

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİESEL MOTORLARINDA PİLOT PÜSKÜRTMENİN PERFORMANS VE
EMİSYON AÇISINDAN OPTİMİZASYONU**

ORKUN ÖZENER

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MUAMMER ÖZKAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİSEL MOTORLARINDA PİLOT PÜSKÜRTMENİN PERFORMANS VE
EMİSYON AÇISINDAN OPTİMİZASYONU**

Orkun ÖZENER tarafından hazırlanan tez çalışması 02.01.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. İrfan YAVAŞLIOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ertuğrul ARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin ERGENEMAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün
2011-06-01-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması aşamasında 6 yıl boyunca benden desteğini esirgemeyen tez danışmanım Doç.Dr.Muammer ÖZKAN'a, süreç boyunca fikirleri ve tavsiyeleri ile yanımda olan tez izleme komitemin üyeleri Prof.İrfan YAVAŞLIOĞLU ve Prof.Dr.Ertuğrul ARSALAN'a ve YTÜ Otomotiv Ana bilim dalı öğretim üyemiz Yrd.Doç.Dr.Tarkan SANDALCI'ya teşekkürlerimi sunarken, yanma ve modellenmesi konusunda çalışmam hususunda beni her zaman cesaretlendirmiş olan merhum hocam Prof.Dr.Orhan DENİZ'i minnetle anıyorum.

1980 Haziran'da mavi kareli battaniyenin üzerinde debelenirken bana bakan bir çift göz olan, henüz altı yaşındayken sarı gömlek ve siyah yeleğimin içerisinde iken analog bir fotoğraf makinesinin deklanşörüne basan, bayram günlerinde en güzel kıyafetlerimizle bozkır kokan topraklarda bize sarılıp fotoğraf karesine dalan, ilk kravat takıp ortaokulun servis yoluna doğru koyulurken ceketimizi sırtıma giydiren ve oğlum artık büyüyorsun diyen, lise yıllarımı bir sengine acem mülkü feda ettiğimiz İstanbul'da geçirebilmem için, Kırkkale'de beşinci kattaki evimizin kapısında yüreğini ortaya koyan, uzatmalı üniversite yıllarında biraz daha gayret gösterebilmem için bana devamlı omuz veren beni büyüten yetiştiren doğduğum günden beridir 33 yıldır kendilerinden fedakarlık ederek bugün bu satırları yazabiliyor olmamı mümkün kılan ve bana nefes veren annem Meral ÖZENER ve babam Yıldırım ÖZENER'e, 50'li yıllarda İstanbul'un Aksaray'ındaki meşhur Sinekli Bakkal sokağının karşı köşesine gelin gelen, 80'li yıllarda sabahın saat dördünde bir tas çorba ısıtıp eşini Gülhane'deki kahvesine yolcu ettikten sonra torununun altını bezleyen, ona camdan sokağı izleten, 70 yaşına geldiğinde ise 18 yaşında delikanlı bir çocuğa bakmaktan, her sabah onu kaldırıp tıpkı o çocuğun annesi ve dayısını da gönderdiği gibi üniversiteye göndermekten hiç yorulmayan, yüzünden ve gözlerinden nur'un hiç eksik olmadığı, Aksaray'ın Sorguççu sokağında arabanızı önüne çekemeyeceğiniz tek camının arkasındaki bir çift göz olan canım anneannem Nuran GÜMÜŞ'e ve bebekken beni kucağında Ufı'nın yürüyen merdivenlerine bindirip gezdiren, rahmetle andığım dedem Hüseyin GÜMÜŞ'e, daha henüz 25'li yaşlarında tek başına evin erkeği olmak zorunda kalan, sanatçının dediği gibi "vay seni Cerrahpaşa'da" bir yanda hasta babası bir yanda kucağında yeni doğmuş yeğeni ile ablası olan, evde bekleyen diğer yeğeninin ise çamaşırlarını yıkamaktan hiç gıcık olmayan her akşam kapıya geldiğinde emekleyerek heyecanla kapıya tırmandığımda beni kucağına alıp "osca" deyişimi duyduğunda bana sıkıca sarılan bu şehri İstanbul'a geldiğimden beridir beni yalnız bırakmayan ve mahallenin ilk meşin

topunu bana getiren ve ilk bisikletimi alan dayım Osman GÜMÜŞ'e, beşli yaşlarımda okulla ilk tanıştığım her sabah beni Ankara Zübeydehanım anaokulu servisine bindiren, rahmetle andığım büyük dedem Naci ÖZENER'e, Efes antik kentindeki fotoğrafta çıkmamak için mavi şapkasının altında kalan iki çift kahverengi gözünü ufak elleriyle kapatan, mahalledeki ilk bıçkın delikanlı günlerinde abim diyip her başım dara düştüğünde yanıma koşan, ilk ve ortaokul yıllarımda sınıflarımızın bile aynı koridorda olmasından dolayı gizliden gizliye mutluluk duyduğum, şimdi ise akşamları iş dönüşleri aynı sofraya oturduğumda yorgunluğumu unuttuğum ve bu çalışmayı hazırlarken son ana kadar en büyük yardımı yapan ve bunun için uykusuz kalan canım kardeşim Hüseyin Barkın ÖZENER'e, canım aileme, sonsuz teşekkürlerimle.

Son olarak; bu süreçte bana destek olan yol arkadaşım Hafize ÖZTÜRK'e, tezimin hazırlanmasında değerli yorumları ve yardımları ile katkıda bulunan, her sabah ofisimin kapısını çalan ve benden sıcak bir günaydını esirgemeyen meslektaşım ve arkadaşım Levent YÜKSEK'e, sıkıntılı zamanlarımda yanımda olan, moral veren değerli arkadaşlarım Ersin YÜCEL ve H.Nadir YAMAN'a ,teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2013

Orkun ÖZENER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMA LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÇİZELGE LİSTESİ	xxxvii
ÖZET	xxxix
ABSTRACT	xlii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	42
1.3 Orijinal Katkı.....	42
BÖLÜM 2	
DİSEL MOTORLARINDA YANMA VE KİRLETİCİ EMİSYONLAR.....	43
2.1 Diesel Motorlarında Yanma	43
2.1.1 Diesel Spreyi ve Püskürtme	46
2.1.2 Diesel Yanmasının Safhaları.....	48
2.2 Diesel Motorlarında Kirletici Emisyonlar.....	50
2.2.1 Azot Oksit Emisyonları (NO _x)	50
2.2.2 Karbon monoksit Emisyonları (CO)	52
2.2.3 Hidrokarbon Emisyonları (HC)	52
2.2.4 Partikül Madde Emisyonları (PM)	54
2.2.5 İs-NO _x Dengesi	56
2.3 Diesel Motorlarında Püskürtmenin Fazlandırılması, Püskürtme Basıncı ve Kirletici Emisyonlar	58
2.3.1 Pilot Püskürtme.....	58
2.3.2 Art Püskürtme	61

2.3.3	Püskürtme Basıncı	62
2.4	Diesel Motorlarında Yanmanın Modellenmesi	62
2.4.1	Termodinamik (1 boyutlu) Modeller	63
2.4.2	Olgusal (Sanki Boyutlu) Modeller	64
2.4.3	Çok Boyutlu Modeller	64
2.4.4	Yapay Sinir Ağları Yöntemi	65

BÖLÜM 3

3.1	Kullanılan Termodinamik Simülasyon Programı (Avl Boost)	67
3.1.2.2	Basit Korunum Denklemleri	72
3.1.2.3	Emme ve egzoz kanallarındaki Kütle Akışının Hesaplanması	73
3.1.2.4	Dolgu Değişiminin Hesaplanması	74
3.1.2.5	Pistonun Hareketinin Hesabı	75
3.1.2.6	Isı Transferinin Hesaplanması	75
3.1.2.7	Kanallarda Isı Transferinin Hesaplanması	76
3.1.2.8	Kartere Kaçan Dolgu Miktarının Hesaplanması (Blow-By)	77
3.1.2.10	Karışım Kontrollü Yanma Modelinin Teorisi (MCC)	79
3.1.2.11	Karışım Kontrollü Yanma Denklemleri	80
3.1.2.12	Yakıt Jeti için Korunum Denklemleri	80
3.1.2.13	Tutuşma Gecikmesinin Hesaplanması	80
3.1.2.14	Ön Karışım Yanma Modeli Denklemleri	81
3.1.2.15	Damlacık Isınması ve Buharlaşması Model Denklemleri	81
3.1.2.17	Azot Oksit (NO_x) Oluşumunun Modellenmesi	82
3.1.2.18	Karbonmonoksit (CO) Oluşumunun Modellenmesi	83
3.1.2.19	İs Oluşumunun Modellenmesi	83

BÖLÜM 4

4.1	Yöntem	99
4.1.1	Motor Deneyleri	102
4.1.1.1	Deney noktaları	102
4.1.2	Tek Boyutlu Termodinamik Paket Program Simülasyonun Yapılması Motor Deneylerinin Sonuçlarının Doğrulanması	115
4.1.2.1	Geometrik Verilerin Programa Girişi	115
4.1.2.2	Termodinamik Modelin Doğrulanması ve Kalibrasyonu	115
4.1.3	Yeni Deney Noktalarının Tek Boyutlu Termodinamik Model ile Simülasyonu	121
4.1.3.1	Yeni Deney Noktaları	121
4.1.3.2	Yeni Parametrelerin Tayini ve Modelin Çalıştırılması	121
4.1.4	Yeni Deney Noktalarının YSA ile Simülasyonu	124
4.1.5	Sonuçların ve Kullanılmış Olan Yöntemin Yorumlanması	125
4.2	ALT MODELLER	125
4.2.1	Enjektör Modeli	125
4.2.1.1	Enjektör Alt Modeli Çalışma Prensibi	125
4.2.2	Silindir İçi Parçaların Sıcaklık Modeli	129
4.2.2.1	Silindir Duvarı Sıcaklığının Hesaplanması	131
4.2.2.2	Silindir Kafası Sıcaklığının Hesaplanması	135

4.2.2.3	Piston Ortalama Sıcaklığının Hesaplanması	136
4.2.3	Sürtünme Modeli	140
BÖLÜM 5		143
DENEY EKİPMANLARI, DENEYLERİN YAPILIŞI, YAKIT ÖZELLİKLERİ VE YAPILMIŞ OLAN DENEYLERİN GRUPLANMASI.....		143
5.1	Deney Motoru , Deney Ölçüm Elemanları , Veri Toplama Ve Deney Otomasyon Yazılımları	143
5.1.1	Deney Motoru.....	143
5.1.2	Dinamometre.....	145
5.1.3	Yakıt Sarfiyatı Ölçümü	147
5.1.4	Yakıt Şartlandırıcısı	148
5.1.5	İs Ölçer.....	149
5.1.6	Egzoz Emisyonları Ölçüm Cihazı (CO,CO ₂ ,NO _x ,THC).....	151
5.1.7	Basınç Analiz Sistemi	155
5.1.8	Emme Havası Debisi Ölçümü	157
5.1.9	Motor Kontrol Ünitesi Kontrolü.....	157
5.1.10	Deney Otomasyon Sistemi	158
5.1.11	Deneylerin yapılması	159
BÖLÜM 6		
SONUÇLAR VE TARTIŞMA		160
6.1	Motor Deneyleri Sonuçları	160
6.1.1	Pilot Püskürtme Avansına Ve Pilot Püskürtme Parametresine Bağlı Olarak Motor Performans Ve Emisyonlarının Değişimi	161
6.1.1.1	n=2000 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =25 mg/çev, P _{yph} =130 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	161
6.1.1.2	n=2000 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =25 mg/çev, P _{yph} =140 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	164
6.1.1.3	n=2000 d/d, AV _{ap} =10°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =25 mg/çev, P _{yph} =120 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	168
6.1.1.4	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	171
6.1.1.5	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2200 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	175
6.1.1.6	n=3750 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =25 mg/çev, P _{yph} =120 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler	178
6.1.2	Motor Performans Ve Emisyonlarının Pilot Püskürtme Avansına Ve Püskürtme Basıncı Parametresine Bağlı Olarak Değişimi	182
6.1.2.1	n=2000 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =25 mg/çev, M _{pil} =2,5 mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler.....	182
6.1.2.2	n=2000 d/d, AV _{ap} =10°KMA, P _{man} =2200 hPa, M _{top} =38 mg/çev, M _{pil} =3,8 mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler.....	185
6.1.2.3	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2300 hPa, M _{top} =45 mg/çev, M _{pil} =2,25 mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler.....	189

6.1.2.4	$n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pij}=1,45$ mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler.....	192
6.1.3	Deney Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma	195
6.1.3.1	Deneylerde Elde Edilen NO_x Sonuçları	195
6.1.3.2	Deneylerde Elde Edilen NO_x Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma	196
6.1.3.3	Deneylerde Elde Edilen İş Emisyonu Sonuçları.....	199
6.1.3.4	Deneylerde Elde Edilen İş Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma	201
6.1.3.5	Deneylerde Elde Edilen CO Emisyonu Sonuçları	201
6.1.3.6	Deneylerde Elde Edilen CO Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma	203
6.1.3.7	Deneylerde Elde Edilen Özgül Yakıt Sarfiyatı (b_e) Sonuçları.....	204
6.1.3.8	Deneylerde Elde Edilen Özgül Yakıt Sarfiyatı (b_e) Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma	208
6.1.3.9	Deneylerde Elde Edilen Ortalama İndike Efektif Basınç (OIB) Sonuçları	209
6.1.3.10	Deneylerde Elde Edilen Ortalama İndike Basınç Sonuçları Yorumlanması ve Tartışma	212
6.2	Tek Boyutlu Termodinamik Paket Program Simülasyonu Ve Motor Deneylerinin Sonuçlarının Doğrulanması Aşamasının Sonuçları	213
6.2.1	REFERANS DENEYLERİN DOĞRULANMASI AŞAMASININ SONUÇLARI	213
6.2.2	PILOT PÜSKÜRTMELİ DENEYLERİN DOĞRULANMASI AŞAMASININ SONUÇLARI	218
6.3	Deneylerden Elde Edilen Ve Simülasyondan Elde Edilen Verilerin Silindir İçi Basınç Grafiklerinin Karşılaştırılması, Isı Açığa Çıkış Grafikleri Ve Sıcaklıklar.....	223
6.3.1	$n=2000$, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=130$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırılması.	224
6.3.2	$n=2000$, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=130$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırılması.	232
6.3.3	$n=2000$, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=120$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırılması.	240
6.3.4	$n=2000$ d/d, $M_{top}=38$ mg/çev, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=130,140,150$ MPa, $P_{man}=2200$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırılması.....	248
6.4	YSA Ve Tek Boyutlu Termodinamik Programın Birlikte Kullanılması	258
6.4.1	Tek Püskürtmenin Yapıldığı Durumlarda Belirlenen Boost Programı Kalibrasyon Parametreleri Ve Simülasyon İçin Gerekli Olan Basınç Ve Sıcaklık Değerleri	260
6.4.1.1	Yanma Parametresi (PRM_{YNM})	260
6.4.1.2	Tutuşma Gecikmesi Parametresi (PRM_{TG}).....	261
6.4.1.3	Azot Oksit Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{NOX})	262
6.4.1.4	Karbon Monoksit Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{CO}).....	262
6.4.1.5	İş Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{IS}).....	263
6.4.1.6	Egzoz Supabı Açıldığı Anda Silindir İçi Sıcaklık Değeri (T_{EGSA})	264
6.4.1.7	Egzoz Supabı Açıldığı Anda Silindir İçi Basınç Değeri (P_{EGSA})	264

6.4.1.8 Egzoz Manifold Sıcaklık Değeri (T_{EGMAN})	265
6.4.1.9 Egzoz Manifold Sıcaklık Değeri (P_{EGMAN})	266
6.4.1.10 Silindir Kovanı AÖN Sıcaklığı (T_{KOVIA}) Ve Silindir Kovanı ÜÖN Sıcaklığı ($T_{KOVİ}$)	266
6.4.1.11 SİLİNDİR KAFASI SICAKLIĞI (T_{KAF})	267
6.4.1.12 Piston Sıcaklığı ($T_{PİS}$)	268
6.4.1.13 Emme Supabı Kapandığı Anda Silindir İçi Basınç (P_{ESK})	268
6.4.1.14 Blow By Değeri (PRM_{BLOW}).....	268
6.4.1 YSA+Tek Boyutlu Termodinamik Simülasyon Programının Birlikte Kullanımının Doğrulanması.	268
6.4.2 YSA+Tek Boyutlu Termodinamik Simülasyon Programının Birlikte Kullanımı İle Elde Edilen Performans Parametrelerinin ve Emisyonların Analiz Grafikleri.	275
6.4.3 Pilot Püskürtme Avansı ve Pilot Püskürtmesine Bağlı Değişim Grafikleri.....	276
6.4.3.1 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ d/d, $Y_{ypb}=120$ MPa şartında yapılan deneyler.	276
6.4.3.2 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılan deneyler.....	279
6.4.4 Pilot Püskürtme Avansı ve Pilot Püskürtme Basıncına Bağlı Değişim Grafikleri.....	283
6.4.4.1 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=10^{\circ}MA$, $P_{man}=2000$ d/d, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılan deneyler.	283
6.4.4.2 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ d/d, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$ şartında yapılan deneyler.	286
6.4.5 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	290
6.4.5.1 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda NO_x Emisyonları.....	290
6.4.5.2 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda NO_x Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma.....	291
6.4.5.3 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda İş Emisyonları.....	291
6.4.5.4 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda İş Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma	292
6.4.5.5 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda CO Emisyonları	293
6.4.5.6 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda CO Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma	294
6.4.5.7 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda OİB'nin değişimi.....	294
6.4.5.8 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda OİB'nin Yorumlanması ve Tartışma	295
6.4.5.9 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda b_e 'nin değişimi.....	295

6.4.5.10 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda b_e 'nin Değişiminin Yorumlanması ve Tartışma	296
6.4.6 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Yöntemi İle Pilot Püskürtmenin Çok Küçük Mikatlar Yapılması Durumunda NO _x Emisyonunun Değerlendirilmesi.....	297
6.5 YSA'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılması	298
6.5.1 YSA'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılmasının Doğrulanma Aşaması	299
6.5.2 YSA'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılması Durumunda Elde Edilen Motor Performans Parametrelerinin ve Emisyonlarının Analiz Grafikleri.	301
6.5.2.1 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.	301
6.5.2.2 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.	304
6.5.2.3 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı YSA Analizleri.	306
6.5.2.4 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.	309
6.5.3 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda Elde Edilen Sonuçların Yorumlanması.....	311
6.5.3.1 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda NO _x Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	311
6.5.3.2 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda İS Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar	312
6.5.3.3 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda CO Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar	313
6.5.3.4 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda OİB İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	314
6.5.3.5 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda b_e İçin Elde Edilen Sonuçlar	314
6.5.3.6 YSA Metodunun Sonuçlarının Değerlendirilmesi	315
BÖLÜM7.....	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	316
KAYNAKLAR.....	319
ÖZGEÇMİŞ	326

SİMGE LİSTESİ

$\left \frac{dm_{yakıt}}{d\varphi} \right _{diff}$	Difüzyon fazında henüz reaksiyona girmemiş yakıt kütlesi
$\sum \frac{dQ_w}{d\alpha}$	Silindir duvar ısı kayıpları
$\dot{m}_{F,I}$	Püskürtülen yakıt kütlesi (gerçek)
$\Delta\alpha_c$	Ön karışimli yanma süresi = $\tau_{id} \cdot C_{PMC-Dur}$
$\frac{1}{\tau_{char}}$	Karakteristik karışma
p_{O_2}	Oksijenin kısmi basıncı
p_{O_2REF}	Oksijenin kısmi referans basıncı
$\frac{d\alpha}{d(m_c \cdot u)}$	Silindir içindeki iç enerjinin değişimi
$\frac{dQ_F}{d\alpha}$	Yakıtın ısı nerji girişi
$\frac{dm_{BB}}{d\alpha}$	Blow-by kütle akışı
$\frac{dm}{dt}$	Kütle akış oranı
$\dot{m}$	Kütle akış oranı
α_{SOI}	Püskürtme zamanının başlangıcı
α_{id}	Tutuşma gecikme zamanı
α_p	Porttaki ısı transfer katsayısı
λ_{Diff}	Difüzyonlu yanma için hava fazlalık katsayısı
ρ_F	Yakıt yoğunluğu
τ_{id}	Tutuşma gecikmesi
$-p_c \cdot \frac{dV}{d\alpha}$	Piston işi
$\mu\sigma$	Portur akış katsayısı
A_0	İs oksidasyonu sabiti
A_B	İs oluşum sabiti
A_{eff}	Efektif akış alanı
AF_{CP}	Yanma ürünlerinin hava yakıt oranı
A_i	Yüzey alanı (silindir kafası, piston, silindir gömleği)
AV_{ap}	Ana püskürtme avansı
AV_{pil}	Pilot püskürtme avansı
A_w	Port yüzey alanı
B10	10% Biodiesel +90%Diesel Karışımı
B100	100% Biodiesel

B20	20% Biodiesel +80%Diesel Karışımı
B5	5% Biodiesel +95%Diesel Karışımı
B50	50% Biodiesel +50%Diesel Karışımı
B75	75% Biodiesel +25%Diesel Karışımı
b_e	Özgöl yakıt sarfiyatı
C_1	$2.28+0.308 \cdot c_u/c_m$
C_2	0,00324 (dizel motorlar için)
C_{Comb}	Yanma sabiti
C_{Diss}	Dağılım sabiti
C_{EGR}	EGR (egzoz gazı resirkülasyonu) etki sabiti
c_m	Ortalama piston hızı
CO	Karbon monoksit
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
CO _{motor}	Motorun egzoz hattı üzerinden karbon monoksit değeri
CO _{sim_1}	Simülasyon karbon monoksit kalibrasyon parametresinin 1 olması durumunda elde edilen karbon monoksit değeri
C_p	Sabit basınçta özgöl ısı
C_{PMC}	Ön karışımli yanma parametresi
$C_{PMC-Dur}$	Ön karışımli yanma süresi faktörü
C_{Rate}	Karışım oranı
C_{Turb}	Türlüansli enerji üretim sabiti
c_u	Çevresel hız
d	Çap
D	Silindir çapı
d_d	Gerçek damlacık çapı
$d_{d,0}$	Başlangıç damlacık çapı
d_{in}	Emme protuna bağlı boru çapı
dm_e	Silindir dışarısına akan kütle
dm_i	İçeriye akan kütle
dm_{is}	İs emisyonu değışim miktarı
$dm_{is,oksidasyon}$	İs emisyonu oksidasyonu değışim miktarı
$dm_{is,oluşum}$	İs emisyonu oluşumu değışim miktarı
$dm_{yakıt}$	Sisteme giren yakıt miktarının değışimi
d_{vi}	Valf oturma yüzeyi iç çapı
d_{vi}	Valf oturma yüzeyi iç çapı – referans çap
e	Piston pimi ofseti
E_{kin}	Kinetik jet enerjisi[J]
f	Silindir dolgusu buharlaşma ısı kesri/oranı
$H_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha}$	Blow-by kaynakli entalpi akışı
h_{BB}	Blow-by entalpisi
h_e	Dışarıya akan kütle entalpisi
h_i	İçeriye akan kütle entalpisi
HRR_{MAX}	Maksimum ısı açığa çıkış hızı
HRR_{MAX_KMA}	Maksimum ısı açığa çıkış hızının oluştuğu krank mili açısı
h_v	Valf kalkışı

ib_e	İndike özgül yakıt sarfıyatı
I_{id}	Tutuşma gecikmesinin integrali
ITR_{sil}	Silindir ısı transferi
$\dot{I}s_{motor}$	Motorun egzoz hattı üzerinden ölçülen ısı değeri
$\dot{I}s_{sim_1}$	Simülasyon ısı kalibrasyon parametresinin 1 olması durumunda elde edilen ısı değeri
K	Özgül ısılar oranı
k	Türbülans kinetik enerjisinin oratamala yoğunluğu
KF_{HAK}	Yanma hava fazlalık değişim kalibrasyon faktörü
KF_{KAF}	Silindir kafası ısı transfer kalibrasyon faktörü
KF_{KOV}	Silindir kovani ısı transfer kalibrasyon faktörü
KF_{PIS}	Piston ısı transfer kalibrasyon faktörü
l	Biyel uzunluğu
LCV	Alt ısı değer
m	Şekil parametresi
m_c	Silindir içerisindeki kütle
m_c	Silindir içi kütle
m_{ev}	Buharlaşan yakıt
m_f	Buharlaşmış yakıtın gerçek kütlesi
$m_{fuel,id}$	Tutuşma gecikmesi fazında püskürtülen yakıt miktarı
$mg/çev$	mg/çevrim
m_{is}	İs kütlesi
M_{pil}	Pilot püskürtme miktarı
m_{stoich}	Taze dalganın stokiometrik kütlesi
M_{top}	Bir çevrimde püskürtülen toplam püskürtme miktarı
n	Motor devri
n	Motor hızı
N_2O	Azot dioksit
NO_x	Azot oksit
$NO_{x,motor}$	Motorun egzoz hattı üzerinden ölçülen azot oksit değeri
NO_{x,sim_1}	Simülasyon azot oksit kalibrasyon parametresinin 1 olması durumundaki elde edilen azot oksit değeri
n_{sw}	Silindir içi girdap
n_{swi}	İçeriye akan kütlenin girdap oranı
p	Basınç
P_2	Alt akış statik basıncı
p_c	Silindir basıncı
p_c	Silindir içi basıncı
$P_{c,1}$	Emme valfi kapandığı anda silindir içi basınç
$P_{c,0}$	Boşta döndürülen motorda silindir içi basınç
p_{cyl}	Silindir içi basıncı
P_{EGMAN}	Egzoz manifold basıncı
P_{EGSA}	Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi basıncı
P_{ESK}	Emme valfi kapandığı andaki silindir içi basınç
P_{MAN}	Emme manifold basıncı
P_{MAX}	Maksimum silindir içi basıncı

$PMAX_{KMA}$	Maksimum basıncın oluştuğu krank mili açısı
p_{o1}	Yukarı akış stagnasyon basıncı
p_{ref}	Referans basınç
PRM_{BUH}	Buharlaştırma Faktörü Kalibrasyon Faktörü
PRM_{DAG}	Dağılma faktör parametresi
$PRM_{ÖKY}$	Ön Karışım Yanma Kalibrasyon Parametresi
$PRM_{ÖKYS}$	Ön Karışım Yanma Süresi Kalibrasyon Parametresi
PRM_{TG}	Tutuşma Gecikmesi Kalibrasyon Parametresi
PRM_{TUR}	Türbülans parametresi
PRM_{YNM}	Yanma Kalibrasyon Parametresi
P_{ypb}	Pilot püskürtme basıncı
Q_{EHAV}	Emme hava debisi
q_{ev}	Yakıtın buharlaştırma ısısı
Q_F	Yakıt enerjisi
Q_{MCC}	Karışım kontrollü yanma için kümülatif ısı açığa çıkışı
Q_{PMC}	Ön karışım yanmada toplam yakıt ısı girişi = $m_{fuel,id} \cdot C_{PMC}$
Q_{ref}	Referans aktivasyon enerjisi, f (damlacık çapı, oksijen içeriği)
Q_w	Duvar ısı kaybı
Q_{wi}	Duvar ısı akışı (silindir kafası, piston, silindir gömleği)
R	Havanın saflığı
r	Krank yarı çapı
R	Regresyon
R_o	Gaz sabiti
s	Pistonun üst ölü noktadan uzaklığı
T	Sıcaklık
t	Zaman
$T_{A,oksidasyon}$	İs oksidasyonu için baz sıcaklık
$T_{A,oluşum}$	İs oluşumu için baz sıcaklık
T_c	Silindirdeki gaz sıcaklığı
$T_{c,1}$	Emme valfi kapandığı anda silindir içi sıcaklık
t_d	Aşağıya doğru sıcaklık
T_d	İzotermal damlacık buharlaşması denge sıcaklığı
T_{EGMAN}	Egzoz manifold sıcaklığı
T_{EGSA}	Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi sıcaklığı
T_{EHAV}	Emme hava sıcaklığı
TG	Tutuşma gecikmesi
THC	Toplam hidrokarbon
T_{KAF}	Silindir kafa sıcaklığı
T_{KOVi}	Silindir kovani iç yüzey üst ölü nokta sıcaklığı
T_{KOViA}	Silindir kovani iç yüzey alt ölü nokta sıcaklığı
T_L	Silindir gömleğisıcaklığı
$T_{L,TDC}$	Silindir gömleğinin üst ölü nokta sıcaklığı
T_{o1}	Yukarı akış stagnasyon sıcaklığı
T_{ort}	Ortalama Sıcaklık
T_{piS}	Piston sıcaklığı
T_{ref}	Referans sıcaklığı = 505,0

T_u	Yukarı doğru sıcaklık
T_{UB}	Yanmamış bölgenin sıcaklığı
T_w	Port Duvar sıcaklığı
T_{wi}	Duvar sıcaklığı
u	Özgöl iç enerji
V_{ph}	Püskürtme hızı $= \frac{\dot{m}_F}{\rho_F \cdot \mu A}$
V	Silindir hacmi
V_D	Silindir başına deplasman hacmi
V_e	Buharlaştırma hızı
v_{in}	Emme portu hızı
W_{air}	Havanın kütle kesri/oranı
w_{CP}	Yanma ürünlerinin kütle kesri/oranı
w_{FB}	Yanmış yakıtın kütle kesri/oranı
w_{FV}	Yakıt buharının kütle kesri/oranı
$w_{Oxygen, available}$	Püskürtme başlangıcında mevcut oksijenin kütle kesri/oranı
x	Rölatif strok (Strok ile ilgili olma gerçek piston pozisyonu)
α_{KMA}	Krank açısı
α_w	Isı transfer katsayısı
δ	Blow-by açıklığı/ Kaçak aralığı
λ_c	Silindirin termal kondüktivitesi
ψ	Krank dikey pozisyonu ve pistonun üst ölü noktada iken iki pozisyon arasındaki krank açısı
a	Vibe parametresi $a=6,9$
μA	Efektif nozül delik alanı

KISALTMA LİSTESİ

AFR	Hava-yakıt oranı
AÖN	Alt ölü nokta
AP	Ana püskürtme
CFD	Computer fluid dynamics
ÇKA	Çok katmanlı algılayıcı
DI	Direk püskürtmeli
DNS	Direk nümerik simülasyonu
DPF	Diesel partikül filtresi
DT	Bekleme zamanı (<i>dwel time</i>)
EGR	Egzoz gazı geri dönüşümü
FOEB	Fren ortalama efektif basınç
GPPA	Gerçekleşen pilot püskürtme avansı
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HCCI	Homojen dolgulu, sıkıştırma ateşlemeli proses
HRR	Isı açığa çıkış hızı (Heat Release Rate)
IDI	İndirekt püskürtmeli
IEA	International Energy Agency
KTM	Kullanıcı tanımlı model
LES	Large eddy simlasyonu
LM	Levenberg Marquardt Algoritması
LNT	Lean NO _x trap (Fakir NO _x kapanı)
MAPE	Mutlak basınç hata değeri
MCC	Karışım kontrollü yanma
OEB	Ortalama efektif basınç
OHYB	Ortak hatlı yüksek basınçlı sistem
OİB	Ortalama indike basınç
PAPS	Pilot+ Ana püskürtme stratejisi
PCCI	Ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli proses
PMC	Ön karışım kontrollü yanma
PP	Pilot püskürtme
PPPA	Planlanan pilot püskürtme avansı
PRPÜS	Püskürtme Profili
RMS	Root mean square (En küçük kareler yöntemi)
RMSE	Root mean squared error (En küçük kareler yöntemi hatası)

