerin miktarı ve püskürtme avansları parametrik olarak tanımlanmıştır. Enjektörün enerjilenme zamanı ve basınca göre değişen püskürtme oranları ile oluşan harita Şekil 2.9'da verilmiştir. Verilen haritada enerjilenme süreleri 0,28, 0,8, 1 ve 1,2 ms, püskürtme basınçları ise 600 ve 1600 bar noktalarındaki püskürtme oranları girilmiştir.

Tablo 2.23 Çoklu püskürtme profili bağlantısı parametreleri

Parça Adı	Modeldeki Adı		Modeldeki Yeri	
Çoklu Püskürtme Profili Bağlantısı	Enjektör			
Parametre	Birim	Değer	Açıklama	
Kütle				
Toplam Püskürtülen Miktar	mg	-		
Akışkan				
Akışkan Nesnesi		Dizel2		
Püskürtülen Yakıt Sıcaklığı	K	303,25	.	
Buharlaşan Yakıt Oranı		0		
Enjektör Memesi				
Meme Delik Çapı	mm	0,108		
Memedeki Delik Sayısı	-	8		
Meme Boşaltma Katsayısı	-	0,8457		
Püskürtme Profili Ayarları				
Zaman veya KMA Bazlı		Zaman(ms)		
Basınç veya Kütle Bazlı		Kütle		
Ray Basıncı		[RAY BASINCI]	Parametrik tanımlama	
Profiller				
Püskürtme Numarası		1	2	3
Püskürtme Miktarı	mg	[qPI2]	[qPI1]	[qMI1]
Püskürtme Açısı	°KMA	[PhiPI2]	[PhiPI1]	[PhiMI1]
Profil Nesnesi	bar	Püskürtme Debisi Haritaları v1		



Şekil 2.9 Enjektör püskürtme haritası

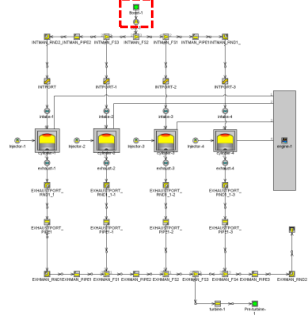


Şekil 2.10 Püskürtme debisi eğrileri

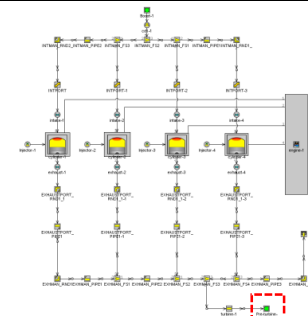
2.3.10 Ortam Sonlandırma

Bu nesne simülasyonun sınır şartlarının belirlenmesi ve bu sınırdaki sıcaklık, basınç ve akışkanın belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Simülasyon emme manifoldu girişi ile egzoz manifoldu çıkışı arasındaki parçaların modellenmesini içerdiğinden bu sınırlardaki şartlar bu şablon kullanılarak girilmiştir.

Tablo 2.24 Dolgu ortam sonlandırma parametreleri

<i>Parça Adı</i>	<i>Modeldeki Adı</i>		<i>Modeldeki Yeri</i>
Ortam Sonlandırma	dolgu		
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel			
Basınç (Mutlak)	mbar	[DOLGU BASINCI]	Parametrik tanımlama
Sıcaklık	°C	[DOLGU SICAKLIĞI]	Parametrik tanımlama
Akışkan		hava	

Tablo 2.25 Egzoz ortam sonlandırma parametreleri

<i>Parça Adı</i>	<i>Modeldeki Adı</i>		<i>Modeldeki Yeri</i>
Ortam Sonlandırma	Türbin Öncesi		
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>	<i>Açıklama</i>
Genel			
Basınç (Mutlak)	mbar	[TÜRBİN ÖNCESİ BASINÇ]	Parametrik tanımlama
Sıcaklık	K	900	
Akışkan		hava	

Oluşturulan içten yanmalı dizel motor modeli ile motor performansına ait, silindir basınçları, LogP-LogV diyagramları, yanma hızları, görünür ısı açığa çıkma hızı,

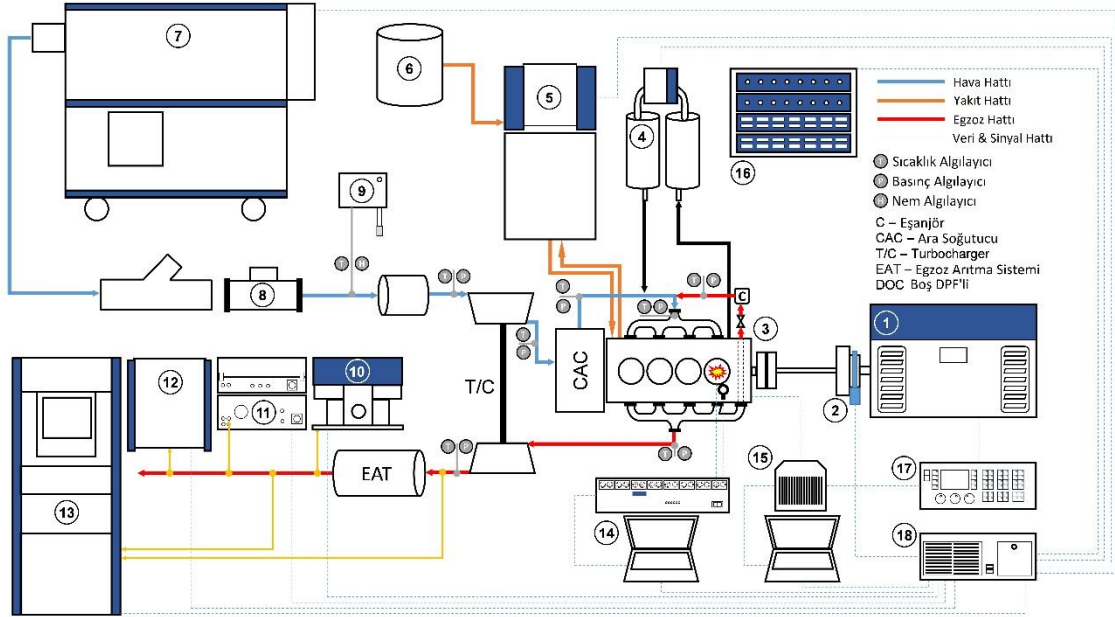
yanmış ve yanmamış bölge sıcaklıkları, silindir içi enerji dengesi, fren torku, fren gücü, özgül yakıt tüketimi, indike ortalama efektif basıncı, fren ortalama efektif basıncı, volumetrik verim, hava yakıt oranı, emme havası debisi, egzoz debisi, egzoz sıcaklıkları ve modelde yer alan bütün elemanlar içinden geçen akışkanın sıcaklık, basınç ve debi değerleri elde edilmektedir.

Elde edilen değerler deneysel testler ile karşılaştırılarak modelin validasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve böylece model kalibrasyonu yapılmıştır.



3

özellikleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 3.1 Motor test sistemi şematiği

(**1.** Dinamometre, **2.** Tork Ölçüm Sistemi, **3.** İçten Yanmalı Motor, **4.** Blow by Ölçüm Cihazı, **5.** Yakıt Tüketimi Ölçüm ve Şartlandırma Sistemi, **6.** Yakıt Tankı, **7.** Yanma Havası Şartlandırma Sistemi, **8.** Emme Havası Debi Ölçüm Sistemi, **9.** Ortam Şartları Ölçüm Sistemi, **10.** Opaklık Ölçer, **11.** Mikro İş Ölçüm ve Şartlandırma Sistemi, **12.** Duman Ölçer, **13.** Katalist Önü ve Ardı Ham Emisyon Ölçüm Sistemi, **14.** Silindir İçi Basınç Ölçüm Sistemi, **15.** Motor EKÜ & Kontrol Yazılımı, **16.** Ölçüm Kabini, **17.** Test Odası Kontrolcüsü, **18.** Otomasyon Sistemi Kontrolcüsü)

3.1 Deney Ekipmanlarının Özellikleri

3.1.1 Dinamometre

Yapılan deneysel çalışmalar AVL firmasının DynoSpirit model dinamometresinde gerçekleştirilmiş olup bu dinamometre çok düşük atalet momenti sebebiyle dinamik testler gerçekleştirmeye uygundur. Dinamometre test odasına diyagonal

olarak yerleştirilmiş olup altı boşluklu olduğundan orijinal egzoz konfigürasyonlarının denenmesine imkân vermektedir. Dinamometrenin genel ve teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 AVL DynoSpirit 370/4.5-8 FK özellikleri

Genel Özellikler	
Dinamometre Tipi	AVL DynoSpirit 370/4.5-8 FK
Motor Tipi	P PMS 180M 370/4,5-8 p3 IC17
Teknik Bilgiler	
Nominal Tork	785 Nm $n=0$ ’dan 4500 d/d’e ve 785-442 Nm $n=4500$ d/d’den $n_{max}=8000$ d/d’e kadar
Nominal Güç	370 kW
Nominal Hız	4500 d/d
Maksimum Hız	8000 d/d
Yapısal Tipi	IM 1071, yüksek ayaklı yapı
Rotor Atalet Momenti	0,266 kgm ²
Şaft bağlantı parçası atalet momenti	0,006 kgm ²
Shaft Encoder ND End	Heidenhain ECN 1313 512
Kilitleme Aparatı	Üzerinde

3.1.2 Yakıt Tüketimi Ölçüm Cihazı

Deneyler esnasında motorun tükettiği yakıt anlık olarak AVL 7351 CME model, Coriolis prensibine göre çalışan cihaz ile ölçülmüştür. Cihaz benzin, dizel, %100’e kadar alkol katkılı yakıtlar ve %100’e kadar biodizel katkılı yakıtların tüketim ölçümlerinde kullanılabilmektedir. Yakıt tüketimi ölçüm cihazının özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Yakıt tüketimi ölçüm cihazı özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 7351 CME
Ölçüm Aralığı (Ters yöndeki akış debileri ölçülebilir.)	0-125 kg/sa
Yakıtlar	Benzin, dizel, %100’e kadar alkol katkılı yakıtlar, %100’e kadar biodizel katkılı yakıtlar
Teknik Bilgiler	
Çıkış Basıncı	10-50 kPa, Maksimum 100 kPa
Sistematik Ölçüm Belirsizliği	$u_s \leq 0,12\%$

Tablo 3.2 Yakıt tüketimi ölçüm cihazı özellikleri (devamı)

Toplam Tüketim Ölçüm Belirsizliği	Kütle: $\leq \pm (0,05\text{kg} + \text{Ölçülen değerin } \%0,0001'i)$ Hacim: $\leq \pm (0,05\text{l} + \text{Ölçülen değerin } \%0,0001'i)$
Yoğunluk Ölçüm Belirsizliği	$\leq \pm 0,5 \text{ kg/m}^3$
Sıcaklık Ölçüm Belirsizliği	$\leq \pm (1^\circ\text{C} + \text{Ölçülen değerin } \%0,5'i)$

3.1.3 Yakıt Şartlandırma Cihazı

Motora gönderilen yakıtın sıcaklığının şartlandırılarak, yakıtın motora uygun sıcaklıkta ve kontrollü bir şekilde gönderilmesini sağlamaktadır. Yakıt şartlandırma cihazı yakıt tüketimi ölçüm cihazı ile entegre bir şekilde çalışmakta ve yakıt tüketimi ölçüm cihazından çıkan yakıt şartlandırıldıktan sonra motora gönderilmektedir. Yakıt şartlandırma cihazının özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3 Yakıt şartlandırma cihazı özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 753CH M100
Ölçüm devresi içerisinde iken sağlanabilen nominal yakıt debisi	240 l/sa
Yakıtlar	Benzin, dizel, %100'e kadar alkol katkılı yakıtlar, %100'e kadar biodizel katkılı yakıtlar
Teknik Bilgiler	
Sıcaklık Kontrol Aralığı	10-80°C
Ayarlanan sıcaklıktaki sapma	Maks. $\pm 1^\circ\text{C}$
Motordan dönen maksimum yakıt sıcaklığı	Maks. 110°C
Isıtma Kapasitesi	1,6 kW

3.1.4 Yanma Havası Şartlandırma Cihazı

Motora giren yanma havasının sıcaklığı, nemi ve basıncı kontrol edilerek tüm deneylerin aynı şartlarda yapılması sağlanmıştır. Yanma havası şartlandırma cihazı tarafından motora gönderilen hava, motora girmeden önce hat üzerinde bulunan debimetre ile ölçülmektedir. Yanma havası şartlandırma cihazının özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Yanma havası şartlandırma cihazı özellikleri

Genel Özellikler		
Tipi	AVL ACS 1600 FH	
Teknik Özellikler		
	maks.	min.
Hava Çıkış Debisi	1600 m ³ /sa.	40 m ³ /sa.
Ayarlanabilir Hava Basıncı	P _a +100 mbar	P _a -100 mbar
Doğruluk	± 1 mbar	
	maks.	min.
Ayarlanabilir Hava Sıcaklığı	70°C	15°C
Doğruluk	±0,5°C	
	maks.	min.
Ayarlanabilir Hava Nemi	8 g H ₂ O/kg kuru hava	20 g H ₂ O/kg kuru hava
Doğruluk	±3 % bağıl nem	

3.1.5 Motor Yağı Şartlandırma Cihazı

Motorda çalışan yağ kartere geldikten sonra yağ şartlandırma cihazına gönderilerek soğutulmuş ve tekrar kartere geri gönderilmiştir. Yağın soğutulmasında kullanılan motor yağı şartlandırma cihazı özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Motor yağı şartlandırma cihazı özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL ConsysLube 554 200
Uygun olduğu maks. motor gücü	200 kW
Maks. Soğutma Gücü	25 kW
Teknik Özellikler	
Yağ Tipi	SAE Yağı
Yağ Hacmi	6 l
Çalışma sıcaklığı	20-150°C
Yağ Sıcaklığı Ayarlama Aralığı	70-140°C
Kontrol Doğruluğu	±1°C
Isıtma Kapasitesi	9 kW

3.1.6 Blow By Ölçüm Cihazı

Motorun çalışması sırasında segmanlar ile silindir duvarları arasındaki boşluklardan kartere kaçan dolgunun ölçülmesi amacıyla kullanılan blow by ölçüm cihazının özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Blow by ölçüm cihazı özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 442/150
Ölçüm Aralığı	3-150 l/d
Teknik Özellikler	
Doğruluk	1,5%
Fark Basınç Sensörü Ölçüm Aralığı	$\pm 6,25$ mbar
Maks. İzin Verilen Fark Basıncı	± 350 mbar
Maks. İzin Verilen Sistem Basıncı	± 1 bar
Maks. İzin Verilen Blow by Gaz Sıcaklığı	80°C

3.1.7 Emme Havası Debisi Ölçüm Cihazı

Deneyler sırasında motora giren yanma havası debisinin ölçümü, sıcak film anemometre prensibine göre çalışan debimetre ile gerçekleştirilmektedir. Bu ölçüm metodunda debimetre içinden geçen akış, ısıtılmış bir yüzeyden ısının taşınmasına ve debi ile değişen oranda bir soğutma etkisinin oluşmasına neden olmaktadır. Ölçüm için kurulan sistemde debimetre içinden geçen akışın sıcaklığı ile ısıtılmaya çalışılan direncin sıcaklığı arasındaki farkın sabit tutulmasına çalışılmakta ve ısıtılan direncin üzerinden akım geçirilmektedir. Geçirilecek olan akım miktarı, gaz sıcaklığı ile ısıtılan direncin sıcaklığı arasındaki fark sabit olacak şekilde elektronik kontrol devresi tarafından üretilmektedir. Isıtılan direnç tarafından üretilen güç, gaz akışı sebebiyle oluşan ısı kaybı ile kompanse edilmektedir. Bu ısı kaybı ise tamamıyla direncin üzerine çarpan partiküllerin sayıları ile orantılıdır ve akımın miktarı ise debiyi ifade etmektedir. Debimetrenin teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Emme havası debisi ölçüm cihazı özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	ABB Sensyflow P
Ölçüm Aralığı	0(40)-1200 kg/sa.
Teknik Özellikler	
Doğruluk	Ölçülen değerin $< \pm 1\%$ Ölçüm aralığının 0-5%’i arasında azalan doğruluk
Tekrar Üretilirlik	Ölçülen değerin $< 0,25\%$
Sıcaklık Etkisi	Ölçülen değerden $< 0,03$ / K sapma
Basınç Etkisi	Ölçülen değerden $< 0,2$ / 1 bar sapma
Cevap süresi	$T_{63} = 12$ ms
Maksimum Çalışma Basıncı	2,5 bar (mutlak)

3.1.8 Duman Ölçer

Deneyler esnasında egzoz gazlarının duman miktarını ölçmek için, egzoz hattı üzerinden emdiği gaz numunesini önce bir filtre üzerinden geçirerek daha sonra bu kâğıdın opaklığını ölçerek filtre duman numarası (FSN) olarak çıkış değeri veren duman ölçere ait özellikler Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8 Duman ölçer özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 415S
Teknik Özellikler	
Ölçüm Aralığı	
Duman değeri	0-10 FSN
İs Konsantrasyonu	0-32000 mg/m ³
Kirlilik Seviyesi	0-100%
Çözünürlük	0,001 FSN / 0,01 mg/m ³ / 0,01%
Tekrarlanabilirlik	$\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + \text{Ölçülen değerin } \%3'ü)$
Tekrar Üretilirlik	$\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + \text{Ölçülen değerin } \%6'sı)$
Özel Örnekleme Opsiyonu	Ortam basıncına göre -200 mbar’dan +750 mbar toplam basınç ölçebilme

3.1.9 İs Ölçer ve Şartlandırma Ünitesi

Foto akustik ölçüm prensibiyle çalışan is ölçme cihazında, modüle edilmiş lazer ışınına maruz kalan egzoz gazı içerisindeki partikül tanecikleri periyodik olarak ısıyıp soğuyarak genişler ve küçülür. Partikül yoğunluğuna bağlı olarak değişen boyutlarda bir ses dalgası oluştururlar ve bu ses dalgası mikrofonlar vasıtasıyla ölçülür. Deneyler sırasında kullanılan is ölçer ve şartlandırma ünitesinin özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9 İs ölçer ve şartlandırma ünitesi özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 483
Teknik Özellikler	
İs Konsantrasyonu	<50 mg/m ³
Görüntüleme Çözünürlüğü	0,001 mg/m ³
Ölçüm Değerinin Çözünürlüğü	$\leq 0,01 \text{ mg/m}^3$
Sapma	$\leq 0,01 \text{ (mg/m}^3\text{)}/\text{sa.}$
Çıkış	Seyretme Oranı
Seyretme Oranı	2-20

3.1.10 Opaklık Ölçer

Deneyler sırasında sürekli olarak ölçüm yapabilme yeteneğine sahip olan opaklık ölçer, belirli uzunluktaki yansımaz bir hücreye dolan homojen egzoz gazının, hücrenin bir ucundan gönderilen ışığın şiddetinde sebep olduğu düşüşün karşı taraftaki bir alıcı tarafından ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Deneyler sırasında kullanılan opaklık ölçerin özellikleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10 Opaklık ölçer özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL 439
Teknik Özellikler	
Ölçüm Değeri Çıkışı	Opaklık N [%] veya adsorpsiyon k [m^{-1}]
Ölçüm Aralığı	N=0-100% veya k=0-10 m^{-1}
Ölçüm Değeri Çözünürlüğü	0,1 % opaklık veya 0,0025 m^{-1}
Sıfır Stabilitesi	{0,1 % veya 0,0025 m^{-1} } / 30 d
Yükselme Zamanı	0,1 s (40 l/d debide)
Opasite Sinyali İçin Örnekleme Frekansı	50 Hz

3.1.11 Egzoz Emisyonları Ölçüm Sistemi

Deneyler esnasında motordan çıkan egzozun içerisinde bulunan THC (Toplam Hidrokarbon), CH_4 , NO_x , NO, CO, CO_2 ve O_2 katalizör öncesi (Pre-Cat), katalizör sonrası (Post-Cat) ve EGR portundan olmak üzere üç ayrı noktadan alınan egzoz numuneleri ile sürekli olarak ölçülmüştür. Örnekleme noktasından 191°C'ye kadar ısıtılmış bir hat ile taşınan egzoz gazları öncelikle bir ön filtreden geçirilerek içerisindeki is, kurum ve partiküllerden arındırıldıktan sonra analizörlere gönderilmekte ve her bir kirletici emisyon için ölçüm 10 Hz frekansta gerçekleştirilmektedir.

FID (Flame Ionization Detector) i60 analizörü, organik karbon atomlarının hidrojen alevi içerisinde iyonlaşması sebebiyle iki elektrot arasında küçük elektrik akımı oluşturması prensibi ile çalışmaktadır. Akım iyonlaşan karbon atomlarının sayısı ile orantılıdır. Kullanılan ölçüm metodu göreceli bir ölçüm metodudur. Çünkü konsantrasyonu bilinen bir referans gazla ölçülen akım değeri, numune gazdan elde edilen akım ile karşılaştırılır ve ölçülen değer hesaplanır. CH_4 konsantrasyonunun ölçülmesi için ise numune gaz ölçümünden önce bir

konvertörden geçirilir ve konvertör içerisinde bütün CH_4 olmayan hidrokarbonlar CO_2 ve suya oksitlenir dolayısıyla numune gaz içinde sadece CH_4 kalır.

CLD (Chemiluminescence Detector) i60 analizörü, NO'nun O_3 ile oksidasyonu sonucunda yaklaşık 600 nm ile 3200 nm arasında dalga boyunda ve yaklaşık 1200 nm pik radyasyonlu ışık üretmesi prensibine dayanmaktadır. Fazladan O_3 bulunan durumda NO konsantrasyonu ile orantılı olarak değişen bu kemiluminesans radyasyon bir detektör tarafından tutulur ve elektrik sinyaline dönüştürülür. NO_x konsantrasyonunun belirlenmesi için gaz içerisindeki NO_2 ölçümünden önce bir konvertör aracılığıyla NO'ya indirgenir.

IRD (Infrared Detector) i60 analizörü, numune gaz üzerine gönderilen infrared ışının, gaz içerisindeki moleküller tarafından adsorbe edilmesi ve adsorbe edilen spektrumun her gaz için farklı olması prensibine göre çalışmaktadır. Sonuç olarak adsorpsiyon spektrumu elde edilmiş olur. İnfrared ölçüm esnasında adsorplanan dalga boyu gazın cinsini karakterize eder ve adsorplanma ölçülen bileşenin konsantrasyonu ile orantılıdır. Gazın içinden geçen infrared radyasyon bir detektöre çarpar ve bu detektör adsorplanmamış olan radyasyonu elektrik sinyaline dönüştürür. Dolayısıyla bileşenlerin konsantrasyonlarının belirlenebilmesi için, infrared radyasyonun analiz edilecek gaz bileşenini içermeyen referans bir gazın içinden geçmesi gerekmektedir. Böylece gözlenen adsorpsiyon spektrumunda hiç adsorpsiyon olmamış olur ve daha sonra ölçülen değerler bu değerle karşılaştırılır.

PMD (Paramagnetic Detector) i60 analizörü ise oksijenin manyetik alan içinde merkeze doğru hareket etmesi prensibine dayanarak, O_2 konsantrasyonunun belirlenmesini sağlamaktadır. Manyetik alanın merkezindeki oksijen orijinal pozisyonu ölçülen dönebilen bir tablaya bir kuvvet uygularken, tabla üzerine pozisyonun değişimini kompanse edecek bir karşı manyetik alan uygulanır. Bu dönme hareketini kompanse etmek için gerekli olan akım oksijen konsantrasyonunun miktarıdır. Egzoz emisyonları ölçüm sisteminin özellikleri Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11 Egzoz emisyonları ölçüm sistemi özellikleri

EGZOZ EMİSYONLARI ÖLÇÜM SİSTEMİ (KATALİZÖR ÖNCESİ+KATALİZÖR SONRASI+EGR)	
Genel Özellikler	
Tipi	AVL AMA i60 R2 Unit with Switch Multihost Stream Sharing
Teknik Özellikler	
AVL CUTTER FID i60 HHD x2 (Pre + Post)	Yüksek konsantrasyon / Isıtılmış / Çift kanal
Ölçülen Bileşenler	THC ve CH ₄
Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-10 ppm C ₃
Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-20000 ppm C ₃
CH ₄ için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-30 ppm C ₁
CH ₄ için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-20000 ppm C ₁
Sapma	tam skalada ≤%1 / 24 sa
Tekrar Üretilirlik	tam skalada ≤%0,5
THC / CH ₄ için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤0,5 s / ≤1,6 s
THC için T ₉₀ Süresi	≤1,2 s
Numune Gaz Debisi	Yaklaşık 220 l/sa
Konvertör Verimi	NMHC için %98
AVL CLD i60 HHD x2 (Pre + Post)	Yüksek konsantrasyon / Isıtılmış / Çift kanal
Ölçülen Bileşenler	NO ve NO _x
NO _x için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-10 ppm
NO _x için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-10000 ppm
NO için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-10 ppm
NO için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-10000 ppm
NO / NO _x için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1 s
NO / NO _x için T ₉₀ Süresi	≤2 s
Numune Gaz Debisi	Yaklaşık 100 l/sa.
NO/NO _x Sönümlenmesi	% H ₂ O başına ≤%0,30 / %0,30 % CO ₂ başına ≤%0,06 / %0,06
AVL COMBI i60 CO₂ H/COH/O₂ x2 (Pre + Post)	
Ölçülen Bileşenler	CO ₂ , CO ve O ₂
CO ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-0,5 %
CO ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-20 %
CO için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-0,5 %
CO için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-10 %

Tablo 3.11 Egzoz emisyonları ölçüm sistemi özellikleri (devamı)

O ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-0,5 %
O ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-25 %
CO ₂ için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1 s
CO ₂ için T ₉₀ Süresi	≤1,5 s
CO için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1,2 s
CO için T ₉₀ Süresi	≤2 s
O ₂ için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤3,5 s
O ₂ için T ₉₀ Süresi	≤4,5 s
CO ₂ /CO/O ₂ için Sapma	tam skalada ≤%1 / 24 sa.
CO ₂ /CO/O ₂ için Tekrar Üretilebilirlik	tam skalada ≤%0,5
CO ₂ /CO/O ₂ için Numune Gaz Debisi	Yaklaşık 60 l/sa.
AVL IRD CO₂ H/COL (CO₂ H EGR için + COL Pre için)	
Ölçülen Bileşenler	CO ₂ ve CO
CO ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-0,5 %
CO ₂ için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-20 %
CO için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-50 ppm
CO için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-5000 ppm
CO ₂ için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1 s
CO ₂ için T ₉₀ Süresi	≤1,5 s
CO için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1,5 s
CO için T ₉₀ Süresi	≤2,5 s
CO ₂ /CO için Sapma	tam skalada ≤%1 / 24 sa.
CO ₂ /CO için Tekrar Üretilebilirlik	tam skalada ≤%0,5
CO ₂ /CO için Numune Gaz Debisi	Yaklaşık 60 l/sa.
AVL IRD COL (COL Post için)	
CO için Ölçülmesi Mümkün En Düşük Ölçüm Aralığı	0-50 ppm
CO için Ölçülmesi Mümkün En Yüksek Ölçüm Aralığı	0-5000 ppm
CO için T ₁₀₋₉₀ Süresi	≤1,5 s
CO için T ₉₀ Süresi	≤2,5 s
CO için Sapma	tam skalada ≤%1 / 24 sa.
CO için Tekrar Üretilebilirlik	tam skalada ≤%0,5
CO için Numune Gaz Debisi	Yaklaşık 60 l/sa.

3.1.12 Silindir İçi Basınç Ölçüm Sistemi

Deneyler esnasında krank açısı ile eş zamanlı olarak ölçülen silindir içi basınç, ray basıncı, enjektör iğnesinin kalkışı, püskürtme zamanlamaları ve püskürtme kontrol sinyallerinin maksimum 0,025° KMA çözünürlüğe kadar kaydedilmesi amacıyla kullanılan silindir içi basınç ölçüm sisteminin özellikleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Gerçek zamanlı veri toplama sistemi ile toplanan veriler ile silindir içi basınç, püskürtme basıncı, püskürtme sinyalleri, ateşleme sinyalleri, manifold basınçları gibi yanma ile ilgili birçok sinyal değerlendirilebilir, krank açısı tabanlı olarak ısı açığa çıkışı, ortalama efektif basınç, çoklu püskürtme zamanlamaları, ateşleme zamanlamaları, pik değerleri ve birçok hesaplama içeren işlemler gerçekleştirilebilir.

Tablo 3.12 Silindir içi basınç ölçüm sistemi özellikleri

Genel Özellikler	
Tipi	AVL IndiSmart 612
Teknik Özellikler	
Analog Giriş	8 analog diferansiyel sinyal girişi
Analog Örnekleme Frekansı	Her bir kanal için 14 Bit / 800 kHz ADC
Kuvvetlendirici Kanal Sayısı	6 adet piezo amplifier kanalı
Kuvvetlendirici Kanal Sayısı	2 adet çok amaçlı amplifier kanalı
Krank Mili Açısı Çözünürlüğü	0,025/0,05/0,1/0,2/0,5/1° KMA

3.1.13 Test Sistemi Otomasyon Programı

İçten yanmalı motor dinamometresinde deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için, test odasına ve deney motoruna ait parametrelerin belirlendiği, ölçüm alınacak noktalardaki sensör kanal tanımlamalarının yapıldığı, ölçüm sonuçlarının görüntülendiği, sistemde anlık değişimlerin yapılmasına izin veren ve ölçüm sonuçlarının kaydedilmesini sağlayan Puma Open 1.4 otomasyon programı kullanılmaktadır. Otomasyon programı vasıtasıyla uygun haberleşme protokolleri kullanılarak motorun elektronik kontrol ünitesine erişilebilmekte, görüntüleme ve kontrol işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Otomasyon programı oluşturulan otomatik test çevrimleri ile hem deney motorunu hem de dinamometreyi otomatik olarak istenilen çalışma noktasına götürebilmekte ve bu noktada bütün ölçüm cihazları ile haberleşerek istenilen süre boyunca istenilen ölçümlerin yapılmasına ve kaydedilmesine imkân vermektedir.

3.2 Motor Mod Testleri ve Model Kalibrasyonu

1498 cc hacminde 4 silindirli doğrudan püskürtmeli 8 supaplı maksimum gücü 3600 d/d hızda 88 kW ve maksimum torku 1750-2500 d/d aralığında 270 Nm olan dizel motorun GT-Power programı kullanılarak oluşturulan modelinin, deney sisteminde yapılan testler sonucunda ölçülen performans ve emisyon değerleri kullanılarak doğrulanması ve kalibrasyonunun yapılarak farklı noktalarda doğru şekilde çalıştığından emin olunması gerekmektedir.

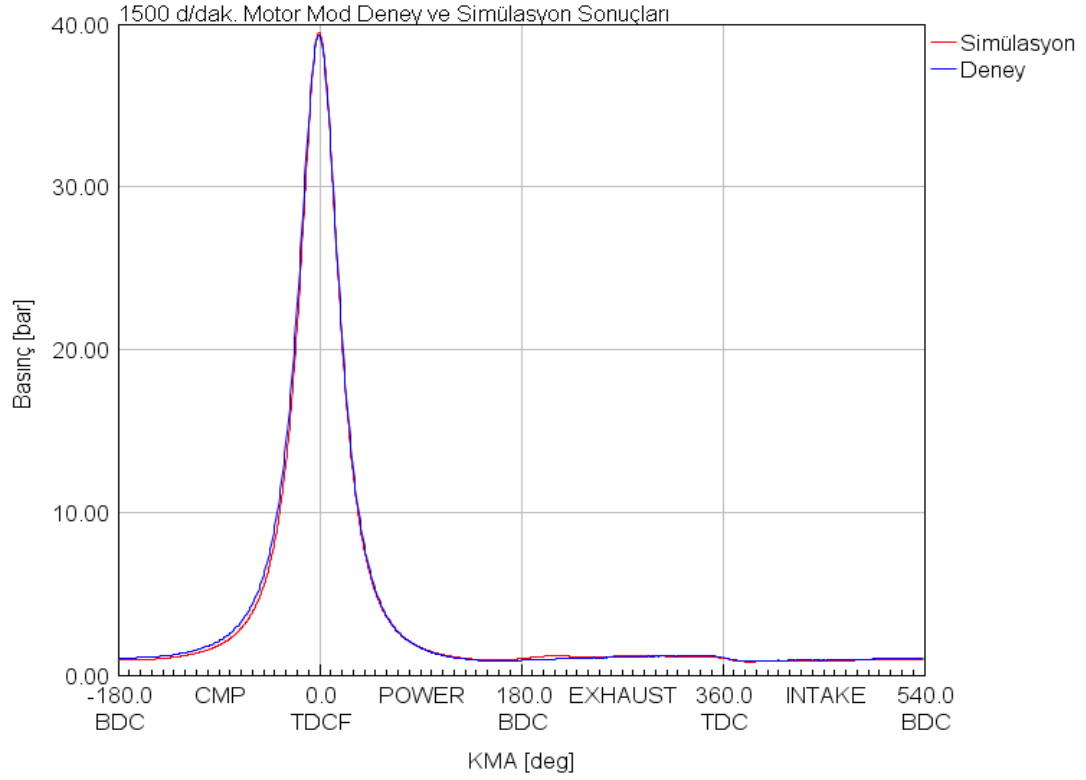
Modellenen içten yanmalı dizel motorun test sisteminde gerçekleştirilen deneylerinde dinamometre test sisteminden ve motor üzerinde enstrümanite edilmiş olan sensörlerden elde edilen tork, güç, devir, hava-yakıt oranı, motora giren hava debisi, motorun kullandığı yakıt debisi, sıcaklığı ve özgül yakıt tüketimi değeri, emme manifoldu basınç ve sıcaklığı, egzoz manifoldu basınç ve sıcaklığı, silindir içi basınç ölçüm sisteminden elde edilen silindir içi basınçları, püskürtme akımları, indike ortalama efektif basınç, emisyon ölçüm sisteminden elde edilen CO₂, CO, THC, NO_x emisyon değerleri, motor kontrol ünitesinden elde edilen püskürtme zamanları ve miktarları, ray basıncı ve egzoz debisi değerlerinin bir kısmı modelin çalıştırılması için parametrik olarak tanımlanmış olup bir kısmı da validasyon çalışması sırasında simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

İçten yanmalı dizel motor modelinin yanmanın olduğu deney noktaları ile validasyonundan önce iş gazının geçtiği emme manifoldu, emme supapı, silindir, egzoz supapı ve egzoz manifoldunun boyutlarının doğrulanabilmesi amacıyla motor modda çalışma durumundaki silindir içi basınçların validasyonu gerçekleştirilmiştir.

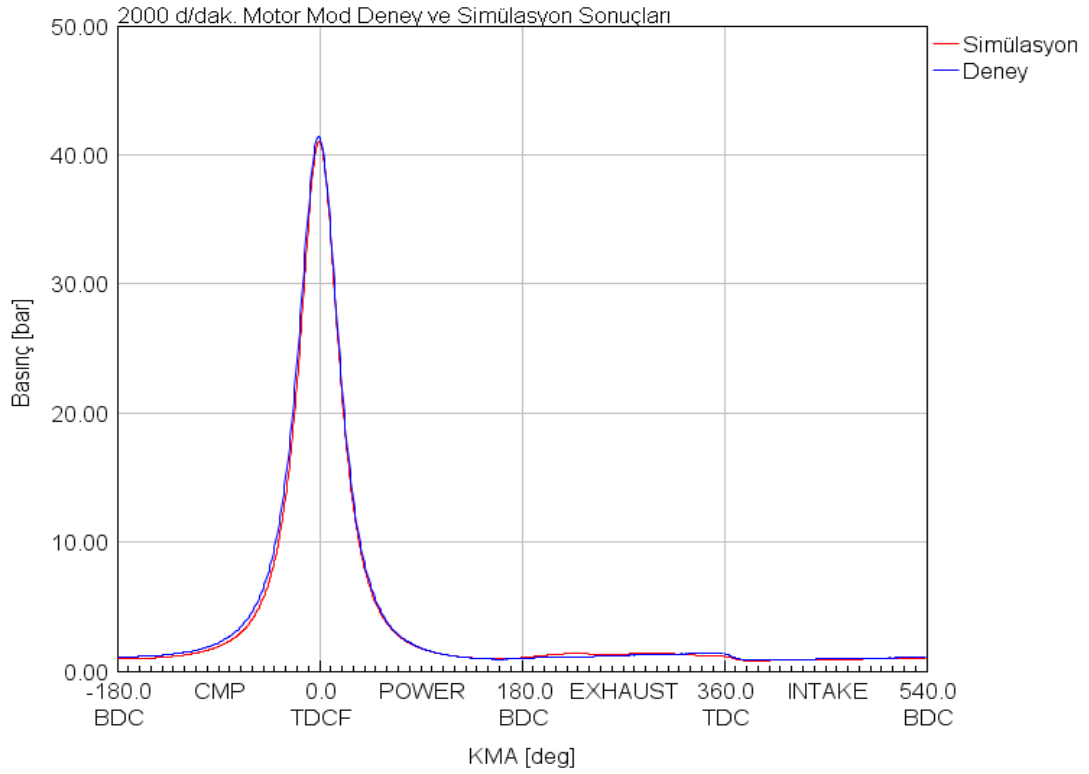
İçten yanmalı dizel motor modelinin motor modda simülasyonunun yapıldığı ve valide edildiği deney noktaları ve bu deney noktalarında alınan ölçümler Tablo 3.13'de gösterilmiştir. Sınır şartları değerleri kullanılarak yapılan kalibrasyon çalışmaları sonrasında her devirde elde edilen silindir içi basınç değerlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığı grafikler aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 3.13 Motor mod simülasyon parametreleri

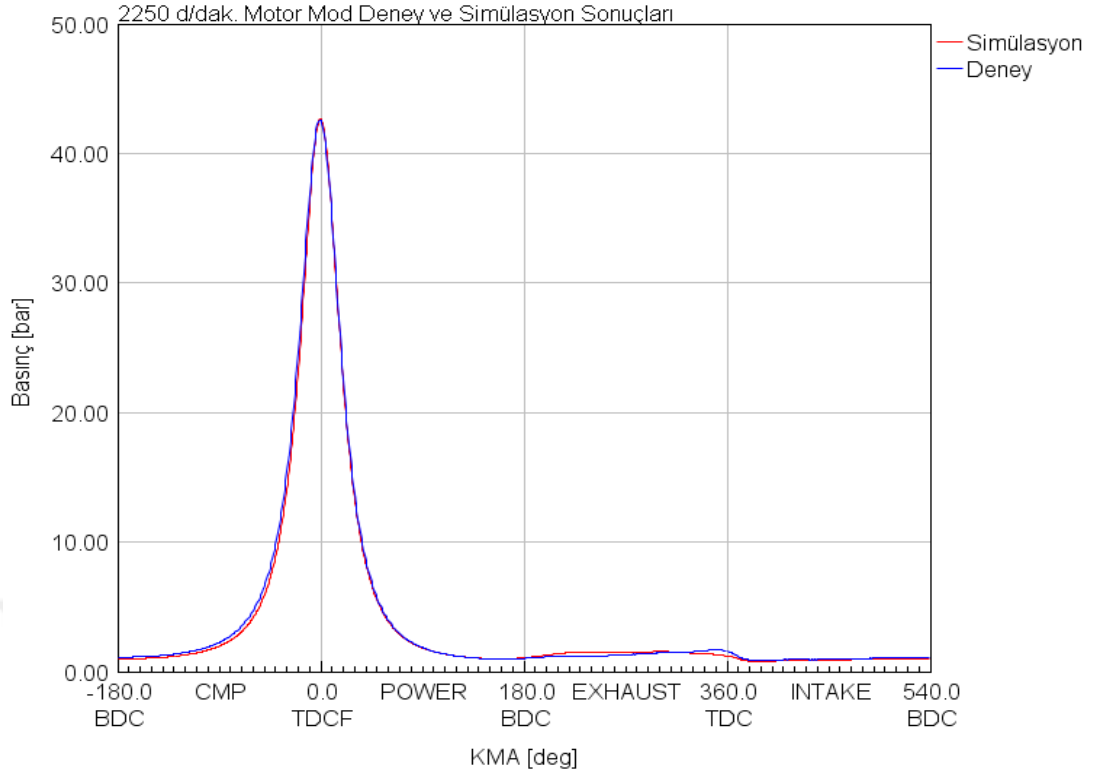
Parametre	Birim	Nokta #1	Nokta #2	Nokta #3	Nokta #4	Nokta #5	Nokta #6	Nokta #7	Nokta #8	Nokta #9
Motor Devri [SPEED]	d/d	1500	2000	2250	2500	2750	3000	3500	3600	4500
Pedal Pozisyonu	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dolgu Sıcaklığı [T_BOOST]	°C	55,22	56,32	54,21	56,5	52,49	57,09	58,62	51,14	62,69
Dolgu Basıncı [P_BOOST]	mbar	914,59	942,79	972	978,17	951,52	952,61	947,06	913,29	932,93
Egzoz Basıncı [P_TURBOP]	mbar	1084,17	1187,58	1287,18	1538,72	1467,91	1489,5	1589,83	1520	1553,68
Egzoz Sıcaklığı [P_TURBOT]	°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Emme Hava Debisi [AsMod_dmIndAirRef]	kg/sa	59,64	82,96	96,59	107,07	113,5	120,96	135,05	134,47	150,81
Ana Püskürtme Miktarı [qMI1]	mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.ön Püskürtme Miktarı [qPI1]	mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.ön Püskürtme Miktarı [qPI2]	mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ana Püskürtme Avansı [PhiMI1]	°KMA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.ön Püskürtme Avansı [PhiPI1]	°KMA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.ön Püskürtme Avansı [PhiPI2]	°KMA	-	-	-	-	-	-	-	-	-



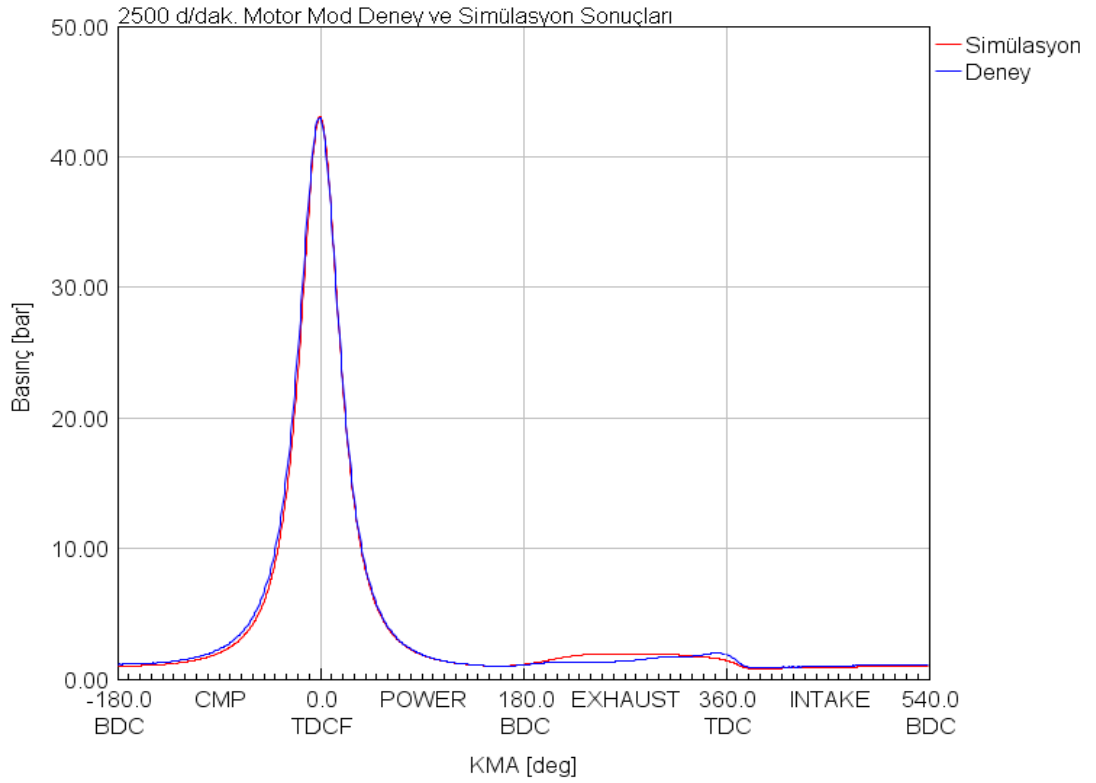
Şekil 3.2 1500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



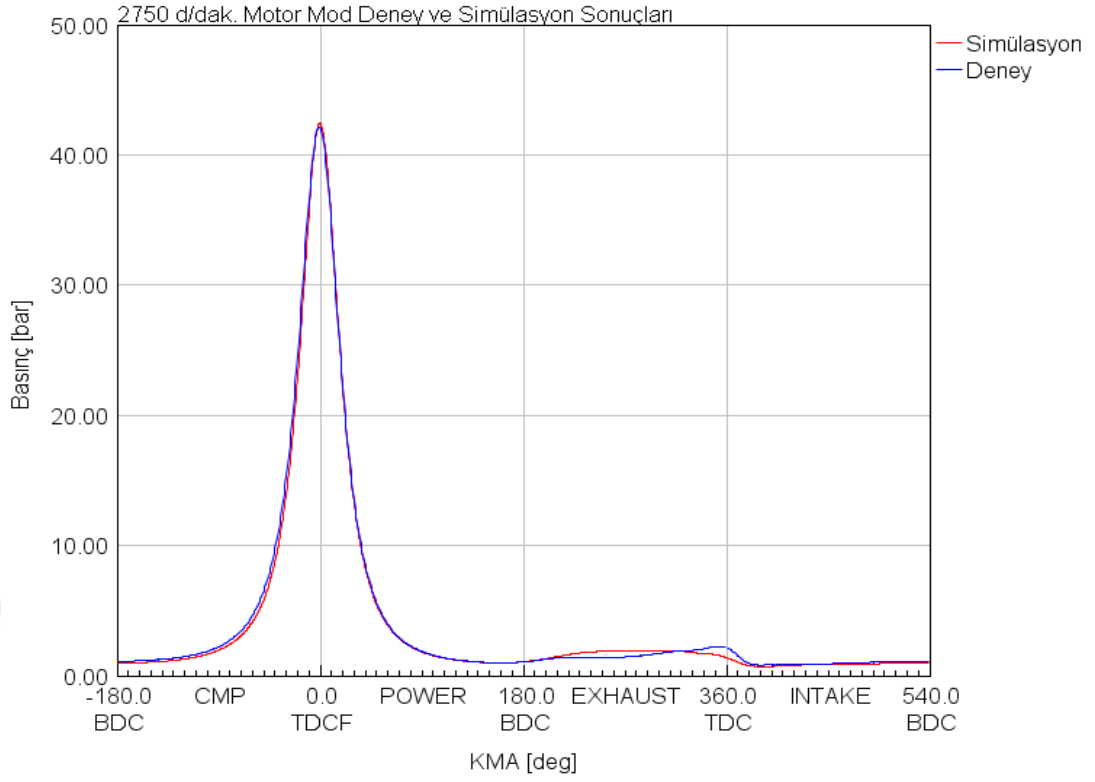
Şekil 3.3 2000 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



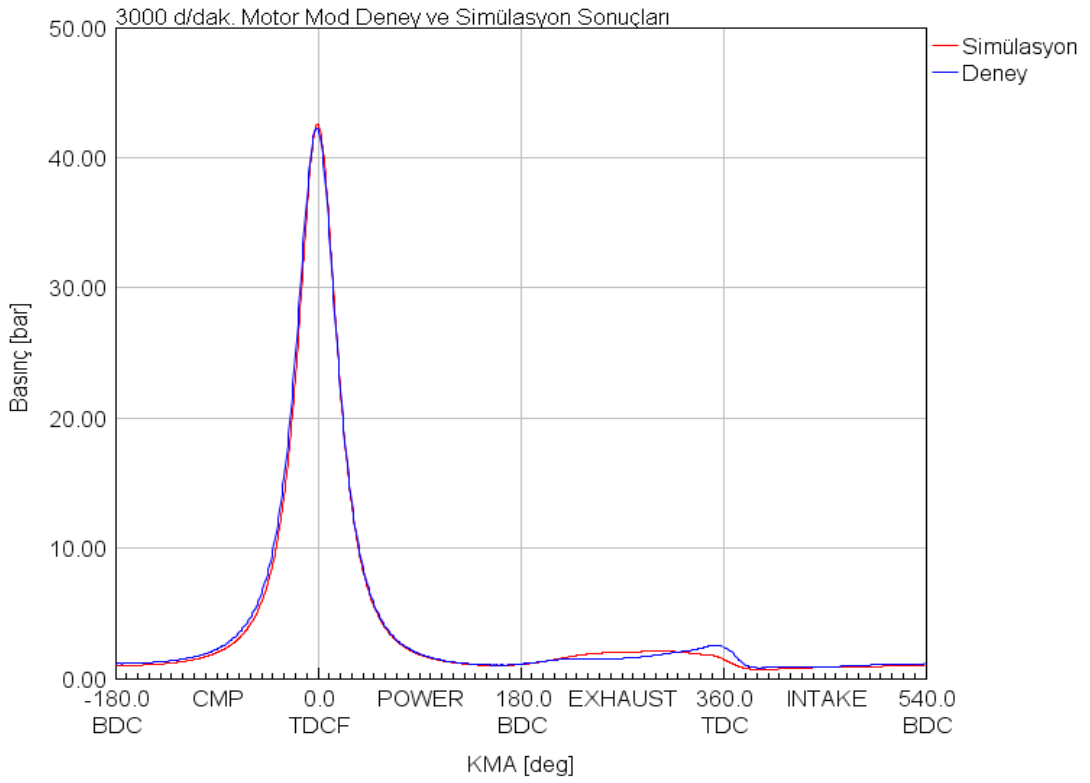
Şekil 3.4 2250 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



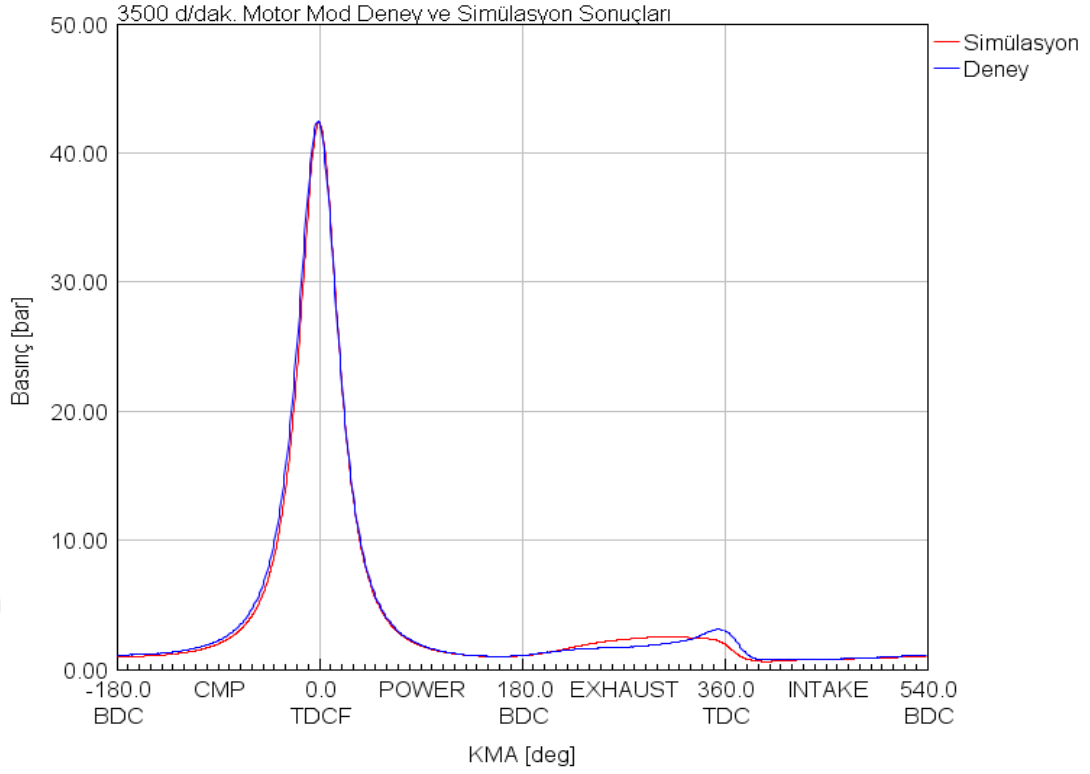
Şekil 3.5 2500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



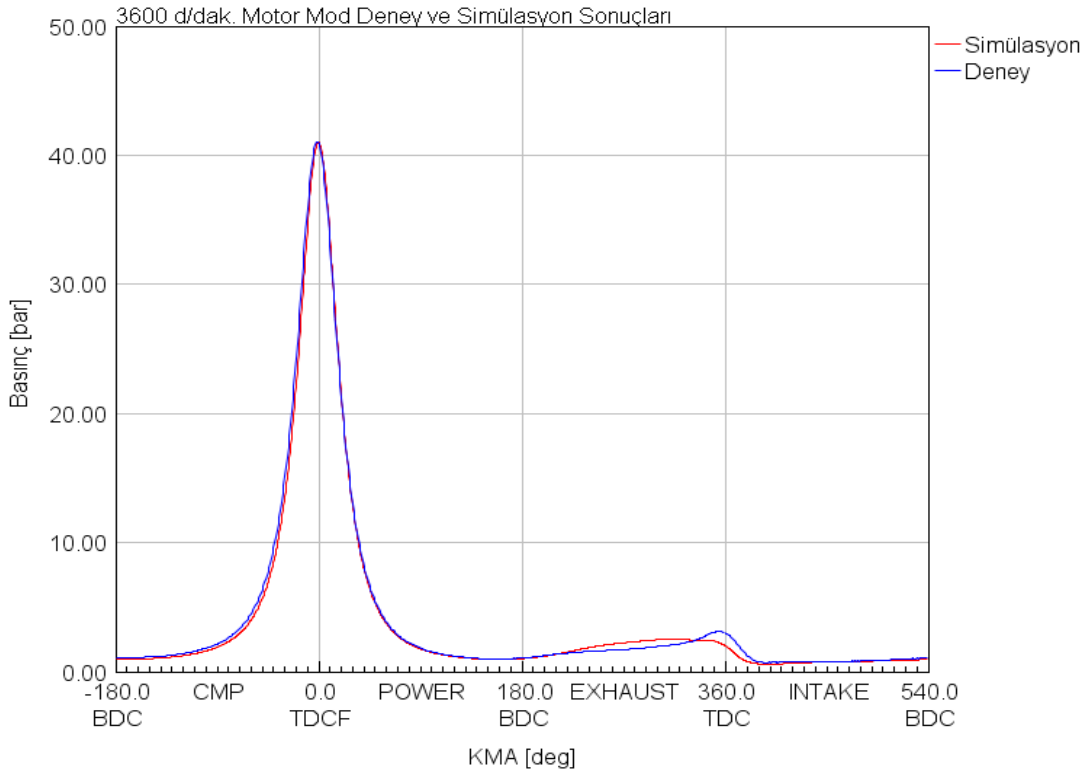
Şekil 3.6 2750 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



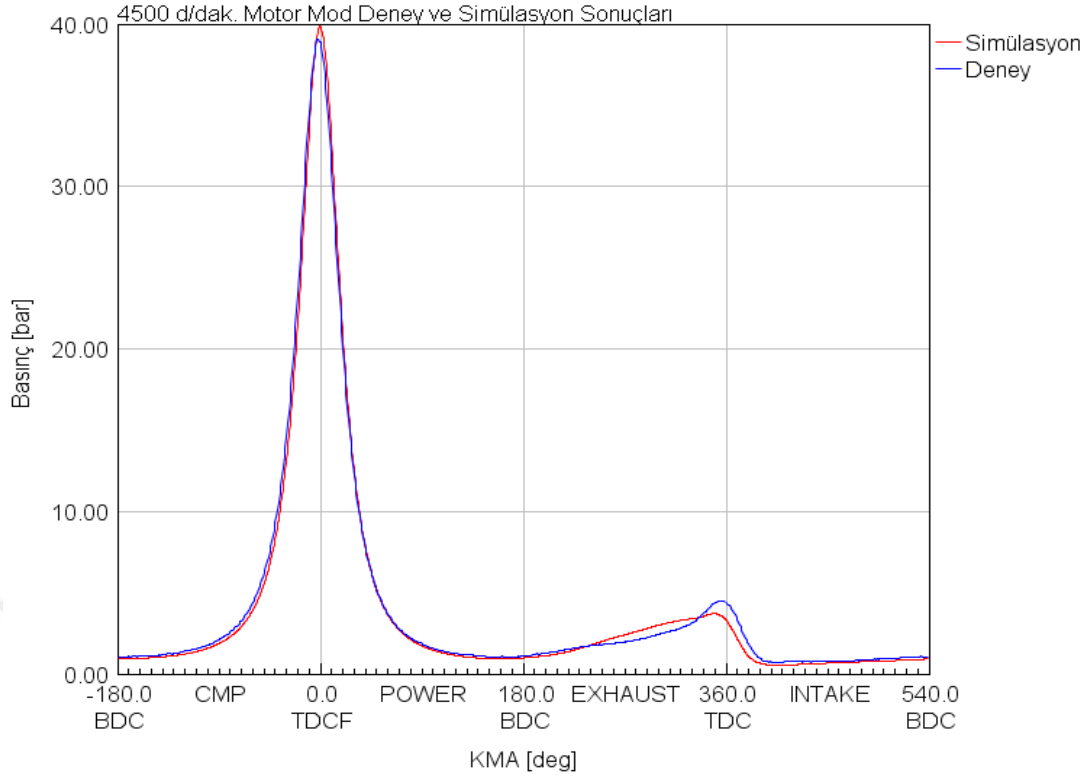
Şekil 3.7 3000 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



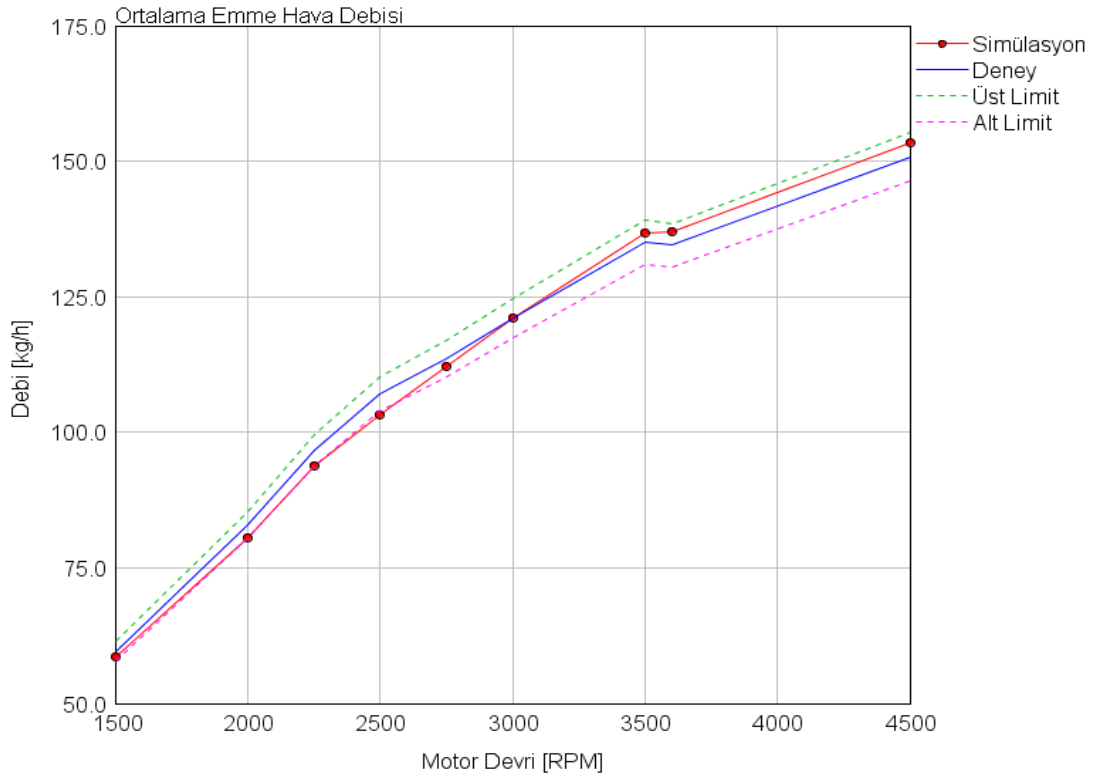
Şekil 3.8 3500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.9 3600 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.10 4500 d/d motor mod deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.11 Emme hava debisi deney ve simülasyon sonuçları

3.3 Kısmi Yük Testleri ve Yanma Modeli Kalibrasyonu

Motor modda yapılan kalibrasyon ve validasyon çalışmalarının ardından içten yanmalı motorun dinamometreye bağlanarak kısmi yüklerde ngrl yanma modelinin kalibre edilmesi ve farklı çalışma noktalarında valide edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla tez konusu kapsamındaki püskürtme stratejisini içeren 9 farklı durum için deney düzeneğinden ölçülen ve motor kontrol ünitesinden alınan veriler simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Validasyon amaçlı yapılan testlerde 9 farklı durumdaki motorun çalışma parametrelerindeki değişim Tablo 3.14 te görülmektedir. Kısmi yükte, 1375 d/d motor devrinde, 40 Nm indike torkta, EGR gazını içeren motor çalışma noktasında bütün çalışma parametreleri aynı kalmak şartıyla, her iki n püskürtmenin miktarı 1, 1,5 ve 2 mg ve püskürtme açıları da 3'er derece KMA ne ve geriye çekilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerdeki motor çalışma parametreleri ve elde edilen deney sonuçları Tablo 3.15 ve Tablo 3.16 da görülmektedir. Yapılan deneylerde silindir içi basınç eğrileri ve ısı açığa çıkma hızları da hesaplanmıştır. Yapılan motor deneylerinde motorun elektronik kontrol ünitesinde enjektör öğrenme fonksiyonu olmadığı için noktadan noktaya toplam püskürtme miktarı değişmiş ancak bu değişim ana püskürtmede oluştuğu için, ana enjesiyon miktarı yakıt tüketimi ölçüm sonuçlarındaki fark kadar düzeltilmiştir.