SAE	Society of Automotive Engineers
SCG	Scaled Conjugant Gradient Algoritması
SCR	Selective catalytic reduction
SGP	Standart girdi parametreleri
SOB	Sürtünme ortalama basıncı
TPS	Tek püskürtme stratejisi
ÜÖN	Üst ölü nokta
ÜÖNÖ	Üst ölü noktadan önce
ÜÖNS	Üst ölü noktadan sonra
VGT	Değişken geometrili turbo
YSA	Yapay sinir ağı

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Yakıtın yanma odasına püskürtülmeye başlaması44
Şekil 2. 2	Yakıtın yanma odasına püskürtülmeye başlaması [55][53]45
Şekil 2. 3	Buharlaştan ve yanan diesel yakıt hüzmesinin şematik görünümü[54] ...46
Şekil 2. 4	°KMA başına ısı açığa çıkışının değişimi50
Şekil 2. 5	Diesel Spreyinde İS Oluşum Bölgeleri55
Şekil 2. 6	İs-NO _x Dengesi[57].....56
Şekil 2. 7	Pilot püskürtme durumunda püskürtme oranı ve silindi içi basınç değişimi [57].....59
Şekil 2. 8	Tek ve iki ön püskürtme ve ardından ana püskürtme stratejisinin uygulanması59
Şekil 2. 9	Ana püskürtme ve ardından tek ve iki art püskürtme uygulanan strateji örneği61
Şekil 3. 1	AVL Boost programı kullanıcı ara yüzü ekran çıktısı.....68
Şekil 3. 2	Göz önüne alınan kütle oranlarının gösterimi (air-hava).....72
Şekil 3. 3	Silindirin Enerji Balansı.....73
Şekil 3. 4	Krank Mili Grubu.....75
Şekil 3. 5	Isı transfer modellerinin deney verisi ile uyumunun karşılaştırılması.....76
Şekil 3. 6	Yapay Sinir Ağlarının Genel Yapısı [75][73]86
Şekil 3. 7	Yapay Sinir Ağlarının Genel Yapısı87
Şekil 3. 8	YSA'nın Genel Yapısı87
Şekil 3. 9	Yapay sinir ağı katmanlarının birbirleri ile ilişkileri.....90
Şekil 3. 10	Danışmanlı öğrenme algoritması şematik şekli.....91
Şekil 4. 1	Tez çalışmamda kullanılmış olan yöntemin akış şeması101
Şekil 4. 2	Tez çalışmamda kullanılmış olan deney numaralandırılmasının açıklaması 102
Şekil 4. 3	Referans püskürtme stratejilerinde püskürtme zamanının değiştirilmesi104
Şekil 4. 4	Referans püskürtme stratejilerinde püskürtme zamanının değiştirilmesi114
Şekil 4. 5	Boost Programı motor geometri veri giriş ekranı115
Şekil 4. 6	Boost Programı parametre veri giriş ekranı.....116
Şekil 4. 7	Silindir içi basınç verisi değerlendirme kısımları119
Şekil 4. 8	Modelin yeni parametrelerini tahmin eden YSA yapısı123

Şekil 4. 9	Enjektör Memesinin Kesit Resmi.....	126
Şekil 4. 10	Enjektör üzerine bağlanmış olan sensordan alınan örnek sinyal.....	127
Şekil 4. 11	İğne kalkışına bağlı kesit alanının değişimi	128
Şekil 4. 12	Enjeksiyon sinyali ve model çıktısı püskürtme oranının aynı şekilde gösterimi	129
Şekil 4. 13	Silindir içerisindeki ısı akışının gösterimi.....	130
Şekil 4. 14	Silindir içerisindeki ısı akışının gösterimi.....	131
Şekil 4. 15	Silindir kafasına olan ısı akışının gösterimi.....	135
Şekil 4. 16	Pistona olan ısı akışının gösterimi.....	136
Şekil 4. 17	Tek püskürtme stratejisi deneyleri için hesaplanmış parçacık sıcaklıkları... ..	139
Şekil 4. 18	Pilot püskürtme stratejisi deneyleri için hesaplanmış parçacık sıcaklıkları . ..	139
Şekil 4. 19	Boost programı sürtünme ortalama efektif basınç girişi	140
Şekil 4. 20	Deneylerde elde edilmiş olan SOB değerleri.....	141
Şekil 4. 21	BOOST programı FMEP lineer interpolasyonu 3 boyutlu görüntüsü	142
Şekil 5. 1	Deney Motorunun Tam Yükteki Moment ve Güç Eğrileri	145
Şekil 5. 2	Deneylerde kullanılmış olan AVL APA 204/8 Dinamometresi.....	145
Şekil 5. 3	Deneylerde kullanılmış olan AVL APA 204/8 Dinamometresinin Güç bantlarına göre % hassasiyet eğrileri	147
Şekil 5. 4	Deneylerde kullanılmış olan AVL 735S yakıt sarfiyatı ölçüm ve AVL 753C yakıt sıcaklığı kontrol cihazı kombinasyonu.....	149
Şekil 5. 5	Deneylerde kullanılmış olan AVL 415S ısı ölçüm cihazı	150
Şekil 5. 6	Deneylerde kullanılmış olan HoribaMexa 7100 DEGR egzoz emisyon ölçüm cihazı.....	153
Şekil 5.7	Deneylerde kullanılmış olan silindir içi veri toplama sistemi AVL Indiset 620	156
Şekil 5.8	Deneylerde kullanılmış olan Indicom programı ara yüzü	156
Şekil 5. 9	Deneylerde kullanılmış olan emme havası debi ölçeri ABB Sensy Flow	157
Şekil 5. 10	Motor Kontrol Ünitesi Parametrelerini değiştirebilmek için kullanılmış an olan ATI Vision programı ekran çıktısı	158
Şekil 5. 11	Tüm test sistemini kontrol edebilmek için kullanılmış olan AVL PUMA Open 1.4 400 ekran çıktısı.....	158
Şekil 3. 12	Deney sistemi ve Motor Kontrol ünitesi iletişimi.....	159
Şekil 6. 1	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı NO_x değişimi	161
Şekil 6. 2	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı ısı değişimi	161
Şekil 6. 3	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO değişimi	162
Şekil 6. 4	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı THC değişimi	162

Şekil 6. 5	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO_2 değişimi162
Şekil 6. 6	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı b_e değişimi163
Şekil 6. 7	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} e bağlı OİB değişimi163
Şekil 6. 8	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OEB değişimi163
Şekil 6. 9	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı PMAX değişimi164
Şekil 6. 10	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı TMAX değişimi164
Şekil 6. 11	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı NO_x değişimi164
Şekil 6. 12	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı Is değişimi ...165
Şekil 6. 13	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO değişimi165
Şekil 6. 14	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı THC değişimi165
Şekil 6. 15	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO_2 değişimi166
Şekil 6. 16	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı b_e değişimi166
Şekil 6. 17	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OİB değişimi166
Şekil 6. 18	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OEB değişimi167
Şekil 6. 19	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı PMAX değişimi 167
Şekil 6. 20	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı TMAX değişimi 167

Şekil 6. 21	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı NO_x Değişimi	168
Şekil 6. 22	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı is Değişimi	168
Şekil 6. 23	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO Değişimi	168
Şekil 6. 24	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı THC değişimi	169
Şekil 6. 25	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO_2 değişimi	169
Şekil 6. 26	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı b_e değişimi	169
Şekil 6. 27	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı $OİB$ değişimi	170
Şekil 6. 28	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OEB değişimi	170
Şekil 6. 29	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı $PMAX$ değişimi	170
Şekil 6. 30	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı $TMAX$ değişimi	171
Şekil 6. 31	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı NO_x değişimi	171
Şekil 6. 32	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı is değişimi	171
Şekil 6. 33	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO değişimi	172
Şekil 6. 34	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı THC değişimi	172
Şekil 6. 35	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO_2 değişimi	172

Şekil 6. 36	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı b _e değişimi	173
Şekil 6. 37	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı OİB değişimi	173
Şekil 6. 38	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı OEB değişimi	173
Şekil 6. 39	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı PMAX değişimi	174
Şekil 6. 40	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =28 mg/çev, P _{yph} =120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı TMAX değişimi	174
Şekil 6. 41	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2200 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı NO _x değişimi	175
Şekil 6. 42	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneyde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı İS değişimi ...	175
Şekil 6. 43	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı CO değişimi	175
Şekil 6. 44	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı THC değişimi	176
Şekil 6. 45	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı CO ₂ değişimi	176
Şekil 6. 46	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı b _e değişimi	176
Şekil 6. 47	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı OİB değişimi	177
Şekil 6. 48	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı OEB değişimi	177
Şekil 6. 49	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı PMAX değişimi	177
Şekil 6. 50	n=2500 d/d, AV _{ap} =5°KMA, P _{man} =2000 hPa, M _{top} =37 mg/çev, P _{yph} =130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV _{pil} ve M _{pil} 'e bağlı TMAX değişimi	178

Şekil 6. 51	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı NO_x değişimi	178
Şekil 6. 52	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı $\dot{m}$ değişimi	178
Şekil 6. 53	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO değişimi	179
Şekil 6. 54	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı THC değişimi	179
Şekil 6. 55	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı CO_2 değişimi	179
Şekil 6. 56	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı b_e değişimi	180
Şekil 6. 57	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OİB değişimi	180
Şekil 6. 58	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı OEB değişimi	180
Şekil 6. 59	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı PMAX değişimi	181
Şekil 6. 60	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}' e bağlı TMAX değişimi	181
Şekil 6. 61	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb}' e bağlı NO_x değişimi	182
Şekil 6. 62	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb}' e bağlı $\dot{m}$ değişimi	182
Şekil 6. 63	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb}' e bağlı CO değişimi	183
Şekil 6. 64	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb}' e bağlı THC değişimi	183
Şekil 6. 65	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb}' e bağlı CO_2 değişimi	183

Şekil 6. 66	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi	184
Şekil 6. 67	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OiB değişimi	184
Şekil 6. 68	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi	184
Şekil 6. 69	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $PMAX$ değişimi	185
Şekil 6. 70	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $TMAX$ değişimi	185
Şekil 6. 71	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi	185
Şekil 6. 72	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı i_s değişimi	186
Şekil 6. 73	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi	186
Şekil 6. 74	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi	186
Şekil 6. 75	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO_2 değişimi	187
Şekil 6. 76	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi	187
Şekil 6. 77	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OiB değişimi	187
Şekil 6. 78	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi	188
Şekil 6. 79	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $PMAX$ değişimi	188
Şekil 6. 80	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $TMAX$ değişimi	188

Şekil 6. 81	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi	189
Şekil 6. 82	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı i_s değişimi	189
Şekil 6. 83	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi	189
Şekil 6. 84	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi	190
Şekil 6. 85	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO_2 değişimi	190
Şekil 6. 86	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi	190
Şekil 6. 87	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi	191
Şekil 6. 88	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi	191
Şekil 6. 89	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı PMAX değişimi	191
Şekil 6. 90	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi	192
Şekil 6. 91	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi	192
Şekil 6. 92	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı i_s değişimi	192
Şekil 6. 93	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi	193
Şekil 6. 94	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi	193
Şekil 6. 95	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO_2 değişimi	193

Şekil 6. 96	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi 194
Şekil 6. 97	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi 194
Şekil 6. 98	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi 194
Şekil 6. 99	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı PMAX değişimi 195
Şekil 6. 100	n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi 195
Şekil 6. 101	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OİB'lerin birbirleri oranları..... 213
Şekil 6. 102	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OEB'lerin birbirleri ile oranları. 214
Şekil 6. 103	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş SOB'lerin birbirleri oranları... 214
Şekil 6. 104	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FTRK'lerin birbirleri ile oranları. 214
Şekil 6. 105	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş b_e 'lerin birbirleri ile oranları. . 215
Şekil 6. 106	Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FGÜÇ'lerin birbirleri ile oranları. ... 215
Şekil 6. 107	Basınç verisinin önceden belirlenmiş bölümlerinde deney ve simülasyon verisi arasındaki korelasyon katsayıları 215
Şekil 6. 108	Basınç verisinin SBV1 kısmında (emme) deney ve simülasyon verisi arasındaki ortalama mutlak hata 216
Şekil 6. 109	Deney ve simülasyon sonucunda elde edilmiş olan % efektif verimler 216
Şekil 6. 110	Simülasyonda emisyon NO_x kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen NO_x değerlerinin , deneylerden elde edilen NO_x değerlerine oranı 216
Şekil 6. 111	Simülasyonda emisyon CO kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen CO değerlerinin, deneylerden elde edilen CO değerlerine oranı 217
Şekil 6. 112	Simülasyonda emisyon İS kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen İS değerlerinin, deneylerden elde edilen İS değerlerine oranı 217
Şekil 6. 113	Hata oranları b_e hata oranına eşitlenmiş emisyonların hata oranları ... 217
Şekil 6. 114	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OİB'lerin birbirleri ile oranları. 218
Şekil 6. 115	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OEB'lerin birbirleri ile oranları. 218
Şekil 6. 116	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş SOB'lerin birbirleri ile oranları. 219

Şekil 6. 117	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FTORK'ların birbirleri ile oranları.....	219
Şekil 6. 118	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş b_e 'lerin birbirleri ile oranları.....	219
Şekil 6. 119	Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FGÜÇ'lerin birbirleri ile oranları.....	220
Şekil 6. 120	Basınç verisinin önceden belirlenmiş bölümlerinde deney ve simülasyon verisi arasındaki korelasyon katsayıları	220
Şekil 6. 121	Basınç verisinin SBV1 kısmında (emme) deney ve simülasyon verisi arasındaki ortalama mutlak hata	221
Şekil 6. 122	Deney ve ve simülasyon sonucunda elde edilmiş olan % efektif verimler ..	221
Şekil 6. 123	Simülasyonda emisyon NO_x kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen NO_x değerlerinin, deneylerden elde edilen NO_x değerlerine oranı	222
Şekil 6. 124	Simülasyonda emisyon CO kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen CO değerlerinin, deneylerden elde edilen CO değerlerine oranı	222
Şekil 6. 125	Simülasyonda emisyon $\dot{m}$ kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen $\dot{m}$ değerlerinin , deneylerden elde edilen $\dot{m}$ değerlerine oranı	222
Şekil 6. 126	Simülasyon kalibrasyon parametreleri ile belirlenen egzoz emisyonları % hataları	223
Şekil 6. 127	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında, deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması.....	224
Şekil 6. 128	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	224
Şekil 6. 129	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	225
Şekil 6. 130	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=13^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	225
Şekil 6. 131	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	226
Şekil 6. 132	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	226
Şekil 6. 133	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=13^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	227

Şekil 6. 134	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması227
Şekil 6. 135	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması228
Şekil 6. 136	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=13^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması228
Şekil 6. 137	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.229
Şekil 6. 138	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.229
Şekil 6.139	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.230
Şekil 6. 140	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.230
Şekil 6. 141	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.231
Şekil 6. 142	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.231
Şekil 6. 143	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması232
Şekil 6. 144	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması232
Şekil 6. 145	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması233
Şekil 6. 146	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=13^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması233
Şekil 6. 147	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması234
Şekil 6. 148	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması234

Şekil 6.149	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=13,7^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	235
Şekil 6. 150	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	235
Şekil 6. 151	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	236
Şekil 6. 152	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	236
Şekil 6. 153	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=13,7^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	237
Şekil 6. 154	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	237
Şekil 6. 155	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	238
Şekil 6. 156	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	238
Şekil 6. 157	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	239
Şekil 6. 158	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	239
Şekil 6. 159	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	240
Şekil 6. 160	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması.....	240
Şekil 6. 161	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	241
Şekil 6. 162	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	241
Şekil 6. 163	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	242

Şekil 6. 164	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	242
Şekil 6. 165	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	243
Şekil 6. 166	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18,5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	243
Şekil 6. 167	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	244
Şekil 6. 168	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	244
Şekil 6. 169	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18,5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	245
Şekil 6. 170	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	245
Şekil 6. 171	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	246
Şekil 6. 172	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması	246
Şekil 6. 173	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	247
Şekil 6. 174	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	247
Şekil 6. 175	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması	248
Şekil 6. 176	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	248
Şekil 6. 177	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	249
Şekil 6. 178	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=150$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	249

Şekil 6. 179	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	250
Şekil 6. 180	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	250
Şekil 6. 181	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=150$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	251
Şekil 6. 182	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	251
Şekil 6. 183	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	252
Şekil 6. 184	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	252
Şekil 6. 185	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=150$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması	253
Şekil 6. 186	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklık verilerinin karşılaştırılması	253
Şekil 6. 187	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklık verilerinin karşılaştırılması	254
Şekil 6. 188	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklık verilerinin karşılaştırılması	254
Şekil 6. 189	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.....	255
Şekil 6. 190	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.....	255
Şekil 6. 191	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.....	256
Şekil 6. 192	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	256
Şekil 6. 193	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	257

Şekil 6. 194	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	257
Şekil 6. 195	Hedef değerleri ve YSA çıktılarının karşılaştırılmasının yapıldığı grafiklerin anlatımı.	260
Şekil 6. 196	PRM_{YNM} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması...	261
Şekil 6. 197	Pilot püskürtmeli strateji için PRM_{TG} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	261
Şekil 6. 198	PRM_{NOX} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması ...	262
Şekil 6. 199	PRM_{CO} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	262
Şekil 6. 200	PRM_{is} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması.....	263
Şekil 6. 201	T_{EGSA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	264
Şekil 6. 202	P_{EGSA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	265
Şekil 6. 203	T_{EGMAN} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	265
Şekil 6. 204	P_{EGMAN} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	266
Şekil 6. 205	T_{KOVIA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması	267
Şekil 6. 206	T_{KAF} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması.....	267
Şekil 6. 207	No:1 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	269
Şekil 6. 208	No:2 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	270
Şekil 6. 209	No:3 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	270
Şekil 6. 210	No:4 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	271
Şekil 6. 211	No:5 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	271
Şekil 6. 212	No:5 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	272
Şekil 6. 213	No:6 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	272
Şekil 6. 214	No:7 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	273
Şekil 6. 215	No:8 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	273
Şekil 6. 216	No:9 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması	274
Şekil 6. 217	No:10 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması.....	274
Şekil 6. 218	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev,,45 mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi.....	276
Şekil 6. 219	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı is değişimi	276
Şekil 6. 220	$n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi.....	277

Şekil 6. 221	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OIB değişimi.....	277
Şekil 6. 222	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi	278
Şekil 6. 223	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $PMAX$ değişimi	278
Şekil 6. 224	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $TMAX$ değişimi	279
Şekil 6. 225	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi	279
Şekil 6. 226	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı is değişimi	280
Şekil 6. 227	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi	280
Şekil 6. 228	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OIB değişimi	281
Şekil 6. 229	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi.....	281
Şekil 6. 230	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $PMAX$ değişimi	282
Şekil 6. 231	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $TMAX$ değişimi	282
Şekil 6. 232	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi	283
Şekil 6. 233	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı is değişimi	283
Şekil 6. 234	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi	284
Şekil 6. 235	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OIB değişimi.....	284
Şekil 6. 236	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi	285
Şekil 6. 237	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $PMAX$ değişimi	285
Şekil 6. 238	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $TMAX$ değişimi	286
Şekil 6. 239	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi	286

Şekil 6. 240	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı i_s değişimi	287
Şekil 6. 241	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı CO değişimi	287
Şekil 6. 242	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı O_iB değişimi	288
Şekil 6. 243	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı b_e değişimi	288
Şekil 6. 244	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı P_{MAX} değişimi	289
Şekil 6. 245	n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı T_{MAX} değişimi	289
Şekil 6. 246	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa, şartında yeni pilot püskürtme kütleleri için AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı NO_x değişimi	298
Şekil 6. 247	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı NO_x değişimi	301
Şekil 6. 248	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı i_s değişimi	302
Şekil 6. 249	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı CO değişimi	302
Şekil 6. 250	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı O_iB değişimi	303
Şekil 6. 251	n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı b_e değişimi	303
Şekil 6. 252	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı NO_x değişimi	304
Şekil 6. 253	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı i_s değişimi	304
Şekil 6. 254	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} ’e bağlı i_s CO değişimi	305

Şekil 6. 255	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değişimi	305
Şekil 6. 256	n=2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi	306
Şekil 6. 257	n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı NO_x değişimi	306
Şekil 6. 258	n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı is değişimi	307
Şekil 6. 259	n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı CO değişimi	307
Şekil 6. 260	n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı OİB değişimi	308
Şekil 6. 261	n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı b_e değişimi.....	308
Şekil 6. 262	n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev , şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı NO_x değişimi	309
Şekil 6. 263	n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı is değişimi.....	309
Şekil 6. 264	n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı CO değişimi	310
Şekil 6. 265	n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı OİB değişimi	310
Şekil 6. 266	n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pypb} 'e bağlı b_e değişimi.....	311

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. 1	Hafif Yolcu Araçları Avrupa Birliği Emisyon Standartlarının Gelişimi (g/km).....	4
Çizelge 3. 1	Denklemlerde Kullanılmış Olan “C” katsayıları.	77
Çizelge 3. 2	NO _x oluşum	82
Çizelge 3. 3	CO oluşum denklemleri.....	83
Çizelge 4. 1	Referans Strateji Tek Püskürtme Test Noktaları Çizelgesi	103
Çizelge 4. 2	Referans Strateji Tek Püskürtme Test Noktaları Kod Çizelgesi	104
Çizelge 4. 3	2000 d/d içi pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi.....	106
Çizelge 4. 4	Planlanan deney matrisi.....	109
Çizelge 4. 5	2500 d/d ve 3750 d/d içi pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi ..	110
Çizelge 4. 6	Yanma Parametre Grubu	117
Çizelge 4. 7	Emisyon Parametre Grubu.....	118
Çizelge 4. 8	Değerlendirme kriterleri	119
Çizelge 4. 9	Tek püskürtme yapıldığı durumlarda simülasyon deney matrisi.....	121
Çizelge 4. 10	Enjektör Verileri.....	126
Çizelge 5. 1	Deney Motorunun Teknik Özellikleri.....	144
Çizelge 5. 2	AVL APA 204/8 Dinamometresi özellikleri.....	146
Çizelge 5. 3	AVL 735S Yakıt Sarfiyatı Ölçüm Cihazı özellikleri.....	147
Çizelge 5. 4	AVL 753C yakıt sıcaklık şartlandırıcısı cihazı özellikleri	148
Çizelge 5. 5	AVL 415S is ölçer cihazı özellikleri	150
Çizelge 5. 6	Horiba 7100 DEGR cihazı sensörleri ve ölçüm aralıkları	152
Çizelge 5. 7	Horiba 7100 DEGR cihazı IRD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması.....	153
Çizelge 5. 8	Horiba 7100 DEGR cihazı CLD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması.....	154
Çizelge 5.9	Horiba 7100 DEGR cihazı FID analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması.....	154
Çizelge 5.10	Horiba 7100 DEGR cihazı MPD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması.....	155
Çizelge 5.11	AVL Indiset 620 Yanma Analiz Sistemi Özellikleri.....	155
Çizelge 5.12	ABB Sensy Flow hava akış ölçer özellikleri	157

Çizelge 6. 1	Deney matrisinin oluşturulması	259
Çizelge 6. 2	Doğrulama için seçilen 10 deney noktasının özellikleri.....	269
Çizelge 6. 3	Doğrulama için seçilen 10 deney noktanın deneysel ve simülasyon çıktılarının karşılaştırılması.....	275
Çizelge 6. 4	Tek püskürtme durumu için YSA'ların regesyon durumu.....	299
Çizelge 6. 5	Pilot püskürtme durumu için YSA'ların regesyon durumu	299
Çizelge 6. 6	Pilot püskürtme durumu için YSA'ların regesyon durumu	300
Çizelge 6. 7	YSA yönteminin tek başına kullanımı durumunda 15 deney noktasının doğrulmasının değerlendirilmesi.	300

DİSEL MOTORLARDA PİLOT PÜSKÜRTMENİN PERFORMANS VE EMİSYON AÇISINDAN OPTİMİZASYONU

Orkun ÖZENER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muammer ÖZKAN

Dünya üzerindeki kirletici emisyon salınımının 20.yy içerisinde büyük bir ivmeyle artmasının bir sonucu olarak, emisyon salınımını azaltmaya yönelik yapılan anlaşmalar ve emisyonlara getirilen kısıtlamalar otomotiv endüstrisini de kapsamaktadır. Ülkemizde de geçerli olan EU (Avrupa Birliği) standartlarının zorlayıcı etkisi ve özellikle yürürlüğe girecek yeni emisyon standartların da emisyonlarda ciddi oranlarda azaltmayı hedeflemiş olması, emisyonların azaltılmasını hedefleyen çalışmalara hız katmıştır. Araştırmacılar farklı yöntemler ile emisyon salınımını azaltmaya çalışmaktadırlar. Bu çalışmalara, düşük emisyon ve kısa ömür döngüsüne sahip alternatif yakıt çalışmaları, yanma sonrası emisyonların azaltılmasına yönelik katalitik konvertör, DPF (Diesel Particulate Filter), SCR (Selective Catalytic Reduction), uygulamaları ve yanma mekaniğine etki ederek yanma esnasında emisyonu oluşumunu önlemeye yönelik EGR, yanma odasına su püskürtme çalışmaları örnek olarak verilebilir. Belirtilen nitelikteki çalışmalar ile birlikte, özellikle 20.yy son çeyreğinde elektronik alanında yaşanan ilerlemeler birlikte gelişen diesel motor teknolojisi, püskürtme stratejilerini değiştirilerek, yanma esnasında oluşan emisyonun azaltılmasına olanak vermiştir. Geliştirilen yeni stratejiler ile çalışan diesel motorlar, bir yandan emisyon sınırlarını karşılar iken diğer yandan minimum performans kaybını gerçekleştirmektedirler.

Modern diesel püskürtme sistemlerinde, püskürtmenin fazlandırılabilmesi emisyonların kontrolü açısından motor üreticilerine esneklik sağlamıştır. Temel uygulamada; aynı çevrim içerisinde sisteme ön(pilot), ana ve art püskürtme olarak, selenoid bobinli enjektörlerde üç, piezo enjektörlerin kullanılması durumunda üç ten daha fazla parça halinde püskürtülmesi mümkündür.

Pilot püskürtme ana olarak NO_x emisyonlarının ve yanma gürültüsünün azaltılmasında etkin biçimde kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar bilimi açısından bakıldığında, bu alanda yapılmış olan gerek deneysel gerekse teorik olarak bir çok özgün çalışma mevcuttur. Çalışmaların bir çoğu deney matrislerinin büyüklüğü nedeni ile bir yada birkaç deney şartı için gerçekleşmiş olup, bütün motor işletme şartları için incelenememiştir. Geniş bir alana yayılmış olan teorik çalışmalar ise doğrulanmak için büyük deney matrislerine ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde modelleme tekniklerinin gelişmesi ile birlikte, doğruluğundan emin olunan gerek fiziksel gerekse yenilikçi modelleme metotları ile olası bütün püskürtme kombinasyonlarını değerlendirmek, performans ve emisyon açısından optimum stratejiyi geliştirmek mümkün hale gelmiştir.

Tez çalışmamda 1.8 lt direkt enjeksiyonlu aşırı doldurmalı, su soğutmalı ve ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemi kullanan 4 silindirli bir diesel motorla hem tek püskürtme stratejisinde referans deneyler gerçekleştirilmiş, daha sonra seçilen referans deneyler için toplam püskürtülen yakıt miktarının %5, 10%, 15' si pilot püskürtme olarak çeşitli avans açılarında sisteme sokulmuş ve bu esnada tüm sıcaklık ve basınç verileri kayıt edilmiştir. Deney aşamasında toplam 361 deney yapılmıştır. Kayıt edilen veri grubu, birinci aşamada tek boyutlu termodinamik bir motor simülasyon programı olan AVL Boost programı kullanılmış ve deney motorunun verileri programa girilerek, program parametreleri deney noktalarında elde edilmiş silindir içi basınç eğrisini doğrulayacak şekilde kalibre edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise deney düzeneğinde denenmemiş noktalar için simülasyon programı kalibrasyon parametreleri YSA yöntemi ile tahmin edilmiş ve program yeni parametre grupları ile çalıştırılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, Yapay Sinir Ağları(YSA) metodu ile motor performans çıktı parametrelerini tahmin eden çok katmanlı algılayıcı tipinde YSA'lar geliştirilmiştir ve geliştirilmiş olan bu YSA'lar ile yeni noktalardaki performans parametreleri araştırılmıştır.

Çalışma elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; pilot püskürtmenin uygun miktarda ve avansla yapıldığında NO_x emisyonlarının azaldığı, yapılan çalışmada pilot püskürtmenin NO_x emisyonlarını azaltmada etkin olarak kullanılabilmesi için pilot püskürtme miktarının kullanılmış olan deney motorunda ~1.5 mg/çevrimi geçmemesi gerektiği, pilot püskürtme miktarını uygun olarak seçildiği stratejilerde ıs emisyonlarındaki artış görüldüğü, püskürtme basıncının arttırılmasının ıs emisyonunu düşürebildiğini ancak daha iyi yanma nedeni ile ve NO_x artışına sebep olduğu, simülasyon programının kullanımının, özellikle parametrik analizlerde ve optimizasyon problemlerinin çözümünde belirli bir yaklaşım sağladığı, ancak kalibrasyon parametrelerinin çok geniş bir veri bandı içerisinde doğrulanması gerektiği, deneysel olarak gerçekleştirilmemiş noktaların performans ve emisyon sonuçlarının araştırılmasında simülasyon programının kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde YSA metodunun kullanılabilir olduğu, YSA'nın tek başına kullanımı durumunda ise , metodun yeterli deney matrisleri ile eğitildiği durumlarda ara parametre tahmininde kullanılabileceğini ancak çok düşük sayıdaki deney matrisi sonuçları ile motor performans parametrelerini tahmin etmede yetersiz olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Diesel motor, pilot püskürtme, yanma, yapay sinir ağları, modelleme

ABSTRACT

OPTIMISATION OF PILOT INJECTION STRATEGIES IN DIESEL ENGINES FROM THE PERSPECTIVE OF PERFORMANCE AND EMISSIONS

Orkun ÖZENER

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Muammer ÖZKAN

Increasing the pollutant emissions on worldwide with an huge momentum, enforces the world for making new arrangements for decreasing the pollutant emissions, which these arrangement's and restrictions includes the automotive industry. The enforcing effect of the valid and forthcoming European Unions (EU) emission regulations, which is also valid for our country, has added a huge momentum to the studies aimed at reducing remissions. The researchers are using different methods for reducing the released emissions. Alternative fuel studies which has short life and emission cycles, after treatment systems like DPF (Diesel Particulate Filters), SCR (Selective Catalytic Reduction), systems that directly effect the combustion mechanics like EGR (Exhaust Gas Recirculation) and water spray application in the combustion chamber can be given effective examples for reducing released emissions. Additionally to these systems the highly developed diesel injection systems with the electronic developments at the last quarter of the 20th century allows us to reduce emission in the combustion chamber with implementing various flexible injection strategies. Implementation of newly developed strategies makes possible to meet the emission limits with obtaining minimum performance loss.