Simülasyonlarda  basınç analizi (TPA) yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızlarında deney ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir yaklaşıma ulaşılmış ve motor çalışma parametrelerindeki değişimden kaynaklanan motor performans parametrelerinin değişimi için deney ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

Tablo 3.14 Kısmi yük çalışma noktalarındaki motor çalışma parametrelerinin değişimi

Nokta Nu.	<i>qPI1</i>	<i>qPI2</i>	<i>PhiPi1</i>	<i>PhiPi2</i>	<i>Açıklama</i>
-	mg/str	mg/str	°KMA	°KMA	Değişen Tek Parametre
Nokta#1	0,6	0,6	14,71	24,81	Baz Durum
Nokta#2	1,1	0,6	14,71	24,81	1.Ön Püskürtme Miktarı
Nokta#3	1,6	0,6	14,71	24,81	1.Ön Püskürtme Miktarı
Nokta#4	0,6	0,6	17,71	24,81	1.Ön Püskürtme Açısı
Nokta#5	0,6	0,6	11,69	24,81	1.Ön Püskürtme Açısı
Nokta#6	0,6	1,1	14,71	24,81	2.Ön Püskürtme Miktarı
Nokta#7	0,6	1,6	14,71	24,81	2.Ön Püskürtme Miktarı
Nokta#8	0,6	0,6	14,71	27,8	2.Ön Püskürtme Açısı
Nokta#9	0,6	0,6	14,71	21,8	2.Ön Püskürtme Açısı

Tablo 3.15 Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli motor çalışma parametreleri

Parametre	Birim	Nokta #1	Nokta #2	Nokta #3	Nokta #4	Nokta #5	Nokta #6	Nokta #7	Nokta #8	Nokta #9
Motor Devri [SPEED]	d/d	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1375
İndike Tork [PthSet_trqInrSet]	Nm	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Pedal Pozisyonu [ALPHA]	%	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Dolgu Sıcaklığı [T_BOOST]	°C	32,9	32,5	32,2	31,4	31,1	30,9	30,7	30,5	30,4
Dolgu Basıncı [P_BOOST] / [PCR_pActVal]	mbar	1008,91	1007,93	1007,29	1009,33	1006,77	1008,39	1008,88	1008,53	1009,31
Egzoz Basıncı [P_TURBOP] / [P_TUR_I]	mbar	1074,5	1072,5	1070,8	1072,1	1068	1070	1069,8	1069	1069,9
Egzoz Sıcaklığı [P_TURBOT] / [T_TUR_I]	°C	193,7	184,5	178,9	200,2	173,6	190,9	196,6	193,7	200,4
Yakıt sıcaklığı [T_FUEL_I]	°C	25,6	25,5	25,5	25,4	25,5	25,4	25,4	25,5	25,4
Emme Hava Debisi [AFS_dm]	kg/sa	33,38	33,36	33,32	33,59	33,4	33,57	33,6	33,58	33,66
EGR Valf Açıklığı [EGR Angle] / [EGRVlv_rAct]	%	24	24	24	24	24	24	24	24	24

Tablo 3.15 Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli motor çalışma parametreleri (devamı)

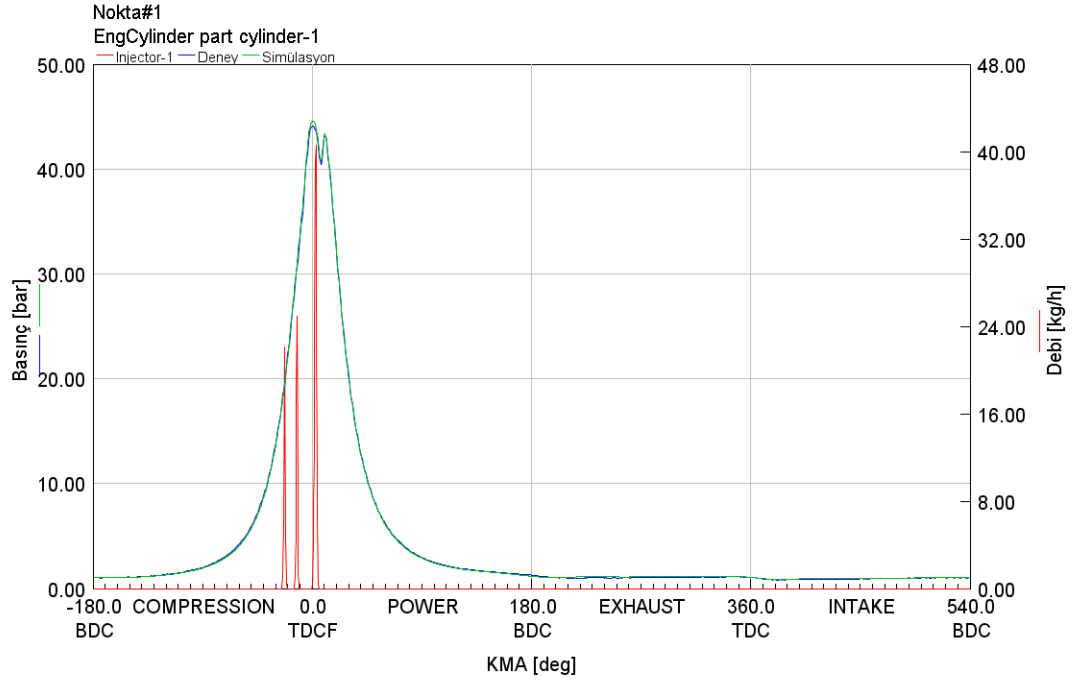
Püskürtme Basıncı [RAIL_P] / [Rail_pSetPoint]	bar	515	515	515	515	515	515	515	515	515
Ana Püskürtme Miktarı [qMI1]	mg	3,52	2,75	2,14	4,04	2,92	3,27	3	3,74	4,12
1.ön Püskürtme Miktarı [qPI1]	mg	0,6	1.1	1,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
2.ön Püskürtme Miktarı [qPI2]	mg	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,1	1,6	0,6	0,6
Ana Püskürtme Avansı [PhiMI1]	°KMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.ön Püskürtme Avansı [PhiPI1]	°KMA	14,7	14,7	14,7	17,71	11,69	14,7	14,7	14,7	14,7
2.ön Püskürtme Avansı [PhiPI2]	°KMA	24,81	24,81	24,81	24,81	24,81	24,81	24,81	27,8	21,8

Tablo 3.16 Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli deney ölçüm sonuçları

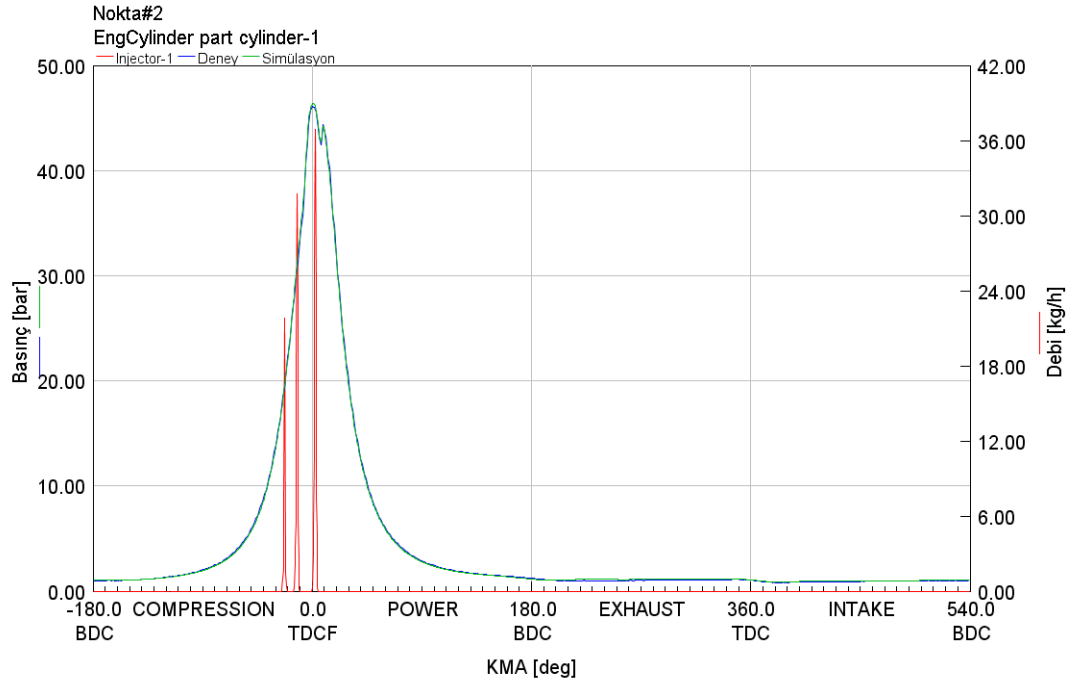
Parametre	Birim	Nokta #1	Nokta #2	Nokta #3	Nokta #4	Nokta #5	Nokta #6	Nokta #7	Nokta #8	Nokta #9
Ortalama İndike Efektif Basınç [OİEB]	bar	2,04	1,86	1,84	2,14	1,78	2,04	2,31	2,14	2,17
Ortalama İndike Efektif Basınç [OİEB720] GT ile hesaplanan	bar	2,00	1,90	1,92	2,24	1,81	1,92	2,25	2,19	2,21
Maksimum Basınç [P _{MAX}]	bar	44,13	45,99	48,45	44,99	43,41	45,62	48,95	43,43	46
Krankşaft Torku [TORQUE]	Nm	15,5	14	13,1	18,6	11	16,6	18,5	16,5	19
Krankşaft Gücü [P]	kW	2,2	2	1,9	2,7	1,6	2,4	2,7	2,4	2,7
Sürtünme Torku [RngMod_trqFrc]	Nm	16,9	16,94	16,99	17,05	17,08	17,16	17,15	17,15	17,15
Yakıt Tüketimi [FB_VAL]	kg/sa	0,78	0,74	0,71	0,87	0,67	0,81	0,86	0,82	0,97
Özgül Yakıt Tüketimi [SFC]	g/kWsa	350,1	364,7	380	322,5	429,3	342,4	321,6	343,3	321,2
Egzoz Debisi [EXH_FLOW]	kg/sa	34,7	34,6	34,5	34,8	34,5	34,8	34,8	34,8	34,9
EGR Çıkış Sıcaklığı [T_EGR_O]	°C	107,8	105,8	103,9	107,3	102,9	105,3	106,5	106	107,5
EGR Soğutucu Girişi Sıcaklığı [T_EGRC_I]	°C	89,8	89,8	89,2	88,1	87,7	87,5	87,5	87,3	87,3
EGR Soğutucu Çıkışı Sıcaklığı [T_EGRC_O]	°C	89,1	89	88,5	87,3	86,9	86,7	86,7	86,5	86,5

Tablo 3.16 Kısmi yük çoklu ön püskürtmeli deney ölçüm sonuçları (devamı)

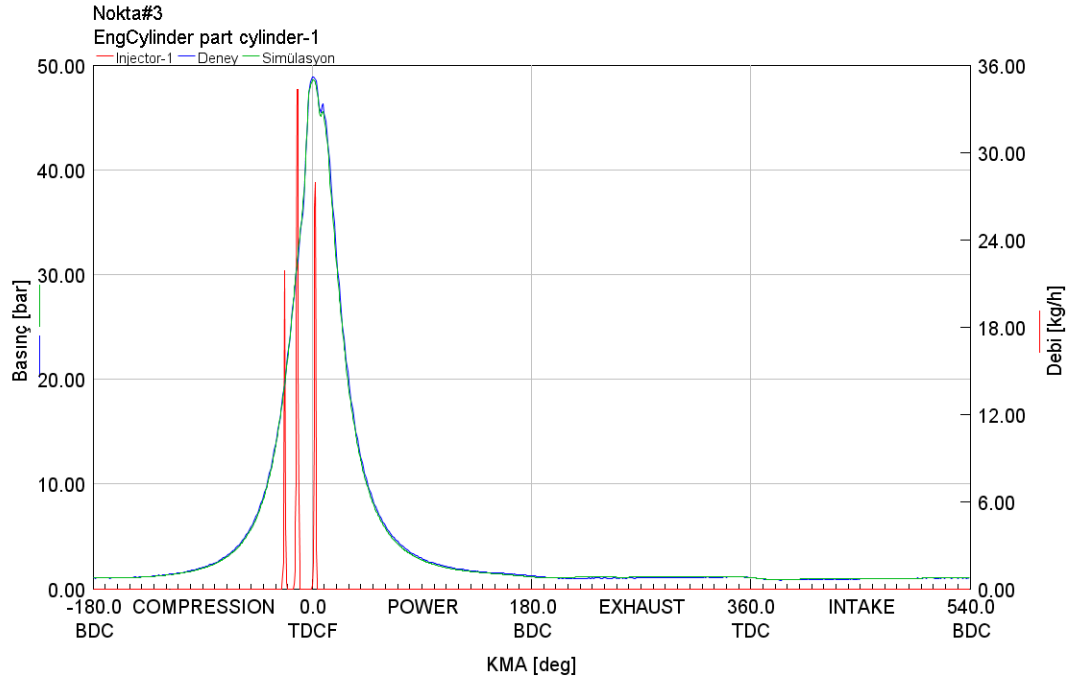
Manifold Sıcaklığı [T_MAN]	°C	62,31	61,34	60,55	61,13	59,71	60,18	60,58	60,44	60,72
İs Emisyonu [OPA_OPAC]	-	0,01	0,005	0	0,02	0,002	0,012	0,011	0,005	0,018
Özgül CO ₂ Emisyonu [CO2_PRE_M]	g/kWsa	870,77	901,58	930,55	802,37	1041,07	833,86	797,38	842,21	795,74
CO ₂ Emisyonu [CO2_PREGH]	g/sa	1938,01	1816,26	1755,17	2150,27	1649,07	1995,94	2125,41	1999,94	2176,5
Özgül CO Emisyonu [CO_PRE_M]	g/kWsa	14,11	13,68	13,6	11,43	22,65	18,63	15,88	17,32	8,3
CO Emisyonu [CO_PREGH]	g/sa	31,4	27,56	25,65	30,63	35,89	44,58	42,33	41,14	22,69
Özgül NO Emisyonu [NO_PRE_M]	g/kWsa	2,15	2,99	4,09	1,81	2,92	1,91	1,82	1,83	2,04
NO Emisyonu [NO_PREGH]	g/sa	4,79	6,02	7,71	4,85	4,63	4,57	4,85	4,36	5,58
Özgül O ₂ Emisyonu [O2_PRE_M]	g/kWsa	2149,87	2440,61	2634,47	1715,12	3112,61	1978,89	1728,6	2003,43	1680,07
O ₂ Emisyonu [O2_PREGH]	g/sa	4784,8	4916,63	4969,12	4596,38	5088,81	4736,66	4607,61	4757,41	4595,3
Özgül THC Emisyonu [THC_PRE_M]	g/kWsa	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01
THC Emisyonu [THC_PREGH]	g/sa	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
Motor Gürültüsü [APOLLO]	dBA	68,832	68,555	69,493	69,078	69,640	68,563	68,862	69,477	68,184



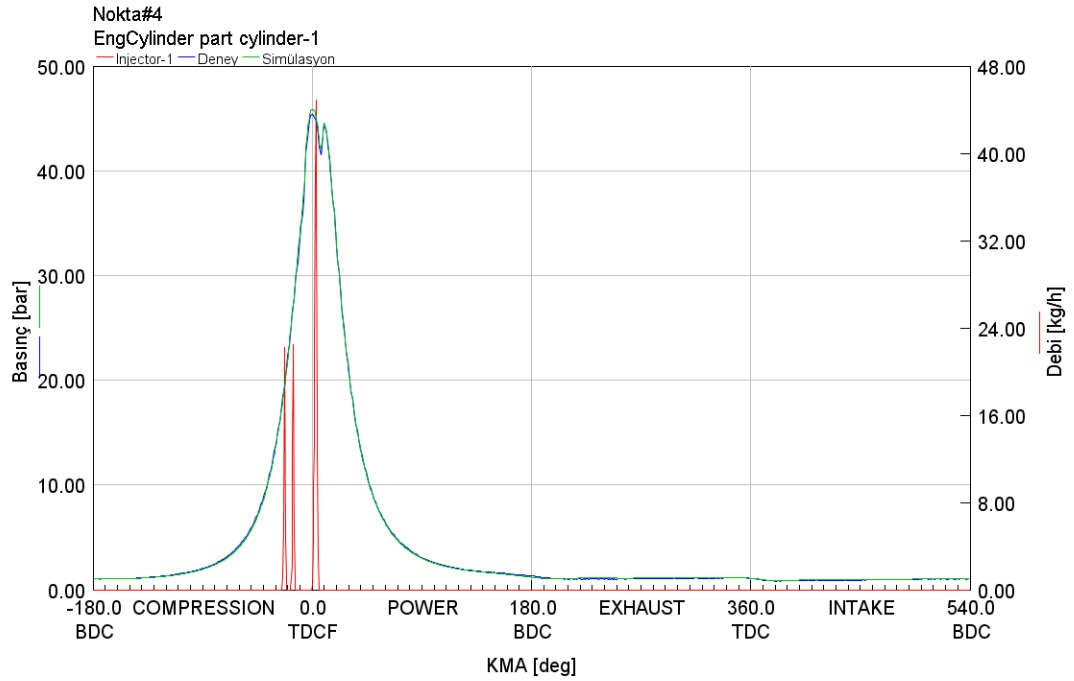
Şekil 3.12 Nokta#1 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



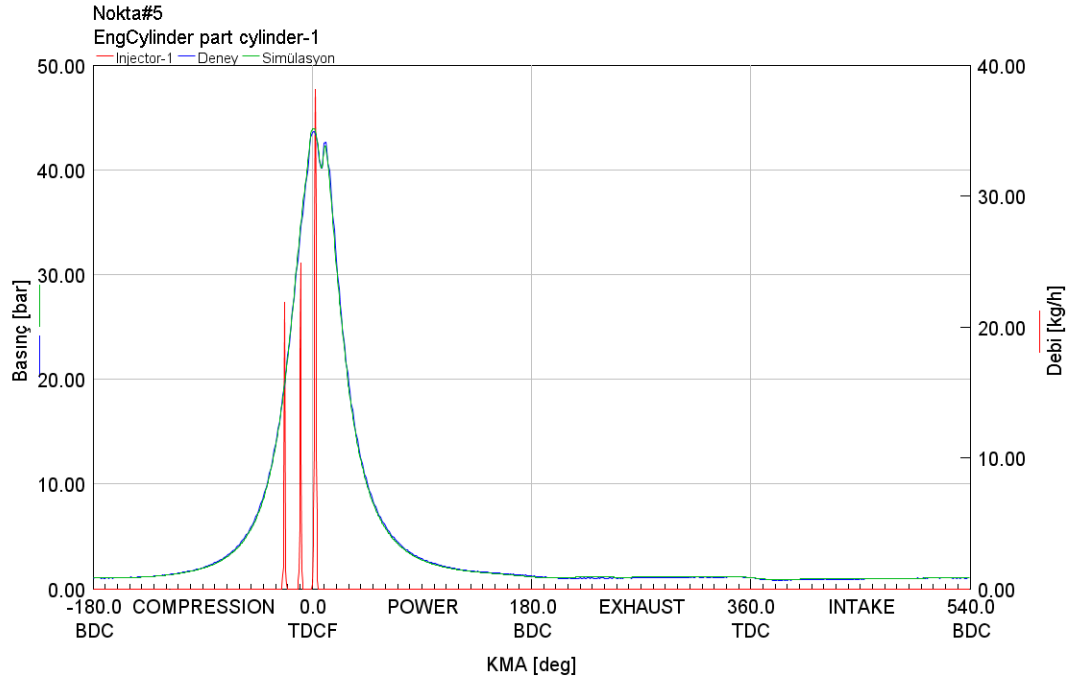
Şekil 3.13 Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



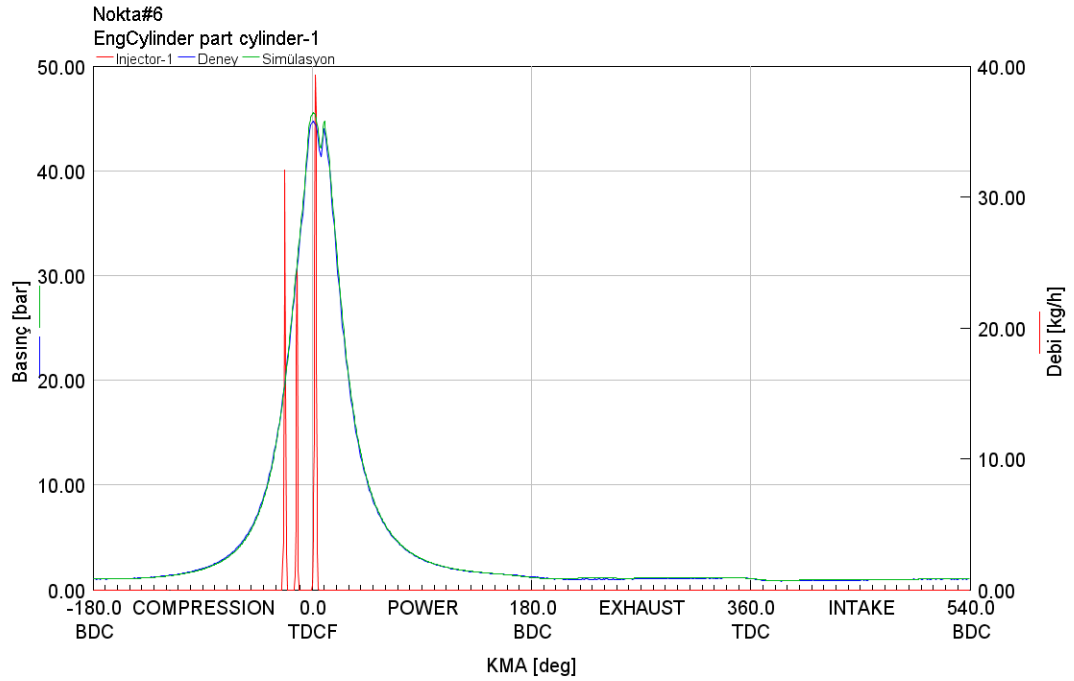
Şekil 3.14 Nokta#3 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



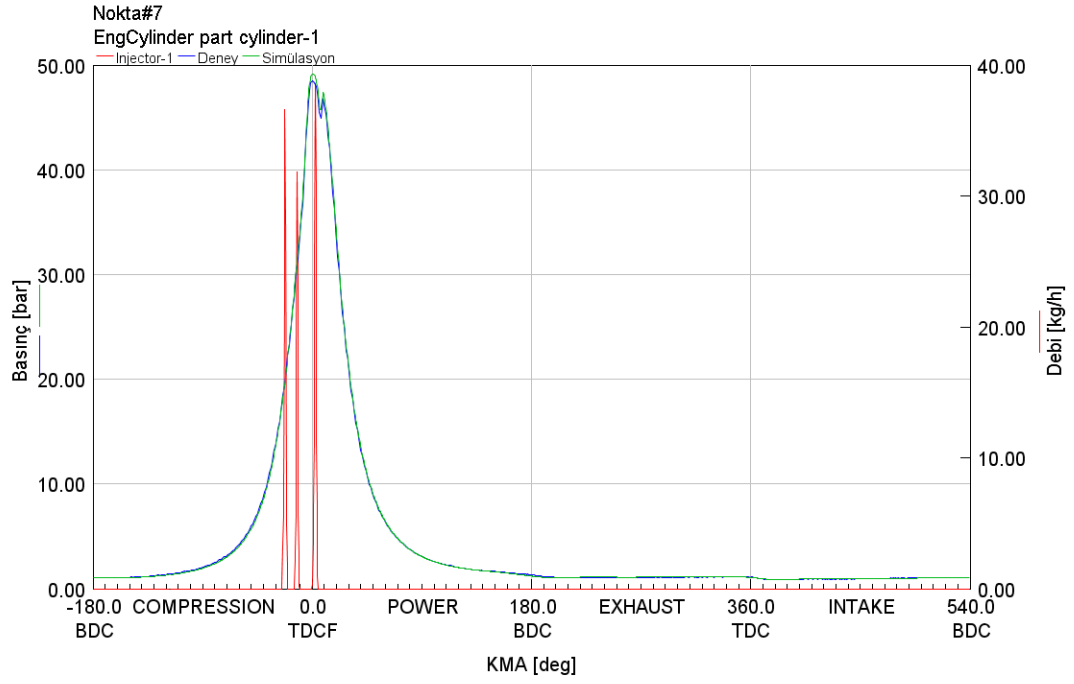
Şekil 3.15 Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



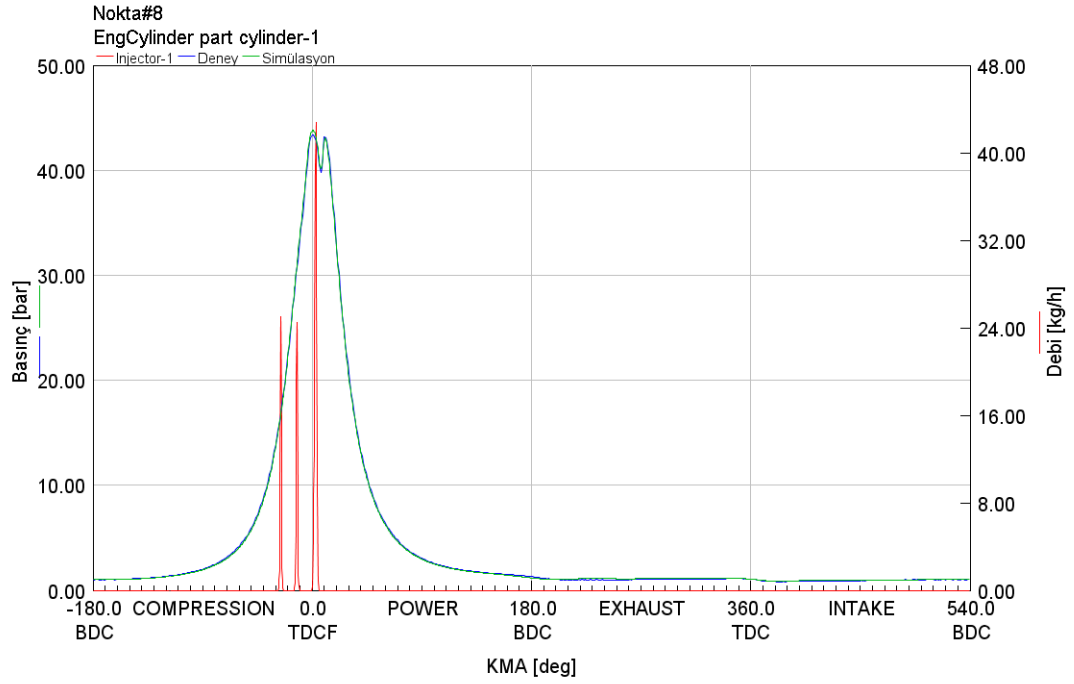
Şekil 3.16 Nokta#5 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



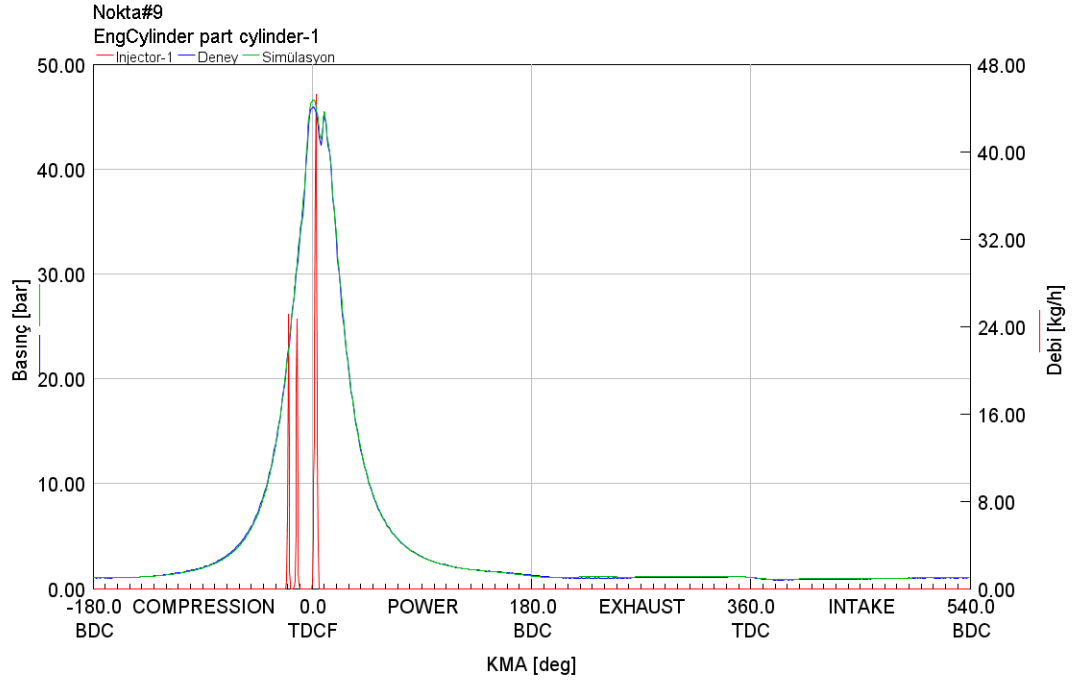
Şekil 3.17 Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



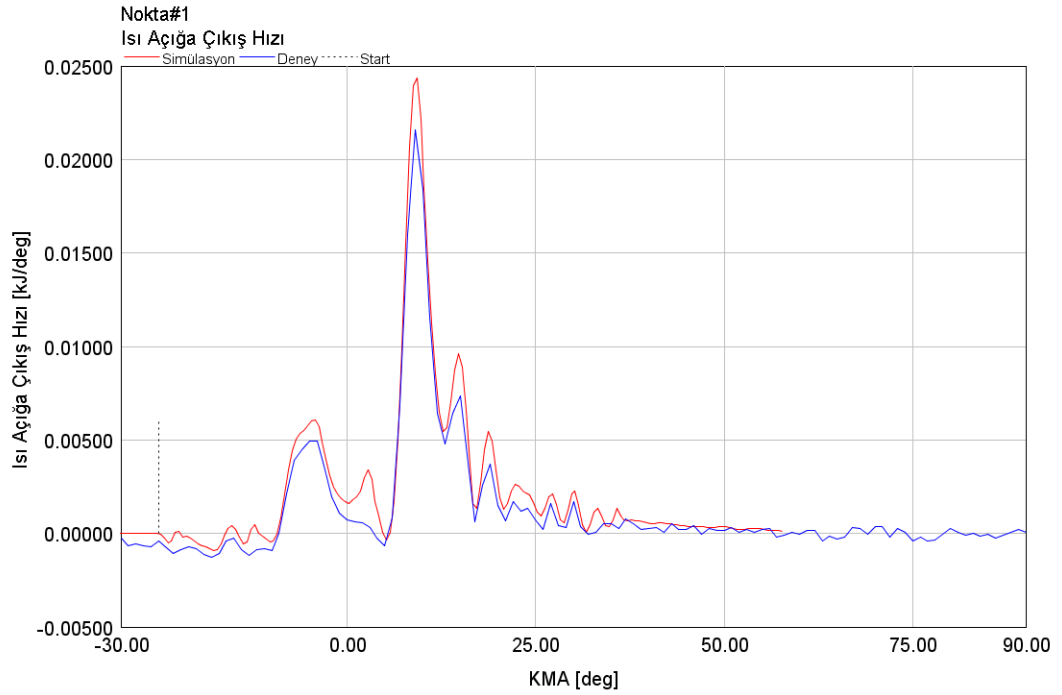
Şekil 3.18 Nokta#7 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



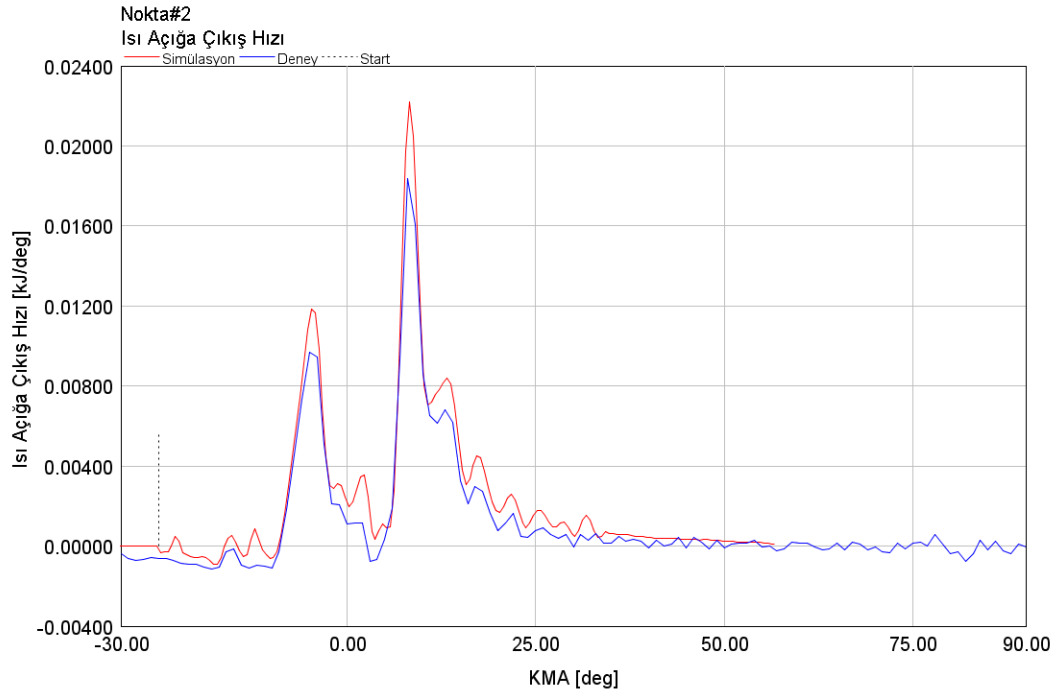
Şekil 3.19 Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



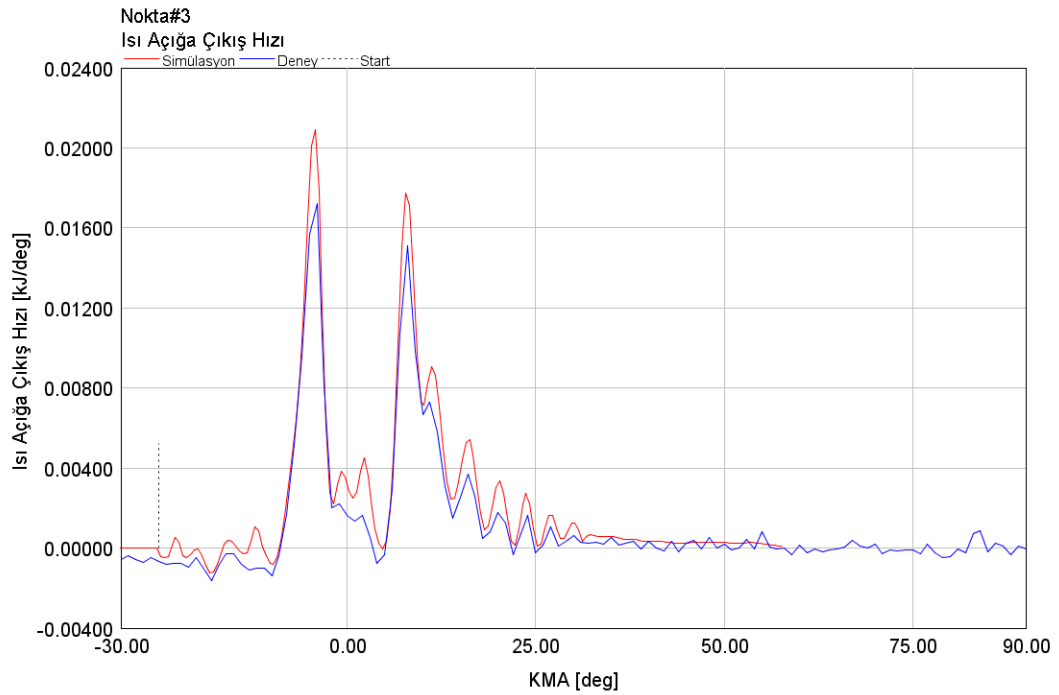
Şekil 3.20 Nokta#9 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



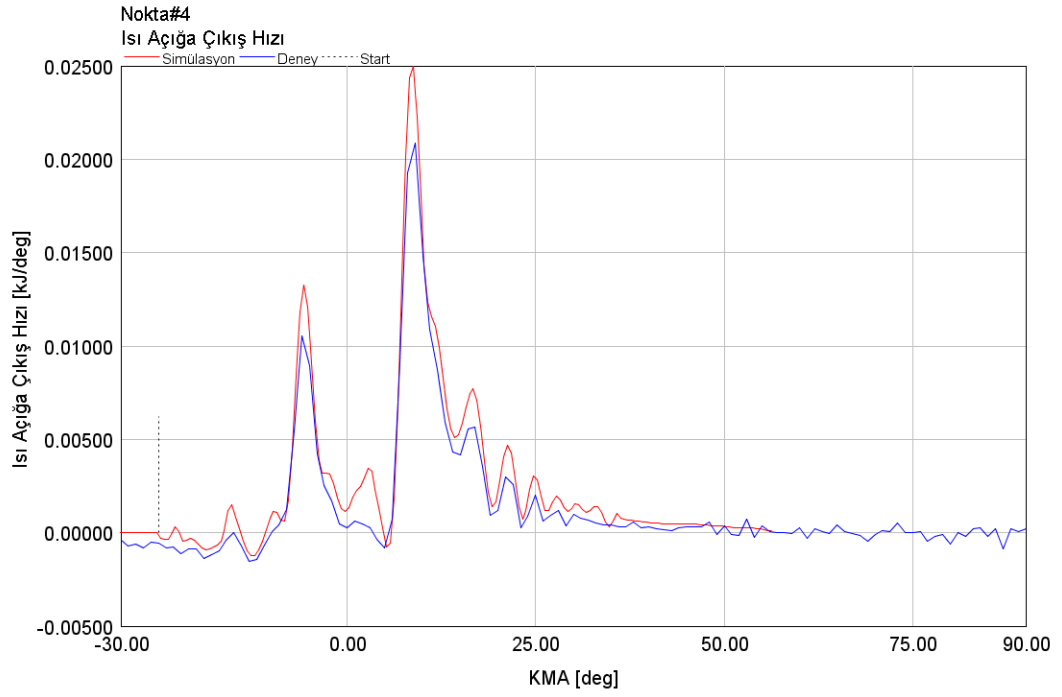
Şekil 3.21 Nokta#1 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



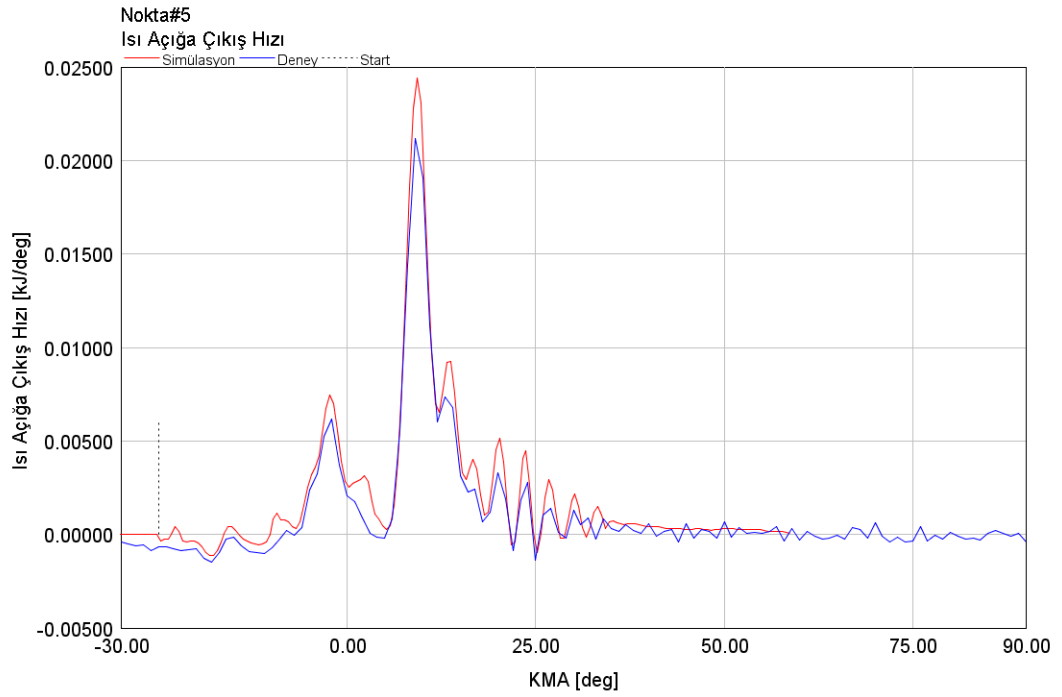
Şekil 3.22 Nokta#2 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



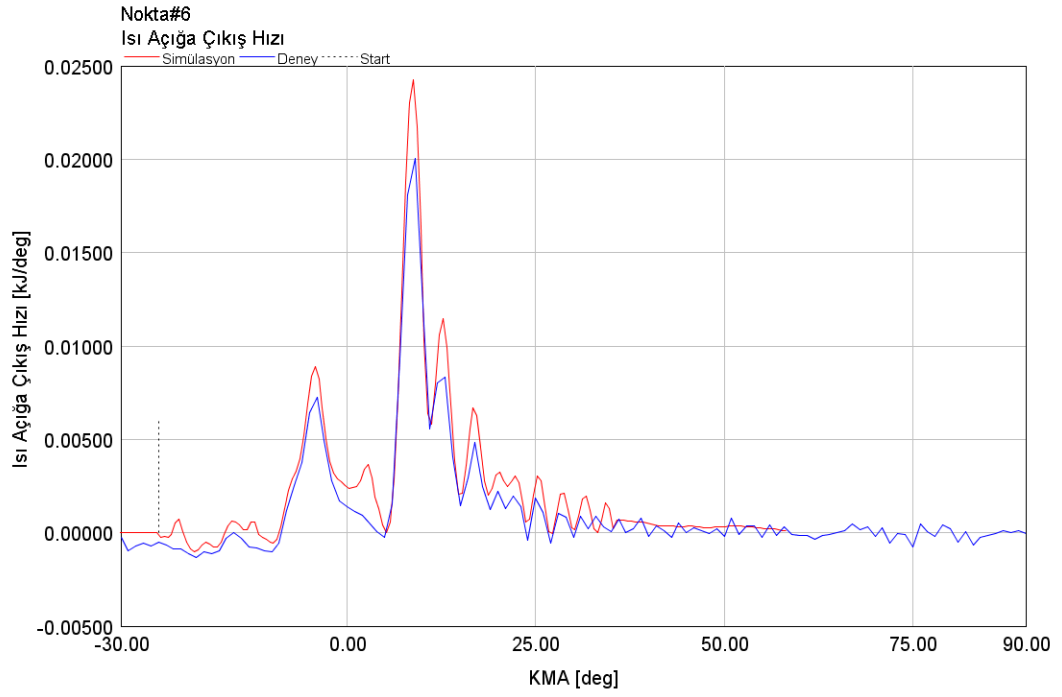
Şekil 3.23 Nokta#3 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



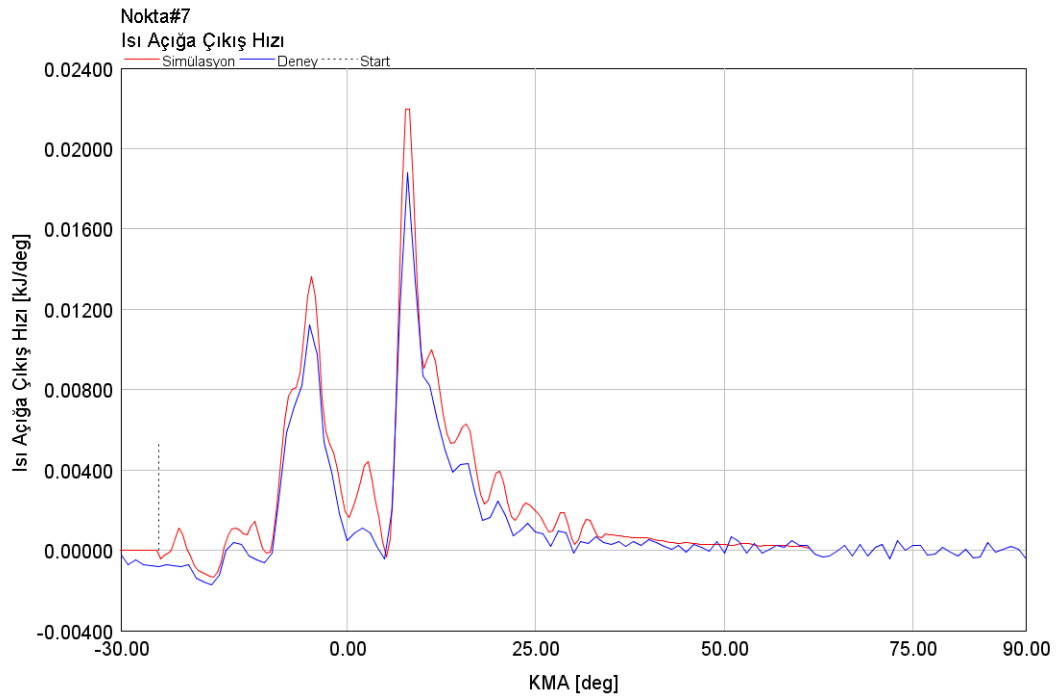
Şekil 3.24 Nokta#4 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



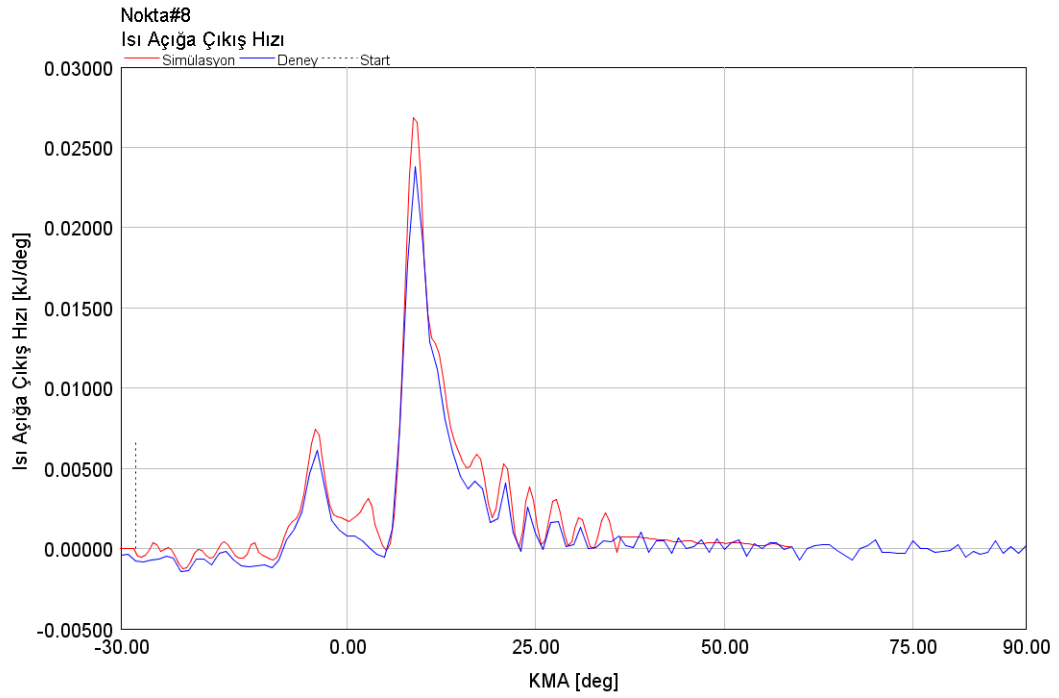
Şekil 3.25 Nokta#5 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



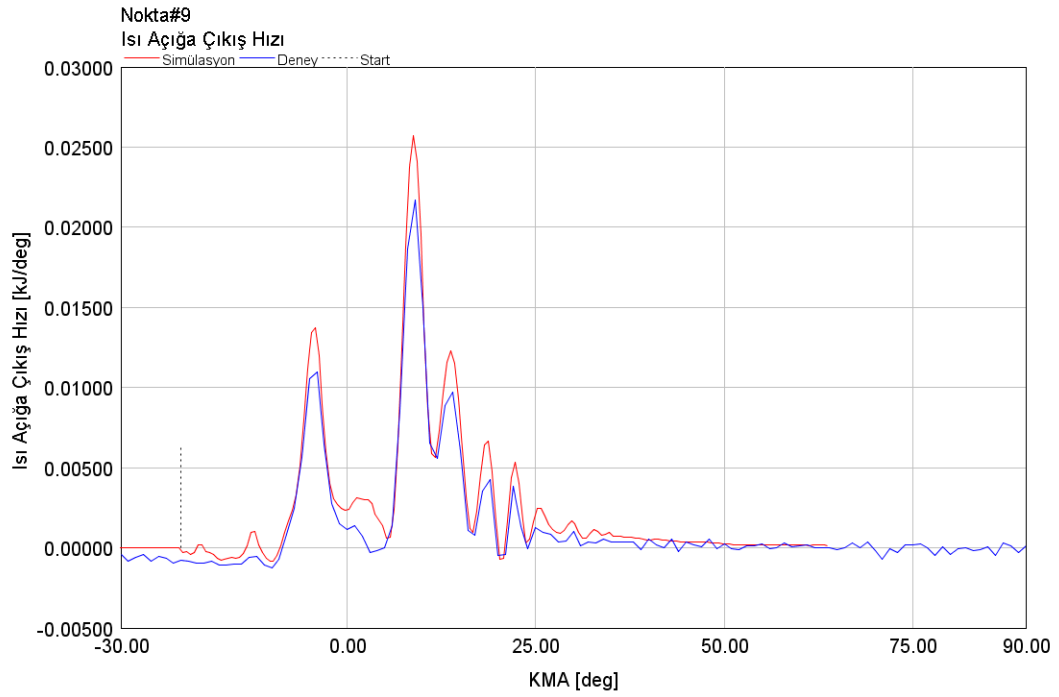
Şekil 3.26 Nokta#6 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



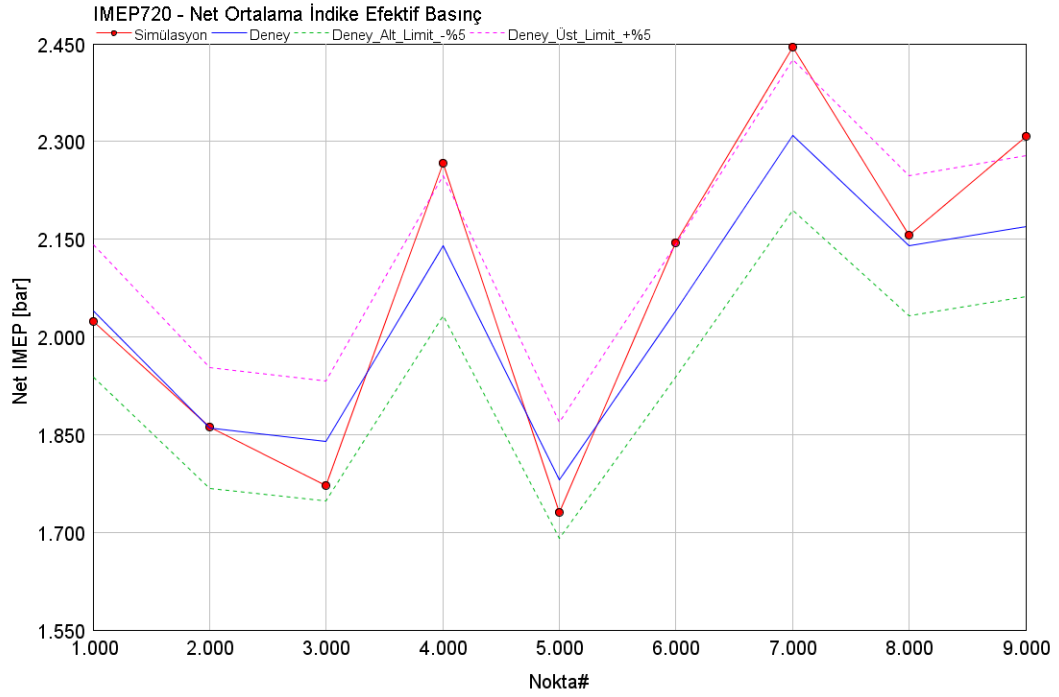
Şekil 3.27 Nokta#7 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



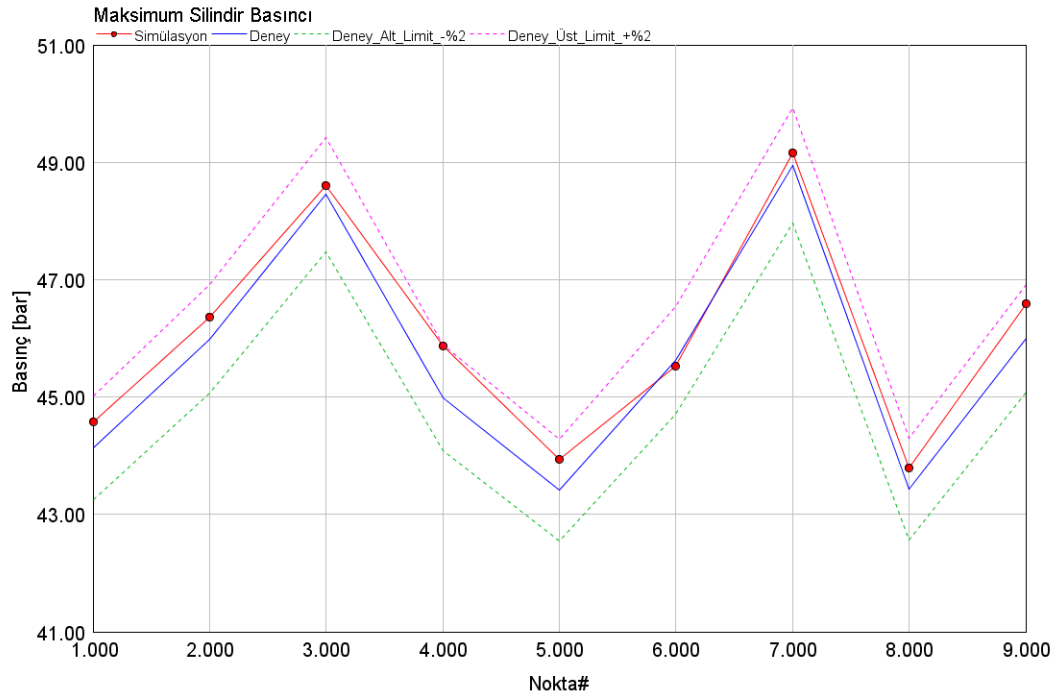
Şekil 3.28 Nokta#8 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



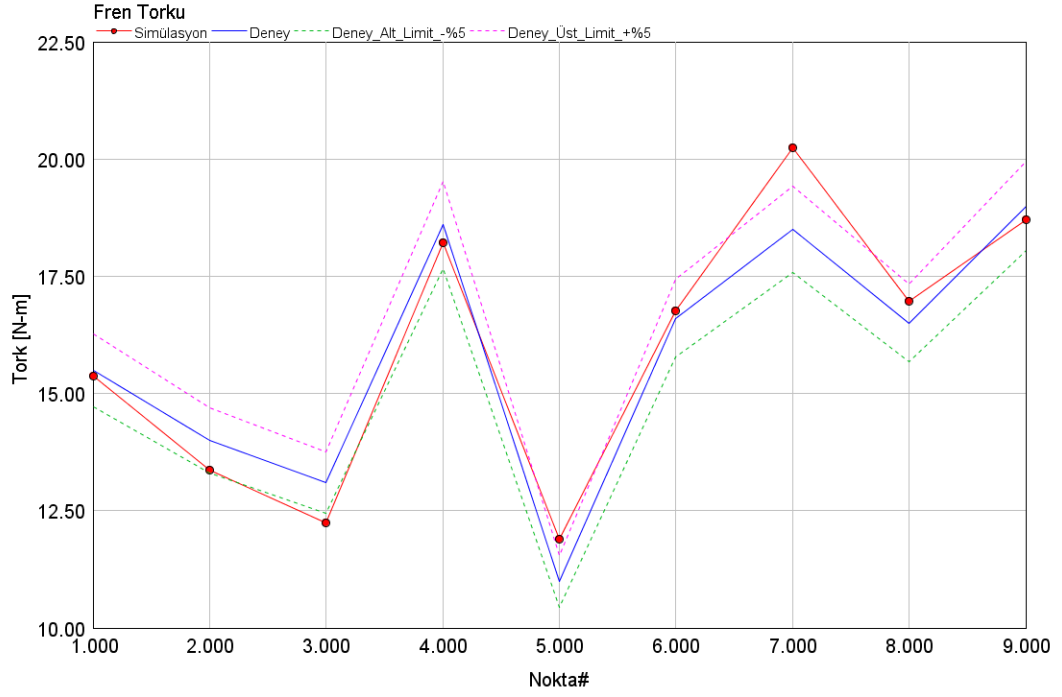
Şekil 3.29 Nokta#9 ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



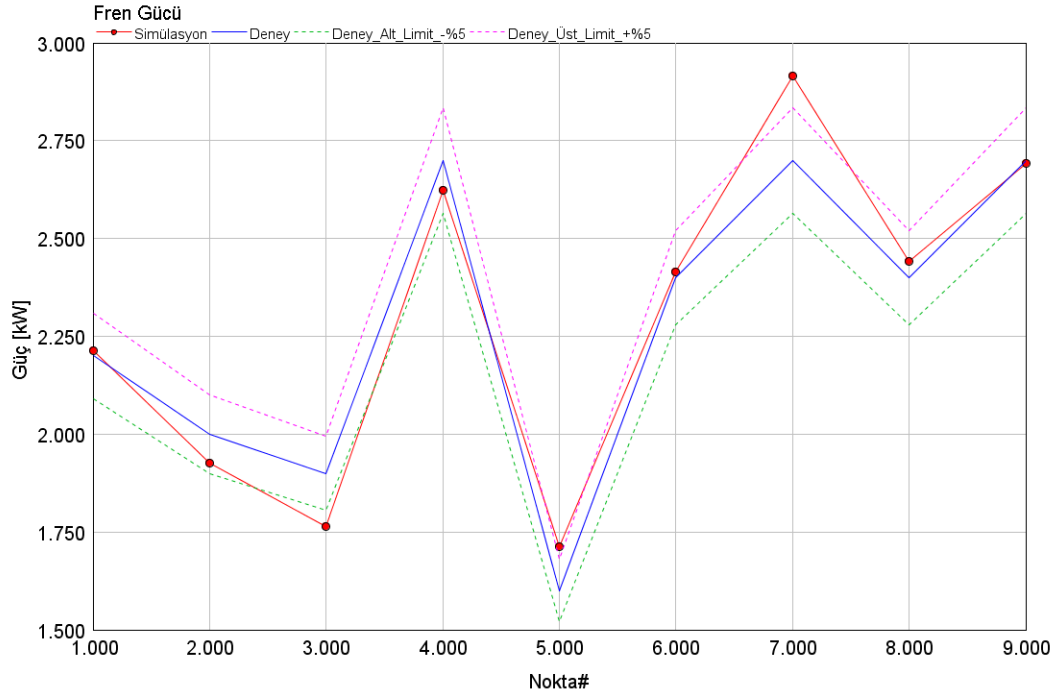
Şekil 3.30 Ortalama indike efektif basınç deney ve simülasyon sonuçları



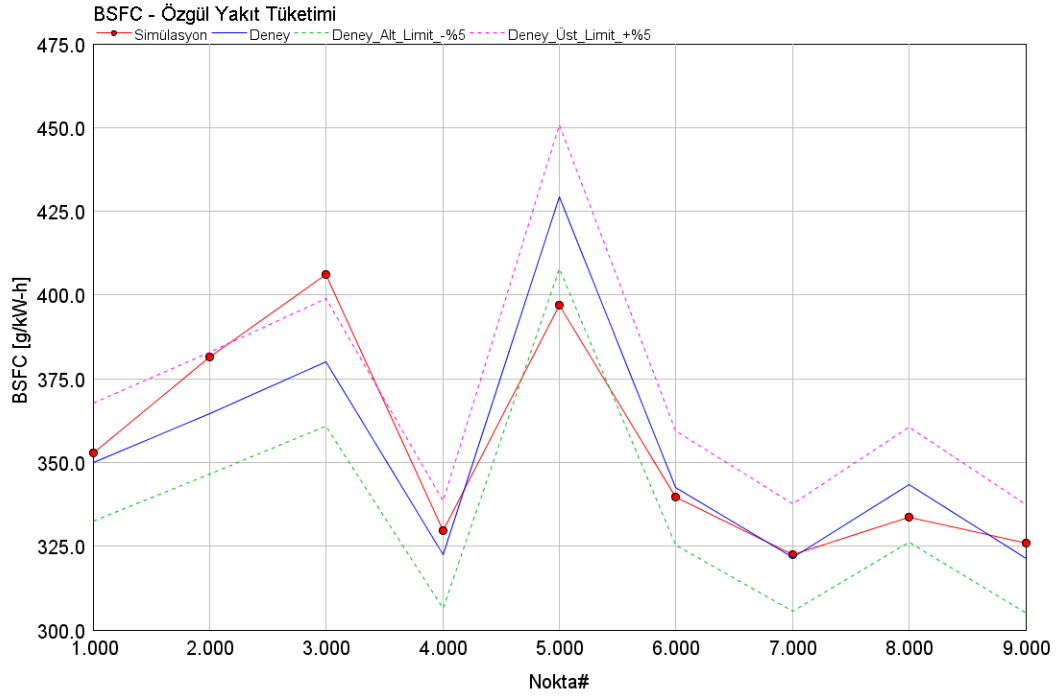
Şekil 3.31 Maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



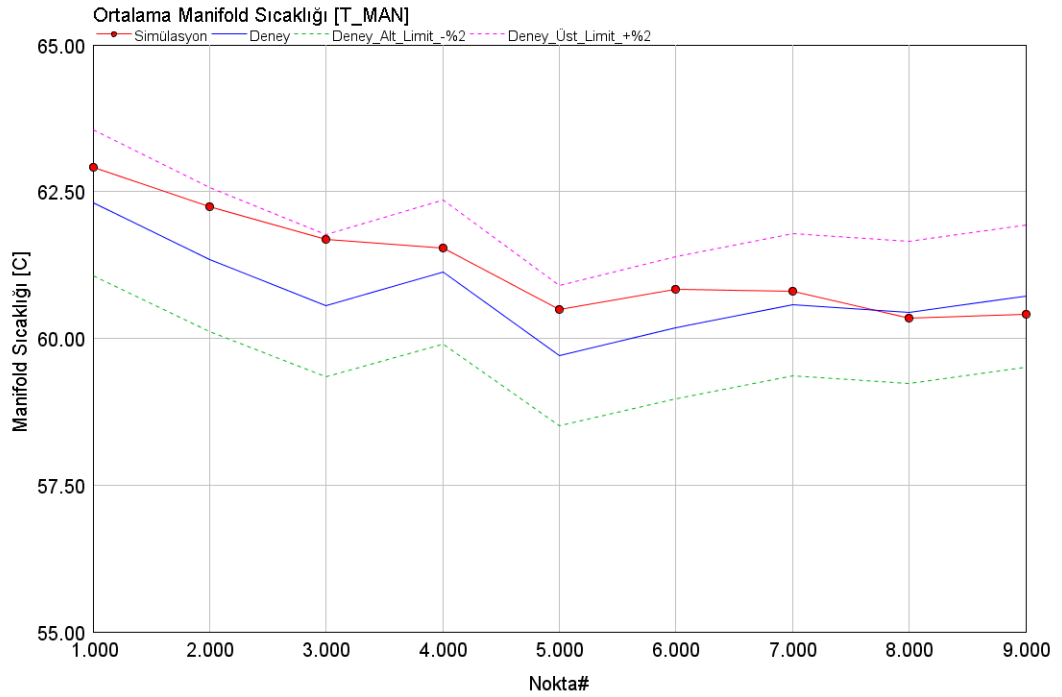
Şekil 3.32 Fren torku deney ve simülasyon sonuçları



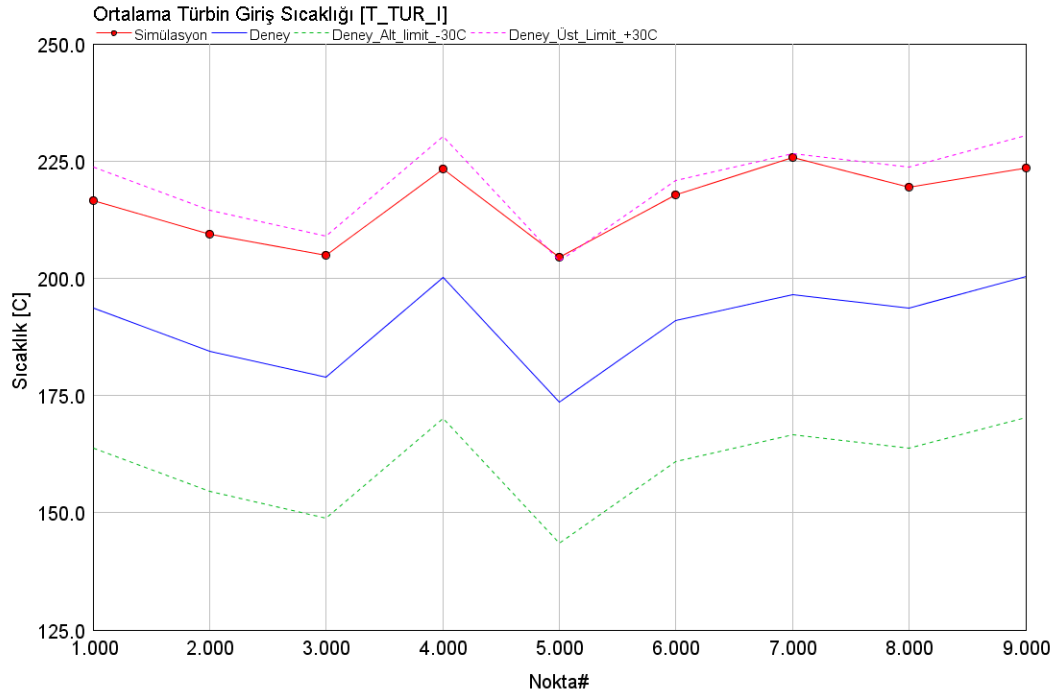
Şekil 3.33 Fren gücü deney ve simülasyon sonuçları



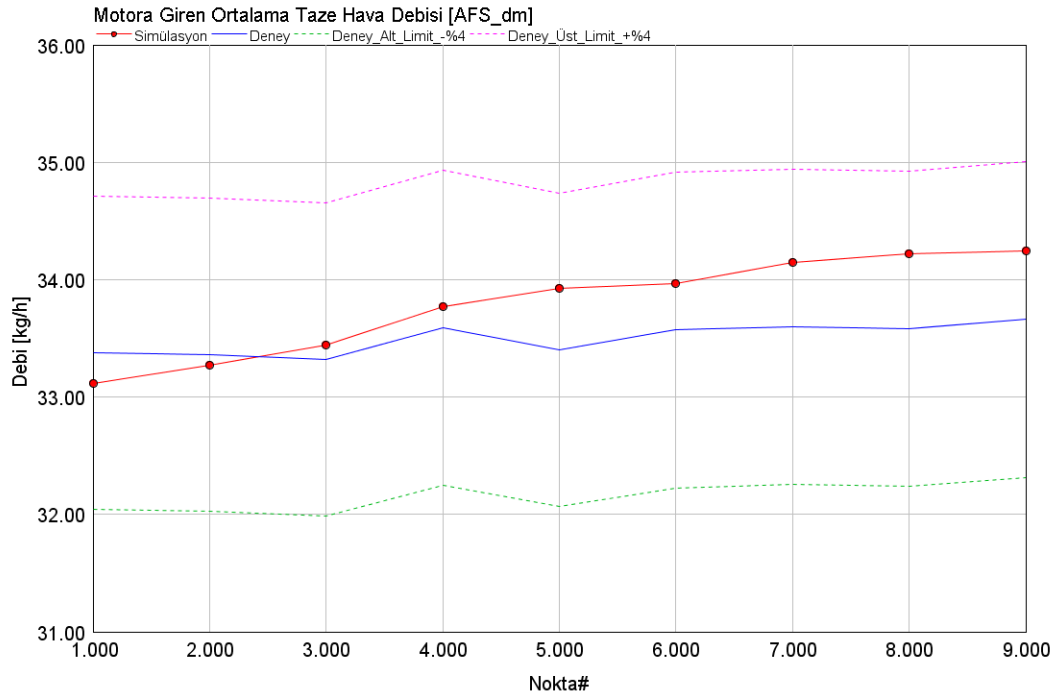
Şekil 3.34 Özgöl yakıt tüketimi deney ve simülasyon sonuçları



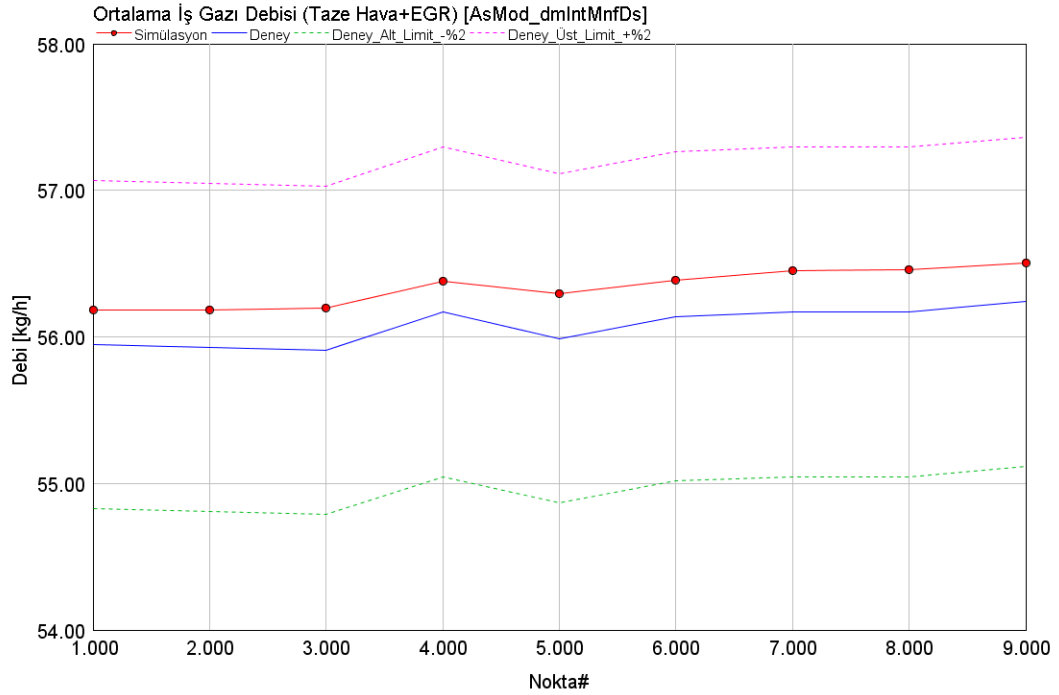
Şekil 3.35 Manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.36 Ortalama türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.37 Motora giren ortalama taze hava debisi deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.38 Motora giren ortalama iş gazı debisi deney ve simülasyon sonuçları

Üç basınç analizi ile istenen toleranslarda sonuçlar üreten motor modeline ulaşılmasının ardından “DIPulse” öngörülü yanma modeli kullanılarak benzer sonuçlara ulaşılmaya çalışılacaktır. DIPulse yanma modeli doğrudan püskürtmeli dizel motorda tek ve çoklu püskürtmedeki yanma hızlarını ve emisyonları öngörmektedir. Modelin temel yaklaşımı yakıtın enjekte edilmesi, buharlaşması, çevresindeki gazlarla karışması ve yanmasını izlemektir. Bu nedenle anlamlı sonuçlara ulaşabilmek için tam doğru bir yakıt püskürtme profili kesinlikle gerekmektedir. DIPulse modeli silindir basınç analizinden hesaplanan yanmanın eşleştirilmesi için kalibre edilmelidir. Sadece Nokta#1 verileri kullanılarak gerçekleştirilen parametre kalibrasyonuna ait parametre değişimleri ve sonuç grafikleri görülmektedir. Tüm motor modelinde püskürtme miktarları aşağıdaki şekilde girilerek tüm motor modeline sadece Nokta#1 için, DIPulse parametrelerinin Tablo 3.17 de görülen limitler dahilinde Latin Hybercube kullanılarak 100 noktalı bir deney matrisi koşulmuştur. Bu deney matrisi sonucunda 33. durumun sonuçları tatmin edici olmuştur. Nokta#1’de kullanılan püskürtme miktarları $q_{PI2}=0,6$, $q_{PI1}=0,6$ ve $q_{MI1}=3,52$ mg ‘dır.

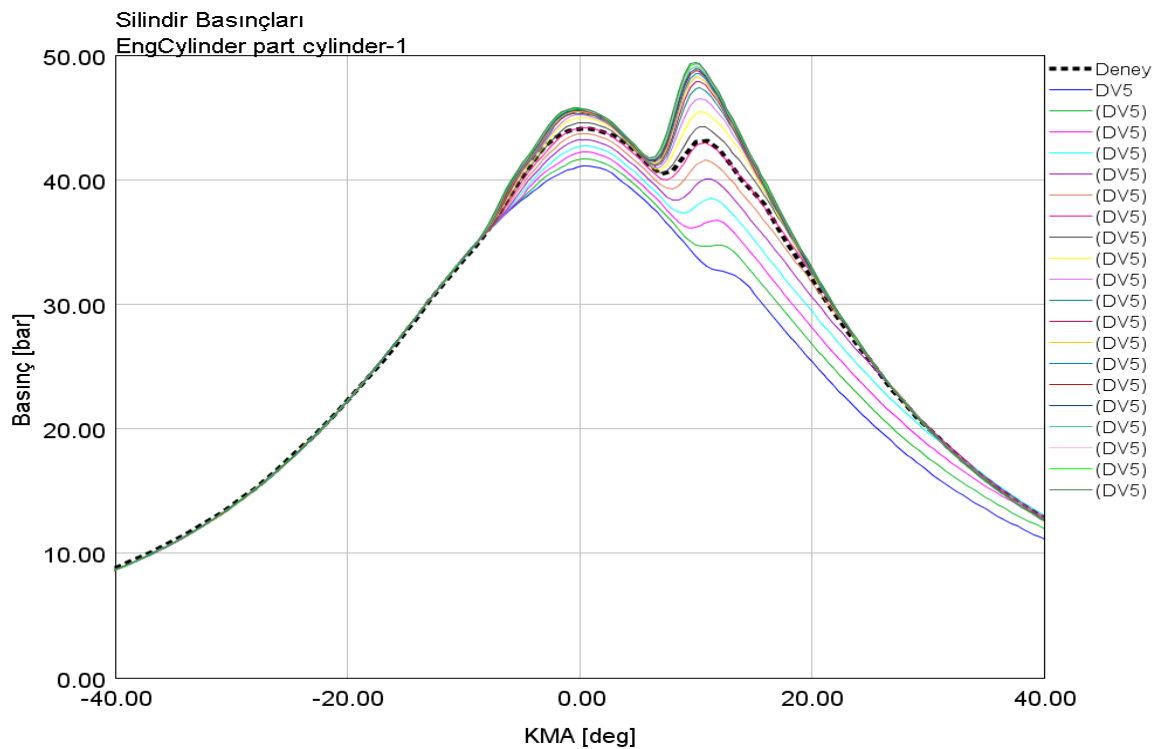
Tablo 3.17 DIPulse parametreleri kalibrasyon deney matrisi aralıkları

<i>DIPulse Parametreleri</i>	<i>Min.</i>	<i>Maks.</i>	<i>Adım Sayısı</i>	<i>Opt. Değer</i>
Girişim Hızı Çarpanı	0,5	2,8	20	1,26759
Tutuşma Gecikmesi Çarpanı	0,3	1,7	20	1,15417
Ön Karışımli Yanma Hızı Çarpanı	0,05	2,5	20	1,35274
Karışım Kontrollü Yanma Hızı Çarpanı	0,4	1,4	20	1,28053

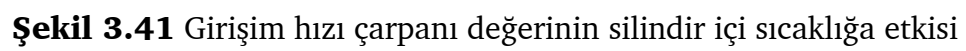
Optimum DIPulse parametrelerinin bulunmasının ardından girişim hızı çarpanı parametresinin Tablo 3.18’de görülen değerlerde değişiminin silindir basıncına, ısı açığa çıkış hızına ve silindir içi sıcaklığa etkisi aşağıda görülmektedir.