In the modern diesel injection systems; the phasing of injection in the same cycle gives a high flexibility to engine manufacturers. Basically, when using a solenoid injection it is possible to inject the fuel in three phased which they are pilot(pre), main and post injection phases. Also it is possible to inject more then three pahses when using piexo activated injector.

The pilot injection is used effectively for reducing the NO_x emission and combustion noise. Considering to the internal combustion engine sciences there are lots of original work either in theoretical or experimental base. These works are generally realized for one or few more conditions, and they didn't search a large engine operating band because of huge experimental matrixes. A larger theoretical search needs to be validated with large experimental matrixes. Nowadays, with the help of newly developed physical and innovative reliable modeling techniques, all possible injection strategy combinations can be evaluated in terms of performance and emissions for optimization purposed.

In my PhD thesis work, reference and pilot injection strategy experiments were realized with 1.8 l, 4 cylinder, direct injection, turbo boosted, water cooled and common rail injection system equipped diesel engine. First, single injection(reference) events are realized and then 5%,10% and 15% of the total injected fuel was extracted from the injection and injected at different crank angles as pilot injection. The in-cylinder pressure, emissions related physical data was logged during the events.361 experimental event was realized during experimental work. The logged data groups was used to model the engine at AVL Boost programme, the experimental data was validated considering to the in cylinder pressure with the programme and program calibration parameters are identified. In the second stage of thesis work, the experiment points which are not realized at test bench are made run at Boost programme, while the new programme parameters are identified with artificial neural network(ANN) technique. In the last and third stage of thesis work, multi layer perceptron (MLP) type ANNs are developed for identifying of engine out performance and emissions then the developed MLPs are used to predicted new test points performance data.

The results showed that; the implementation of appropriate mass of pilot injection at the appropriate injection advance will reduce the NO_x emissions, in this study it is showed that for effective implementation of pilot injection, the mass of pilot injection should be maximum at ~1.5 mg/stroke value for the engine that was used for experimental research, the soot emissions are increased when using pilot injection, increasing of injection pressure has the capability of decreasing of soot, but it increased the NO_x emission because of better combustion, usage of simulation programme has found useful up to a certain extent especially for parametric analyses and optimization problems via with validation of calibration parameters at a huge experimental data, in this study it is showed that the ANN method can be used for identifying of the new calibration parameters of the simulation programme which these points are not tested at test bench, ANN method with huge experimental data training could be used solely at performance parameter interpolation, but the lack of experimental data showed lower prediction capability.

Key words: Diesel engine, pilot injection, combustion, artificial neural networks,modeling

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

İnsanlığın varoluşundan bugüne değin değişmeyen en önemli gerçeklerden birisi, enerjiye olan ihtiyaçtır. İlk çağlarda ilkel yöntemlerin yardımı ile çeşitli birincil enerji türevlerini doğrudan olarak kullanan insanlık, modern tarih ile birlikte enerjinin kullanım şeklini de değiştirmeye başlamış ve farklı enerji kaynaklarını da kullanabilir duruma gelmiştir. 18.yy da Rönesans'ın etkisi ve matematiksel analizde yaşanan gelişmelerle birlikte, modern bilim toplumuna geçişin ilk adımları da atılmaya başlanmıştır. 19.yy başlarında çeşitli endüstriyel amaçlar ve en önemlisi de taşımacılık amaçlı geliştirilen buharlı makineler ise süre gelen yüzyılda ve devamında durdurulamaz bir ivme ile devam edecek olan teknolojik devrimin önünü açmıştır. 1800'lerin sonunda bugünkü bildiğimiz anlamı ile içten yanmalı makineler olan otto ve diesel motorunun geliştirilmiş olması ise endüstriyel alanda hareketliliği farklı bir boyuta taşımıştır. 20.yy başlarında pistonlu makinelerin otomotiv, denizcilik, tarım vb. alanlara çok hızlı bir şekilde adaptasyonu ve buna bağlantılı olarak hızla büyüyen endüstriyel sektörler yüzyılın sonlarına doğru beklenmedik iki büyük sorunla karşı karşıya kalmışlardır. Bu sorunlardan birincisi, yanma prosesi için gerekli olan petrol rezervinin dünya üzerinde gitgide azalıyor olmasıdır. İkinci büyük sorun ise petrol kaynaklı yakıtların yanması sonucu açığa çıkan kirletici gazların, dünya üzerinde iklim değişikliği ve önemli sağlık sorunları gibi birçok farklı olumsuzluğu da beraberinde getiriyor olmasıdır. Dünya üzerindeki enerji kullanımı dikkate alındığında toplam tüketilen enerjinin yaklaşık 25%'lik kısmı petrol kaynaklı yakıtlardan karşılanmaktadır ve konu ilgili yapılmış olan projeksiyon çalışmalarındaki çeşitli senaryolar göz önüne

alındığında 2050 yılı itibari ile dünya enerji ihtiyacının yaklaşık 25% lik bir kısmının petrolden karşılanacağı öngörülmektedir[1].Diğer bir deyişle enerji üretimi için dünya petrol ihtiyacında bir azalma öngörülmemektedir. 2007 yılı sektörel istatistiklerine bakıldığında ise dünya petrol ihtiyacının yaklaşık olarak 45%'lik bir kısmının doğrudan karayolu taşımacılığı için kullanıldığı görülmektedir. Karayolu taşımacılığı sektöründe ise ana tahrik unsuru olarak içten yanmalı motorların kullanıldığı göz önüne alındığında dünya petrol ihtiyacının ~12-13%'lik bir kısmının doğrudan içten yanmalı motorları çalıştırmak amaçlı kullanıldığı söylenebilir [2]. Deniz, demiryolu taşımacılığı vb. gibi önemli oranda içten yanmalı motor kullanan diğer taşımacılık sistemlerin de dikkate alınması bu oranı daha da artıracaktır. Taşımacılık sektörünün tamamında yakıt kullanım eğilimine bakıldığında ise, hali hazırda 70%'in üzerinde kullanım alanı bulan konvansiyonel dizel ve benzin yakıtlarının, dünya enerji ajansının (IEA) üç farklı senaryosuna göre, 2030 yılı itibari ile ~50%'ye gerileyeceği, 2050 yılında ise en kötü senaryoya göre ~50%'lerde kalırken en iyimser senaryoya göre ise bu ihtiyaç 30%'lar düzeyine ineceği öngörülmüştür. Tüm bu istatistikler ve projeksiyonlar değerlendirildiğinde önümüzdeki 50 yıl ve sonrasında da petrol türevi yakıtların özellikle yol taşımacılığı sektöründe yoğun bir biçimde kullanılmaya devam edeceğini öngörmek yanlış olmayacaktır.

İçten yanmalı motorlar özellikle yol taşımacılığı sektöründe uzun yıllardır ana tahrik unsuru olarak güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde, petrol türevi yakıtlar yerine elektrik, güneş enerjisi vb. alternatif kaynaklar veya hibrit tahrik sistemlerinin gelişimi ve kullanımı hızla artsa da, teknolojisinin gelişmişliği, bilinirliği, güvenilir olması, maliyet vb. nedenlerle içten yanmalı motorların yakın ve orta gelecekte taşımacılık sektörünü domine edeceği öngörülebilir. Tüm bu istatistikler ve öngörüler göz önüne alındığında ise taşımacılık sektöründe kullanılan fosil yakıtların yanması sonucu oluşan kirlletici emisyonların dünya için büyük bir sorun teşkil ettiği muhakkaktır. 2008 yılı itibari ile dünya üzerindeki karbondioksit (CO₂) salınımının 22%'lik bir kısmı taşımacılık sektörü kaynaklı gerçekleşmiştir ki bu salınımın 70%'lik bir kısmı (toplam CO₂ salınımının 15.4%'lük bir kısmı) doğrudan olarak karayolu taşımacılığı kaynaklıdır[3]. İklim değişikliğinde önemli rol oynayan sera gazı emisyonlarının oluşumuna bakıldığında ise 76% oranında CO₂'nin katkıda bulunduğu, motorlarda yanma sonucu oluşan bir diğer

kirletici olan azot oksit (NO_x) grubundan olan di-azotoksit'in (N_2O) de sera gazı oluşumuna 6% katkıda bulunduğu görülmektedir [3]. Bu sonuçlar içten yanmalı motorların çalışma prosesi sonucunda açığa çıkan ve çevreye olumsuz etkileri bulunan diğer kirleticiler olan karbon monoksit (CO), yanmamış toplam hidrokarbonlar (THC), is, partikül madde gibi etkenler ile birlikte göz önüne alındığında içten yanmalı motorlardan açığa çıkan kirleticilerin azaltılmasının gerektiği ortadadır.

20.yy'ın ikinci yarısı itibari ile, taşıt kaynaklı kirleticiler dünya üzerinde uygulanmakta olan çeşitli emisyon yönetmelikleri ile kontrol edilmektedir. Ancak bu emisyon yönetmelikleri bölgelere veya ülkelere göre farklılıklar göstermekle birlikte bu yönetmeliklerde öngörülen sınırlar da zaman içerisinde değişmeye devam etmektedirler. Bu konuyu ülkemizin de kurallarına uygulamayı taahhüt ettiği Avrupa Birliği emisyon yönetmelikleri bağlamında değerlendirecek olur isek, Avrupa birliğinde bölgesinde hafif taşıtların emisyonlarının 1970 yılından itibaren, ağır taşıtların emisyonlarının ise 1988 yılından itibaren yayımlanan yönetmeliklerle kontrol edildiği görülmektedir [4]. Hafif taşıtlardan yayılan emisyonlar 06.04.1970 tarihinde yayımlanmış olan ve bugüne değin 23 kez değişiklik ve adaptasyona uğramış olan 70/220/EEC yönetmeliği, ağır taşıtlar için ise 09.02.1988 yılında yayımlanmış ve bugüne değin 5 kez değişiklik ve adaptasyona uğramış olan 88/77/EEC yönetmeliği ile kontrol edilmeye başlanmıştır [5] , [6]. Zaman içerisinde meydana gelen değişiklikler ile birlikte ilgili standartlar "Euro" standartları şeklinde anılmaya başlanmışlardır. Örnek olarak Avrupa Birliğinin diesel ve benzinli yolcu araçları için uygulanmakta olan Euro Emisyon Standartlarının sınırlarının gelişimi Çizelge 1 de verilmiştir. 2012 yılı itibari ile Avrupa Birliği sınırlarında geçerli olan emisyon uygulamaları 18 Temmuz 2008 tarihinde yayımlanmış olan EC/692/2008 no'lu yönetmelik ile kontrol edilmektedir. İlgili yönetmelik Euro 5 ve Euro 6 emisyon standartlarını belirlemiş olup, Euro 5 standartları 1 Eylül 2009 itibari ile uygulanmaya başlanmış durumdadır. Euro 6 standartları ise 1 Eylül 2014 yılı itibari ile uygulanmaya başlanacaktır [7]. Çizelge 1 de verilmiş olan standart limitleri değerlendirildiğinde 90'lı yıllardan itibaren devreye giren emisyon sınırlarındaki hızlı düşüş açık olarak görülmektedir. İlgili yönetmeliklerde ilk yayımlanan sınırlar ve Euro 6 emisyon standartları göz önüne alındığında, CO emisyonları diesel motor kullanan araçlarda, ilk sınırların $\sim 1/7'$ sine, benzin motoru kullanan araçlarda ise

~1/3'ü seviyelerine, toplam hidrokarbon emisyonları (THC) benzinli motoru kullanan araçlarda ilk sınırların ~1/2' sine, NO_x emisyonları diesel motor kullanan araçlarda ilk sınırların ~1/6 sına, benzin motoru kullanan araçlarda ~1/2.5'u seviyelerine, Hidrokarbon(HC) + NO_x emisyonları ise diesel motoru kullanan araçlarda ilk sınırların ~1/7'si seviyelerine(benzin motorlardan ise sadece Euro 1 ve 2 de kontrol edilmişlerdir), partikül madde emisyonları ise diesel motoru kullanan araçlarda ilk sınırların ~1/36'sı seviyelerine çekilmiş olup benzin motoru kullanan araçlarda ise Euro 5 ve Euro 6 standartları ile birlikte kontrol edilmeye başlanmışlardır. Emisyon limitlerindeki bu büyük azalma oranları dikkate alındığında kirletici emisyonların azaltılması yönünde özellikle son 20 yılda büyük bir baskı olduğu açıkça görülmektedir ki buda otomotiv sektörünü birçok

Çizelge 1. 1 Hafif Yolcu Araçları Avrupa Birliği Emisyon Standartlarının Gelişimi

Araç Tipi	Aşama	Tarih	CO	THC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM
Diesel	Euro 1	1992	3.16	-	-	-	1.13	0.18
	Euro 2	1996	1.0	-	-	-	0.7	0.08
	Euro 3	2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
	Euro 4	2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025
	Euro 5	2009	0.50	-	-	0.180	0.230	0.005
	Euro 6	2014	0.50	-	-	0.080	0.170	0.005
Benzin	Euro 1	1992	3.16	-	-	-	1.13	-
	Euro 2	1996	2.2	-	-	-	0.5	-
	Euro 3	2000	2.3	0.20	-	0.15	-	-
	Euro 4	2005	1.0	0.10	-	0.08	-	-
	Euro 5	2009	1.0	0.10	0.068	0.060	-	0.005
	Euro 6	2014	1.0	0.10	0.068	0.060	-	0.005
* Emisyon değerleri g/km cinsinden verilmiştir.								

farklı yeni çözüm arayışına itmektedir. Araç filoları açısından bakıldığında ise diesel motoru araç parkının gittikçe büyüdüğü görülmektedir. 20.yy'ın ikinci yarısında daha çok ağır ve ticari alanda uygulama alanı bulan diesel motorlar, özellikle son 20 yılda diesel motor kontrolü, püskürtme teknolojisi ve elektronik alanda yaşanan gelişmelerle birlikte iyileşen yakıt ekonomisi ve yakıt fiyatlarındaki avantajlar nedeni ile yol araçlarında da tercih edilir konuma gelmiştir. Batı Avrupa da ki yeni araç kayıtlarına bakıldığında diesel araç tercihi 1990 yılında 12% iken 2009 yılı itibari ile bu oran 50%'lere yükselmiştir. Diğer bir deyişle batı Avrupa'da diesel araç tercihi son 20 yıl itibari ile 5 katına çıkmıştır [8]. Türkiye de ki araç parkı istatistiklerine bakıldığında ise, 2004 yılında Türkiye araç parkının ~30%'sini diesel araçların oluşturulduğu görülürken, 2009 yılında bu oranın ~40%'a çıktığı görülmektedir[9]. Diesel araçların tercihinde ki bu artış oranı ile birlikte diesel motor emisyonların da ki regülasyon limitlerinin daralması göz önüne alındığında, silindir içi yanma prosesinin amaca yönelik olarak iyileştirilmesi veya sonradan iyileştirme sistemlerinin (katalitik konvertör, diesel partikül filtresi vb.) kullanımı zorunlu bir hale gelmektedir.

Diesel motorunun çalışma prensibine temel olarak bakıldığında; sıkıştırma sonucu yüksek basınçta ve sıcaklıkta hava (veya oksijen içeren bir gazı) muhteva eden silindir içerisine bir enjektör vasıtası ile püskürtülen yüksek basınçlı yakıtın alev alması ve patlaması prensibi ile çalışan bir motordur. Yanma sürecinin ilk bölümü ön karışımli yanma olarak gerçekleşirken ikinci kısım ise difüzyonlu yanma olarak gerçekleşmektedir. Yanma sürecinin benzin motorlarında kıvılcım ateşlemeli motorlarda olduğunun aksine herhangi bir yardımcı ekipman (buji vb.) kullanılmadan kendi kendine başlaması ve gelişmesi, püskürtme sürecindeki tüm fiziksel parametreleri (püskürtme basıncı, püskürtme oranı, püskürtme zamanlaması, sprej açısı, sprej ortalama damlacık çapı, enjektör meme geometrisi, sprej ile havanın karışabilme kabiliyeti, pülverizasyon vb.) motorun performansını ve emisyonları etkileyen temel faktörler haline getirmektedir ve bu nedenle püskürtme sisteminin kabiliyeti (yüksek basınç pompası, basınç hatları ve enjektörler vb.) anahtar rolü üstlenmektedir. Eski nesil direk püskürtmeli (DI) diesel motorlarda mevcut olan püskürtme sistemleri, yakıtın ~200-300 bar basınçta ve tek bir seferde silindir içerisine püskürtülebilmesine izin verirken, çeşitli sebeplerle (yanma gürültüsünü azaltma, isli

çalışmayı önleme vb..) yapılan iyileştirme çalışmalarında yardımcı meme veya kademeli kam profilleri vb. gibi yanma mekaniğini doğrudan etkileyen yeni geliştirmelerin vasıtasıyla püskürtme süreçleri fazlandırılmaya çalışılarak sürece esneklik kazandırılmaya çalışmış ancak mekanik ve teknolojik sınırlar bu esnekliği sınırlamıştır. 90'lı yıllardan itibaren yürürlüğe giren emisyon regülasyonları ve bu regülasyonlarda açıklanan limitlerin de zamanla daralıyor (ve daralacak) olması ise üreticileri püskürtme teknolojileri alanında daha esnek arayışlara ve araştırmalara itmiştir. 20.yy'ın son çeyreğinde gelişen malzeme ve elektronik teknolojisinin yardımı ile ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemi (OHYB- *Common Rail*) sistemleri geliştirilmiş olup bu sistemlerde püskürtme basınçları çalışma (yük,devir vb..) şartına bağlı olarak değişebilir bir esneklikte maksimum ~2000-2200 bar civarına yükselirken , piezo elektrik kristal kullanan enjektörler (CR3 nesil) ile aynı çevrim içerisinde farklı miktarlarda 1 den fazla püskürtme (~10 faza kadar) yapabilme imkanı doğmuştur. Püskürtme basıncındaki artış spreydeki damlacık çaplarının küçülmesi, daha iyi pülverizasyon vb. etkilerle ile karışım teşkilinde iyileşmeye, püskürtmenin bir çok kademeye fazlandırılabilmesi ise çok esnek bir yanma mekaniği sayesinde performans, emisyon, yanma gürültüsü vb. karakteristik değerlerde iyileştirme yapılabilmesinin önünü açmıştır.

Gelişen ve uygulamaya konulan yeni teknolojiler püskürtme sürecinin parametrelerinden olan; püskürtme miktarı, püskürtme basıncı, püskürtme faz sayısı, püskürtme fazlarının silindir içerisine püskürtülmeye başladıkları zaman vb. gibi birçok parametreyi esnek bir biçimde kontrol edilebilir hale getirmiştir. Bu nedenle belirlenen motor çalışma şartlarını gerçekleyebilmek için çalışma parametrelerinin ideal kombinasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen bu kombinasyonlar çalışma noktasında ki püskürtme stratejisi olarak adlandırılmaktadır. Motorun tüm çalışma noktaları göz önüne alındığında ise, birden fazla stratejinin motorun kontrol ünitesi üzerindeki püskürtme ile ilgili kısımda haritalar şeklinde kodlanmış bulunması gerekir. Tüm bu kombinasyonların bir araya geldiği bu kompleks yapıya motorun püskürtme kalibrasyonu adı verilir.

Püskürtmenin fazlandırılması aşamasında, temelde aynı çevrim içerisinde sisteme ön(pilot), ana ve art püskürtme olarak birden fazla parça halinde yakıtın püskürtülmesi

mümkündür. Buna ek olarak püskürtme sistemi kabiliyetleri, pilot ve art püskürtmelerinde kendi içerisinde belirli oranlarda bölünmesine olanak sağlamaktadır. Yakıtın aynı çevrim içerisinde fazlandırılmasının etkisi incelendiğinde; pilot püskürtme ana olarak Azot Oksit (NO_x) emisyonlarının ve yanmadan kaynaklı gürültünün azaltılmasında etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Sisteme ana püskürtmeden önce sokulan yakıt tutuşarak ortam sıcaklığını arttırmakta ve ana püskürtme başladıktan sonra ana püskürtme safhasında sisteme giren yakıtın tutuşma gecikme süresini kısaltmaktadır. Tutuşma gecikmesi süresinin kısılması ise ön karışımli safhada yanan yakıt miktarını azalmakta ve dolayısıyla bu safhada ortaya çıkan basınç artışının değişimi, klasik mekanik tek püskürtmeli sistemler ile karşılaştırıldığında daha yavaş olmaktadır. Bu ise pik basınç ve pik sıcaklığın düşmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla yanma odasında içerisindeki pik sıcaklığın düşmesi ile birlikte hava kaynaklı moleküler azot'un parçalanması da azalacak ve dolayısıyla oluşan toplan NO_x oluşumunda da bir azalma görülecektir. Art püskürtme is oksidasyonunu hızlandırmak amacını taşımaktadır. Diesel yanma mekaniğinin ikinci aşaması olan difüzyonlu yanma safhasının ilerleyen aşamalarında düşen yanma odası sıcaklığı, sisteme art püskürtme ile sokulan yakıtın yanmaya başlaması ile birlikte yeniden artmaya başlamakta ve soğumaya başlayan yanma odası sıcaklığını artırmaktadır. Buna ek olarak art püskürtmenin yarattığı etki ile birlikte yanma odasındaki yakıtça zengin ve havaca fakir bölgelerde ki karışımın karakteristiği de bir anda değişmeye başlayacak ve zengin bölgelerdeki yakıtın havayla buluşabilmesine olanak verecektir. Bu iki etken bir araya geldiğinde sıcaklık nedeniyle durma noktasına gelebilecek olan is oksidasyon mekanizmasını yeniden hızlandırarak, karbon partiküllerinin tam olarak okside olabilmesine olanak sağlayacaktır. Azot oksitler emisyon yönetmelikleri tarafından direk olarak (THC'ler ile birlikte) kontrol edilmektedir. Is emisyonu ise partikül madde başlığı altında yer alarak emisyon regülasyonları tarafından kontrol edilmektedirler. Is yapısı itibari ile yüksek sıcaklıkta karbonlaşmış ve yanmasının tamamlamamış yakıt parçacıklarından oluştuğundan doğrudan olarak yakıt tüketimi ve yanma mekaniği üzerinde etkili durumdadır. Is sınırı yanma odasına püskürtülebilecek maksimum yakıt miktarını belirleme de önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. NO_x emisyonunu azaltmaya yönelik olarak yanma prosesine yapılan müdahalelerin yanma

sıcaklığını azaltması nedeniyle is miktarını arttırıcı yönde etkisi bulunmaktadır. Bu aşamada silindir içi yanma karakteristiğine bağlı olarak değişen NO_x – Is dengesinin emisyon regülasyonları içerisinde sağlanabilmesi ve bu esnada da CO ve THC emisyonlarının regüle edilebilmesi, yakıt tüketiminin ve araç performansının optimum düzeyde tutulabilmesi için ön ve art püskürtmelerin miktarlarının, püskürtme basıncının ve hangi anda yanma odasına sokulması gerektiği hususunun belirlenmesi gerekmektedir.

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 fazlar bölünerek sisteme sokulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Okude vd. [10] tek bir yük ve devir şartı için geniş bir püskürtme avans bandında pilot püskürtmenin miktarının ve pilot püskürtme avansının egzoz emisyonları ve motor performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma tek silindirli, direkt püskürtmeli, 744 cm^3 hacminde, sıkıştırma oranı 15.7 olan OHYB püskürtme sistemi kullanan bir motorda gerçekleştirmiştir. Deneyler esnasında silindir içi basınç, enjektör iğne kalkış sinyali, THC, CO, CO_2 , NO_x ve is emisyonları ölçmüş ve sonuçları kaydedilmiştir. Araştırmacılar deneyleri; motor hızı=1620 d/d, ortalama indike basınç (OİB)=0.82MPa, püskürtülen yakıt hacmi=37 $\text{mm}^3/\text{çev}$ (8mg/çev), yakıt püskürtme basıncı (P_{ypb}) =140 MPa, ana püskürtme avansı (AV_{ap}) = 2.5 °KMA üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS), egzoz gazı geri dönüşümü (EGR) oranı = 24%, aşırı doldurma basıncı (P_{man})=47kPa, emme hava sıcaklığı (T_{man})=65°C şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Pilot püskürtme zamanlaması üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) 40° KMA avans açısından başlayarak, sabit tutulan ana avans değerine kadar (2.5°KMA ÜÖNS) kadar değiştirilirken, pilot püskürtme kütlesi ise 0 dan başlayarak 8 mg/çev şartına kadar arttırılmıştır. Tüm deneyler boyunca ana püskürtme avansı sabit tutulmuştur. Deneylerin sonuçları incelendiğinde; pilot püskürtme kütlesinin 4 mg/çev geçmediği şartlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak NO_x emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Bu azalma, bu şartlarda pilot püskürtmenin silindir içi gaz sıcaklığını yükselterek ana püskürtmenin yanmayı başladığı anda ısı ortaya çıkış oranını azalttığı ve bu nedenle silindir içi gaz sıcaklığının ani olarak hızlı bir şekilde yükselişini

önlediğinden NO_x emisyon oluşumunu azalttığı şeklinde yorumlamışlardır. Tutuşma gecikmesi (TG) incelendiğinde ise; pilot püskürtme kütlesinin sabit tutulduğu ve pilot püskürtme avansının ana püskürtmeye yaklaştığı (geciktirildiği) durumlarda TG süresinin azaldığı görülmektedir. Bu ise; pilot püskürtmenin ana püskürtmeye yeterince yakın olması durumlarında, pilot püskürtmenin yarattığı sıcaklığın yüksekliği daha ufak bir bölgenin ana püskürtmenin tutuşmaya başlamasına yeterken, pilot püskürtmenin ana püskürtmeden uzaklaştığı durumlarda pilot püskürtmenin içerideki sıcaklığı ana püskürtmenin tutuşmasına yetecek kadar arttırmasının daha uzun süre almasından kaynaklandığı belirtmişlerdir. Araştırmacılar, yüksek pilot püskürtme miktarları uygulandığı ve pilot püskürtmenin ana püskürtmeye yakın gerçekleştirildiği noktalarda TG süresi en kısa olsa da NO_x emisyonlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Silindir içi sıcaklık değişimlerini incelediklerinde, pilot püskürtme avansının (ana püskürtme avansına yakın olarak) sabit tutulup pilot püskürtme miktarının arttırıldığı durumlarda TG'nin de azalmasından dolayı ana püskürtmenin sıcaklık artışının daha yumuşak bir biçimde gerçekleştiğini, ancak pilot püskürtmenin kendi yanmasının ısı açığa çıkış hızının (HRR) daha büyük olmasından dolayı pilot püskürtme safhasındaki sıcaklık artışının (gradyen) daha dik olduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm bu sonuçlar incelendiğinde, ana püskürtmenin TG sininin kısalması NO_x emisyonlarını azaltsa da, bu azalma etkisi pilot püskürtmenin kendisinin yanması esnasında üretmiş olduğu NO_x miktarı nedeni ile ortadan kaybolmuş ve sistemden toplam çıkan NO_x miktarı arttığı yorumu yapılmıştır. Daha küçük pilot püskürtme kütleleri ile çalışıldığı şartlarda ise pilot püskürtmenin ana püskürtmeden uzaklaştırıldığı şartlarda (pilot püskürtme avansının daha öne alındığı durumlarda, NO_x emisyonlarının düştüğü gözlemlenmiş ve HRR grafikleri incelendiğinde bu etkinin pilot püskürtmenin ana püskürtmeden uzaklaştıkça HRR pikinin (hem pilot püskürtme için hem de ana püskürtme için) düşmesinden kaynaklandığı ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar NO_x emisyonun da ki artışı bağlamış oldukları, pilot püskürtmenin ürettiği NO_x nedenini ortaya koyabilmek için yeni bir deney daha gerçekleştirmişler ve ana püskürtmenin yapılmadığı ve sadece pilot püskürtmenin yapıldığı deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde pilot püskürtme avansının ana püskürtmeye oldukça uzak tutulduğu ve erken pilot püskürtme yapıldığı (ÜÖNÖ 30°KMA) durumunda pilot püskürtmenin NO_x üretmediği,

ancak pilot püskürtmenin ana püskürtmeye yaklaştırılmaya başladığında (ÜÖNÖ 20 °KMA ve 10 °KMA şartlarında) pilot püskürtmenin tek başına ihmal edilemeyecek düzeyde NO_x ürettiğini gözlemlemişlerdir. Bu ise pilot püskürtmenin püskürtülmeye başladığı an ile tutuşmaya başladığı an arasındaki kısa sürenin neden olduğu yetersiz ve fakir karışma (*başlangıçta ortamdaki hava miktarının tüm püskürtme için yetecek kadar olması ve pilot püskürtme anında ortamda sadece az miktarda yakıt bulunması ilk aşamayı fakir karışım yapmaktadır*) nedeni ve dolayısıyla da bu az sürede pilot püskürtmenin spreynin içerisinde ortaya çıkan büyük miktarda stokiometri sınırına yakın karışım daha hızlı ve ani bir yanmaya sebep olarak NO_x emisyon seviyelerini yükseltmiştir. Araştırmacılar bu konudaki tezlerini kanıtlayabilmek için pilot püskürtmeyi, silindir içi şartları sağlayan bir basınçlı kaba püskürterek oluşan sprej fotoğraflarını incelemişler ve sprejin iç kısmındaki hava fazlalık katsayısının değişimin araştırmışlardır. Yapılan inceleme neticesinde ÜÖNÖ 30°KMA şartında yapılan püskürtme de, pilot püskürtmenin tutuşmaya başladığı anda sprej içerisinde $\lambda \leq 1.6$ şartını sağlayan (Tanaka [11] tarafından NO_x oluşumu için belirlenmiş olan kriter) kütle oranının 10%, pilot püskürtmenin ÜÖNÖ 20 °KMA şartında yapıldığı durumda ise $\lambda \leq 1.6$ şartını sağlayan bu kütle oranının 30% civarında olduğu görülmüştür. Bu erken pilot püskürtme stratejisinde, pilot hüzmünün tutuşmasının fakir, geç pilot püskürtme stratejisinde ise pilot püskürtme tutuşmasının görece olarak zengin karışım gerçekleşmesini ve dolayısıyla daha yüksek ısı açığa çıkış oranı ve NO_x emisyonu artışını açıkladığını belirtmişlerdir. Isı emisyonları incelendiğinde, pilot püskürtme miktarının artarak ÜÖN'ya yaklaştığı durumlarda ısı emisyonunun arttığını bunun nedeninin azalan TG süresi nedeni ile yakıtın büyük kısmının difüzyonlu yanmaya maruz kalması olduğunu belirtmişlerdir. Ancak elde edilen deneysel veriler incelendiğinde özellikle ÜÖNÖ 20-25 °KMA arasında yapılan pilot püskürtme stratejilerinde TG süresi referans süreye göre uzasa da ısı emisyonunun arttığı görülmüş olup bu etki silindir içi hava hareketi ve enjektör geometrisine bağlı olarak pilot alevin bir yandaki enjektör deliğinin ana püskürtmesi içerisine doğru penetre olmuş olabileceği olgusu üzerinden açıklanmıştır. Araştırmacılar bu olguyu araştırabilmek için farklı girdap oranları için deneyler yapmış ancak deney motorundaki şartlarda ısı emisyonlarının girdap oranından bağımsız olarak pilot püskürtmenin 24 °KMA da püskürtüldüğü şartta pik

değerlere ulaştığını görmüşlerdir. Araştırmacılar bu bulgu üzerine spreyn yanma odası içerisindeki durumunu piston konumuna göre incelemek için bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Düzenekte buharlaşmayan ve yanmayan spreylere pistonun konumuna göre yanma odası içerisindeki penetrasyonu incelenmiş ve fotoğraflanmıştır. Deneylerde ÜÖNÖ 20°KMA da yapılan püskürtmenin bir kısmının piston oyuğunun içine diğer kısmının da piston üst yan yüzeyine çarptığı ve üst yan yüzeye çarpan spreyn sıkıştırma stroğu esnasında bu bölgede sıkışarak kötü bir karışım teşkili ile is oluşumuna neden olabileceği diğer tüm durumlarda ise karışım teşkilinin bu duruma göre daha iyi gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır. Ek olarak 3 farklı püskürtme açısı (136°, 140°, 144°) ile yapılan deneylerde daha dar püskürtme açılı enjektörler ile yakıt hava karışımının kötü karışımı nedeni ile is emisyonlarının arttığını, diğer yandan her üç püskürtme açısı içinde is emisyonlarının pilot püskürtme avansına bağlı olarak ani olarak yükseldikleri anın ise spreyn piston oyuğu iç yüzeyi ile piston üst yüzeyi arasında kalan kısma çarptığı anda oluştuğu görülmüşler, bu sonuçlara göre piston oyuğu içerisinde yanan pilot huzme yakıtının artışına paralel olarak is miktarının artacağını belirtmişlerdir. CO ,THC emisyonları ve ortalama indike özgül yakıt tüketimi (ib_e) ise benzer bir yaklaşım göstermişler ve pilot püskürtmenin ana püskürtmeden uzaklaştığı ve kütlesinin arttığı şartlarda artmışlardır. Araştırmacılar özellikle erken püskürtmenin silindir duvarına çarpması CO ve THC emisyonlarında bir artışa neden olabilir açıklamasını getirmişle, bunu önlemek için pilot püskürtmenin iki veya daha fazla bölünmesinin etkili olabileceğini belirtmişlerdir.

Vanegas vd.[11] tek püskürtme , pilot püskürtme + ana püskürtme, pilot püskürtme + ana püskürtme + art püskürtmenin etkisini, püskürtme avanslarını da değiştirerek, kısmi yük şartları için deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar deneylerini 1.9 lt, sıkıştırma oranı 18.3 olan OHYB püskürtme sistemi kullanan, 4 silindirli, su soğutmalı, direk püskürtmeli, değişken turbo geometrili (VGT) bir motorda gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 2000 d/d motor hızında, EGR uygulanmadan, 700 bar püskürtme basıncında ve çevrim başına toplam 15 mg yakıt püskürterek ve püskürtme stratejisinde bağlı olarak 4.6 bar ve 6.4 bar OİB'ler de gerçekleştirilmiştir. Deneylerde öncelikle tüm yakıt kütlesi tek püskürtme halinde sisteme sokulmuş, daha sonra yakıt kütlesinin 1/8'lik kütleli kısmı pilot püskürtme, 1/8'lik kütlesi art püskürtme olacak

şekilde 3 fazlı püskürtme gerçekleştirilmiştir. Tek püskürtme stratejisi için ana püskürtme zamanı $\dot{U}\ddot{O}\ddot{N}\ddot{O}$ °4 KMA, 1 °KMA ve $\dot{U}\ddot{O}\ddot{N}\ddot{S}$ 2°KMA 5 ° KMA'da olarak dört farklı şekilde uygulanır iken pilot püskürtme 4 farklı avans açısında sisteme sokulmuştur. Tüm şartlar için; pilot püskürtmenin çevrim maksimum sıcaklığının azalması ve ön karışimli yanma safhasında basınç değişim hızının ($dp/d\alpha$) daha yavaş olması nedeniyle NO_x emisyonlarında azalma gözlemlerken is emisyonlarında çok az miktarda artış gözlemlenmiştir, pilot +ana+ art püskürtmeli stratejide ise ana yanma fazı sonrası karışım iyileşmesi nedeni ile is emisyonlarında azalmalar görülmüştür.

Zhang [12] OHYB püskürtme sistemi ile donatılmış tek silindirli yüksek hızlı bir diesel motorda, pilot püskürtmenin is, NO_x ve yanma gürültüsü üzerine etkilerini incelemiştir. EGR'nin pilot ile oluşturduğu kompleks etkiyi araştırabilmek için soğutulmuş EGR kullanılmıştır. Tek silindirli motorda yapılmış olan deneylere ek olarak pilot püskürtmenin etkisini inceleyebilmek için yanma odası transparan olan bir motorla da deneyler yapılmıştır. Deneyler 2200 devir/dakika (d/d) motor hızında düşük, orta ve tam yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Düşük yükte yapılan ve pilot püskürtme avansının değiştirildiği deneylerde, pilot püskürtme yapılan durumlarda yanma gürültüsü-is eğrisinin tek püskürtme yapıldığı durumlara göre oldukça iyileştiği, ancak tam yük şartlarında ise sonuçların çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. HRR eğrilerinde yapılan incelemede; düşük yükte pilot püskürtme yapılması durumunda HRR eğrisinin maksimum değerinin düştüğü ve daha yumuşak bir yanma gerçekleştiği, tam yükte yapılan pilot püskürtme durumunda ise ana HRR pikinin ve karakteristiğinin değişmediği görülmüştür. Tam yükte karşılaşılan bu etki, pilot püskürtme miktarının büyük olması durumunda pilot hüzmünün TG sinin uzaması ve bu nedenle pilot püskürtme kaynaklı gürültünün artmasına ve aşırı pilot püskürtme yapılması durumunda maksimum silindir içi basıncın yükselmesine bağlanmıştır. NO_x emisyonlarını azaltabilmek için pilot püskürtme ile birlikte EGR uygulanması durumlarında tek püskürtme durumuna göre is miktarlarında büyük artışlar görülmüştür. Aynı çalışmada transparan bir motorla pilot püskürtmenin is emisyonları üzerine etkisi de incelenmiş, ana püskürtmenin başladığı anda yanma odası içerisindeki pilot püskürtme kaynaklı alev büyüklüğünün pilot püskürtme kaynaklı is emisyonu üzerine etkisi incelenmiştir. Araştırmacılar pilot püskürtme kaynaklı alev boyutunun

çok büyük olması (is ışıması kaynaklı alev) ve ana püskürtmenin bu alev bulutu içerisinde doğru penetre ediyor olması durumunun kötüleşmiş karışma ve pilot alevindeki is'in oksidasyonunda kötüleşmeye yol açtığı belirtilmişlerdir. Büyük pilot püskürtme miktarı, ana püskürtmenin yapılması için pilot püskürtmenin yanmasına yetecek kadar bekleme zamanı ve pilot püskürtmenin yetersiz karışması etkilerinin kombinasyonu ana püskürtmenin yapıldığı anlarda yanma odasındaki alev boyutunu büyüttüğü yorumu yapılmıştır. Bu nedenle optimize edilecek olan; pilot püskürtme miktarı ve pilot püskürtme – ana püskürtme arası bekleme süresi parametreleri kombinasyonu ile pilot püskürtme kaynaklı is miktarı azaltılabilir ki bunun için optimum şartın küçük miktarlarda pilot püskürtme ve ardından uzun bir bekleme zamanının ardından ana püskürtmenin yapılması önermesi getirilmiştir. Ek olarak, transparan motorla yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki uzun bekleme süresinin is emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir.

Badami vd. [13] 4 silindirli OHYB püskürtme sistemi ile donatılmış bir motorda pilot püskürtmenin zamanlamasının ve miktarının is, NO_x emisyonu, yakıt sarfiyatı ve yanma gürültüsü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler; i) 1500 d/d - 5 bar ortalama efektif basınç (OEB), 14% EGR, ii) 2000 d/d – 2 bar OEB , 40% EGR iii) 2500 d/d -8 bar OEB, 16% EGR şartlarında gerçekleştirilmiştir. Pilot püskürtme süresi bitimi ile ana püskürtme arasındaki bekleme süresi (Dwell Time- DT) ın 500 µs'nden büyük değerleri için ana püskürtmenin TG sinde azalmaya yol açarken DT'nin daha da fazla azalması ana püskürtmenin TG sinde çok fazla değişikliğe yol açmamıştır. 500 µs'nden büyük DT değerleri için ana püskürtmenin HRR en büyük değeri azalırken 500 µs'nden küçük değerler için HRR en büyük değerleri yükselmiştir. DT'nin 500 µs ye kadar yükselmesi is emisyonlarını artırırken bu etki ana püskürtmenin ön karışimli yanma fazının azalmasına bağlanmıştır. Artan DT zamanları NO_x emisyonlarını azaltmıştır ve bu etki ana püskürtmenin TG sinin ksalmasına bağlanmıştır.

Carlucci vd.[14] 2 litre 4 silindirli ve OHYB püskürtme sistemi kullanan bir motorda yaptıkları deneylerle pilot püskürtmenin performans ve emisyonlar üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler 1400 ve 2000 d/d motor hızlarında, ve her hız için 3 farklı motor torku olmak üzere toplam 6 noktada gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde pilot püskürtme avansının artmasının yanan pilot püskürtme miktarını

azalttığı ve ana püskürtme kaynaklı ısı açığa çıkışının maksimum değerini yükselttiği, pilot püskürtme avansının azalmasının ise yanan pilot püskürtme miktarını arttırdığı ve ana püskürtmenin HRR pikini düşürdüğünü ortaya koymuşlardır. Pilot püskürtme avansı arttıkça (erken pilot püskürtme yapıldıkça) maksimum silindir içi basıncının da düştüğü gözlemlenmiştir. Pilot püskürtme avansı arttıkça pilot püskürtmeye ait TG'nin uzadığı bu etkinin ise özellikle düşük yüklerde çok belirgin olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır.

Jinwoo Lee vd. [15] tek silindirli su soğutmalı bir OHYB püskürtme sistemi kullanan motor ile aynı çevrimde tek veya çift ön püskürtme stratejilerinin kullanılmasının motor performansı ve emisyonları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma boyunca motor hızı 1200 d/d sabit tutulmuştur. Tüm deney noktalarında çevrim başı püskürtülen toplam yakıt miktarı çevrim başına 60 mg'dır. Tek pilot püskürtme yapılması durumlarında pilot püskürtme ana püskürtme kütlesinin 10%, 30%, 50 %'si (6mg/çevrim, 18 mg/çevrim, 30 mg/çevrim) olarak, çift ön püskürtme yapılması durumlarında ise her bir pilot püskürtmenin miktarını ana püskürtmenin kütlesinin 15%, 25 % (9mg/çevrim, 15mg/çevrim) olarak değiştirmişlerdir. Pilot püskürtme avansı ise ana püskürtme avansı referans kabul edilerek (-10°KMA [ana püskürtmeden 10°KMA önce] + Ana Püskürtme Avansı $^{\circ}\text{KMA}$) ile (-80°KMA + Ana Püskürtme Avansı $^{\circ}\text{KMA}$) arasında değiştirilirken, ana püskürtme avansı ÜÖNÖ 28°KMA ve ÜÖNS 4°KMA arasında değiştirilmiştir. Püskürtme basıncı ise 300 bar ve 1400 bar olarak denenmiştir. Deneyin ana amaçlarından birisi orta yük koşullarında düşük ve yüksek basıncın etkilerinin incelenmesi olmuştur. Düşük püskürtme basıncı (300 bar) orta motor yükünde yapılan çalışmalarda tek püskürtmeli stratejide (TPS) ve pilot püskürtme+ ana püskürtme stratejilerinde (PAPS), ana püskürtme avansı ÜÖNÖ 20°KMA ya sabitlenmiş ve pilot püskürtme avansı ana püskürtmeden den 10 ve 80°KMA önceye ötelenip (ÜÖNÖ 30°KMA , ÜÖNÖ 100°KMA) değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Pilot püskürtme avansının, ana püskürtmeye referansla $10 - 20^{\circ}\text{KMA}$ ya kadar önce yapıldığı durumda (diğer bir ifadeyle pilot püskürtme avansının ÜÖNÖ 30°KMA ve ÜÖNÖ 40°KMA arasında değiştiği stratejilerde) püskürtülen yakıt miktarı arttırıldıkça NO_x miktarının da arttığı görülmüştür. Bunun nedeni ise pilot püskürtmenin başlaması ve yanması arasındaki kısa süreden dolayı yetersiz karışma ve nedeni ile sprey içerisinde

stokiometrik oranda büyük miktarda yakıtın bulunması ve pilot püskürtmenin kendisinin hızlı yanmaya sebep olmasından kaynaklanmakta olduğunu belirtmişlerdir. 20 °KMA ve 40 °KMA öteleme yapıldığı şartlarda ise (ÜÖNÖ 40°KMA ve ÜÖNÖ 60°KMA) pilot püskürtme miktarı sabit kalmak şartı ile pilot püskürtme avansının artması NO_x emisyonlarını beklendiği gibi azalttığını bunun ise pilot püskürtmenin ön karışımli yanma safhasının payını ve maksimum silindir içi basıncı azaltmasından kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir. 40 °KMA'dan daha da ileriye doğru yapılan ötelemelerde (gerçek olarak pilot püskürtmenin ÜÖNÖ 60 °KMA dan önce yapıldığı durumlar) dramatik bir NO_x azalması görülmüş, bu durumun, kısmi ön karışım dolgulu sıkıştırma ateşlemeli (PCCI) yanma karakteristiğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Diğer bir açıklama ise çok erken pilot püskürtme nedeni ile püskürtülen yakıtın büyük miktarının silindir duvarına yapışmasından dolayı yanmaya katılmadığı ve bu nedenle NO_x emisyonlarının azalmış olabileceği şeklindedir. Aynı stratejide; pilot püskürtmenin 10-20 KMA ötelemelerinde (ÜÖNÖ 30 °KMA,ÜÖNÖ 40 °KMA) is miktarında referans stratejiye göre artış görülmüştür. bu pilot püskürtmenin ön karışımli yanma safhasında kullanılmayan yakıtın difüzyonlu olarak yanmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.. Ancak pilot püskürtme avansının 20 °KMA'dan daha fazla ötelendiği durumlarda (ÜÖNÖ 40 °KMA ve öncesi) pilot püskürtme miktarının artması ile birlikte is miktarında bir azalma gözlemlenmiş ve bu gözlemlerini açıklamak için iki teori ortaya koymuşlardır. Birinci teori; sıkıştırma periyodundaki yakıt ile havanın karışım prosesi esnasında iş oluşumunda önemli olan lokal sıcak ve zengin bölgeleri yok olması sebebiyle is miktarı azalması, diğer teori ise; pilot püskürtme miktarının artması ile birlikte ana püskürtme miktarının azalması nedeni ile (*toplam püskürtme sabit kalmak şartı ile*) difüzyonlu yanma süresinin azalması ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklıkta daha uzun süre gerçekleşen yanma prosesi nedeni ile karbon partiküllerinin oksidasyonu uzun süre yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesidir. Pilot püskürtmeyi 40 °KMA daha fazla ötelemelerde (gerçekte ÜÖNÖ 60 KMA° ve öncesi yapılan püskürtmelerde) is emisyonlarında hafifi bir artış gözlemlenmiştir. bunun nedeni çok erken püskürtme sonucu silindir duvarına yapışan yakıtın egzoz hattında is parçacığı olarak yayılmasıdır. Bu strateji HC emisyonları açısından incelendiğinde pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme miktarı arttırıldıkça HC emisyon miktarının arttığı görülmüş, bu etki iki ise iki

mekanizma ile açıklanmıştır. Birinci mekanizma, erken pilot püskürtmeden dolayı düşük olan ortam basıncından kaynaklı olarak sprey penetrasyonun artması ve bu nedenle silindir duvarı, boşluklar ve sınır tabakada absorbe edilmiş yakıtın egzoz prosesi esnasında is emisyonu olarak egzoz hattından atılmasıdır. Diğer bir mekanizma ise pilot püskürtme miktarının artmasıyla (erken) silindir duvarını ıslatan yakıtın nedeniyle fakir olan bölgelerin daha da fakir bir hale getirmesi ve bütün bir reaksiyon için soğuk kalmasından kaynaklanmasıdır. İb_e'de HC emisyonları ile benzer eğilim göstermiştir. Tek pilot püskürtme durumlarında silindir içi basınç ve HRR analizlerinde, pilot püskürtme miktarı arttıkça pilot püskürtmenin TG sinin kısaldığı, pilot püskürtmenin HRR pikinin büyüdüğü ve pilot püskürtme kaynaklı ısı açığa çıkışının arttığı görülmektedir. İki pilot püskürtme yapıldığı durumlarda (kütlesel olarak toplam püskürtmenin 15%/15% ve 25%/25% oranlarında) incelendiğinde her iki püskürtmenin de önceye alındığı durumlarda NO_x emisyonlarında bir azalma görülmektedir. Ancak 1.pilot ile 2.pilot arasında 40 °KMA olduğu durumlarda anormal bir artış görülmüş, ancak açıklanamamış, ileri incelemeye ihtiyaç duyulmakta olduğu belirtilmiştir. Çift pilot püskürtme stratejisi ile oluşturulabilen daha homojen bir püskürtme yapısının NO_x emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir. Azalmanın boyutu çift püskürtmeye ayrılan yakıtın miktarı arttıkça artmıştır. Ancak ana olarak püskürtme zamanlaması olarak 2.pilot püskürtmenin zamanlaması (1.pilot püskürtmeye göre) NO_x azaltımında daha baskın olarak bulunmuştur. Ötelenen 1 ve 2.püskürtme zamanlamaları ile birlikte de is emisyonları azalmıştır. Bu ise daha homojen bir dolgu oluşumu sonucu yakıtça zengin bölgelerin azalmasından kaynaklanmaktadır. Pilot püskürtme kütlelerinin artması ile birlikte difüzyonlu yanma fazındaki azalma nedeni ile is emisyonlarında azalma görülmüştür. NO_x emisyonlarındakine benzer şekilde 2.pilot püskürtme zamanlamasının is emisyonları üzerinde 1.pilot püskürtmeye göre daha belirleyici olduğu görülmüştür. Yakıt miktarının 15%/15% olduğu durumlarda sprey penetrasyonu azalacağından ıslak silindir duvarı alanı azalmış ve bu nedenle THC emisyonları azalmış , 25%/25% durumlarında ise penetrasyonu ve dolayısıyla ıslak alan arttığından THC emisyonları artmıştır.

Shayler vd.[16] 0.5 l tek silindirli ve altı delikli piezo-elektrik aktivasyon prensibine göre çalışan prototip enjektörün kullanıldığı püskürtme sistemine sahip bir motor üzerinde

belirli işletme şartlarında optimum fazlandırma stratejileri üzerinde araştırma yapmışlardır. Araştırmacılar; ana püskürtmenin hangi oranlarda ikiye bölünmesi gerekliliği, ilk ana püskürtmenin püskürtme zamanlaması, ikinci ana püskürtmenin birinci ana püskürtmeden ne kadar sonra başlaması gerektiği, biri EGR oranı olmak üzere dört farklı parametrenin varyasyonunun yakıt sarfiyatı, NO_x ve is emisyonları üzerine etkilerini ve bu çıktı parametrelerini optimize eden püskürtme stratejilerini belirlemeye çalışmışlardır. Deneyler 850 bar püskürtme basıncı, 2100 d/d motor hızı ve 4 bar OEB sabit işletme şartında gerçekleştirilmiştir. Pilot püskürtme avansı ise sürekli olarak ilk ana püskürtmeden 25 °KMA önce olacak şekilde sabit bırakılmıştır. Araştırmacılar fazlı püskürtmedeki ana püskürtme prosesinin ikiye bölünerek NO_x ve is'in azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Pilot+tek ana püskürtme stratejisinden pilot+çift ana püskürtme stratejisine geçildiğinde is- NO_x eğrisi azalma yönünde eksenlere yaklaşıp da *(iyileşme yönünde eğilim gösterebilir de)* bu yaklaşım esnasında bir çok deney noktasında yakıt sarfiyatı ve özgül THC, CO emisyonları artmıştır. Örnek olarak maksimum NO_x azaltımının elde edildiği (64%) test noktasında yakıt sarfiyatı 16%, THC 76% ve CO ise 125% artarken, isin maksimum (60%) azaldığı stratejide yakıt sarfiyatı 18%, THC 75%, ve CO ise 114% artmıştır. Araştırmacılar bu karmaşık strateji yapısını optimize edebilmek için elde edilen emisyon değerlerinin Euro IV emisyon regülasyon limitlerine bölünerek normalize edildiği ve bu normalize edilmiş değerlerin toplanmasından oluşan bir Z değerinin (boyutlu) minimizasyonuna dayanan bir yöntem izlemişlerdir. Ana püskürtmenin çok yakın aralıklarla ikiye bölündüğü durumda (yani bölünmüş püskürtme 1.ana püskürtmenin bitişinin hemen sonrasında (0-1°KMA) olduğu durumlarda is oksidasyonunun hızlandığı ve is emisyonlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Ana püskürtmenin büyük oranlarda birbirinden ayrıldığı ve büyük aralıklara püskürtüldüğü durumlarda ise (ikinci büyük bir art püskürtme gibi) ise NO_x oluşum sıcaklığı ve üzerine ulaşabilecek olan yakıt kütlesi azaldığından (büyük bir yakıt kütlesinin art püskürtme olarak atılması) NO_x Emisyonları azalmıştır. Diğer yandan elde edilen optimum eğrinin minimum değerinin ardından EGR oranının artırılması NO_x emisyonlarını azaltırken is emisyonlarında belirgin bir artışa sebep olmuştur. Deneyin gerçekleştirildiği 12 noktada daha sonradan hassasiyet analizi ve performans değerlerindeki ufak değişimleri telafi edilebilirliği için tüm değerler $\pm 2,5$ aralığında

yeniden taranmış ve bir optimum aranmıştır ancak bu araştırma genel olarak daha yüksek is ve NO_x değerleri ile sonuçlanmıştır. Diğer yandan ana püskürtme avansının erkene çekilmesi (ÜÖNÖ 8°KMA) ve EGR oranının arttırılması özgül yakıt sarfiyatında iyileşmelere neden olmuş, bu etki HRR'yi arttırmıştır. Yakıt sarfiyatını azaltan bu stratejiler aynı zamanda is , THC ve CO emisyonlarında da azalmalara neden olmuştur. Ana püskürtmenin ayrışma oranını artırarak birbirlerinden ayrılma zamanlarının azaltılması ana püskürtme zamanlamasının öne çekilmesinden veya EGR oranı parametresinden daha fazla etkin olmuştur. Birinci Ana püskürtmenin avansının is emisyonları üzerinde çok fazla etkin olmadığı görülmüştür. THC ve CO'yu azaltan stratejilerin NO_x emisyonlarını artırması üzerine ana püskürtme avansı geciktirilmiş, EGR arttırılmış, ana püskürtmenin ayrışma oranı azaltılarak birbirlerinden ayrılma zamanları artırılmıştır. Ancak NO_x üzerindeki baskın faktörün ana püskürtmenin zamanlaması (pilot püskürtme avansı sabit olmak kaydıyla) ve EGR oranı olduğu görülmüştür.

Minami vd. [17] 6 silindirli direk püskürtmeli ve pilot püskürtmeyi özel pistonlu bir pompa tasarımı sayesinde gerçekleştiren turbo şarjlı diesel bir motor üzerinde pilot püskürtmenin zamanlaması ve püskürtme miktarını değiştirerek yanma ve emisyonların değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları deneyler neticesinde, farklı işletme şartları için farklı optimum pilot püskürtme kütlesi bulunduğu, pilot püskürtmenin ısı açığa çıkış hızı grafiğinin pikini düşürdüğünü, pilot püskürtme yapıldığı durumlarda TG'nin kısılması nedeni ile ön karışimli yanma safhasında yanan yakıt miktarının azaldığı, pilot püskürtmenin etkisinin farklı yük şartlarında farklı şekilde gözlemlendiği, düşük yük şartlarında NO_x emisyonlarda ve yakıt sarfiyatında iyileşme gözlemlenirken is emisyonlarında kötüleşme gözlemlendiği, orta yük şartlarında pilot püskürtme NO_x emisyonlarını bir miktar azaltırken THC emisyonları değişmediği is emisyonunun ise bir miktar arttığı, yüksek yük şartlarında pilot püskürtmenin etkisinin az olduğunu gözlemlemişlerdir.

İshida vd.[18] direkt püskürtmeli, özel tasarımı pistonlu pompa ile pilot püskürtme yapabilen 95 kW gücünde turbo şarjlı bir diesel motor üzerinde pilot püskürtmenin egzoz emisyonları, yanma karakteristikleri ve alev sıcaklıkları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar pilot püskürtme yapılan durumlarda; ana püskürtmenin

TG sinin yarı yarıya azaldığını, özellikle düşük yük işletme şartlarında pilot püskürtmenin geciktirilmesi ile düşük yakıt sarfiyatı ve düşük NO_x emisyonları elde edilebildiğini, özgül yakıt sarfiyatı ile NO_x emisyonları arasındaki ilişkinin iyileştiğini bu iyileşmenin düşük yüklerde daha fazla olduğunu, pilot püskürtme yapılan stratejilerde alev sıcaklığının düştüğünü, pilot püskürtme ile ana püskürtmenin başlangıçlarının arasının kısa olduğu stratejilerde is emisyonlarında kötüleşmeye yol açmadan yakıt, NO_x emisyonları ve yakıt sarfiyatındaki iyileşme için pilot püskürtme miktarının küçük tutulması gerektiği ortaya koymuşlardır.