Tablo 3.18 Girişim hızı çarpanı değişim değerleri

Girişim Hızı Çarpanı	
0,5	1,71053
0,621053	1,83158
0,742105	1,95263
0,863158	2,07368
0,984211	2,19474
1,10526	2,31579
1,22632	2,43684
1,34737	2,55789
1,46842	2,67895
1,58947	2,8



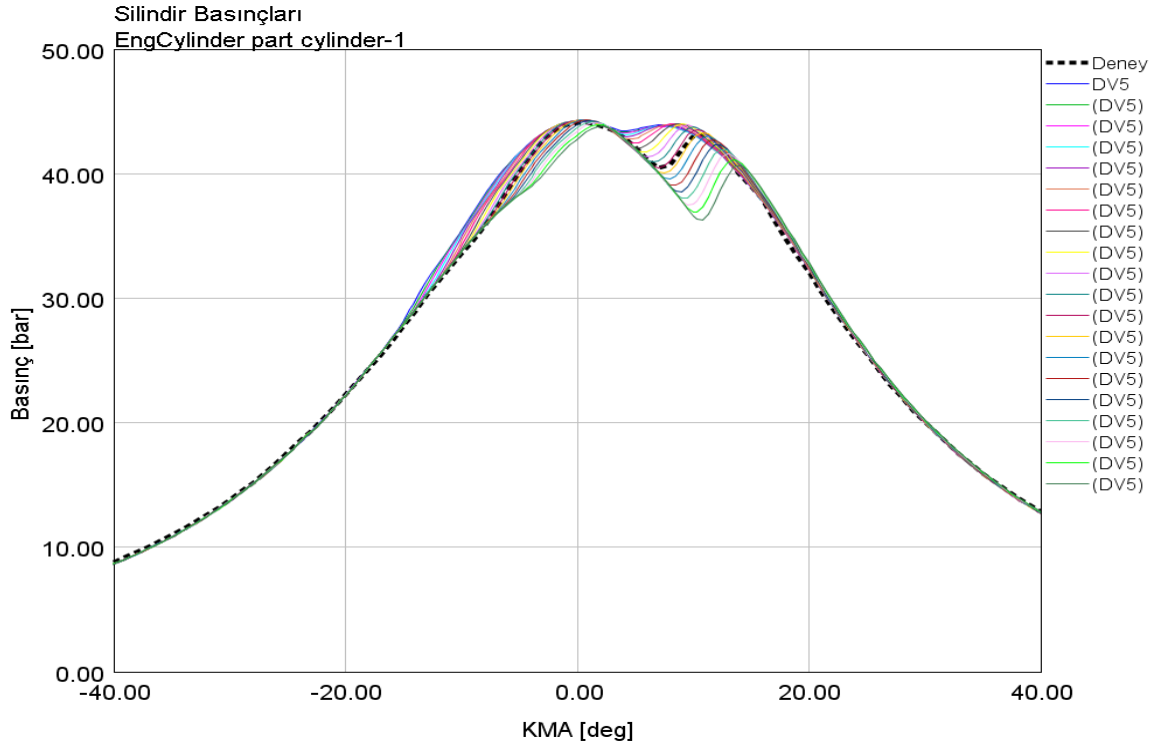
Şekil 3.39 Girişim hızı çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi



Optimum DIPulse parametrelerinin bulunmasının ardından tutuşma gecikmesi çarpanı parametresinin Tablo 3.19 da görülen değerlerde değişiminin silindir basıncına, ısı açığa çıkış hızına ve silindir içi sıcaklığa etkisi aşağıda görülmektedir.

Tablo 3.19 Tutuşma gecikmesi çarpanı değişim değerleri

<i>Tutuşma Gecikmesi Çarpanı</i>		
0,3	0,815789	1,33158
0,373684	0,889474	1,40526
0,447368	0,963158	1,47895
0,521053	1,03684	1,55263
0,594737	1,11053	1,62632
0,668421	1,18421	1,7
0,742105	1,25789	

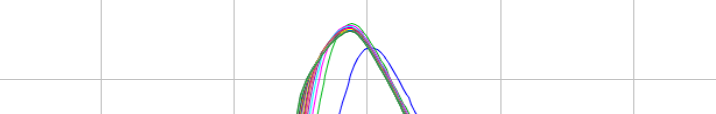


Şekil 3.42 Tutuşma gecikmesi çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi



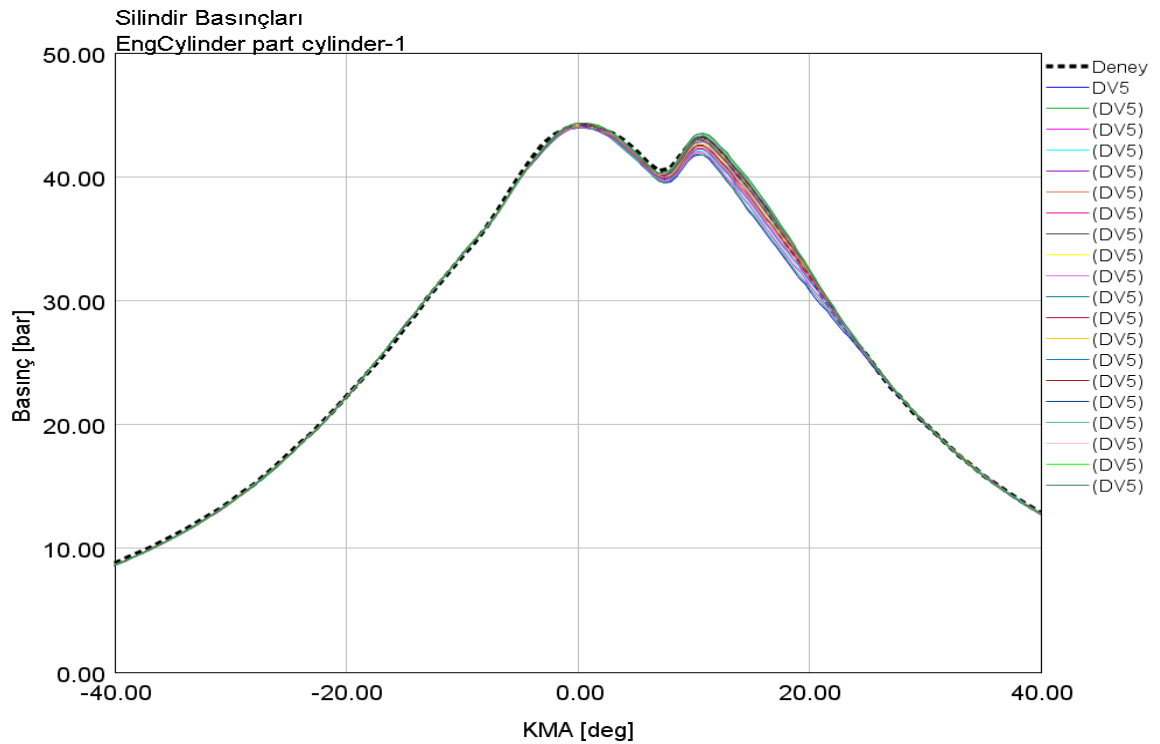


ndir İçi Sıcaklıkları
gCylinder part cylinder-1

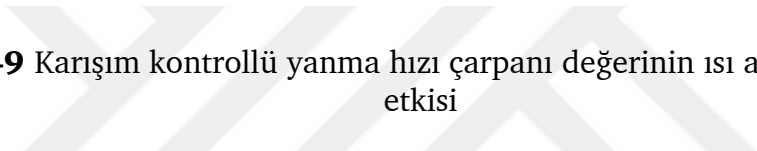


Tablo 3.21 Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değişim değerleri

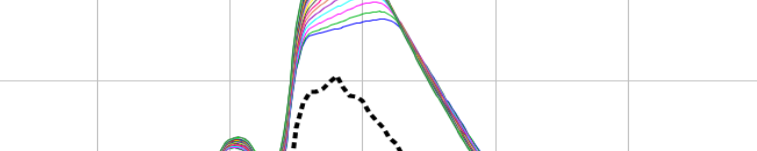
Karışım Kontrollü Yanma Hızı Çarpanı		
0,4	0,768421	1,13684
0,452632	0,821053	1,18947
0,505263	0,873684	1,24211
0,557895	0,926316	1,29474
0,610526	0,978947	1,34737
0,663158	1,03158	1,4
0,715789	1,08421	



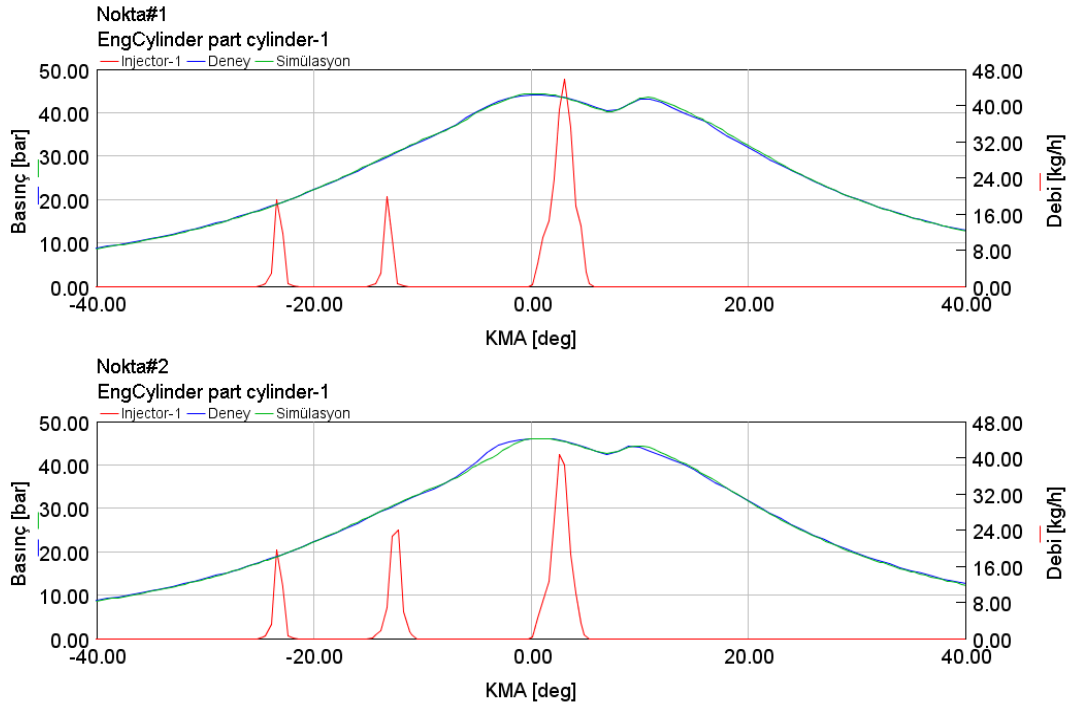
Şekil 3.48 Karışım kontrollü yanma hızı çarpanı değerinin silindir basıncına etkisi



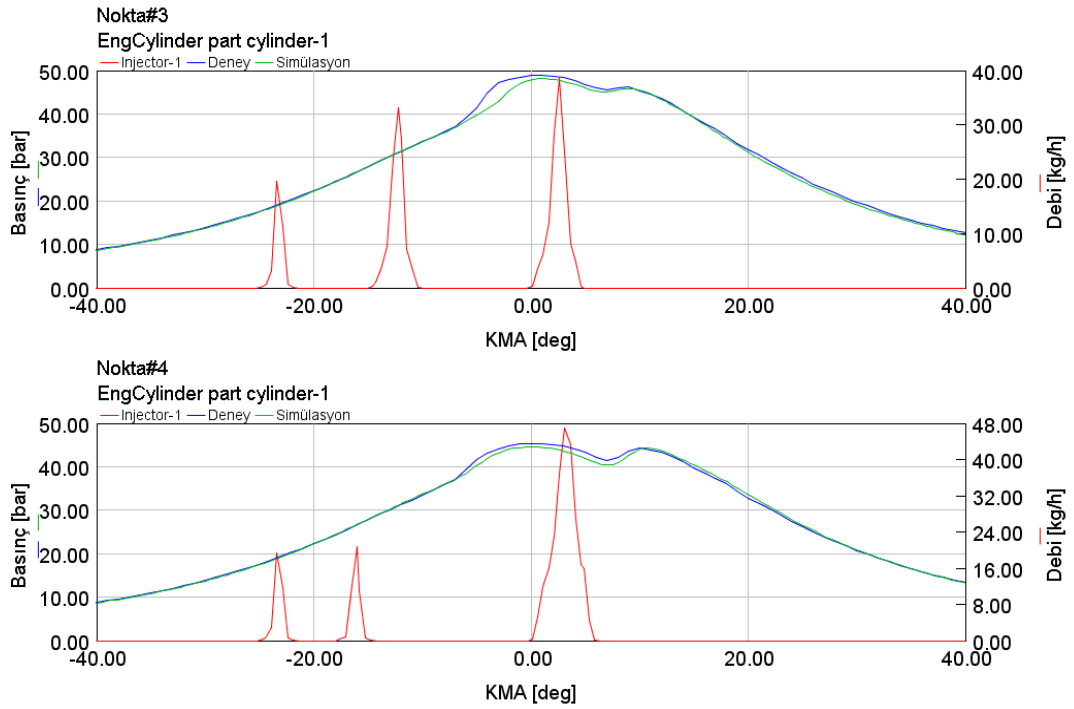
İçerik: Sıcaklık Çizimi
Cylinder part cylinder-1



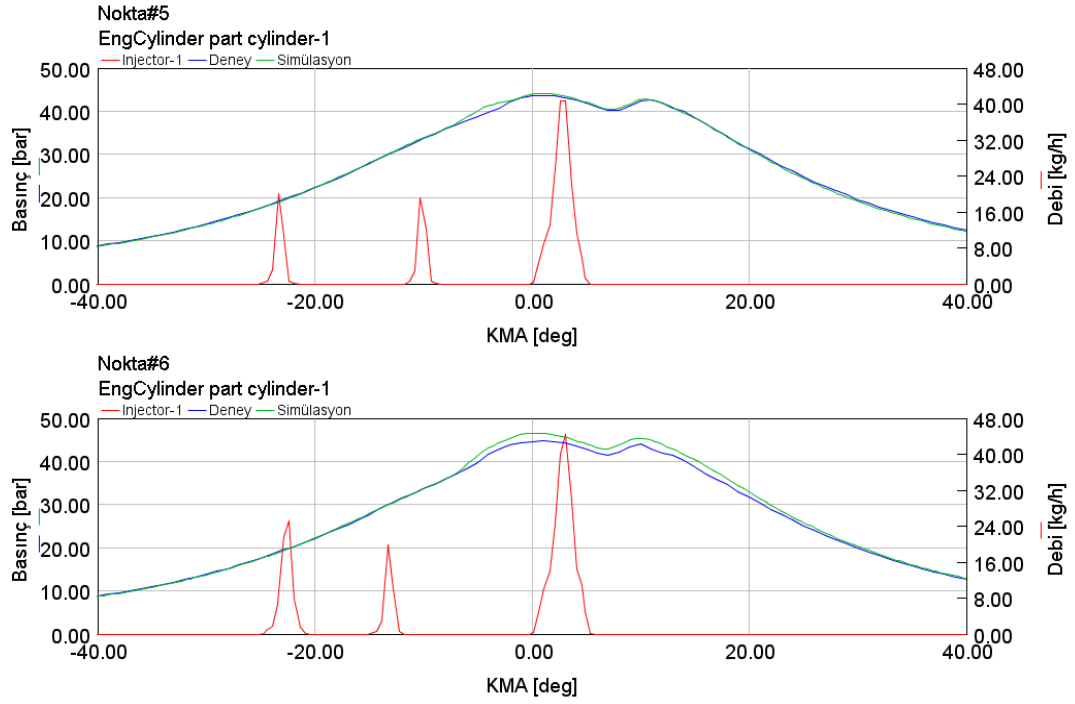
Optimum DIPulse parametreleri ile Tablo 3.14 te listelenen tüm noktalar için simülasyon koşturulmuş ve deney ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.



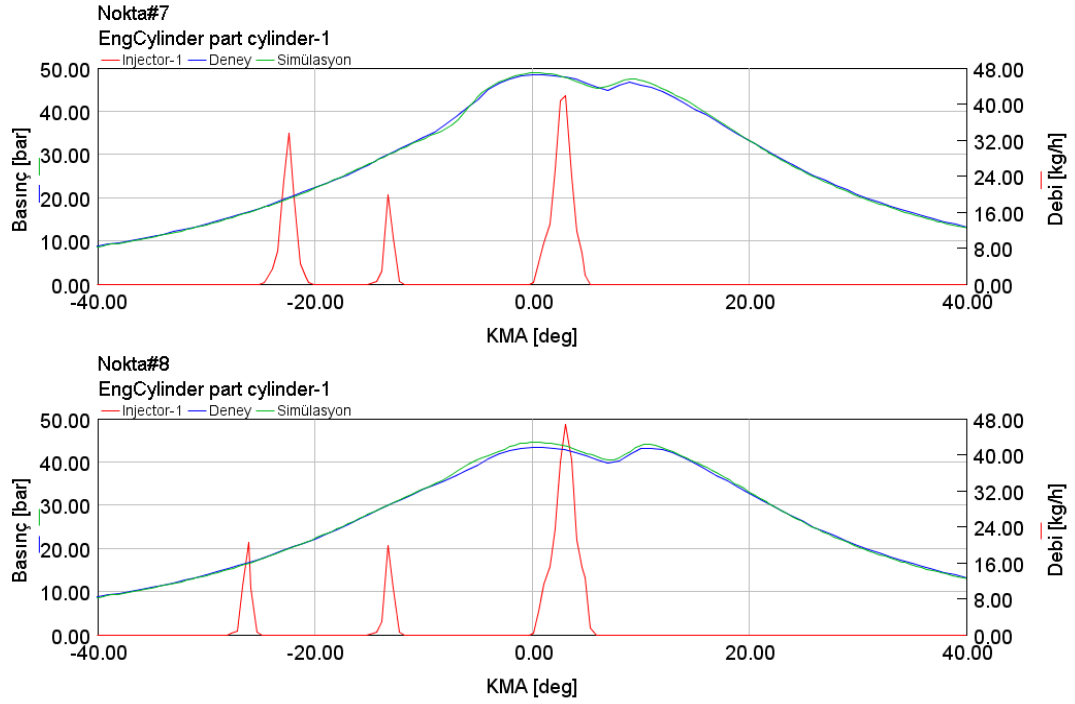
Şekil 3.51 Nokta#1 ve Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



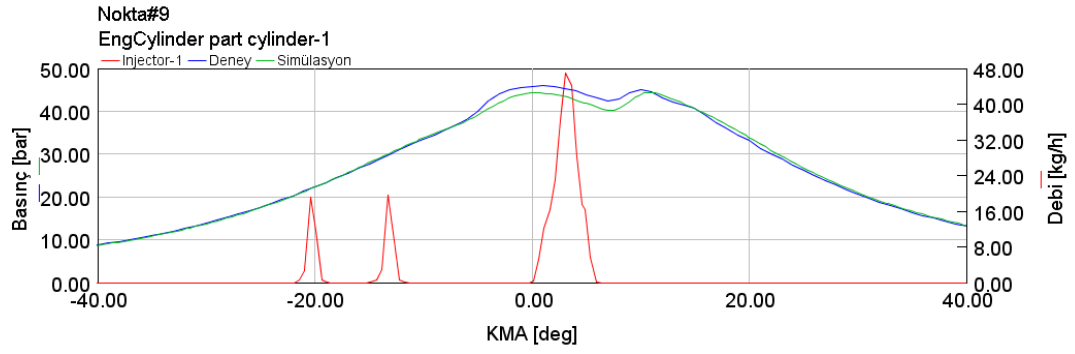
Şekil 3.52 Nokta#3 ve Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



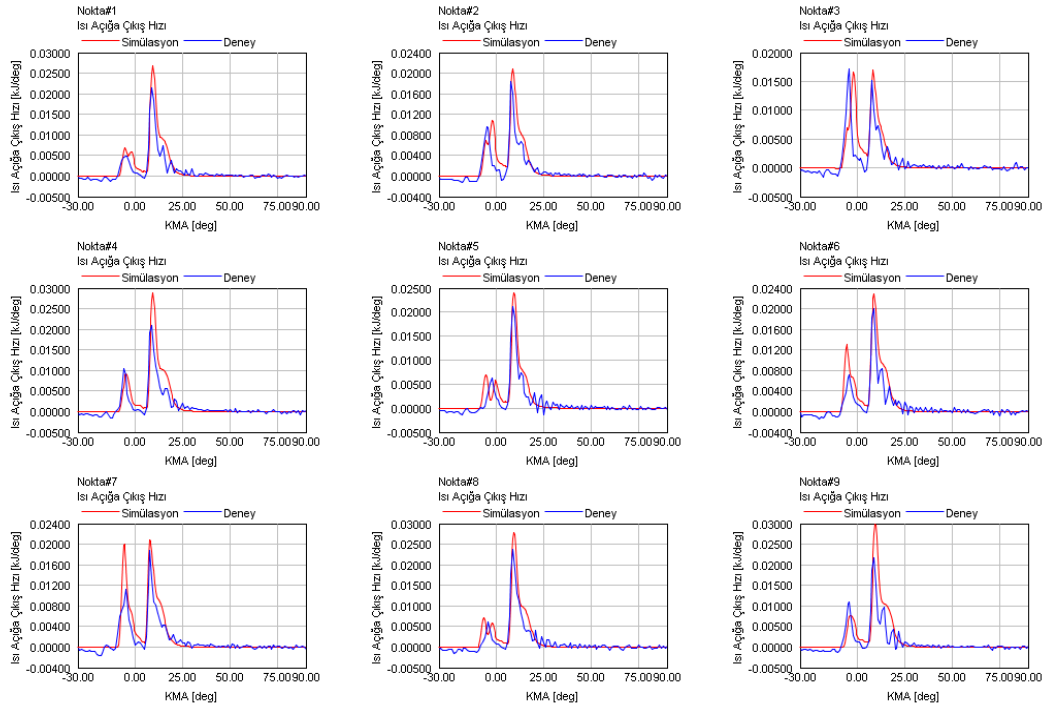
Şekil 3.53 Nokta#5 ve Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



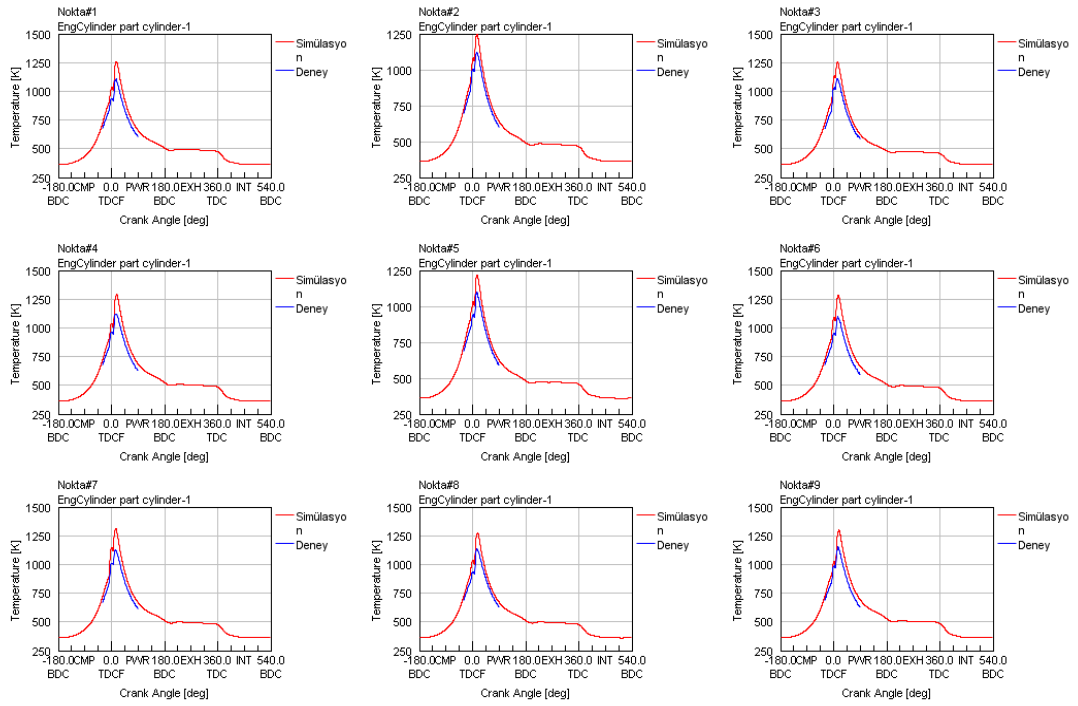
Şekil 3.54 Nokta#7 ve Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



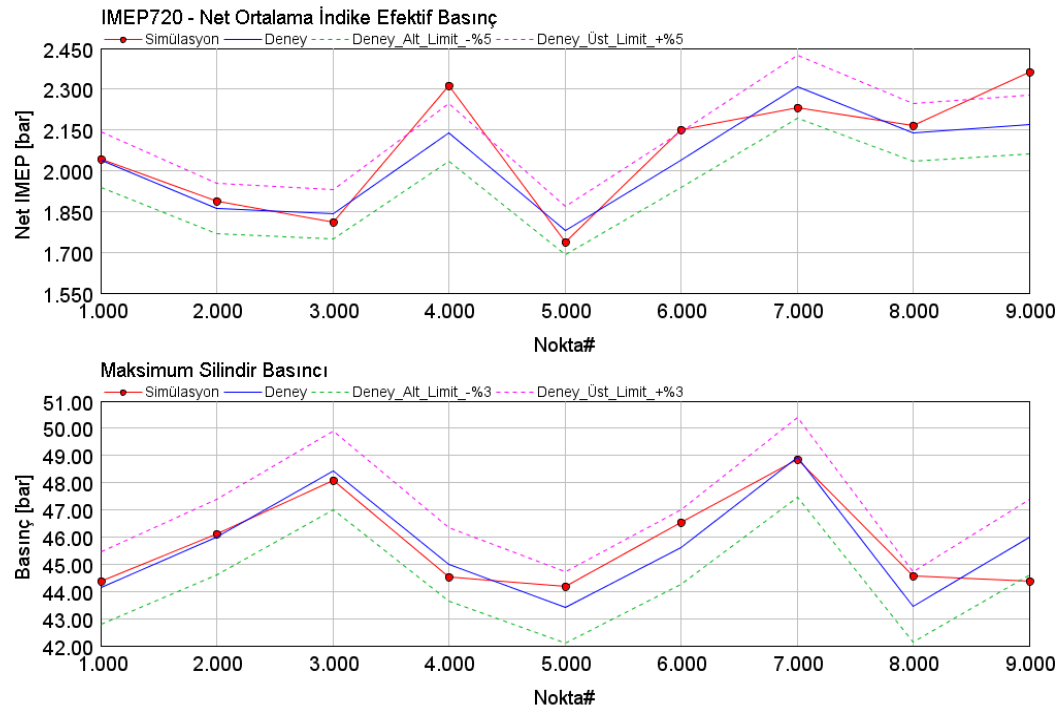
Şekil 3.55 Nokta#9 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



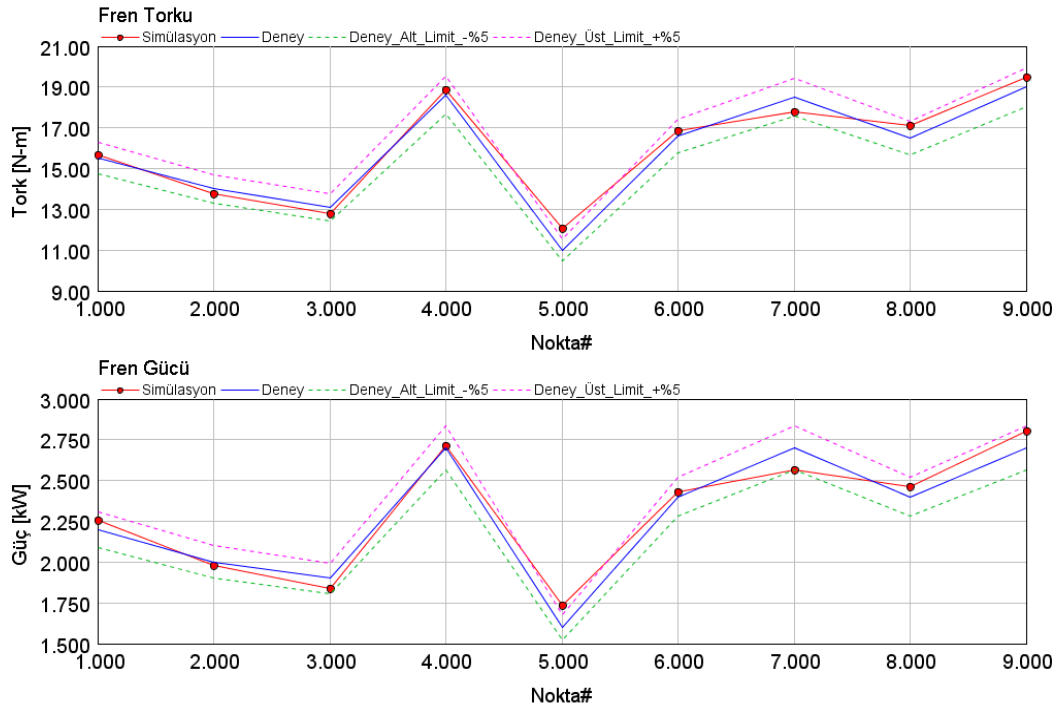
Şekil 3.56 Tüm noktaların ısı açığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



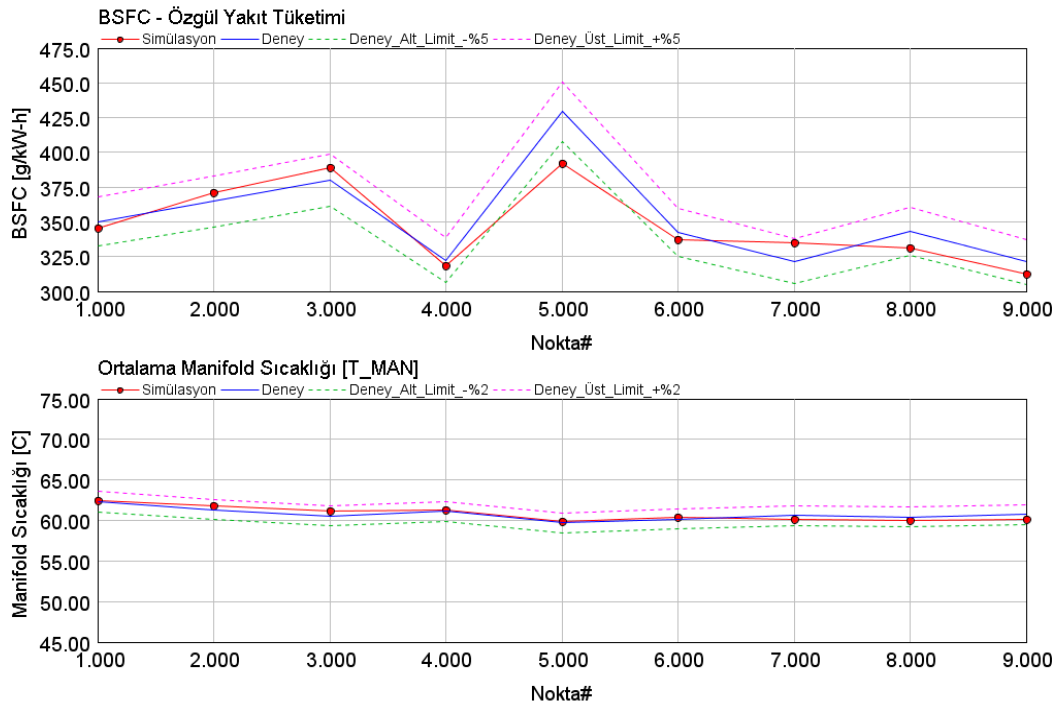
Şekil 3.57 Tüm noktaların silindir içi sıcaklık deney ve simülasyon sonuçları



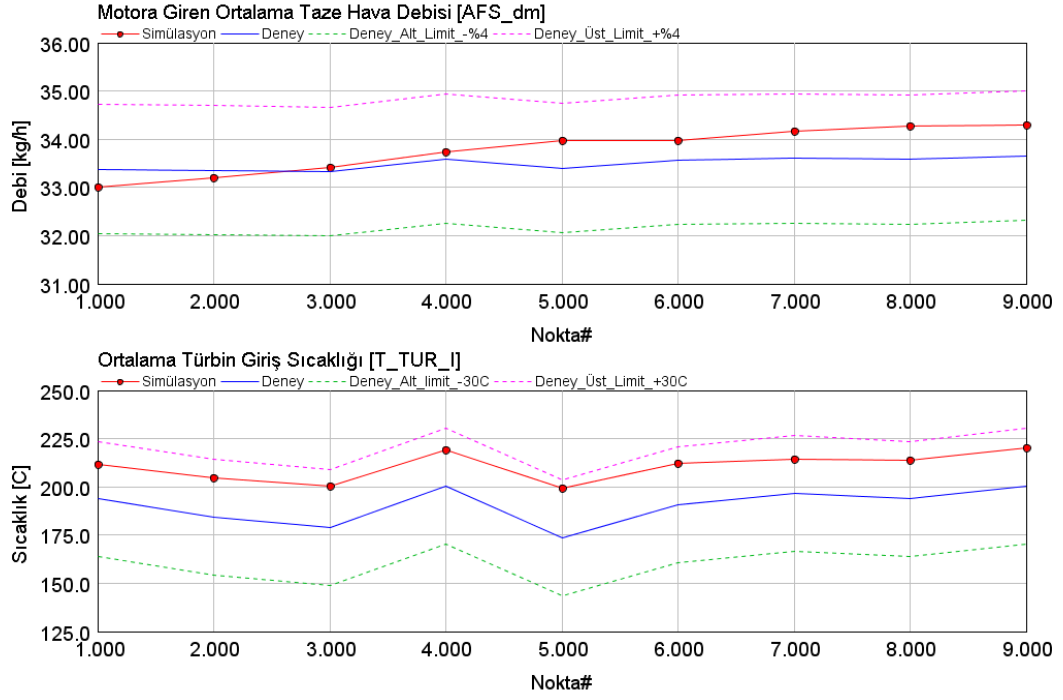
Şekil 3.58 Tüm noktaların ortalama indike efektif basınç ve maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



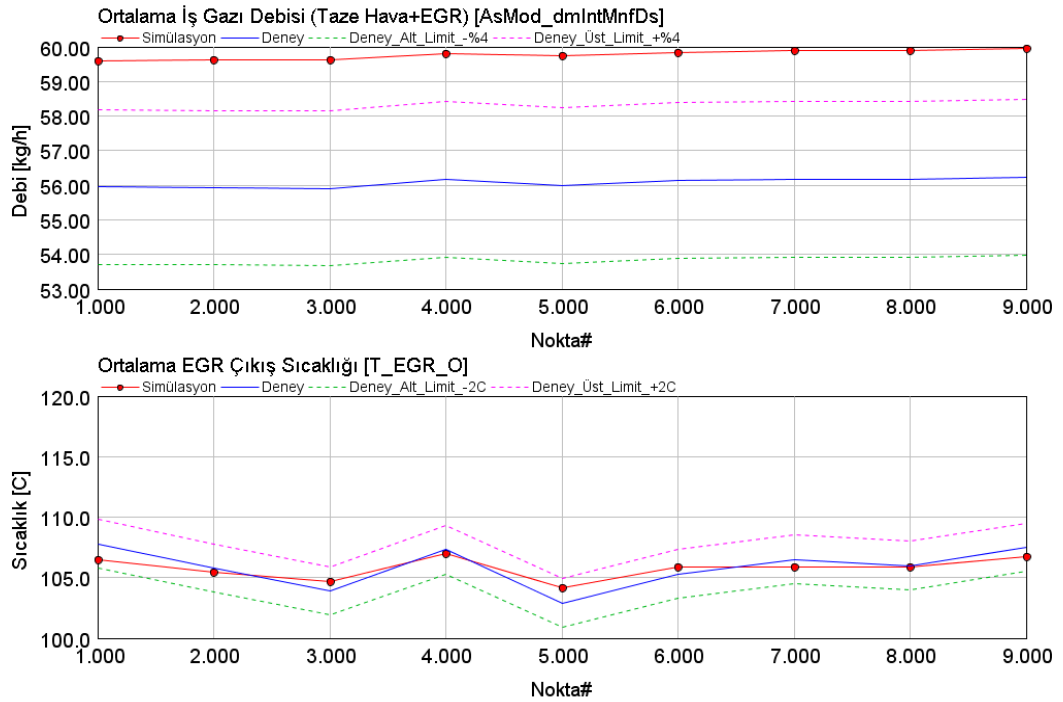
Şekil 3.59 Tüm noktaların fren torku ve fren gücü deney ve simülasyon sonuçları



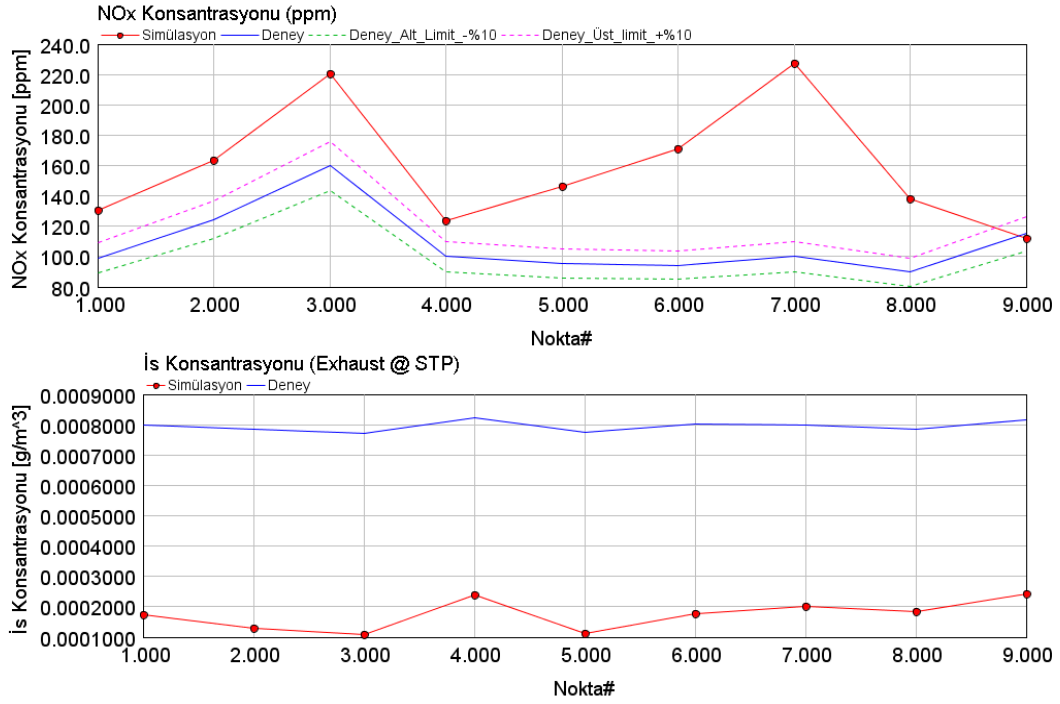
Şekil 3.60 Tüm noktaların özgül yakıt tüketimi ve manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



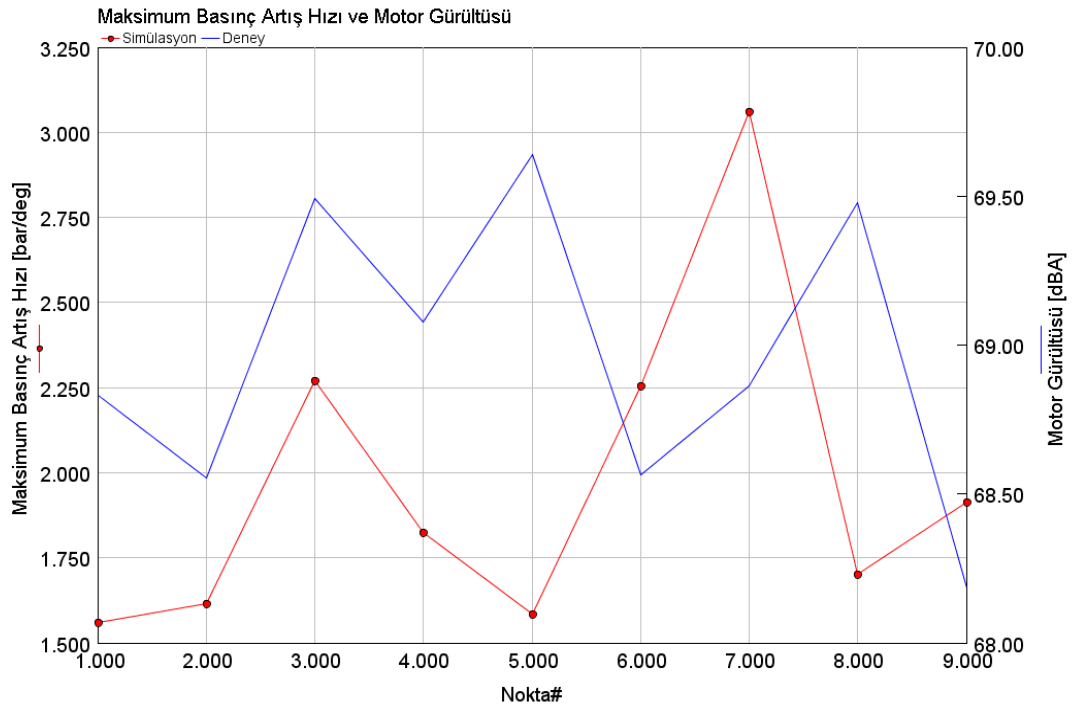
Şekil 3.61 Tüm noktaların motora giren taze hava debisi ve türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.62 Tüm noktaların toplam iş gazı debisi ve egr çıkış sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.63 Tüm noktaların NO_x ve is konsantrasyonları deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.64 Tüm noktaların maksimum basınç artış hızı ve motor gürültüsü deney ve simülasyon sonuçları

Elde edilen simülasyon sonuçlarının kontrol edilmesi amacıyla farklı bir devir ve yük noktasındaki, farklı ray basıncı ve EGR miktarının motor performansına ve

emisyona larına olan etkileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada motorun çalışma parametreleri ve ölçüm sonuçları Tablo 3.22 de görölmektedir.



Tablo 3.22 Kontrol amaçlı koşulan deney noktalarındaki motor çalışma parametreleri

Parametre	Birim	Nokta #1	Nokta #2	Nokta #3	Nokta #4	Nokta #5	Nokta #6	Nokta #7	Nokta #8	Nokta #9	Nokta #10	Nokta #11	Nokta #12
Test ID	-	37	38	39	46	47	48	55	56	57	64	65	66
Motor Devri	d/d	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525	1525
İndike Tork	Nm	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
EGR Valf Açıklığı	%	27	27	27	17	17	17	27	27	27	17	17	17
Püskürtme Basıncı	bar	610	610	610	610	610	610	700	700	700	700	700	700
Pedal Pozisyonu	%	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
Toplam Püskürtme Miktarı	mg	8,27	8,33	8,2	8,25	8,44	8,25	8,72	8,53	8,6	8,77	8,56	8,32
Ana Püskürtme Miktarı	mg	6,27	5,83	5,2	6,25	5,94	5,25	6,72	6,03	5,6	6,77	6,06	5,32
1.ön Püskürtme Miktarı	mg	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2
2.ön Püskürtme Miktarı	mg	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tablo 3.22 Kontrol amaçlı koşulan deney noktalarındaki motor çalışma parametreleri (devamı)

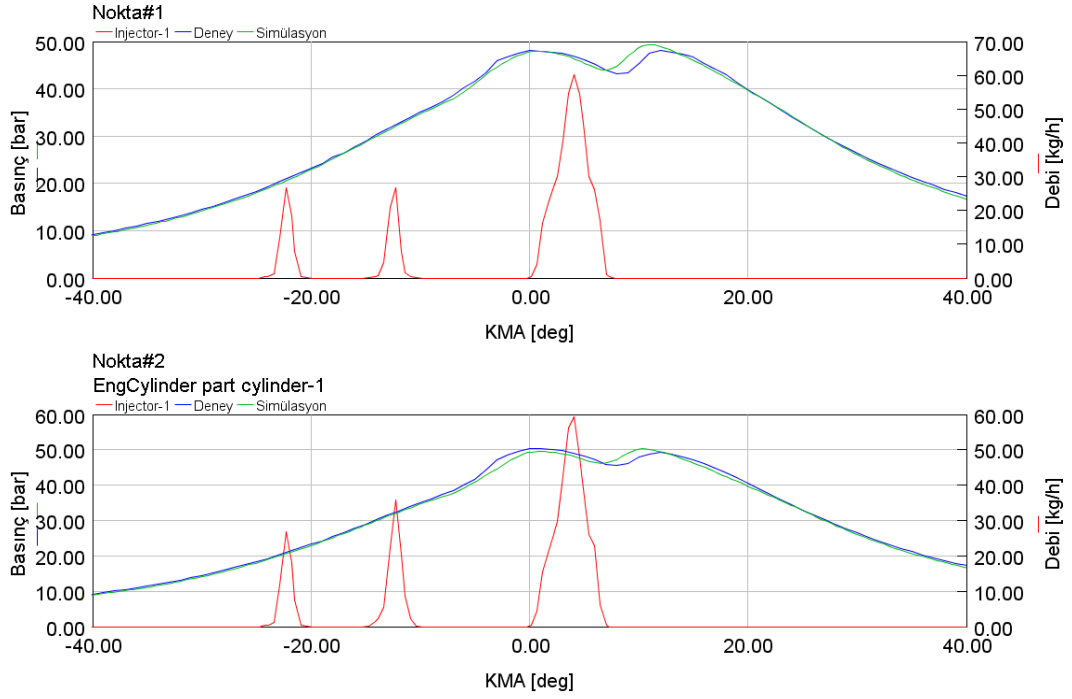
Ana Püskürtme Avansı	°KMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.ön Püskürtme Avansı	°KMA	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81	14,81
2.ön Püskürtme Avansı	°KMA	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61	24,61
Dolgu Sıcaklığı	°C	29,5	29,6	29,7	30,1	30,2	30,2	30,6	30,6	30,6	30,7	30,7	30,8
Dolgu Basıncı	mbar	1040,1	1040,7	1038,8	1058,2	1058,6	1055,7	1044,7	1042,1	1039,5	1063	1059,8	1055,8
Egzoz Basıncı	mbar	1110,3	1109,9	1107,3	1146,3	1147,6	1144,5	1115,2	1112	1109,4	1151	1148,1	1144,4
Egzoz Sıcaklığı	°C	307,6	307,6	301,4	296,4	296,3	289,8	317,8	311,7	302,8	308,4	299,2	291,5
Yakıt sıcaklığı	°C	26,3	26,5	26,5	26,1	26,4	26,3	25,9	26,1	26,1	25,9	26,2	26,2
Emme Hava Debisi	kg/sa	40,65	40,72	40,51	47,81	47,82	47,52	41,05	40,77	40,55	48,01	47,83	47,4

Tablo 3.23 Kontrol amaçlı koşulan noktalardaki deney ölçüm sonuçları

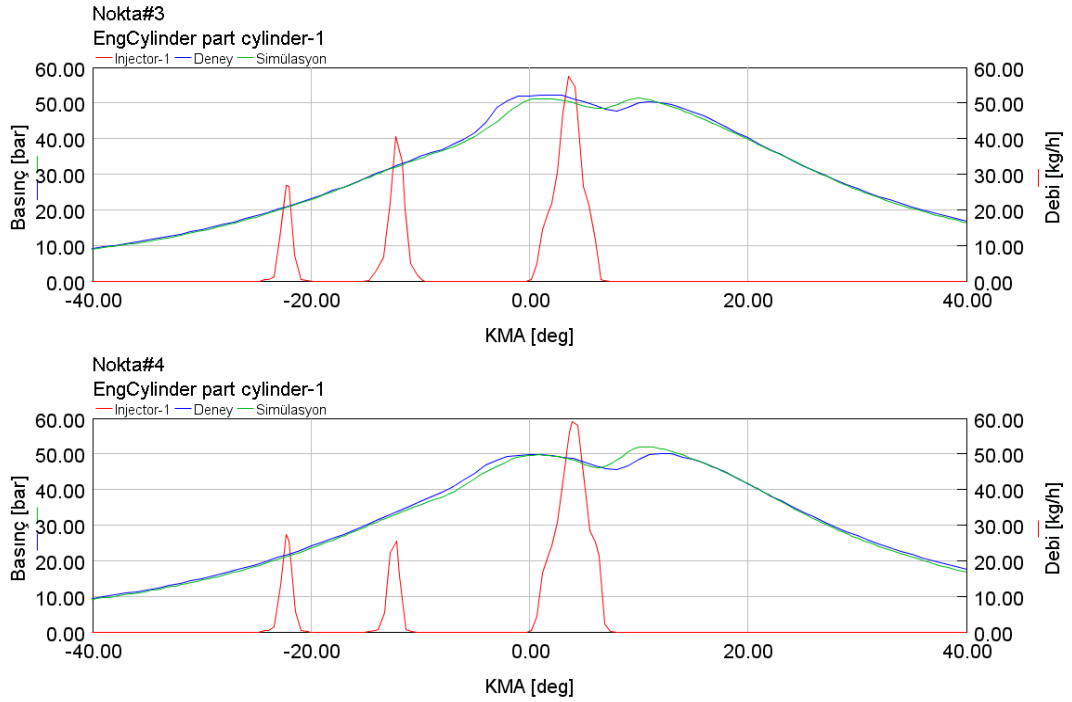
Parametre	Birim	Nokta #1	Nokta #2	Nokta #3	Nokta #4	Nokta #5	Nokta #6	Nokta #7	Nokta #8	Nokta #9	Nokta #10	Nokta #11	Nokta #12
OİEB	bar	3,98	3,96	3,92	4,01	4,01	3,95	4,27	4,14	4,03	4,32	4,17	4,05
MSİB	bar	48,11	50,4	52,23	50,1	52,51	54,34	49,87	51,44	53,57	52,23	53,63	55,66
Krankşaft Torku	Nm	36,3	37,4	36,6	36,7	37,9	37	39,4	38,5	37,4	39,8	39	37,8
Krankşaft Gücü	kW	5,8	6	5,8	5,9	6,1	5,9	6,3	6,1	6	6,4	6,2	6
Sürtünme Torku	Nm	17,21	17,24	17,21	17,21	17,27	17,21	17,21	17,21	17,21	17,21	17,25	17,21
Yakıt Tüketimi	kg/sa	1,5	1,53	1,51	1,52	1,54	1,52	1,61	1,58	1,51	1,61	1,58	1,53
ÖYT	g/kWsa	260,8	255,8	256,5	257,8	254,9	255,3	253,3	253,9	263,8	252,1	251	252,2
Egzoz Debisi	kg/sa	38,8	39	38,7	47,6	47,6	47,2	39,5	39,1	38,9	47,9	47,6	47,1
EGR Çıkış Sıcaklığı	°C	142,1	142,7	142,2	132,5	129,6	128,3	142	143,4	142,5	135,1	131,4	129,3
Manifold Sıcaklığı	°C	72,27	72,39	72,23	61,63	58,82	58,34	71,76	73,05	73,04	63,17	59,88	59,06
İs Emisyonu	-	0,083	0,111	0,1	0,025	0,036	0,049	0,083	0,092	0,086	0,071	0,081	0,077
İs Konsantras yonu	g/m3	0,0009 87	0,0010 60	0,0010 31	0,0008 35	0,0008 64	0,0008 98	0,0009 87	0,0010 10	0,0009 94	0,0009 55	0,0009 81	0,0009 71
Özgül CO ₂ Emisyonu	g/kWsa	623,8	617,92	616,29	634,33	625,21	628,19	611,76	611,67	612,2	619,19	618,45	623,13
CO ₂ Emisyonu	g/sa	3619,1	3681,9	3604,9	3714,1	3787,3	3715,7	3853,3	3758,7	3654,1	3940,5	3859,2	3760,5

Tablo 3.23 Kontrol amaçlı koşulan noktalardaki deney ölçüm sonuçları (devamı)

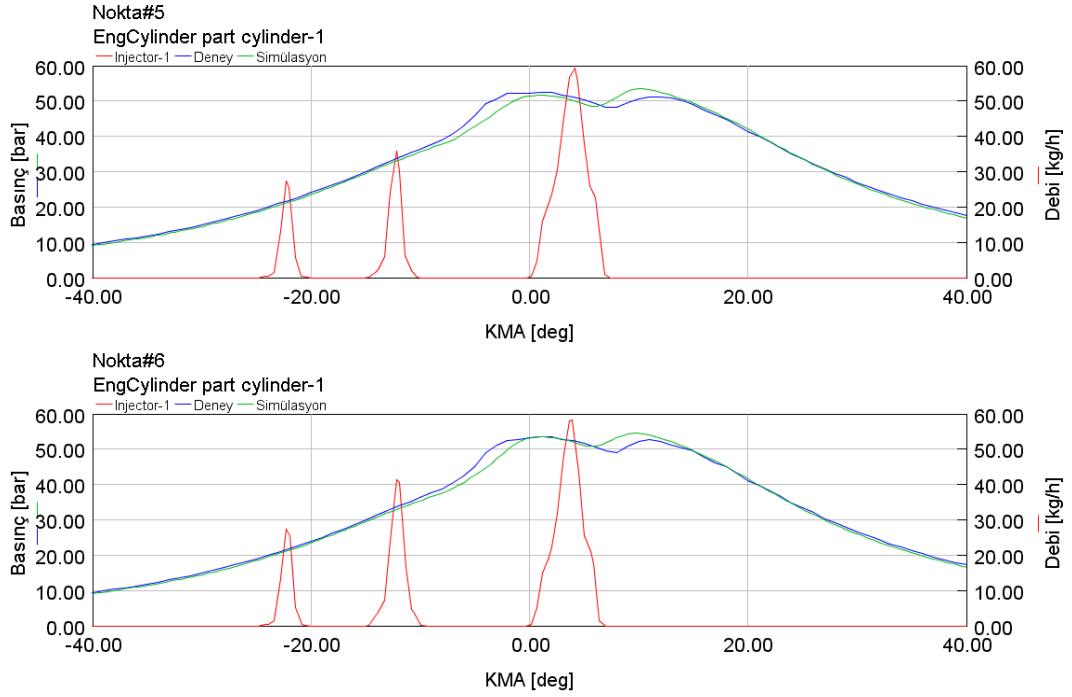
Özgül CO Emisyonu	g/kWsa	4,93	4,29	4,07	4,53	3,76	3,49	4,41	4,06	3,92	3,99	3,63	3,43
CO Emisyonu	g/sa	28,58	25,57	23,8	26,54	22,79	20,63	27,8	24,94	23,37	25,39	22,67	20,68
Özgül NO Emisyonu	g/kWsa	0,73	0,79	0,9	1,61	1,79	2,07	0,71	0,8	0,94	1,58	1,82	2,17
NO Emisyonu	g/sa	4,25	4,73	5,26	9,44	10,84	12,26	4,49	4,92	5,6	10,03	11,37	13,08
NO Konsantrasyonu	ppm	80,405	88,961	99,9	143,70	165,05	188,07	83,506	92,421	105,81	151,88	173,07	201,06
Özgül O ₂ Emisyonu	g/kWsa	631,26	609,86	625,44	915,02	871,97	894,83	561,64	579,13	606,63	810,9	835,15	864,36
O ₂ Emisyonu	g/sa	3662,3	3633,9	3658,4	5357,5	5282,1	5292,9	3537,6	3558,7	3620,9	5160,5	5211,4	5216,3
Özgül THC Emisyonu	g/kWsa	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
THC Emisyonu	g/sa	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
Motor Gürültüsü	dBA	72,812	73,715	75,711	72,898	74,085	75,794	73,914	75,691	77,320	73,743	75,620	76,980



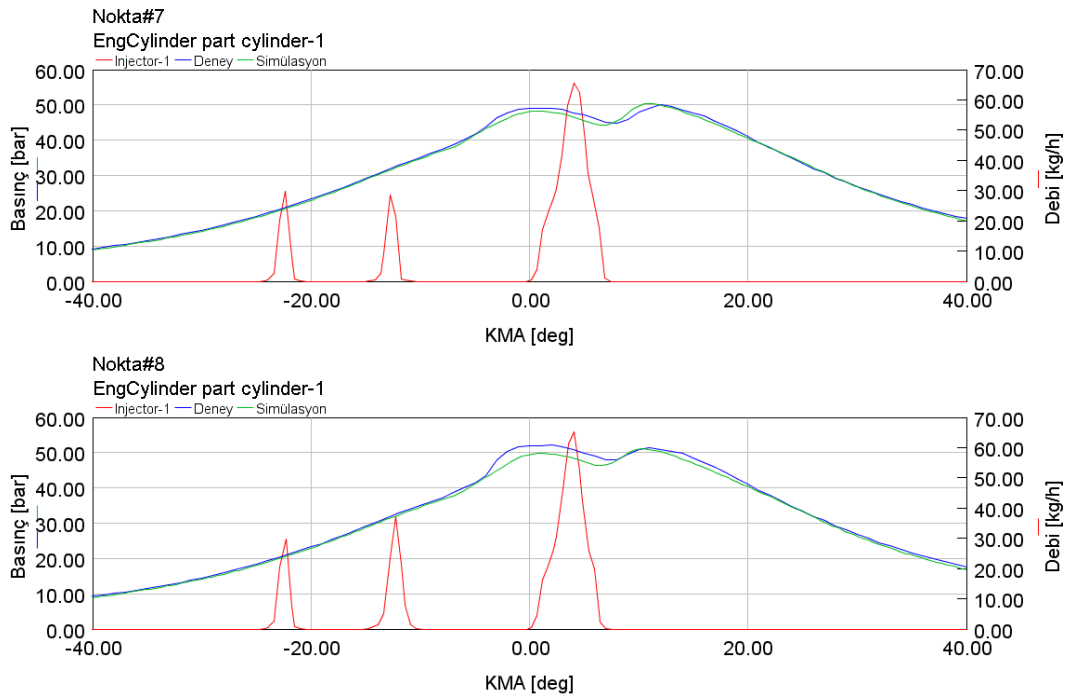
Şekil 3.65 Nokta#1 ve Nokta#2 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



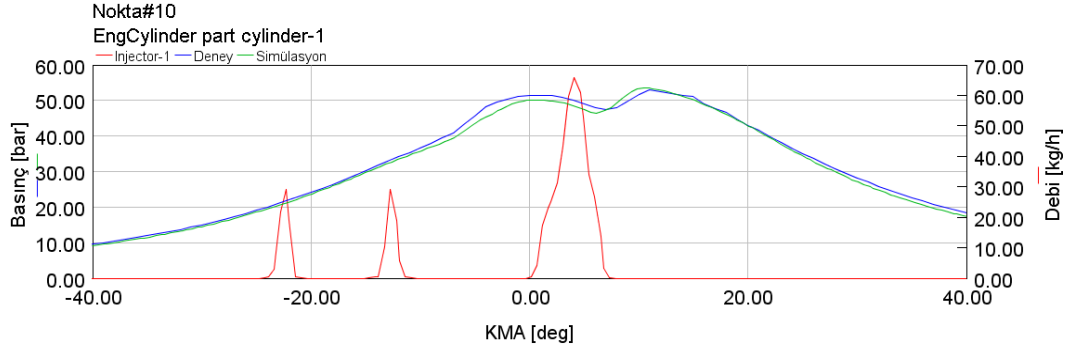
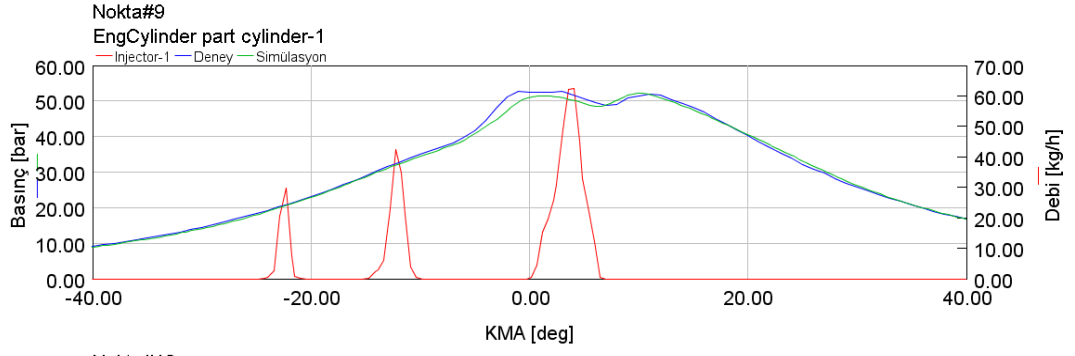
Şekil 3.66 Nokta#3 ve Nokta#4 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



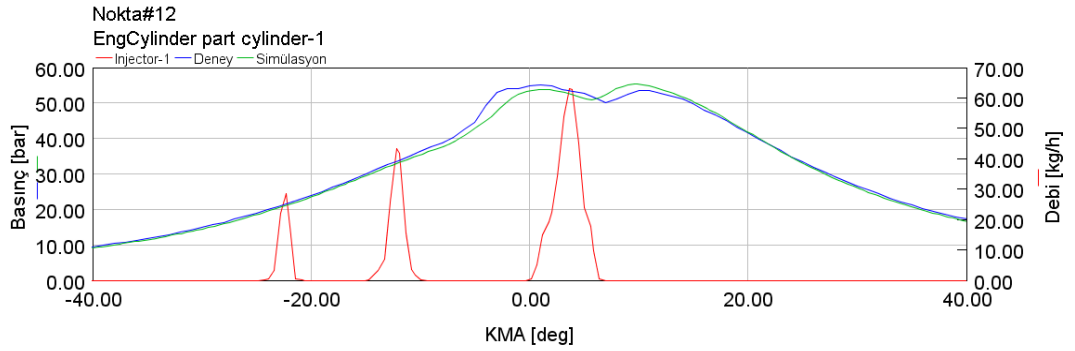
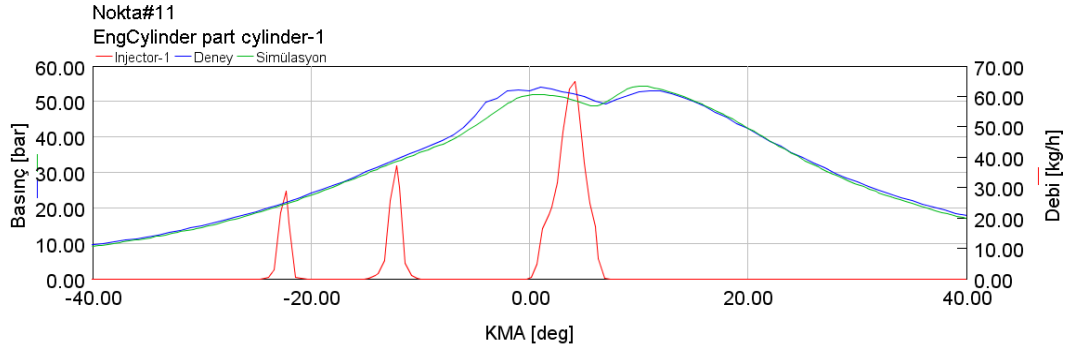
Şekil 3.67 Nokta#5 ve Nokta#6 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



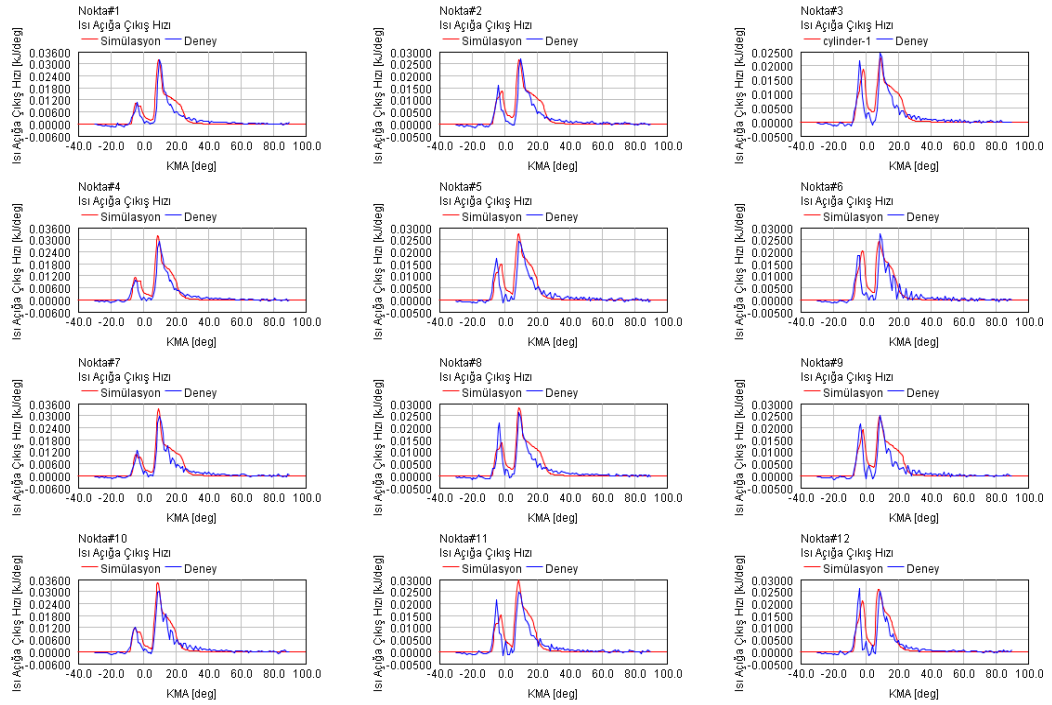
Şekil 3.68 Nokta#7 ve Nokta#8 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



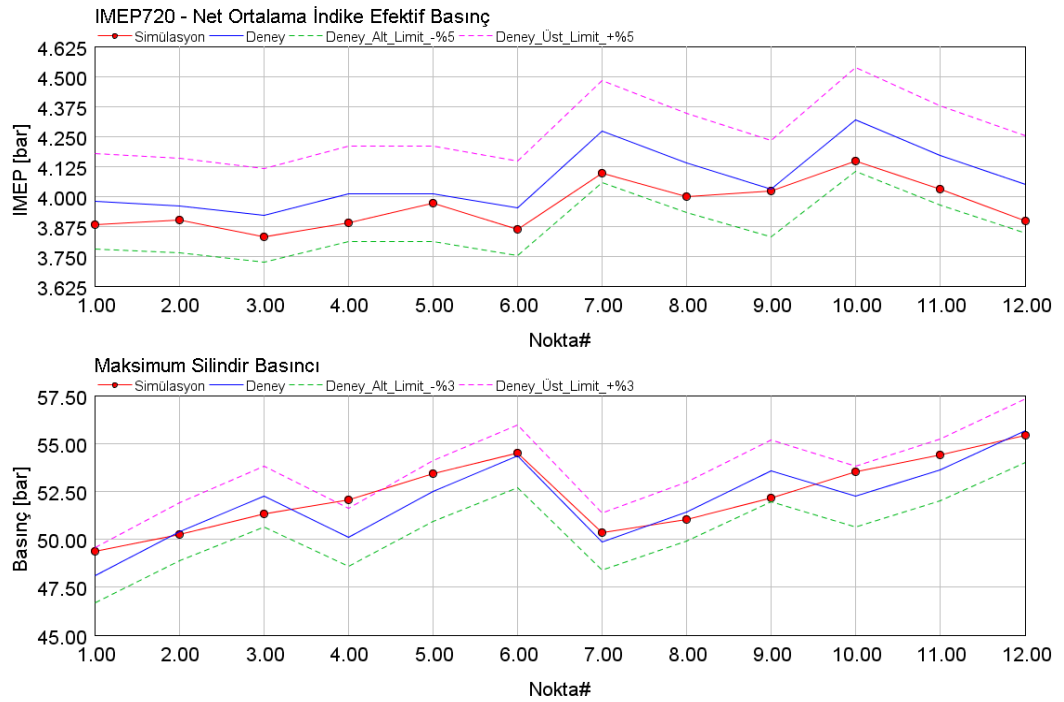
Şekil 3.69 Nokta#9 ve Nokta#10 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



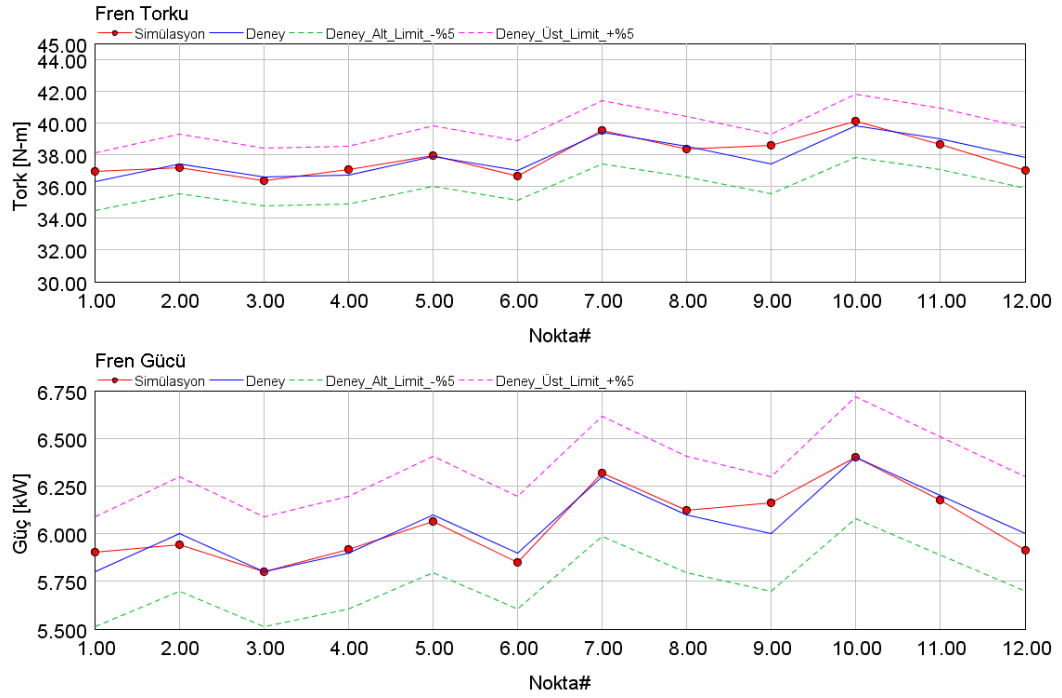
Şekil 3.70 Nokta#11 ve Nokta#12 silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



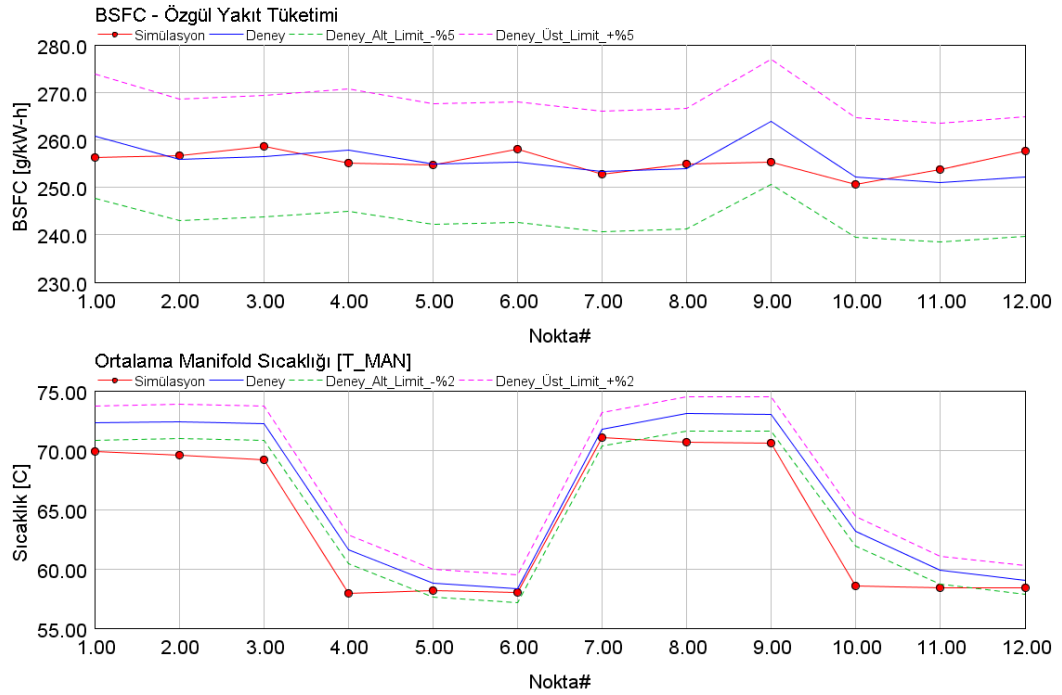
Şekil 3.71 Tüm noktaların ısı ağığa çıkış hızı deney ve simülasyon sonuçları



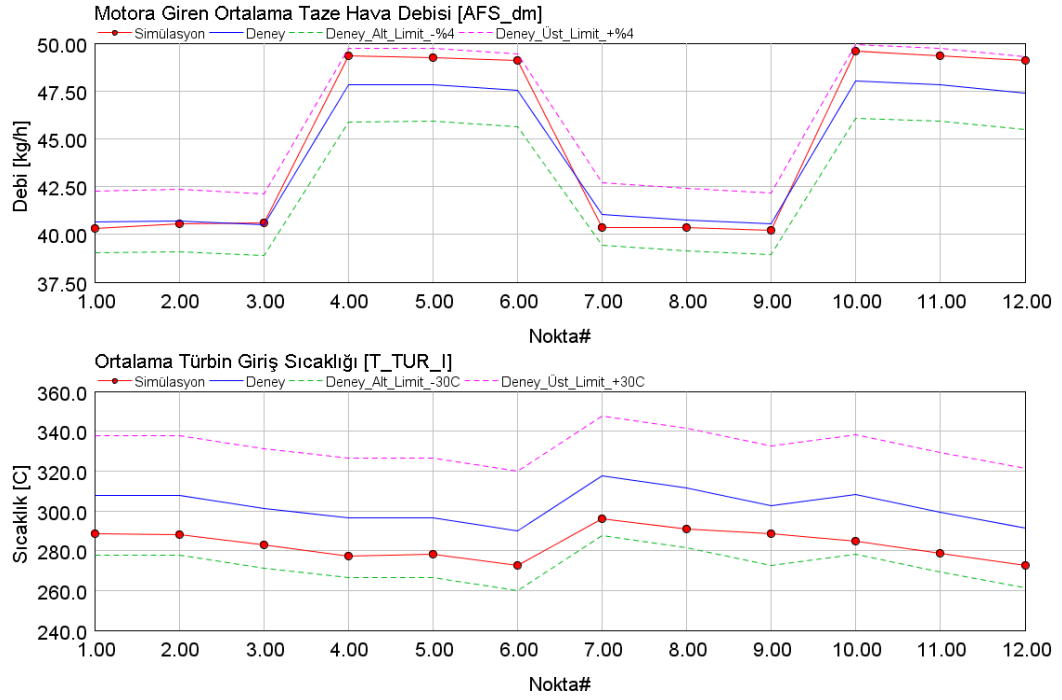
Şekil 3.72 Tüm noktaların ortalama indike efektif basınç ve maksimum silindir basıncı deney ve simülasyon sonuçları



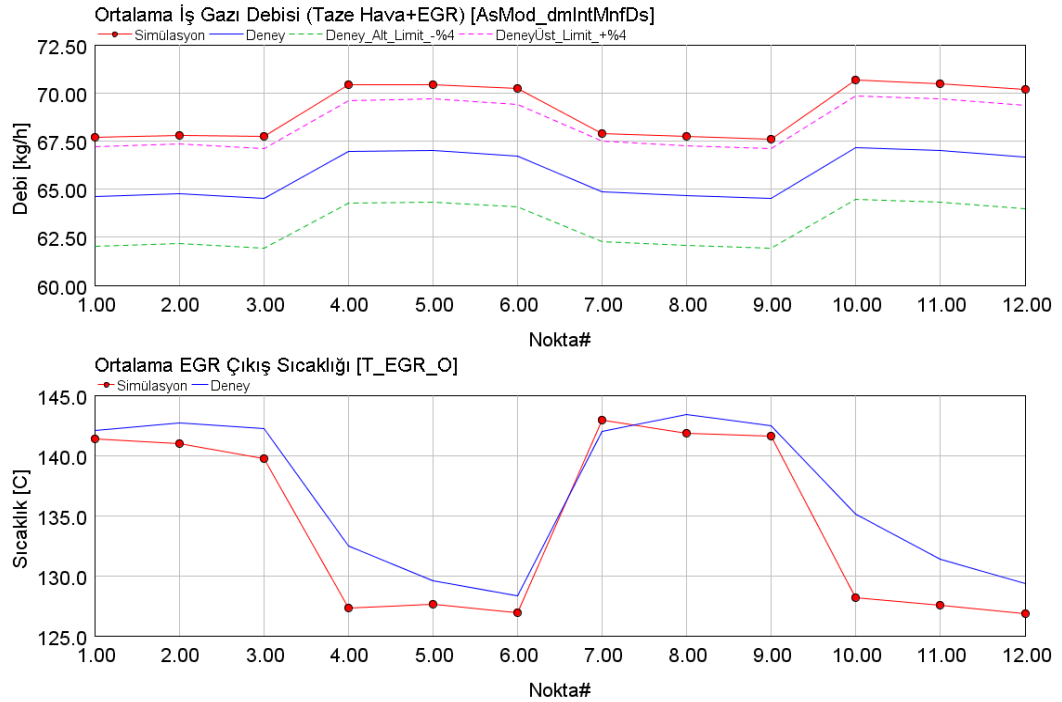
Şekil 3.73 Tüm noktaların fren torku ve fren gücü deney ve simülasyon sonuçları



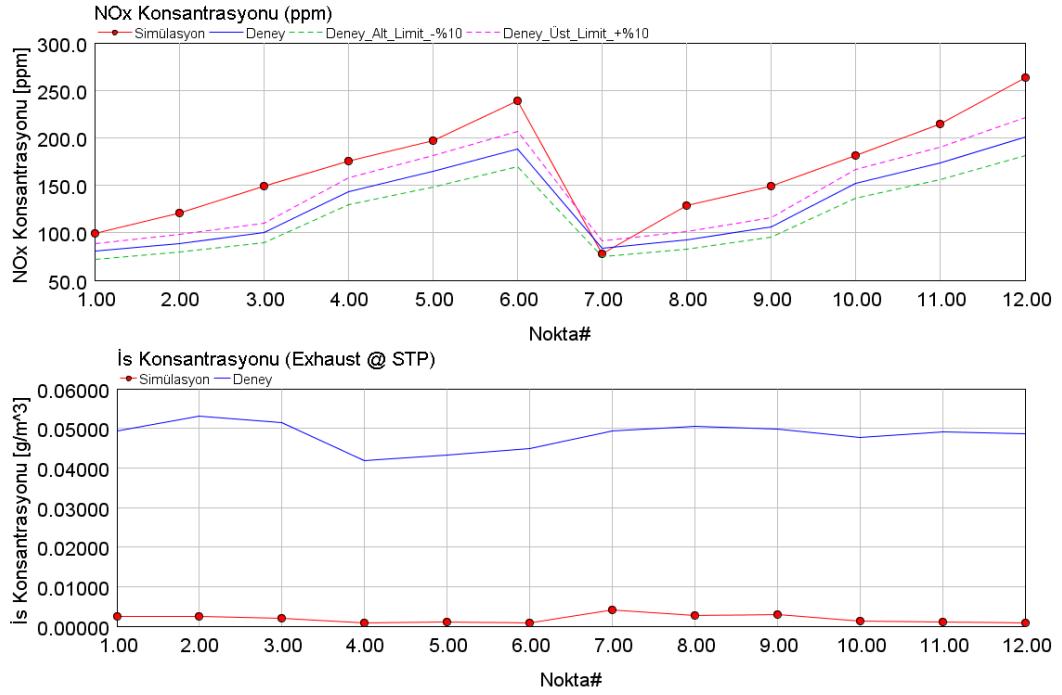
Şekil 3.74 Tüm noktaların özgül yakıt tüketimi ve manifold sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



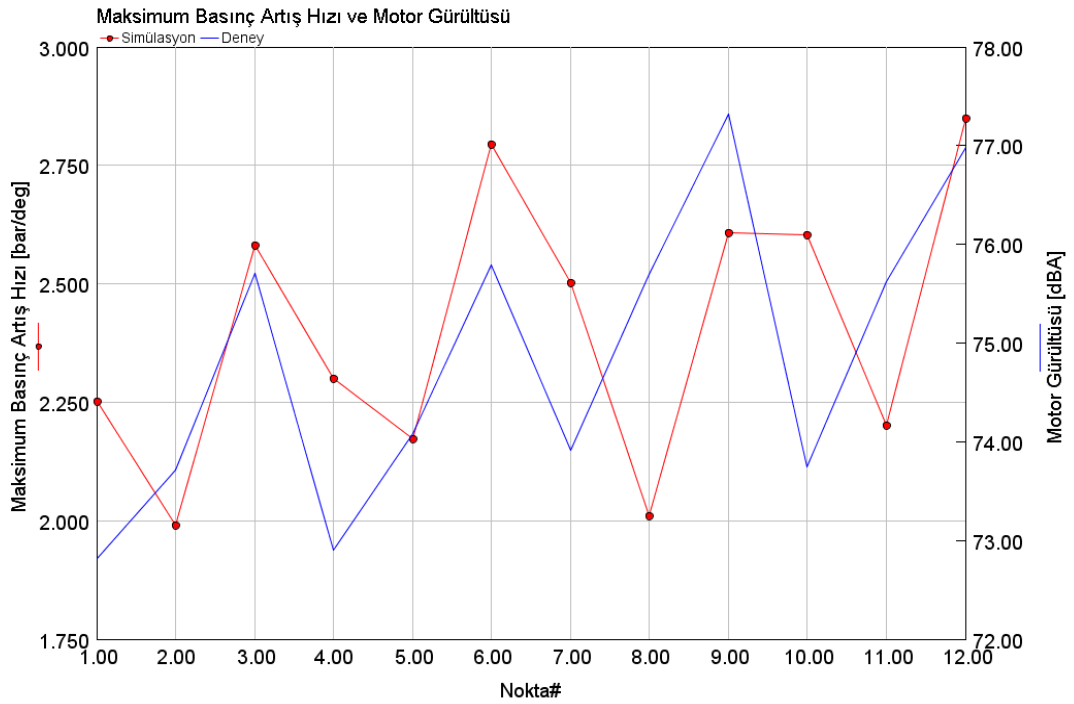
Şekil 3.75 Tüm noktaların motora giren taze hava debisi ve türbin giriş sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.76 Tüm noktaların toplam iş gazı debisi ve egr çıkış sıcaklığı deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.77 Tüm noktaların nox ve is konsantrasyonları deney ve simülasyon sonuçları



Şekil 3.78 Tüm noktaların maksimum basınç artış hızı ve motor gürültüsü deney ve simülasyon sonuçları

Kontrol amacıyla yapılan simülasyon çalışmasında validasyon için kullanılan deney noktalarının aksine EGR oranı, ray basıncı parametreleri değiştirilmiş ve her

bir parametrenin değişen değeri için üç farklı 1.n püskürtme miktarı değiştirilmiştir. Yapılan çalışmada validasyon çalışmasında kullanılan modele göre motora giren hava miktarını denkleştirebilmek amacıyla EGR hattında kullanılan elemanların çapı ve ısı transfer katsayıları değiştirilmiştir. Bununla birlikte silindirdeki ısı transfer katsayısı 1,1'den 1 değerine güncellenmiştir.

Elde edilen grafikler değerlendirildiğinde;

Ortalama indike efektif basınç sonuçlarının tüm noktalar için deney sonuçlarına göre $\pm\%5$ doğruluk limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlarda daha yüksek ray basınçlarında ve daha düşük EGR oranlarında daha yüksek ortalama indike efektif basınç elde edildiği görülmektedir.

Maksimum silindir basıncı sonuçlarında da simülasyon sonuçlarının 4.nokta hariç tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm\%3$ limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Fren torku ve fren gücü sonuçlarında da simülasyon sonuçlarının tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm\%5$ limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Özgül yakıt tüketimi sonuçlarında da simülasyon sonuçlarının tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm\%5$ limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Manifold sıcaklığı sonuçlarında ise simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarına göre $\pm\%2$ limitlerine yakın olduğu ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçlarda EGR oranının düşük olduğu 4, 5, 6, 10, 11 ve 12. noktalarda manifold sıcaklığının da daha düşük olduğu görülmektedir.

Motora giren ortalama taze hava debisi sonuçlarında simülasyon sonuçlarının tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm\%4$ limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçlarda EGR oranının düşük olduğu 4, 5, 6, 10, 11 ve 12. noktalarda taze hava miktarının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Türbin giriş sıcaklığı sonuçlarında da simülasyon sonuçlarının tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm 30^{\circ}\text{C}$ limitleri içinde kaldığı ve deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Silindire giren toplam iş gazı debisi sonuçlarında ise tüm noktalarda deney sonuçlarına göre $\pm 4\%$ limitlerinin biraz üzerinde değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardaki trend deney ile elde edilen sonuçlardaki trend ile uyumludur.

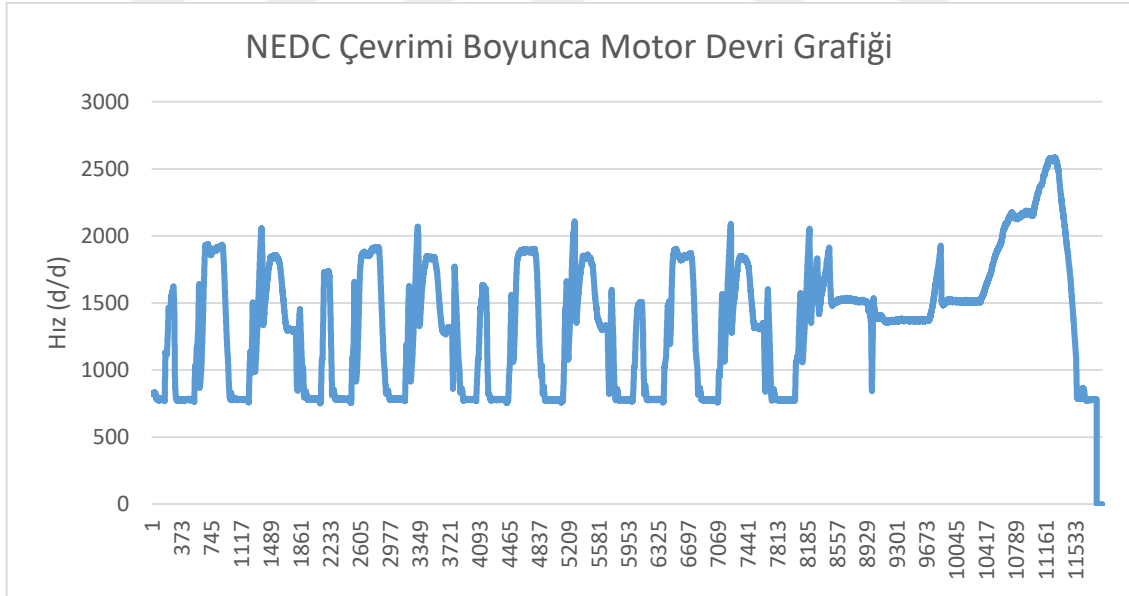
NO_x ve is emisyonlarında modele hiçbir düzeltme katsayısı uygulanmamış ve elde edilen sonuçlar hem değer hem de trend olarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda NO_x konsantrasyonlarının düşük EGR oranının olduğu 4, 5, 6, 10, 11 ve 12. noktalarda $\pm 10\%$ limitleri içinde kaldığı ve tüm deney noktalarındaki trend ile uyumlu olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında deney sonuçları ile uyumlu olarak daha yüksek EGR oranının olduğu 1, 2, 3, 7, 8 ve 9. noktalarda daha düşük NO_x konsantrasyonları elde edilmiştir. İs konsantrasyonları için Nagle and Strickland-Constable modeli kullanılmış ve elde edilen simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile aynı trende sahip olduğu görülmüştür.

Motor deneylerinde silindir içi basınç verisi kullanılarak motora özgü yapılan özel test ve ölçümler ile korele edilen motor gürültüsü verisi, simülasyonlardaki maksimum basınç artış hızı ile ilişkilendirilerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda 2, 3, 4, 6, 7, 9 ve 12. noktalarda iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

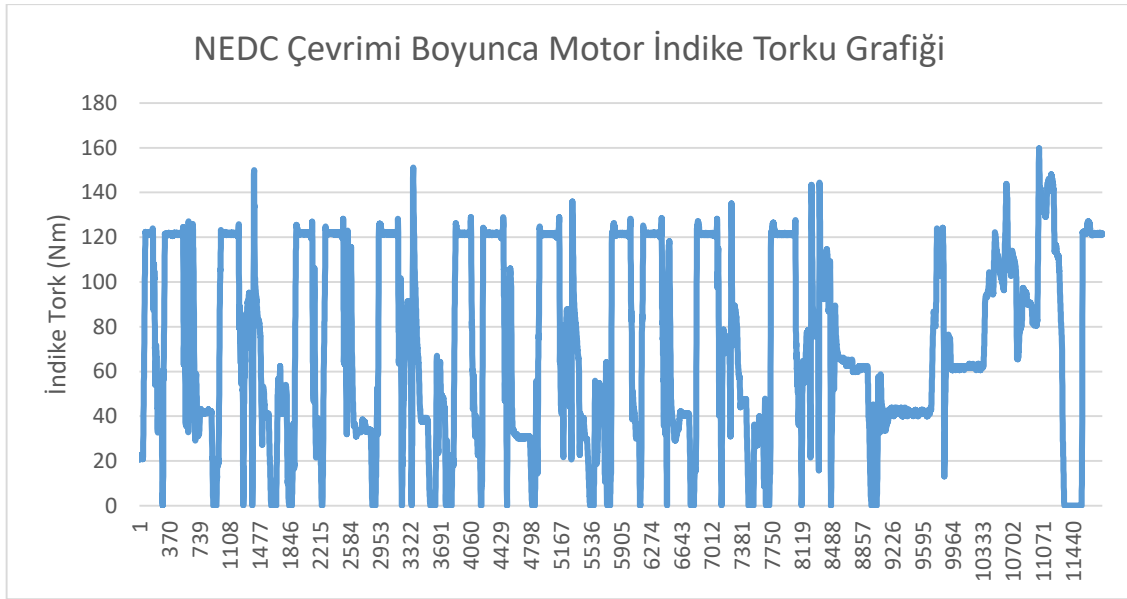
MOTOR VE ÇOKLU ÖN PÜSKÜRTME PARAMETRELERİNİN PERFORMANS VE EMİSYONA ETKİLERİ

4.1 Parametre Etkilerinin İnceleneceği Motor Çalışma Noktalarının Belirlenmesi

Parametre etkilerinin inceleneceği motor çalışma noktalarının seçimi için modellenen 1,5 L hacmindeki motora dinamometrede, Avrupa'nın yasal emisyon ve yakıt tüketimi çevrimi olan Yeni Avrupa Sürüş Çevrimi (NEDC) [40] uygulanmış ve motorun yoğun olarak çalıştığı noktalar tespit edilerek, tez konusu çoklu ön püskürtme parametrelerinin ve motor çalışma parametrelerinin bu noktalardaki değişimleri incelenmiştir. Motorun çalışma noktaları belirlenirken motor devri ve motor indike torku kullanılmıştır.

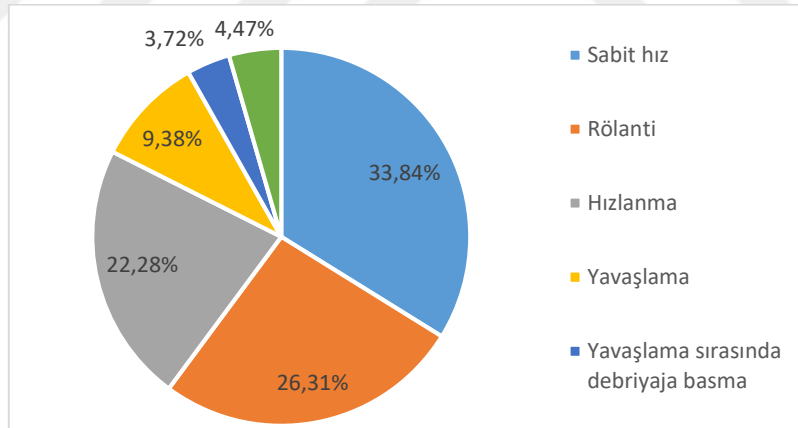


Şekil 4.1 NEDC çevrimi boyunca motor devri grafiği



Şekil 4.2 NEDC çevrimi boyunca motor indike torku grafiği

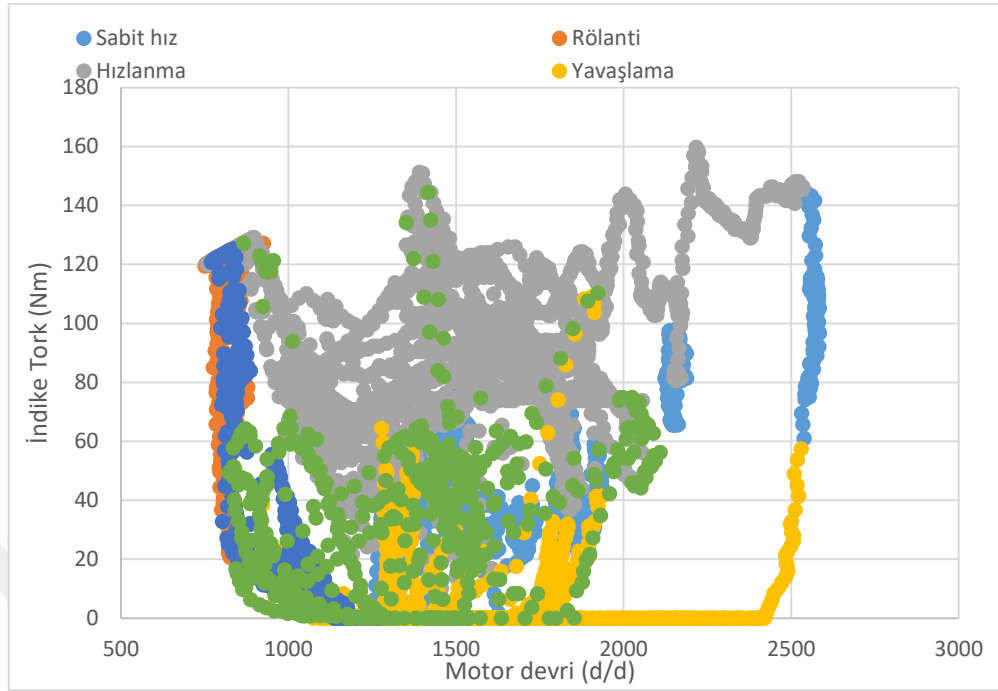
Yapılan çalışmada elde edilen veriler, NEDC çevriminin bölümleri olan rölanti, hızlanma, yavaşlama, vites değişimi, sabit hız ve yavaşlarken debriyaja basma olacak şekilde indekslenmiş ve motorun bu bölümlerdeki çalışma süreleri belirlenmiştir.



Şekil 4.3 Motorun NEDC çevrimindeki çalışma modları

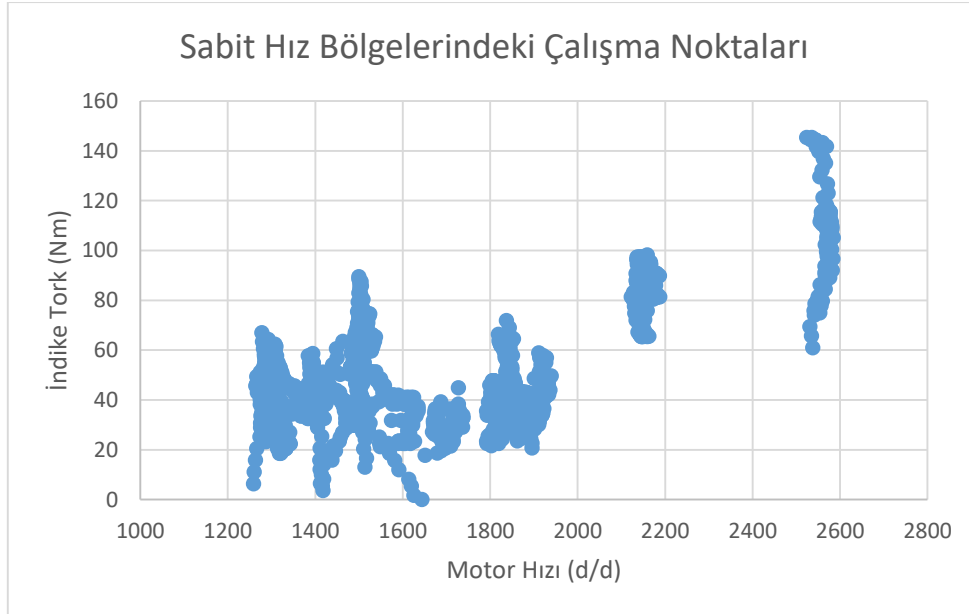
Tablo 4.1 Motorun çalışma modlarındaki süreleri ve yüzdeleri

<i>NEDC Bölümü</i>	<i>Süre (s)</i>	<i>Çevrimdeki Payı (%)</i>
Sabit hız	399,3	33,84
Rölanti	310,5	26,31
Hızlanma	262,9	22,28
Yavaşlama	110,7	9,38
Vites değişimi	52,7	4,47
Yavaşlama sırasında debriyaja basma	43,9	3,72
Toplam	1180	100



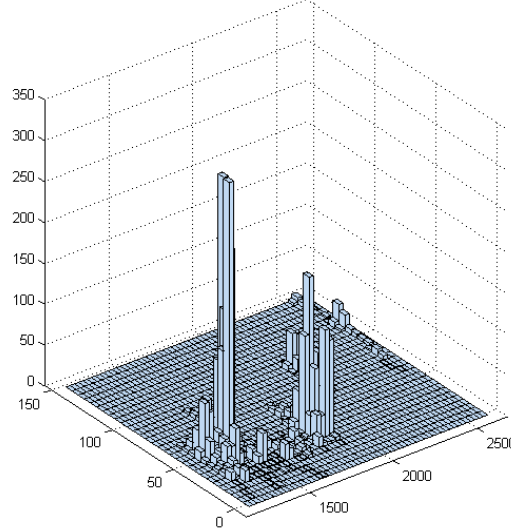
Şekil 4.4 Motorun NEDC çevrimi boyunca çalışma noktaları haritası

Motorun NEDC çevriminde çoğunlukla çalıştığı sabit hız bölgesi daha detaylı incelenerek motorun en çok çalıştığı devir ve indike tork noktaları belirlenecektir. Sabit hız bölgelerindeki çalışma noktaları Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5 Motorun sabit hız çalışma noktaları

Bu çalışma noktalarındaki veri çiftleri için histogram analizi yapılmıştır. Bu analizde motor hızı 1200 d/d ile 2600 d/d arasında 25 d/d farklarla, motor indike torku da 0 Nm ile 145 Nm arasında 5 Nm farklarla gruplanmıştır.

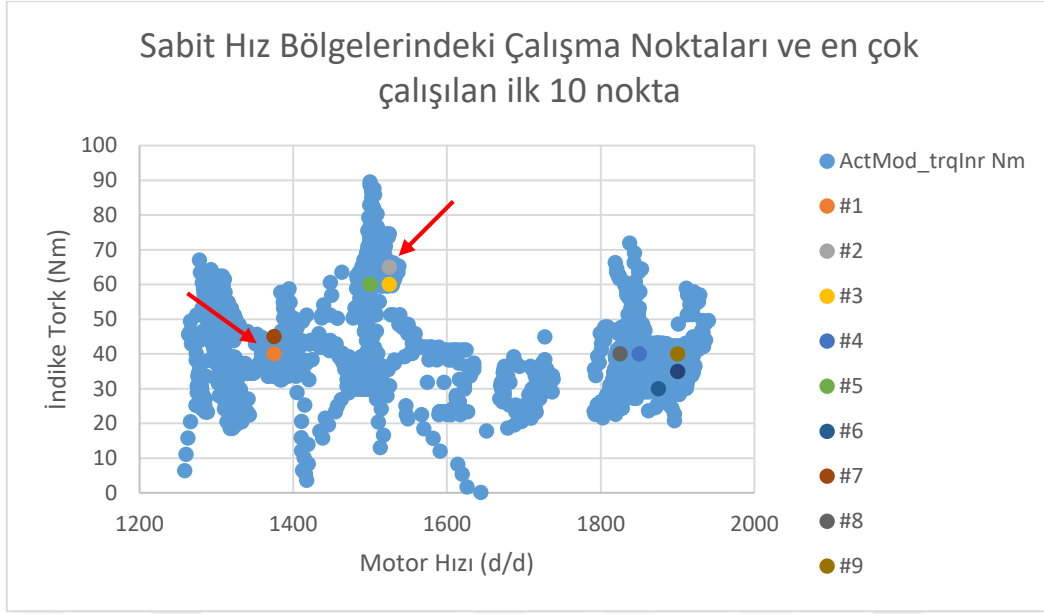


Şekil 4.6 Sabit hız çalışma noktalarının histogram analizi

Elde edilen histogram sonuçları incelendiğinde en yüksek frekansa sahip motor hızı ve indike torku veri çifti noktaları Tablo 4.2'deki şekliyle elde edilmiştir.

Tablo 4.2 Sabit hız noktalarının histogram analizi sonuçları

#	Frekans	Min. Hız (d/d)	Maks. Hız (d/d)	Min. İndike Tork (Nm)	Maks. İndike Tork (Nm)	Ort. Hız (d/d)	Ort. İndike Tork (Nm)
1	343	1363	1387	37,51	42,49	1375	40
2	313	1513	1537	62,51	67,5	1525	65
3	230	1513	1537	57,51	62,49	1525	60
4	190	1838	1862	37,51	42,49	1850	40
5	157	1488	1512	57,51	62,49	1500	60
6	133	1863	1887	27,5	32,49	1875	30
7	132	1363	1387	42,51	47,49	1375	45
8	120	1813	1837	37,51	42,49	1825	40
9	94	1888	1912	37,51	42,49	1900	40
10	84	1888	1912	32,51	37,49	1900	35



Şekil 4.7 Histogram sonuçlarına göre ilk 10 noktanın sabit hız çalışma noktaları içindeki yerleri

Yapılan histogram çalışmaları sonucunda parametre değişimlerinin etkilerinin inceleneceği çalışmaların, sabit hız bölgelerinde en çok çalışılan ilk iki nokta olan 1375 d/d hız ve 40 Nm indike tork ile 1525 d/d hız ve 65 Nm indike tork noktalarında yapılması uygun görülmüştür.

4.2 Çoklu Ön Püskürtme ve Motor Çalışma Parametrelerinin Değişimi

Yapılan deneysel çalışmalar ile valide edilen motor modeli iki farklı EGR açısı ve iki farklı ray basıncı çalışma şartlarında, tezin konusu kapsamındaki iki ön püskürtmenin her birinin açısının ve miktarının üç farklı değer ile koşturularak sonuçlar ortaya koyulmuştur. Yapılan simülasyonlarda çoklu ön püskürtme ve motor çalışma parametrelerinin değişimi Tablo 4.3'te görülmektedir. Yapılan simülasyonlar, silindir içine gönderilen toplam yakıt miktarı değişmemek üzere 1.ön püskürtmenin miktarı baz durum olan 1 mg ve 0,5 mg aralıklarla artırılarak 1,5 ve 2 mg olarak, 1.ön püskürtmenin açısı baz durum olan -14,8 °KMA ve 3 °KMA öne ve geriye alınarak -11,8 ve -17,8 °KMA açılarında olarak, 2.ön püskürtmenin miktarı baz durum olan 1 mg ve 0,5 mg aralıklarla artırılarak 1,5 ve 2 mg olarak, 2.ön püskürtmenin açısı baz durum olan -24,6 °KMA ve 3 °KMA öne ve geriye alınarak -21,6 ve -27,6 °KMA açılarında olarak koşulmuştur. Her bir

simülasyonda bu parametrelerden sadece bir tanesi değiştirilmiştir. Her bir parametrenin üç farklı değerdeki değişiminin dört farklı durum olan %27 EGR ve 610 Bar ray basıncı, %17 EGR ve 610 Bar ray basıncı, %27 EGR ve 700 Bar ray basıncı ve %17 EGR ve 700 Bar ray basıncındaki simülasyon sonuçları verilmiştir.

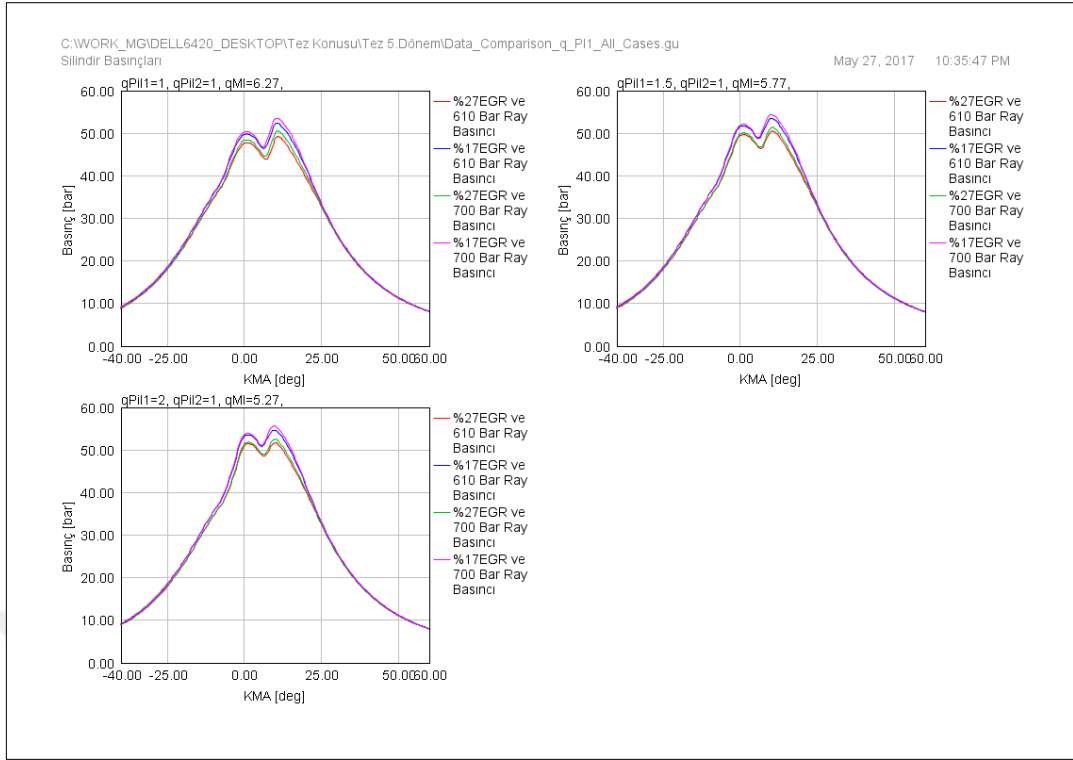
Tablo 4.3 Çoklu ön püskürtme ve motor çalışma parametrelerinin değişimi

<i>Parametre</i>	<i>Açıklama</i>	<i>Birim</i>	<i>Baz</i>	<i>Değer 1</i>	<i>Değer 2</i>
SPEED	Motor Devri	d/d	1525		
APP_r	Pedal Pozisyonu	%	24,2		
EGR	EGR Açısı	%	27	17	
RAIL_P	Ray Basıncı	Bar	610	700	
IFQ	Toplam Yakıt Miktarı	mg/str	8,27		
qPI1	1.ön Püskürtme Miktarı	mg/str	1	1,5	2
qPI2	2.ön Püskürtme Miktarı	mg/str	1	1,5	2
PhiMI1	Ana Püskürtme Açısı	°KMA	0		
PhiPI1	1.ön Püskürtme Açısı	°KMA	-14,8	-17,8	-11,8
PhiPI2	2.ön Püskürtme Açısı	°KMA	-24,6	-27,6	-21,6

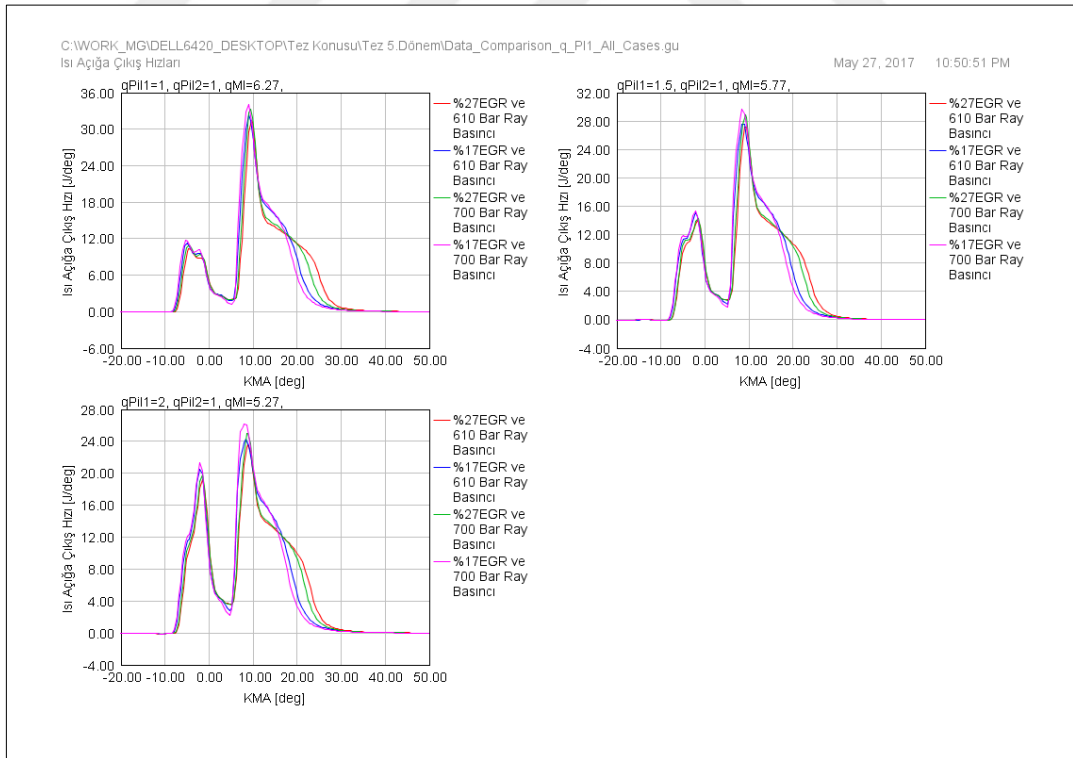
4.2.1 1.Ön Püskürtmenin Miktarının Değişimi

Bu simülasyonlarda 1.ön püskürtmenin miktarı 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler ile;

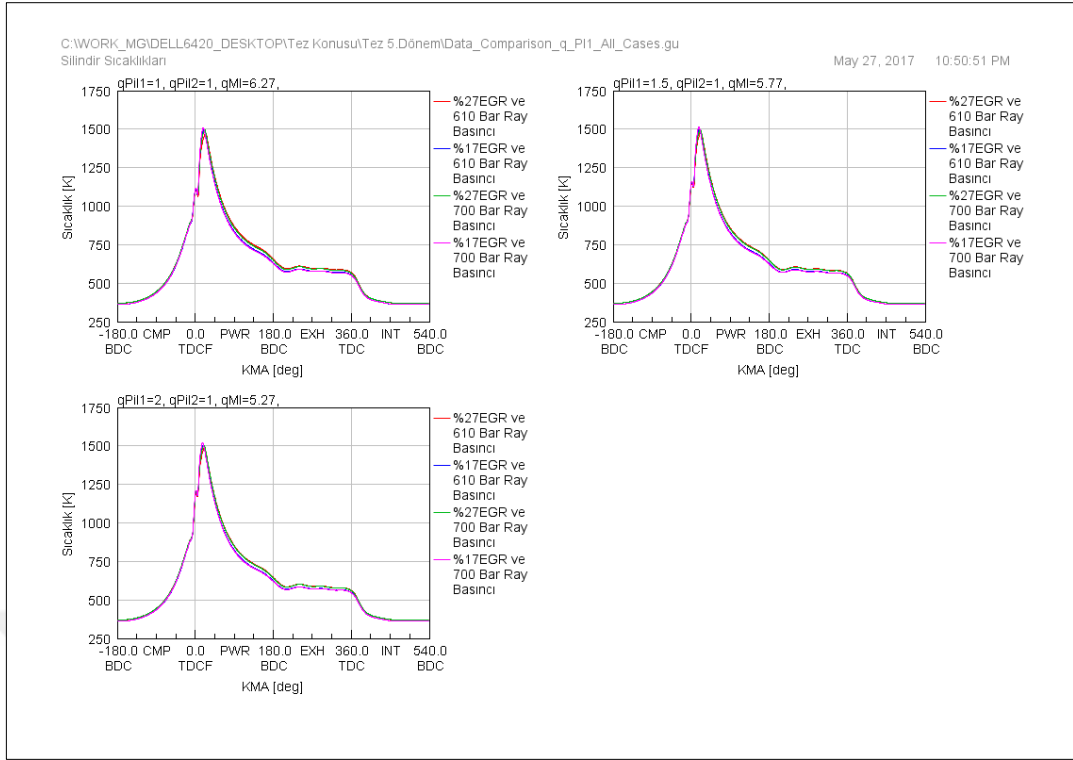
- Her üç püskürtme miktarı sabit tutularak, EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki, 1.ön püskürtme miktarı değişiminin, ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir basıncı, maksimum basınç artış hızı, maksimum yanma sıcaklığı, silindir duvarlarına olan ortalama ısı transferi, fren torku, fren gücü, ortalama manifold sıcaklığı, motora giren ortalama taze hava debisi, ortalama türbin giriş sıcaklığı, silindirlere giren ortalama iş gazı debisi, NO_x konsantrasyonu, özgül NO_x konsantrasyonu, is konsantrasyonu ve özgül is konsantrasyonuna etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumun her birinin sabit tutularak, 1.ön püskürtme miktarının değiştiği üç farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü grafikler elde edilmiştir.



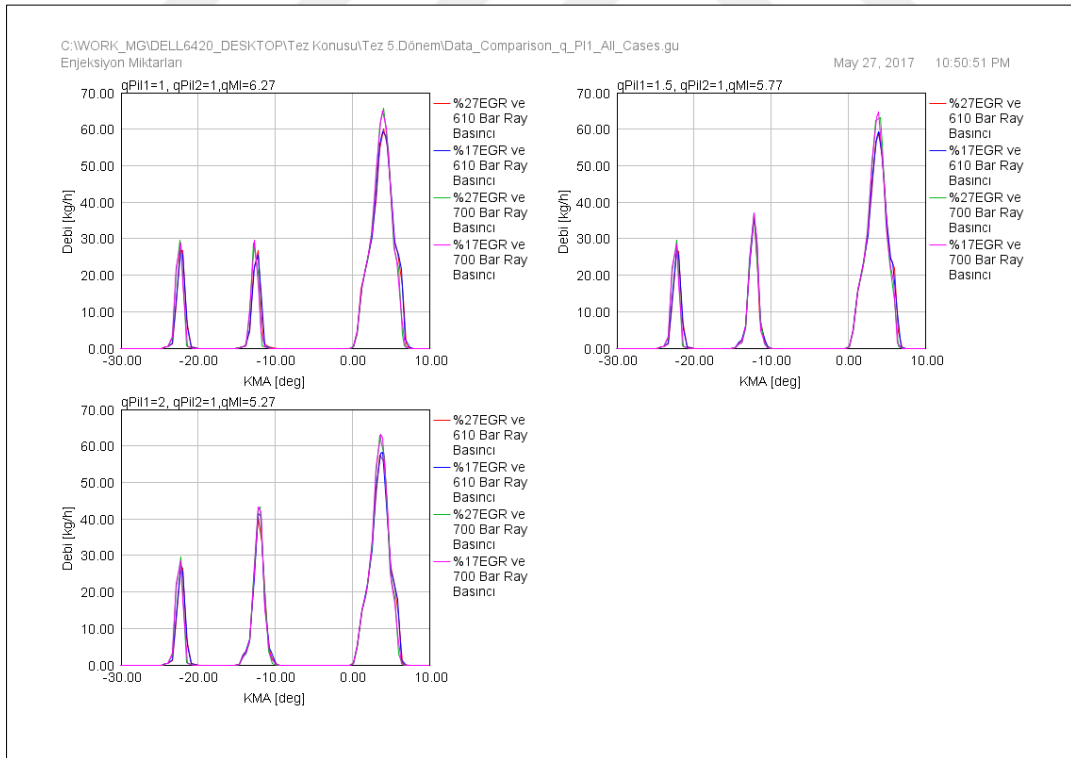
Şekil 4.8 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki silindir basıncı



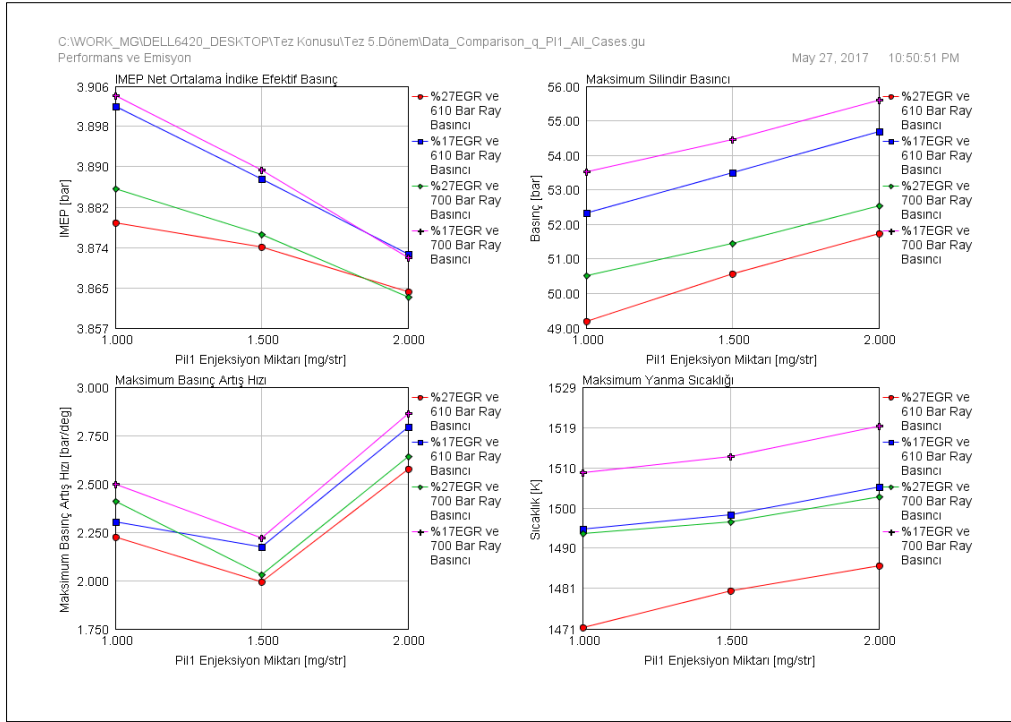
Şekil 4.9 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki ısı açığa çıkış hızı



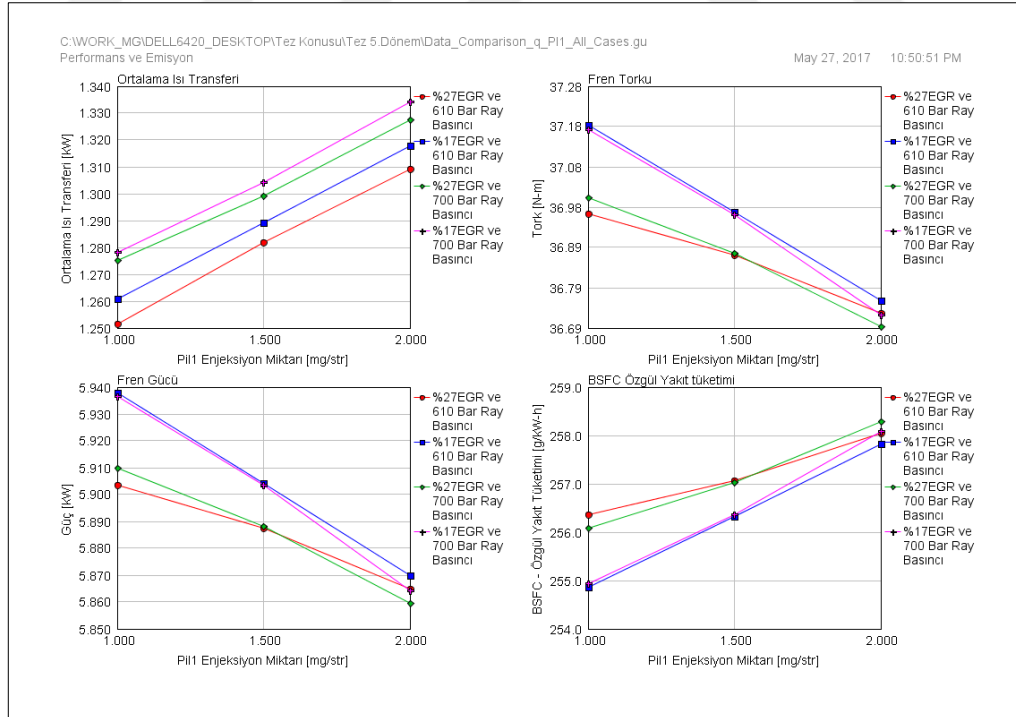
Şekil 4.10 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki silindir sıcaklığı



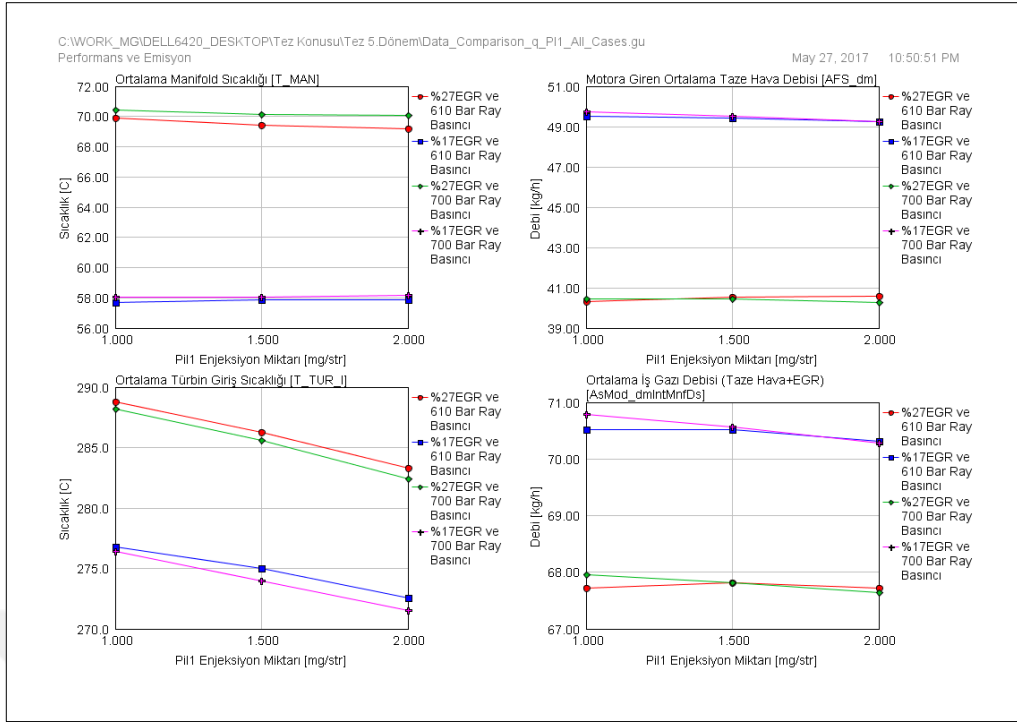
Şekil 4.11 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme miktarındaki püskürtme debileri



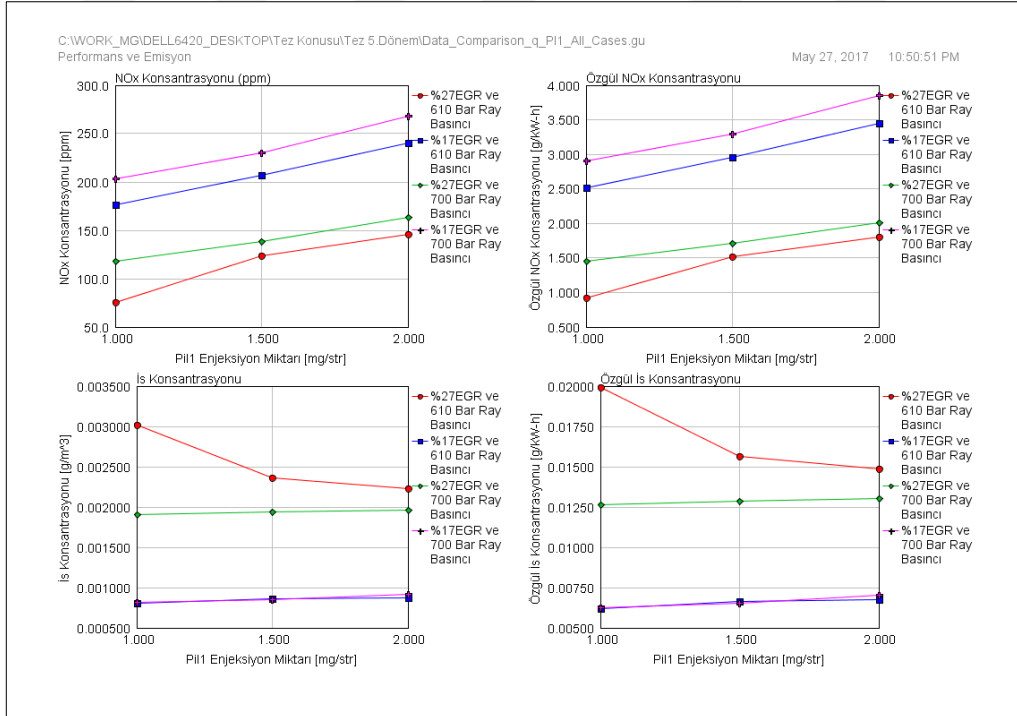
Şekil 4.12 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları



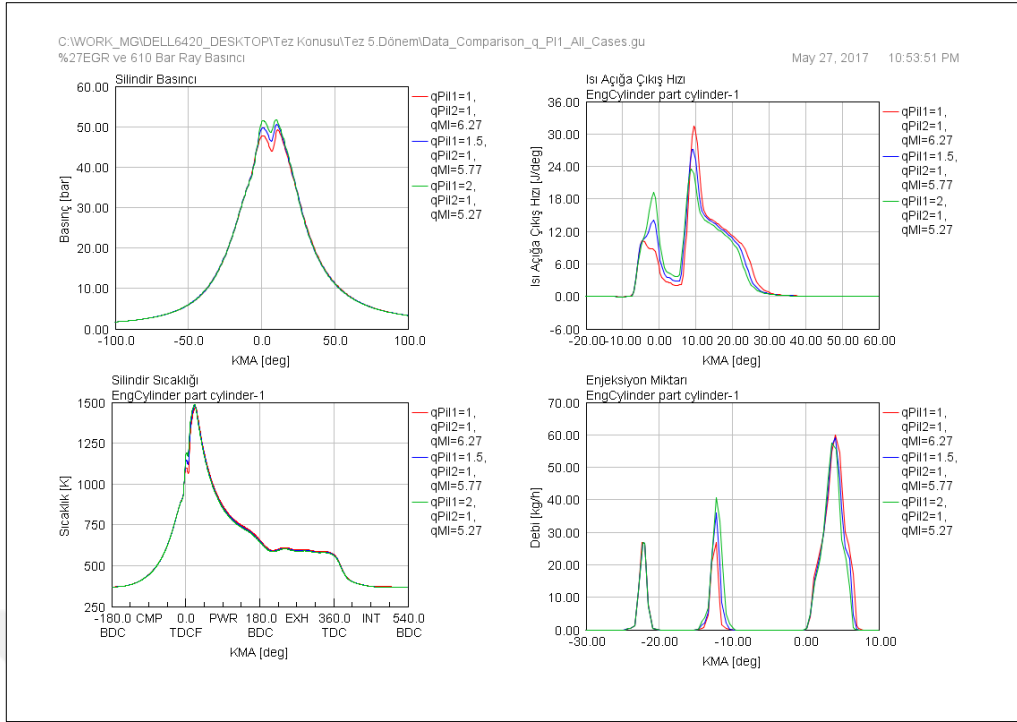
Şekil 4.13 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları



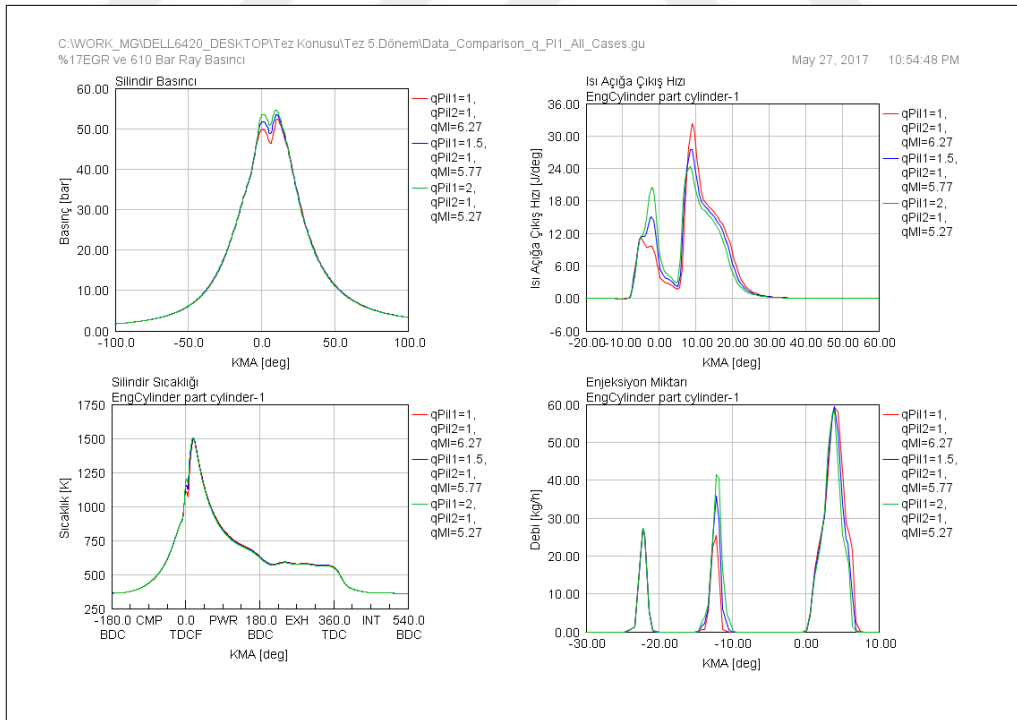
Şekil 4.14 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları



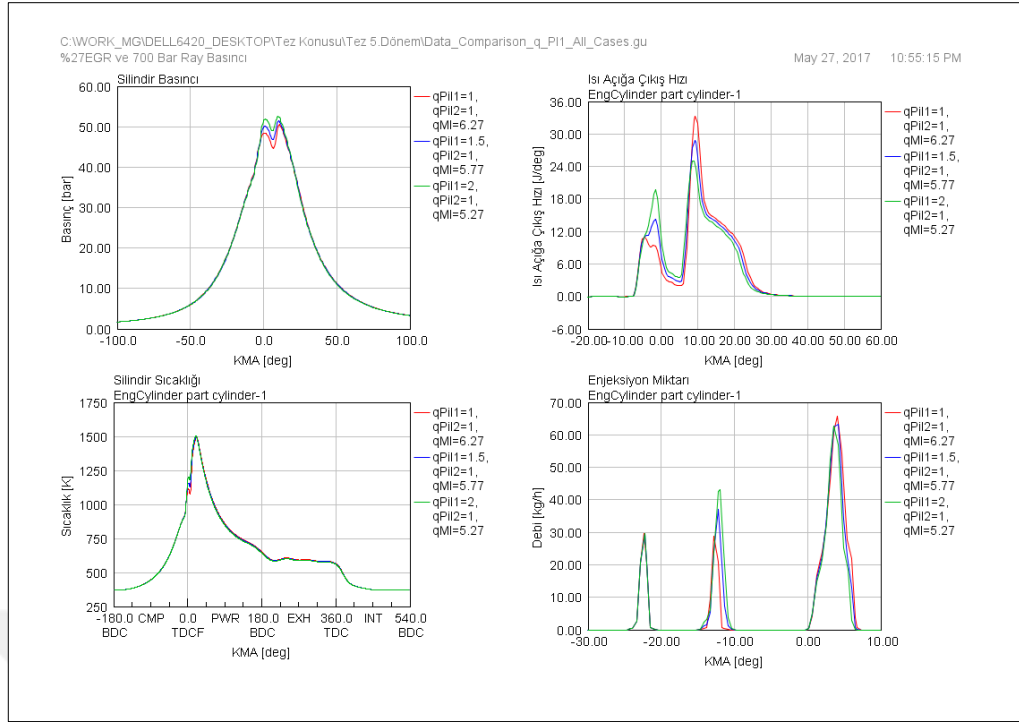
Şekil 4.15 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO_x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO_x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları



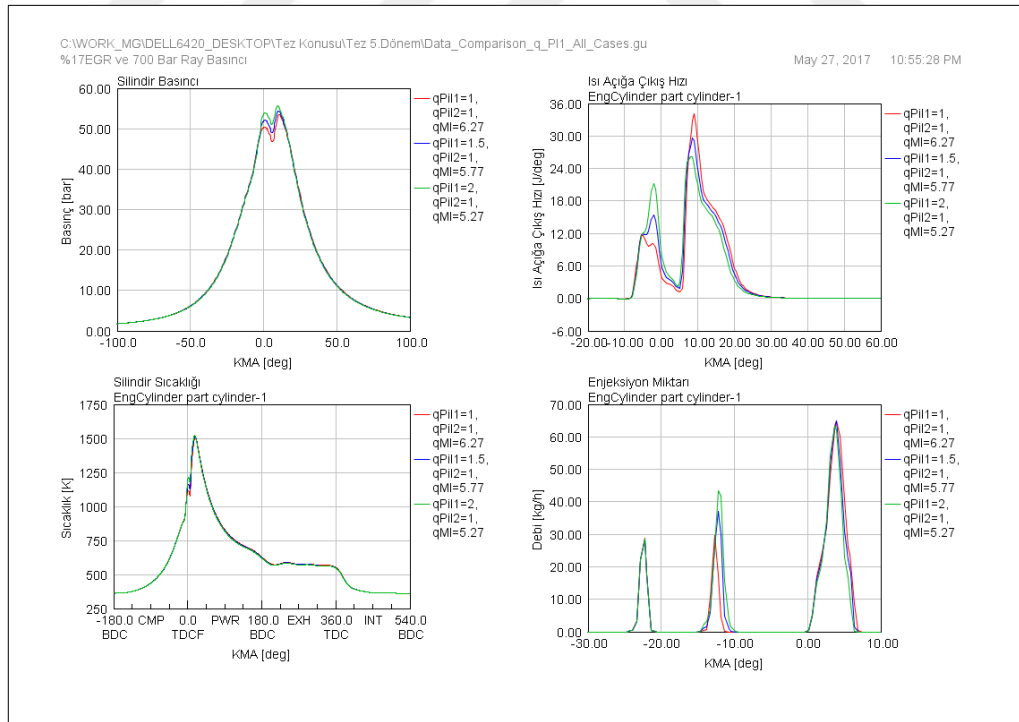
Şekil 4.16 %27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.17 %17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.18 %27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

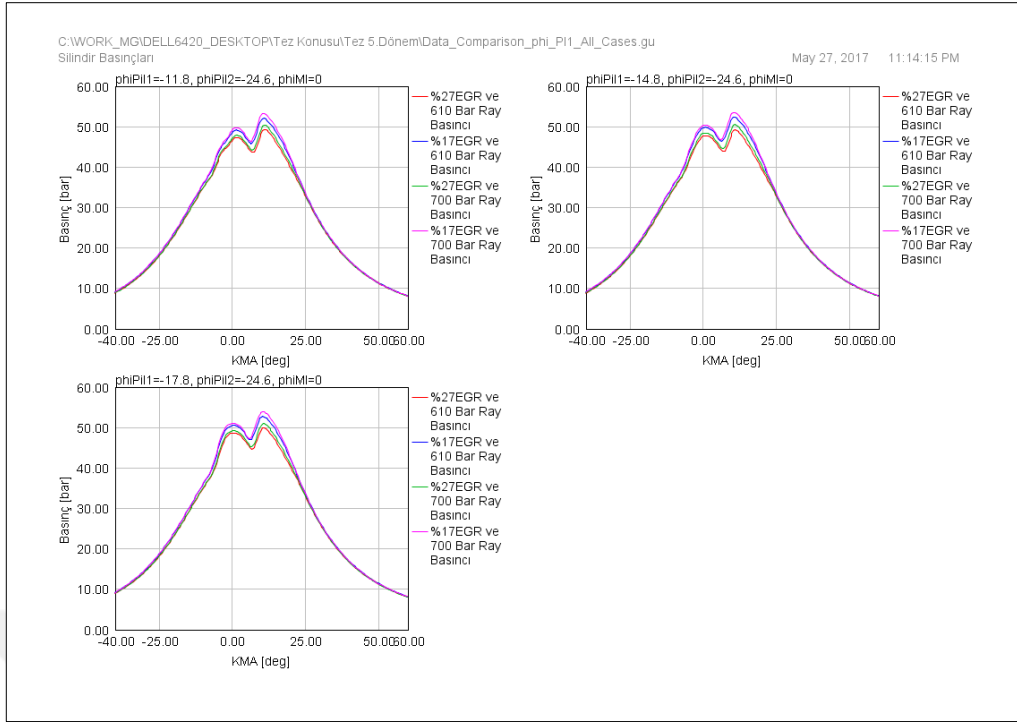


Şekil 4.19 %17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

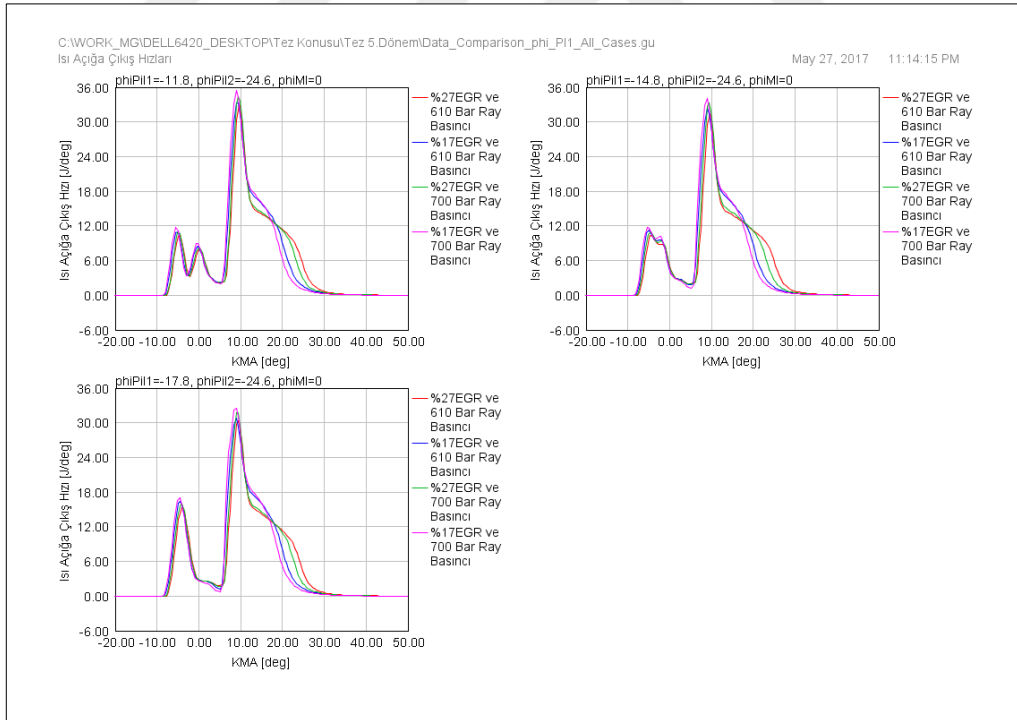
4.2.2 1.Ön Püskürtmenin Açısının Değişimi

Bu simülasyonlarda 1.ön püskürtmenin açısı -11,8, -14,8 ve -17,8 °KMA olarak değiştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler ile;

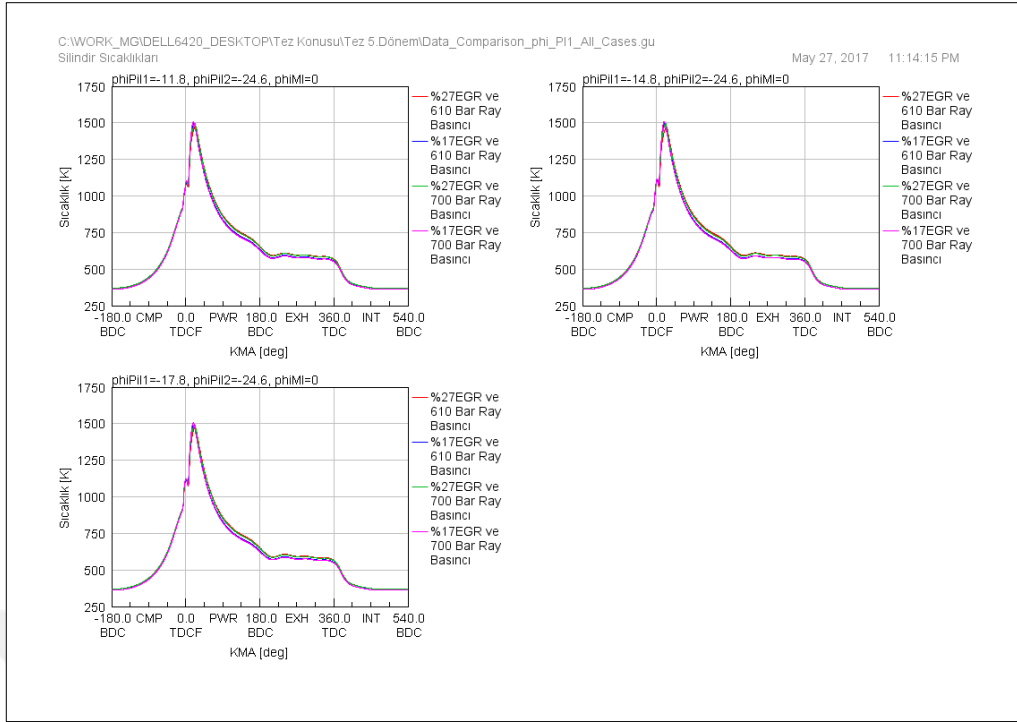
- Her üç püskürtme açısı sabit tutularak, EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki, 1.ön püskürtme açısı değişiminin, ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir basıncı, maksimum basınç artış hızı, maksimum yanma sıcaklığı, silindir duvarlarına olan ortalama ısı transferi, fren torku, fren gücü, ortalama manifold sıcaklığı, motora giren ortalama taze hava debisi, ortalama türbin giriş sıcaklığı, silindirlere giren ortalama iş gazı debisi, NO_x konsantrasyonu, özgül NO_x konsantrasyonu, is konsantrasyonu ve özgül is konsantrasyonuna etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumun her birinin sabit tutularak, 1.ön püskürtme açısının değiştiği üç farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü grafikler elde edilmiştir.