Goldwine vd. [19] tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı bir motorda pilot püskürtmenin ve püskürtme başlangıcında püskürtme oranının azaltılmasının motorun, yanma karakteristikleri, performansı ve emisyonları üzerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmacıların pilot püskürtme avansını sabit tutarak (ÜÖNÖ 5 °KMA) ana püskürtmeyi ÜÖNS ileriye doğru kaydardıkları ve toplam püskürtme miktarı sabit kalmak şartı ile pilot püskürtme miktarının zamanla arttırıldığı (400 bar püskürtme basıncı,-1600 d/d motor hızında) deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarında en büyük NO_x emisyonunun toplam yakıtın 50%-50 ikiye bölündüğü durumda ortaya çıktığı belirlenmiş, pilot püskürtme ile ana püskürtmenin arası açıldıkça yanma sıcaklıklarının azalması nedeni ile NO_x emisyonu miktarı azaldığı, her iki püskürtmenin bir birine yaklaştıkları durumlarda ise tüm püskürtmelerin silindir içi sıcaklıklar ve NO_x emisyonlarının arttırıldığını gözlemlemişlerdir. Püskürtmeler arasındaki faz arttıkça (pilot püskürtme avansı ÜÖNÖ 5 °KMA te sabit kalmak şartı ile) ikinci püskürtmenin çevrimin oldukça geç bir sürecinde yandığı (düşük sıcaklıkta) ve bu nedenle ortaya çıkan NO_x'un ana olarak pilot püskürtmenin ortaya çıkardığı, pilot püskürtme miktarının azaltılarak pilot püskürtmeler arası zamanın artırılması durumunda CO emisyonlarında artış görüldüğü, püskürtmeler arası zamanlama azaldığında her üç püskürtme stratejisinin de benzer CO sonuçları verdiği, THC emisyonlarının TG'nin karakteristiği ile uyum içerisinde olduğu, TG arttıkça THC emisyonlarının da arttığı, çok küçük miktarlarda pilot püskürtmenin yapılması (0.75 mg/çev) yanma odası içerisine belirgin bir enerji girişi sağlayamadığından ve bu stratejide ana püskürtmenin de geciktirilmesi durumunda görece soğuk ortama püskürtme yapılmasından dolayı ana püskürtmenin TG sinin uzadığı, pilot püskürtme miktarının toplam püskürtmenin

kütlesel olarak 25%, 50%'sine eşit olması durumlarında (1.5 mg/çev, 3 mg/çev) ise pilot püskürtmenin belirgin bir enerji açığa çıkardığı, ana püskürtmenin TG sinin kısaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Erken püskürtme durumlarında yanmanın daha erken tamamlanmasından dolayı egzoz sıcaklıklarının düştüğü ve sıcak gazların silindir içerisindeki geçirdikleri sürenin artması nedeniyle ısı transferinin arttığı, püskürtme zamanlarının arasındaki süre kısaldığı durumlarda (pilot püskürtme avansı ÜÖNÖ 5 °KMA te sabit kalmak şartı ile) iki püskürtmenin de ani olarak birbirine çok yakın biçimde yandığı durumlarda silindir içi sıcaklıkların yükseldiği ve artan CO oksidasyonu ile CO emisyonların düştüğü, aynı şekilde iki püskürtme arası bekleme süresi arttıkça, sıcaklıkların düşmesi nedeni ile CO oksidasyonunun azaldığını ve CO emisyonları arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Pilot püskürtme miktarı arttıkça silindir içi ortalama sıcaklığın ve , CO oksidasyonu arttığı, pilot püskürtme miktarının azalması durumun da ise tam tersi yönde etki ortaya çıktığı görülmüştür. Birinci püskürtme arttıkça sıcaklık artmakta ve doğal olarak CO ve HC oksidasyonu artmakta ve CO–HC emisyonları azalmaktadır. Pilot püskürtmenin çok küçük olduğu durumlar, geciktirilmiş tek püskürtme ile aynı etkiyi göstermektedir (geciktirilmiş tek püskürtme stratejisi sıcaklıkları düşürmesi nedeni ile is oksidasyonunu azaltmaktadır). 1.5 mg püskürtme durumunda ise önce is miktarında artış sonrasında da azalma görülmüştür. Azalma, sıcaklığın azalması nedeni ile oksidasyon da ki azalmaya bağlanmıştır. 3 mg durumunda ise yüksek sıcaklıkların is oksidasyonunu artırdığı ancak sonradan püskürtülen yakıtın az olması nedeni ile oksidasyonunun devam edemediğini belirtmişlerdir. Püskürtmeler arası fazlandırmanın TG üzerine etkisi incelendiğinde ana olarak püskürtmeler 3 şekilde karakterize edilmiş ve 0.6 ms den az faz farklarında tek püskürtme fazına göre çok fazla değişiklik görülmemiş, 0.8-1.2 arası faz farkında ilk püskürtme yandıktan sonra ikinci püskürtme püskürtüldüğünden ikinci püskürtmenin TG'sinin düştüğünü, faz farkının 1.2 ms üzerine çıktığı durumlarda her iki püskürtmede ayrık yanma davranışları gösterdiğini ve yanma sıcaklıklarının düştüğünü ve NO_x oluşumunun da düştüğünü belirtmişlerdir. NO_x oluşumunun pilot ve ana püskürtme arasındaki süreden bağımsız olarak ana püskürtme miktarına bağımlı olduğunu ve erken ana püskürtmenin daha büyük NO_x emisyonları sonucunu verdiği görülmüştür. CO emisyonları incelendiğinde genel olarak püskürtmeler arası süre arttıkça CO emisyonlarının arttığı, pilot püskürtmenin

zamanlamasının CO üzerinde etkin olduğu, minimum CO değerinin pilot püskürtmenin ÜÖN'ya yakın olduğu zamanlamalarda yakalandığı ve CO'nun ana tüm yanan modalarında (birleşik, ayrık, geçiş) pilot püskürtmeden kaynaklandığı, ikinci püskürtmenin (ana püskürtmenin) ilk püskürtmede oluşan CO'yu oksitleyemediğı, bu nedenle düşük yükte diesel operasyonunda fazla püskürtmenin CO artışına neden olabileceğı, pilot püskürtmenin de kendi arasında fazlara ayrılmasının CO miktarını artırabileceğı öngörülmüştür. THC emisyonlarının ise ana olarak ikinci püskürtmenin konumlandığı noktadan etkilendiğı ve iki püskürtme arası zamanlamanın THC emisyonlarını fazla etkilemediğı ve ikinci(ana) püskürtmenin TG si düştükçe THC emisyonlarında bir düşme gözlemlendiğı, ikinci püskürtme miktarı arttıkça spray sınırlarındaki aşırı fakirleşmeden dolayı THC emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. Pilot püskürtme ile ana püskürtmenin faz zamanlarının arasının açıldığı süreçlerde duman koyuluğu azalmıştır. (özellikle küçük pilot püskürtmeler esnasında). Pilot püskürtme miktarı bir miktar arttırıldığında 1.5 mg ise 0.6 msn faz farkında bileşik yanma gibi hareket ettiğinden oksidasyon hızlanmış, is azalmış, 0.8-1.4 arası sıcaklıklar ve lokal AFR düştüğünden is miktarı artmış, 1.4 msn den ötede faz ayrışması ise her iki faz da ayrı yandığından fazların karışımı yanması iyileşmiş ve bu nedenle lokal de sıcaklıklar fakir ön karışimli yanma sıcaklıklarına yaklaşmış ve is düşmüştür. Pilot'un ÜÖNÖ 5 °KMA'da sabit tutulup (pilot kütlesi değiştirilmek şartı ile) ana püskürtmenin avansının ÜÖN' dan sonraya alındığı durumlarda en yüksek tork %50-50% durumlarında el de edilmiş ve bu durumda motor veriminin en yüksek olduğu açıklaması getirilmiştir. En düşük tork ise 25/75 % durumunda elde edilmiştir. Egzoz sıcaklıkları incelendiğinde en yüksek egzoz sıcaklığı en düşük torku veren strateji ile eşleşmektedir. Elde edilen sonuçlar püskürtme stratejisinin motor verimini etkilediğini göstermekte olduğu ve egzoz sıcaklığının da püskürtme stratejisi optimizasyonun da kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Carlucci vd. [20] 2l, 4 silindirli, turbo şarjlı bir diesel motorunda erken püskürtme, pilot püskürtme ve ana püskürtme kombinasyonlarını farklı işletme şartlarında deneyerek silindir içi basınç, ısı açığa çıkışı, yakıt sarfiyatı ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Erken püskürtmelerin ve pilot püskürtmelerde enjektörün uyarma zamanı (dolayısıyla püskürtme miktarı) ve avansları belirlendikten sonra, belirlenmiş

olan ana püskürtme avansında başlayan ana püskürtme motor belirlenen işletme şartını gerçekleyecek şekilde ayarlanmıştır. Çalışmada erken+pilot+ana püskürtme stratejisinin karakteristiği ana olarak pilot püskürtmenin yanma eğilimine bağlı olduğunu, pilot püskürtmenin yanmadığı stratejilerde ana püskürtme TG sinin etkilenmediği ve bu tip durumda(pilotun yanmadığı durumda) ana püskürtme TG sinin, ana püskürtmenin avans zamanlamasına bağlı olduğu, erken+pilot+ana püskürtme stratejisindeki HRR eğrilerinin pik değerlerinin ön karışimli fazda yanan yakıt miktarına göre çok fazla değişkenlik göstermediği, erken+pilot+ana püskürtme ve erken+ana püskürtme stratejilerinin erken püskürtme evresinde püskürtülen yakıt miktarının artırılması ana püskürtmenin TG sinde bir miktar azalmaya neden olduğu, erken+pilot+ana püskürtme stratejisinin uygulanmasında erken+ana stratejisine göre silindir içi basıncın genel olarak arttığı, pilot püskürtmenin yeterince büyük yapıldığı durumlarda pilot püskürtmenin yanması sonucu ana püskürtmenin TG sinde azalma olduğu, daha çok pilot püskürtmenin yanmasının ana püskürtmenin TG sinde daha fazla azalmaya neden olduğu, erken püskürtme miktarının artmasının pilot ve ana yanma TG si üzerinde çok fazla etkin olmadığı, pilot püskürtme tarafından ortaya çıkarılan kümülatif ısı miktarı erken püskürtmenin kısa süreleri için (daha az miktarda erken püskürtme için) daha yüksek olduğu görülmüştür. Kısa süreli erken püskürtmeler (az miktarda erken püskürtmeler) pilot ve ana püskürtmeden önce yanmadığı, yanmayan yakıt ile birlikte aynı çevrimde eğer pilot püskürtmede kısa süreli stratejide uygulanırsa, erken püskürtmede ve pilot püskürtme de püskürtülen yakıtın ana püskürtmenin ön karışimli safhasında yandığı, bu yanma sonucunda oluşan pikin pilot+ana püskürtme stratejisinden daha fazla olduğu ve TG sinin ise kısaldığı görülmüştür (bu normal diesel motorlarda gözlemlenen etkilere göre terstir). Karışım kontrollü yanmanın erken püskürtmenin miktarından çok fazla etkilenmediği, erken püskürtme miktarının (süresinin) artması erken + pilot püskürtme stratejisindeki HRR piklerinin düşmesine neden olduğu, pilot püskürtmenin TG sinin ise pilot püskürtme(miktarından) süresinden bağımsız olarak ÜÖNÖ 12 °KMA da aynı noktada başladığı, pilot püskürtmenin uzun sürelerinde daha iyi bir yanma gerçekleştiği ve ana yanmanın daha öne kaydığı ve ana yanma ön karışım pikinin belirgin oranda düştüğü ve karışım kontrollü fazın etkisinin arttığı görülmüştür. Basınç değişimleri incelendiğinde

erken püskürtmenin çok küçük olduğu durumlarda pilot püskürtmenin yanmadığı ve erken+pilot+ana ve pilot+ana stratejilerinin benzer karakteristikler çizdiği, pilot püskürtme miktarının arttırıldığı stratejilerde pilot+ana uygulanmasında pilot püskürtmenin aynı bir HRR piki yaparak kendi kendine tutuştuğu, ancak aynı miktarda arttırılmış pilot hüzme püskürtüldüğü, erken+pilot+ana stratejilerinde tam ters bir etki görüldüğü ve erken yakıt püskürtülmesinin ardından püskürtülen pilot hüzmenin HRR piki yaparak yandığı bir karakter göstermediği bunun da erken püskürtmenin pilot püskürtmenin yanmasını engelleyici etki gösterdiğini, pilot püskürtmenin geciktirilmesi ile birlikte pilot püskürtmenin HRR diyagramında da belirgin hale geldiği ancak yine de erken+pilot+ana püskürtme stratejisine göre düşük kaldığı görülmüştür. Erken püskürtme miktarını artırmak hem erken püskürtmenin hem de ana püskürtmenin yanmasını ÜÖN'dan önce başlatmaktadır buda HRR pikinde azalmalara neden olmakta dolayısıyla motor termik verimi düşmektedir. Emisyon sonuçları incelendiğinde NO_x emisyonlarındaki azalmanın özellikle erken püskürtmenin miktarının artışında belirgin hale geldiği görülmektedir bu erken+pilot püskürtmenin yanmasının ardından ana püskürtmenin difüzyonlu bir karakterle yanmasından kaynaklanmaktadır. Çok düşük pilot kullanan erken+pilot+ana ve erken+ana stratejilerinde NO_x üretimleri neredeyse aynıdır. Uzun süreli pilot püskürtmeler yapılan erken+pilot+ana ile erken+ana püskürtme stratejileri karşılaştırıldığında ise erken+ana efektif değildir. Yüksek erken püskürtme oranlarında erken+pilot+ana ve erken+ana stratejileri duman koyuluğunu kötüleştirdiği, tüm testlerde en düşük partikül oranının $150\mu sn$ erken püskürtme yapılan testlerde ortaya çıktığı görülmüştür.

Soruşbay vd. [21] KIVA3V algoritması yardımı ile çok boyutlu model geliştirmiş olup fazlandırılmış püskürtmenin motor performansı, NO_x ve is emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Model çıktıları 6 silindirli, 7.3 litre direkt püskürtmeli bir motorda doğrulanmış olup, model farklı stratejiler için için çalıştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Deneyler tek püskürtme ile kıyaslandığında, fazlandırılmış püskürtmenin yapılması ile $Is-NO_x$ eğrisinin aynı daha düşük değerle çekilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Ana püskürtmenin ÜÖN da sabit tutularak çeşitli oranlarda pilot püskürtme yapıldığı durumlarda, pilot püskürtme ile ana püskürtme arasındaki bekleme zamanının artırılması NO_x emisyonlarında azalmaya is emisyonlarını da

artmaya neden olmaktadır. Ancak bu durumda da daha iyi performans için ana püskürtmenin avansının küçültülmesi gerektiğini, sabit kaldığı durumun NO_x , is ve performansı olumsuz etkilediği, ilk pilot püskürtme kütlelerinin artmasının TG zamanını kısaltacağından ve ön karışımli faz üzerinde sınırlayıcı etki göstereceğinden NO_x un artacağını is in azalacağını, artan ilk pilot püskürtme değerinin türbülans yoğunluğunu artırarak TG zamanını kısaltacağını, bunun nedeninin ise ilk pilot püskürtmenin ortama hareket katması (uyarması) ve daha az miktarda püskürtülmüş olan yakıtın iç soğutma etkisini başlangıçta azaltması neticesinden daha hızlı kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi olduğunu, erken aşamalarda büyük kütleli ön püskürtme ve bir miktar geciktirilmiş ana püskürtmenin yanma kalitesinde ve NO_x emisyonlarında iyileşmeye yol açacağını, art püskürtme yapılan deneylerde, düşük kütleli ikinci püskürtmelerin tek püskürtme stratejisine göre bir avantajının olmadığı, büyük miktarlardaki yakıtın ana püskürtmeden belirgin bir süre sonra püskürtülmesi bazı stratejilerde NO_x emisyonlarında azalmaya neden olsa da aynı anda geç yanma nedeni ile belirgin bir is ve özgül yakıt sarfiyatının artışına sebep olduğunu, fazlandırılmış püskürtmenin ana püskürtme basıncının artması durumunda daha etkili olabileceğini, her iki püskürtme için de farklı püskürtme karakterlerinin NO_x -is dengesini azaltıcı yönde geliştirebileceğini, sonuç olarak püskürtmenin geciktirilmesinin NO_x 'u azaltıcı yönde etki gösterdiğini ancak bu stratejinin maksimum performansın optimum varyasyonunun dışında yer aldığından performansı kötü etkilediği, NO_x miktarında artışa sebep olmadan is miktarında belirgin bir düşüş sağlanabileceğinden, fazla püskürtmenin NO_x emisyonları üzerinde belirgin bir azaltıcı etki göstermesi isteniyor ise bu oranın 20%'nin üzerinde olması ve bekleme aralıklarının uzun olması gerektiği, bunun ise ana püskürtmenin geciktirilmesi ile yapılabileceği, benzer şekilde de 10%'lik kısımdan daha küçük art püskürtmelerin herhangi bir pozitif etki göstermediğini belirtmişlerdir.

Chen [22] art püskürtme üzerine yaptığı çalışmada yanmanın ilerleyen safhalarında art püskürtme ile yanma odasına sokulan yakıt, devam eden yanma prosesine ek olarak yeni bir yanma prosesi daha başlattığı, yeni başlayan yanma prosesi ise silindir içi sıcaklığı ve/veya silindir içi hava yakıt karışım prosesini hızlandırdığını ve bu iki etkinin

ise is partikülü oksidasyonunu hızlandırarak is emisyon miktarını azalttığını sonucuna ulaşmıştır.

Hotta vd. [23] ise yaptıkları çalışmada art püskürtmede yanma odasına sokulan yakıt jeti, ana püskürtme safhasında yanma odasında oluşmuş olan is partiküllerini yanma odası merkezinden uzak kenar bölgeye (squish area) taşıyarak, artan sıcaklık ve hızlanmış hava/yakıt karışımı prosesinin etkisiyle birlikte is partiküllerinin oksidasyonunu hızlandırmakta olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Desantes vd. [24] art püskürtmenin emisyon karakteristikleri üzerine etkilerini üç farklı şart için karşılaştırmış ve art püskürtmenin yanma karakteristikleri üzerine etkilerinin, art püskürtme safhası boyunca sisteme sokulan yakıt miktarı ve art püskürtme avansının(ana püskürtmeye göre) yanma sonu emisyon karakteristiği üzerinde belirgin bir rol oynadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Abdullah vd.[25] 2.72 l ,V6 , VGT, OHYB püskürtme sistemi kullanan, direk püskürtmeli, su soğutmalı bir diesel motor ile, fazlandırılmış (pilot püskürtme ve ana püskürtmenin) püskürtmenin ve püskürtme basıncının etkisini birlikte inceledikleri bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar 300,430,500,600 ve 700 bar püskürtme basıncında, 1500 ve 2000 d/d motor hızında ve 3 farklı motor yükünde testler gerçekleştirmişlerdir. Tüm testler esnasında püskürtme stratejisi; pilot püskürtme 16 °KMA ÜÖNÖ ve ana püskürtme 2.55 °KMA olmak üzere sabitlenmiştir. Her test noktası için 16%-55% arasında (test noktasının şartların da bağlı olarak) soğutulmuş EGR uygulamasına gidilmiştir. Belirlenen her test noktası aynı zamanda EGR olmadan da (EGR=0% iken de denenmiştir) deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm şartlar için (EGR yapılan şartlar dahil) püskürtme basıncının artması ile birlikte maksimum silindir içi basıncı arttığını, ancak motor devri ve yükünün artması ile birlikte basıncın artış oranı azaldığını, basıncın artmasının atomizasyonu iyileştirdiği, başlangıç aşamasında ve devam eden sürede daha hızlı açığa çıkışı ile daha hızlı bir yanma meydana geldiği, toplam yanma süresinin kısaldığı ve bunun pik basıncı artırdığı, motor hızının arttığı durumlarda emilen hava miktarının artmasının çok düşük püskürtme basınçlarda bile tam yanmaya olanak sağladığı, düşük püskürtme basınçlı durumlarda yanma prosesinin ilk aşamalarında sistemin içerisinde bulunan yakıtın az olmasından ötürü pik basıncın

düştüğü, daha yüksek devirlerde içindeki hava miktarının artmasından ötürü , silindir içi basınç yükselme etkisinin azaldığı, EGR yapılan durumlarda EGR yapılmayan duruma göre silindir içi basıncın düştüğü ve bunun ana olarak nedeni ile sistemdeki oksijenin azalmasından kaynaklı olduğu, 700 barda EGR yapıldığı durum hariç tüm test koşullarında püskürtme basıncının artışına bağlı olarak özgül yakıt sarfiyatının düştüğü, bunun nedeninin karışım teşkilinin iyileşmesi ve yüksek yanma oranı olduğu, özgül yakıt sarfiyatının arttığı koşulda ise EGR nedeni ile yanma sıcaklığının düşmesine bağlı olarak yakıt sarfiyatının arttığı, tüm noktalarda basınç arttıkça egzoz sıcaklığının arttığı, tüm test koşullarında basıncın artması ile birlikte NO_x emisyonlarının arttığı, bunun nedeninin damlacık atomizasyonunun iyileşmesine bağlı yanmadaki iyileşme ,sıcaklık artışı ve silindir içerisindeki basınç artışı olduğu, CO ve THC emisyonlarının basınç artışı ile birlikte düştüğü, bunun basıncın artışı ile birlikte daha küçük damlacıklara ayrılan yakıt spreyinin daha fazla oranda havayla buluşması ve okside olması olduğunu belirtmişlerdir.

Hountalas vd.[26] direkt püskürtmeli, tek silindirli, turboşarjlı bir diesel motorda, kısmi (50%) ve tam yüklerde püskürtme basıncının performans ve emisyonlar üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Araştırmacılar, püskürtme basıncı yükseldikçe özellikle düşük hız ve tam yükte NO_x emisyonları önemli miktarda arttığını, partikül emisyonlarının ise püskürtme basıncının arttırılmasıyla önemli ölçüde azaldığı belirtmişlerdir. Kısmi yük ve düşük motor hızlarında partikül emisyonu azalışı daha belirgin görülmüştür. Püskürtme basıncının arttırılmasının yanma süresini kısalttığı ve ısı açığa çıkışını hızlandığı sonucuna ulaşmışlardır. Püskürtme basıncının arttırılmasıyla özgül yakıt tüketiminde azalma gözlemlenmiştir.

Tennison vd.[27] yaptıkları çalışmada, direkt püskürtmeli, dört zamanlı, tek silindirli, yüksek hızlı bir diesel motorda, püskürtme parametrelerinin performans ve emisyonlar üzerindeki etkileri araştırılmışlardır. Araştırmacılar, püskürtme basıncı arttırıldıkça NO_x emisyonlarında büyük artışlar olmadan, is emisyonunda belirgin bir azalış olduğu gözlemlenmiştir. Püskürtme zamanının biraz geciktirilmesiyle her iki püskürtme basıncı değeri için de eşit seviyede NO_x emisyonu elde edilebileceği saptanmıştır.

Literatürde konu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar ile birlikte günümüz de üretimi ve satışı yapılan diesel araçlar incelendiğinde, satışı yapılan araçların büyük çoğunluğunun elektronik kontrollü ortak hatlı yüksek basınçlı (OHYB) püskürtme sistemleri kullandığı ve bu sistemlerde enjeksiyonun sürecinin fazlandırıldığı (özellikle yakın dönemde ki üretimlerde) görülmektedir. Eski nesil mekanik püskürtme sistemi kullanan motorlara bakıldığında da püskürtme sistemi karakterizasyonu (püskürtme başlangıcı ve püskürtme miktarı) tasarlanmış olan mekanik sisteme bağlıdır ve sistemin sınırları; tasarıma göre şekillendirilmiş olan pompa kamı profili, regülatör yay sabitleri, regülatör denge ağırlıkları kütlesi, regülatör mekanik tasarımı, enjektör iğnesi yay sabiti, pompa by-pass kanalları profili vb. parça ve tasarımların birlikte çalışmasının oluşturduğu püskürtme stratejisi varyasyonu kadardır ve bu nedenle püskürtme stratejilerindeki esneklik mekanik sınırlarla sınırlandırılmış durumdadır. Ancak geliştirilmiş olan elektronik kontrol sistemleri ve ortak hatlı yüksek basınç sistemleri ile bu dar sınırlar yerini geniş bir püskürtme stratejileri varyasyonu alanına bırakmıştır. Ancak bu genişleyen alan bir başka sorunu da beraberinde getirmektedir. Belirlenen motor çalışma şartlarını emisyon regülasyonları çerçevesinde sağlayan optimum püskürtme stratejisi ne olmalıdır? Diğer bir deyişle o şart için gerçekleşmesi gereken; püskürtme basıncı, ön-ana-art püskürtmelerin başlangıç zamanları ve bu fazlardaki kütlelerin ne olması gerektiği, gerekiyorsa bu fazların da kendi içerisinde bölünüp bölünemeyeceği ve bölünecekse bölünmüş kütlelerin neler olması gerektiği gibi parametrelerin belirlenmesi ve buna ilişkin püskürtme kombinasyonlarının yani püskürtme haritalarının oluşturularak motor kontrol ünitesi üzerinde yüklenmesi gerekmektedir.

Bu aşamada, motor işletme şartlarının gerek yük ve gerekse motor hızı açısından statik olmadığı göz önüne alındığında, araç motorlarının geniş bir bantta çalıştığı bilinmektedir. Bu nedenle birden farklı bir çok yük ve hız şartları için öngörülen püskürtme stratejisinin (kalibrasyonun) performans ve emisyon olarak çıktılarının bilinmesi gerekmektedir. Bu araştırma ise temelde 1-Deneysel Tabanlı 2- Modelleme Tabanlı ve her iki yöntemin kombinasyonu şeklinde gerçekleştirilmektedir. Püskürtme kalibrasyonu yapılması gereken nokta sayısının çokluğu, püskürtme sisteminin sınırlarının esnekliği, motor üzerinde ki ek sistemlerinde kalibrasyonun yapılması gerekliliği ve tüm sistemin bütünleşmiş bir biçimde çalışmak zorunda olması

araştırmacıları oldukça zorlamaktadır. Motor çalışma noktalarının tümünde, olası tüm stratejilerin deneysel olarak denenmesi ihtimali göz önüne alındığında, deney matrisini aşırı derece de büyüyecektir ki bu araştırma ve geliştirme prosesi için ekonomik ve zamansal olarak efektif değildir. Bu nedenle araştırmacılar modelleme tekniklerini kullanmaktadırlar. Modelleme teknikleri araştırmacıya birçok farklı motor şartını daha önceden bilgisayar ortamında simüle etme şansı verirken, bu sayede araştırma ve geliştirme prosesindeki deney yükü de azaltılmış olmaktadır.

Modelleme teknikleri göz önüne alındığında model çıktılarının gerçeğe yakınlığı(doğruluğu) ile gerekli olan bilgisayar kaynakları (model çalışma süresi) arasında devamlı olarak doğru orantılı bir denge bulunmaktadır. Klasik modelleme teknikleri temel olarak basit yapıdan karmaşık yapıya modellere göre sıralandığında; termodinamik modeller (sıfır ve bir boyutlu), olgusal modeller (sanki boyutlu) , çok boyutlu modeller (CFD-Computer Fluid Dynamics) şeklindedir. En doğru sonuçlar ise en çok işlem zamanı ve bilgisayar donanım-yazılım kabiliyeti gerektiren ve işlem zamanları tek bir çalışma noktası için bazen günler sürebilen çok boyutlu hesaplamalı akışlar dinamiği metodu elde edilebilmektedir [28] . Tüm bu nedenlerden ötürü daha az hesaplama zamanı gerektiren ancak kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verebilen yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu noktada devreye 3 boyutlu hesaplama yöntemlerine göre daha az hesaplama zamanı gerektiren ve endüstride bu güne değin elde edilmiş sonuçlar ışığında geliştirilmiş ve yarı fiziksel yarı ampirik ifadelerle dayanan ve kabul edilebilir sınırlarda motor performans ve emisyon parametrelerini analiz edebilen 1 boyutlu termodinamik simülasyon programları ve karmaşık matematiksel ifadeler kullanmayı gerektirmeyen ve bir sistemin fiziksel çıktılarının tahmin edilebilmesini sağlayan evrimsel hesaplama metodu olan Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımı veya benzer modelleme yöntemlerini kombinasyonlarının kullanımı gündeme gelmektedir[29]. Yapay Sinir Ağları içerisinde bulunduğumuz yakın dönemde karmaşık problemlerin çözümünde geniş bir şekilde kullanılmaya başlanmış olan alternatif bir yöntemdir ve YSA içten yanmalı motorlarda da başarılı bir şekilde uygulanabilir bir teknoloji haline dönüşmüştür[30]. “Yapay sinir” terimi yapay YSA terminolojisinde YSA’nın gelişim prosedürlerinin insan beyninin çalışma biçimine ve bilgiye reaksiyonlarına benzerliğini belirtmek için

kullanılmaktadır[31]. YSA'nın sonuçlar ile ilgili öngörülerinde ki başarısı YSA'nın deneysel bir veri seti ile eğitilmesi ve başka bir bağımsız deney seti verisi ile sınanmasından ileri gelmektedir ve eğer varsa yeni bir veri seti daha YSA yapısına entegre edilirse YSA yeniden öğrenme ve performansını artırma kapasitesine sahiptir[32]. Eğer yeteri miktarda deneysel veri bulunmakta ise YSA ları içten yanmalı motorlar gibi özel uygulamalarda araştırma ve geliştirme süreçlerinde kullanılabilirler. YSA'ların içten yanmalı motorlar kullanımı ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların motorun performans parametrelerini (moment, güç, yakıt sarfiyatı) ,egzoz emisyonlarını, silindir içi basınç değişimini ve motor arızalarını tahmin etmek için YSA ile modelleme tekniğini başarı ile kullandıkları görülmektedir. Doktora tez çalışmamın içerisinde kullanmış olduğum 1 boyutlu termodinamik simülasyon programının tüm alt modelleri ve anlatımı ileriki bölümlerde yapılmış olup alt bölümde YSA metodunun içten yanmalı motorlarda kullanımına ilişkin literatür çalışması verilmiştir.

He vd.[29] içten yanmalı bir diesel motorunda silindir içi basıncını, silindir içi sıcaklığını, silindir duvar ısı transferini, NO_x emisyonlarını, is emisyonlarını tahmin edebilmek için YSA metodolojisinden yararlanmışlardır. Araştırmacılar 7 motor kontrol parametresini; motor hızı(d/d), motor yükü(m_f), püskürtme başlangıcı (KMA°), püskürtme basıncı(bar), pilot püskürtmenin kütlesi, aşırı doldurma basıncı(bar), EGR miktarını YSA'nın standart girdi parametreleri (SGP) olarak kullanmışlardır. YSA'nın tahmin etmesi istenen çıktılar ise silindir içi basıncı (P_{sil}), silindir içi sıcaklığı (T_{sil}), silindir ısı transferi (ITR_{sil}), NO_x ve is emisyonlarıdır. ÇKA yapısında tasarımılanan edilen YSA'yı eğitmek ve test etmek için gerekli olan veri, 2.44 l ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemi kullanan bir diesel motorun KIVA-ERC [33] programından elde edilen çıktıları kullanılmıştır. Araştırmacılar P_{sil} , T_{sil} ve ITR_{sil} tahmini için SGP'ye ek olarak iki parametre daha kullanmışlardır. Bu parametreler; krank açısı (KMA°), püskürtme profilidir. Krank açısı hesaplanmak istenen P_{sil} , T_{sil} , ITR_{sil} in zamana bağlı olarak belirlenebilmesine olanak sağlamak için, püskürtme profili ise yakıt püskürtme prosesi ile ilgili olarak daha fazla fiziksel bilgi taşıması açısından SGP ye eklenmiştir. Araştırmacılar optimum çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) tasarımını şu şekilde bulmuşlardır; P_{sil} tahmini için 9 girdi-14 nöron-1 çıktı(9-14-1), T_{sil} için 9-17-1, ITR_{sil} için ise 9-16-1, NO_x tahmini için 9-5-1, is tahmini için 9-4-1 dir.

YSA'nın eğitiminde ulaşılan en büyük ortalama hataların karesinin toplamı $2,81 \times 10^{-4}$, test aşamasında ise ulaşılan en büyük hata $7,90 \times 10^{-4}$ olmuştur. Araştırmacılar YSA'nın tahmin kapasitesini artırabilmek için SGP + krank açısı + püskürtme profili girdi katmanına, aynı motorun tek boyutlu bir termodinamik model programından elde edilmiş olan silindir içi basınç verisini (ön bilgi) 10. veri olarak girmişlerdir ve oluşturulan bu yeni YSA'nın P_{sil} ve T_{sil} tahminindeki davranışları incelenmiştir. Bu YSA'dan elde edilen sonuçlar ağırlıklı mutlak test hatasının azaldığını ve ön bilgi kullanan bir YSA'nın genelleme yeteneğinin arttığını göstermişlerdir.