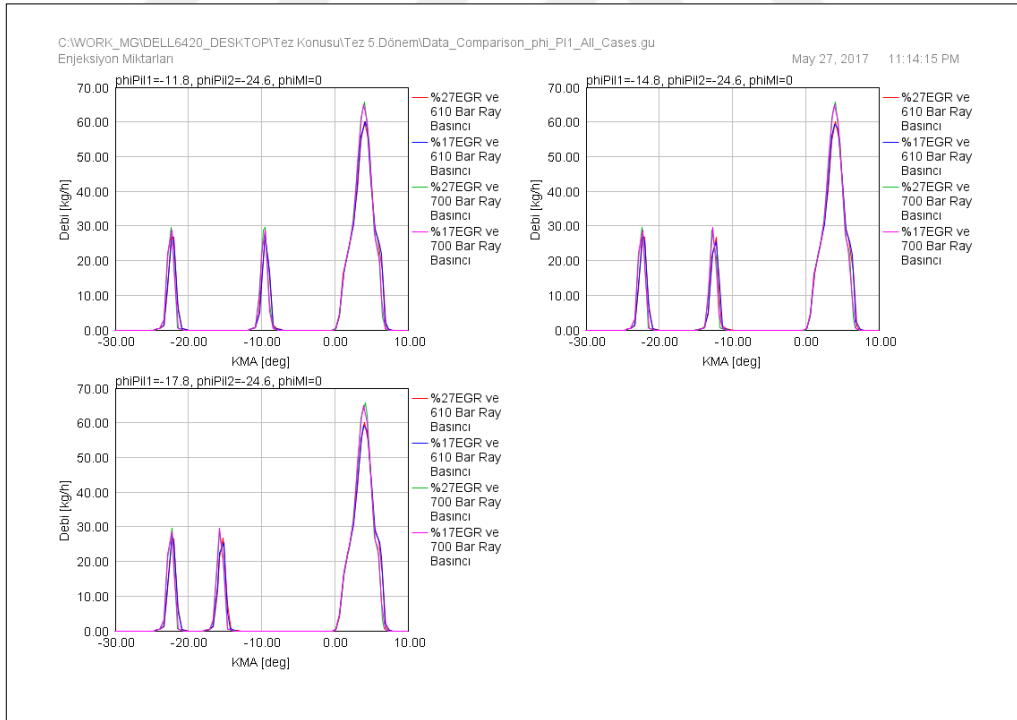
Şekil 4.20 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki silindir basıncı



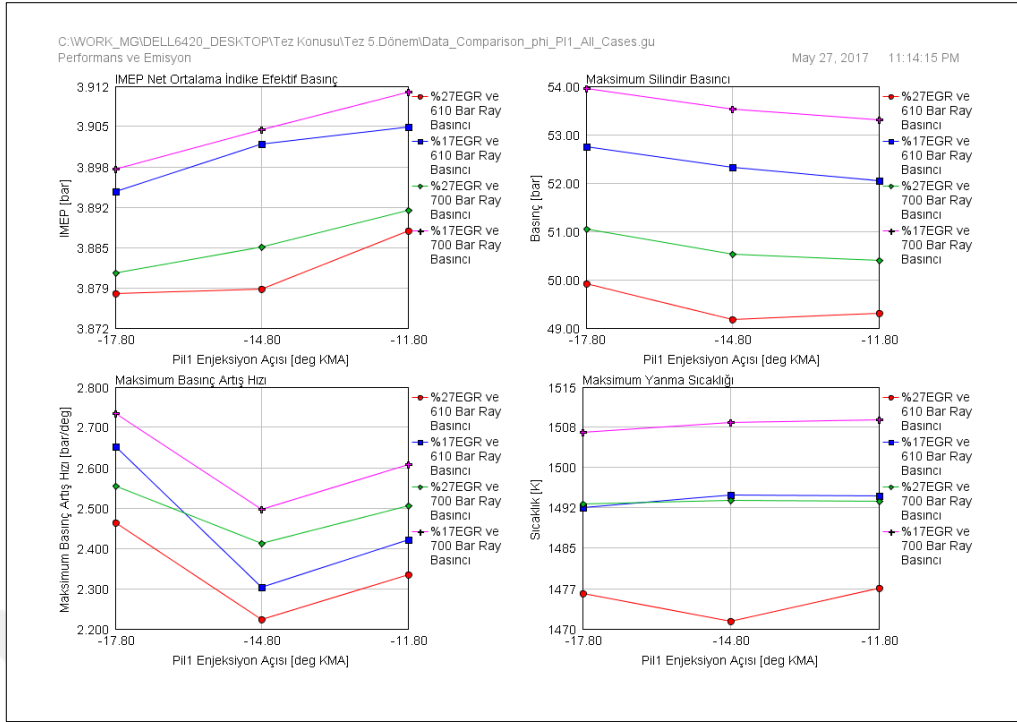
Şekil 4.21 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki ısı açığa çıkış hızı



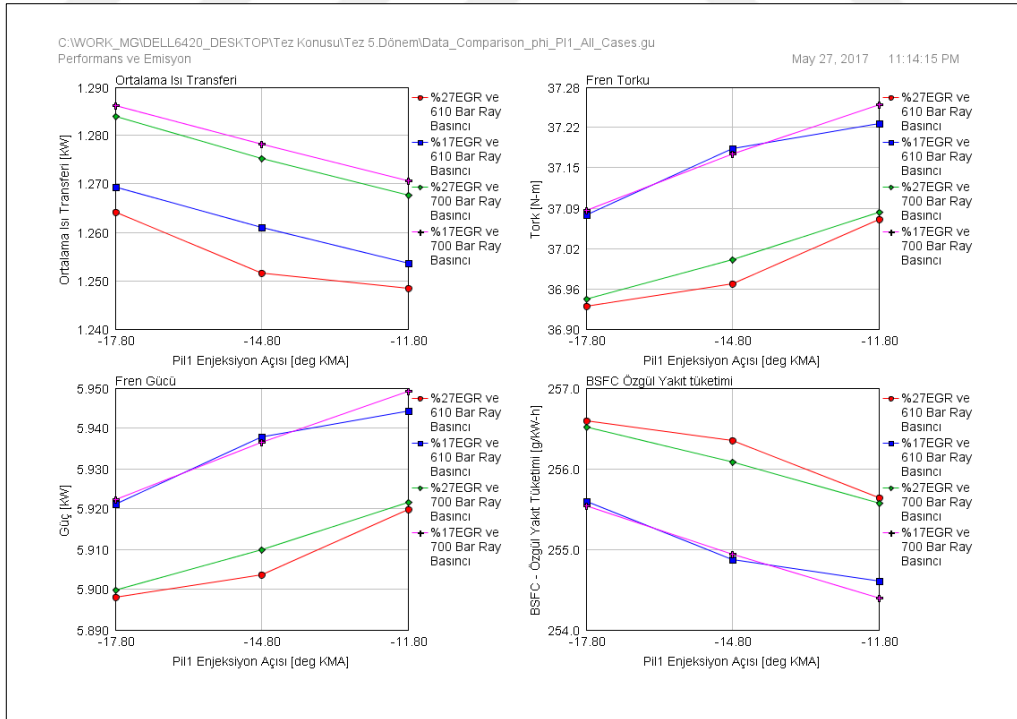
Şekil 4.22 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki silindir sıcaklığı



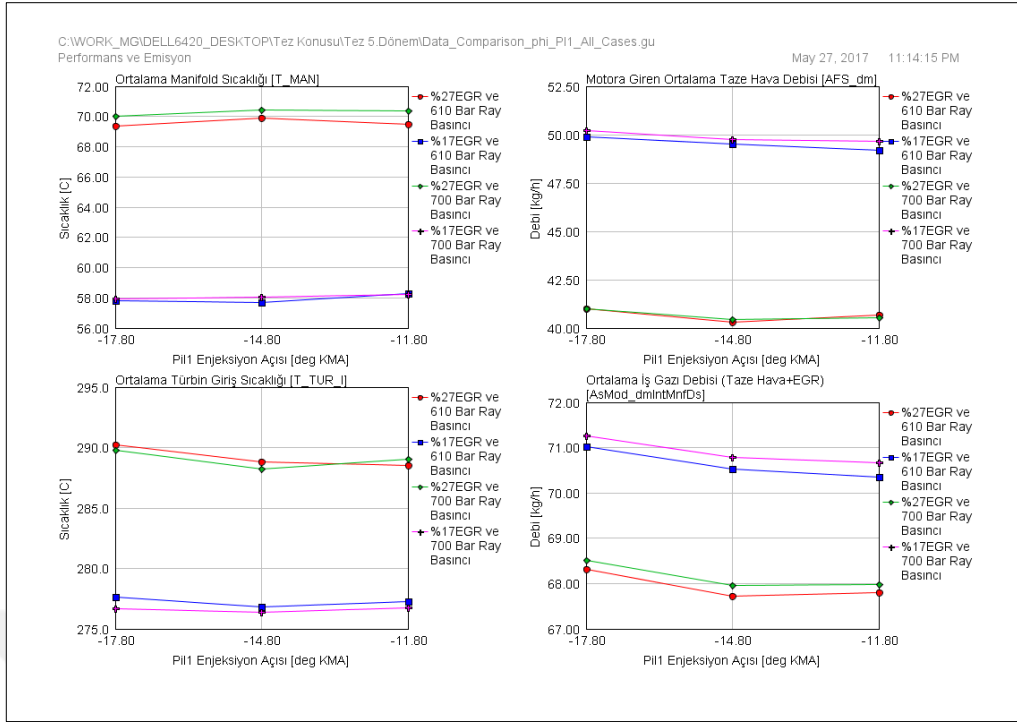
Şekil 4.23 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 1.ön püskürtme açısındaki püskürtme debileri



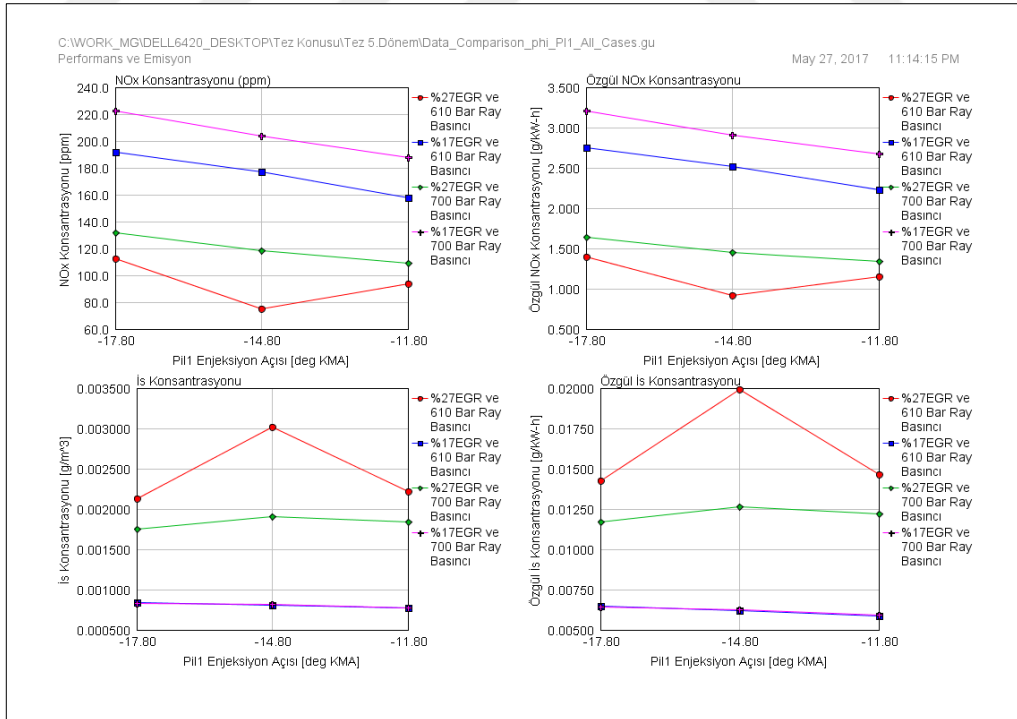
Şekil 4.24 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları



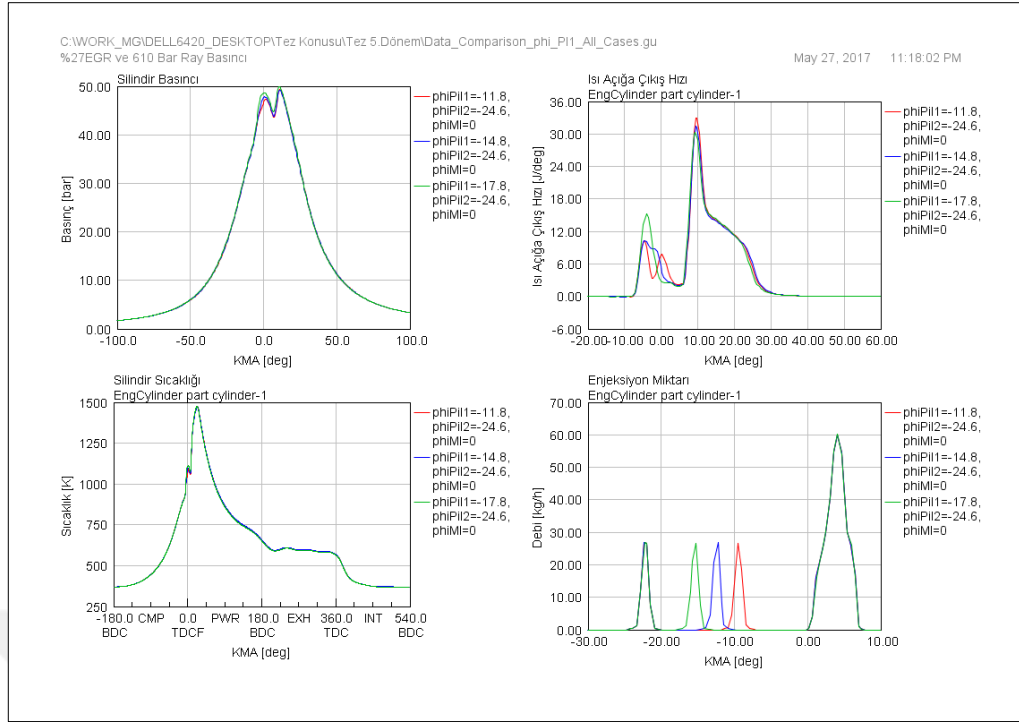
Şekil 4.25 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları



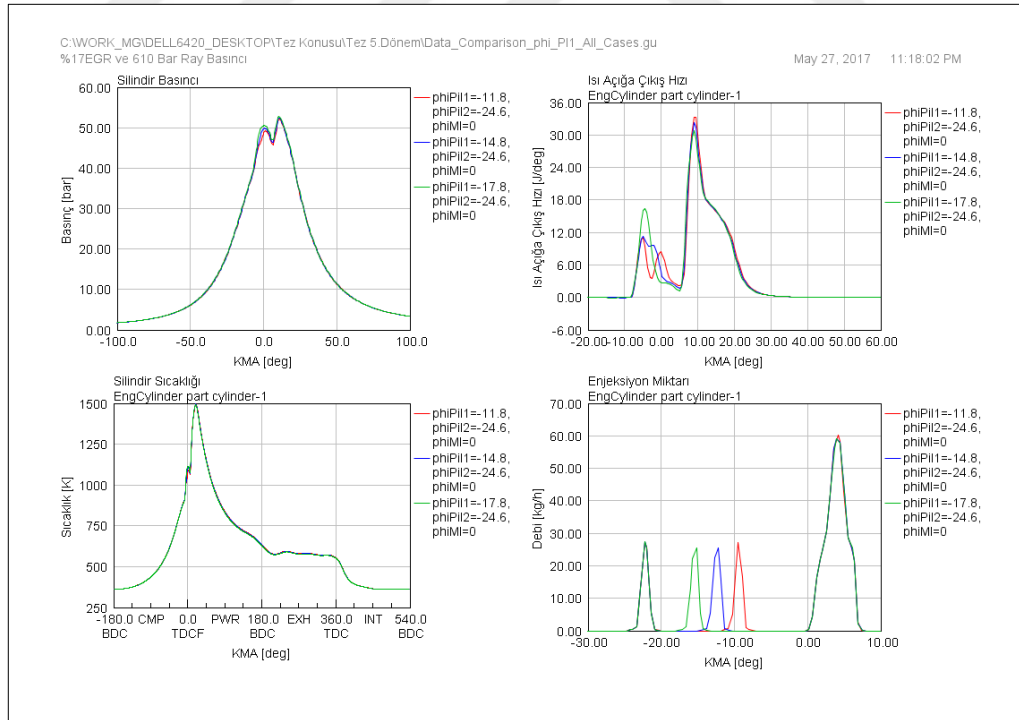
Şekil 4.26 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları



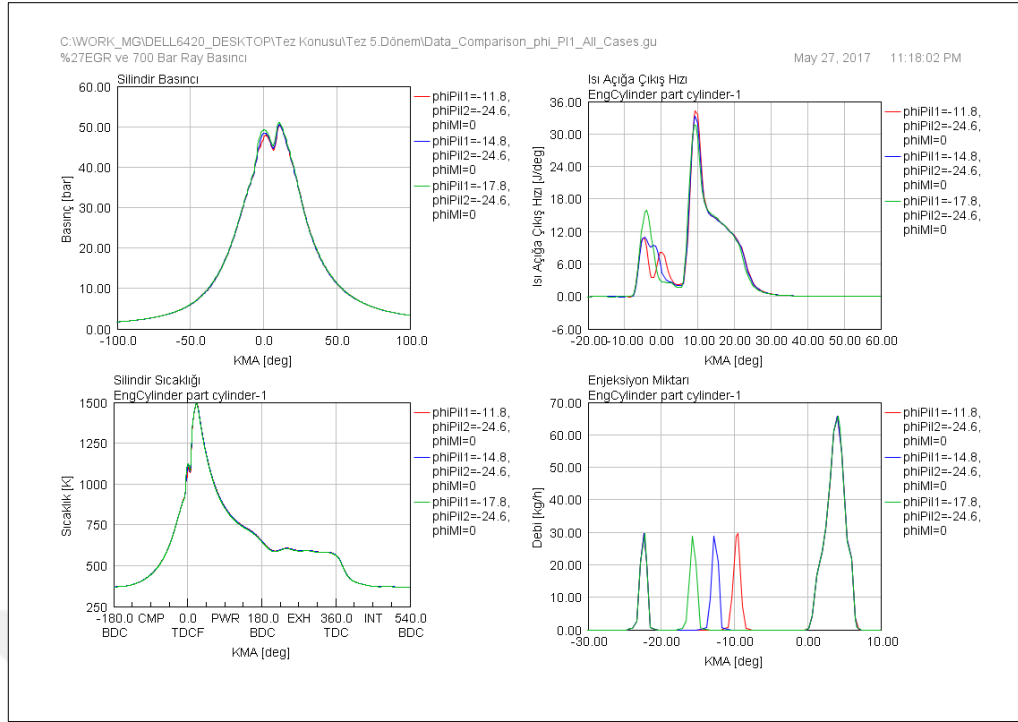
Şekil 4.27 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO_x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO_x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları



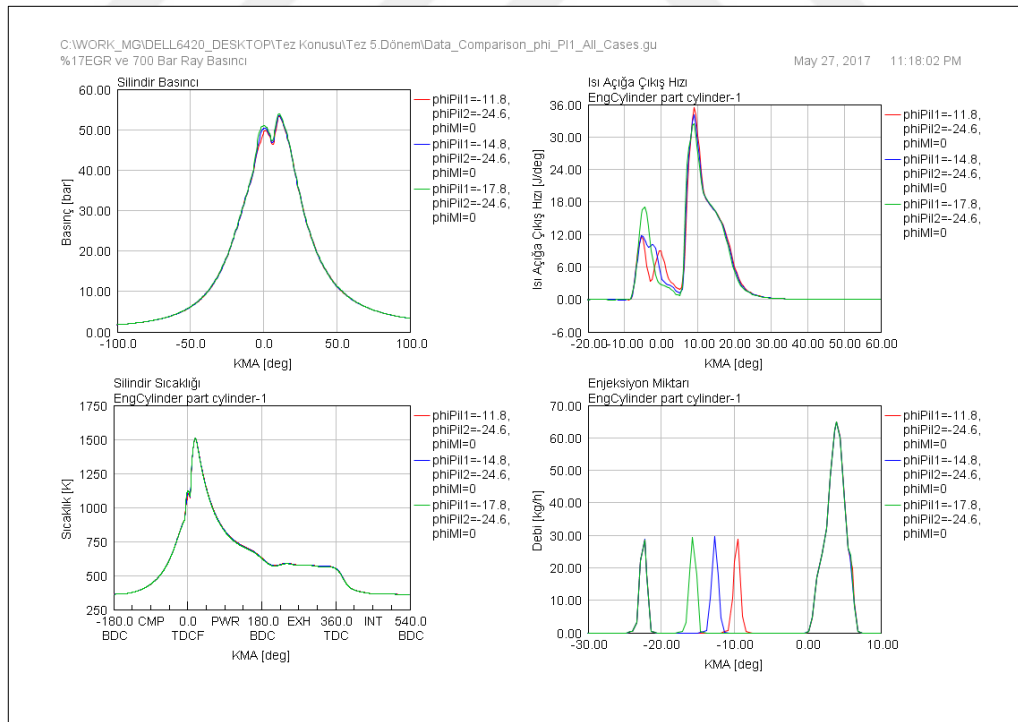
Şekil 4.28 %27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.29 %17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.30 %27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

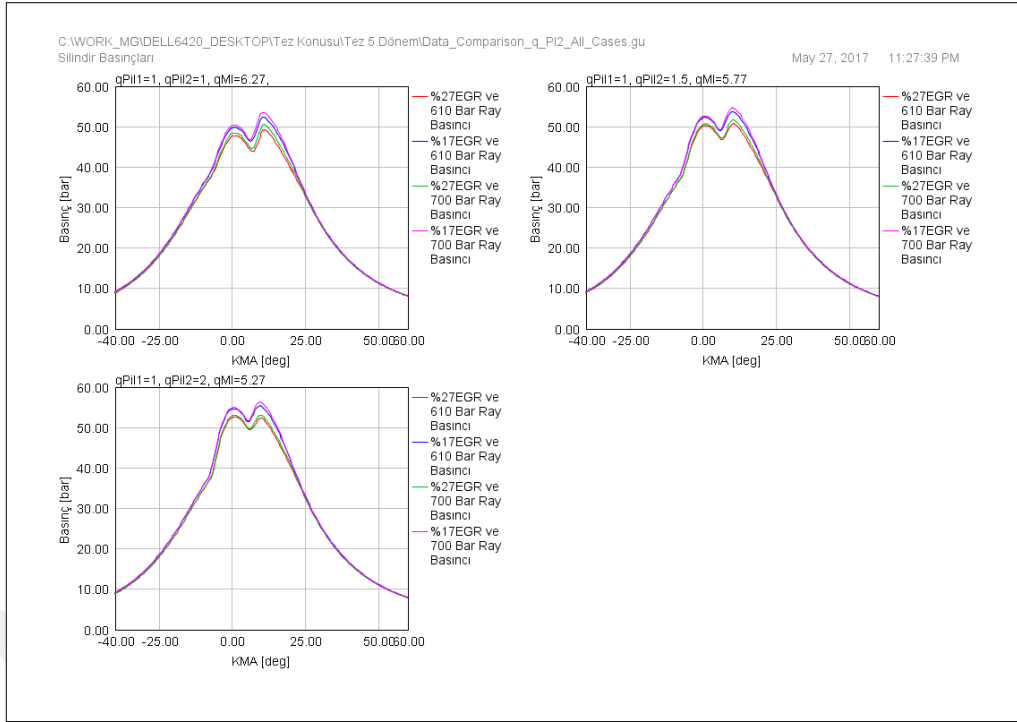


Şekil 4.31 %17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 1.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

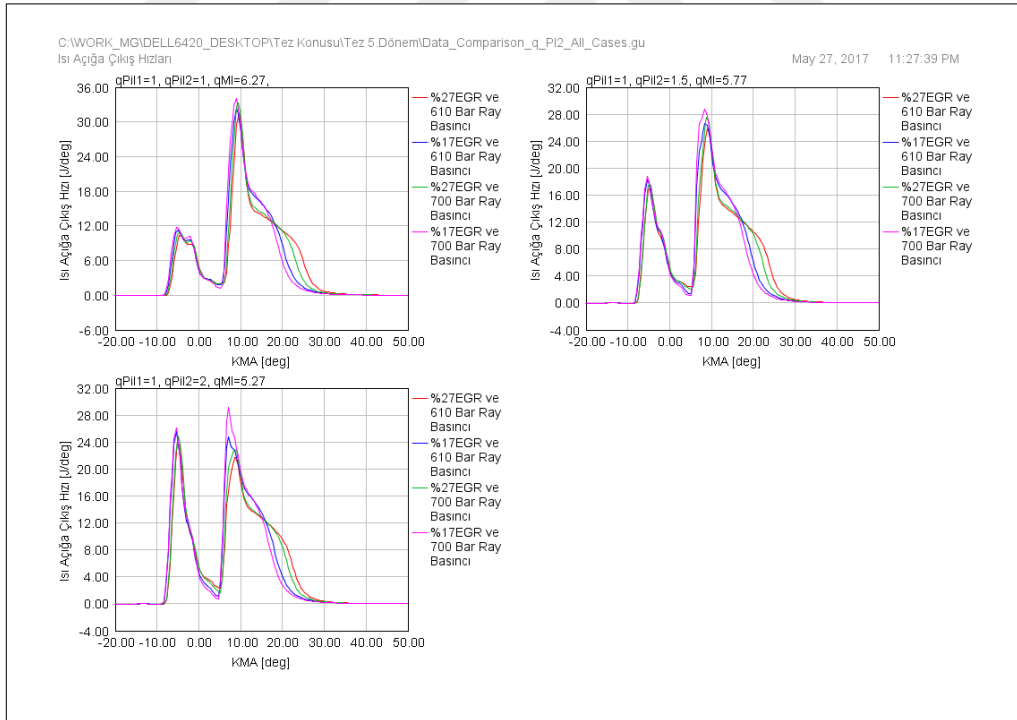
4.2.3 2.Ön Püskürtmenin Miktarının Değişimi

Bu simülasyonlarda 2.ön püskürtmenin miktarı 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler ile;

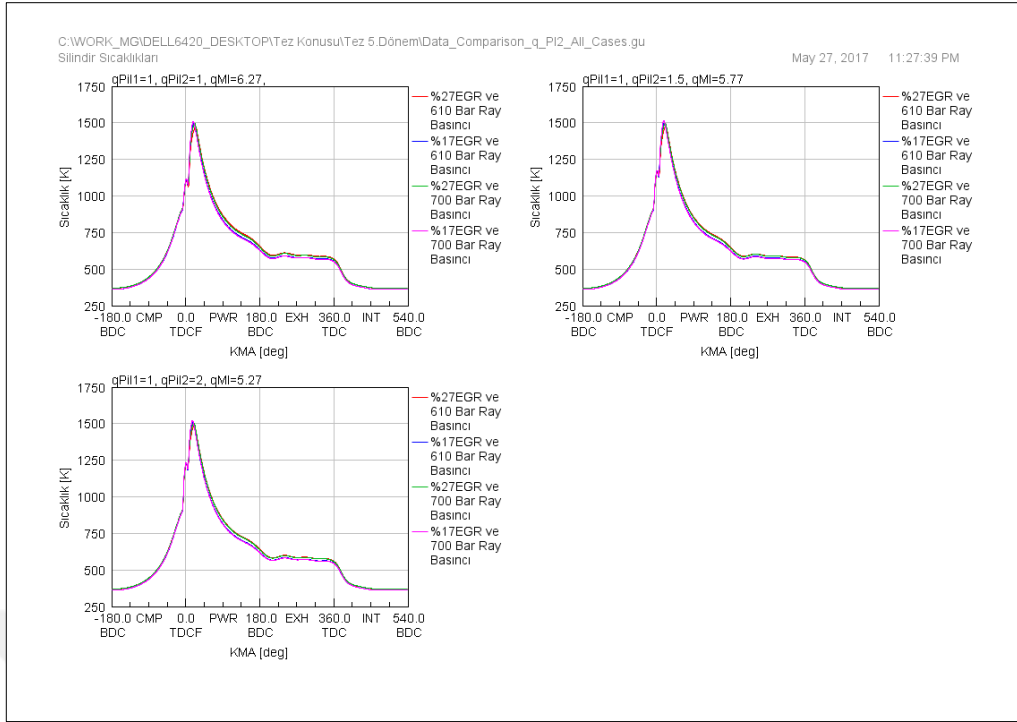
- Her üç püskürtme miktarı sabit tutularak, EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki, 2.ön püskürtme miktarı değişiminin, ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir basıncı, maksimum basınç artış hızı, maksimum yanma sıcaklığı, silindir duvarlarına olan ortalama ısı transferi, fren torku, fren gücü, ortalama manifold sıcaklığı, motora giren ortalama taze hava debisi, ortalama türbin giriş sıcaklığı, silindirlere giren ortalama iş gazı debisi, NO_x konsantrasyonu, özgül NO_x konsantrasyonu, is konsantrasyonu ve özgül is konsantrasyonuna etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumun her birinin sabit tutularak, 2.ön püskürtme miktarının değiştiği üç farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü grafikler elde edilmiştir.



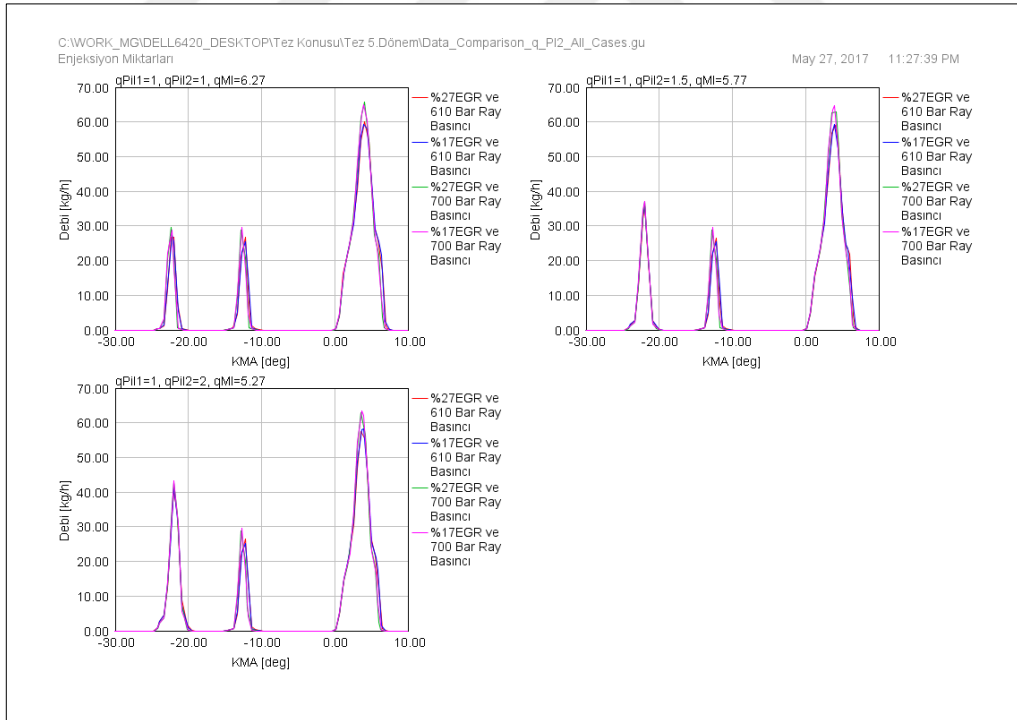
Şekil 4.32 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki silindir basıncı



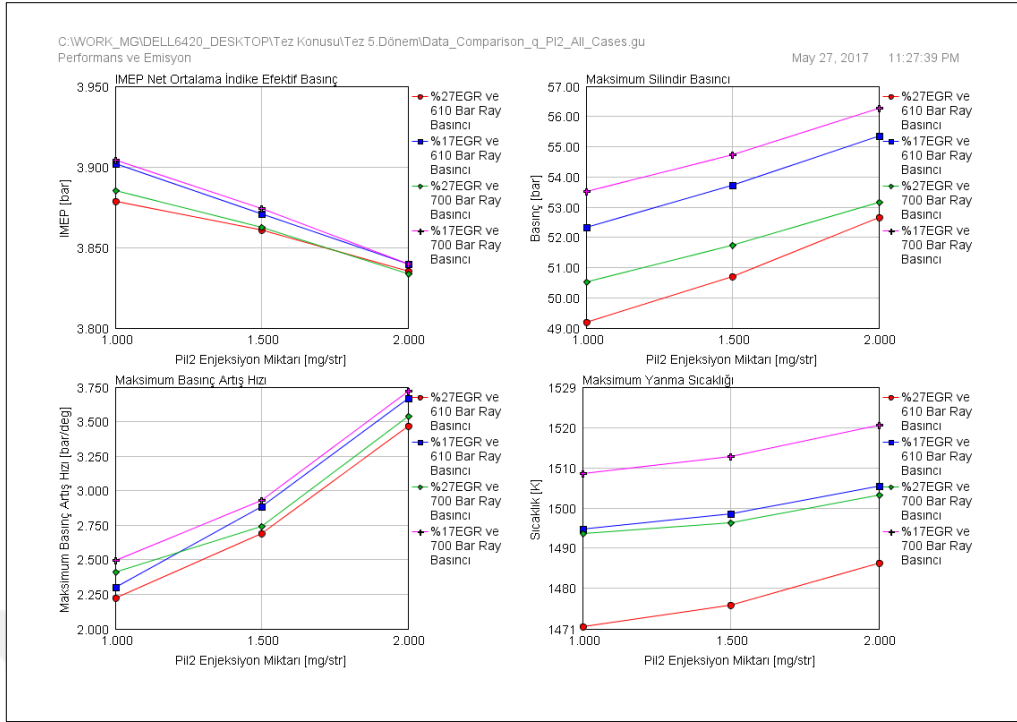
Şekil 4.33 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki ısı açığa çıkış hızı



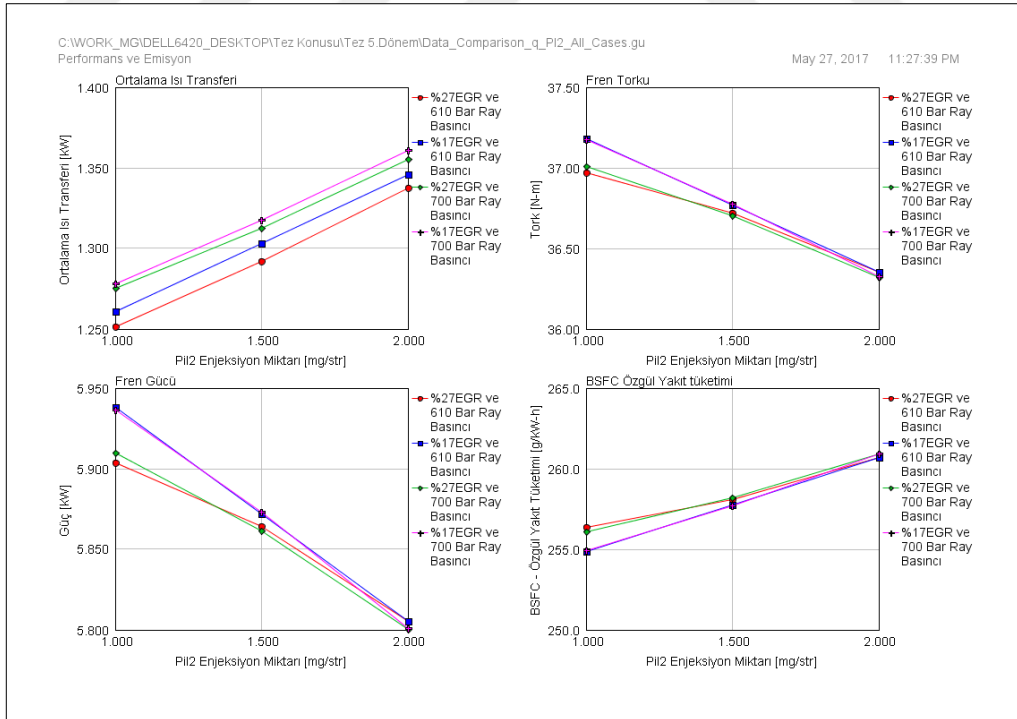
Şekil 4.34 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki silindir sıcaklığı



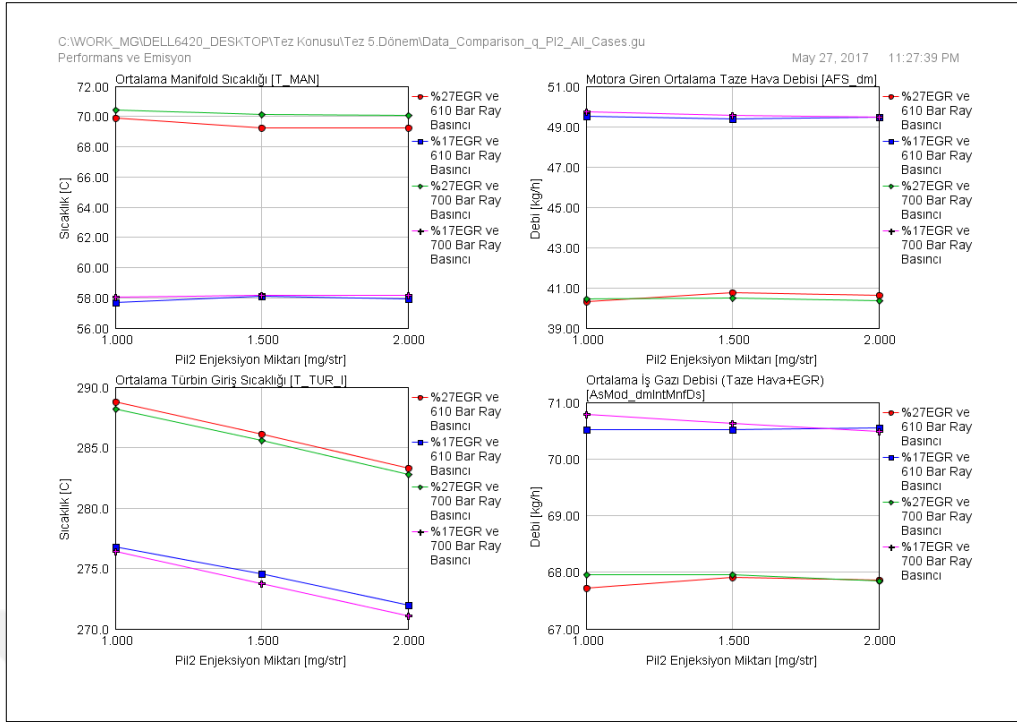
Şekil 4.35 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme miktarındaki püskürtme debileri



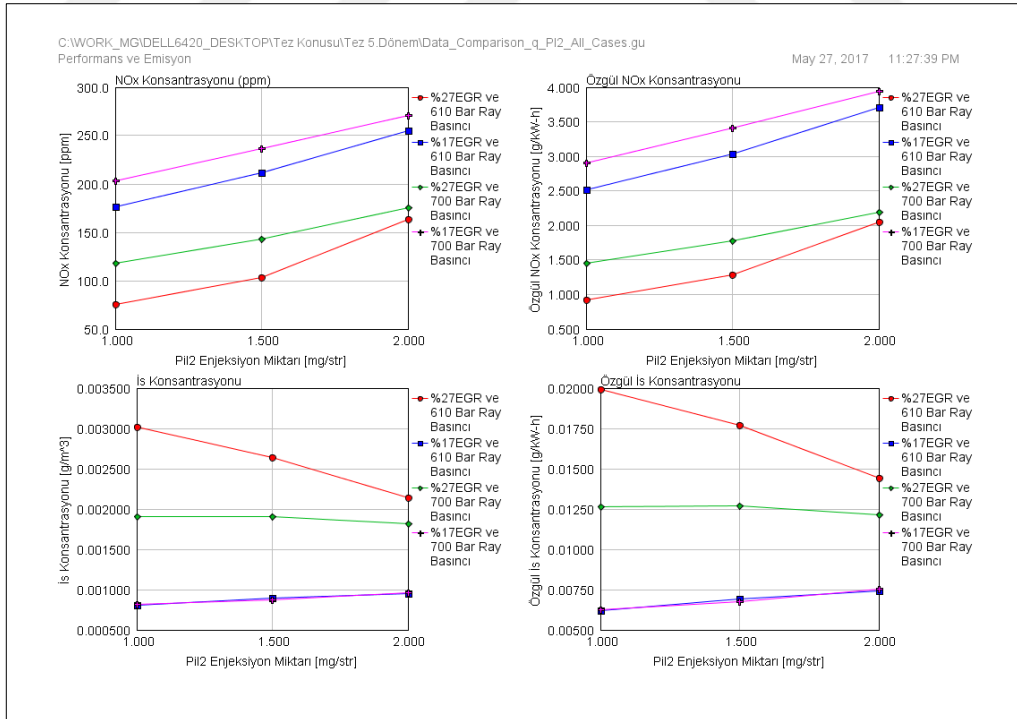
Şekil 4.36 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları



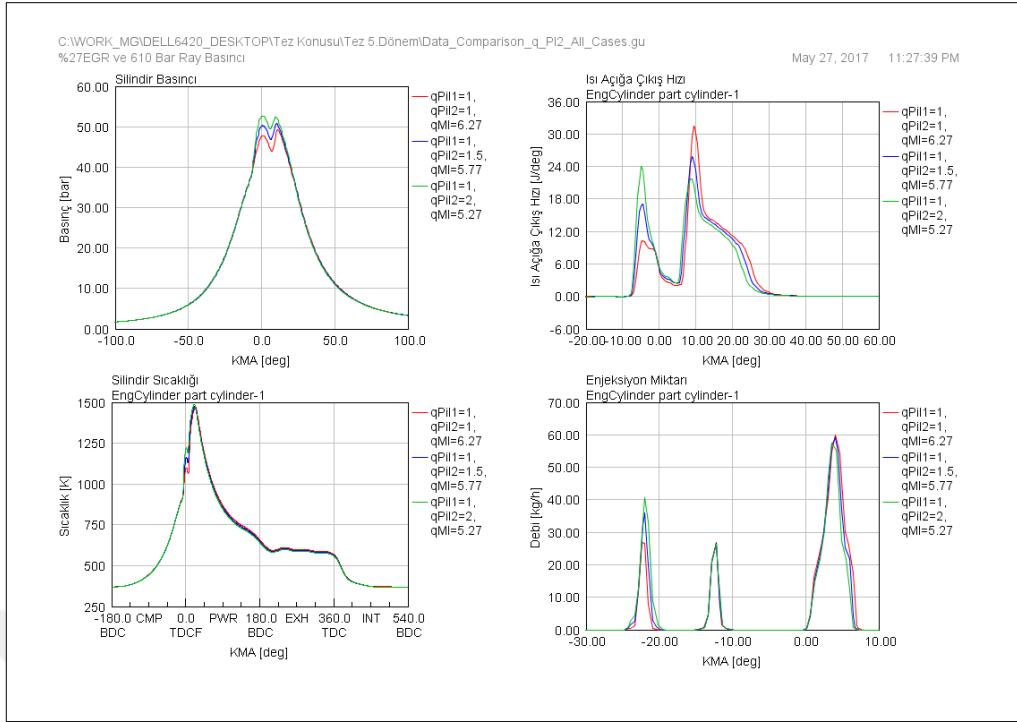
Şekil 4.37 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları



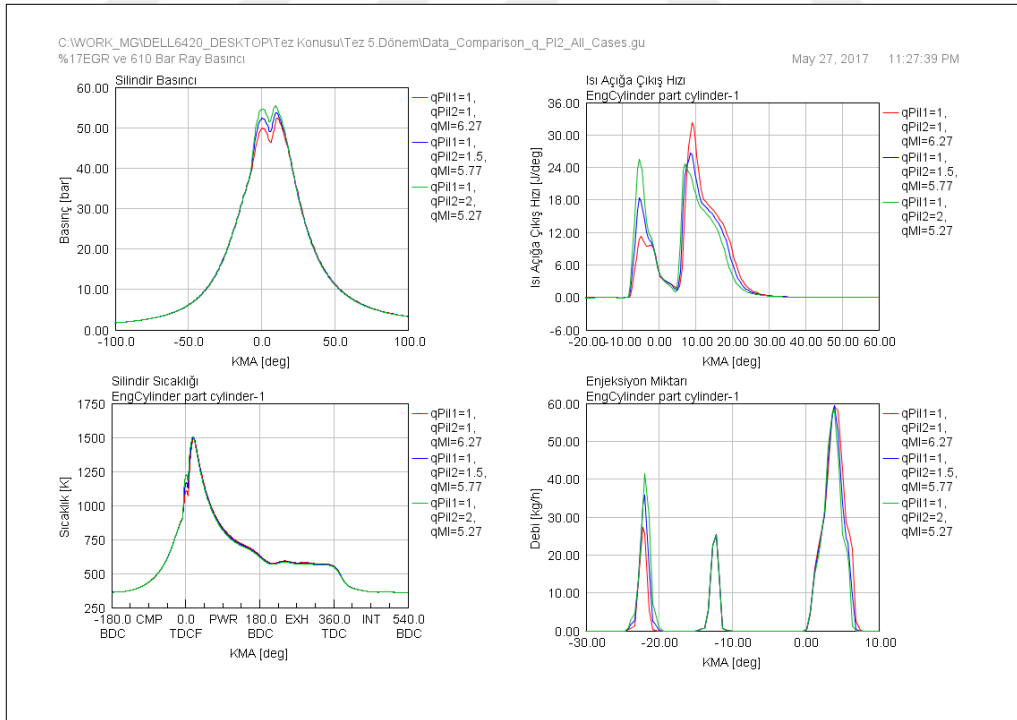
Şekil 4.38 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları



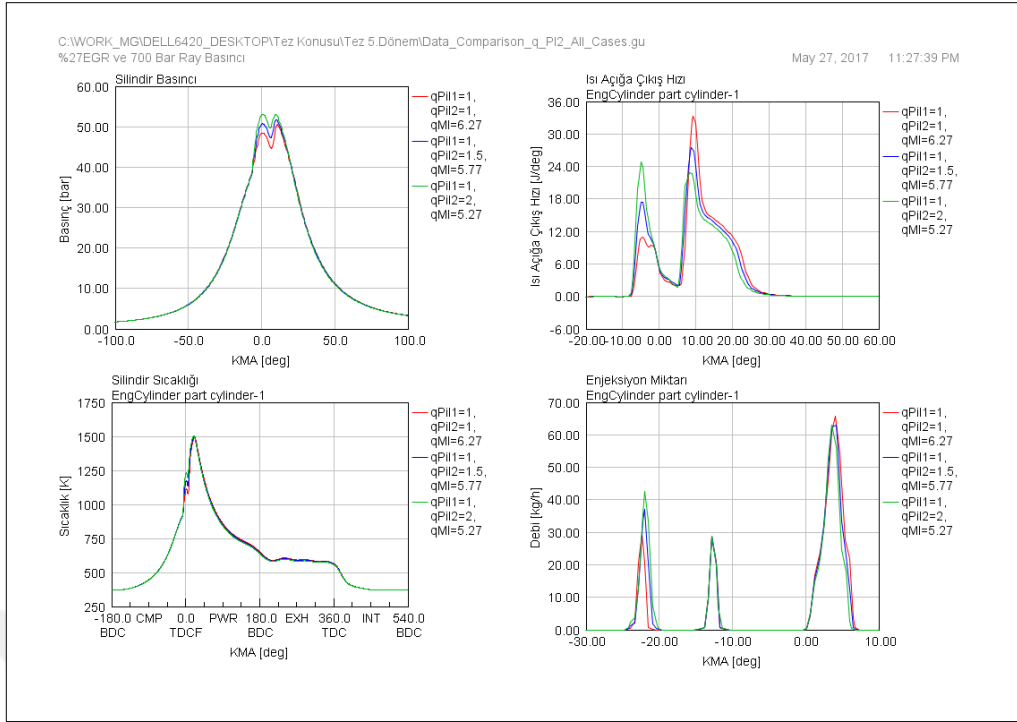
Şekil 4.39 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO_x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO_x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları



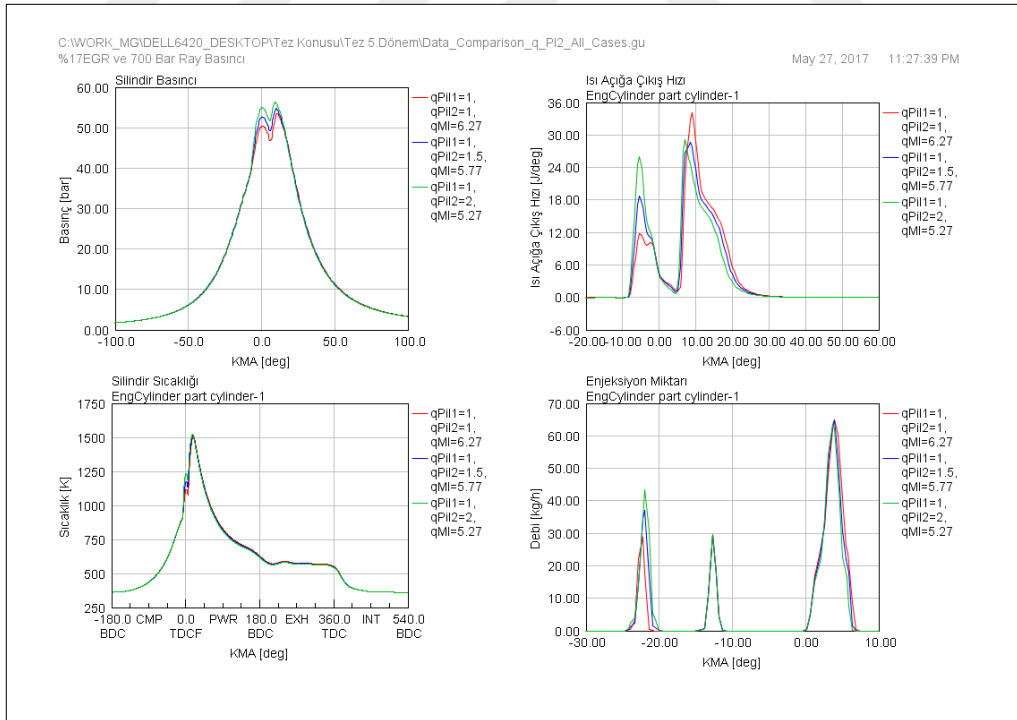
Şekil 4.40 %27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.41 %17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.42 %27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

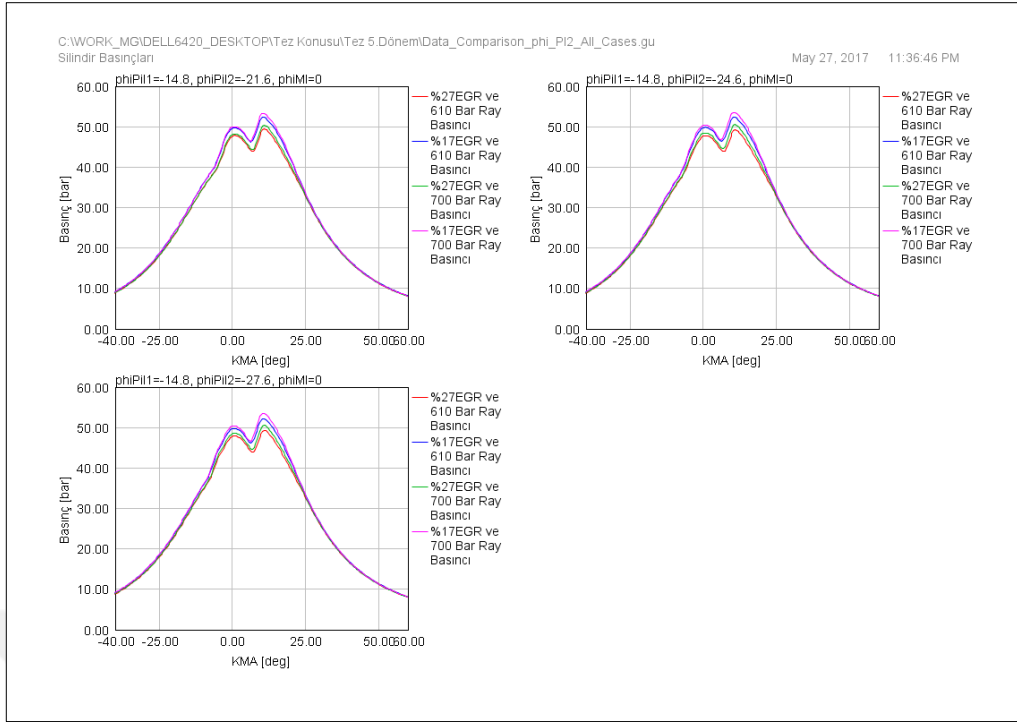


Şekil 4.43 %17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme miktarı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

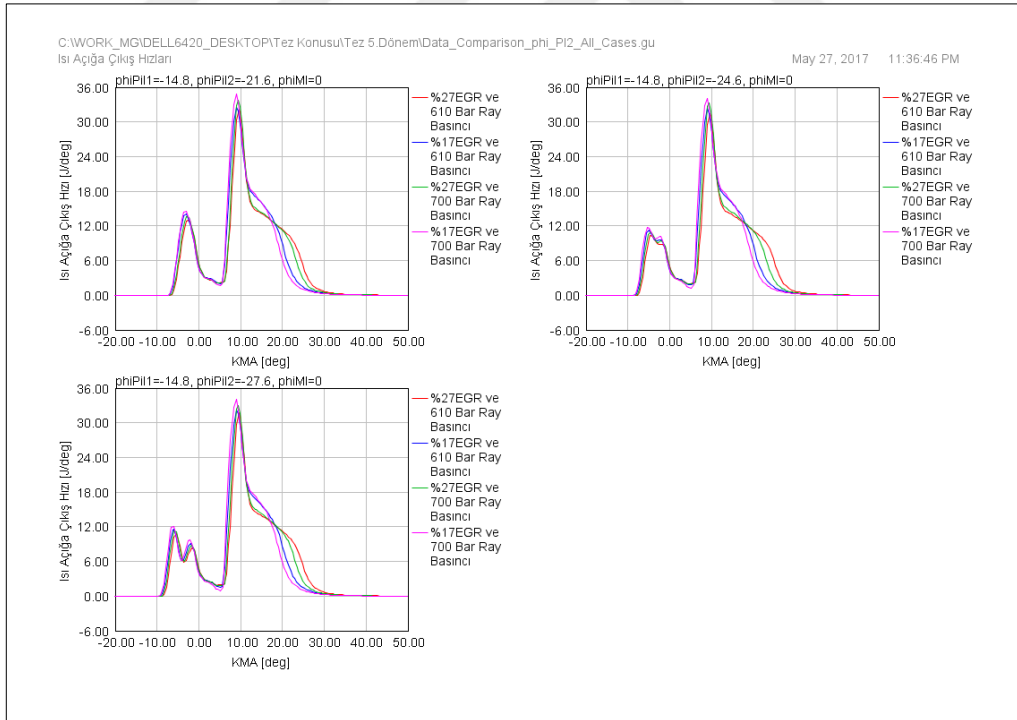
4.2.4 2.Ön Püskürtmenin Açısının Değişimi

Bu simülasyonlarda 2.ön püskürtmenin açısı -21,6, -24,6 ve -27,6 °KMA olarak değiştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler ile;

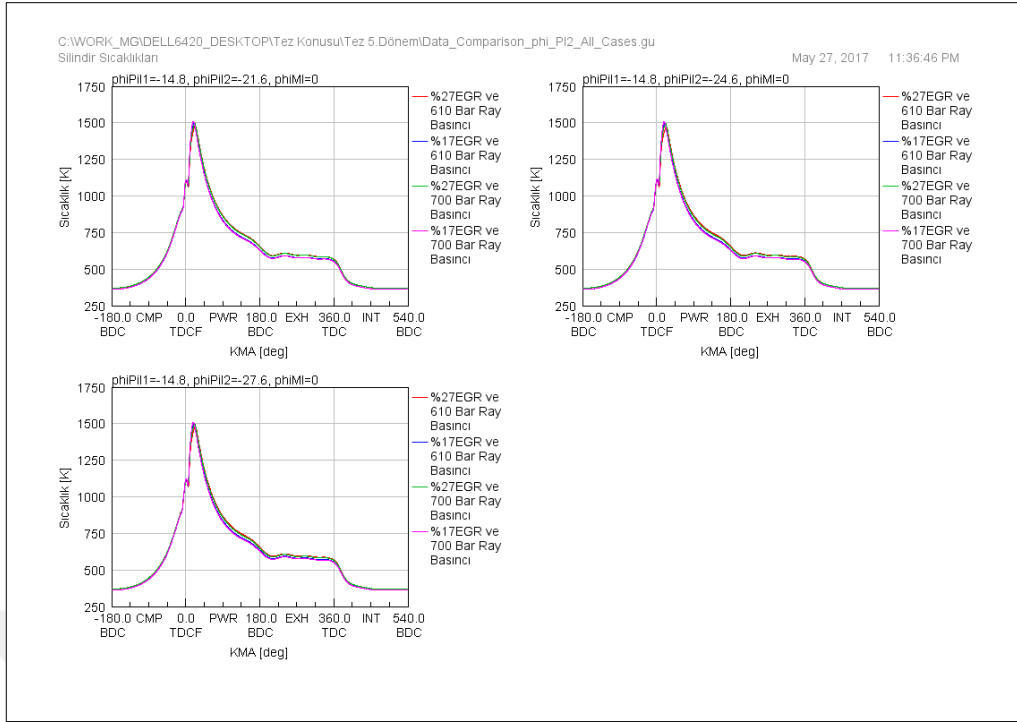
- Her üç püskürtme açısı sabit tutularak, EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumdaki, 2.ön püskürtme açısı değişiminin, ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir basıncı, maksimum basınç artış hızı, maksimum yanma sıcaklığı, silindir duvarlarına olan ortalama ısı transferi, fren torku, fren gücü, ortalama manifold sıcaklığı, motora giren ortalama taze hava debisi, ortalama türbin giriş sıcaklığı, silindirlere giren ortalama iş gazı debisi, NO_x konsantrasyonu, özgül NO_x konsantrasyonu, is konsantrasyonu ve özgül is konsantrasyonuna etkilerinin görüldüğü,
- EGR açısı ve ray basıncının değiştiği dört farklı durumun her birinin sabit tutularak, 2.ön püskürtme açısının değiştiği üç farklı durumdaki silindir basıncı, ısı açığa çıkış hızı, silindir sıcaklığı ve püskürtme miktarlarına olan etkilerinin görüldüğü grafikler elde edilmiştir.