Aceves vd. [34] YSA metodolojisi ile içten yanmalı motorlar alanında sıkça kullanılan 3 boyutlu hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) programı olan KIVA3V[35] programını birlikte kullanarak "KIVA3V-ANN" adı altında homojen dolgu sıkıştırma ateşlemeli motorların (HCCI) 3 boyutlu simülasyonunda yeni bir hesaplama aracı geliştirmişlerdir. Çalışma, temelde, diesel motorundaki tutuşma gecikmesi süresinin dizayn edilen YSA tarafından tahmin edilerek 3 boyutlu HAD programına veri olarak girilmesi ve programın çalıştırılmasından oluşmaktadır. Tasarlanan YSA, sıcaklığın, basıncın, hava/yakıt fazlalık katsayısının ve art gaz katsayısının girdi verisi olarak kullanarak tutuşma gecikmesini tahmin etmek üzere dizayn edilmiştir. 3 boyutlu HAD'ın çalıştırılması esnasında her bir adımda YSA tutuşma gecikmesine dair süreyi işlemekte ve her bir hesap hücresi için tutuşma gecikmesi süresini hesaplamaktadır, hesap adımında ilgili süreye ulaşıldığı hücre yamaya başlamakta ve yanma kimyası aktif hale gelmektedir. Tutuşma gecikmesini tahmin için dizayn edilen YSA, kimyasal kinetik hesaplamalarında kullanılan CHEMKIN[36] programının kullanılan iso-octane için eğitilmiştir. Program sıcaklık olarak $600K < T < 1500K$ aralıkta, basınç olarak $1 \text{ bar} < P < 200 \text{ bar}$, yakıt fazlalık katsayısı $0.1 < \phi < 0.45$, EGR oranı olarak $0 < EGR < 0.2$ aralığında 38880 noktada çalıştırılmış ve iso-octane'in tutuşma gecikmesi süreleri YSA eğitimi için kayıt edilmiştir. Toplanan verinin 3 te 2'lik kısmı YSA'nın doğrulanması, 3 te 1'lik kısmı ise YSA'nın testi için ayrılmıştır. YSA'nın eğitilmesi esnasında, deneme yanılma yöntemi ile yapılan analize optimum ara katman sayısının 2, nöron sayısını ise 20 olarak tespit etmişlerdir. Eğitim esnasında standart geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Oluşturulan YSA KIVA3V ye adapte edilmiştir, YSA her hücre için tutuşma gecikmesini, hücreler arasında difüzyon veya adveksiyon (yatay iletim) olmadığını ön görerek

hesaplamaktadır. Tutuşma gecikmesi integralinin değeri çalışmada öngörülen değere (0.7) ulaştığında tutuşmanın başladığı öngörülmüş ve kimya aktif hale getirilmiştir. KIVA3V-ANN hesaplama aracı yapılan iki testle, tahmin kabiliyeti açısından teste tabi tutulmuştur, birinci test tek silindirli 1.6 lt hacminde, 11.2:1 sıkıştırma oranı olan ve HCCI prensibine göre çalıştırılan bir motorda 1200 d/d motor hızında 2 bar dolgu basıncında 0.4 yakıt fazlalık oranında gerçekleştirilmiştir, tutuşma gecikmesi süresi emme havası ısıtılarak istenilen değerlerde tutulmuştur. İkinci deney ise tek silindirli 0.981 l hacminde , 17.63:1 sıkıştırma oranının sahip, HCCI prensibine göre çalıştırılan bir motorda 1200 d/d motor hızında, yakıt fazlalık oranı 0.04-0.26 aralığında (tutuşma gecikmesi süresi ÜÖN dan hemen önce gerçekleşmesi için) ve dolgu basıncı 1.2 bar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar deneylerin sonuçlarını, KIVA3V sonuçlarını ve KIVA3V-ANN sonuçlarını aynı anda değerlendirerek geliştirilen hesaplama aracının performansını değerlendirmişlerdir. Yapılan birinci deneyin sonuçları karşılaştırıldığında; KIVA3V-ANN yanmanın ilk safhalarında basınç tahmininde daha düşük değerler üretirken, tutuşmanın gecikmesinin ardından daha hızlı bir yanma ve dolayısıyla daha yüksek basınç tahmini yaptığı görülmüştür. Egzoz emisyonlarına bakıldığında ise CO tahmininde yaklaşık 8 katı yüksek tahmin oranı elde edilirken, (simülasyon:4100ppm, deney:500 ppm), HC emisyonları tahmininde ise oldukça düşük düzeylerde (simülasyon:70ppm, deney:2200 ppm) kalmıştır. 2.deney sonuçları ile karşılaştırıldığında ise KIVA3V-ANN yanma verimini özellikle düşük yakıt fazlalık oranlarında ($\phi < 0.22$) daha fazla olarak tahmin etmektedir ve hem KIVA3V ye hem de deney sonuçlarına göre kabul edilebilir hata oranında olsa da daha kötü sonuçlar vermektedir. Emisyon sonuçları ise; $\phi = 0.20$ değerinde KIVA3V ile oldukça uyum içerisinde çıkarken deney sonuçlarına göre düşük düzeyde kalmıştır. Tüm bu işlemler hesaplama zamanı açısından karşılaştırıldığında, KIVA3V-ANN normal modelleme yöntemine göre sadece 10% daha fazla işlem zamanı gerektirse de özellikle HCCI uygulamalarında kabul edilebilir düzeyde bir hata oranına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Oğuz vd. [32] 3.9 l, direkt püskürtmeli, su soğutmalı bir diesel motorunun diesel, biodiesel, etanol ve karışımları ile çalıştırılması durumunda motor gücünü, torkunu ve yakıt sarfiyatını tahmin edebilmek için YSA yöntemini kullanmışlardır. Test yakıtı olarak

hacimsel 100% diesel, 100% biodiesel(B100), 20% biodiesel +80% Diesel (B20), 5% Ethanol+%20 Biodiesel+75 Diesel(E5B20), 10% Ethanol+%20 Biodiesel+70 Diesel(E10B20), 15% Ethanol+%20 Biodiesel+65 Diesel(E15B20) karışımları kullanmışlar ve tüm yakıtlar test motorunda 1400 d/d – 2800 d/d aralığında 200 d/d aralıkla test edilmiş ve motor gücü, motor torku, motor yakıt sarfiyatı (kg/h), motor özgül yakıt sarfiyatı(gr/kWh) verileri kayıt edilmiştir. 96 test noktasında toplanan veriler 71-25 (74%-27%) nokta olarak sırasıyla YSA eğitime ve YSA test veri grubu olarak rastgele ikiye ayrılmıştır. Çalışmada tek girdi katmanı, bir ara katman ve 4 çıktıdan oluşan ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) tipi bir YSA tasarımı kullanılmıştır. Girdi katmanında yakıtın cinsi ve motor hızı(d/d) ağa verilmiş ve YSA dan dört motor performans verisi (güç, tork, yakıt sarfiyatı, özgül yakıt sarfiyatı) çıktı olarak alınmış ve deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Tüm deney datası 0 ile 1 arasında normalize edilerek ağa girdi olarak verilmiştir. YSA'nın ara katmanında işlem fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyon(tansig) kullanılmıştır. YSA'nın eğitimi ağın çıktıları ile hedef değerler arasındaki toplam hatanın karelerinin toplamının ortalaması 1×10^{-4} olana dek ağ eğitime devam edilmiş, hata oranı istenen toleransa eriştiğinde ise eğitim prosesi durdurulmuştur. Araştırmacılar tüm bu matematiksel işlemleri gerçekleştirmek için Matlab Programı YSA araç kutusunu kullanmışlardır. Ağın yapısı deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiş olup, minimum hata oranını sağlayan ara katman nöron sayısı 28 olarak belirlenmiş ve ağ 2 girdi-28 nöron-4 çıktı tasarımı durumunda kullanılmıştır. Çalışmanın neticesinde araştırmacılar tüm ağ çıktıları ile hedef değerler arasında çok iyi bir uyum ve 0,999 regresyon (R) değeri elde etmişlerdir.

Çanakçı vd. [37] 1.8 l, in-direkt püskürtmeli, su soğutmalı, atmosferik bir diesel motorunun diesel ve bio diesel ile çalıştırılması durumunda performans ve emisyon değerlerini tahmin edebilmek için YSA yöntemi kullanmışlardır. Araştırmacılar deney motorunu 100% diesel yakıtı, atık kızartma yağından elde edilmiş olan 100% bio diesel yakıtı (B100) ve hacimsel olarak 5% (B5), 20% (B20), 50% (B50) bio diesel karışımları ile tam yük şartlarında 1000 d/d, 2000 d/d, 3000 d/d motor hızlarında çalıştırmışlar ve motor performans verileri ve gaz emisyon çıktıları kaydedilmiştir. Bu deneysel veriler rastgele ikiye ayrılarak ilk veri gurubu ile YSA eğitilmiş ikinci veri gurubu ile eğitilmiş olan YSA test edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında 5 farklı YSA çalışmışlardır. Birinci

YSA'da; yakıt özelliklerini (alt ısı değeri, yoğunluk, kinematik viskozite, setan sayısı), motor hızı ve çevresel koşulları (bağıl nem, kuru termometre sıcaklığı, sıcaklık ve basınç) girdi katmanındaki parametreler olarak belirlenmiş olup, hava akış debisi, yakıt akış debisi ve maksimum püskürtme basıncı ise ağırlık tahmin etmesi istenen parametrelerdir. İkinci YSA'da ise ; yakıt özelliklerini, motor hızını, hava ve yakıt akış debilerini, püskürtme basıncını girdi parametreleri olarak belirlenmiş olup, tüm emisyonlar (CO , CO_2 , NO_x , is), fren torku, maksimum silindir gaz basıncı, termodinamik verim ise ağırlık tahmin etmesi istenen çıktılardır. Araştırmacılar 1.YSA dan elde edilen püskürtme basıncı çıktılarının hassasiyetinin çok iyi olmadığından 2.YSA'daki tahmin edilen değerlerin hassasiyetlerinin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu nedenle araştırmacılar 1. YSA ve 2.YSA'nın kopyası olan ancak püskürtme basıncının girdilerden çıkarıldığı 3.YSA'yı ve püskürtme basıncının çıktılardan çıkarıldığı 4.YSA'nın tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar son olarak 5.bir YSA daha tasarlamışlar ve 1.YSA kullandıkları girdi parametrelerini aynen bırakarak, çıktı katmanında 1.ve 2.YSA daki parametrelerin tamamının aynı anda tahmin edilmesi istenmiştir. Tüm çalışma için tek ara katman ve hatayı geriye yayma algoritması (hem ölçülenmiş birleşik fark –SCG, hem de Levenberg-Marquardt (LM) algoritmaları) kullanılmıştır. Tüm girdi ve çıktılar normalize edilmiştir. YSA'ların ana katmanında işlem fonksiyonu olarak logaritmik sigmoid fonksiyon (logsig) seçilmiştir. Çıktıları daha hassas tahmin edebilmek için, ara katmanda 5-8 arasında nöron sayıları denenmiştir. YSA çıktılarının deneysel sonuçlar ile regresyonunun kıyaslanmasında, R^2 , RMS ve ortalama % hata değerleri kullanılmıştır. Araştırmacıların oluşturdukları ağlarda alınan sonuçların en iyi kombinasyonu şu şekilde oluşmuştur; 1.YSA: LM algoritması- 6nöron, 2.YSA:SCG algoritması 7 nöron, 3.YSA:LM algoritması 5 nöron, 4.YSA:SCG algoritması 7 nöron, 5.YSA: SCG algoritması 8 nöron. Araştırmacılar tüm YSA'lar için R^2 oranlarını ~0.99 olarak bulmuşlar ve ağların yeterli tahmin kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar son aşama olarak ise tahmin kabiliyetinin yeterli ve diğerleri benzer olduğunu düşündükleri ve tüm çıktıları tahmin edebilen 5.YSA'yı seçerek deney motorunda denenmemiş olan B10,B30,B40,B60,B80,B100 ve diesel yakıtları için devre bağılı olarak özgül yakıt sarfiyatı, fren torku, termodinamik verim ve tüm emisyonlarını (CO , CO_2 , THC , IS , NO_x) YSA vasıtası ile tahmin edip analizler gerçekleştirmişlerdir.

Parlak vd.[38] in-direkt püskürtmeli, Ricardo E6 tipi, tek silindirli, su soğutmalı bir motorda çeşitli yük şartlarında, 1000 d/d, 1400 d/d, 1800 d/d ve 2200 d/d motor hızında, 38 KMA° sabit püskürtme avansında ve yine aynı şartlarda ancak değişken püskürtme avanslarında düşük ısı çıkarımlı bir diesel motorla deneyler gerçekleştirmişler ve bu deneyler esnasında kaydedilen veriler ile oluşturulan YSA ile özgül yakıt sarfiyatı ve egzoz sıcaklığı parametrelerini tahmini üzerine bir araştırma ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar toplam 80 deney gerçekleştirmiş ve bu veri setinin 60'ını YSA eğitimi 20'sini ise tasarımılanan YSA'yı test etmek için ayırmışlardır. Veri seti rastgele yapılan seçimle ayrılmıştır. Tüm verileri 0.1 ve 0.9 arasında normalize edilmiştir. Araştırmacılar eğitim ve test aşamalarında ulaşılan maksimum ortalama rölatif hata 1.93% ve 2.36% olarak bulunduğu belirtmiş olup ve ağın 900 eğitim iterasyonundan sonra kabul edilebilir bir seviyeye ulaştığı ancak bu aşamadan sonra ağın ortaya çıkan hatasında bir düşme yaşanmadığı ve ağın tahmin kabiliyetinin yeterliği olduğu belirtmişlerdir.

Çelik vd. [39] 29.92 l, soğutma suyu sıcaklığının yakıt sarfiyatı üzerine etkisini su soğutmalı, sekiz silindirli 4 zamanlı aşırı doldurmalı askeri amaçlarla üretilmiş bir motor üzerinde YSA metodunu kullanarak (ÇKA ile tasarımılanmış) incelemişlerdir. Motor 1000 d/d ve 2300 d/d motor hızı aralığında, 75 kW ve 450kW güç bandında 75 kW'lık artırımlarla 70 C°, 80 C°, 90C°, 100C° soğutma suyu sıcaklığı şartlarında çalıştırılmıştır ve YSA oluşturulması için gerekli olan verileri toplanmıştır. Motor soğutma suyu sıcaklığı, motor hızı ve motor gücü YSA'nın girdi parametreleri olarak ağa gösterilmiş, özgül yakıt sarfiyatı, egzoz sıcaklığı ve yakıt hava oranı ise çıktı parametreleri olarak ağdan cevap olarak istenmiştir. Araştırmacılar hem SCG hem de LM geri yayılım algoritmalarını kullanmışlar ve tek ara katmanlı ağ tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Ara katman işlem fonksiyonu (aktivasyon fonksiyonu) olarak logsig fonksiyonunu kullanmışlar ve tüm girdi ve çıktıları 0 ile 1 arasında normalize etmişlerdir. Tüm YSA işlemleri için Matlab [40]yazılımını kullanmışlardır. YSA eğitim aşamasında, YSA'nın çıktı tahmin kabiliyetini arttırmak için nöron sayısı 3 ile 5 arasında değiştirilmiştir. Ağın tahmin kapasitesi değerlendirilirken RMS, R^2 değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Araştırmacılar en iyi tahmin değerlerini; özgül yakıt sarfiyatı için SCG 5 nöron, yakıt hava oranı için SCG 3

nöron, egzoz sıcaklığı 5 nöron ile elde ettiklerini belirtmişlerdir. Tüm çıktılar için R^2 değerleri ~ 0.999 , özgül yakıt sarfiyatı için ortalama hata ise 1.03 % dir.

Ghobadian vd.[41] 1.2 l, 2 silindirli, atmosferik, direkt püskürtmeli bir motorun farklı motor işletme şartlarında diesel ve biodiesel yakıtları (B10-B50) ile çalıştırıldığı durumlardaki performans parametrelerini YSA ile tahmin eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar ÇKA kullanan bir YSA yapısı tasarlanmış olup, geri yayılım algoritması olarak LM'yi seçmişlerdir. Aktivasyon fonksiyonu olarak hem logsig hem de tansig fonksiyonları kullanılmıştır. Girdi verileri olarak motor hızı ve biodiesel karışım oranı kullanılırken, YSA'dan çıktı verisi olarak motor torku, özgül yakıt sarfiyatı, CO, HC'yi cevap olarak YSA dan istenmiştir. YSA tasarımı ve hesaplar için Matlab [40]programını kullanmışlardır. Elde edilmiş olan deney veri setinin 80% kısmı YSA'nın eğitimi için 20%' lik kısmı ise doğrulama ve test için ayrılmıştır. Deneme yanılma yöntemi ile yapılan analizlerde ara katmanda 25 nöron kullanımından sonar tahmin kapasitesinin iyileşmediği görüldüğünden tek ara katmanlı 25 nöronlu bir YSA tasarımı kullanılmıştır. Eğitim aşamasındaki hedef 10-5 hata olarak belirlenmiştir. Tasarımlanan tüm YSA'nın korelasyon katsayısı ~ 0.999 , karesi alınmış hataların ortalaması (RMSE) ise 0,0004 olarak bulunmuştur ve oluşturulmuş olan tüm ağların tahmin kabiliyetlerinin yeterli olduğunu belirtmişlerdir.

Ghazikhani vd. [42] 3.7 l, 4 silindirli ,direkt püskürtmeli, turbo atık ısı kanalı(waste gate) ünitesinin pozisyonunun is emisyonları üzerine etkisi YSA metodu ile incelenmiştir. Testler 13 modlu ECE R49 yönetmeliği doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar ÇKA tipinde geri yayımlı bir YSA oluşturmuşlar ve hem LM hem de SCG eğitim algoritmalarını denemişlerdir. Araştırmacılar 6 farklı manifold basıncından oluşan veri gurubunu YSA'yı eğitmek için kullanırlarken, 1.veri grubunu ise YSA'yı test etmek için ayırmışlardır.YSA'nın girdileri emme manifoldu basıncı, emme havası debisi, yakıt sarfiyatı, motor torku ve motor hızı olmuştur. Deneme yanılma yöntemi ile optimum ağın 24 nörondan oluşan SCG eğitim algoritması kullanan ağ yapısı olduğuna karar vermişlerdir. Araştırmacılar tüm hesaplamaları Matlab programı ile yapmışlardır. Aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant sigmoid fonksiyonu kullanmışlardır ve tüm değerleri 0 ile 1 arasında normalize etmişlerdir. YSA'yı değerlendirmek için RMSE, ortalama mutlaka hata oranı (MAPE) ve R^2 değerlerini kullanmışlardır. Araştırmacılar

elde edilen R^2 değerini 0,9998 olarak bulmuşlardır ve ağın genelleme kabiliyetinin test motorunun sonuçlarının değerlendirilmesinin kullanılmasında alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Togun ve Baysec [43] kıvılcım ateşlemeli bir motorun torkunu ve özgül yakıt sarfiyatını tahmin edebilmek için, ateşleme avansını, gaz pozisyonunu ve motor hızını temel alan (girdi olarak kullanan) bir YSA yapısı geliştirmişlerdir. Çalışmada 1.3 lt, su soğutmalı, silindirli bir kıvılcım ateşlemeli motor kullanılmıştır. Motor 1500 d/d ve 3500 d/d aralığında 250 d/d ile test edilmiştir. Testler boyunca tork, yakıt akışı, hava akışı, yakıt sarfiyatı kayıt edilmiştir. Deneyler 50%,75% ve 100% gaz pozisyonları için 10 KMA°, 5 KMA° ve 0 KMA° avans açıları için yapılmıştır. Deneylerin tamamlanmasının ardından 81 deney veri grubu eğitim ve test veri gurubu olarak rastgele olarak ikiye bölünmüştür (63-18). Araştırmacılar tüm hesaplamalarını Matlab programlama dili altında geliştirdikleri bir yazılımla yapmışlardır. Çalışmada tek ara katmanlı geri yayılımlı bir ağ kullanılmış olup, deneme yanılma yöntemi ile yapılan hesaplamalarda optimal ağ yapısının tork tahmini için 3-13-1 , özgül yakıt sarfiyatı için ise 3-15-1 şekilde olduğunu bulmuşlardır. Eğitim algoritması LM, aktivasyon fonksiyonu ise logsig'dir. Çalışmanın sonuçlarına göre YSA'nın tork ve özgül yakıt sarfiyatını tahmininde eğitim aşamasında elde edilen korelasyon katsayıları sırasıyla 0.9997 ve 0.9971 olarak olurken test aşamasında ise 0.99595 ve 0.98331 olarak gerçekleşmiştir ve çalışmanın çıktısı olarak YSA'nın genelleme kapasitesinin olduğa yeterli olduğunu ve bu tip uygulamalarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Yuanwang vd. [44] diesel yakıtındaki toplam setan sayısını, baz setan sayısını ve setan iyileştiricisi toplam setan sayısı ve azot içeriğini girdi olarak kullanan, HC,CO,PM ve NO_x emisyonlarını çıktı olarak tahmin eden KA tipi geri yayılımlı bir YSA tasarımı oluşturmuşlardır. Tasarımlanan YSA tek katmanlıdır ve aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyonunu kullanmışlardır. YSA'nın en iyi sonucu vermesi için optimum nöron sayısı 5 olarak belirlenmiştir. YSA'ların eğitilmesi ve testi esnasında ulaşılan en büyük hata 2.99×10^{-2} 'dir.Araştırmacılar girdi verileri hem tek tek ayrı olarak girdi katmanında kullanmışlar hem de ikerli ve üçerli gruplayarak girdi katmanında kullanmışlar ve sonuçları kıyaslamışlardır. Toplam setan sayısının girdi olarak kullanıldığı YSA da ortalama hatalar 3.40-3.44-1.78-2.32% hata sırasıyla

HC,CO,PM ve NO_x için elde edilmiştir. Baz setan sayısı ve setan iyileştiricisinin girdi olarak kullanıldığı YSA topolojisinde ise ortalama hata oranları 4.86-2.96-1.55-1.87 % olarak sırasıyla HC,CO,PM ve NO_x için elde edilmiştir. Toplam setan sayısı ve azot içeriğinin girdi olarak seçildiği YSA topolojisi ile sadece NO_x tahmini yapılmış ve elde edilen ortalama hata 1.39% olmuştur. Araştırmacılar toplam setan sayısını, baz setan sayısını ve setan iyileştiricisini girdi olarak kullandıkları 3 ayrı ağ geliştirmişlerdir. HC tahmini için her 3 ağında hata oranı benzer düzeylerde kalmıştır.CO tahmini için aynı 3 ağ kullanılmış ancak toplam setan sayısının girdi olarak kullanıldığı ağ yapısının tahmin kapasitesi diğer iki ağa göre daha düşük kalmıştır. Partikül Madde (PM) ve NO_x tahmininde ise toplam setan sayısını kullanıldığı ağın hata oranı diğer ağlara göre daha büyük olmuştur. Araştırmacılar toplam hata oranlarını analiz ettiklerinde tek girdiden oluşan ağlar yerine birden fazla girdi verisinden oluşan YSA'ların tahmin kapasitelerinin daha yüksek hassasiyette tahmin kapasitesine ulaşabildiklerini göstermişlerdir.

Sayın vd. [45] 4 silindirli 4 zamanlı 1.6 lt bir motorun özgül yakıt sarfiyatını, termodinamik verimini, egzoz gaz sıcaklığını ve egzoz emisyonlarını tahmin eden ve ÇKA topolojisinde bir YSA kullanan bir model oluşturmuşlardır. YSA'nın eğitimi için test motoru 91,93,95,95 oktan sayılarında 4 farklı yakıtla 1000-2400 d/d arasında 200 d/d aralıklarla 20,30,40 Nm yüklerinde testler gerçekleştirilmiş ve 96 veri grubu elde edilmiştir. Veri grubu 70% eğitim 30% test amaçlı olarak rastgele iki gruba ayrılmıştır. Kullanılan yakıtın alt ısı değeri, motor torku, motor hızı ve emme hava sıcaklığı girdi olarak YSA topolojisine gösterilmiştir. Oluşturulmuş olan ağ yapısı, LM eğitim algoritmasını kullanmış ve tek ara katmandan oluşturulmuştur ve aktivasyon fonksiyonu olarak tansig fonksiyon kullanılmıştır. Oluşturulmuş olan YSA'nın genel tahmin kapasitesi $\pm 10\%$ bandında bulunmuş olup, YSA'nın özgül yakıt sarfiyatının tahmin hata oranı 2.24% , termodinamik verim tahmin hata oranı 2.97% , CO emisyonları ise tahmin hata oranı ise 3.64% , HC emisyonları tahmin hata oranı ise 6.66% dir , egzoz sıcaklığı tahmin hata oranı ise 1.41% olarak bulunmuştur. Araştırmacılar daha fazla sayıda test koşulmasının YSA'nın tahmin kapasitesini arttıracaklarını ve YSA'nın doğru tasarımı ve yeterli test sayısının yapılması durumunda motor çıktı parametrelerinin belirlenmesinde doğru bir yöntem olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Najafi[46] 1.3 l 4 silindirli su soğutmalı kıvılcım ateşlemeli bir motorun 0%, 5%, 10%, 15%, 20% oranlarında etanol-benzin karışımları ile çalıştırılması durumunda; motorun gücünü, torkunu, özgül yakıt sarfiyatını, termodinamik verimini, hacimsel verimini ve emisyonlarını tahmin eden ve ÇKA topolojisinde bir YSA kullanan bir model oluşturmuşlardır. YSA modeline girdi parametresi olarak etanol karışım oranı ve motor hızı gösterilmiştir. Deney verilerinin toplan 70% rastgele seçilerek YSA'nın eğitimi için , kalan 30%'lik kısmı ise YSA'nın testi için kullanılmıştır. Oluşturulan YSA'nın topolojisi 2 girdi , bir ara katman ve 9 çıktı şeklindedir, ağı eğitilmesinde standart geriye yayılım algoritması ve LM tekniği kullanılmış olup aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyon kullanılmıştır. YSA'nın performansını değerlendirmek için R,RMSE, ve MRE değerleri kullanılmıştır. Deneme yanılma yöntemi ile yapılan nöron sayısı belirleme prosesinde ara katmandaki optimum nöron sayısının 20 olduğunu durumlarda tahmin kapasitesinin en iyi olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar hesaplamalarının sonucunda, motor gücü, motor torku, termodinamik verim, hacimsel verim ve emisyonlar (CO, CO₂,HC,NO_x) için elde ettikleri R değerleri sırasıyla 0.99 , 0.995 , 0.981, 0.985 ve 0.986 olmuştur. Elde edilen RMSE'ler ise 0.74 kW, 0.49Nm, 0.59%, 0.48%, 0.003 kg/kWh tir. Araştırmacılar bu sonuçlarla birlikte geliştirmiş oldukları YSA'nın simülasyon sonuçları ve ölçüm sonuçları arasında oldukça iyi bir korelasyon olduğunu ve YSA'nın motor performans parametrelerini tahmin etmede güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Kiani[47]1.3 l 4 silindirli su soğutmalı kıvılcım ateşlemeli bir motorun 5% (E5), 10% (E10), 15%(E15), 20%(E20) oranlarında etanol-benzin karışımları ile 25,50,70% yük koşullarında çalıştırılması durumunda; motor gücünü, motor torkunu ve egzoz emisyonlarını tahmin eden ve ÇKA topolojisinde bir YSA tasarımı yapmışlardır. Tasarımı yapılan YSA da standart geriye yayılım algoritması ve LM eğitim algoritması kullanılmıştır. Deneyler esasında toplanmış olan verinin 80% si ağı eğitimi için, geri kalan 20% si ise YSA'nın testi için kullanılmıştır. YSA ya motor hızı, motor yükü ve etanol karışın oranı girdi parametreleri olarak verilmiş ve altı çıktı parametresinin YSA tarafından tahmin prosesi çalışmıştır. Tüm girdi ve çıktılar 0-1 arasında normalize edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyon kullanılmıştır ve deneme yanılma yöntemi ile yapılan çalışmalarda 25 nöronlu bir ağı tahmin kapasitesi

açısından yeterli olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar tüm hesaplamalarını Matlab ortamında gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı yapılan YSA'lar CO,CO₂,HC ve NO_x için sırasıyla 0.98, 0.96, 0.90, 0.71 korelasyon katsayısı sonuçlarını vermiştir. Araştırmacılar sonuçları değerlendirdiklerinde YSA metodolojisinin hızlı ve etkin bir biçimde motor performans parametrelerinin ve lineer olmayan problem çözümlerinde etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Yusaf vd.[48] 4 silindirli dört zamanlı 32kW maksimum gücündeki bir diesel motorunun 25%, 50%, 75% palm yağı biodieseli ve diesel yakıtı karışımı ile 1000 ile 3000 d/d arasında çalıştırılması durumunda motor performans ve emisyon parametrelerini YSA yöntemi ile tahmin eden bir model üzerinde çalışmışlardır. ÇKA topolojisinde tasarımı yapılan YSA' ya iki parametre girdi parametresi; motor hızı ve biodiesel karışım oranı girilmiştir ve bunun karşılığında YSA'nın altı çıktı parametresi motor gücü, özgül yakıt sarfiyatı, egzoz sıcaklığı ve NO_x, CO ve CO₂ ve O₂ emisyonlarını tahmin etmesi istenmiştir. Deney verisinin 80% si rastgele olarak YSA'nın eğitimi için ayrılmış , 20% si ise ağı test amaçlı olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar tek ve iki katman dan oluşan ara katman yapısını ve artan nöron sayısının ağı tahmin kapasitesine etkisini incelemişler ve en iyi tahmin kabiliyetine sahip YSA ağ topolojisinin 2 ara katman (gizli katman) ve 25 ara nöron dan oluşan yapı olduğunu belirtmişlerdir. Tasarımı yapılan YSA'nın motor gücü ve özgül yakıt sarfiyatı için tahmin kabiliyeti sırasıyla R² si 0,96 ve 0,83 olarak bulunmuştur. YSA'nın emisyon tahmin kabiliyeti değerlendirildiğinde ise, NO_x,CO,O₂ emisyonları için tahmin kabiliyetleri sırasıyla 0.9332, 0.9396, 0.9367 ve 0.9152 olarak bulunmuştur. Araştırmacılar gerçekleştirmiş oldukları analizin neticesinde, YSA'nın güvenilir bir metot olarak motor performans parametrelerinin çıktısının analizinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Shivakumar vd. [49]0.3 l tek silindirli su soğutmalı bir diesel motorunun, 3 farklı sıkıştırma oranında (16-17.5-18) , 3 farklı püskürtme avansında (24-27-30 KMA) , 4 farklı yük şartında ve 4 farklı diesel biodiesel karışım ile (B10,B15,B20,B25) (atık yemek yağından üretilmiş biodiesel) çalıştırılması durumunda motor performans ve emisyon parametrelerinin ÇKA topolojisindeki YSA ile tahminini sunan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yapılmış olan deneylerin 70% sini YSA eğitim için, 15% sini eğitim doğrulama için ve kalan 15%lik veriyi ise tasarımı yapılan YSA'yı test etmek

için rastgele ayırmışlardır. Motor yükü, biodiesel oranı, sıkıştırma oranı ve püskürtme zamanı YSA'nın girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Özgül enerji sarfiyatı, termodinamik verim ve egzoz sıcaklığını tahmine etmek için ayrı, emisyon verileri (NO_x , is ve THC) değerlerini tahmine etmek için ayrı bir ağ kullanmışlardır. Tüm hesaplamalar Matlab tabanında gerçekleştirilmiş olup, eğitim esnasında LM algoritması kullanılmıştır. Ağların değerlendirmesinde ortalama rölatif hata, performans parametrelerinde 5% , emisyon parametrelerinde ise 8%'i limit olarak baz almışlardır. Termodinamik verim, özgül enerji sarfiyatı ve egzoz sıcaklığı için eğitim setindeki ortalama rölatif hatalar sırasıyla 1.914%, 2.281%, ve 2.476% ve test setinde elde edilen rölatif hatalar ise sırasıyla 1.929%, 0.64%, 3.109% olarak bulunmuştur. Emisyon modellemesinde ise elde edilen rölatif hatalar ise; eğitim seti için NO_x , is ve THC için sırasıyla 3.864%, 5.105% ve 7.017% , test seti için ise sırasıyla 4.586%, 5.490%, ve 7.342% dir. Araştırmacılar çalışmanın son aşamasında girdi verilerini sabit bırakarak tüm çıktı verilerini aynı anda tahmin eden ara katmanında 24 nöron bulunduran ve LM algoritması ile eğitilmiş üçüncü bir YSA tasarımı daha oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu üçüncü ağın test setindeki ortalama bağıl hatalar termodinamik verim, özgül enerji sarfiyatı, egzoz sıcaklığı, NO_x , THC için sırasıyla; 1.778%, 2.348%, 2.235%, 5.084%, 5.889%, 8.150% olarak hesaplanmıştır. Her iki farklı yapı (ayrı ayrı tahmin ve toplu olarak sonuç tahmini) incelendiğinde sonuçların toplu olarak tahmin edildiği ağ topolojisinde YSA'nın tahmin kabiliyetinin düştüğü görülmektedir. Araştırmacılar çalışmalarının sonunda YSA metodolojisinin doğru tasarımılanmış YSA yapısı ile hızlı ve etkin bir modelleme metodu olarak motor performans ve emisyon tahmininde kullanılabileceğini ve bu şekilde deney sayılarının azaltılabileceğini belirtmişlerdir.