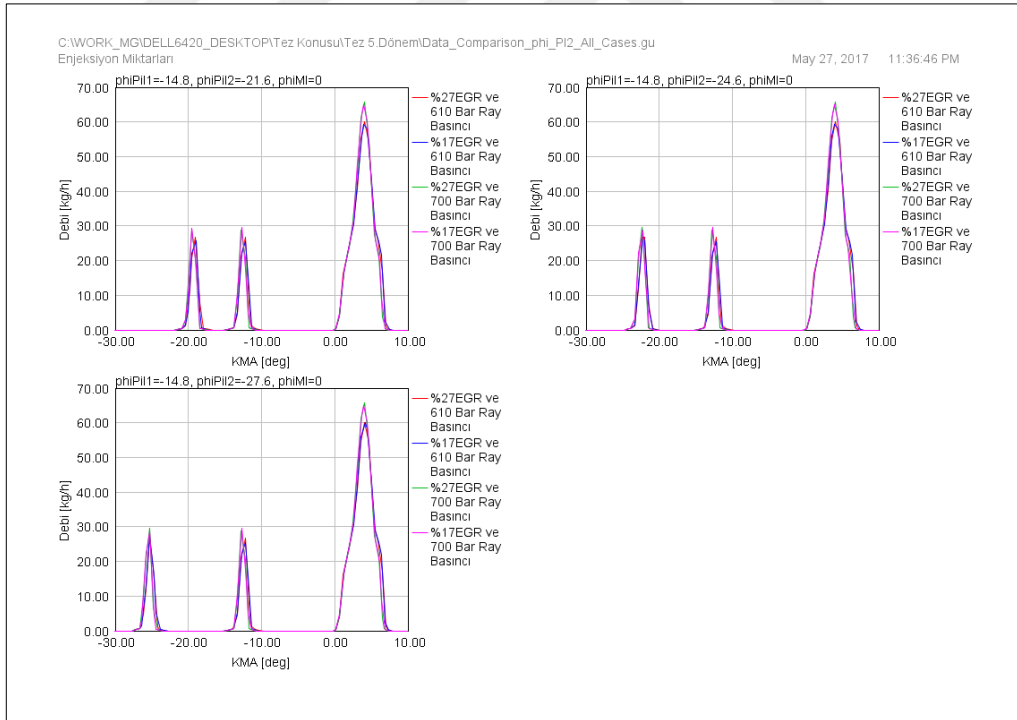
Şekil 4.44 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki silindir basıncı



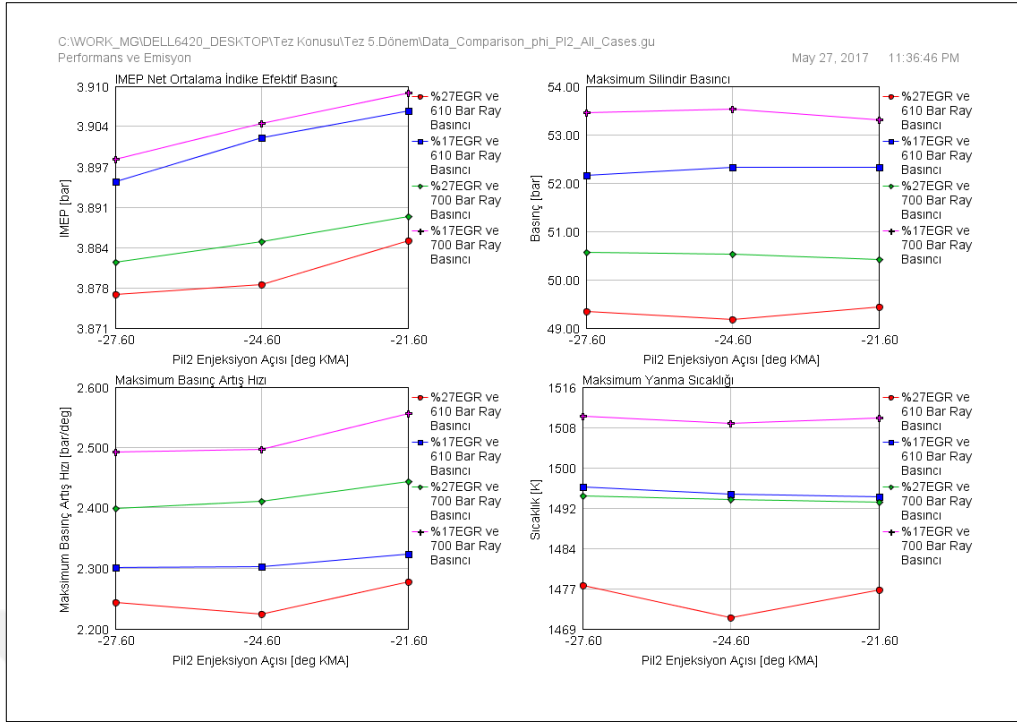
Şekil 4.45 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki ısı açığa çıkış hızı



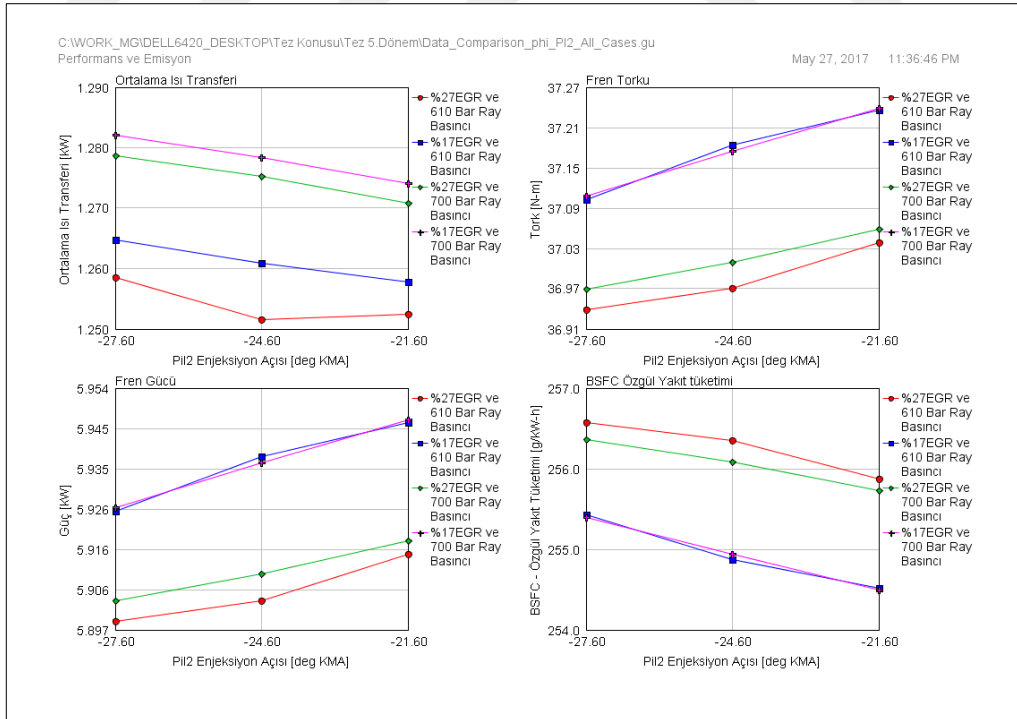
Şekil 4.46 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki silindir sıcaklığı



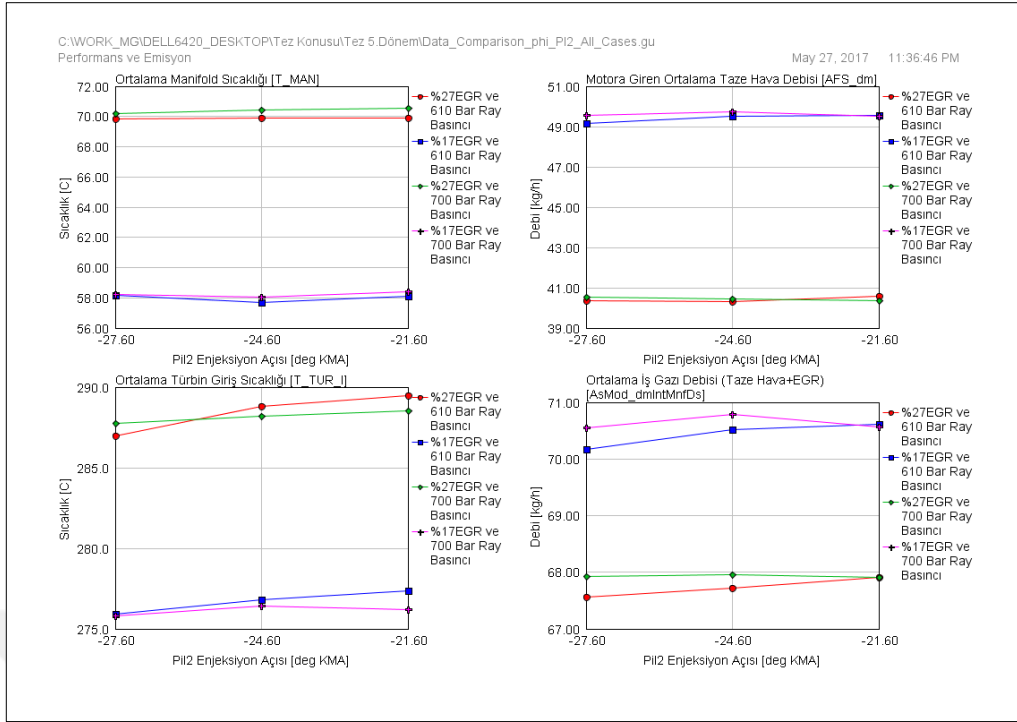
Şekil 4.47 EGR ve ray basıncı değişimine bağlı her üç 2.ön püskürtme açısındaki püskürtme debileri



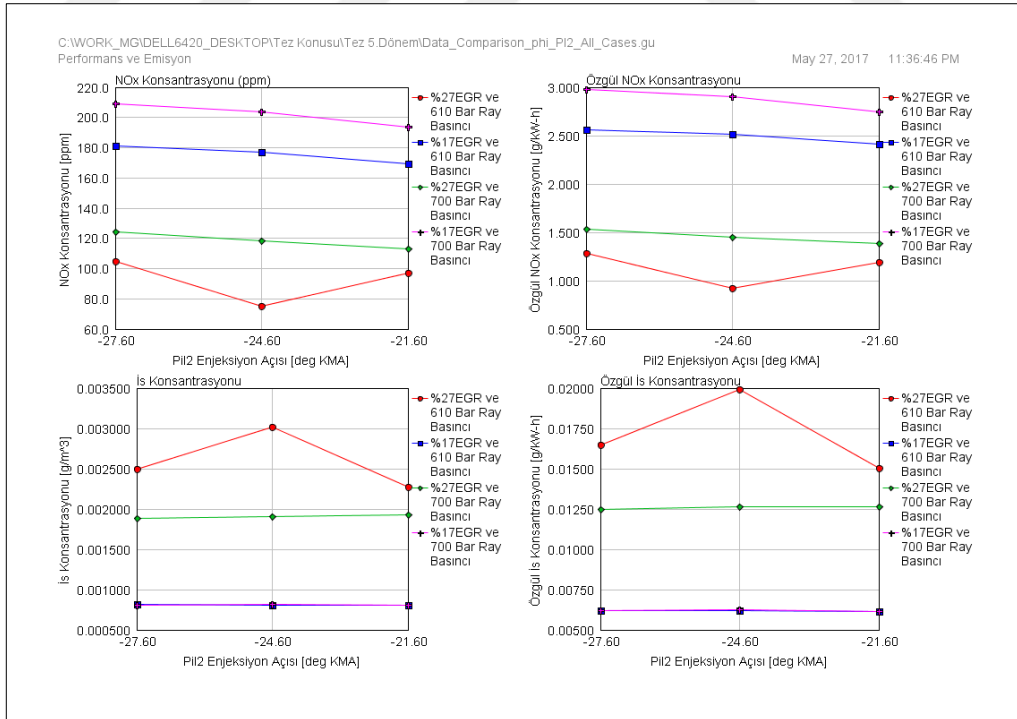
Şekil 4.48 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama indike efektif basınç (sol üst), maksimum silindir basıncı (sağ üst), maksimum basınç artış hızı (sol alt) ve maksimum yanma sıcaklığı (sağ alt) sonuçları



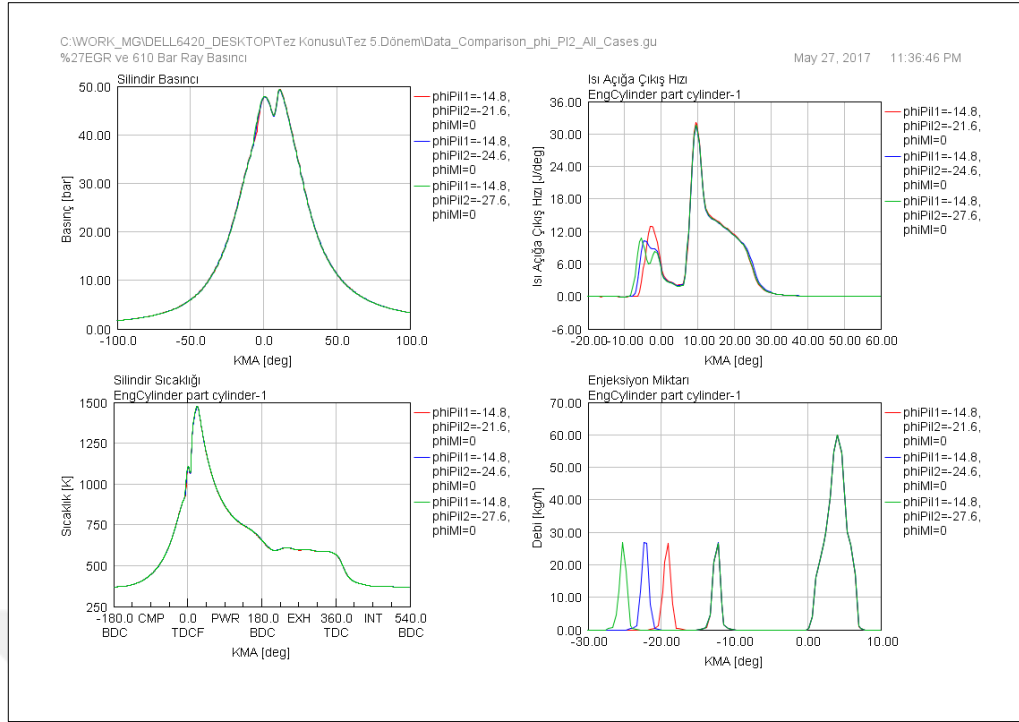
Şekil 4.49 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama ısı transferi (sol üst), fren torku (sağ üst), fren gücü (sol alt), özgül yakıt tüketimi (sağ alt) sonuçları



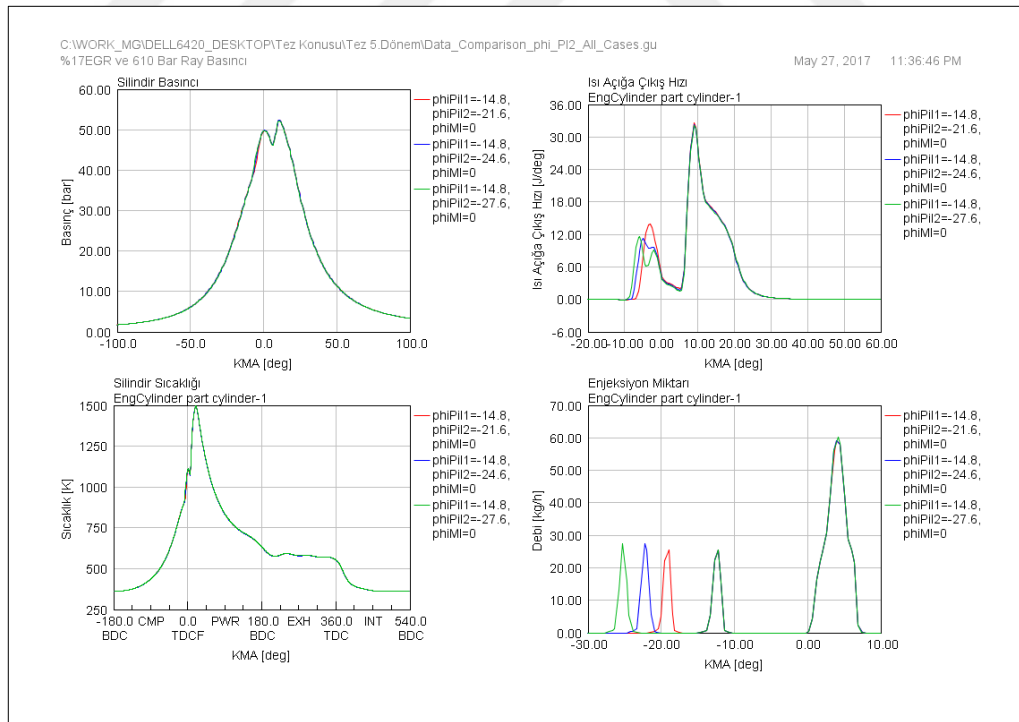
Şekil 4.50 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki ortalama manifold sıcaklığı (sol üst), motora giren taze hava debisi (sağ üst), ortalama türbin giriş sıcaklığı (sol alt), ortalama iş gazı debisi (sağ alt) sonuçları



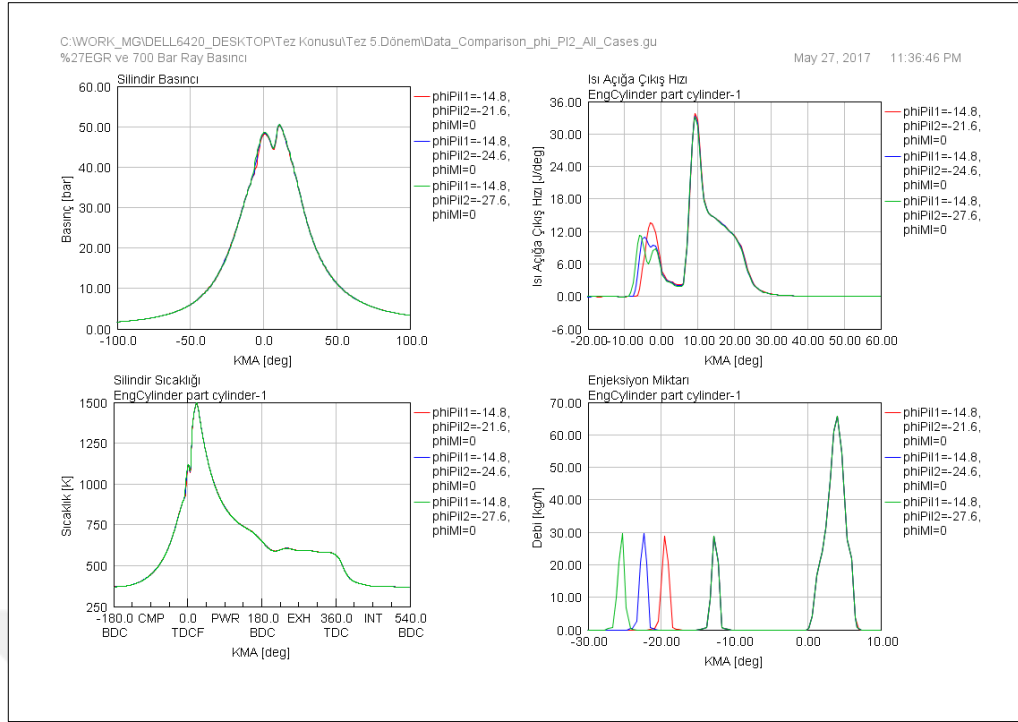
Şekil 4.51 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı her 4 motor çalışma durumundaki NO_x konsantrasyonu (sol üst), özgül NO_x konsantrasyonu (sağ üst), is konsantrasyonu (sol alt), özgül is konsantrasyonu (sağ alt) sonuçları



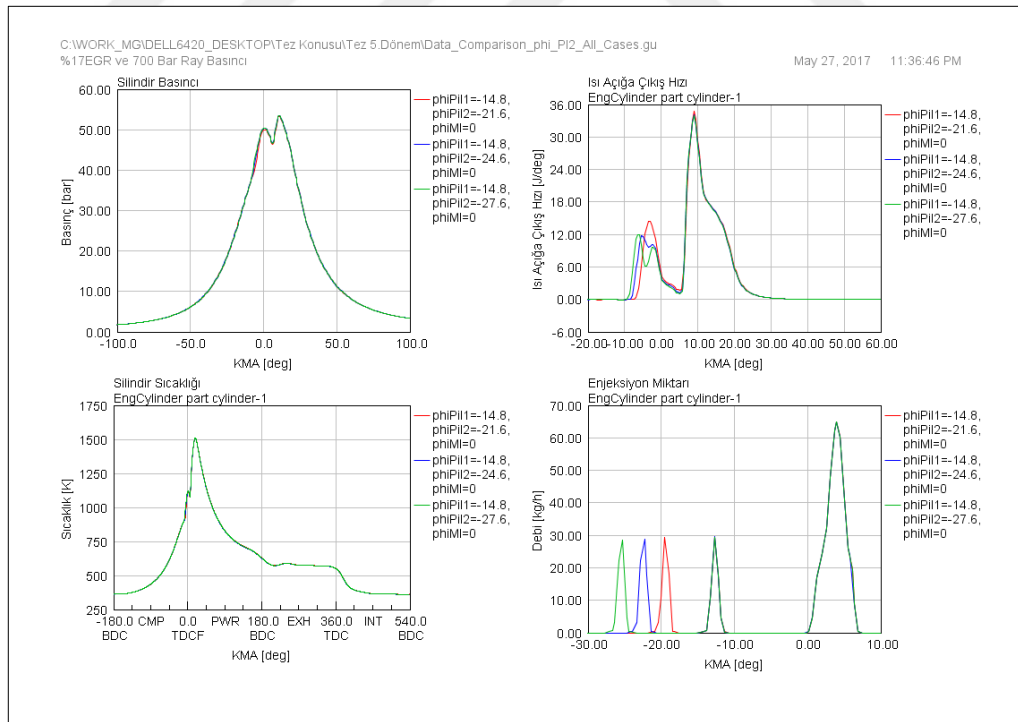
Şekil 4.52 %27 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.53 %17 EGR ve 610 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.54 %27 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri



Şekil 4.55 %17 EGR ve 700 Bar ray basıncı şartlarında 2.ön püskürtme açısı değişimine bağlı silindir basıncı (sol üst), ısı açığa çıkış hızı (sağ üst), silindir sıcaklığı (sol alt), püskürtme miktarı (sağ alt) grafikleri

4.3 Tüm Çoklu Ön Püskürtme Parametresi Değişimlerinde Aynı Sınır Koşullarının Kullanılması

Duyarlılık analizi ve optimizasyon çalışmaları öncesinde, değişen sınır koşullarının etkisini de ortadan kaldırmak amacıyla, dinamometre testlerinde elde edilen sınır şartlarının kullanıldığı simülasyon sonuçları ile sadece baz durumdaki sınır şartlarının tüm çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişiminde aynı kaldığı simülasyonların sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırma için motorun %27 EGR pozisyonu ve 610 Bar ray basıncının olduğu durum seçilmiştir. Bu değerlendirmelerin yapıldığı modelde yanma modeli v75, akış modeli v2019 olarak kullanılmıştır. Bu çalışma ile model sınır koşullarından bağımsız hale getirilmiş ve sadece çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişiminin etkisi gözlemlenmiştir.

Tablo 4.4'te her bir çoklu ön püskürtme parametresi değişiminde motor testlerinde elde edilen sınır şartları değerleri görülmekte olup, bu değişken sınır şartları değerleri ile elde edilen sonuçlarla, baz durumdaki sınır şartlarının tüm çoklu ön püskürtme parametresi değişimlerinde aynı şekilde kullanılması ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4 Çoklu ön püskürtme parametreleri değişimlerinde kullanılan değişken sınır şartları değerleri

<i>Değişen Parametre</i>	<i>Dolgu Sıcaklığı</i>	<i>Dolgu Basıncı</i>	<i>Türbin Giriş Basıncı</i>	<i>Türbin Giriş Sıcaklığı</i>	<i>Manifold Sıcaklığı</i>	<i>Yakıt Sıcaklığı</i>
-	°C	mbar	mbar	°C	°C	°C
Baz Durum	29,5	1040,07	1110,3	307,6	72,27	26,3
qPI1 = 1,5 mg	29,6	1040,65	1109,9	307,6	72,39	26,5
qPI1 = 2 mg	29,7	1038,75	1107,3	301,4	72,23	26,5
PhiPI1 = -11,8 °KMA	29,8	1040,35	1108,8	307,5	72,76	26,2
PhiPI1 = -17,8 ° KMA	29,7	1048,25	1117,3	328,1	73,06	26,2
qPI2= 1,5 mg	29,8	1041,7	1110,1	310,9	72,94	26,7
qPI2= 2 mg	29,8	1041,18	1110,1	309,9	72,78	26,5
PhiPI2= -21,6 ° KMA	30	1042,98	1112,5	314,5	72,74	26,1
PhiPI2= -27,6 ° KMA	29,9	1037,61	1106,9	298,1	72,38	26,2

Tablo 4.4 Çoklu ön püskürtme parametreleri değişimlerinde kullanılan değişken sınır şartları değerleri (devamı)

Standart Sapma	0,14	2,87	2,92	8,03	0,29	0,19
----------------	------	------	------	------	------	------

	PI1_FQ	PI2_FQ	PI1_SOI	PI2_SOI	AllCases	OneCaseDoE	AllCases	OneCaseDoE	AllCases	OneCaseDoE	AllCases	OneCaseDoE	AllCases	OneCaseDoE	AllCases	OneCaseDoE
	mg	mg	deg	deg	IMEP	PFP	MFB50	BSFC	NOx	Soot						
					bar	bar	deg	g/kW-h	g/kW-h	g/kW-h						
Base Point	1	1	-14,8	-24,6	3,8785	3,8748	49,19	49,41	8,63	8,63	256,35	257,00	0,92	1,03	0,0199	0,0154
PI1_FQ=1,5	1,5	1	-14,8	-24,6	3,8737	3,8666	50,57	50,53	8,01	8,04	257,06	257,91	1,52	1,30	0,0157	0,0157
PI1_FQ=2	2	1	-14,8	-24,6	3,8646	3,8612	51,74	51,67	7,45	7,50	258,04	258,61	1,81	1,45	0,0149	0,0147
PI1_SOI= -11,8	1	1	-11,8	-24,6	3,8880	3,8794	49,31	49,27	8,71	8,74	255,64	256,58	1,15	0,93	0,0147	0,0151
PI1_SOI= -17,8	1	1	-17,8	-24,6	3,8778	3,8691	49,92	49,53	8,41	8,54	256,59	257,50	1,40	1,12	0,0142	0,0156
PI2_FQ=1,5	1	1,5	-14,8	-24,6	3,8611	3,8533	50,71	50,76	7,90	7,94	258,08	259,09	1,29	1,38	0,0177	0,0157
PI2_FQ=2	1	2	-14,8	-24,6	3,8351	3,8281	52,65	52,56	7,26	7,30	260,70	261,60	2,05	1,63	0,0144	0,0161
PI2_SOI= -21,6	1	1	-14,8	-21,6	3,8887	3,8791	49,44	49,34	8,62	8,68	255,88	256,63	1,19	0,97	0,0151	0,0151
PI2_SOI= -27,6	1	1	-14,8	-27,6	3,8800	3,8711	49,34	49,47	8,62	8,60	256,57	257,32	1,28	1,10	0,0165	0,0157

Şekil 4.56 Aynı sınır koşullarının kullanımının sonuçlara etkisi

Şekil 4.56’da Farklı Sınır Şartları (Farklı SŞ) satırlarındaki değerler o parametrenin her bir çoklu ön püskürtme parametresi değişiminde (qPI1, qPI2, PhiPI2 ve PhiPI2) farklı sınır koşullarının kullanıldığı (T_BOOST, P_BOOST, P_TURBOP, P_TURBOT, T_MAN ve T_FUEL) durumda elde edilen sonuçları göstermektedir. Aynı Sınır Şartları (Aynı SŞ) satırlarındaki değerler ise tüm çoklu ön püskürtme parametresi değişimlerinde aynı baz durum sınır koşullarının kullanıldığı durumda elde edilen sonuçları göstermektedir. 1.ön püskürtmenin miktarının değişiminde bu iki durumda elde edilen sonuçlar Tablo 4.5’te görülmektedir.

Tablo 4.5 1.ön püskürtme miktarı değişimi için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması

qPI1	mg		1	1,5	2
OİEB	bar	Farklı SŞ	3,8785	3,8737	3,8646
		Aynı SŞ	3,874844	3,8666	3,8612
MSİB	bar	Farklı SŞ	49,19	50,57	51,74
		Aynı SŞ	49,41	50,53	51,67
MFB50	°KMA	Farklı SŞ	8,63	8,01	7,45
		Aynı SŞ	8,63	8,04	7,50
ÖYT	g/kWsa	Farklı SŞ	256,35	257,06	258,04
		Aynı SŞ	257,00	257,91	258,61
NO _x	g/kWsa	Farklı SŞ	0,92	1,52	1,81
		Aynı SŞ	1,03	1,30	1,45
İs	g/kWsa	Farklı SŞ	0,0199	0,0157	0,0149
		Aynı SŞ	0,0154	0,0157	0,0147

2.ön püskürtmenin miktarının değişiminde bu iki durumda elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.6 2.ön püskürtme miktarı değişimi için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması

<i>qPI2</i>	<i>mg</i>		<i>1</i>	<i>1,5</i>	<i>2</i>
OİEB	bar	Farklı SŞ	3,8785	3,8611	3,8351
		Aynı SŞ	3,874844	3,8533	3,8281
MSİB	bar	Farklı SŞ	49,19	50,71	52,65
		Aynı SŞ	49,41	50,76	52,56
MFB50	°KMA	Farklı SŞ	8,63	7,90	7,26
		Aynı SŞ	8,63	7,94	7,30
ÖYT	g/kWsa	Farklı SŞ	256,35	258,08	260,70
		Aynı SŞ	257,00	259,09	261,60
NO _x	g/kWsa	Farklı SŞ	0,92	1,29	2,05
		Aynı SŞ	1,03	1,38	1,63
İs	g/kWsa	Farklı SŞ	0,0199	0,0177	0,0144
		Aynı SŞ	0,0154	0,0157	0,0161

1.ön püskürtmenin açısının değişiminde bu iki durumda elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de görülmektedir.

Tablo 4.7 1.ön püskürtme açısı için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması

<i>PhiPI1</i>	<i>°KMA</i>		<i>-11,8</i>	<i>-14,8</i>	<i>-17,8</i>
OİEB	bar	Farklı SŞ	3,8880	3,8785	3,8778
		Aynı SŞ	3,8794	3,8748	3,8691
MSİB	bar	Farklı SŞ	49,31	49,19	49,92
		Aynı SŞ	49,27	49,41	49,53
MFB50	°KMA	Farklı SŞ	8,71	8,63	8,41
		Aynı SŞ	8,74	8,63	8,54
ÖYT	g/kWsa	Farklı SŞ	255,64	256,35	256,59
		Aynı SŞ	256,58	257,00	257,50
NO _x	g/kWsa	Farklı SŞ	1,15	0,92	1,40
		Aynı SŞ	0,93	1,03	1,12
İs	g/kWsa	Farklı SŞ	0,0147	0,0199	0,0142
		Aynı SŞ	0,0151	0,0154	0,0156

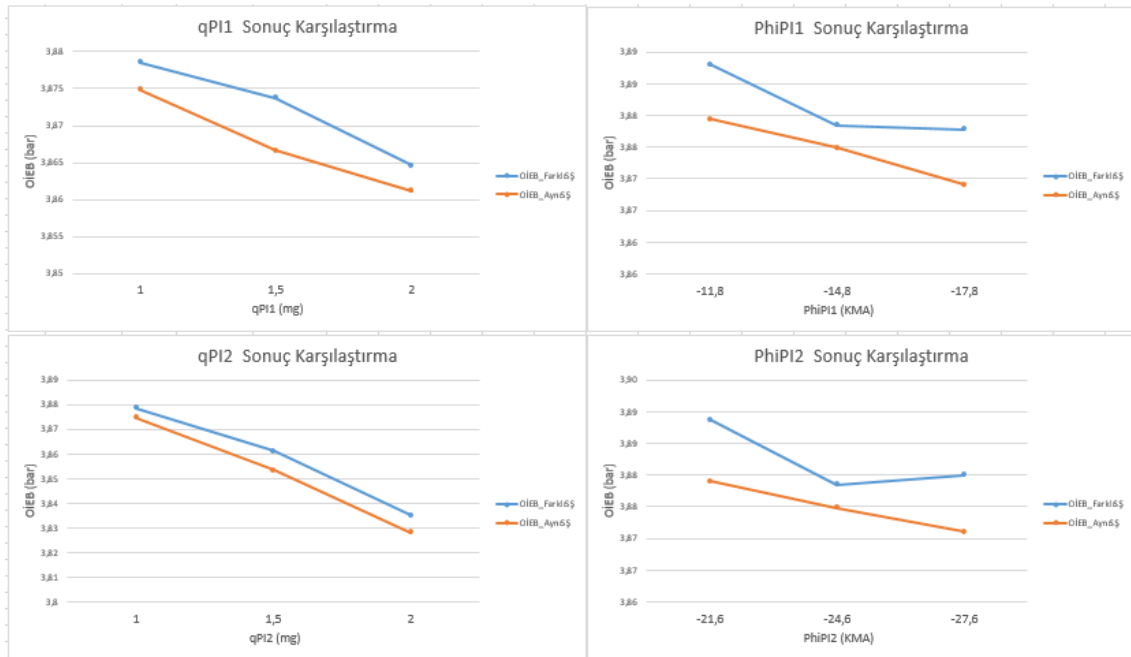
2.ön püskürtmenin açısının değişiminde bu iki durumda elde edilen sonuçlar Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8 2.ön püskürtme açısı için sınır koşulları durumunun karşılaştırılması

<i>PhiPI2</i>	<i>°KMA</i>		-21,6	-24,6	-27,6
OİEB	bar	Farklı SŞ	3,8887	3,8785	3,8800
		Aynı SŞ	3,8791	3,8748443	3,8711
MSİB	bar	Farklı SŞ	49,44	49,19	49,34
		Aynı SŞ	49,34	49,41	49,47
MFB50	°KMA	Farklı SŞ	8,62	8,63	8,62
		Aynı SŞ	8,68	8,63	8,60
ÖYT	g/kWsa	Farklı SŞ	255,88	256,35	256,57
		Aynı SŞ	256,63	257,00	257,32
NO _x	g/kWsa	Farklı SŞ	1,19	0,92	1,28
		Aynı SŞ	0,97	1,03	1,10
İs	g/kWsa	Farklı SŞ	0,0151	0,0199	0,0165
		Aynı SŞ	0,0151	0,0154	0,0157

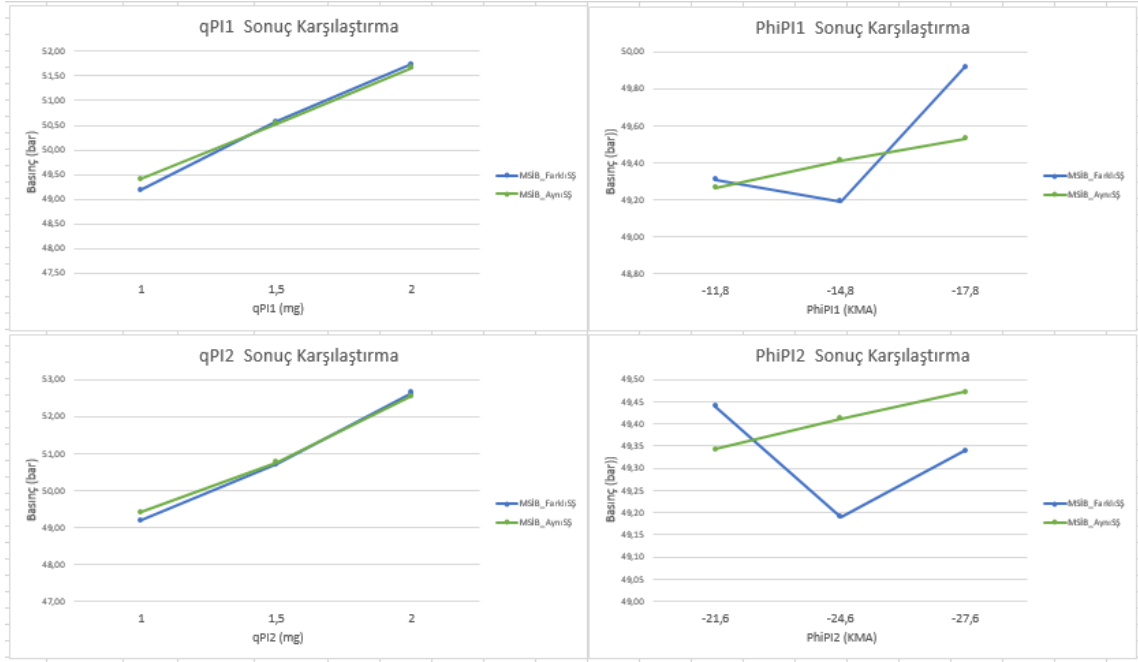
Tablolardaki sonuçlar incelendiğinde;

OİEB sonuçlarında Şekil 4.57’de görüldüğü üzere miktar değişimlerinde hem değer hem de eğilim olarak birbirlerine yakın sonuçlar elde edildiği, açı değişimlerinde ise sadece 3°KMA avans alındığı durumda değerlerde ve eğilimlerde farklılık oluşmaktadır.



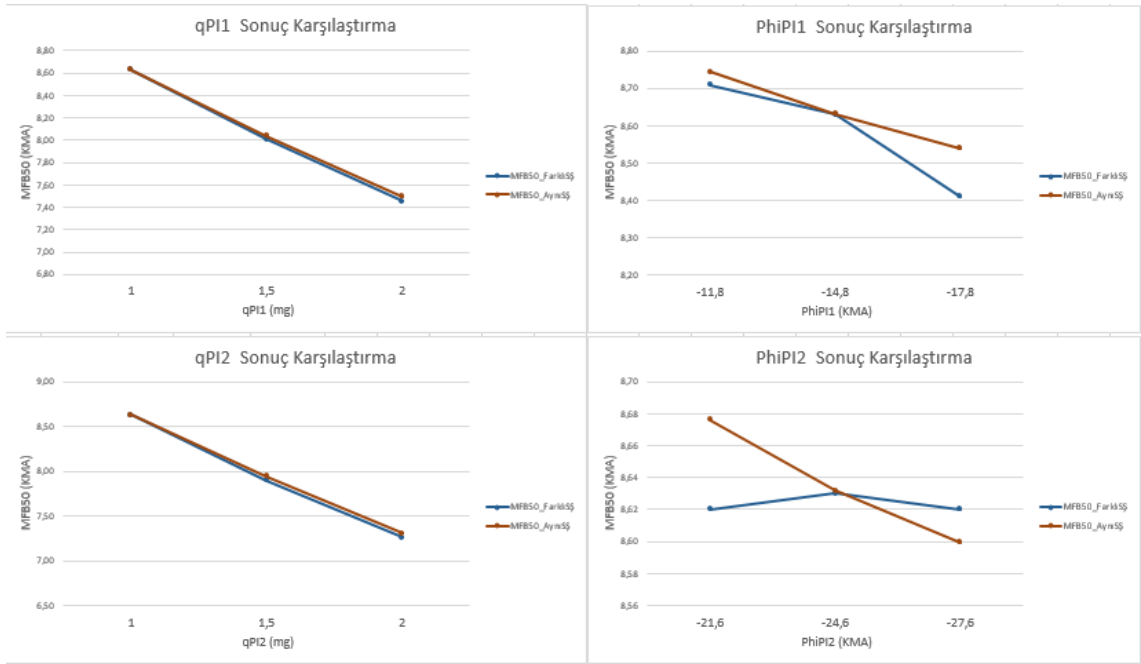
Şekil 4.57 OİEB sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

Şekil 4.58’de görülen maksimum silindir içi basınç değerlerinde ise her iki ön püskürtmenin miktarlarının değişimlerinde birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiş, açılarının değişimlerinde ise benzer bir ilişki elde edilememiştir. Bununla birlikte açı değişimlerinde avans artırıldıkça silindir içi basıncın artması durumu sınır koşullarının değiştirilmediği durumda gözlemlenmiş ve bu davranış simülasyonun doğruluğu açısından katkı sunmuştur.



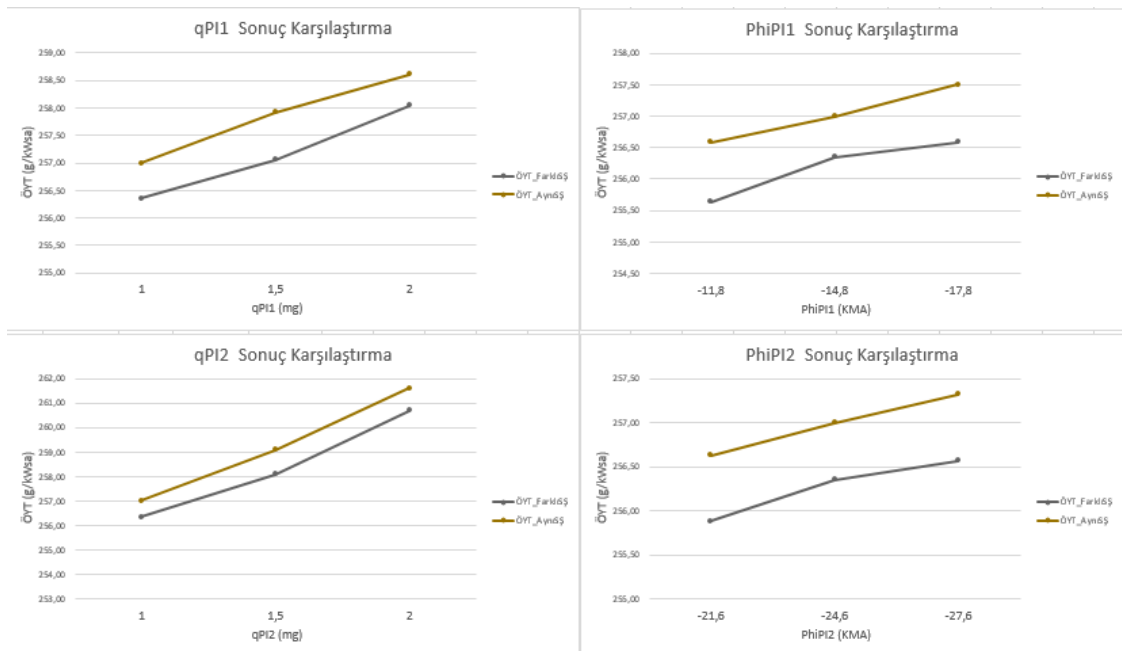
Şekil 4.58 MSİB sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

Püskürtülen yakıt miktarının %50’sinin yandığı açı olan ve Şekil 4.59’da görülen MFB50 değerleri ise yine maksimum silindir içi basınç değerlerinde olduğu şekilde miktar değişimlerinde çok yakın sonuçlar vermiş fakat açı değişimlerinde eğilimler benzer olsa da değer farklılıkları görülmüştür. Bununla birlikte avans artırıldıkça MFB50 açısının ÜÖN’ya yaklaşması da beklenen ve Şekil 4.58’de görülen silindir içi basınç değerlerinin oluşmasını destekleyecek yönde ortaya çıkmıştır.



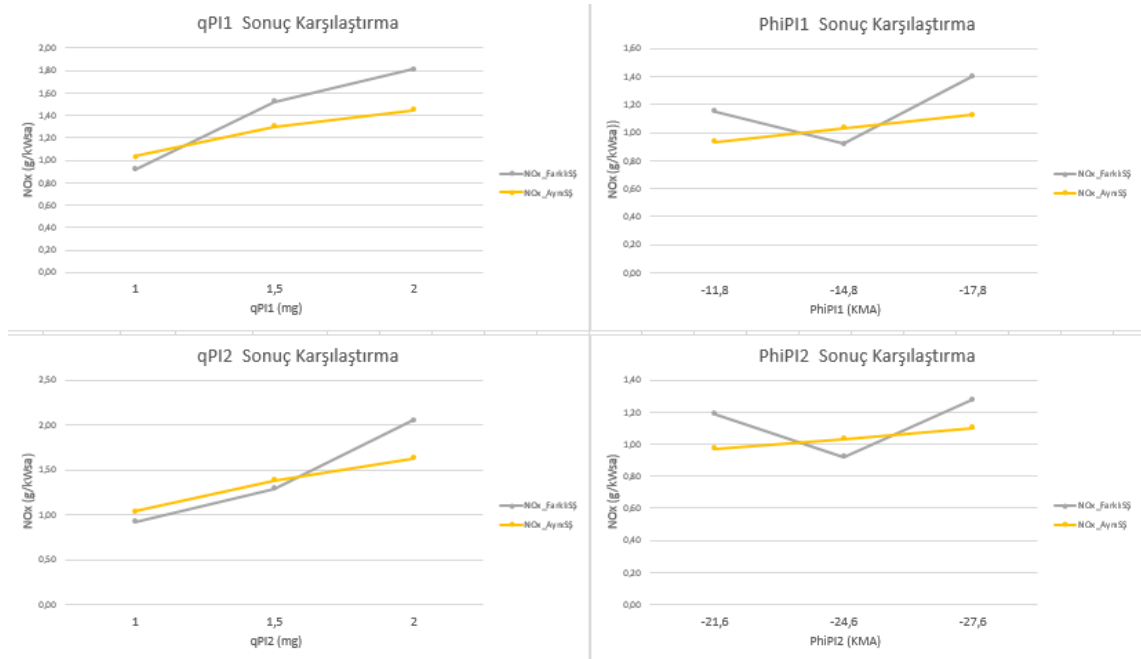
Şekil 4.59 MFB50 sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

Özgül yakıt tüketimi sonuçlarında ise Şekil 4.60'ta görüldüğü üzere her iki ön püskürtmenin hem miktarlarının hem de açılarının değişimlerinde değer ve eğilim olarak yüksek uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte her iki ön püskürtmenin açılarının değişimlerinde miktarlarının değişimlerine oranla değer olarak daha yüksek farklılıkta sonuçlar elde edilmiştir.



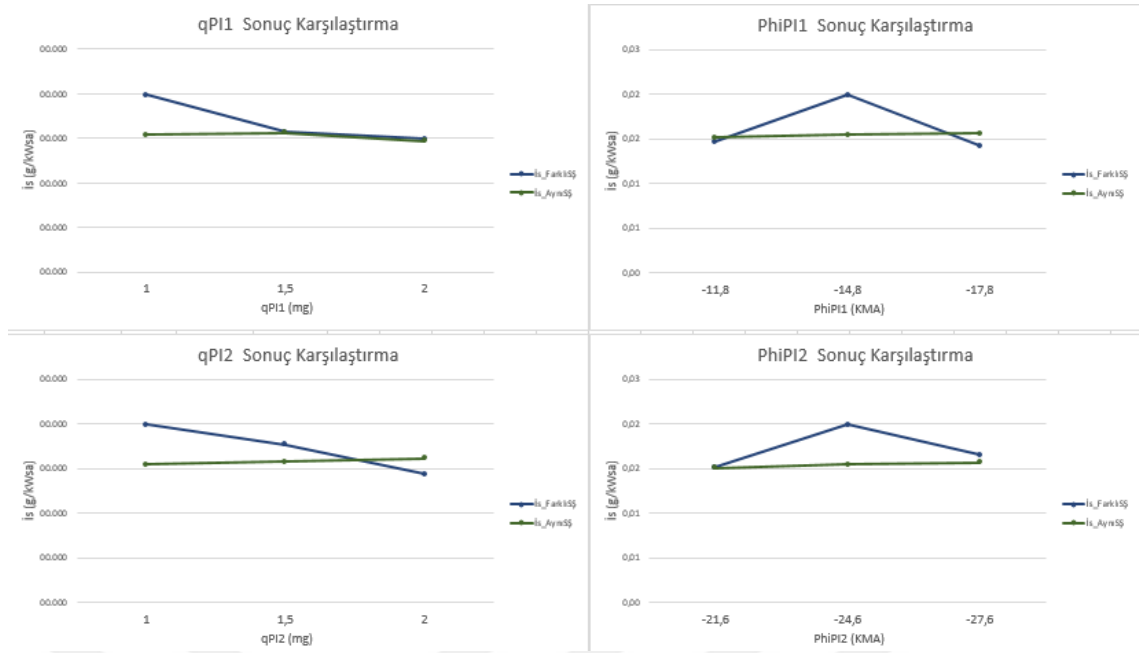
Şekil 4.60 ÖYT sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

- NO_x emisyonu sonuçları Şekil 4.61’de görülmekte olup, miktar değişiminde değer ve trenlerde uyum görülmektedir. Bununla birlikte açış değişiminde değerler yakın olsa da eğilimde bir uyumsuzluk görülmektedir. Fakat sınır koşullarının değişmediği durumda elde edilen sonuçlarda MFB50 açısının öne gelmesi ile silindir içi basınç değerinin artması ve benzer şekilde NO_x emisyonlarının artması beklenildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.61 NO_x sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

- İS emisyonu sonuçlarında Şekil 4.62’de görüldüğü üzere değerler benzer olsa da genel olarak eğilimde bir uyumsuzluk görülmektedir. Bununla birlikte is emisyonlarındaki değişim oldukça minör olup ≈ 30 mertebelerindeki hava yakıt oranı sebebiyle zaten oldukça düşük olan is emisyonlarında belirgin bir değişim beklenmemektedir.



Şekil 4.62 Is sonuçlarının farklı sınır koşulları durumlarında karşılaştırılması

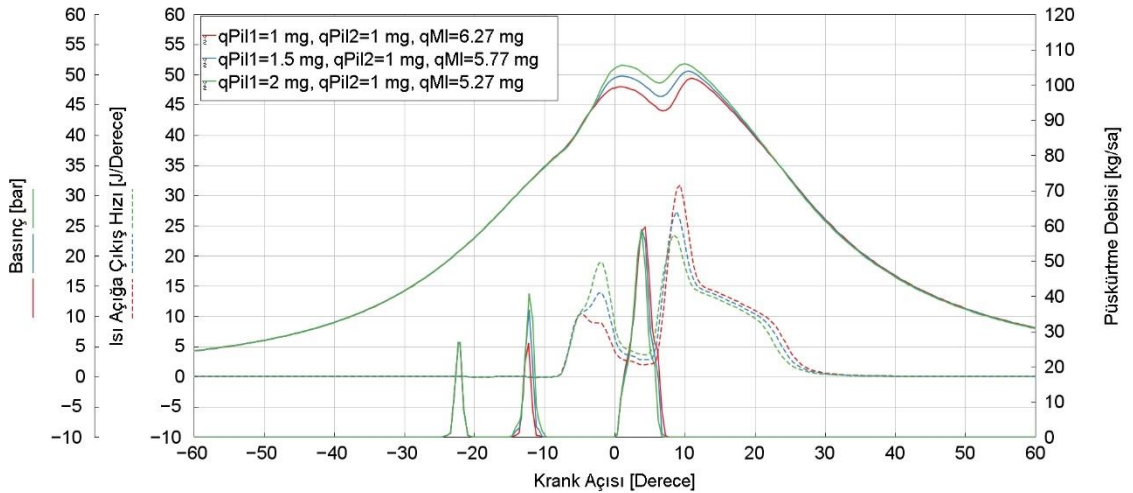
Sonuç olarak deney matrisi çalışmasına geçilmeden önce tüm çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişiminde aynı sınır koşullarının kullanımının uygun olduğu, simülasyonun bu durumda çoklu ön püskürtme parametrelerindeki değişimlere literatür ile uyumlu sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

4.4 Çoklu Ön Püskürtme Parametrelerinin Performans ve Emisyona Etkileri

Elde edilen sonuçlarda çoklu ön püskürtme parametrelerindeki (q_{PI1} , q_{PI2} , ϕ_{PI1} ve ϕ_{PI2}) değişimlerin, deneylerin yapıldığı ve 4 farklı motor çalışma parametresinin (EGR ve ray basıncı) tamamında benzer etkiler gösterdiği görüldüğünden, sadece %27 EGR valf açıklığı ve 610 Bar ray basıncı motor çalışma şartlarındaki çoklu ön püskürtme parametrelerinin performans ve emisyon sonuçları üzerine etkileri incelenmiştir. Sadece çoklu ön püskürtme parametrelerindeki değişimlerin performans ve emisyon üzerindeki etkilerinin ortaya koyulabilmesi amacıyla tüm değişimlerde aynı sınır şartları uygulanmış ve parametre değişimlerinin etkileri sınır şartları değişiminden arındırılmıştır.

4.4.1 1.Ön Püskürtme Miktarının Performans ve Emisyona Etkileri

1.ön püskürtme miktarı değişimi için yapılan etki analizinde Şekil 4.63'te görüldüğü üzere püskürtme miktarları 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirilmiştir. 2.ön püskürtme miktarı 1 mg iken toplam yakıt miktarının değişmemesi sebebiyle, 1.ön püskürtme miktarındaki bu artış ana püskürtmenin aynı miktarda azalması ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.63 1.ön püskürtme miktarının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı

Şekil 4.63'te görüldüğü üzere 1.ön püskürtme miktarının artırılması, silindir basıncını ve gaz sıcaklığını artırmış ve sırasıyla daha yüksek sürtünme kayıpları ve soğutma suyuna daha yüksek ısı transferi ile sonuçlanmıştır. Silindir gaz

sıcaklıklarının yükselmesi daha fazla NO_x emisyonu oluşumunu tetiklemiştir. Tablo 4.9'da görüldüğü üzere, 1.ön püskürtme miktarındaki 1 mg'lık artış, NO_x emisyonunda 40% oranında artışa neden olmuştur. NO_x emisyonu ile yakıtın 50% miktarının yandığı açı arasındaki ters ilişki burada da gözlenmekte olup, bu açı azalarak ÜÖN'ya yaklaştıkça NO_x emisyonu yükselmiştir.

Şekil 4.63'te ısı açığa çıkış hızı grafikleri incelendiğinde, 1.ön püskürtme miktarının artırılmasının yanma başlangıcında önemli bir değişikliğe neden olmazken ana püskürtmenin başladığı ana kadar daha fazla yakıtın yanmasına sebep olduğu görülmüştür. Yanma başlamadan önce her iki ön püskürtmede silindirin içindedir. Yanma başlangıcında herhangi bir değişiklik olmaması esasen beklenen bir durumdur. Bunun nedeni önce 2.ön püskürtmenin yanmaya başlamasıdır ve 2.ön püskürtmeye herhangi bir değişim uygulanmamıştır. Yine de 1.ön püskürtme miktarının artırılması ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini az da olsa kısaltmıştır.

1.ön püskürtme miktarının 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirildiği ve bir çevrimdeki toplam yakıt miktarının değişmediği durumda elde edilen ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir içi basınç (MSİB), yakıtın %50 miktarının yandığı krank açısı (MFB50) ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) performans değerleri ile NO_x ve is emisyon değerleri Tablo 4.9'da gösterilmektedir.

1.ön püskürtme miktarının artırılması, toplam OİEB üzerinde negatif etkiye sahip olan sıkıştırma stroku OİEB değerlerinin artmasına ve azalan ana püskürtme miktarı sebebiyle özellikle 20°KA'ndan sonra daha düşük genişleme stroku OİEB değerleri sebebiyle indike verimin ve toplam OİEB'nin düşmesine neden olmuştur.

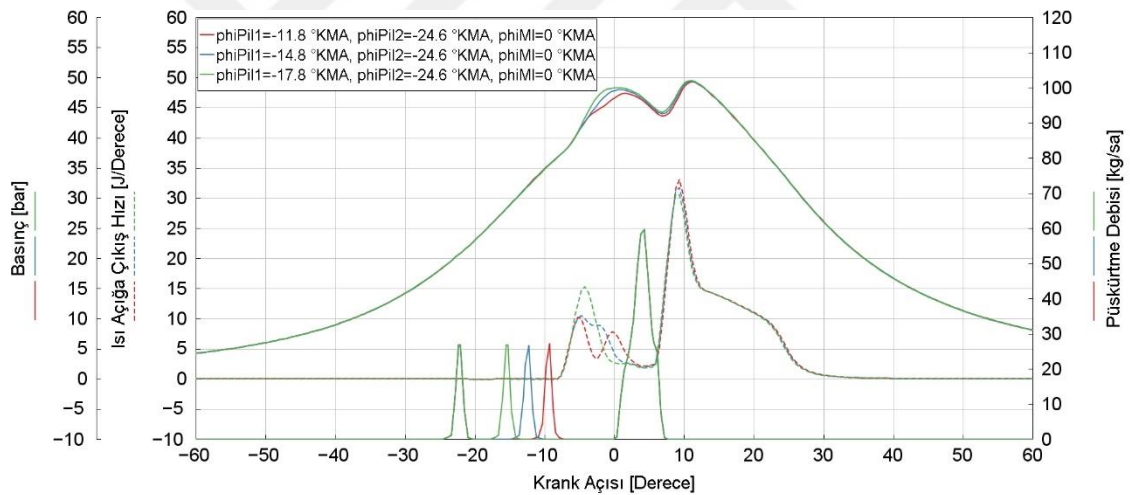
Tablo 4.9 1.ön püskürtme miktarı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları

1.Ön Püskürtme Miktarı (mg)	1	1,5	2
OİEB (bar)	3,8748	3,8666	3,8612
MSİB (bar)	49,41	50,53	51,67
MFB50 (°KA)	8,63	8,04	7,50
ÖYT (g/kWsa)	257,00	257,91	258,61
NO _x (g/kWsa)	1,03	1,30	1,45
İs (g/kWsa)	0,0154	0,0157	0,0147

Sonuç olarak; 1.ön püskürtme miktarının minimize edilmesi performans sonuçlarını iyileştirmiş olup burada minimum yapılabilecek püskürtme miktarı enjektörün özellikleri ile sınırlıdır. Emisyon açısından 1.ön püskürtme miktarının azaltılması MFB50 açısını ötelemekte ve böylece daha düşük silindir içi gaz sıcaklıklarının ve daha düşük NO_x emisyonlarının oluşmasını sağlamaktadır. Fakat bu durum is emisyonu için tam tersi şekilde sonuçlanmış ve 1.ön püskürtme miktarının azaltılması is emisyonlarını artırmıştır.

4.4.2 1.Ön Püskürtme Açısının Performans ve Emisyona Etkileri

1.ön püskürtme açısının değişimi için yapılan etki analizinde, Şekil 4.64'te görüldüğü üzere püskürtme, baz zamanlama olan -14,8°KMA'nda, 3°KMA geciktirilerek -11,8 °KMA'nda ve 3°KMA avans alınarak -17,8 °KMA'nda uygulanmıştır. Ana püskürtme ve 2.ön püskürtme zamanlamaları aynı tutulmuştur.



Şekil 4.64 1.ön püskürtme açısının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı

1.ön püskürtme avansının artırılarak 2.ön püskürtmeye yaklaştırılması ısının silindir içerisinde daha erken oluşturulmasına ve dolayısıyla silindir duvarları ile daha fazla ısı transferinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. İki ön püskürtme ve bir ana püskürtme stratejisindeki her püskürtme kendi tutuşma gecikmesine ve kendi yanma fazlarına sahiptir. Bir çevrimde oluşan her bir krank açısındaki toplam ısı açığa çıkışı her bir püskürtmenin katkısı süperpoze edilerek oluşmaktadır. Şekil 4.64'te görüldüğü üzere 1.ön püskürtme avansının artırılması

2.ön püskürtmenin yanmasından kaynaklı sıcaklık artışının düşmesi durumunu ortadan kaldırmış ve daha yüksek silindir gaz sıcaklıklarına ulaşılmıştır. 1.ön püskürtme açısındaki her 3°KMA avans değişiminin NO_x emisyonunda 8% ila 10% arasında bir artışa neden olduğu Tablo 4.10'da görülmektedir.

Şekil 4.64'te görüldüğü üzere 1.ön püskürtme avansının artırılması tüm püskürtmelerin aynı miktarda yapılmalarından ötürü maksimum silindir içi basıncında önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Bununla birlikte 1.ön püskürtme avansının artırılması, basınç eğrisinin sadece ilk tepesinde, silindir basıncının daha dik bir şekilde yükselmesine sebep olmuştur.

Şekil 4.64'te gösterilen püskürtmelerin uygun zaman aralıklarında yapılması ve birbirinden ayrı ısı açığa çıkış hızı tepelerinin oluşturulması Tablo 4.10'da görüldüğü üzere performans ve emisyon sonuçlarını iyileştirmiştir. Yüksek EGR oranı ve oldukça yüksek hava yakıt oranı sebebiyle 2.ön püskürtmenin püskürtmeden kısa bir süre içinde yanması mümkün olmamakta ve bu nedenle 1.ön püskürtmenin avansı artırıldığında yakıtlar birleşmekte ve tek bir ısı açığa çıkış hızı eğrisi oluşmaktadır.

1.ön püskürtme açısının -11,8, -14,8 ve -17,8 °KMA olarak değiştirildiği ve bir çevrimdeki toplam yakıt miktarının değişmediği durumda elde edilen ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir içi basınç (MSİB), yakıtın %50 miktarının yandığı krank açısı (MFB50) ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) performans değerleri ile NO_x ve is emisyon değerleri Tablo 4.10'da gösterilmektedir.

Tablo 4.10 1.ön püskürtme açısı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları

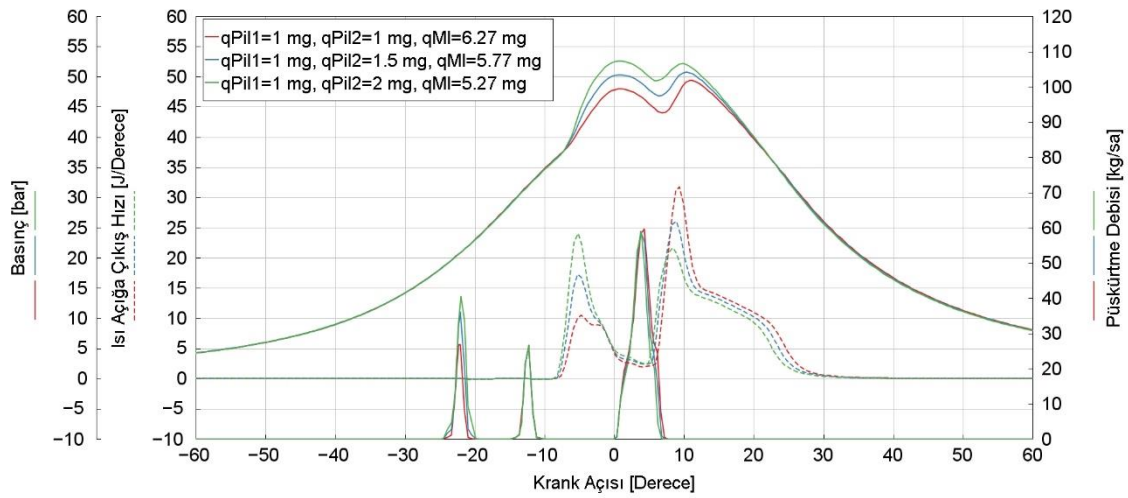
1.ön Püskürtme Açısı (°KA)	-11,8	-14,8	-17,8
OİEB (bar)	3,8794	3,8748	3,8691
MSİB (bar)	49,27	49,41	49,53
MFB50 (°KA)	8,74	8,63	8,54
ÖYT (g/kWsa)	256,58	257,00	257,50
NO _x (g/kWsa)	0,93	1,03	1,12
İs (g/kWsa)	0,0151	0,0154	0,0156

Sonuç olarak; 1.ön püskürtmenin geciktirilmesi ve 2.ön püskürtmeden uzaklaştırılması performans sonuçlarını iyileştirmiştir. 1.ön püskürtme avansının artırılması ise 2.ön püskürtmenin yanmasının ardından sıcaklığın yükselmeye

devam etmesini ve daha yüksek NO_x emisyonu ile sonuçlanan, ana püskürtme öncesinde tek bir ısı açığa çıkış hızı tepesinin oluşmasına neden olmaktadır.

4.4.3 2.Ön Püskürtme Miktarının Performans ve Emisyona Etkileri

2.ön püskürtme miktarı değişimi için yapılan etki analizinde Şekil 4.65'te görüldüğü üzere püskürtme miktarları 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirilmiştir. 1.ön püskürtme miktarı 1 mg iken toplam yakıt miktarının değişmemesi sebebiyle, 2.ön püskürtme miktarındaki bu artış ana püskürtmenin aynı miktarda azalması ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.65 2.ön püskürtme miktarının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı

Şekil 4.65'te görüldüğü üzere 2.ön püskürtme miktarının artırılması 1.ön püskürtme miktarının artırılmasına benzer şekilde silindir basıncını artırmış ve çok daha hızlı bir şekilde artan daha yüksek bir ısı açığa çıkış hızı oluşturmuştur. 2.ön püskürtme miktarının artırılması daha erken bir yanma başlangıcına neden olup, bu da göstermektedir ki yanmanın başlangıcı üzerinde 2.ön püskürtme miktarı, 1.ön püskürtme miktarından çok daha güçlü bir etkiye sahiptir. Silindir içindeki artan yakıt miktarı, daha zengin yakıt bölgelerinin oluşmasını sağlamış ve tutuşma koşullarına daha erken ulaşılmasını tetiklemiştir. 1.ön püskürtme miktarının artırılması durumuna benzer şekilde 2.ön püskürtme miktarının artırılması da ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini azaltmıştır. Roberto Finesso ve Ezio Spessa [41] da çalışmalarında aynı davranışı gözlemlemiş ve ön püskürtme miktarını azaltarak hem ön püskürtmenin hem de ana püskürtmenin kimyasal gecikmesini

uzatmıştır. Yazarlar çalışmalarında ön püskürtme miktarlarının değişiminin tutuşma gecikmesi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilmesi için, oksijen konsantrasyonunun 12%'nin altında olması gerektiğini sunmuşlardır. Tez çalışmasında özellikle optimizasyonu yapılan motor işletme noktası için oksijen konsantrasyonu 10% mertebelerindedir ve sonuç olarak ön püskürtme miktarlarının artırılması ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini önemli ölçüde kısaltmıştır.

2.ön püskürtme miktarının 1, 1,5 ve 2 mg olarak değiştirildiği ve bir çevrimdeki toplam yakıt miktarının değişmediği durumda elde edilen ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir içi basınç (MSİB), yakıtın %50 miktarının yandığı krank açısı (MFB50) ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) performans değerleri ile NO_x ve is emisyon değerleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

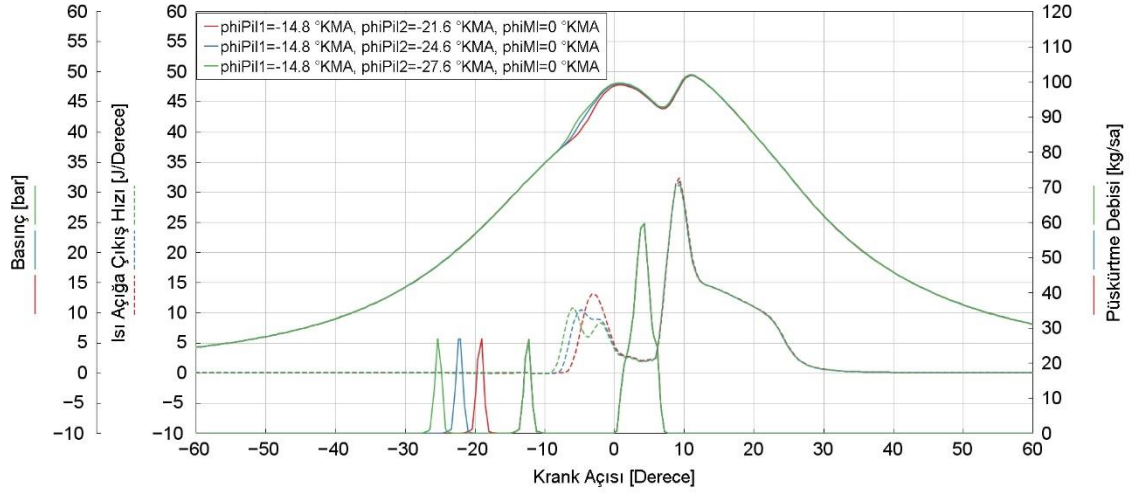
Tablo 4.11 2.ön püskürtme miktarı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları

2.ön Püskürtme Miktarı (mg)	1	1,5	2
OİEB (bar)	3,8748	3,8533	3,8281
MSİB (bar)	49,41	50,76	52,56
MFB50 (°KA)	8,63	7,94	7,30
ÖYT (g/kWsa)	257,00	259,09	261,60
NO _x (g/kWsa)	1,03	1,38	1,63
İs (g/kWsa)	0,0154	0,0157	0,0161

Sonuç olarak; 2.ön püskürtme miktarının değişimi performans ve emisyon sonuçları üzerinde Tablo 4.11'de görüldüğü şekilde güçlü etkilere sahiptir. Silindir basıncı ve gaz sıcaklığının daha erken yükselmesi soğutma suyuna olan ısı transferini artırmış ve toplam OİEB üzerinde negatif etkiye sahip olan daha fazla sıkıştırma işi yapılmasına neden olmuştur. Tablo 4.11 görüldüğü üzere, 2.ön püskürtme miktarının artırılması, 1.ön püskürtme miktarının artırılmasından daha kötü performans sonuçlarına neden olmuştur. 2.ön püskürtme miktarının azaltılarak yakıtın 50%'sinin yandığı açının ÜÖN'dan uzaklaşması, NO_x emisyonunun azalması fakat is emisyonunun yükselmesi ile sonuçlanmıştır.

4.4.4 2.Ön Püskürtme Açısının Performans ve Emisyona Etkileri

2.ön püskürtme açısının değişimi için yapılan etki analizinde, Şekil 4.66'da görüldüğü üzere püskürtme, baz zamanlama olan $-24,6^{\circ}\text{KMA}$ 'nda, 3°KMA geciktirilerek $-21,6^{\circ}\text{KMA}$ 'nda ve 3°KMA avans alınarak $-27,6^{\circ}\text{KMA}$ 'nda uygulanmıştır. Ana püskürtme ve 1.ön püskürtme zamanlamaları aynı tutulmuştur.



Şekil 4.66 2.ön püskürtme açısının değişimine bağlı silindir basıncı ve ısı açığa çıkış hızı

2.ön püskürtme avansının artırılması maksimum silindir içi basınç üzerinde önemli bir etki yaratmazken silindir içi basınç eğrisinin genel karakteristiği üzerinde de Şekil 4.66'da görüldüğü üzere önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. 2.ön püskürtme avansının 3°KMA artırılması, 2.ön püskürtmenin 1°KMA erken, 1.ön püskürtmenin ise $0,5^{\circ}\text{KMA}$ erken yanması ile sonuçlanmış olup, yanan yakıt miktarında çok az değişime neden olmuştur. Performans sonuçları üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Ana püskürtmeden önce silindirdeki toplam yakıt miktarının aynı olması sebebiyle, silindir içindeki basınç ve sıcaklık koşulları neredeyse aynı kalmış ve nedenle ana püskürtmenin yanma başlangıcı üzerinde bir etki oluşmamıştır.

2.ön püskürtmenin açısının $-21,6$, $-24,6$ ve $-27,6^{\circ}\text{KMA}$ olarak değiştirildiği ve bir çevrimdeki toplam yakıt miktarının değişmediği durumda elde edilen ortalama indike efektif basınç (OİEB), maksimum silindir içi basınç (MSİB), yakıtın %50 miktarının yandığı krank açısı (MFB50) ve özgül yakıt tüketimi (ÖYT) emisyonu

performans değerleri ile NO_x ve is emisyon değerleri Tablo 4.12’de gösterilmektedir.

Tablo 4.12 2.ön püskürtme açısı değişimi sonrası performans ve emisyon sonuçları

2.ön Püskürtme Açısı (°KA)	-21,6	-24,6	-27,6
OİEB (bar)	3,8791	3,8748	3,8711
MSİB (bar)	49,34	49,41	49,47
MFB50 (°KA)	8,68	8,63	8,60
ÖYT (g/kWsa)	256,63	257,00	257,32
NO _x (g/kWsa)	0,97	1,03	1,10
İs (g/kWsa)	0,0151	0,0154	0,0157

2.ön püskürtme avansının artırılması daha erken bir yanma başlangıcı oluştursa da Tablo 4.12’de görüldüğü üzere performans açısından etkileri çok azdır. 2.ön püskürtme avansının artırılması 2.ön püskürtme ısı açığa çıkış hızının daha erken oluşmasına, iki ön püskürtmeden kaynaklanan ısı açığa çıkma süresinin artmasına ve daha yüksek NO_x emisyonu oluşmasına neden olmuştur. Ana enjeksiyonun yanmasının ardından oluşan maksimum gaz sıcaklıkları aynı sıcaklık mertebelerine ulaşmıştır.

5.1 Deney Matrisi Oluşturulması

Yapılan deney matrisi çalışmasında çoklu ön püskürtme parametreleri Tablo 5.1’de gösterilen aralıklarda ve adımlarda değiştirilerek hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1 Deney matrisi çalışmasında kullanılan parametreler ve değişimleri

	<i>Delta Değeri</i>	<i>Adım Sayısı</i>	<i>Adım Aralığı</i>	<i>Değer #1</i>	<i>Değer #2</i>	<i>Değer #3</i>
qPI1 [mg]	0...1	3	0,5	1	1,5	2
qPI2 [mg]	0...1	3	0,5	1	1,5	2
PhiPI1 [KMA]	-3...3	3	3	-17,8	-14,8	-11,8
PhiPI2 [KMA]	-3...3	3	3	-27,6	-24,6	-21,6

Bu çalışmada toplamda 81 durum için simülasyon çalıştırılmış olup bu durumlardan 2.ön püskürtmenin 3°KMA gecikme yapıldığı ve 1.ön püskürtmenin de 3°KMA avans yapıldığı durumda, 2.ön püskürtme bitmeden 1.ön püskürtme başladığı ve püskürtmeler çakıştığı için simülasyon bu durumlarda çalışmamıştır. Bu durum sadece bu gecikme ve avans değerlerinde yaşanmış olup bu nedenle 9 durum başarısız olmuştur. Bu durumlarda 2.ön püskürtme açısı -21,6°KMA’nda başlayıp en küçük püskürtme miktarı olan 1 mg atıldığı durumda -17,4°KMA’nda bitmekte ve 1.ön püskürtme -17,8°KMA’nda başladığından püskürtmeler çakışmaktadır.

Başarılı bir şekilde koşulan 72 durum için yapılan faktör duyarlılığı analizinde Şekil 5.1’de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Bağıl duyarlılık analizi, her bir performans ve emisyon parametresi üzerinde hangi faktörlerin en fazla etkiye sahip olduğuna dair kabaca bir tahmin sağlamayı amaçlamaktadır. Başka bir deyişle, belirli bir yanıt için en önemli faktörleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Hesaplama lineer en küçük kareler metoduna dayandığından, faktörler ve yanıt arasındaki ilişki doğrusal olduğunda değerler en

doğru olmaktadır. Dolayısıyla, belirli bir yanıt için tamamen doğrusal bir regresyon oluşmuş olsaydı, elde edilen R^2 değeri 1 olur ve elde edilen duyarlılık değerleri mükemmel şekilde doğru olurdu. R^2 değeri 1'in altına düştükçe, elde edilen duyarlılık değerleri de o denli doğruluktan uzaklaşmaktadır.