Krijnsen vd. [50] iki farklı motor tipinde ve test metodunda, 6 silindirli, 12 l, direk püskürtmeli, aşırı doldurmalı, bir diesel motorunun (A motoru), 3 silindirli, maksimum gücü 8 kW olan ve 1500 d/d sabit hızda çalıştırılan su soğutmalı atmosferik bir diesel jeneratör motorun (B motoru) NO_x emisyonlarını tahmin etmek ve bu tahmin üzerinden NO_x emisyonlarını tespit etmeye çalışmak için YSA metodundan yararlanmışlardır. A motoru ETC (European Transient Cycle) koşullarında test edilmiş ve NO_x emisyonları kayıt edilmiştir. B motoru ise 13 saat boyunca işletme parametreleri değiştirilerek çalıştırılmıştır. Her iki durum içinde dizayn edilen YSA'da motor hızını, gaz

kolu pozisyonunu, emme havası basıncını ve emme havası sıcaklığını girdi parametreleri olarak kullanmışlardır. Araştırmacılar literatürdeki bir çok çalışmadan farklı olarak, bazı verilerin anlık değerleri ile birlikte değerlerin değişim geçmişlerini de YSA yapısına girdi olarak eklemişlerdir. A motorunda motor hızının t anındaki ve t-1 anındaki değeri, gaz kolu pozisyonunun t-1, t-2, t-3 anındaki değeri, emme havası basıncının t,t-2,t-3 anındaki değeri ve emme havası sıcaklığının t anındaki değeri YSA ya girdi olarak gösterilirken B motorunda emme havasının t anındaki değeri, emme basıncının t anındaki değeri, emme havasının t anındaki nemi ve motor yükünün t,t-2,t-5,t-8,t-14 anındaki değeri girdi olarak YSA ya gösterilmiştir. Araştırmacıların A motorunun NO_x emisyonlarını tahmininde elde ettikleri ortalama hata değeri 6,7-18% olurken, B motorunun statik çalışması durumunda elde ettikleri ortalama NO_x hata değerleri 3,2-6,7% arasında gerçekleştirmiştir.

Harun vd.[51] 0.3l, atmosferik bir diesel motorun diesel ve farklı biodiesel yakıt karışımları ile çalıştırılması durumunda, dört motor işletme parametresini; motor hızı, motor torku, yakıt tüketimi ve biodiesel karışım oranını kullanarak dokuz motor performans parametresini; CO, CO₂, NO, THC, maksimum basınç, maksimum basıncın olduğu krank açısını, maksimum ısı açığa çıkış oranı, maksimum ısı açığa çıkış oranının olduğu krank açısını ve kümülatif ısı açığa çıkış oranını tahmin eden bir ÇKA topolojisinde bir YSA oluşturmuşlardır. Deney veri grubu; 70% eğitim için, 15% doğrulama için, 15% test için ayrılmıştır. Eğitim fonksiyonu olarak LM algoritması, aktivasyon fonksiyonu olarak ise tanjant sigmoid fonksiyon kullanılmıştır. Araştırmacılar YSA'nın korelasyon katsayısını tahmin edilen CO,CO₂,NO,PMAX, PMAX_{KMA} (maksimum basıncın olduğu KMA°) ,HRR_{MAX} (ısı açığa çıkış oranının maksimum değeri) ,CU_{HRR}(kümülatif ısı açığa çıkış oranı) göre sırasıyla 0.984, 0.987, 0.981, 0.985, 0.942, 0.977, 0.939 olarak hesaplanmıştır. THC tahmininde ise R değeri 0.542 de kalmıştır. Aynı şekilde HRR_{max}KMA (Maksimum ısı açığa çıkış oranının olduğu KMA°) tahmininde de YSA'nın R değeri 0.567 de kalmıştır ve araştırmacılar bu iki parametrenin tahmin oranını yükseltilmesi için YSA'ya yeni parametrelerin eklenmesi gerektiğini ve eğer doğru bir topoloji ile YSA dizaynı yapılırsa YSA'nın etkin ve hızlı bir biçimde motor performans parametrelerinin tahmininde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Yeni nesil diesel motorlarında uygulanmakta olan fazlandırılmış pilot stratejilerinin birden farklı birçok motor yük ve hız şartı için gerek motor performansı gerekse kirletici emisyonlar açısından optimizasyonun yapılarak, bu şartlar altında uygulanması gerekli olan pilot püskürtme stratejileri için geçerli olan püskürtme zamanlarının ve püskürtme miktarlarının neler olması gerektiğinin a) Deneysel Metod b) 1 boyutlu termodinamik simülasyon +YSA metodu c) YSA metodu ile modellenerek belirlenmesi ve uygulamalardaki çıktıların hassasiyetlerinin birbirleri ile karşılaştırılmasıdır.

1.3 Orijinal Katkı

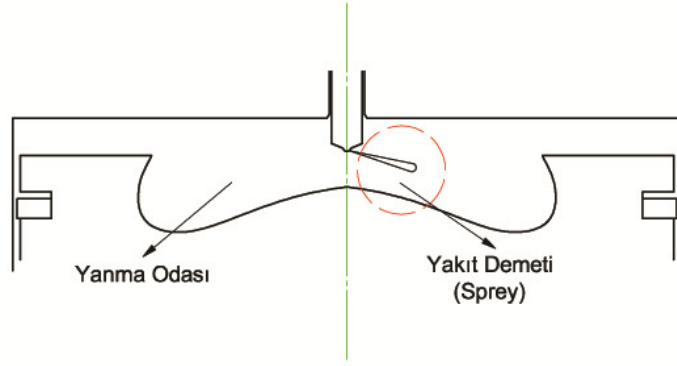
İçten yanmalı motorlar bilimi açısından, bu alanda yapılmış olan gerek deneysel gerekse teorik olarak birçok özgün ve değerli çalışma mevcuttur. Ancak çalışmaların bir çoğu deney matrislerinin büyüklüğü nedeni ile bir yada birkaç deney şartı için gerçekleşmiş olup, bütün motor işletme şartları için incelenememiştir. Geniş bir alana yayılmış olan teorik çalışmalar ise doğrulanmak için büyük deney matrislerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle motor haritası üzerinde geniş bir bandına yayılması gereken bir deneysel ve teorik araştırmaya ihtiyaç olduğu açıktır. Özellikle püskürtme stratejilerinin gelişen enjektör teknolojisi ile birlikte aynı çevrim içerisinde birden fazla püskürtme yapılabildiği göz önüne alındığında, geniş bir bantta yapılan bu tip bir çalışmanın bu alanda yapılmış olan çalışmalara önemli bir katkı sunacaktır. Aynı şekilde proje sonucunda elde edilecek olan çıktılar ve model, üreticiler için bir referans olarak kullanılabilecek olup, konu üzerindeki Ar-Ge zamanlarını kısaltılarak ürün geliştirme prosesi esnasındaki maliyetleri ekonomik açıdan daha verimli hale getirecektir.

DİSEL MOTORLARINDA YANMA VE KİRLETİCİ EMİSYONLAR

Diesel motorlarında fazlandırılmış püskürtme prosesi ve, bu prosesin uygulama yöntemi ile kirletici emisyonlara etkisi incelenmeden önce, diesel motorlarının temel çalışma prensibinin ve püskürtme sürecinde silindir içerisinde süre gelen mekanizmaların irdelenmesi gerekmektedir. Diesel motorlar karışım teşkili açısından iki gruba ayrılırlar. Bunlar 1-Direkt püskürtmeli (*Direct Injection-DI*) , 2-İndirekt püskürtmeli (*Indirect Injection-IDI*) motorlardır. Direkt püskürtmeli diesel motorlarda yakıt yanma odasına bir veya birden fazla deliği bulunan bir enjektör vasıtasıyla direkt olarak püskürtülür. İndirekt püskürtmeli motorlarda ise yakıt bir enjektör vasıtası ile yanma odasına (veya bir türbülans odasına) püskürtülür. Günümüzde kullanılan modern diesel motorların büyük bir kısmı direkt püskürtmeli diesel motordur. Doktora tezimin bundan sonraki kısmında da ana olarak DI diesel motorlarda ki prosesler incelenecektir.

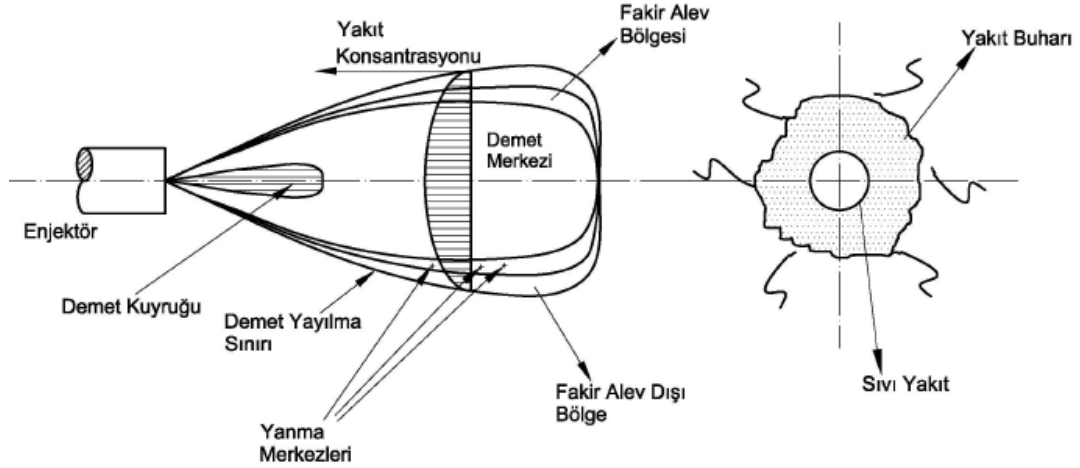
2.1 Diesel Motorlarında Yanma

Diesel motorunda, sıkıştırma fazının sonlarına doğru yanma odasına püskürtülen yakıtın, bir kısmı buharlaşarak ve hava ile karışır.



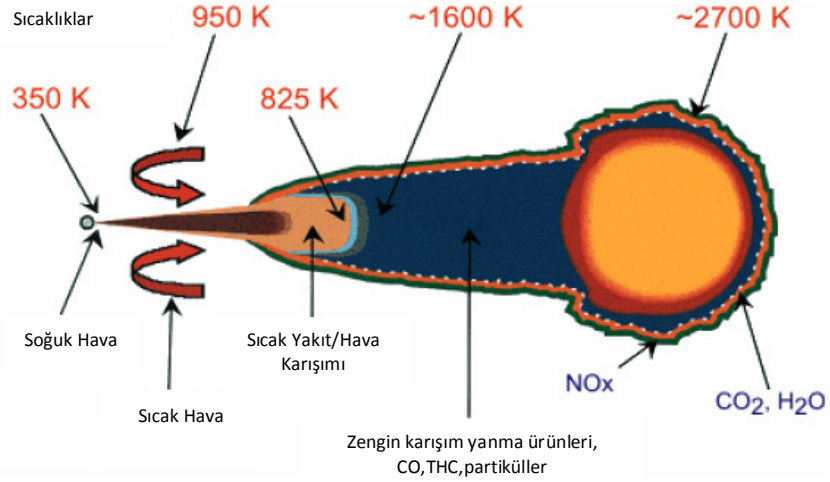
Şekil 2. 1 Yakıtın yanma odasına püskürtülmeye başlaması

Sıkıştırma sonu silindir içi sıcaklığın sıcaklığının yüksek olması nedeni ile püskürtülmüş olan yakıtın, buharlaşmış, hava ile karışmış ve yanabilirlik limitleri içerisinde olan kısmı çok hızlı bir biçimde yanar. Devam eden süreçte, türbülanslı bir biçimde yayılan alev ortamına püskürtülmeye devam eden ve difüze olan yakıtın kendi kendine yanması ile diesel yanması tamamlanır [52]. Şekil 2.1 de direk püskürtmeli bir motorda yakıt demetinin yanma odasına girişi görülmektedir Sprey demeti enjektör memesinin tasarımı esnasında belirlenmiş olan bir açıyla, yanma odasında piston oyuğu içerisinde hareket etmeye başlamaktadır. Şekil 2.1 de kesikli daire içerisine alınmış olan bölümdeki yakıtın yanma odasına püskürtülmeye başladığı andaki sprej demetinin detayı ise Şekil 2.2 de verilmiştir. Şekil 2.2 de enjektörden durgun hava ortamına püskürtülen yakıt, hava ile sürtünmesi sonucu parçalanması gösterilmiştir. Demet çevresinde sürtünmenin fazla olması nedeniyle bu bölgede yakıtta parçalanma oranı yüksek olup çevrede daha küçük taneli damlacıklar oluşur. Küçük taneli damlacıkların kütlelerine göre hava ile temas yüzeyleri daha fazla olduğundan ilk buharlaşan ve yanmaya hazır olan yakıt zerrelere demet çevresinde oluşur. Damlacıkların hazırlanma zamanını tamamlayarak yanmaya başlaması, demet çevresinde birkaç noktada birden meydana gelebilir[53].



Şekil 2. 2 Yakıtın yanma odasına püskürtülmeye başlaması [55][53]

Tutuşmanın başlaması aşamada yanma mekanizması kesin değildir; *i*-alev yayılması ile de olabilir, *ii*-ilk yanmanın etkisi ile artan sıcaklığın sebep olduğu bir kendi kendine tutuşma etkisi ile de olabilir. Başlangıçtaki bu yanma fazı ön karışımli yanma fazı olarak adlandırılmaktadır. Sprey demetlerinin çevresindeki gaz karışımları yanmaya devam ederken, sıcak yanma ürünleri de ortamda bulunmaktadır ve bu gazlar sprej demetinin içerisindeki yakıtın yanma için gerekli oksijenle karışma oranını azaltmakta (oksijenin sprej içerisine penetre olmasını engelleyerek ve sprejin çekirdeğinde sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Bu süreçteki yanma prosesi zengindir ve yanma oranı istisna durumlar dışında türbülansli karışma ile kontrol edilmektedir. Yüksek sıcaklıklar nedeni ile, pik basıncın oluşumundan önce meydana gelen ön karışımli yanma ve karışım kontrollü yanma büyük miktarlarda NO_x oluşumuna neden olabilir. Difüzyonlu yanma sürecindeki yakıtça zengin ortamda ve yüksek basınç altında gerçekleşen yanma prosesi ise büyük miktarlarda partikül madde (çoğunluğu katı karbon) oluşumunu tetikler. Ölü hacimler ise hava ile dolu olduğundan, soğuk ilk çalıştırma şartları hariç yanmamış hidrokarbon miktarları oldukça düşüktür. Fakir yanma nedeniyle egzozdaki Karbon monoksit miktarı düşüktür. [52]. Bir diesel yakıt hüzmelerinin genel görünümü ve yaklaşık sıcaklık dağılımları ve kirlenici emisyonların oluşum bölgeleri genel hatları ile Şekil 2.3 te verilmektedir.



Şekil 2. 3 Buharlaşıp ve yanan diesel yakıt hüzmesinin şematik görünümü[54]

Başlangıç aşamasındaki yanma oranı yüksek olsa da, diesel yanması genişleme prosesine kadar uzayabilecek olan bir sürece kadar devam edebilir. Yanmanın bütünsel bir şekilde analizi ise, sürekli olmayan püskürtme prosesi ile birlikte türbülanslı difüzyonlu yanmanın değerlendirilmesindeki zorluklar nedeniyle oldukça karmaşık bir yapı ortaya koymaktadır[52].

2.1.1 Diesel Spreyi ve Püskürtme

Diesel yakıtı püskürtme memesinin ucundaki bir veya birden fazla meme deliğinden/nozülünden, yanma odasının içerisine gönderilir. Yakıt jeti nozülü terk ettikten sonra türbülanslı bir hal almaktadır ve çevresindeki hava ile karışmaya başlamaktadır. Nozüle yakın kısımlarda, spreyn dış kısmı $\sim 10\mu\text{m}$ çapında damlacıklara ayrılmaktadır. Nozülü terk ederek silindir içerisine doğru penetre olmaya başlayan sıvı sütunu, belirli bir mesafe sonra parçalanmaya başlar, sıvı sütunun farklı çaplarda damlacıklara ayrıldığı bu mesafeye “sprey kırılma uzunluğu-(spray break up length)” denir. Spreyin nozülden uzaklaşmaya başlaması ile birlikte, sprej içerisindeki hava kütlesi artmakta sprej genişlemekte, yayılmakta ve hızı azalmaktadır. Havanın, sprej sistemine girişi ile birlikte yakıt damlacıkları buharlaşmaya başlamaktadırlar. Spreyin ucu ise giderek azalan bir ilerleme hızı ile yanma odasında ilerlemektedir. Günümüzde taşıtlarda kullanılan küçük ölçekli motor boyutlarında yanma odası dizaynları karışım

teşkilinin iyileştirilmesi açısından yanma havasına girdap kazandırabilecek şekilde dizayn edilmektedirler. Sprey başlangıçtaki çıkışına göre radyal ve teğetsel yönde rölatif bir hareket mevcut olduğundan dolayı spreyn durumu kompleks bir hal almaktadır. Sprey silindir içerisindeki havanın içerisinde girmeye başladıktan sonra girdap yönünde bükülmektedir (ilerledikçe büyümenin boyutu da büyümektedir). Spreyin önemli özelliklerinden birisi de, sıvı içeren sprej çekirdeğinin alt kısmında yakıt buharı ihtiva eden büyük bir bölgenin bulunmasıdır. Yakıt püskürtüleme prosesinin temel görevi yakıtın sistem içerisine dağılmasını ve yakıtın hava ile karışmasını sağlamaktır. Motor yükü, sistemin içerisine püskürtülen yakıt miktarı ile kontrol edilmektedir. Diesel spreynin hızı ve sprej uç noktasının yanma odası içerisindeki yakıt-hava karışımına önemli oranda etki etmektedir. Yakıtın aşırı penetre olması, sıvı yakıtın soğuk yüzeylere çarpmasına neden olur, bu etki karışım oranını azaltarak yanmamış ve kısmen yanmış ürünlerden oluşan kirletici emisyonları artırır. Yetersiz penetrasyon ise havanın düşük düzeyde kullanımı ve yanma odasının çevresindeki havanın yakıt ile yeteri derecede buluşamaması ile sonuçlanır. Enjektör memesinden püskürtülerek atomize olan ve bir sprej oluşturan yakıt demeti, havayla karışmadan ve yanmadan önce buharlaşmalıdır. Püskürtmenin başlaması işlemi bittikten sonra (enjektör iğnesi tam kalktıktan sonra) çekirdeğin uzunluğu püskürtme bitene kadar temelde sabit kalır. Bu çekirdek ise yanma odasına daha derinleme olarak penetre eden daha büyük bir buhar içeren bölge ile çevrelenmiştir. Çekirdek ise sprej ucunun sadece bir kısmına kadar uzanmaktadır[55]. Yüksek püskürtme basıncı daha küçük damlacıklar ve dolayısıyla daha hızlı buharlaşma gibi avantajlara sahiptir. Artan püskürtme basıncı ile birlikte damlacık çapı da $(dp/d\alpha)^{-1/2}$ ile orantılı küçülmektedir, sprej penetrasyonu ise $(dp/d\alpha)^{1/4}$ ile orantılı olarak artmaktadır. Elektronik sistemlerin gelişimi püskürtme basıncı, püskürtme zamanını ve püskürtme oranı eğrisini esnek olarak değiştirmek için oldukça uygun bir ortam yaratmaktadır. Emisyon kontrolü amaçlı geliştirilen ön püskürtme ve art püskürtme teknolojisi de bu sistemin örneklerindendir. Bu sistemin kullanım avantajlarına ilerleyen kısımlarda değinilecektir.

2.1.2 Diesel Yanmasının Safhaları

Diesel yanmasının ana olarak dört safhaya ayırmak mümkündür. *i- Tutuşma Gecikmesi, ii- Ön Karışım Yanma , iii-Karışım Kontrollü Yanma – iv-Art Yanma*

Tutuşma Gecikmesi: Diesel yakıtının püskürtmesinin başladığı andan tutuşmanın başladığı ana kadar geçen süre **tutuşma gecikmesi** (TG) süresi olarak adlandırılır. Gecikme süresi boyunca yakıt püskürtülmeye ve buharlaşmaya devam eder. Gecikme ana olarak buharlaşma oranını ve kimyasal reaksiyon oranını etkileyen parametrelerin bir fonksiyonudur. Yakıt karışımında belirgin reaksiyonların başlamasından önce, yakıtın damlacıklara ayrılması, buharlaşması ve hava ile karışması gerekmektedir. DI diesel motorlarda tutuşma gecikmesini etkileyen ana parametreler gecikme süresinde yanma odası içerisindeki havanın sıcaklığı, basıncı, püskürtme zamanlaması, püskürtme miktarı, püskürtme oranı, motor hızı, girdap oranı ve yakıtın kimyasal yapısıdır. Tutuşma gecikmesi ile ilgili olarak motor ve bombalarda birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalarda genel olarak temel bağımsız parametreler, gecikme süresindeki ortalama silindir içi basıncı, gecikmesi süresindeki ortalama silindir içi sıcaklık ve motorun yakıt/hava karışımıdır. En önemli parametre ise sıcaklıktır; ancak bombalarda yapılmış olan deneylerde ~800 K° sıcaklığın üzerinde sıcaklığın tutuşma gecikmesi süresi üzerine etkisinin daha az belirgin olduğu görülmüştür. Bu olgu, kimyasal kinetik gecikmenin çok kısa olması durumunda, fiziksel gelişme önemli bir rol oynamaya başlayacağını göstermektedir. Ancak motorlarda yapılan araştırmalarda, ana püskürtmeden önce çok ufak miktarlarda yakıtın yandığı durumlarda tutuşma gecikmesinin kısaldığı görülmüştür ki buda fiziksel hazırlanma süresinin oldukça kısa olduğunu göstermektedir [52], [55] .

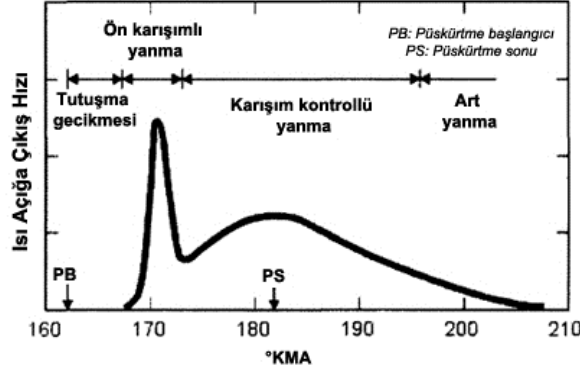
Ön Karışım Yanma: Diesel motorlarında silindir içerisine püskürtülmüş ve hava ile karışmış olan yakıtın ani olarak tutuşması ile gerçekleşen süreç ve hemen sonrası diesel motor terminolojisinde **ön karışım yanma** safhası olarak adlandırılmaktadır. Bu süreci etkileyen en önemli parametre ise tutuşma gecikmesidir. Tutuşma gecikmesinin ardından hızlı bir biçimde yanan yakıt miktarı; yakıt özellikleri, püskürtme parametreleri, silindirdeki akış karakteristiği, silindir içerisindeki iş gazının basıncı, sıcaklığı ve tutuşma gecikmesi süresinde bağlıdır [52]. Tutuşma gerçekleştiğinde

hazırlanmış olan yakıt ani olarak yanar. Bu süreçte birim °KMA başına açığa çıkan ısı miktarı en yüksek değerine ulaşır ve bir pik yapar. TG süresinin uzaması ise bu süreçte sisteme giren yakıt miktarını arttırır, çok hızlı bir basınç artışı ile birlikte daha büyük bir maksimum basınç ve karakteristik olarak çok keskin bir vuruntu sesi oluşturur. Bu tip çalışma şartlarının devamı mekanik arızalara yol açmakla birlikte ses standartları içerisinde yanma gürültüsünün kontrolünü de zor hale getirmektedir. Püskürtme zamanlamasının geciktirilmesi, bir miktar egzoz gazının sisteme sokulması, yada emme havasının ısıtılması bu sorunu giderici yönde etki gösterebilir ancak buda performans ve emisyon parametrelerinde istenmeyen etkilerin görülmesine neden olabilir [52],[55].

Karışım Kontrollü Yanma: Ön karışımli yanma safhasının ardından yakıt, yanan alevin ve yanma ürünlerinin içerisine doğru püskürtölmeye devam eder ki bu süreç **difüzyonlu** veya **karışım kontrollü yanma** süreci olarak adlandırılır. Motorun rejim koşullarında, ön karışımli (hızlı) yanma safhasını takiben yanma oranı, yakıt buharının hava ile karışım oranı ile kontrol edilmektedir. *(Soğuk ilk çalıştırma durumlarında ise damlacık buharlaşması yanma oranını kontrol eden önemli bir parametre haline gelmektedir).* Bu aşamada bir çok proses gerçekleşmektedir. Bunlar temel olarak, sıvı yakıtın atomizasyonu, buharlaşma, yakıt buharının hava ile karışması ve alev öncesi kimyasal reaksiyonlarıdır. Karışım kontrollü yanma safhasında, karbon parçacıklarının oluşumu nedeni ile alev oldukça parlaktır.

Art Yanma: Genişleme prosesinde çok düşük oranda ısı açığa çıkışı devam etmektedir. Yakıtın çok ufak bir kısmının yanmamış olması ya da yakıtça zengin yanma ürünlerindeki enerji açığa çıkışı buna neden olabilir. Genişleme prosesi ilerledikçe silindir içi sıcaklıklarda düştüğünden art yanma kinetikleri de yavaşlarlar [55].

Ön karışımli yanma safhası ve karışım kontrollü yanma safhalarında °KMA başına ısı açığa çıkışının değişimi ise Şekil 2.4 te görölmektedir.



Şekil 2. 4 °KMA başına ısı açığa çıkışının değişimi

2.2 Diesel Motorlarında Kirletici Emisyonlar

Diesel motorlarından yayılan ve ilgili regülasyonlarla kontrol altına alınan kirletici emisyonlar Azot oksitler (NO_x), Karbon monoksit(CO), Partikül Madde (PM) dir. Doktora tezimin bu kısmında, fazla püskürtmenin emisyon kontrolünde kullanılmasıdaki kuramsal temeline geçmeden önce kısaca bu kirletici emisyonların oluşumunun üzerinde durulacaktır.

2.2.1 Azot Oksit Emisyonları (NO_x)

Yanma havasında (atmosferik havada) yaklaşık 79% oranında bulunan azot, diesel yanması sonucu açığa çıkan azot oksitlerin esas kaynağını oluşturur. Farklı azot oksitlerden (NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_5) sadece NO ve NO_2 bileşikleri yanma sonucu kayda değer miktarlarda ortaya çıkar ve bunlar genel olarak NO_x (azot oksitler) emisyonları olarak isimlendirilir. Azot oksitler; azot oksit (NO) ve azot dioksit(NO_2),diesel yakıtını silindir içerisindeki yanması esnasında temel olarak iki mekanizma ile oluşur. Bunlardan birincisi yanma havasında mevcut durumda bulunan O_2 ve N_2 'nin yüksek sıcaklıklara termal olarak birbirine bağlanması, ikincisi ise atmosferik oksijenin yakıt içerisindeki azot içeren bileşiklerle reaksiyonu sonucudur. Her iki temel mekanizmada ağırlıklı olarak NO üretmektedir, çünkü içten yanmalı motorlarda geçen çevrim süresi NO 'nun yanma odası içerisinde NO_2 'ye oksitlenebilmesi için oldukça kısadır. NO_2 termodinamik olarak düşük sıcaklıklarda ortaya çıkar. NO ancak atmosferde NO_2 ye oksitlenir ki bu da fotokimyasal dumanın

oluşmasında ana etkindir [56]. NO; alev cephesinin hemen arkasındaki yüksek sıcaklıkta yanmış gazların bulunduğu azot ve oksijen atom ve moleküllerinin bulunduğu bölümlerde oluşmaktadır. Gaz sıcaklığı ne kadar yükselir ise NO'nun oluşum oranı da o kadar artar. Yanmış gazlar genişleme prosesinde soğumaya başladıklarına NO'nun oluşumuna ilişkin reaksiyonlar donar ve NO seviyesi beklenen denge reaksiyonu seviyesindeki miktarın üzerinde kalır. NO oluşumu en iyi biçimde ısı dengeye dayanan Zeldovich mekanizması ile açıklanabilir. Burada yanmanın stokiometrik oranda karışım ile gerçekleştiği kabul edilir ve gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir. 2.1, 2.2 ve 2.3 no'lu denklemler Zeldovich'in önermesi iken 2.4 no'lu denklem Lavoie'nin sisteme yaptığı önermedir[55].



Motorlardaki silindir içi çalışma koşulları göz önüne alındığında, yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçtaki gazların içerisinde NO oluşumunun en fazla olduğu kritik hava fazlalık katsayısı stokiometrik orana (veya çok az fakir) yakındır[52]. Kritik zaman periyodu yanmış gazların sıcaklığının maksimum olduğu süreçtir ki bu süreç yanmanın başlaması ve pik basıncın oluşmasından hemen sonraki an arasındaki süreçtir. Yanma sürecinin ilk aşamalarında yanan karışım, yüksek bir sıcaklığa sıkıştırıldığı için NO formasyonunda oldukça önemlidir, çünkü bu oluşum sürecinde yanma devam etmekte ve basınç yükselmektedir. Pik basıncın oluşumunun ardından silindirdeki gazların genişlemesi ile birlikte yanmış gaz sıcaklıkları da düşmeye başlamaktadırlar. Genişlemeden dolayı sıcaklığın düşmesi ve yüksek sıcaklıktaki gazın havayla veya daha soğuk bir yanmış gaz ile karışması NO kimyasını/reaksiyonlarını dondurmaktadır[55]. NO'nun azaltılmasında iki metod oldukça verimlidir. Bunlardan birincisi püskürtme zamanının geciktirilmesidir. Bu yakıt ekonomisinde bir miktar kötüleşmeye neden olurken ön karışimli yanma esnasında yanan yakıt miktarını azalttığından oldukça efektiftir. İkinci yöntem ise soğumuş egzoz gazlarının silindir içerisine geri dönüşüdür. Egzoz gazı geri dönüşümü yanma ürünlerinin sıcaklıklarını düşürür. Bu çözümler

NO'nun düşürülmesi için kombine edildiklerinde tam ters olarak diğer bir zararlı emisyon olan ve regülasyonlarla sınırlandırılan edilen partikül madde oluşumunda bir artış meydana gelir[52]. NO_x ve Partikül Madde Dengesine doktora tezimin ilerleyen bölümlerinde değinilecektir.

2.2.2 Karbon monoksit Emisyonları (CO)

Diesel motorları kaynaklı CO emisyonları (Benzin motorları ile karşılaştırıldığında) oldukça düşüktür ve sadece yanma prosesinde is sınırına ulaşıldığı zamanlarda artmaktadır[56]. CO emisyonları içten yanmalı motorlarda hava fazlalık katsayısı ile ilişkilendirilmektedir. CO eksik yanma sonucu oluşur. CO oluşumunu kontrol eden mekanizma kimyasal kinetik kontrollüdür. Ön karışimli hidrokarbon-hava alevlerinde CO konsantrasyonu alev bölgesinde maksimuma yükselir. Bu değer, yakıtın adyabatik yandığı düşünüldüğünde denge değerinden daha büyüktür. Hidrokarbonun yanma mekanizmasında birkaç reaksiyon basamağında meydana gelir. CO oluşum reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Denklemden R hidrokarbon kökü olarak kullanılmıştır. Yanma işleminde oluşan CO oksitlendikten sonra CO₂'ye dönüşür.