Elde edilen duyarlılık değerleri, standartlaştırılmış regresyon katsayılarına dayanmaktadır. Her değişken (her faktör ve yanıt), ortalamanın çıkarılması ve örnek kümesinin standart sapmasına bölünmesi ile standartlaştırılır. Tüm faktörler ve yanıtlar standartlaştırıldıktan sonra, her yanıtta doğrusal bir regresyon gerçekleştirilir. Bağlı duyarlılık değerleri, her bir regresyon katsayısının mutlak değerinin, tüm regresyon katsayılarının mutlak değerinin toplamına bölünmesiyle hesaplanır.

Lineer regresyon denklemi dört faktörün bulunduğu bağlı duyarlılık analizi çalışması için şu şekildedir.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \quad (5.1)$$

Denklemde x_i standartlaştırılmış faktörleri, a_i standartlaştırılmış regresyon katsayılarını ve y ise standartlaştırılmış yanıtları ifade etmektedir. Duyarlılık değerleri de şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$S_i = \frac{|a_i|}{\sum |a_i|} \quad (5.2)$$

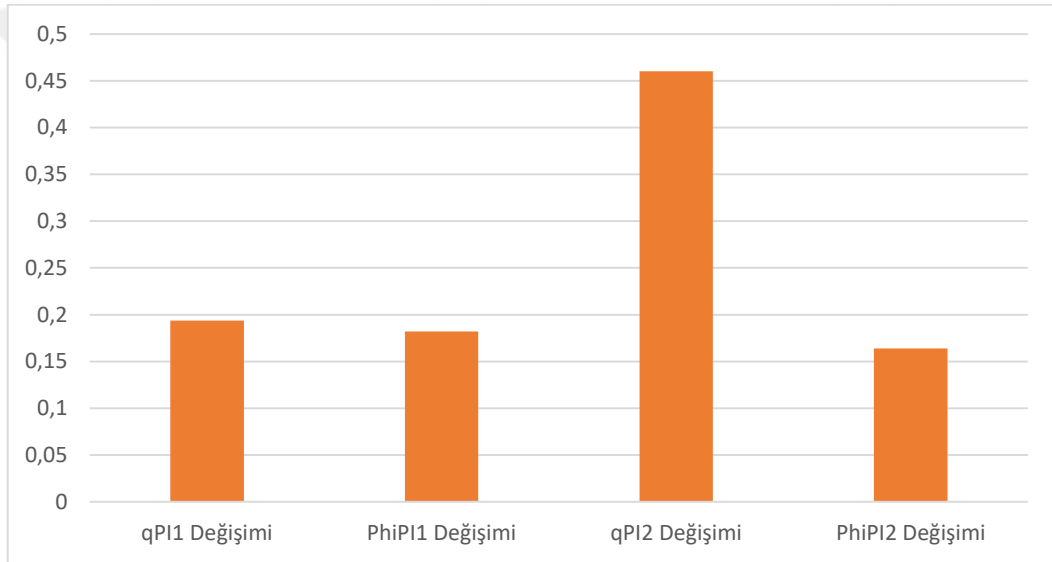
Relative Sensitivities and Correlation Coefficients Analysis								Total: 72
#	Design Set	Case	Response	DELTA_PI1_FQ	DELTA_PI1_SOI	DELTA_PI2_FQ	DELTA_PI2_SOI	Linear R-Squared
Type				Factors				
1	Default	1 - Case - 1	imep	0.1938	0.1821	0.4601	0.1640	0.9667
2	Default	1 - Case - 1	cylpmx	0.3666	0.1148	0.4686	0.04991	0.9787
3	Default	1 - Case - 1	comb50	0.4192	0.07311	0.4812	0.02649	0.9844
4	Default	1 - Case - 1	bsfc	0.2188	0.1728	0.4604	0.1480	0.9665
5	Default	1 - Case - 1	bsnoxnew	0.2839	0.2231	0.3723	0.1208	0.9405
6	Default	1 - Case - 1	bssoot	0.3130	0.06039	0.1879	0.4387	0.06364
7	Default	1 - Case - 1	bkvw	0.2186	0.1725	0.4612	0.1477	0.9694

Şekil 5.1 Faktör duyarlılık analizi sonuçları

Elde edilen duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde lineer R^2 değerlerinin is sonucu hariç diğer tüm yanıtlar için 1'e oldukça yakın olduğu ve bu nedenle diğer tüm yanıtlar için bağlı duyarlılık değerlerinin güvenilir ve oldukça doğru olduğu değerlendirilmektedir. İs emisyonu konusunda faktörler ile yanıt arasında lineer bir ilişki kurulamamıştır. Bu durum is emisyonu üzerinde, bu motor çalışma

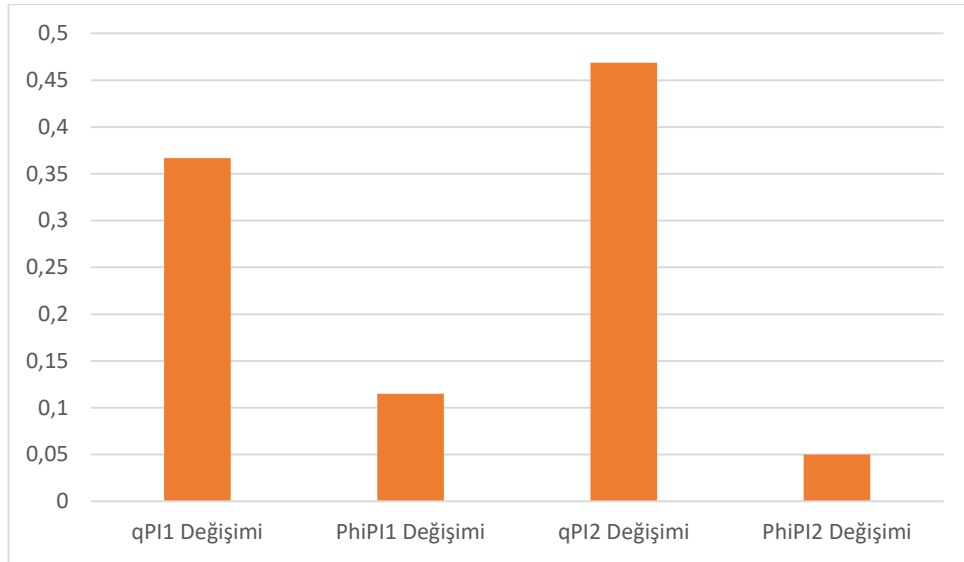
koşulları için çoklu ön püskürtme parametrelerinin etkisi konusunda güvenilir ve doğru bir ilişki elde edilemediğini göstermiştir.

Duyarlılık analizi sonuçlarında faktörlerin cevaplar üzerindeki etki değerleri toplamı 1'e eşit olup bir faktörün diğer faktörlere göre bir cevap üzerindeki etki gücü değerlerin oranlanması ile elde edilebilir. Şekil 5.2 incelendiğinde, OİEB üzerinde en etkili çoklu ön püskürtme parametresinin 2.ön püskürtme miktarı olduğu görülmektedir. 2.ön püskürtme miktarı değişimi 1.ön püskürtme miktarı değişimine göre 2,38 kat, 1.ön püskürtme açısının değişimine göre 2,52 kat ve 2.ön püskürtme açısının değişimine göre ise 2,82 kat daha etkilidir. Diğer tüm çoklu ön püskürtme parametreleri OİEB üzerinde birbirine yakın etkiye sahiptir.



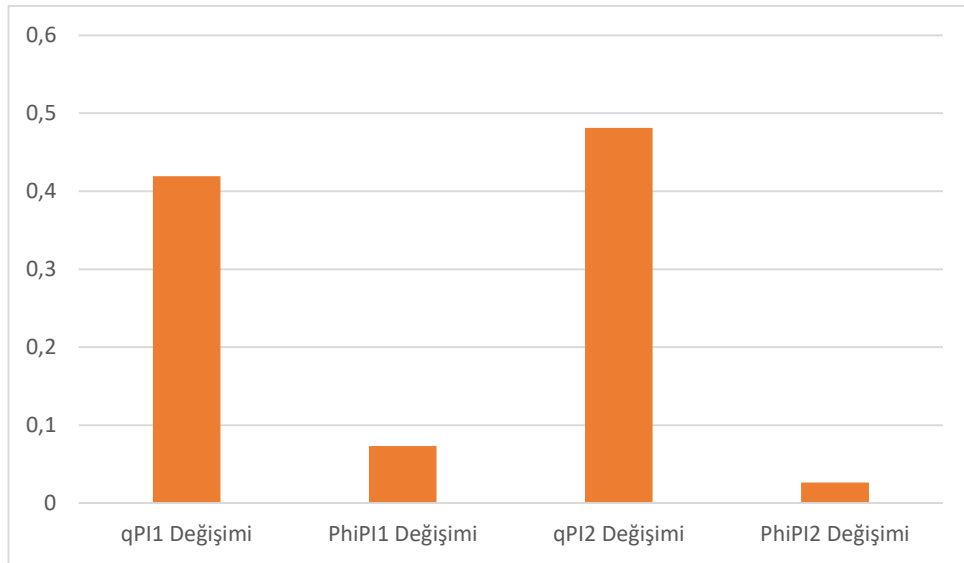
Şekil 5.2 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin OİEB üzerindeki etkisi

Çoklu ön püskürtme parametrelerin maksimum silindir içi basınç üzerindeki etkileri incelendiğinde Şekil 5.3'de görüldüğü üzere her iki ön püskürtme miktarının baskın bir şekilde etkili olduğu ve bunlardan da 2.ön püskürtme miktarının 1.ön püskürtme miktarından 1,27 kat daha etkili olduğu görülmektedir. Ön püskürtme açıları açısından değerlendirildiğinde ise 1.ön püskürtmenin değişimi 2.ön püskürtmenin değişimine göre yaklaşık 2,2 kat daha etkilidir.



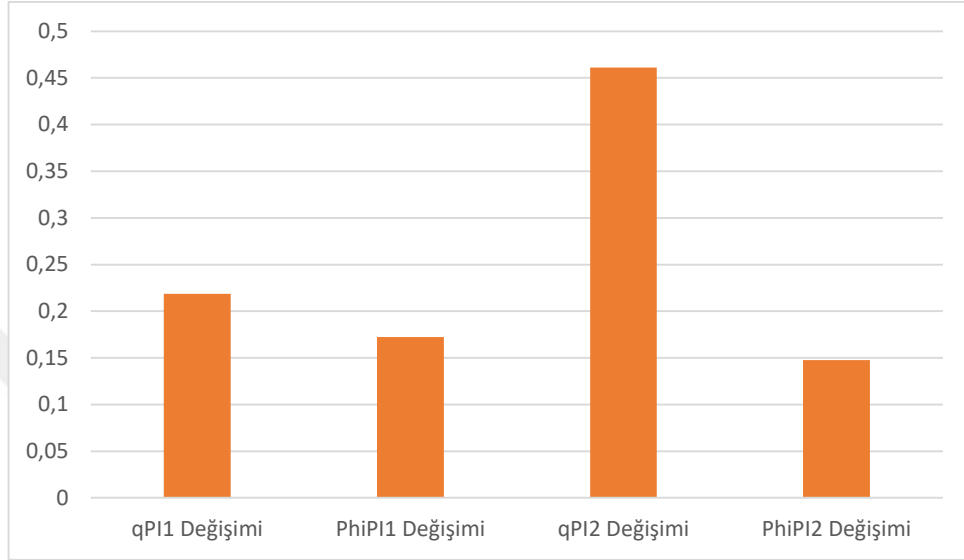
Şekil 5.3 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MSİB üzerindeki etkisi

Çoklu ön püskürtme parametrelerin yakıtın %50'sinin yandığı açı olan MFB50 üzerindeki etkileri incelendiğinde Şekil 5.4'te görüldüğü üzere her iki ön püskürtme miktarının baskın bir şekilde etkili olduğu ve bunlardan da 2.ön püskürtme miktarının değişimi 1.ön püskürtme miktarının değişimine göre 1,14 kat, 1.ön püskürtme açısının değişimine göre 6,58 kat, 2.ön püskürtme açısının değişimine göre ise 18,5 kat daha etkili olduğu görülmektedir. Ön püskürtme açıları açısından değerlendirildiğinde ise 1.ön püskürtmenin değişimi 2.ön püskürtmenin değişimine göre yaklaşık 2,8 kat daha etkilidir.



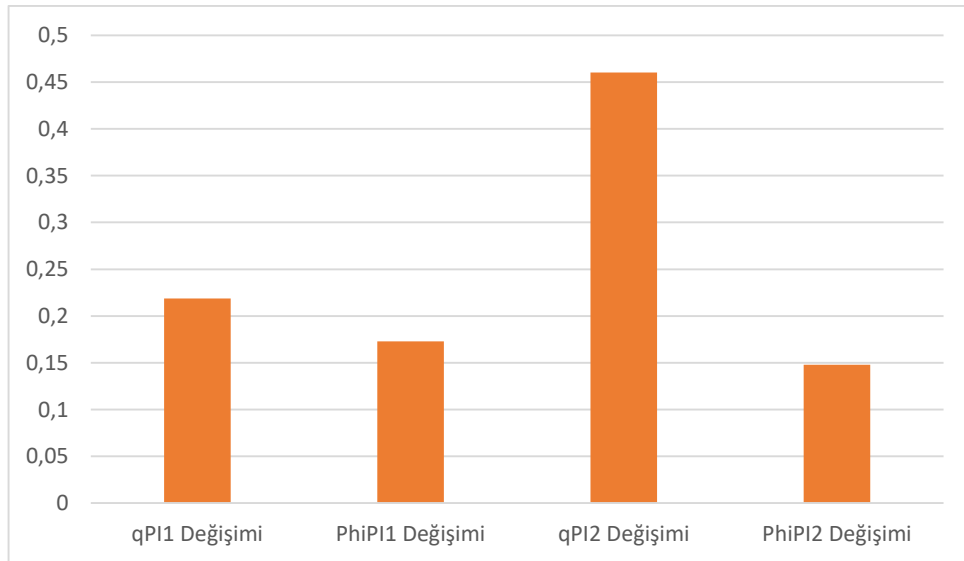
Şekil 5.4 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MFB50 üzerindeki etkisi

Şekil 5.5'te çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki etkileri incelendiğinde, 2.ön püskürtme miktarının değişimi en etkili parametre olup; 1.ön püskürtme miktarının değişimine göre 2,1 kat, 1.ön püskürtme açısının değişimine göre 2,68 kat, 2.ön püskürtme açısının değişimine göre ise 3,13 kat daha etkili olmuştur.



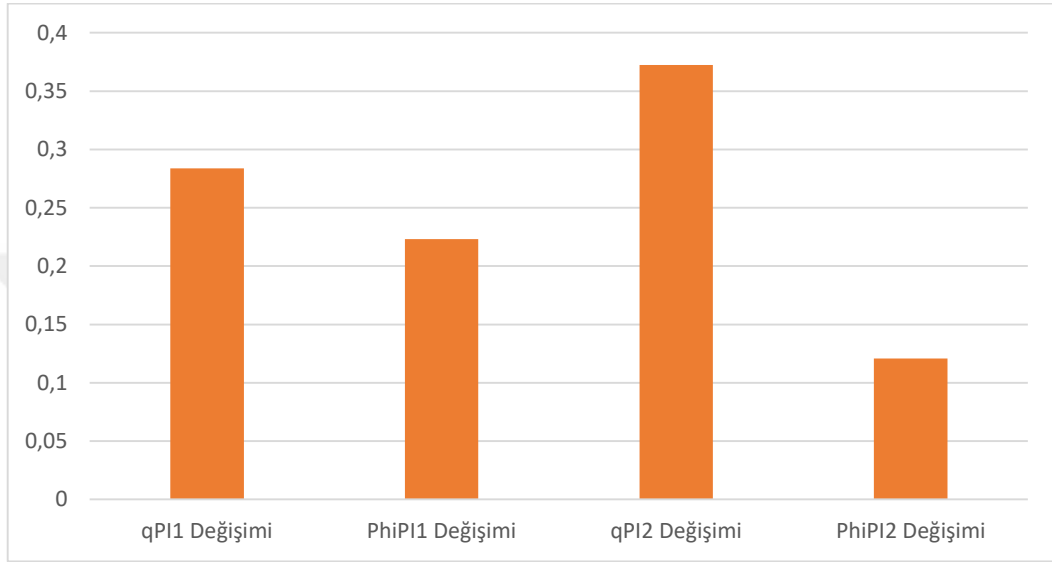
Şekil 5.5 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki etkisi

Şekil 5.6'da çoklu ön püskürtme parametrelerinin özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri incelendiğinde, her durumda aynı miktarda yakıt gönderilmesi sebebiyle, fren gücü üzerindeki etkiler ile aynı oranda etkiler elde edilmiştir.



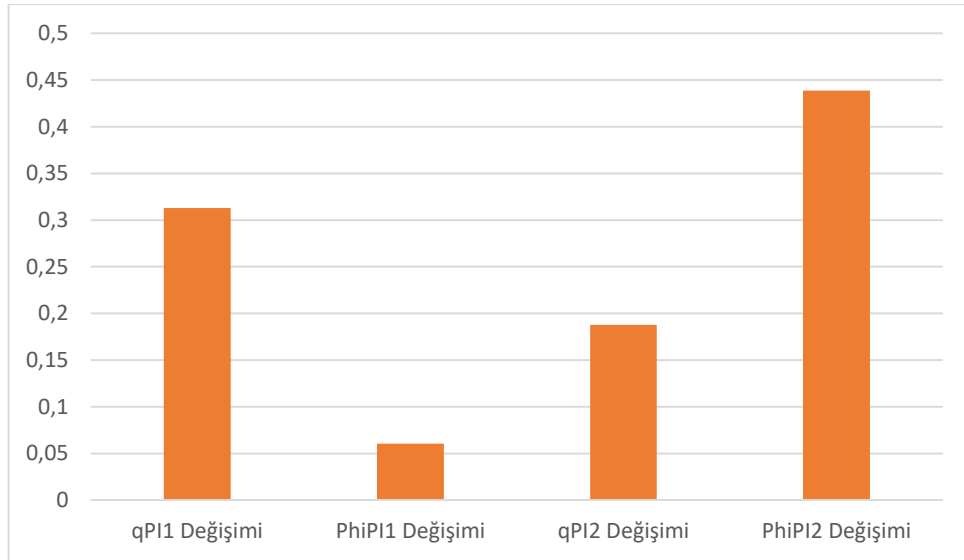
Şekil 5.6 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin ÖYT üzerindeki etkisi

Şekil 5.7’de çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO_x emisyonu üzerindeki etkileri görülmekte olup, en etkili parametre 2.ön püskürtme miktarının değişimi olmuştur. 2.ön püskürtme miktarının değişimi, 1.ön püskürtme miktarının değişimine göre 1,31 kat, 1.ön püskürtme açısının değişimine göre 1,66 kat ve 2.ön püskürtme açısının değişimine göre ise 3,1 kat daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO_x emisyonu üzerindeki etkileri

Çoklu ön püskürtme parametrelerinin is emisyonu üzerindeki etkileri incelendiğinde Şekil 5.8’de görülen ve çoktan aza doğru sırasıyla 2.ön püskürtme açısı değişimi, 1.ön püskürtme miktarı değişimi, 2.ön püskürtme miktarı değişimi ve 1.ön püskürtme açısı değişiminden etkilendiği anlaşılmaya karşın elde edilen 0,06364 R² değeri sebebiyle bu etki analizi sonuçlarının güvenilir olmadığı değerlendirilmiştir.



Şekil 5.8 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin is emisyonu üzerindeki etkileri

Bağıl duyarlılık analizinin ardından iki değişken arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak ortaya koyulmasını sağlayan Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu ilişki değerleri -1 ile +1 arasında olmaktadır. -1 mükemmel negatif korelasyonu, 0 herhangi bir korelasyon olmadığını, +1 ise mükemmel pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir. Şekil 5.9'da elde edilen Spearman korelasyon katsayıları tablosu incelendiğinde çoklu püskürtme parametrelerinin birbirinden bağımsız olarak değişmesinden ötürü faktörler arasındaki korelasyon katsayıları 0 veya 0'a çok yakın çıkmıştır.

#	Design Set	Case	RLT	Type	DELTA_P11_FQ	DELTA_P11_SOI	DELTA_P12_FQ	DELTA_P12_SOI	imep	cylpmx	comb50	bsfc	bsnoxnew	bssoot	blw
Type					Factors				Responses						
1	Default	1 - Case - 1	DELTA_P11_FQ	Factor	1.000										
2	Default	1 - Case - 1	DELTA_P11_SOI	Factor	0.000	1.000									
3	Default	1 - Case - 1	DELTA_P12_FQ	Factor	0.000	0.000	1.000								
4	Default	1 - Case - 1	DELTA_P12_SOI	Factor	0.000	0.2133	0.000	1.000							
5	Default	1 - Case - 1	imep	Response	-0.3184	0.3490	-0.8275	0.3170	1.000						
6	Default	1 - Case - 1	cylpmx	Response	0.5697	-0.1994	0.7825	-0.1221	-0.9320	1.000					
7	Default	1 - Case - 1	comb50	Response	-0.5918	0.1906	-0.7702	0.1005	0.9199	-0.9985	1.000				
8	Default	1 - Case - 1	bsfc	Response	0.3614	-0.3268	0.8275	-0.2919	-0.9975	0.9498	-0.9391	1.000			
9	Default	1 - Case - 1	bsnoxnew	Response	0.4952	-0.4091	0.6982	-0.2956	-0.9504	0.9398	-0.9321	0.9997	1.000		
10	Default	1 - Case - 1	bssoot	Response	-0.1842	-0.08103	0.03601	-0.1994	-0.09210	-0.01720	0.01576	0.06755	-0.04701	1.000	
11	Default	1 - Case - 1	blw	Response	-0.3610	0.3277	-0.8275	0.2914	0.9975	-0.9497	0.9390	-1.000	-0.9996	-0.06756	1.000

Şekil 5.9 Spearman korelasyon katsayıları tablosu

Ortalama indike efektif basınç ile 2.ön püskürtme miktarı arasında -0,8275 ile oldukça yüksek bir negatif korelasyon elde edilmiştir. Yine benzer şekilde 1.ön püskürtme miktarı ile de -0,3184 değerinde negatif bir korelasyon oluşmuştur. Bu durum 0'dan 1'e değişen delta yakıt miktarı arttıkça dolayısıyla ön püskürtme miktarları yükseldikçe ortalama indike efektif basıncın düştüğü sonucunu vermektedir. 1. Ve 2.ön püskürtme açıları ile de sırasıyla 0,3490 ve 0,3170 gibi

birbirlerine yakın değerlerde pozitif korelasyon elde edilmiştir. Bu durumda -3'den +3'e değişen delta açı değerleri arttıkça dolayısıyla n püskürtmelerin açısı retard edildikçe (N'ya yaklaştıkça) ortalama indike efektif basıncın da arttığı sonucunu vermektedir.

Çoklu püskürtme parametrelerinin maksimum silindir içi basınç ile korelasyonu incelendiğinde, 2.n püskürtme miktarı ile +0,7825 değerinde bir pozitif korelasyon, 1.n püskürtme miktarı ile +0,5697 değerinde pozitif bir korelasyon elde edilmiştir. 1. Ve 2.n püskürtmelerin açıları ile ise sırasıyla -0,1994 ve -0,1221 değerlerinde çok küçük negatif korelasyona sahip olduğu grlmştir. Püskürtme açılarının geciktirilmesi ve N'ya yaklaşması maksimum silindir içi basınçta çok küçük düşüşlere neden olmuştur.

Yakıtın %50 miktarının yandığı aı olan MFB50 ile çoklu n püskürtme parametrelerinden 2.n püskürtme miktarı ve 1.n püskürtme miktarı arasında sırasıyla -0,7702 ve -0,5918 değerlerinde negatif korelasyon elde edilmiştir. n püskürtmelerin miktarları arttıkça MFB50 değerleri azalmakta N'ya doğru yaklaşarak geri gelmektedir. 1.n püskürtme açısı ve 2.n püskürtme açısı ile de sırasıyla +0,1906 ve +0,1005 pozitif korelasyon değerleri elde edilmiş olup, n püskürtmelerin delta değerlerinin artarak püskürtmelerin N'ya yaklaşması MFB50 değerlerinin çok küçük miktarlarda artmasına ve ötelenerek N'dan uzaklaşmasına neden olmuştur.

Özgül yakıt tüketimi ve g sonuçları çoklu n püskürtme parametreleri ile aynı değerlerde ancak tam ters işaretili korelasyon katsayısı değerlerine sahip olmuştur. Bir parametrenin özgül yakıt tüketimi üzerindeki pozitif korelasyonu yakıt tüketimi değerinin arttığını ve aynı miktarda yakıt püskürtüldüğü için de g değerinin negatif korelasyon ile azaldığı sonucuna ulaşmaktadır. Çoklu püskürtme parametrelerinin g ile korelasyonunda, 2.n püskürtme miktarı ile -0,8275 değeri ile oldukça yüksek bir negatif korelasyon elde edildiği, 1.n püskürtme miktarı ile de -0,3610 değerinde biraz daha düşük etkide bir negatif korelasyona sahip olduğu grlmştir. n püskürtmelerin miktarlarının artması fren gücünün azalmasına neden olmuştur. 1.n püskürtme açısı ve 2.n püskürtme açısı da fren gücü ile sırasıyla +0,3277 ve +0,2914 değerlerinde pozitif korelasyona sahip

olmuştur. Ön püskürtme açılarının retard edilerek ÜÖN'ya yaklaşması fren gücünün artmasına sebep olmuştur.

NO_x emisyonunun çoklu ön püskürtme parametreleri ile korelasyonu incelendiğinde, 2.ön püskürtme miktarı ile +0,6982 değerinde pozitif korelasyona, 1.ön püskürtme miktarı ile de +0,4952 değerinde pozitif korelasyona sahip olmuştur. Ön püskürtmelerin miktarı arttıkça NO_x emisyonlarının da arttığı görülmüştür. NO_x emisyonu, 1.ön püskürtme açısı ve 2.ön püskürtme açısı ile sırasıyla -0,4091 ve -0,2956 değerlerinde negatif korelasyon oluşturmıştır. Ön püskürtme açılarının retard edilerek ÜÖN'ya yaklaşması NO_x emisyonlarının azalmasına sebep olmuştur.

İs emisyonunda bağıl duyarlılık analizinde elde edilen ve 0'a oldukça yakın olan R² değerinden de anlaşılabileceği üzere güvenilir bir bağıl duyarlılık sonucuna varılamamıştır. Bu durum Spearman korelasyon katsayıları analizinde de ortaya çıkmış ve is emisyonu ile herhangi bir çoklu ön püskürtme parametresi arasında güçlü bir korelasyon elde edilememiştir.

Elde edilen bağıl duyarlılık analizi sonuçlarının güvenilirliğini kontrol etmek ve adım sayısını artırarak elde edilen regresyon denklemi katsayılarını daha doğru bir şekilde belirleyebilmek amacıyla özellikle daha düşük bağıl duyarlılık sonuçları gösteren her iki ön püskürtmenin açıları daha küçük adımlar şeklinde değiştirilerek Tablo 5.2'de görülen deney matrisi çalışması tekrar edilmiştir.

Tablo 5.2 Yapılan 2. deney matrisi çalışması değişim aralıkları

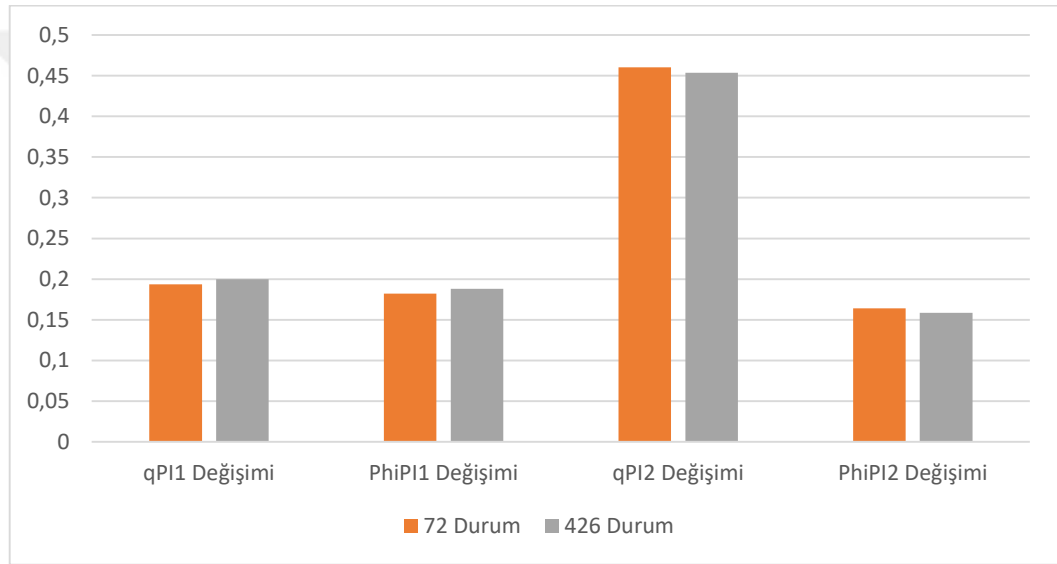
	<i>Delta Değeri</i>	<i>Adım Sayısı</i>	<i>Adım Aralığı</i>
qPI1 [mg]	0...1	3	0,5
qPI2 [mg]	0...1	3	0,5
PhiPI1 [KMA]	-3...3	7	1
PhiPI2 [KMA]	-3...3	7	1

Yapılan 2. deney matrisi çalışmasında 441 durum koşulmuş ve bunlardan 15 tanesi püskürtmelerin çakışması sebebi ile başarısız olmuştur. Dolayısıyla duyarlılık analizi çalışmasında 426 durum verisi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen duyarlılık analizi sonuçları Şekil 17'de gösterilmiştir.

#	Design Set	Case	Response	DELTA_PI1_FQ	DELTA_PI1_SOI	DELTA_PI2_FQ	DELTA_PI2_SOI	Linear R-Squared
Type				Factors				
1	Default	1 - Case - 1	imep	0.1998	0.1881	0.4537	0.1584	0.9728
2	Default	1 - Case - 1	cylpmx	0.3680	0.1109	0.4680	0.05317	0.9822
3	Default	1 - Case - 1	comb50	0.4215	0.07365	0.4795	0.02530	0.9850
4	Default	1 - Case - 1	bsfc	0.2242	0.1771	0.4548	0.1439	0.9730
5	Default	1 - Case - 1	bsnoxnew	0.2888	0.2113	0.3656	0.1343	0.9498
6	Default	1 - Case - 1	bssoot	0.2905	0.01987	0.3369	0.3527	0.08816
7	Default	1 - Case - 1	bkw	0.2242	0.1769	0.4556	0.1433	0.9753

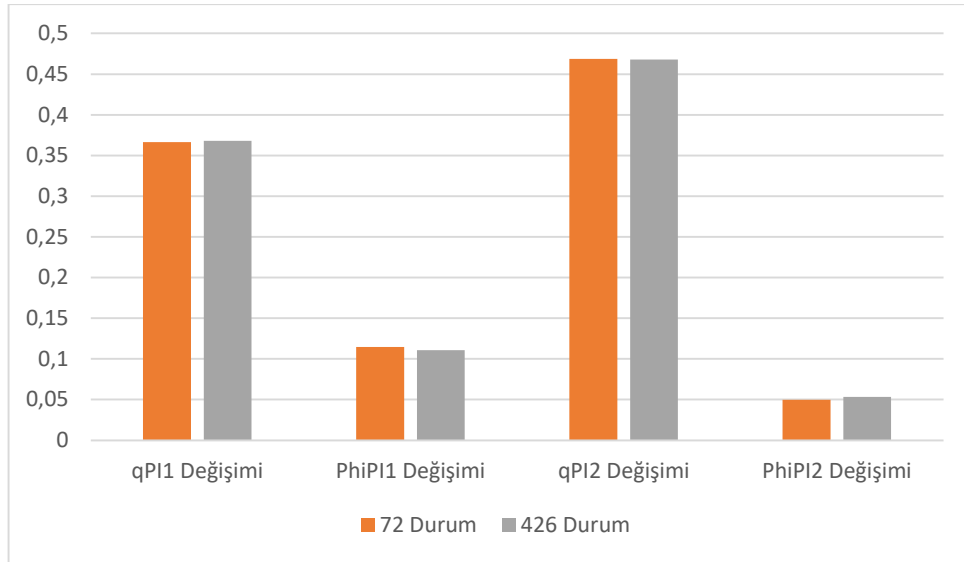
Şekil 5.10 Durum sayısı artırılmış bağıl duyarlılık analizi sonuçları

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçları karşılaştırıldığında OİEB üzerinde Şekil 5.11’de görüldüğü üzere birbirine çok yakın bağıl duyarlılık değerleri elde edilmiştir.



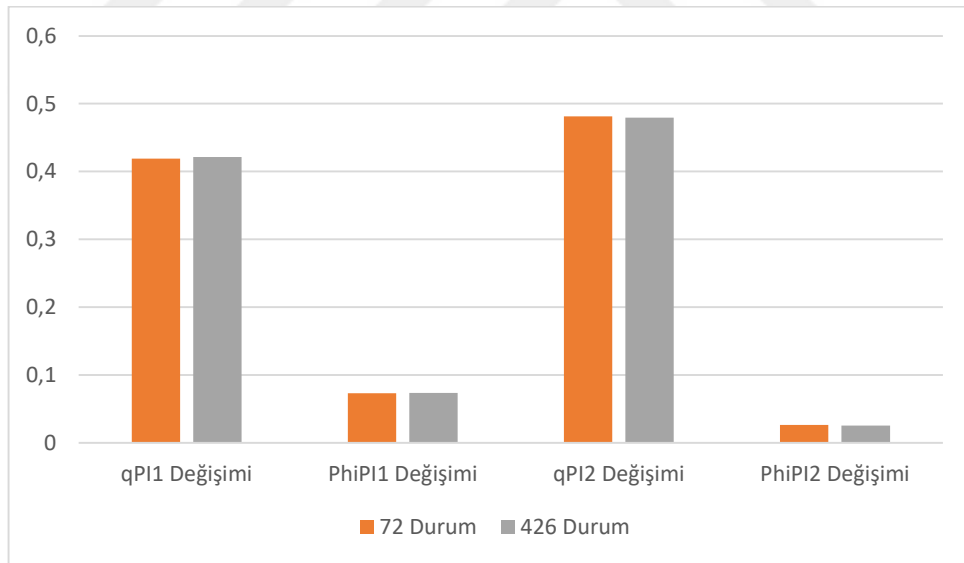
Şekil 5.11 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin OİEB üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçları karşılaştırıldığında çoklu ön püskürtme parametrelerinin maksimum silindir içi basınç üzerindeki etkilerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği Şekil 5.12’de görülmektedir.



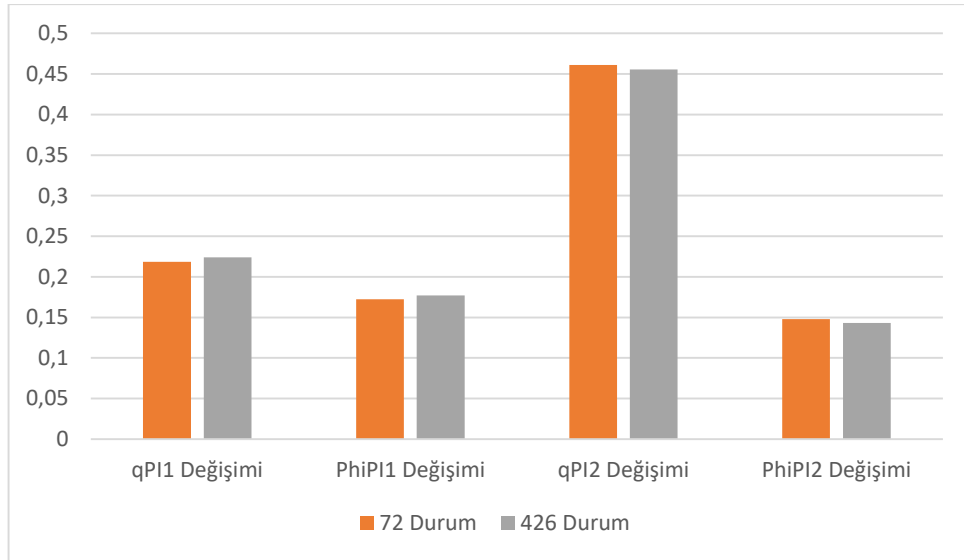
Şekil 5.12 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MSİB üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçları karşılaştırıldığında MFB50 üzerinde Şekil 5.13’de görüldüğü üzere birbirine çok yakın bağıl duyarlılık değerleri elde edilmiştir.



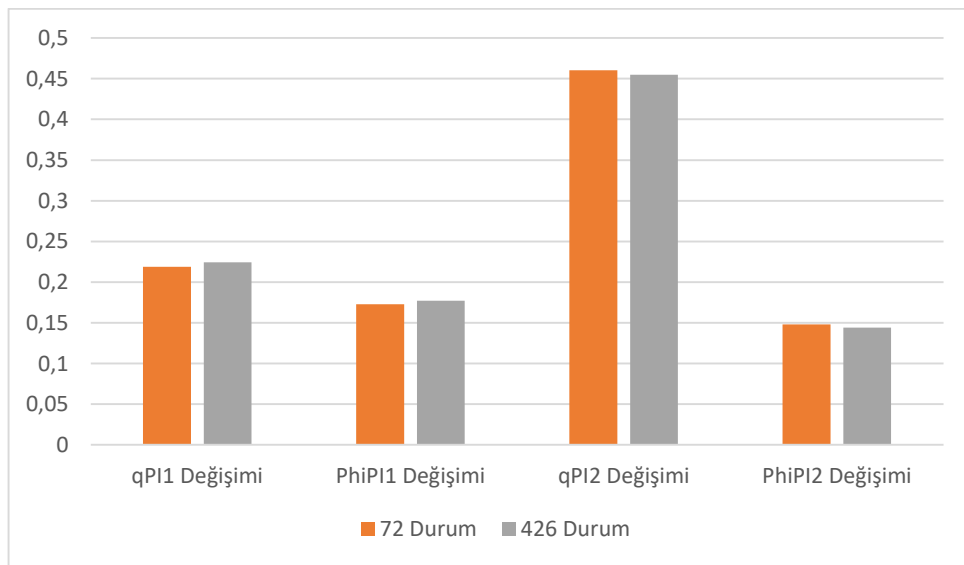
Şekil 5.13 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin MFB50 üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçları karşılaştırıldığında fren gücü üzerinde Şekil 5.14’de görüldüğü üzere birbirine çok yakın bağıl duyarlılık değerleri elde edilmiştir.



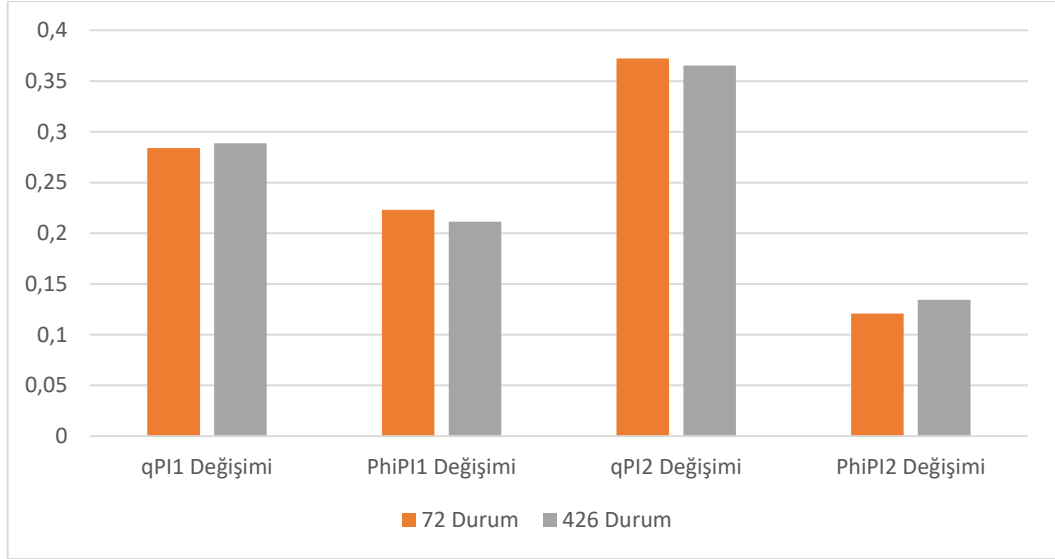
Şekil 5.14 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçlarında özgül yakıt tüketimi üzerinde Şekil 5.15’de görülen sonuç değişimleri fren gücü üzerinde oluşan sonuç değişimleri ile birebir aynıdır. Bununla birlikte farklı sayılardaki durumlar ile elde edilen bağıl duyarlılık analizi sonuçları birbirlerine oldukça yakındır.



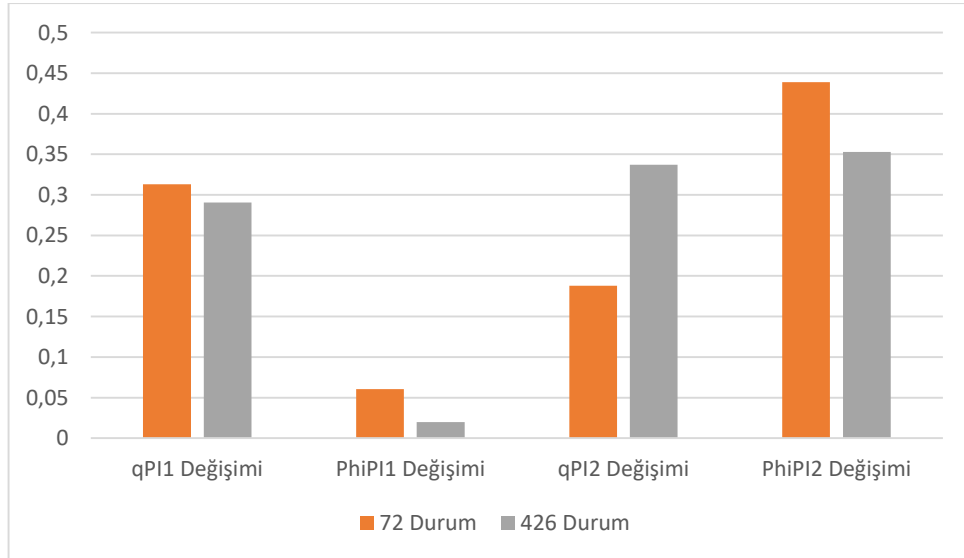
Şekil 5.15 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin özgül yakıt tüketimi üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçları karşılaştırıldığında NO_x emisyonu üzerinde Şekil 5.16’da görüldüğü üzere birbirine çok yakın bağıl duyarlılık değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.16 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO_x emisyonu üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

72 durum ve 426 durum ile oluşturulan bağıl duyarlılık analizi sonuçlarında is emisyonu açısından R² değeri benzer şekilde sırasıyla 0,06364 ve 0,08816 olarak elde edilmiş ve bağıl duyarlılık değerlerinin güvenilirliği çok düşük seviyelerde kalmıştır. Bununla birlikte Şekil 5.17’de görülen bağıl duyarlılık değerlerinde 1.ön püskürtmenin açısı ve 2.ön püskürtmenin miktarına olan bağıllık değerleri önemli oranda değişmiştir.



Şekil 5.17 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin is emisyonu üzerinde farklı durum sayıları için karşılaştırılması

Şekil 5.18’de görülen 426 durum ile elde Spearman korelasyon katsayıları ile 72 durum ile elde edilen korelasyon katsayıları tablosunda parametreler arasındaki

ilişkiler ve bu ilişkilerin mertebeleri açısından bir değişiklik olmamıştır. İlişki değerleri küçük oranlarda değişmesine karşın belirgin bir değişim oluşmamıştır.

#	Design Set	Case	RLT	Type	DELTA_P11_FQ	DELTA_P11_SOI	DELTA_P12_FQ	DELTA_P12_SOI	imep	cyipmx	comb50	befc	bsnoxnew	bssoot	bkw
Type					Factors				Responses						
1	Default	1 - Case - 1	DELTA_P11_FQ	Factor	1.000										
2	Default	1 - Case - 1	DELTA_P11_SOI	Factor	0.000	1.000									
3	Default	1 - Case - 1	DELTA_P12_FQ	Factor	0.000	0.02265	1.000								
4	Default	1 - Case - 1	DELTA_P12_SOI	Factor	0.000	0.07117	-0.02265	1.000							
5	Default	1 - Case - 1	imep	Response	-0.3538	0.2610	-0.8520	0.2554	1.000						
6	Default	1 - Case - 1	cyipmx	Response	0.5683	-0.1551	0.7903	-0.1089	-0.9520	1.000					
7	Default	1 - Case - 1	comb50	Response	-0.5846	0.1652	-0.7774	0.09283	0.9459	-0.9992	1.000				
8	Default	1 - Case - 1	befc	Response	0.3954	-0.2402	0.8475	-0.2295	-0.9584	0.9671	-0.9618	1.000			
9	Default	1 - Case - 1	bsnoxnew	Response	0.5435	-0.3031	0.7130	-0.2394	-0.9508	0.9517	-0.9534	0.9589	1.000		
10	Default	1 - Case - 1	bssoot	Response	-0.2190	-0.01407	0.1611	-0.1877	-0.1350	0.05225	-0.04884	0.1194	-0.02547	1.000	
11	Default	1 - Case - 1	bkw	Response	-0.3954	0.2402	-0.8474	0.2295	0.9984	-0.9671	0.9618	-1.000	-0.9590	-0.1194	1.000

Şekil 5.18 426 durum ile elde edilen spearman korelasyon katsayıları tablosu

Bu şekilde durum sayısını yaklaşık 6 kat artırarak elde edilen sonuçlarda önemli bir değişiklik oluşmadığı gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçların durum sayısına olan duyarlılığı ortaya koyulmuştur.

5.2 Optimizasyon Çalışması

Oluşturulan model ile günümüz motor geliştirme çalışmalarının motor kontrol ünitesi kalibrasyonu aşamalarında yapılan test çalışmalarını minimize edebilmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmalarda motorun çalışma parametrelerinin, çoğunlukla motor veya aracın tabi olduğu emisyon regülasyonunda koşulan çevrimdeki belirlenen motor çalışma noktaları için, hedef emisyon değerlerine ulaşılırken aynı zamanda güç ve yakıt tüketimi değerlerinin de dramatik değişimler göstermeden korunarak kalibre edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmalarda motor üzerindeki tüm sistemlerde kendi çalışma limitleri içinde kalmalıdır.

Optimizasyon çalışması bir veya birden fazla giriş parametresinin veya faktörün sistematik olarak değiştirilerek bir model çıktısının veya cevabının maksimize veya minimize edilmesi işlemidir. Optimizasyon araçları, bu işlemdeki giriş parametrelerinin iteratif olarak ayarlanmasını, modelin çalıştırılmasını, model çıktılarının değerlendirilmesini ve optimizasyon hedeflerine ulaşılması için giriş parametrelerinin bitiş kriterleri sağlanana kadar tekrar değiştirilmesi aşamalarını otomatik hale getirmiştir. Her bir hesaplama adımının zaman ve maddi açıdan değeri olduğu düşünüldüğünde, optimizasyon araçlarının bir sonraki adımda kullanacağı giriş parametreleri setini belirlerken akıllı algoritmalar ve yöntemler kullanmaları gerekmektedir.

Optimizasyonda bir model çıktısı maksimize veya minimize edilirken bazı model çıktıları da belirli değerler arasında kalarak kısıtlanabilir. Her bir faktör veya giriş parametresinin alt ve üst sınır değerlerinin kullanıcı tarafından belirlendiği ve optimum sonucun arandığı alana araştırma uzayı veya araştırma alanı denilmektedir. Yapılan çalışmada optimum değerlerin bulunması istenen faktör veya giriş parametresi seti alt ve üst limitleri ile birlikte Tablo 5.3’de görülmektedir. Araştırma alanında yer alan giriş parametreleri 1.ön püskürtme miktarındaki değişim Δ_{qPI1} , 1.ön püskürtme açısındaki değişim $\Delta_{\Phi PI1}$, 2.ön püskürtme miktarındaki değişim Δ_{qPI2} ve 2.ön püskürtme açısındaki değişim $\Delta_{\Phi PI2}$ parametreleridir. Dinamometre testlerinde ve model doğrulama çalışmalarında kullanılan aralıklar daha dar bir aralık olmasına rağmen optimum çalışma parametresinin bu aralığın dışında olabileceği durumu da göz önünde bulundurularak daha geniş aralıklar seçilmiştir.

Aralıkların seçilmesi konusu üzerinde çalışılan sistem cevabının, parametrelerdeki değişime nasıl cevap verdiği ile ilgili olarak bir çok lokal minimum değere sahip olabileceği gibi global bir minimum değere de sahip olabilecektir. Dolayısıyla optimizasyon çalışması bir lokal bir minimum değere yaklaşmış olabilir ve kullanıcı bir global minimumun varlığından haberdar olmayabilir. Bu nedenle seçilen aralıklar test ve doğrulama çalışmalarında kullanılan aralıklardan daha geniş seçilmiş ve simülasyonun gerek püskürtme açıları gerekse de miktarlar açısından uygulanabilir en optimum değeri bulması sağlanmıştır.

Tablo 5.3 Araştırma alanı faktörleri ve limitleri

Faktör	Δ_{qPI1}	$\Delta_{\Phi PI1}$	Δ_{qPI2}	$\Delta_{\Phi PI2}$
Alt limit	-0,5	-6,0	-0,5	-6,0
Üst Limit	3,0	6,0	3,0	6,0
Test Limiti	0...1	-3...+3	0...1	-3...+3

Yapılan optimizasyon çalışmasında motorun çalışma noktasındaki baz parametrelerle elde edilen gücün mümkün olduğunca korunması ve bununla birlikte NO_x emisyonunun da minimize edilmesi hedeflenmiştir. Motorun baz durumda kullanılan parametreleri ve hedef çıktılarının baz durumundaki değerleri Tablo 5.4’de görülmektedir.

Tablo 5.4 Baz durum çoklu ön püskürtme parametreleri ve çıktı sonuçları

Parametre	Birim	Değer
DELTA_qPI1	mg	0
DELTA_PhiPI1	°KMA	0
DELTA_qPI2	mg	0
DELTA_PhiPI2	°KMA	0
qPI1	mg	1
qPI2	mg	1
qMI1	mg	6,27
PhiPI1	°KMA	-14,8
PhiPI2	°KMA	-24,6
PhiMI1	°KMA	0
NO _x Emisyonu	g/kWsa	1,03
Fren Gücü	kW	5,89

Optimizasyon çalışmaları tek hedefli veya çoklu hedefli olarak gerçekleştirilebilir. Çoklu optimizasyon çalışmaları da ağırlıklı toplam veya Pareto olmak üzere iki farklı yaklaşımla yapılabilmektedir. Yapılan optimizasyon çalışması çoklu optimizasyon çalışması olup Pareto yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. İçerisinde trade-offlar barındıran mühendislik problemlerinin çözümünde Pareto yaklaşımının daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. Pareto grafiklerinde her bir cevap diğerine karşı ikili olarak çizdirilir ve grafikte her bir veri seti ile elde edilen sonuçlar görüntülenir. Eksenlerden birindeki cevap minimum iken diğer eksenindeki cevap maksimum değerinde olabilir ve hedefin iki cevabında minimize edilmesi olduğu durumlarda tek bir çözüm veya optimum olmamaktadır. Bunun da ötesinde bu iki cevabın minimumları arasındaki bir hat üzerinde optimum değeri de içinde bulunduran Pareto noktaları oluşmuş olur. Bu tip durumlarda başka bir değerlendirme kriteri dahil edilmedikçe tüm Pareto çözümlerinin eşit oranda iyi olduğu kabul edilmektedir. Optimizasyon çalışmasında kullanılan çoklu hedefli optimizasyon parametreleri Tablo 5.5’de görülmektedir.

Tablo 5.5 Çoklu hedefli optimizasyon parametreleri

Sistem Cevabı	NO_x Emisyonu [g/kWsa]	Fren Gücü [kW]
Hedef	Minimize Etme	Hedefe Ulaşma
Hedef Değer	-	5,89

Hedef fonksiyonu optimizasyon aracının maksimize veya minimize etmeye çalıştığı matematiksel bir fonksiyondur. Tek bir durum için çalıştırılan

optimizasyon çalışmasında hedef fonksiyonu basit bir şekilde cevap değeri olan NO_x emisyonudur ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$f = R \quad (5.3)$$

Hedef fonksiyonunun hedefe ulaşma şeklinde olması durumunda ise hedef fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$f = (R - R_{target})^2 \quad (5.4)$$

Çoklu hedefli Pareto optimizasyonlarında optimizasyon aracı tek bir matematiksel fonksiyonu maksimize ya da minimize eden tek bir optimum parametre seti bulmak yerine baskın olmayan parametre setlerinin elde edildiği bir arama algoritması kullanmaktadır.

Kullanılan optimizasyon aracı NSGA-III ve CMA-ES ile iki evrimsel arama algoritması ve Simplex ve Discrete-Grid olmak üzere de iki deterministik arama algoritması sağlamaktadır. Yapılan optimizasyon çalışmasında Genetik Algoritma, NSGA-III algoritması kullanılmıştır. NSGA-III, oldukça iyi bilinen NSGA-II'nin yerine geçen ve çoklu hedefli Pareto optimizasyonunda kullanılan bir algoritmadır. Genetik algoritma araştırma alanında geniş bir bölgede çözüm aramakta ve üç veya daha fazla faktörün bulunduğu, doğrusal olmayan problemler ile çalışılan orta ile yüksek karmaşıklıkta problemlerin çözümü için önerilmektedir.

Kullanıcı tarafından belirlenmesi ve girilmesi gereken iki önemli parametre bulunmaktadır. Bunlar popülasyon boyutu ve çalıştırılacak yeniden üretim sayısıdır. Bu iki parametrenin çarpımı optimizasyon aracının çalıştıracağı toplam tasarım seti sayısını vermektedir. Genetik algoritma kullanıldığı durumda bir durma kriteri bulunmamaktadır ve tüm tasarım setleri tamamlanana kadar optimizasyon devam etmektedir. Popülasyon boyutu genellikle faktör sayısı ile orantılıdır ve faktör sayısına göre önerilen popülasyon boyutu Tablo 5.6'da görülmektedir. Yapılan optimizasyon çalışmasında dört faktör bulunduğundan dolayı popülasyon boyutu 16 olarak seçilmiştir.

Tablo 5.6 Faktör sayısı ve önerilen popülasyon boyutu

Faktör Sayısı	Popülasyon Boyutu
3	10
4	16
5	20
6	26
7	30
8	40
9+	50

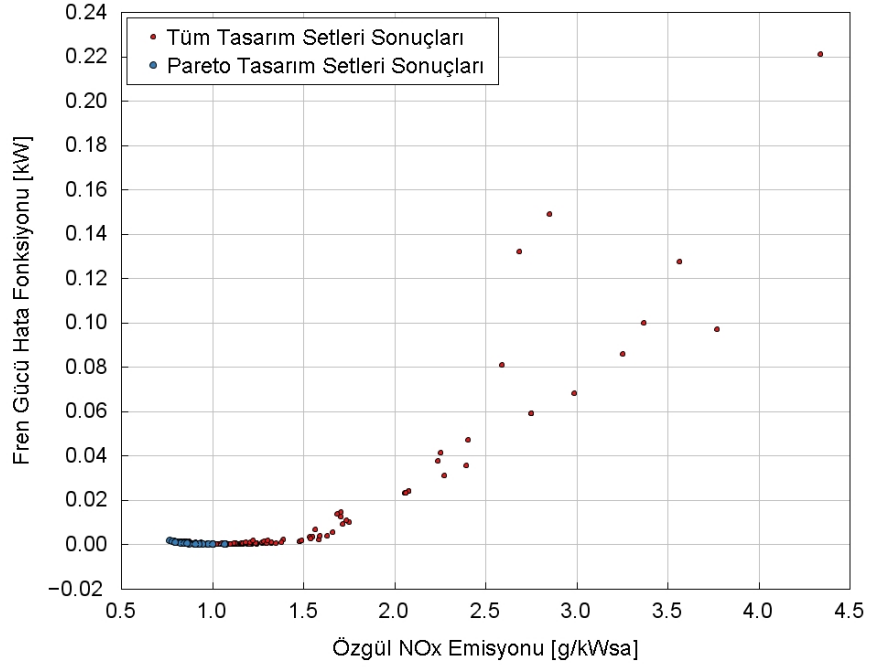
Başlangıç popülasyonu, başlangıç olarak verilen ilk tasarım seti değerleri hariç Latin Hybercube örnekleme yöntemi kullanılarak oluşturulmaktadır.

Genetik algoritma beş ayar parametresine sahip olup bunlar; popülasyon boyutu, çaprazlama oranı, çaprazlama oranı dağılım endeksi, mutasyon oranı ve mutasyon oranı dağılım endeksidir. Optimizasyon çalışmasında kullanılan genetik algoritma çalışma parametreleri ve değerleri Tablo 5.7’de görülmektedir.

Tablo 5.7 Genetik algoritma çalışma parametreleri

Özellik	Değer
Arama Algoritması	Genetik Algoritma
Popülasyon Boyutu	16
Yeniden Üretme Sayısı	15
Çaprazlama Oranı	1
Çaprazlama Oranı Dağılım Endeksi	15
Mutasyon Oranı	0,25
Mutasyon Oranı Dağılım Endeksi	20
Rastgele Sayı Üretimi	Rastgele

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda 240 tasarım seti ile elde edilen fren gücü için hata fonksiyonu ile NO_x emisyonu değeri grafiği Şekil 5.19’da görülmektedir. Şekilde görülen kırmızı noktalar koşulan tüm tasarım setlerinin sonuçlarını gösterirken mavi noktalar her iki hedefi de sağlayan Pareto tasarım setlerinin sonuçlarını göstermektedir. Bununla birlikte faktör değerlerinin yer aldığı tasarım setleri ve bu tasarım setlerinin kullanılması ile elde edilen sonuçlara ait bilgiler de Tablo 5.8’de yer almaktadır.



Şekil 5.19 Fren gücü için hata fonksiyonu ve NO_x emisyonu grafiği

Tablo 5.8’de yer alan tasarım setlerinden 1 numaralı tasarım seti mevcut durumu gösteren ve algoritmaya dahil edilmeyen baz durum parametrelerini ve sonuçlarını göstermektedir. Durum bilgisi ise kullanılan tasarım seti parametreleri ile başarılı bir simülasyon koşulup koşulmadığını göstermektedir. Verilen parametre seti değerleri sebebiyle gerek püskürtme miktarları gerekse de püskürtme açıları açısından simülasyonun koşmasına engel bir durum oluşmuş ise bu başarısız tasarım seti olarak değerlendirilmektedir. Başarısız tasarım setleri bir sonuç veremediği için kullanılan püskürtme miktarları ve açılarındaki değişim değerleri doğru olarak belirtilmesine karşın elde edilen sonuçlar bir önceki başarılı tasarımın sonuç değerleridir. Başarısız bir tasarım seti olan 7. durumda kullanılan miktar ve açı değişim değerleri görülmekte olup elde edilen NO_x ve fren gücü değerleri son başarılı durum olan 6. durumun değerleridir.

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar

Nu.	Durum	NO_x Emisyonu	Fren Gücü	DELTA_ qPI1	DELTA_ PhiPI1	DELTA_ qPI2	DELTA_ PhiPI2
-	-	g/kWsa	kW	mg	°KMA	mg	°KMA
1	Olası Tasarım	1,03	5,89	0	0	0	0
2	Olası Tasarım	2,06	5,74	1,11	1,14	0,635	-5
3	Olası Tasarım	3,57	5,53	2,75	3,45	2,24	2,28
4	Olası Tasarım	1,32	5,88	1,19	4,56	0,216	4,47
5	Olası Tasarım	1,57	5,81	1,47	-1,13	-0,151	-2,03
6	Olası Tasarım	2,75	5,65	0,366	-2,87	1,56	-1,65
7	Başarısız Tasarım	2,75	5,65	2,84	-5,49	2,65	5,36
8	Olası Tasarım	3,77	5,58	2,05	-2,71	0,868	-3,18
9	Olası Tasarım	2,26	5,69	-0,379	5,91	1,63	-5,38
10	Olası Tasarım	2,69	5,53	2,09	4,31	1,9	-3,78
11	Olası Tasarım	1,19	5,88	0,445	1,7	0,189	4,2
12	Olası Tasarım	1,21	5,88	0,678	-1,21	-0,325	3,28
13	Başarısız Tasarım	1,21	5,88	2,38	-5	1	-0,0968
14	Başarısız Tasarım	1,21	5,88	-0,00226	-4,3	1,2	1,69
15	Olası Tasarım	4,34	5,42	1,71	-0,267	2,53	-0,822
16	Olası Tasarım	3,37	5,58	-0,15	2,31	2,87	0,949
17	Olası Tasarım	1,48	5,85	1,45	4,56	0,0466	-3,73
18	Başarısız Tasarım	1,48	5,85	1,2	-1,13	0,0281	4,65
19	Olası Tasarım	2,28	5,72	-0,262	-2,98	1,45	-1,69
20	Olası Tasarım	1,24	5,87	0,358	1,23	0,104	0,0434
21	Başarısız Tasarım	1,24	5,87	2,38	-5	0,241	4,42

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

22	Olası Tasarım	1,71	5,77	1,19	4,56	0,977	0,834
23	Olası Tasarım	2,41	5,67	2,85	3,23	0,635	-5,4
24	Olası Tasarım	3,26	5,6	1,07	0,641	2,24	2,68
25	Olası Tasarım	2,85	5,51	2,75	3,4	1,61	-5,35
26	Olası Tasarım	2,4	5,7	-0,379	5,96	2,26	2,24
27	Olası Tasarım	2,24	5,7	-0,379	5,91	1,63	-4,35
28	Olası Tasarım	2,06	5,74	1,11	1,14	0,635	-5
29	Olası Tasarım	1,54	5,83	1,19	4,53	0,217	-5
30	Olası Tasarım	1,72	5,8	1,11	1,17	0,778	4,7
31	Olası Tasarım	1,3	5,86	0,445	1,7	0,384	4,2
32	Olası Tasarım	2,08	5,74	1,11	1,14	0,656	-5
33	Olası Tasarım	2,99	5,63	0,714	-2,75	1,45	-1,69
34	Olası Tasarım	0,881	5,92	-0,297	-1,21	-0,325	3,28
35	Olası Tasarım	2,08	5,74	1,11	1,14	0,659	-5
36	Olası Tasarım	1,69	5,77	1,19	4,56	0,953	0,834
37	Olası Tasarım	1,67	5,82	-0,324	-3,05	0,687	-1,45
38	Olası Tasarım	2,59	5,61	1,12	1,64	1,46	-5
39	Pareto Tasarım	1,07	5,89	0,43	3,85	0,189	4,2
40	Olası Tasarım	1,55	5,83	1,2	4,45	0,217	-5
41	Olası Tasarım	1,63	5,83	0,654	1,16	0,697	5,11
42	Olası Tasarım	1,59	5,85	1,12	1,7	0,27	4,2
43	Olası Tasarım	1,71	5,78	0,596	1,07	0,568	-5
44	Olası Tasarım	1,75	5,79	1,11	0,762	0,778	4,7

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

45	Olası Tasarım	1,49	5,85	1,45	4,46	0,0462	-3,73
46	Olası Tasarım	2,06	5,74	1,12	1,14	0,635	-5
47	Olası Tasarım	1,39	5,85	0,36	1,71	0,371	0,0434
48	Olası Tasarım	1,23	5,87	0,443	1,22	0,118	2,21
49	Olası Tasarım	1,25	5,88	0,63	1,68	0,119	4,2
50	Olası Tasarım	1,16	5,88	0,443	3,22	0,188	2,21
51	Olası Tasarım	1,12	5,89	0,374	2,51	0,189	4,17
52	Olası Tasarım	1,59	5,83	1,27	4,3	0,217	-5
53	Olası Tasarım	1,23	5,87	0,358	1,43	0,104	0,0434
54	Olası Tasarım	0,998	5,9	0	0	-0,138	-1,23
55	Olası Tasarım	1,08	5,88	0,0314	0	0,0597	0
56	Olası Tasarım	1,74	5,79	1,76	-1,31	-0,151	-2,03
57	Olası Tasarım	1,28	5,87	0,445	1,7	0,339	4,2
58	Olası Tasarım	1,3	5,86	0,445	1,7	0,388	4,2
59	Olası Tasarım	1,21	5,88	0,647	-1,21	-0,31	3,28
60	Olası Tasarım	1,04	5,89	0,0316	0	-0,0147	0,111
61	Olası Tasarım	1,2	5,88	0,706	-1,21	-0,325	4,51
62	Olası Tasarım	1,35	5,87	1,19	4,56	0,216	3,25
63	Olası Tasarım	1	5,9	0,241	0,825	-0,195	3,35
64	Olası Tasarım	1,54	5,84	0,667	-1,06	0,104	0,0434
65	Olası Tasarım	0,887	5,91	-0,141	0	-0,133	3,98
66	Olası Tasarım	1,28	5,86	0,325	1,7	0,183	-1,01
67	Olası Tasarım	1,05	5,89	-0,0193	0	0	-1,17

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

68	Olası Tasarım	1,25	5,87	0,697	-1,78	-0,31	3,28
69	Olası Tasarım	0,857	5,93	-0,297	-1,21	-0,456	3,28
70	Olası Tasarım	1,1	5,88	0,0314	0	0,0928	0,31
71	Olası Tasarım	0,949	5,91	0,0316	0	-0,303	0,111
72	Olası Tasarım	1,33	5,86	0,678	-1,21	-0,0171	3,28
73	Olası Tasarım	1,22	5,87	0,346	-1,07	0,124	4,13
74	Olası Tasarım	1,21	5,89	0,922	1,54	-0,315	3,39
75	Olası Tasarım	1,3	5,87	0,638	2,81	0,132	0,0434
76	Olası Tasarım	1,12	5,89	0,35	1,44	0,104	4,2
77	Olası Tasarım	1,23	5,87	0,352	1,43	0,118	0,0434
78	Olası Tasarım	1,24	5,87	0,448	1,22	0,129	2,21
79	Olası Tasarım	1,17	5,88	0,374	2,51	0,187	2,13
80	Olası Tasarım	1,12	5,88	0,193	1,22	0,12	1,81
81	Olası Tasarım	1,02	5,9	0,262	0,114	-0,181	4,53
82	Olası Tasarım	1,03	5,9	0,243	2,51	0,0801	3,44
83	Olası Tasarım	1,38	5,86	0,778	0,56	0,12	3,96
84	Olası Tasarım	0,916	5,91	-0,141	0	-0,133	1,84
85	Olası Tasarım	0,944	5,9	-0,0101	1,46	-0,138	-1,06
86	Olası Tasarım	0,89	5,91	-0,118	0	-0,195	3,35
87	Olası Tasarım	1,1	5,89	0,35	1,9	0,104	4,2
88	Olası Tasarım	1,16	5,88	0,193	1,22	0,2	1,81
89	Olası Tasarım	1,21	5,89	0,901	1,54	-0,315	3,23
90	Olası Tasarım	1,01	5,9	0,261	0,827	-0,195	3,25

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

91	Olası Tasarım	1	5,91	0,241	0,821	-0,217	3,37
92	Olası Tasarım	0,949	5,91	0,0316	0,0036	-0,303	0,0861
93	Olası Tasarım	1,01	5,9	0,0324	-0,668	-0,162	-0,207
94	Pareto Tasarım	1	5,89	-0,142	0	0,215	4,3
95	Olası Tasarım	0,939	5,92	0,206	0,826	-0,459	3,19
96	Olası Tasarım	0,916	5,91	-0,192	-1,21	-0,191	3,26
97	Olası Tasarım	0,924	5,9	-0,142	-0,0227	-0,0275	3,26
98	Olası Tasarım	0,918	5,91	-0,192	0,122	-0,132	1,84
99	Olası Tasarım	0,944	5,9	-0,0104	1,46	-0,138	-1,06
100	Olası Tasarım	0,998	5,9	3,10E-04	0	-0,138	-1,23
101	Olası Tasarım	0,92	5,91	-0,273	-0,0667	-0,133	1,84
102	Olası Tasarım	0,932	5,92	0,427	3,85	-0,196	4,2
103	Olası Tasarım	1,04	5,89	0,0324	-1,82	-0,162	-0,207
104	Olası Tasarım	1,05	5,89	0,0324	-0,668	-0,0423	-0,207
105	Olası Tasarım	0,928	5,91	-4,01E-04	0,00354	-0,303	0,465
106	Olası Tasarım	1	5,9	0,032	6,36E-05	-0,138	-0,615
107	Olası Tasarım	0,926	5,91	-0,0028	-0,319	-0,147	3,73
108	Olası Tasarım	1,17	5,87	0,432	4,16	0,198	-1,23
109	Olası Tasarım	0,874	5,92	-0,189	-1,21	-0,478	1,69
110	Olası Tasarım	0,906	5,92	-0,301	-1,21	-0,184	3,26
111	Olası Tasarım	0,848	5,92	-0,141	0	-0,38	3,98
112	Olası Tasarım	1,07	5,89	0,43	3,85	0,189	4,2
113	Olası Tasarım	0,863	5,92	-0,119	-0,648	-0,416	3,45

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

114	Olası Tasarım	0,909	5,91	-0,102	0,364	-0,133	2,23
115	Olası Tasarım	0,88	5,91	-0,141	0	-0,175	3,81
116	Olası Tasarım	0,866	5,92	-0,141	0	-0,361	2,01
117	Olası Tasarım	0,91	5,91	-0,2	-1,43	-0,191	4,12
118	Olası Tasarım	1,13	5,88	0,437	3,25	0,189	3,34
119	Olası Tasarım	0,931	5,91	0,0439	-0,828	-0,329	3,73
120	Olası Tasarım	1,14	5,89	0,43	2,75	0,2	4,2
121	Olası Tasarım	0,926	5,91	-0,0028	-0,319	-0,147	3,73
122	Olası Tasarım	0,863	5,92	-0,429	0,814	-0,147	3,73
123	Olası Tasarım	0,961	5,9	0,0452	0,149	-0,0645	3,14
124	Olası Tasarım	0,915	5,91	-0,142	-0,0226	-0,134	1,95
125	Olası Tasarım	1,21	5,88	0,431	0	-0,144	-0,883
126	Pareto Tasarım	0,925	5,9	-0,0063	3,85	0,195	4,11
127	Olası Tasarım	1,03	5,89	-0,00633	0,452	0,215	4,26
128	Olası Tasarım	0,916	5,91	-0,146	1,46	-0,152	-1,34
129	Olası Tasarım	1,01	5,89	3,10E-04	0	-0,0925	-1,23
130	Olası Tasarım	0,872	5,91	-0,141	0,704	-0,133	3,98
131	Pareto Tasarım	0,794	5,92	-0,136	3,85	-0,17	4,11
132	Olası Tasarım	1,04	5,89	-0,0119	-0,0721	0,19	3,81
133	Olası Tasarım	0,884	5,91	-0,144	0	-0,138	4,07
134	Olası Tasarım	0,942	5,91	0,00301	0	-0,34	-1,49
135	Olası Tasarım	0,908	5,9	-0,122	3,85	0,189	4,2
136	Olası Tasarım	1,06	5,9	0,411	-0,242	-0,38	3,98

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

137	Olası Tasarım	0,906	5,91	-0,0063	0,0418	-0,165	4,03
138	Olası Tasarım	0,872	5,91	0	3,8	-0,138	-1,23
139	Olası Tasarım	0,998	5,9	0	0	-0,138	-1,23
140	Olası Tasarım	1,29	5,86	0,0732	0	0,266	-1,23
141	Olası Tasarım	0,985	5,9	0,422	3,74	-0,00799	4,12
142	Pareto Tasarım	0,976	5,89	-0,0659	0,843	0,0871	2,32
143	Pareto Tasarım	0,869	5,91	-0,0242	3,85	-0,138	-1,67
144	Olası Tasarım	1,08	5,89	0,0699	-0,101	0,195	4,31
145	Olası Tasarım	1,3	5,87	0,761	2,55	0,192	4,2
146	Olası Tasarım	1,07	5,89	0,0403	-2,61	-0,165	-0,128
147	Olası Tasarım	0,927	5,91	-0,146	1,45	-0,153	-2,08
148	Olası Tasarım	0,882	5,91	-0,141	0,234	-0,132	3,98
149	Olası Tasarım	0,855	5,92	-0,119	-0,255	-0,411	3,54
150	Olası Tasarım	0,992	5,91	0,0324	-1,82	-0,361	-0,297
151	Olası Tasarım	1,01	5,9	0,291	0,704	-0,133	4,91
152	Olası Tasarım	0,892	5,91	-0,146	2,42	-0,152	-1,43
153	Olası Tasarım	1,19	5,87	0,422	3,74	0,404	4,12
154	Olası Tasarım	0,985	5,9	0,422	3,74	-0,00799	4,12
155	Pareto Tasarım	0,817	5,92	-0,152	3,8	-0,138	2,43
156	Olası Tasarım	1,21	5,86	-0,0632	0,843	0,303	-1,34
157	Olası Tasarım	0,844	5,92	-0,141	-0,101	-0,406	3,98
158	Pareto Tasarım	0,857	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-1,23
159	Olası Tasarım	0,996	5,9	-0,362	0	0,213	4,3

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

160	Olası Tasarım	1,08	5,89	0,43	3,88	0,203	4,15
161	Olası Tasarım	0,865	5,91	-0,0441	1,45	-0,133	3,98
162	Olası Tasarım	0,955	5,9	-0,0666	0,706	-0,153	-2,08
163	Olası Tasarım	0,927	5,91	-0,151	1,45	-0,153	-2,13
164	Olası Tasarım	0,873	5,91	0,00522	3,8	-0,138	-1,18
165	Olası Tasarım	0,913	5,91	-0,248	3,85	0,199	4,11
166	Olası Tasarım	0,802	5,92	-0,0063	3,82	-0,174	4,29
167	Olası Tasarım	0,819	5,92	-0,0242	3,85	-0,308	-1,95
168	Olası Tasarım	0,921	5,91	-0,146	1,45	-0,153	-1,67
169	Olası Tasarım	0,908	5,9	-0,122	3,85	0,189	4,2
170	Olası Tasarım	1,09	5,89	0,43	3,55	0,189	4,2
171	Olası Tasarım	0,909	5,9	-0,0882	1,87	0,00262	2,32
172	Pareto Tasarım	1,07	5,89	0,452	4,08	0,189	4,21
173	Pareto Tasarım	1,01	5,89	-0,141	0,711	0,242	3,98
174	Pareto Tasarım	0,981	5,89	-0,0659	0,669	0,0871	2,32
175	Başarısız Tasarım	0,981	5,89	0,0324	-1,8	0,238	5,22
176	Olası Tasarım	0,915	5,91	-0,142	1,08	-0,185	-1,13
177	Pareto Tasarım	0,851	5,91	-0,0242	3,85	-0,197	-1,67
178	Olası Tasarım	1,08	5,89	0,43	3,8	0,188	4,2
179	Olası Tasarım	0,972	5,9	-0,18	0,711	0,16	3,98
180	Pareto Tasarım	1,07	5,89	0,452	4,08	0,189	4,21
181	Olası Tasarım	1,14	5,89	0,507	3,46	0,189	3,91
182	Olası Tasarım	1,01	5,89	-0,141	0,711	0,242	3,98

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

183	Olası Tasarım	1,05	5,88	-0,024	3,85	0,207	-1,73
184	Olası Tasarım	0,875	5,91	-0,0606	3,85	0,11	4,26
185	Olası Tasarım	0,933	5,9	-0,0195	3,85	0,226	4,17
186	Pareto Tasarım	1	5,89	-0,14	0	0,215	4,3
187	Olası Tasarım	0,817	5,92	-0,0063	3,2	-0,188	4,29
188	Pareto Tasarım	0,952	5,89	-0,0063	3,85	0,209	2,95
189	Pareto Tasarım	0,925	5,9	-0,00673	3,85	0,195	4,11
190	Olası Tasarım	0,89	5,91	-0,122	3,86	0,189	5,51
191	Pareto Tasarım	0,811	5,92	-0,043	3,9	-0,289	-1,23
192	Olası Tasarım	0,857	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-1,23
193	Olası Tasarım	1,13	5,87	-0,122	3,85	0,371	-0,675
194	Pareto Tasarım	0,8	5,92	-0,043	3,9	-0,138	4,06
195	Pareto Tasarım	0,928	5,9	-0,0063	3,85	0,156	2,94
196	Olası Tasarım	0,818	5,92	-0,0242	3,85	-0,31	-1,84
197	Olası Tasarım	1,12	5,87	0,228	3,9	0,209	-1,23
198	Pareto Tasarım	0,869	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-2,21
199	Olası Tasarım	0,917	5,9	-0,0063	3,85	0,189	4,46
200	Pareto Tasarım	0,903	5,9	-0,0439	4,23	0,195	4,2
201	Olası Tasarım	1,03	5,89	-0,224	-1,06	0,195	3,98
202	Olası Tasarım	0,932	5,9	-0,137	3,76	0,242	4,11
203	Pareto Tasarım	0,864	5,91	-0,0247	3,85	0,0152	2,88
204	Olası Tasarım	1,06	5,88	-0,00579	3,85	0,209	-1,61
205	Olası Tasarım	1,19	5,87	-0,0112	0,669	0,436	2,61

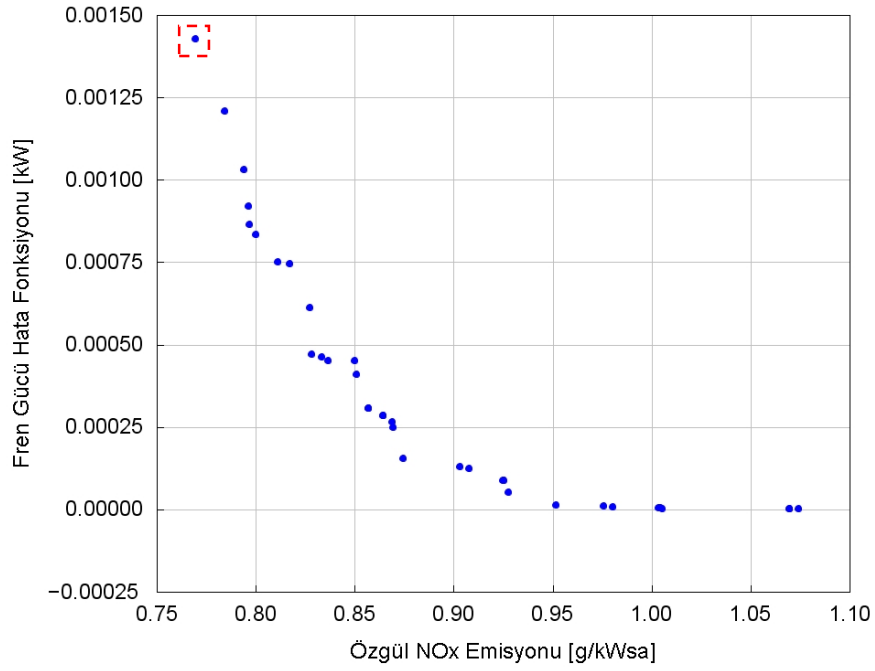
Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

206	Olası Tasarım	0,885	5,91	-0,122	4,42	0,188	4,9
207	Olası Tasarım	0,802	5,92	-0,0063	3,82	-0,174	4,29
208	Olası Tasarım	1,1	5,89	0,43	3,2	0,189	4,59
209	Pareto Tasarım	0,908	5,9	-0,0558	3,85	0,189	4,2
210	Olası Tasarım	0,942	5,91	0,442	3,91	-0,138	4,3
211	Olası Tasarım	0,802	5,92	-0,0102	3,85	-0,17	4,12
212	Olası Tasarım	0,91	5,9	-0,132	3,6	0,189	4,44
213	Pareto Tasarım	0,875	5,9	-0,0242	4,39	-0,0581	-1,34
214	Olası Tasarım	0,894	5,9	-0,00673	3,85	0,108	3,78
215	Olası Tasarım	1,31	5,85	0,43	3,9	0,31	-2,94
216	Olası Tasarım	0,798	5,92	-0,043	3,85	-0,138	4,38
217	Olası Tasarım	0,827	5,92	-0,399	3,85	-0,138	2,88
218	Pareto Tasarım	0,836	5,91	-0,0279	3,8	-0,0703	2,44
219	Pareto Tasarım	0,827	5,92	-0,0063	3,84	-0,126	2,8
220	Olası Tasarım	1,23	5,85	-0,0414	3,22	0,402	-2,06
221	Olası Tasarım	0,925	5,9	-0,00673	3,85	0,195	4,11
222	Olası Tasarım	0,817	5,92	-0,152	3,8	-0,138	2,43
223	Olası Tasarım	0,887	5,9	-0,043	3,9	-0,131	-3,24
224	Olası Tasarım	0,8	5,92	-0,043	3,9	-0,138	4,06
225	Olası Tasarım	1,08	5,89	0,43	3,85	0,189	3,96
226	Olası Tasarım	0,837	5,92	-0,136	1,9	-0,17	4,11
227	Pareto Tasarım	0,769	5,93	-0,043	3,9	-0,457	-1,78
228	Olası Tasarım	0,807	5,92	-0,043	3,9	-0,338	-2,31

Tablo 5.8 Tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar (devamı)

229	Pareto Tasarım	0,784	5,93	-0,152	3,8	-0,289	2,43
230	Pareto Tasarım	0,857	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-1,23
231	Pareto Tasarım	0,834	5,91	-0,0279	3,91	-0,0703	2,44
232	Pareto Tasarım	0,797	5,92	-0,043	4,02	-0,289	0,0444
233	Pareto Tasarım	0,829	5,91	-0,0287	4,14	-0,0703	2,33
234	Olası Tasarım	0,947	5,9	-0,0857	1,23	0,0871	3,13
235	Olası Tasarım	0,866	5,91	-0,136	3,85	-0,139	-1,83
236	Pareto Tasarım	0,797	5,92	-0,0244	3,85	-0,169	4,26
237	Olası Tasarım	0,91	5,92	0,379	3,85	-0,3	2,63
238	Pareto Tasarım	0,85	5,91	0,00728	3,9	-0,204	-1,06
239	Pareto Tasarım	0,864	5,91	-0,0247	3,85	0,0152	2,88
240	Olası Tasarım	0,875	5,91	-0,0279	3,8	0,0267	2,44

240 tasarım seti sonucundan 35 tanesi Pareto tasarım olarak elde edilmiş olup bu tasarım setlerinin sonuçları Şekil 5.20’de görülmektedir.



Şekil 5.20 Pareto tasarımlarının fren gücü hata fonksiyonu - NO_x emisyonu sonuçları

Pareto tasarım olarak belirlenen sonuçlar incelendiğinde fren gücü değerlerinin hedef değer olan 5,89 kW ve üstü değerler olduğu, NO_x emisyonu değerlerinin de baz durumda elde edilen 1,03 g/kWsa değerinin biraz üzerinde olmasına karşın 1,07 g/kWsa ve bunun altında elde edilen değerlerden oluştuğu görülmektedir. Elde edilen Pareto tasarımları arasında optimum çözümün seçimi için üçüncü bir değerlendirme kriterinin de eklenmesi gerekmektedir. Çünkü NO_x emisyonunun minimum olduğu parametre setinin mi yoksa hedef gücün sıfıra en yakın hatayla elde edildiği ve NO_x'un da minimum olduğu değer mi seçileceği veya farklı bir seçim kriterinin mi uygulanacağı kullanıcının hedeflerine ve beklentilerine göre değişmektedir. Pareto tasarımlarının tasarım setlerinde kullanılan değerler ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5.9 Pareto tasarım setleri ve elde edilen sonuçlar

Sıra Nu.	Tasarım Nu.	NO_x Emisyonu	Fren Gücü	DELTA_qPI1	DELTA_PhiPI1	DELTA_qPI2	DELTA_PhiPI2
-	-	g/kWsa	kW	mg	°KA	mg	°KA
1	39	1,07	5,89	0,43	3,85	0,189	4,2
2	94	1	5,89	-0,142	0	0,215	4,3
3	126	0,925	5,9	-0,0063	3,85	0,195	4,11
4	131	0,794	5,92	-0,136	3,85	-0,17	4,11
5	142	0,976	5,89	-0,0659	0,843	0,0871	2,32
6	143	0,869	5,91	-0,0242	3,85	-0,138	-1,67
7	155	0,817	5,92	-0,152	3,8	-0,138	2,43
8	158	0,857	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-1,23
9	172	1,07	5,89	0,452	4,08	0,189	4,21
10	173	1,01	5,89	-0,141	0,711	0,242	3,98
11	174	0,981	5,89	-0,0659	0,669	0,0871	2,32
12	177	0,851	5,91	-0,0242	3,85	-0,197	-1,67
13	180	1,07	5,89	0,452	4,08	0,189	4,21
14	186	1	5,89	-0,14	0	0,215	4,3
15	188	0,952	5,89	-0,0063	3,85	0,209	2,95
16	189	0,925	5,9	-0,00673	3,85	0,195	4,11
17	191	0,811	5,92	-0,043	3,9	-0,289	-1,23
18	194	0,8	5,92	-0,043	3,9	-0,138	4,06
19	195	0,928	5,9	-0,0063	3,85	0,156	2,94
20	198	0,869	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-2,21
21	200	0,903	5,9	-0,0439	4,23	0,195	4,2
22	203	0,864	5,91	-0,0247	3,85	0,0152	2,88
23	209	0,908	5,9	-0,0558	3,85	0,189	4,2
24	213	0,875	5,9	-0,0242	4,39	-0,0581	-1,34
25	218	0,836	5,91	-0,0279	3,8	-0,0703	2,44
26	219	0,827	5,92	-0,0063	3,84	-0,126	2,8
27	227	0,769	5,93	-0,043	3,9	-0,457	-1,78
28	229	0,784	5,93	-0,152	3,8	-0,289	2,43
29	230	0,857	5,91	-0,043	3,9	-0,138	-1,23
30	231	0,834	5,91	-0,0279	3,91	-0,0703	2,44
31	232	0,797	5,92	-0,043	4,02	-0,289	0,0444
32	233	0,829	5,91	-0,0287	4,14	-0,0703	2,33
33	236	0,797	5,92	-0,0244	3,85	-0,169	4,26
34	238	0,85	5,91	0,00728	3,9	-0,204	-1,06
35	239	0,864	5,91	-0,0247	3,85	0,0152	2,88

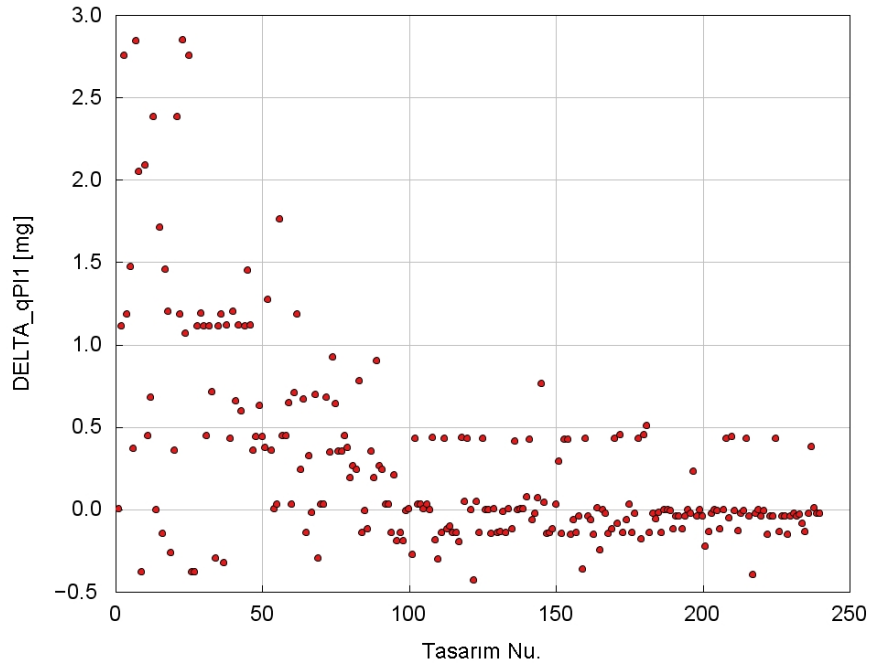
Yapılan çalışmada Pareto tasarım setlerinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde 227 numaralı tasarım seti ile 0,769 g/kWsa değerindeki minimum NO_x emisyonu elde edilirken 5,93 kW fren gücü değeri ile de baz durumdaki ve aynı zamanda hedef değer olan 5,89 kW değerinin de üzerine çıkmıştır. Bu tasarım seti her iki

parametre açısından da olumlu sonuçlar verdiği için optimum nokta olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak optimizasyon çalışmasında başlangıç ve sonuç olarak elde edilen değerler ve kullanılan çoklu ön püskürtme parametre değerleri Tablo 5.10'da gösterilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda NO_x emisyonu %25,34 oranında azalırken, fren gücü %0,68 oranında artmıştır.

Tablo 5.10 Optimizasyon öncesi ve sonrasında elde edilen parametre setleri ve sonuçları

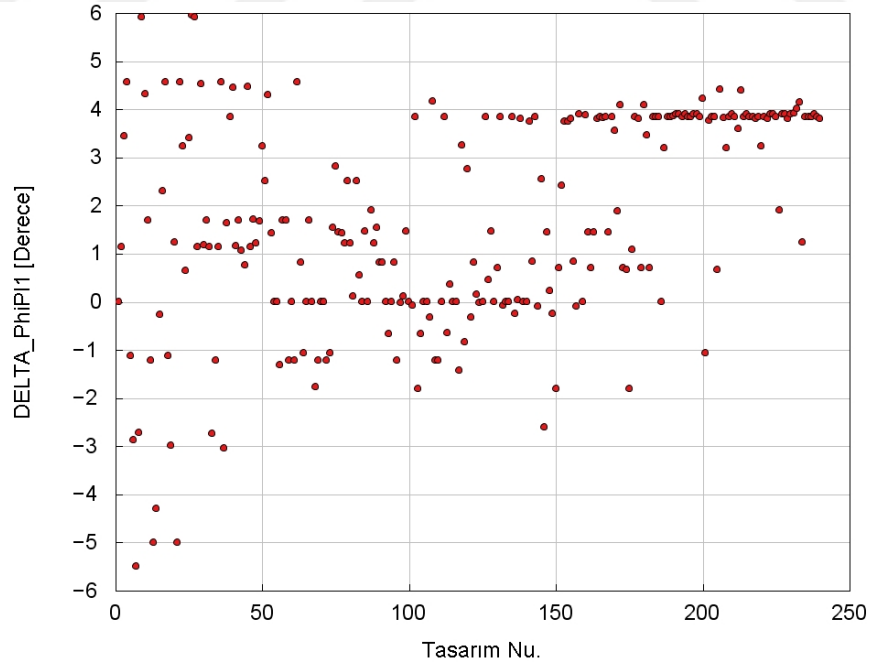
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Optimizasyon Başlangıcı</i>	<i>Optimizasyon Sonucu</i>	<i>Değişim</i>
NO _x Emisyonu	g/kWsa	1,03	0,769	%25,34
Fren Gücü	kW	5,89	5,93	%0,68
DELTA_qPI1	mg	0	-0,043	
DELTA_PhiPI1	°KMA	0	3,9	
DELTA_qPI2	mg	0	-0,457	
DELTA_PhiPI2	°KMA	0	-1,78	
qPI1	mg	1	0,957	
PhiPI1	°KMA	-14,8	-10,9	
qPI2	mg	1	0,543	
PhiPI2	°KMA	-24,6	-26,38	
qMI1	mg	6,27	6,77	
PhiMI1	°KMA	0	0	

Yapılan optimizasyon çalışmasında tüm tasarım setlerinde sırası ile 1.ön püskürtme miktarı üzerinde -0,5 ile 3,0 mg arasında uygulanan değişimler Şekil 5.21'de görülmektedir.



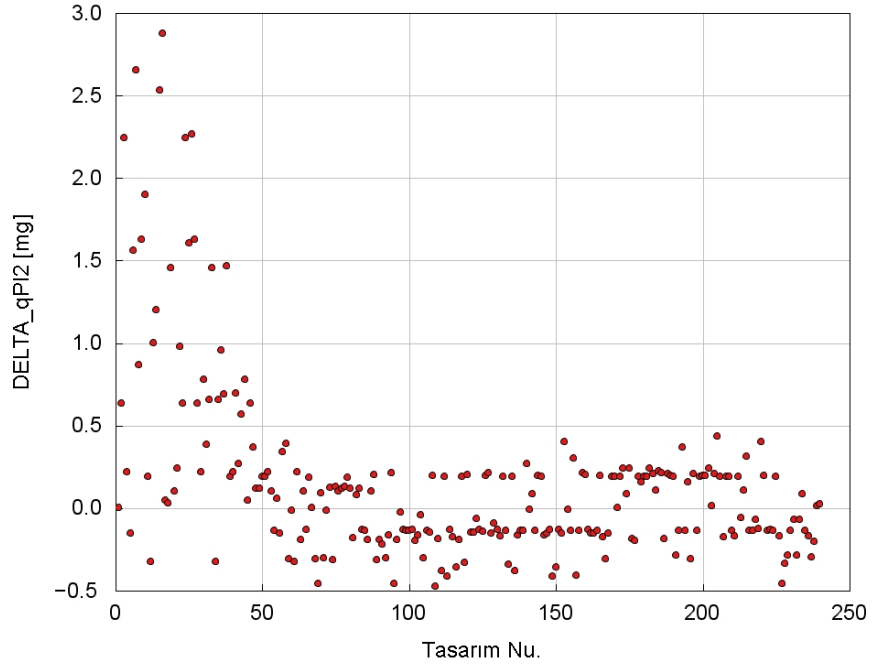
Şekil 5.21 Optimizasyonda uygulanan 1.ön püskürtme miktarı değişimleri

Yapılan optimizasyon çalışmasında tüm tasarım setlerinde sırası ile 1.ön püskürtme açısı üzerinde -6,0 ile +6,0 °KA arasında uygulanan değişimler Şekil 5.22'de görülmektedir.



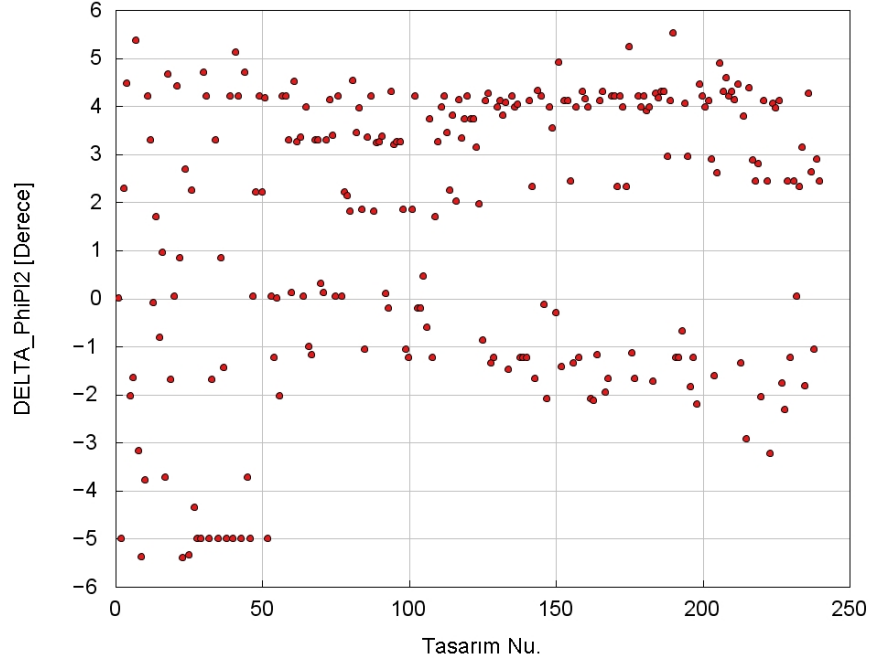
Şekil 5.22 Optimizasyonda uygulanan 1.ön püskürtme açısı değişimleri

Yapılan optimizasyon çalışmasında tüm tasarım setlerinde sırası ile 2.ön püskürtme miktarı üzerinde -0,5 ile 3,0 mg arasında uygulanan değişimler Şekil 5.23'de görülmektedir.



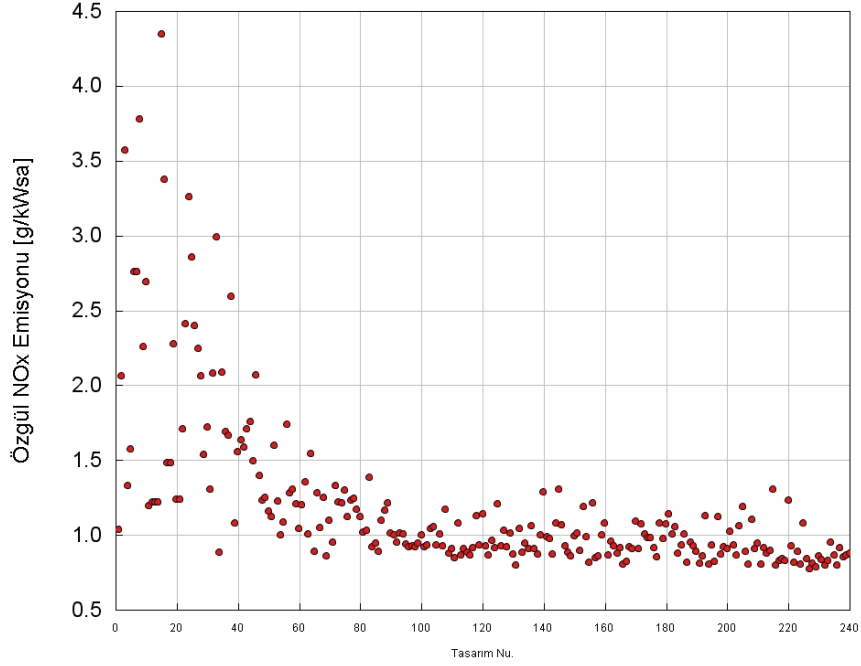
Şekil 5.23 Optimizasyonda uygulanan 2.ön püskürtme miktarı değişimleri

Yapılan optimizasyon çalışmasında tüm tasarım setlerinde sırası ile 2.ön püskürtme açısı üzerinde -6,0 ile +6,0 °KA arasında uygulanan değişimler Şekil 5.24'de görülmektedir.



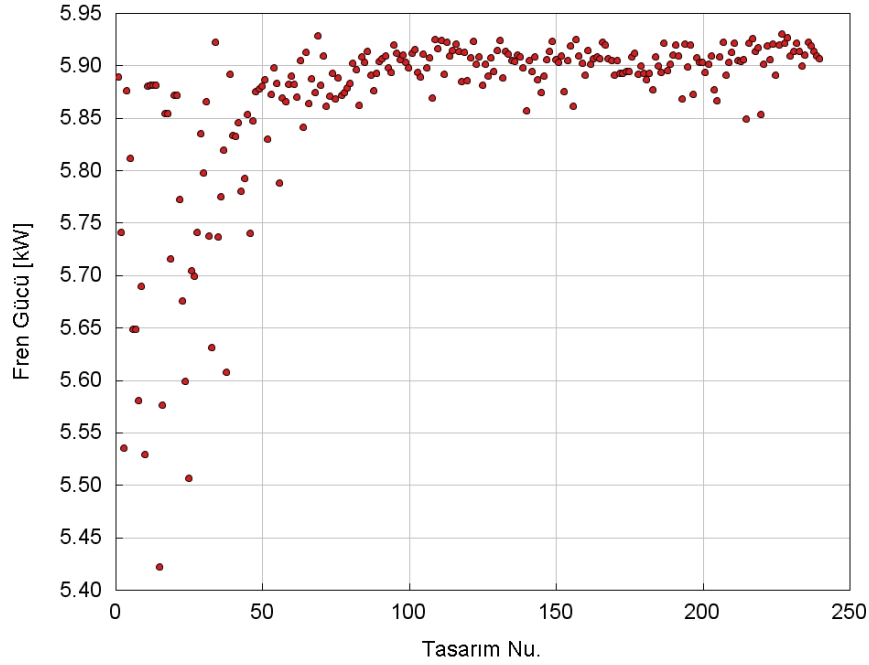
Şekil 5.24 Optimizasyonda uygulanan 2.ön püskürtme açısı değişimleri

Optimizasyon çalışmasında her bir tasarımda elde edilen ve NO_x emisyonlarının optimizasyon adımları ilerledikçe gittiği nokta Şekil 5.25’de görülmektedir. Algoritmanın 60. Tasarım adımından itibaren belirli bir değer çevresinde sonuçlar üretecek tasarım setlerini oluşturduğu anlaşılmaktadır.



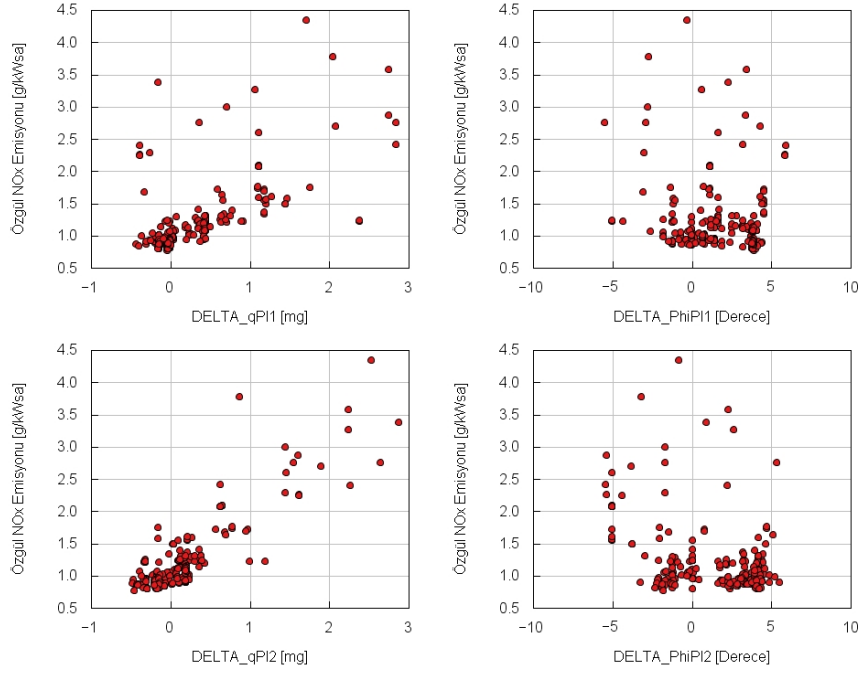
Şekil 5.25 Optimizasyonda her tasarım setinde elde edilen NO_x emisyonu değerleri

Optimizasyon çalışmasında her bir tasarımda elde edilen ve fren gücü değerlerinin optimizasyon adımları ilerledikçe gittiği nokta Şekil 5.26'da görülmektedir. Algoritmanın 60. Tasarım adımından itibaren belirli bir değer çevresinde sonuçlar üretecek tasarım setlerini oluşturduğu anlaşılmaktadır.



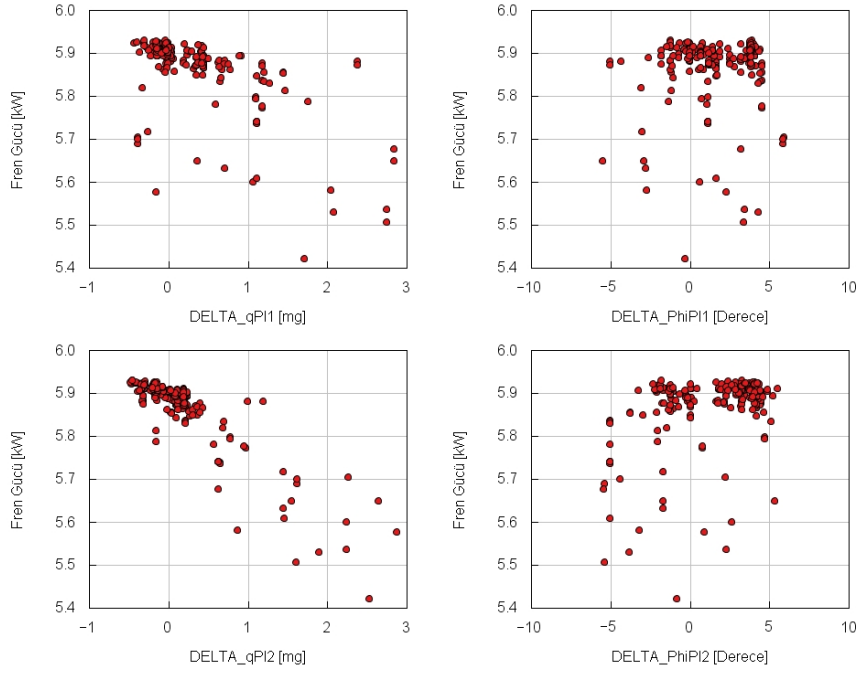
Şekil 5.26 Optimizasyonda her tasarım setinde elde edilen fren gücü değerleri

NO_x emisyonu parametresinin her bir çoklu ön püskürtme parametresinin uygulanan değerlerinde elde edilen sonuçları Şekil 5.27'de görülmektedir. Bu grafiklerde sol üstte her bir 1.ön püskürtme miktarı değişiminde elde edilen NO_x emisyonu değerleri, sol altta her bir 2.ön püskürtme miktarı değişiminde elde edilen NO_x emisyonu değerleri, sağ üstte her bir 1.ön püskürtme açısı değişiminde elde edilen NO_x emisyonu değerleri ve sağ altta her bir 2.ön püskürtme açısı değişiminde elde edilen NO_x emisyonu değerleri görülmektedir. Bu grafiklerde NO_x emisyonunun her bir çoklu ön püskürtme parametresine olan duyarlılık analizi de hesaplanmaktadır. Ancak burada diğer parametrelerinde aynı anda değiştiği dikkate alınmalıdır.



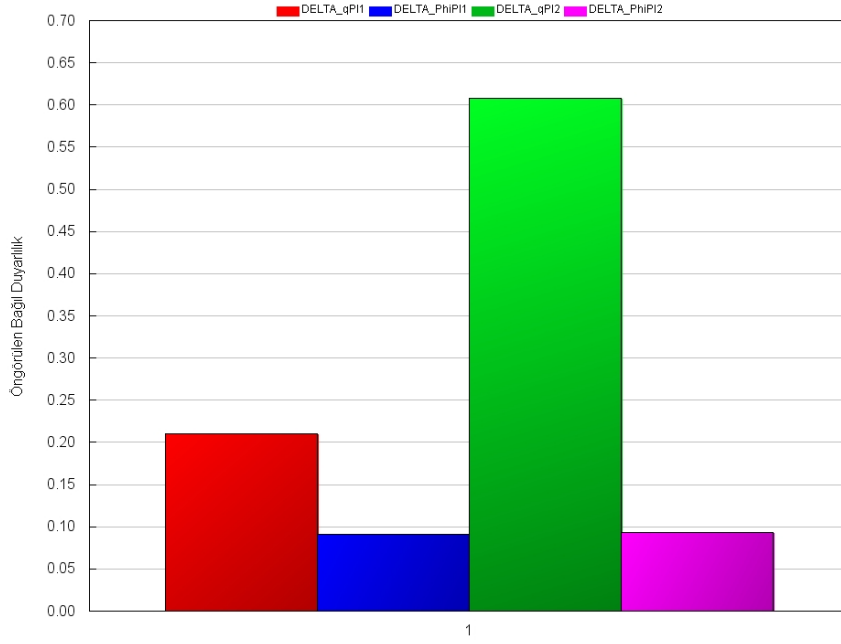
Şekil 5.27 NO_x emisyonu değerlerinin çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimi ile ilişkisi

Benzer şekilde fren gücü parametresinin her bir çoklu ön püskürtme parametresinin uygulanan değerlerinde elde edilen sonuçları Şekil 5.28’de görülmektedir. Bu grafiklerde sol üstte her bir 1.ön püskürtme miktarı değişiminde elde edilen fren gücü değerleri, sol altta her bir 2.ön püskürtme miktarı değişiminde elde edilen fren gücü değerleri, sağ üstte her bir 1.ön püskürtme açısı değişiminde elde edilen fren gücü değerleri ve sağ altta her bir 2.ön püskürtme açısı değişiminde elde edilen fren gücü değerleri görülmektedir. Bu grafiklerde fren gücünün her bir çoklu ön püskürtme parametresine olan duyarlılık analizi de hesaplanmaktadır. Ancak burada diğer parametrelerinde aynı anda değiştiği dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.28 Fren gücü değerlerinin çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimi ile ilişkisi

Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO_x emisyonu üzerindeki bağıl duyarlılık analizi sonuçları Şekil 5.29’da görülmekte olup bu sonuçların daha önce deney matrisi çalışmasında yapılan bağıl duyarlılık analizi ile karşılaştırma sonuçları Tablo 5.11’de görülmektedir. Optimizasyon çalışmasında elde edilen bağıl duyarlılık analizi sonuçları hesaplanırken diğer çoklu ön püskürtme parametrelerinin değiştiği de dikkate alınmalıdır. Deney matrisi çalışmasında diğer tüm parametreler sabit tutulurken sadece bir parametrenin değiştirildiği durumda bağıl duyarlılık analizi sonuçları hesaplanmaktadır.

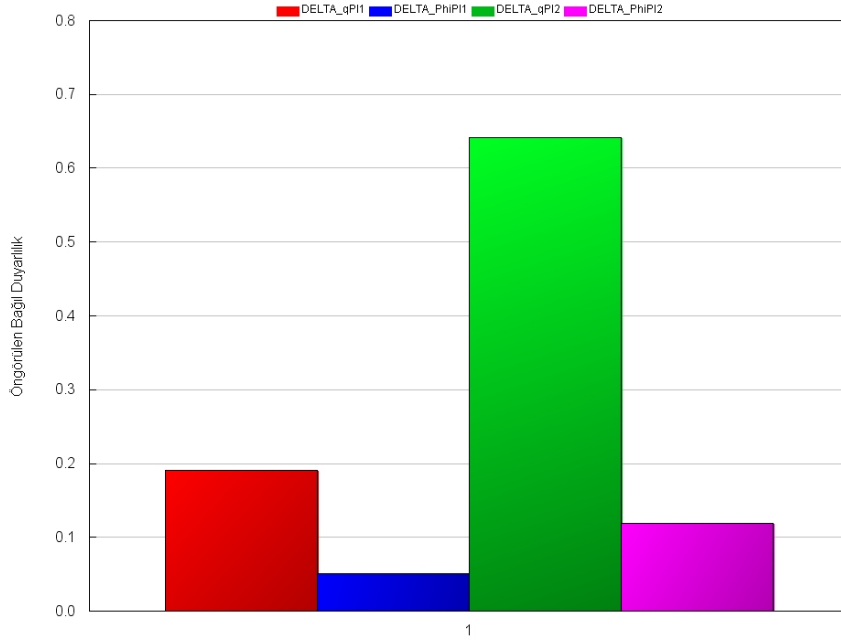


Şekil 5.29 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin NO_x emisyonu üzerindeki bağıl duyarlılık analizi

Tablo 5.11 NO_x emisyonu üzerinde optimizasyon ve deney matrisi ile elde edilen duyarlılık değerleri

<i>Parametre</i>	<i>DELTA_qPI1</i>	<i>DELTA_PhiPI1</i>	<i>DELTA_qPI2</i>	<i>DELTA_PhiPI2</i>
Optimizasyon	0,21	0,0903	0,608	0,0923
Deney Matrisi	0,2839	0,2231	0,3723	0,1208

Benzer şekilde optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki bağıl duyarlılık analizi sonuçları Şekil 5.30'da görülmekte olup bu sonuçların daha önce deney matrisi çalışmasında yapılan bağıl duyarlılık analizi ile karşılaştırma sonuçları Tablo 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.30 Çoklu ön püskürtme parametrelerinin fren gücü üzerindeki bağıl duyarlılık analizi

Tablo 5.12 Fren gücü üzerinde optimizasyon ve deney matrisi ile elde edilen duyarlılık değerleri

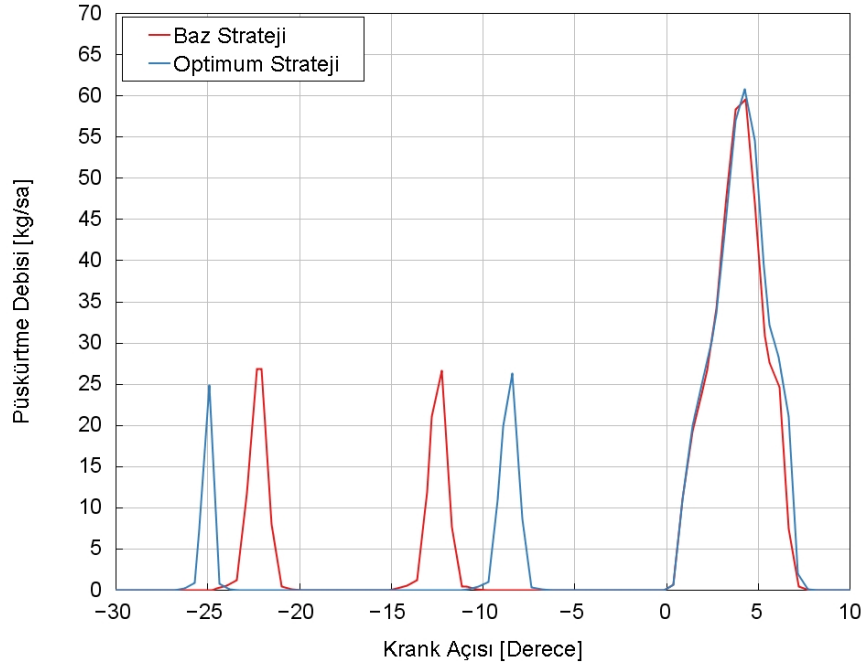
<i>Parametre</i>	<i>DELTA_qPI1</i>	<i>DELTA_PhiPI1</i>	<i>DELTA_qPI2</i>	<i>DELTA_PhiPI2</i>
Optimizasyon	0,19	0,0504	0,641	0,118
Deney Matrisi	0,2186	0,1725	0,4612	0,1477

Baz durum ile optimizasyon sonucu elde edilen optimum çoklu püskürtme parametreleri kullanılarak elde edilen performans ve emisyon sonuçları Tablo 5.13’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.13 Baz durum ile optimum durumun karşılaştırılması

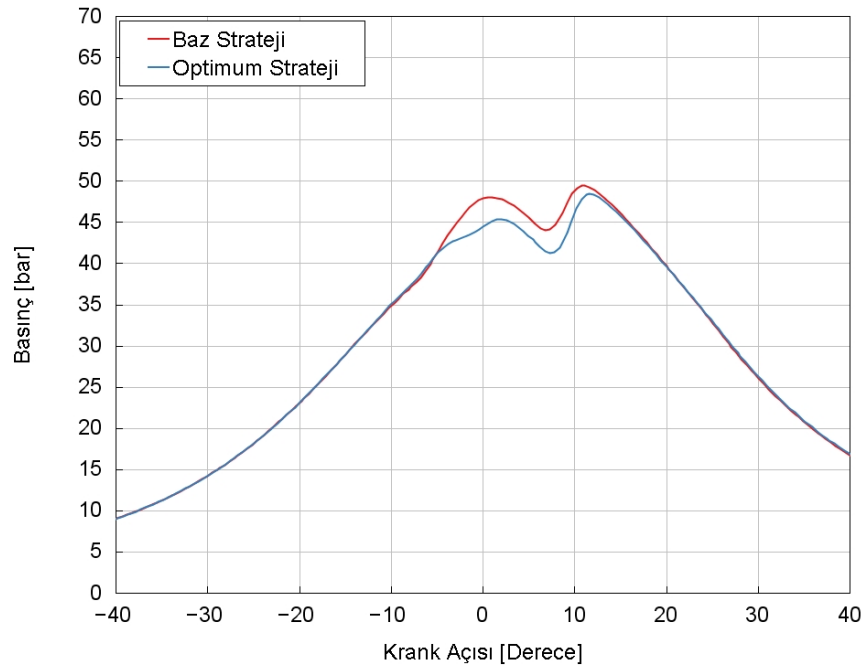
<i>Parametre</i>	<i>Birim</i>	<i>Baz Durum</i>	<i>Optimum Durum</i>
OİEB	bar	3,8748443	3,893424
Fren Gücü	kW	5,8888574	5,929111
MSİB	bar	49,41211	48,39323
Maks. Sıcaklık	K	1480,6154	1483,6136
Yanma Başlangıcı	°KMA	-8,003817	-8,9165745
MFB50	°KMA	8,631669	9,385125
NO _x Emisyonu	g/kWsa	1,032516	0,76949155
İs Emisyonu	g/kWsa	0,015431126	0,013501905
Türbin Giriş Sıcaklığı	K	562,8116	565,1973

Baz durum ile optimum durumda toplamda 8,27 mg yakıtın iki ön ve bir ana püskürtme ile silindir içine girişleri Şekil 5.31’de görülmektedir.



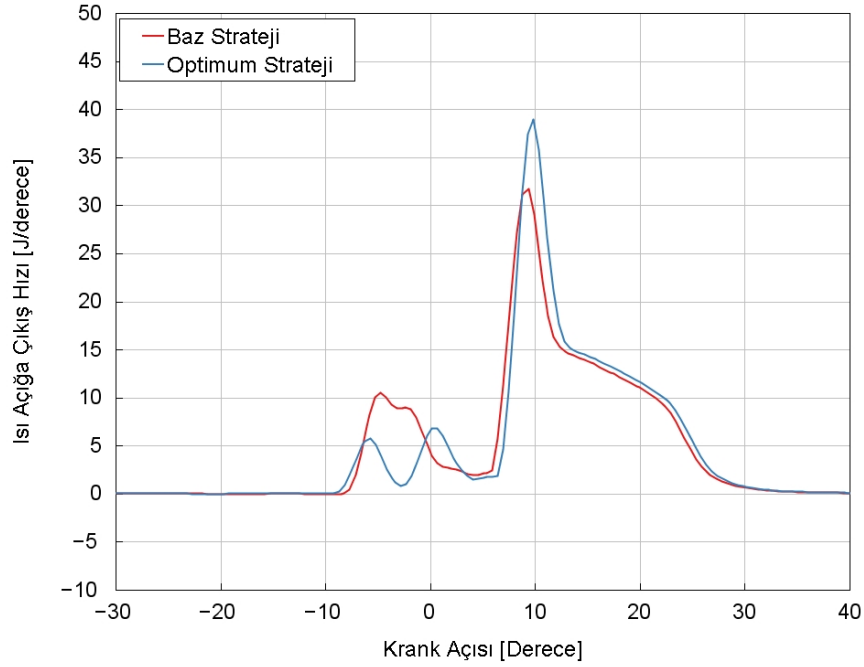
Şekil 5.31 Baz durum ve optimum durumda yapılan püskürtme debi grafikleri

Baz durum ile optimum durumda elde edilen silindir içi basınç grafiği Şekil 5.32’de görülmektedir.



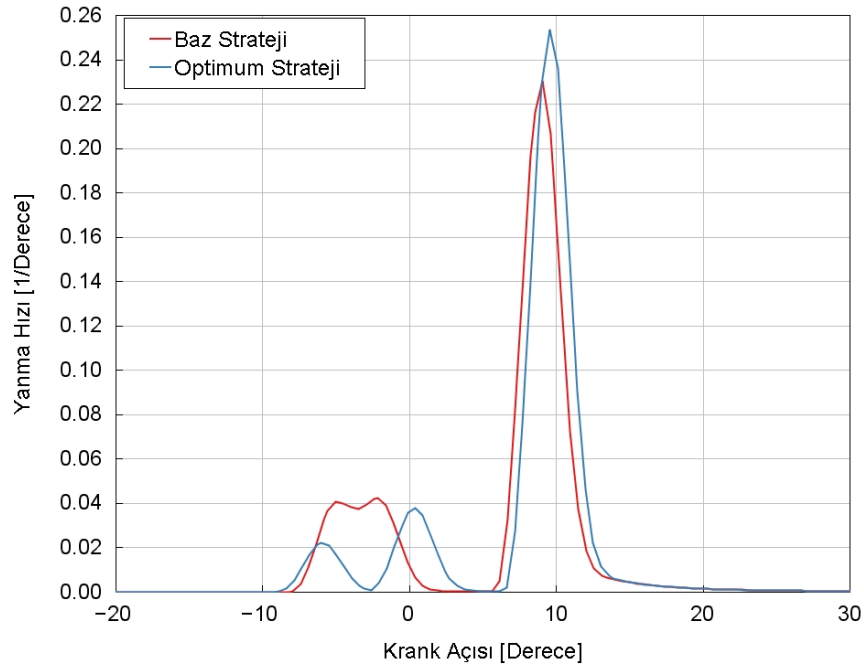
Şekil 5.32 Baz durum ve optimum durumda elde edilen silindir içi basınç grafikleri

Oluşan silindir içi basınç grafikleri Şekil 5.33’de görülen ısı açığa çıkış hızı grafikleri incelendiğinde anlamlı hale gelmektedir. Isı açığa çıkışının kesintiye uğrayarak oluşması silindir içi basıncında hızlı bir şekilde daha yüksek değerlere ulaşmasını engellemiştir.

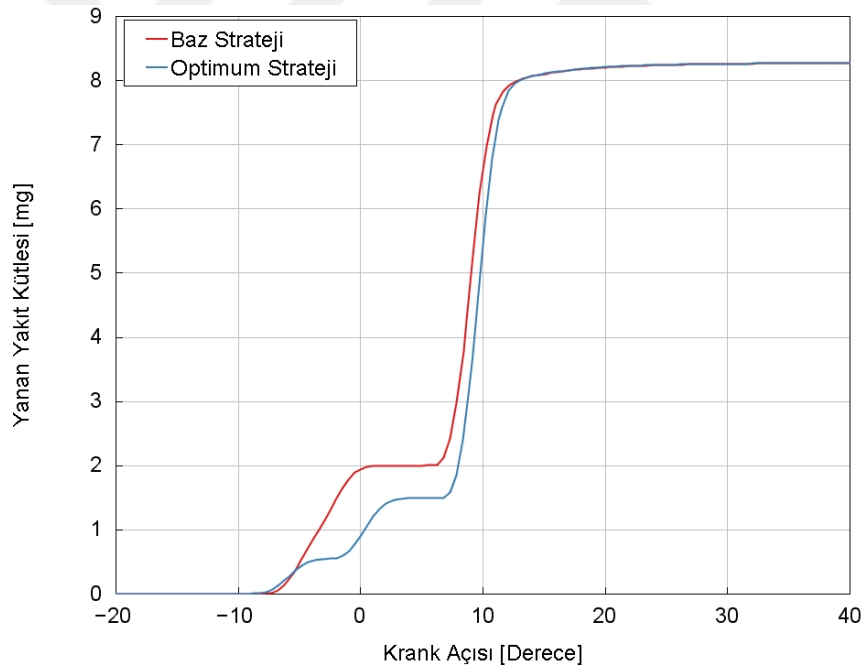


Şekil 5.33 Baz durum ve optimum durumda elde edilen ısı açığa çıkış hızı grafikleri

Silindir içine gönderilen yakıtın baz durum ve optimum durumdaki yanma hızı grafikleri ve yanan yakıt miktarı grafikleri sırasıyla Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de görülmektedir.



Şekil 5.34 Baz durum ve optimum durumda elde edilen yanma hızı grafikleri



Şekil 5.35 Baz durum ve optimum durumda elde edilen yanan yakıt miktarı grafikleri

Optimizasyon çalışması sonucunda optimum durum olarak seçilen tasarım seti farklı değerlendirme kriterleri ile değişiklik gösterebilecektir. Bununla birlikte optimizasyon çalışması gerçek motor kontrol ünitesi ve yakıt püskürtme sistemi yetenekleri ve hassasiyetleri de göz önünde bulundurularak farklı kısıtlamalar altında tekrar edilebilir.

- i. Çoklu ön püskürtme stratejileri kısmi yüklerde is ve NO_x emisyonlarının azaltılması açısından önemli potansiyele sahiptir.
- ii. Modelleme teknikleri, test odalarında geçirilen motor kalibrasyon sürelerini ve test bütçelerini önemli ölçüde azaltmakta ve optimizasyon algoritmaları ile en iyi püskürtme ve motor işletme parametrelerinin öngörülebilmesi mümkün olmaktadır.
- iii. Çalışmada kullanılan öngörülü yanma modeli silindir içi basıncın öngörülmesinde çok başarılı olmuş ve çoklu ön püskürtme parametrelerindeki ve motor işletme koşullarındaki en küçük değişimlere cevap verebilmiştir. Motorun oldukça geniş aralıktaki yük ve hız değişimlerine karşı tutarlı sonuçlar üretebilmiştir.
- iv. 1. ve 2.ön püskürtme miktarlarının artırılması, toplam OİEB üzerinde negatif etkiye sahip olan sıkıştırma stroku OİEB değerlerinin artmasına ve azalan ana püskürtme miktarı sebebiyle özellikle 20°KA'ndan sonra daha düşük genişleme stroku OİEB değerleri sebebiyle indike verimin ve toplam OİEB'nin düşmesine neden olmuştur.
- v. 1.ön püskürtme miktarının artırılması silindir içi sıcaklıkları yükselterek, soğutma suyuna olan ısı transferini artırmış ve fren termal veriminin azalmasına neden olmuştur.
- vi. 1.ön püskürtme miktarının artırılması silindir içi sıcaklıkları yükselttiğinden NO_x emisyonlarını artırmış, is emisyonlarını ise azaltmıştır.
- vii. 1.ön püskürtme avansının artırılması, 2.ön püskürtmenin yanmasını takiben sıcaklığın artarak devam etmesini ve ana püskürtmeden önce tek bir ısı açığa çıkış tepesi görülmesini sağlamış ve daha yüksek NO_x emisyonlarının oluşmasına neden olmuştur.
- viii. 1.ön püskürtme avansının azaltılması ısı açığa çıkışının ana püskürtmeden önce iki ayrı tepe olarak oluşmasını sağlamış ve performans sonuçlarını iyileştirmiştir.

- ix. 2.ön püskürtme miktarının artırılması, 1.ön püskürtme miktarının artması ile benzer etkiler oluşturmuş olup, performans ve emisyon sonuçlarını olumsuz yönde daha fazla etkilemiştir.
- x. 2.ön püskürtme miktarının artırılmasını yanma başlangıcının değişimi konusunda 1.ön püskürtme miktarından daha etkili olmuştur.
- xi. 2.ön püskürtme avansının artırılması silindir içi basınç eğrisi üzerinde önemli bir değişiklik oluşturmamıştır.
- xii. Emisyonlar üzerinde en az etkiye sahip olan bu parametrenin minimum NO_x emisyonu avansın azaltıldığı durumda elde edilmiştir.
- xiii. Ortalama indike efektif basınç üzerindeki en etkili parametre 2.ön püskürtme miktarının değişimi olurken diğer çoklu ön püskürtme parametreleri birbirine yakın etkilere sahip olmuşlardır.
- xiv. Maksimum silindir içi basınç ve yakıtın %50'sinin yandığı açı üzerinde sırasıyla 2.ön püskürtme miktarı ve 1.ön püskürtme miktarının değişimleri önemli ölçüde etkiye sahip olurken, sonrasında 1.ön püskürtme açısının değişimi ve en düşük olarak da 2.ön püskürtme açısının değişimi etki sahibi olmuştur.
- xv. NO_x emisyonu üzerinde ise 2.ön püskürtme açısının değişimi haricinde, 2.ön püskürtme miktarının değişimi başta olmak üzere tüm çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimlerinin önemli derecede etkisi olmuştur.
- xvi. Çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimi ile is emisyonu arasında yüksek hava yakıt oranı sebebiyle lineer bir ilişki kurulamamıştır.
- xvii. Genetik algoritma kullanılarak yapılan çoklu hedefli optimizasyon sonucunda NO_x emisyonları %25 oranında azaltılırken hedef güç değeri artırılabilmiştir.
- xviii. Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum çoklu ön püskürtme stratejisinde 2.ön püskürtme avansının artırılması hariç diğer tüm parametreler baz püskürtme stratejisine göre NO_x emisyonunu azaltıcı ve fren gücünü artırıcı yönde hareket etmiştir.
- xix. Gelecek çalışmalar için optimizasyonda kullanılan çoklu ön püskürtme parametrelerinin değişimlerine, EGR oranı ve ray basıncı değişimi faktörleri

de eklenebilecek ve performans ve emisyon üzerine etkileri araştırılabilecektir.

- xx. Optimizasyonda kullanılan genetik algoritma kodunun performansının da değeriendirilebilmesi amacıyla mutasyon oranı, çaprazlama oranı, vb. parametrelerin değışimlerinin optimizasyon ve sonuçlar üzerine etkileri incelenebilir.
- xxi. Çoklu ön püskürtme stratejilerinin uygulandığı durumlarda motorun elektronik kontrol ünitesinde enjektörlerin püskürttüğü miktarların tam olarak istenen miktarlarda gönderilmesini sağlayan enjektör miktar ayarlama fonksiyonunun bulunması faydalı olacaktır.



-
- [1] <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>, 27.12.2021
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards#Emission_standards_for_passenger_cars, 09.01.2022
- [3] ICCT's Comments And Technical Recommendations on Future Euro 7/VII Emission Standards, Berlin, May 7, 2021
- [4] B. Yang, L. Wang, L. Ning, and K. Zeng, "Effects of pilot injection timing on the combustion noise and particle emissions of a diesel/natural gas dual-fuel engine at low load," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, no. x, pp. 822–828, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.126.
- [5] P. Punov, T. Gechev, S. Mihalkov, P. Podevin, and D. Barta, "Experimental study of multiple pilot injection strategy in an automotive direct injection diesel engine," *MATEC Web Conf.*, vol. 234, no. x, pp. 0–4, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201823403007.
- [6] H. K. Suh, "Study on the twin-pilot-injection strategies for the reduction in the exhaust emissions in a low-compression-ratio engine," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 228, no. 3, pp. 335–343, 2014, doi: 10.1177/0954407013511072.
- [7] B. Mohan, W. Yang, and S. K. Chou, "Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, no. x, pp. 664–676, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.051.
- [8] T. Fang, R. E. Coverdill, C. F. Lee, and R. A. White, "Effects of injection angles on combustion processes using multiple injection strategies in an HSDI diesel engine," vol. 87, no. x, pp. 3232–3239, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.05.012.
- [9] M. Zheng and R. Kumar, "Implementation of multiple-pulse injection strategies to enhance the homogeneity for simultaneous low-NO_x and -soot diesel combustion," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 9, pp. 1829–1841, 2009, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.009.
- [10] S. Han, S. Hyun, and C. Sik, "Effects of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel fuel," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 88–98, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.024.
- [11] M. R. Herfatmanesh, P. Lu, M. A. Attar, and H. Zhao, "Experimental investigation into the effects of two-stage injection on fuel injection quantity, combustion and emissions in a high-speed optical common rail diesel engine," *Fuel*, vol. 109, pp. 137–147, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.01.013.
- [12] M. Özkan, D. Burcu, O. Özener, and Y. Hasan, "Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple

- injection strategies : Effect of pre-injection timing,” vol. 53, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.12.034.
- [13] H. K. Suh, “Investigations of multiple injection strategies for the improvement of combustion and exhaust emissions characteristics in a low compression ratio (CR) engine,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5013–5019, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.048.
 - [14] R. Mobasheri, Z. Peng, and S. Mostafa, “Analysis the effect of advanced injection strategies on engine performance and pollutant emissions in a heavy duty DI-diesel engine by CFD modeling,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 33, no. 1, pp. 59–69, 2012, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.10.004.
 - [15] N. Gajarlawar, A. Khetan and G. A. P. Rao, “Investigations of effects of pilot injection with change in level of compression ratio in a common rail diesel engine,” vol. 17, no. 1, pp. 71–80, 2012, doi: 10.2298/TSCI120105154G.
 - [16] N. R. Abdullah, R. Mamat, M. L. Wyszynski, A. Tsolakis and H. Xu, “Effects of pilot injection timing and EGR on a modern V6 common rail direct injection diesel engine,” *International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER2013)*, 1-3 July 2013, Paper ID: P294.
 - [17] Q. Fang, J. Fang, J. Zhuang, and Z. Huang, “Influences of pilot injection and exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions in a HCCI-DI combustion engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 48, pp. 97–104, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.021.
 - [18] T. C. Tow, D. A. Pierpont, and R. D. Reitz, “Reducing Particulate and NO_x Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D . I . Diesel Engine,” *SAE Technical Papers*, 1994, doi: 10.4271/940897.
 - [19] Z. Han, A. Uludogan, G. J. Hampson, and R. D. Reitz, “Mechanism of soot and NO_x emission reduction using multiple-injection in a diesel engine,” in *SAE Technical Papers*, 1996, doi: 10.4271/960633.
 - [20] M. Ikegami, K. Nakatani, and S. Tanaka, “Fuel Injection Rate Shaping and Its Effect on Exhaust Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine Using a Spool Acceleration Type Injection System,” *SAE Technical Papers*, 1997, doi: 10.4271/970347.
 - [21] T. Nishimura, K. Satoh, S. Takahashi, and K. Yokota, “Effects of Fuel Injection Rate on Combustion and Emission in a DI Diesel Engine,” *SAE Technical Papers*, 1998, doi: 10.4271/981929.
 - [22] J. Schommers, F. Duvinage, M. Stotz, A. Peters, S. Ellwanger, K. Koyanagi and H. Gildein, “Potential of Common Rail Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines,” *SAE Technical Papers*, 2000, doi: 10.4271/2000-01-0944.
 - [23] M. Badami, F. Millo, and D. D. D'Amato, “Experimental Investigation on Soot and NO_x Formation in a DI Common Rail Diesel Engine with Pilot Injection,” *SAE Technical Papers*, 2001, doi: 10.4271/2001-01-0657.
 - [24] J. M. Desantes, J. Benajes, S. Molina, and C. A. Gonz, “The modification of the fuel injection rate in heavy-duty diesel engines Part 2 : Effects on

- combustion,” vol. 24, pp. 2715–2726, 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.05.004.
- [25] F. Mallamo, M. Badami, F. Millo, and P. Torino, “Analysis of Multiple Injection Strategies for the Reduction of Emissions , Noise and BSFC of a DI CR Small Displacement Non-Road Diesel Engine,” *SAE Technical Papers*, 2002, doi: 10.4271/2002-01-2672.
 - [26] M. Badami, F. Mallamo, F. millo and E. E. Rossi, “Experimental investigation on the effect of multiple injection strategies on emissions , noise and brake specific fuel consumption of an automotive direct injection common-rail diesel engine,” *Int. J. of Engine Research*, 2003, doi: 10.1243/146808703322743903.
 - [27] Y. Hotta, M. Inayoshi, K. Nakakita, K. Fujiwara and I. Sakata, “Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection,” *SAE Technical Papers*, 2005, doi: 10.4271/2005-01-0928.
 - [28] W. L. Hardy and R. D. Reitz, “An Experimental Investigation of Partially Premixed Combustion Strategies Using Multiple Injections in a Heavy-Duty Diesel Engine,” *SAE Technical Papers*, 2006, doi: 10.4271/2006-01-0917.
 - [29] A. P. Carlucci, A. Ficarella, and D. Laforgia, “Control of the combustion behaviour in a diesel engine using early injection and gas addition,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, pp. 2279–2286, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.016.
 - [30] R. Ehleskog, R. L. Ochoterena, and S. Andersson, “Effects of Multiple Injections on Engine-Out Emission Levels Including Particulate Mass from an HSDI Diesel Engine,” *SAE Technical Papers*, 2007, doi: 10.4271/2007-01-0910.
 - [31] F. Payri, A. Broatch, J. M. Salavert, and J. Martín, “Investigation of Diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 857–865, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.01.014.
 - [32] T. Thurnheer, D. Edenhauser, P. Soltic, D. Schreiber, P. Kirchen, and A. Sankowski, “Experimental investigation on different injection strategies in a heavy-duty diesel engine : Emissions and loss analysis,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 457–467, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.074.
 - [33] H. Hiroyasu, H. Miao, T. Hiroyasu, M. Miki, J. Kamiura, and S. Watanabe, “Genetic algorithms optimization of diesel engine emissions and fuel efficiency with air swirl, EGR, injection timing and multiple injections,” *SAE Technical Papers*, vol. 112, 2003, doi: 10.4271/2003-01-1853.
 - [34] E. Özgül, M. Şimşek, and H. Bedir, “Use of thermodynamical models with predictive combustion and emission capability in virtual calibration of heavy duty engines,” *Fuel*, vol. 264, no. December 2019, p. 116744, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116744.

- [35] E. Özgül and H. Bedir, "Fast NO_x emission prediction methodology via one-dimensional engine performance tools in heavy-duty engines," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 1–16, 2019, doi: 10.1177/1687814019845954.
- [36] N. Srinivas and K. Deb, "Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms," *Evol. Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 221–248, 1994, doi: 10.1162/evco.1994.2.3.221.
- [37] S. Lotfan, R. A. Ghiasi, M. Fallah, and M. H. Sadeghi, "ANN-based modeling and reducing dual-fuel engine's challenging emissions by multi-objective evolutionary algorithm NSGA-II," *Appl. Energy*, vol. 175, pp. 91–99, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.04.099.
- [38] M. M. Etghani, M. H. Shojaeefard, A. Khalkhali, and M. Akbari, "A hybrid method of modified NSGA-II and TOPSIS to optimize performance and emissions of a diesel engine using biodiesel," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 59, no. 1–2, pp. 309–315, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.05.041.
- [39] G. Woschni, "A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine," *SAE Technical Papers*, 1967, doi: 10.4271/670931.
- [40] E. C. for E. of the U. Nations, "Regulation No 83 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements Incorporating," *Off. J. Eur. Union*, no. 83, 2012.
- [41] R. Finesso and E. Spessa, "Ignition delay prediction of multiple injections in diesel engines," *Fuel*, vol. 119, pp. 170–190, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.11.040.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Uluslararası Makale

1. M. Güler, M. Özkan, “Energy balance analysis of a DI diesel engine with multiple pilot injections strategy and optimization of brake thermal efficiency,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 204, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117972

Uluslararası Kongre

1. M. Güler, M. Özkan, “Emission And Performance Optimization of A DI Diesel Engine Operating with Multiple Pilot Injections Strategy at Part Load,” *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD’21*, 22-25 Aralık 2021, ISBN: 978-605-74234-9-8, 801-816