Gaz sıcaklığının düşük olması, karışımın homojen olmaması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO₂'ye dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanamaması CO miktarını artırır. Zengin karışımlar için egzozdaki CO, giren yakıt miktarı yükselirken azalan hava fazlalık katsayısı ile birlikte düzenli olarak yükselir. Fakir karışımlar için egzozdaki CO konsantrasyonu ise hava fazlalık katsayısı ile çok fazla değişmemektedir ve toplam mol kesri olarak oldukça küçüktürler (10⁻³ mertebelerinde)[55].

2.2.3 Hidrokarbon Emisyonları (HC)

Hidrokarbonlar organik emisyonlardır. Hidrokarbon içeren yakıtın tamamlanmamış yanma prosesi sonucunda oluşurlar. Diesel motorlarında emme prosesinde sadece

hava emildiğinden ve ufak boşluklarda sadece hava bulunduğundan egzozdaki miktarları oldukça düşüktür. Diesel motorlarındaki HC oluşum mekanizmalarına bakıldığında üç ana başlık karşımıza çıkmaktadır. Bu üç mekanizma içerikleri ile birlikte şöyle özetlenebilir;

Aşırı Fakirleşme : Diesel motorlarında tutuşma stokiometrik orandan çok az fakir karışım oranına sahip olan çekirdeğin alt bölgelerinde gerçekleşir. Burada bulunan yakıt yanabilirlik limitleri içerisinde en fazla zamanı geçirmiştir. Ancak sprey sınırına yakın olan yakıt ise yanabilirlik limitlerinde altında kalacak şekilde karışmıştır ve kendi kendine tutuşmaz veya herhangi bir biçimde bir reaksiyon ön bölgesini devam ettiremez. Aşırı fakir karışım kendi kendine tutuşmayacak veya yanma odasının içerisinde devam etmekte yanma odasının içerisinde devam etmekte olan şartların içerisinde bir alevi besleyemeyecektir. Fakir karışım limitlerinin altında ($\lambda \sim 3.33$) olan fakir karışım miktarı zamanla artar. Bu bölge/karışım sadece çok yavaş termal oksidasyon reaksiyonları ile okside olur ki buda eksik yanma ile sonuçlanır. Bu bölgede yanmamış yakıt, yakıtın de-kompozisyonundan kaynaklı ürünler ve kısmi oksidasyon ürünleri bulunmaktadır ve bunların bir kısmı yanmadan silindir içerisinde kaçmaktadırlar. Bu aşırı fakir bölgelerde oluşmuş olan HC miktarının büyüklüğü tutuşma gecikmesi süresinde püskürtülmüş olan yakıt miktarına, bu süreçteki yakıtın hava ile karışım oranına/karakteristiğine ve hangi koşulların kendi kendine tutuşmaya doğru geçişi sağladığına bağlıdır [55].

Yetersiz Karışma: Diesel motorlarındaki yanma prosesinde yetersiz karışıma neden olan etkenlerden birincisi, yakıtın enjektörü düşük hızda terk etmesidir. Bu durum genelde yanma prosesinin ilerleyen aşamalarında görülür. Bu etkiyi oluşturan en önemli faktör enjektörün oturma boşluk (*sac*) hacminde kalan, yanma ve genişleme prosesleri devam ederken ısınan, buharlaşan ve nozül deliklerinden düşük hızda silindire doğru giren yakıttır. Bu süreçte çok yavaş bir biçimde hava ile karışır ve ana yanma prosesine katılmaz. Yetersiz karışıma neden olan ikinci etken ise aşırı yakıt gönderildiği durumlarda yanma odasına sonradan giren yakıttır.

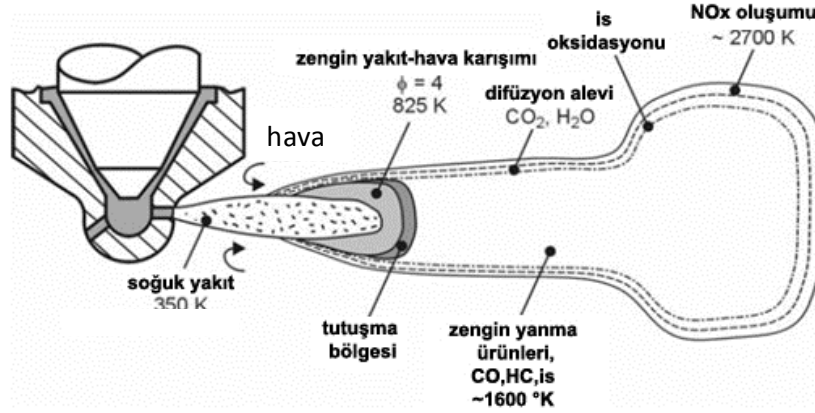
Sönme ve Yanmama/Misfire: Diesel motorlarında yanma prosesi esnasında hidrokarbonların oluşumunda önemli süreçlerinden birisi de alevin sönmesidir. Alevin

sönmesi yanma odasının duvarlarında gerçekleşir. Yanma odasının soğuk duvarları ısıyı ve alev içerisinde oluşmuş olan aktif radikaller karşı yutucu bir duvar gibi işlev görür. Alev söndüğü anda alevin önünde yanmamış bir tabaka yada hacim bırakır. Bu durumda, alevin duvarda sönmesi spreyn yanma odası duvarlarına çarpma derecesine bağlı olarak HC emisyonlarının katkı yapabilir[55].

2.2.4 Partikül Madde Emisyonları (PM)

Diesel motorlarındaki partikül madde emisyonu, ana olarak yanma sırasında oluşan ve bazı organik bileşiklerin de absorbe edildiği karbon parçacıklarından oluşmaktadır. Temelde diesel yanmasının heterojen karakterinden kaynaklanmaktadır.[24]. Partikül formasyonu genel olarak yetersiz havanın bulunduğu yanma ortamındaki termal bozunma nedeni ile olmaktadır. Partikül madde emisyonlarının büyük kısmını is parçacıkları oluşturmaktadır. İS (Partikül Madde) ana olarak difüzyonlu yanma safhasında, yetersiz karışma, eksik yanma nedeni ile difüzyonlu alevin yakıtça zengin kısmında oluşur. Bu bölgelerde yüksek sıcaklık nedeni ile yakıtın de-kompozisyonu mümkündür. Başlangıçtaki ön karışimli yanma safhası, parçacıkların oluşum kaynağı olarak dikkate alınmaz çünkü bu safhadaki yanma stokiometrik oranda gerçekleşmektedir. Direkt püskürtmeli motorlarda, en büyük partikül konsantrasyonu her bir yakıt demetinin çekirdek bölgesindedir ki bu bölgelerde lokal ortalama yakıt fazlalık katsayısı oldukça zengindir[55]. Silindir içi örnekleme valfleri ile yapılan çalışmalarda aşırı zengin yakıt buharının bulunduğu bölgelerde bulunan yakıt kaynaklı karbonunun büyük bir kısmının partikül madde olarak örneklendiği görülmektedir (bunun büyük kısmı is ve yoğunlaşmış HC parçacıklarıdır). Difüzyon alevinin oluşmasının ardından yakıt iki aşamalı bir oksidasyon prosesinden geçer. Birinci aşama oksidasyonu yakıtça zengin olan sıvı spreyn alt kısmındaki (girdap akımlı yanma odasında) ön karışimli bölgededir, ikincisi ise demetin çevresindeki difüzyon alevindedir. İS yakıt fazlalık oranı 2-4 arasında olan ön karışimli bölgelerde oluşur ve is yüzey büyümesi nedeni ile yakıt demetinin merkezinde büyür ve daha sonra bir kısmı difüzyon alevi içerisinde okside olmaktadır. Yakıt demeti içerisinde is oluşum ve oksidasyon bölgeleri Şekil 2.4 te görülmektedir. Yakıtın pirolisisi, is oluşumundaki en önemli etkidir. Silindir içerisinde oluşmuş olan is'in yaklaşık olarak~90% kısmı egzoz prosesinden önce

okside olmaktadır. Sprey çekirdeğinden uzak kısımlarda, sprej ana merkez hattından uzaklaştıkça is konsantrasyonu düşmeye başlar [55].

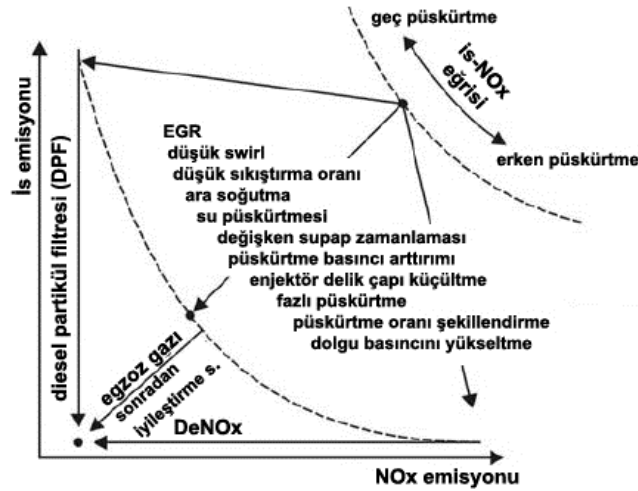


Şekil 2. 5 Diesel Spreyinde İs Oluşum Bölgeleri

İs oluşumu, 1000 °K ile 2800 °K arasında 50 ile 100 atm basınç altında gerçekleşen ve yakıtın tamamını yakabilecek kadar havanın bulunduğu ortamda gerçekleşen bir prostir. Yakıtın bir kısmında is partiküllerinin oluşabilmesi için gerekli süre oldukça kısadır. İs oluşumunun ilk aşaması partikül formasyonudur. Bu aşamada yakıt moleküllerinin oksidasyon ve/veya pirolisis ürünlerinin bulunduğu bölgede yoğunlaşmış fazdaki materyaller ile partiküller oluşmaktadır. Gaz fazında oluşan yoğunlaşma reaksiyonları ilk fark edilebilir is partiküllerinin oluşumuna yol açarlar ve genel olarak çekirdek olarak isimlendirilir. Bu ilk parçacıklar ($d < 2\text{nm}$) oldukça küçüktürler. İkinci aşama ise parçacık büyümesi aşamasıdır. Bu aşama ise yüzey büyümesini, katılaşmayı ve kümelenmeyi içermektedir. Katı fazdaki yüzey büyümesi, gaz fazındaki ürünlerin partiküllerin yüzeyine yapışarak/nüfuz ederek katı faza geçmelerini de içermektedir. Tüm bu is oluşum prosesi boyunca her aşamada; is ve is öncüllerinin yanarak okside olabilirler ki bu esnada bileşikler okside olarak gaz ürünler olan CO veya CO_2 oluşturmaktadırlar. Nihai olarak motordan çıkan toplam is miktarı oluşum prosesi ve oksidasyon yanma prosesi arasındaki dengeye bağlıdır. Açığa çıkan is egzoz gazları, egzoz sisteminde soğur ve hava ile seyrelir. Bu aşamada ise hidrokarbon bileşikleri is partikülleri üzerine tutunarak yoğunlaşabilirler. Bu da is partikülleri üzerine yeni bir kütle eklemesi ile sonuçlanır.

2.2.5 İS-NO_xDengesi

Diesel motorlarının yaydığı kirlетici emisyon kontrolü açısından en problemli konulardan birisi İS-NO_x dengesidir. Problem her iki bileşiğin de oluşumları açısından birbirine ters davranışlara sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. NO_x'un azaltan koşullar is üretimini arttırmaktadır. NO_x emisyonlarının azaltılmasında en etkin yöntem yanma sıcaklıklarının 2000-2200 °K'nin üzerine çıkarılmasından kaçınılmasıdır yada bu sıcaklıklara çıkılan sürelerin oldukça kısa tutulmasıdır. Bu açıdan uygulanabilecek en klasik yöntemlerden birisi enjeksiyonun geciktirilmesi. Enjeksiyonun geciktirilmesi ana yanma fazını genişleme fazına doğru ötelere ve tutuşma gecikmesi sürecinde içeri girmiş olan yakıt miktarını da azaltır. Bu yöntem proses esnasında ulaşılan maksimum sıcaklıkları ve NO_x formasyonunu belirgin bir düzeyde azaltır. Ancak bu durumda sıcaklıkların düşmesi nedeni ile is oksidasyonu azalırken gecikmiş yanma prosesi ve düşük termal verim nedeni ile yakıt sarfiyatı artar. Püskürtmenin çok fazla öne çekilmesi de tam ters bir etki yapacaktır; motor termal verimliliği ve NO_x formasyonu artar iken is emisyonları belirgin bir biçimde düşmeye başlayacaktır.



Şekil 2. 6 İS-NO_x Dengesi[57]

Yakıt püskürtme ve yanma odası sisteminin karakteri her iki emisyonunda oluşumunda ve önlenmesinde oldukça önemlidir. Enjektör memesinin tasarımı (delik sayısı, geometrisi vb.), püskürtme basıncı, püskürtme başlangıcı, püskürtme süresi, püskürtme oranının değişimi, yanma odası dizaynı, hava hareketleri bunlardan bazılarıdır. Örnek olarak daha yüksek girdap hareketine sahip motorlar daha az nozül

sayısına sahip enjektörler ve daha düşük püskürtme basıncı kullanabilirler ancak yüksek girdap emme sisteminin basınç kaybını arttırarak yakıt sarfiyatını artırıcı yönde etki gösterebilir. Ek olarak tutuşma gecikmesi ve ön karışımli pik de yükselir. Başka bir örnek de; çok fazla sayıda delik bulunan enjektörlerde bir delikten püskürtülen yakıtın hemen yanındaki delikten püskürtülmüş olan yakıtın yanmış gazları içerisine püskürtülmesinin gerçekleşmesi olabilir. Bu durum is oluşumunu aşırı derecede arttırır. Günümüzde düşük girdap akımlı motorlar kullanılmaktadır. Karışım oluşumunun az da olsa sprey tarafından sağlanması hedeflenmiştir. Bu nedenle püskürtme basınçları ve delik sayıları yükselmiş ve yeterli sprey penetrasyonunu sağlayabilecek olan geniş yanma odaları tasarlanmıştır. Bu iki örneğe ek olarak bir çok farklı emisyon azaltma yöntemi de bulunmaktadır. Soğutulmuş veya soğutulmamış EGR kullanımı, su enjeksiyonu, emme valfinin erken kapatılması (Miller Çevrimi) vb. Emme valfinin erken kapatılması sıkışmanın daha düşük sıcaklıklardan başlamasına neden olur ancak klasik valf zamanlaması durumu ile aynı dolgu miktarına sahip olmak için aşırı doldurma kullanılması gerekmektedir. Miller çevriminin her noktada aynı verimlilikle kullanılamaması nedeni ile de değişken sübap zamanlamasının kullanılması gerekmektedir.

Dolgu basıncındaki yükselme (artan oksijen miktarı nedeni ile is miktarında azalmaya neden olur) ve düşük sıkıştırma oranlarının kullanımı (pik sıcaklıkların ve NO_x formasyonunun azalmasına neden olur) oldukça avantajlıdır. Ancak bu durumda da istenen yüksek kütle akışlarını istenen yüksek basınçlarda sağlayabilecek olan yüksek verimli aşırı doldurma sistemlerine ihtiyaç vardır.

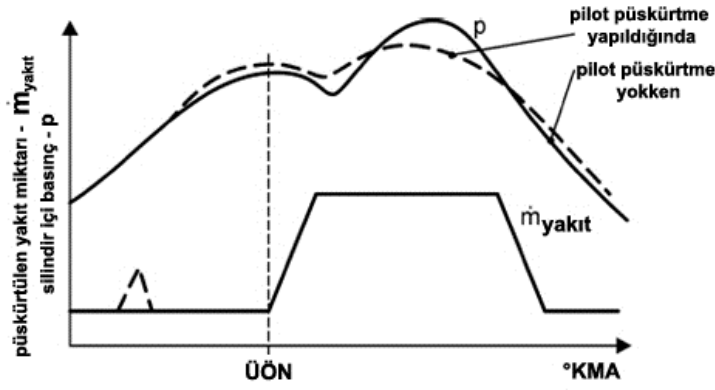
NO_x ve $\dot{I}s$ 'in aynı anda azaltılması farklı birçok yöntem ve parametre kombinasyonunun aynı anda uygulanması gerektirebilir. Ancak her durumda en önemli parametre yakıt püskürtülmesi ve buna dair parametrelerdir. Yüksek esnekliğe sahip püskürtme sistemleri hem is hem de NO_x 'u aynı anda azaltabilecek olan kabiliyetlere sahiptirler. Doktora tezimin bundan sonraki kısmında istenen optimum performans şartlarında optimum $\dot{I}s$ - NO_x dengesini sağlayabilmek için yakıt püskürtme stratejisinin nasıl olması gerektiği ve püskürtme stratejisinin uygulanmasındaki kuramsal temele değinildikten sonra konuya ilişkin olan deneysel çalışma, analiz ve model çıktıları verilerek tartışılacaktır [52] , [55] ,[57].

2.3 Diesel Motorlarında Püskürtmenin Fazlandırılması, Püskürtme Basıncı ve Kirletici Emisyonlar

Modern ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemlerinde kullanılan motor kontrol ünitesi, çeşitli sensörlerden gelen verileri işleyerek, enjektörlere uygulanacak olan akımın süresi ile zamanını kontrol ederek en uygun püskürtme işlemini ve bu işlemin zamanlamasını ,yüksek basınç pompası basıncını , iç by pass miktarını vb. belirlemektedir. Diesel motorlarında kontrol stratejisinin temeli, egzoz ve gürültü emisyonu standartlarının öngördüğü sınırlar dahilinde gereken motor momentinin, minimum özgül yakıt sarfiyatı değerinde elde edilmesine dayanır. Kontrol stratejisinde temel parametre motor hızı ve yüküdür. Hız kontrolüne etki eden girdiler ise püskürtme başlangıcı, püskürtme süresi ve basıncıdır. Bu püskürtme sistemleri aynı çevrim içerisinde birden fazla püskürtme yapabilme (*fazlandırılmış püskürtme*) kabiliyetine sahiptir. Bu püskürtme tipleri temel olarak üç başlık altında toplanmaktadır; ön püskürtme, ana püskürtme ve art püskürtmedir. Ön ve art püskürtme yapabilme yeteneği, diesel motorlarındaki heterojen yanma karakteristiği müdahale ederek aynı anda hem iş hem de NO_x 'un azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

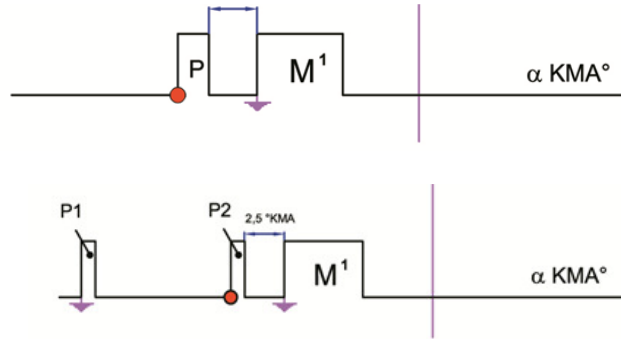
2.3.1 Pilot Püskürtme

Ön karışimli yanma safhasında, tutuşma gecikmesi sürecinde püskürtülen yakıt ani olarak yanar. Bu ani yanma basınç değişimini ($dp/d\alpha$) hızlı bir şekilde artırır. Tutuşma gecikmesi sürecinde püskürtülen fazla yakıt, yanma odasındaki sıcaklık artışını başlangıçta oldukça yükseltir ve NO_x oluşumu için gerekli sınır koşullarını oluşturur. Bu nedenle tutuşma gecikmesini kısaltmak NO_x oluşumunun önlenmesi açısından avantajlıdır. Tutuşma gecikmesinin kısaltılması ise ana püskürtme başlamadan önce ufak bir miktar yakıtın püskürtülmesi ile (pilot püskürtme) ile mümkündür. Önceden püskürtülmüş olan yakıt çabucak buharlaşır ve tutuşma reaksiyonları gerçekleşmeye başlar. Bu reaksiyonlar nedeni ile yanma odası önceden şartlandırılmış olur ve ana püskürtmenin tutuşma süresi kısalır. Bu nedenle de ön karışimli safhanın ısı açığa çıkış piki belirgin bir biçimde düşer (doğal olarak sıcaklıklarda düşer). Bu yöntemin efektif bir biçimde kullanımı ile NO_x emisyonlarını belirgin bir şekilde azaltmak mümkündür.



Şekil 2. 7 Pilot püskürtme durumunda püskürtme oranı ve silindiri içi basınç değişimi [57].

NO_x azaltım boyutu/hedefi dikkate alındığında, bazı işletme koşullarında erken püskürtme ile erken bir yanma başlangıcı mümkün olabilir. Erken yanma başlangıcı termal verimliliğe ve yakıt sarfiyatına iyileştirici yönde bir etki yapar. Ancak önemli olan, püskürtme miktarının, püskürtme basıncının ve püskürtmeler arasındaki bekleme zamanlarının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Genel olarak püskürtme zamanlarının arasının kısa tutulması avantajlıdır. Yüksek yük ve hızlar optimum yakıt miktarını azaltmaktadır. Ön püskürtme genel olarak is miktarında özelliklede kısmi yüklerde bir miktar yükselmeye yol açmaktadır (daha az ön karışimli yanma, düşük başlangıç sıcaklıkları, daha fazla difüzyonlu yanma). Ancak bu etki yakıt sarfiyatını etkilemeden gerçekleştirilebilecek olan bir art püskürtme ile kompanse edilebilir. Tek ön enjeksiyon gerçekleştirilecek olan iki ön püskürtme motor gürültüsünü azaltmak için daha efektif bir yoldur. İki ön püskürtme yapılan durumlarda da yakıt miktarının, püskürtme basıncının ve püskürtmeler arası zamanların iyi ayarlanması gerekmektedir[57].



Şekil 2. 8 Tek ve iki ön püskürtme ve ardından ana püskürtme stratejisinin uygulanması

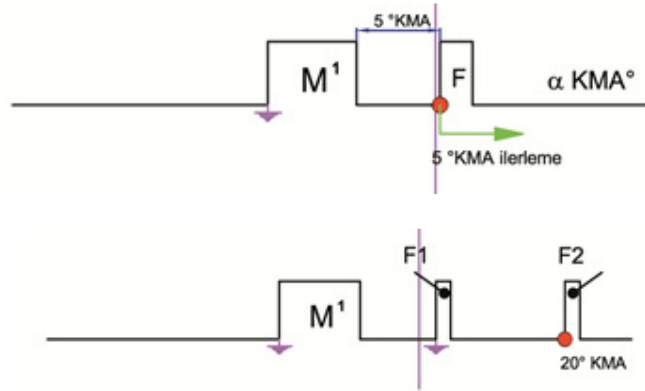
Ana püskürtme fazında püskürtülen yakıt motor torkunu ve gücünü belirlemede en önemli faktördür. Motorun işletme noktasına göre püskürtülen yakıt miktarını zamana bağlı olarak değiştirebilmek emisyonların azaltılabilmesi açısından oldukça avantajlı olabilir. Püskürtme profilinin bu şekilde değiştirilmesi, püskürtme oranının şekillendirilmesi olarak adlandırılmaktadır. Ana püskürmenin erken safhalarında gönderilen yakıt miktarı azdır. Buradaki amaç ısı açığa çıkışını azaltmak ve yanmanın başlangıcındaki NO_x üretimini azaltmaktır. Burada başlangıçta orta düzeydeki basınçların kullanımı, püskürtülmüş olan yakıtın ilk ayrışımı ve buharlaşmasını limitlemek için idealdir. Yanma hafif olarak daha ileri krank açılarına kayar ve termal verimde düşme yakıt sarfiyatında bir miktar yükselme meydana gelir. Ana püskürtmenin sonunda ise kalan yakıtın tamamının püskürtülebilmesi açısından yüksek püskürtme basıncı gerekmektedir. Buna ek olarak yüksek püskürtme basınçları karışım oluşumuna iyileştirici yönde etkileri ve prosesin devam eden krank açılarında is oluşumunun azaltılmasında etkin olmaları nedeni ile avantajlıdır. Her iki kombinasyonun uygulanması ise (düşük basınç + yüksek basınç) aynı anda is ve NO_x 'in azaltılmasına önemli bir katkı yapabilir.

oranının şekillendirilmesi özellikle yüksek yük ve düşük motor hızı şartlarında önemlidir çünkü bu hızlarda püskürtme oranının efektif bir şekilde ayarlanması için mümkün olan süre uzun ve yeterlidir. Ancak yüksek hızlarda, istenen yakıt miktarının tamamının mümkün olan süre içerisinde yanma odasına püskürtülebilmesi için dikdörtgen profil tercih edilir. Dikdörtgen profil Ortak hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemleri tarafından üretilir. Bu tip püskürtme eğrisi genel olarak düşük yakıt sarfiyatı ve düşük is miktarını gerçekler ancak NO_x miktarlarında artma görülür. Ancak yüksek yüklerde ve EGR kullanımları durumunda püskürtme eğrisinin şeklinin az bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Bu durumda EGR oranının ve sıcaklığının ayarlanması ile birlikte dikdörtgen profilin oldukça efektif olarak kullanılabilir. Ek olarak, başlangıçtaki yüksek püskürtme basınçları, enjektör iğnesinin hızlı açılışı ve enjektör içi kavitenin/boşluğunun minimizasyonu ve tüm bunların kombinasyonu spray penetrasyonunu artırır ve silindir içerisindeki dolgunun tamamının yanmasına iyileştirici yönde etki yapar. Bu ise daha yüksek özgül güç alınabilmesine ve is emisyonların azaltılabilmesine olanak sağlar (ki EGR uygulandığında artmaktadır). Her

durumda enjektör iğnesinin çok hızlı kapanması kötüleşmiş karışım hazırlanmasının önüne geçmektedir [57].

2.3.2 Art Püskürtme

Uygulamada iki tip art püskürtme bulunmaktadır. Birisi erken püskürtülen diğeri geç püskürtülen karakteristiktir. Geç art püskürtme genel olarak, egzoz hattında bulunan sonradan iyileştirme sistemlerindeki katalitik reaksiyonlarda (LNT,DPF vb.) kullanılmak üzere egzoz hattında istenen belirli miktardaki buharlaşmış yakıtı elde etmek için uygulanır. Yağ seyrelmesinin önüne geçmek için yakıt miktarı, püskürtme zamanı hassas bir biçimde belirlenmelidir. Ana püskürtmeyi takip eden erken art püskürtme ise is emisyonlarının azaltılmasında oldukça etkilidir. Ana püskürtmenin bitimi ile erken art püskürtmenin başlangıcı arasındaki zamanda püskürtme kesilir ve nozulün yakın kısımlarındaki kısmi oksidasyon bölgesine hava girer. Enjektörün çok hızlı kapanması bu ek havanın bu bölgeye girebilmesi için ve yüksek miktarda yakıtın düşük hızda istenemeyen bir art püskürtme karakterinde sisteme girmemesi için (ki bu is miktarını ve yanmamış THC artırabilir) oldukça önemlidir.



Şekil 2. 9 Ana püskürtme ve ardından tek ve iki art püskürtme uygulanan strateji örneği

Yüksek basınçlı art püskürtme efektif bir karışım teşkili oluşturabilmek ve daha fazla miktarda havanın kısmi oksidasyon bölgesine girebilmesine olanak sağlaması açısından yeterli kinetik enerjiye sahiptir. Karışım yanmanın geç safhalarında yanması is miktarını azaltır. Art püskürtme tarafından açığa çıkarılan enerji, NO_x emisyonlarını arttırabilmek

için yeterli değildir. Art püskürtme bütünüyle değerlendirildiğinde, yakıt sarfiyatına etki etmeden is emisyonlarının azaltılmasına belirgin bir katkı (~70% e kadar) yapabilir. Ana püskürtme tarafından ne kadar çok is üretilirse art püskürtme de o kadar efektif olur [59],[57].

2.3.3 Püskürtme Basıncı

Püskürtme basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla karışım formasyonuna etki eden faktörlerden birisidir. Püskürtme basıncı arttıkça yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülmektedir. Püskürtme basıncının artması karışım teşkilinde ve yanma prosesinde iyileşmeye dolayısıyla da özgül güçte (kW/l) artışa imkan sağlayabilir. Klasik diesel yakıt püskürtme sistemleri ile karşılaştırıldığında aşırı doldurma ile birlikte yapılan fazla yüksek basınçlı yakıt püskürtme, karışım teşkilinde yaratılan olumlu katkı sonucu, motor torkun da ciddi artış sağlayabilir. Damlacık çapının küçülmesiyle yakıt atomizasyonu iyileşir. Temel konsept ile karşılaştırıldığında iyileşmiş karışım teşkili ve daha iyi atomizasyon nedeni ile bu etki Is-NO_x eğrisini azaltacak yönde etki gösterir. Ancak, püskürtme basıncının çok artması tanecik çapının çok küçülmesine ve yakıtın hızlı bir biçimde buharlaşmasına sebep olur. Bunun sonucunda yakıt yanma odasının her yerine tam olarak ulaşamaz. Bu olay ise enjektör çevresindeki bölgede başlarda hızlı bir yanmanın olmasına ve sıcaklıkların artmasını sağlar. Fakat ilk yanmanın belirli bir bölgede sınırlı kalması sebebiyle alev yanma odasının diğer bölümlerine ilerlemesi yavaş olur. Bu olay ısının, işe dönüşme işleminin verimsiz bir şekilde gerçekleşmesine sebep olur [58].

2.4 Diesel Motorlarında Yanmanın Modellenmesi

Diesel motorunun tüm çalışma noktalarında, istenen performans bandında, istenen emisyon ve gürültü limitleri içerisinde çalışması için püskürtme stratejisinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle o çalışma noktasındaki şartları sağlayan optimum püskürtme stratejisinin; püskürtme avansı, püskürtme basıncı, püskürtme faz sayısı, fazlar arası bekleme süreleri, aşırı doldurma basıncı vb. tüm parametrelerin aynı andaki doğru kombinasyonu belirlenmelidir. Diesel motorun çalışma bandının genişliği göz önüne alındığında tüm çalışma noktalarında tüm bütün parametrelerin

kombinasyonlarını geniş bir bantta deneysel olarak deneyerek doğru olan stratejiyi bulmak gerek zaman gerekse maliyet açısından efektif değildir. Bu zamanın kısaltılması için araştırmacılar modelleme tekniklerini kullanmaktadırlar. Buna ek olarak modelleme tekniklerini motor tasarımının en başından itibaren kullanarak tüm alternatif yanma odası konstrüksiyonlarının da performans ve diğer parametreler üzerine etkilerini incelemek mümkündür.

Modelleme tekniklerinin her durumda belirli bir hata payı bulunsa da motor geliştirme prosesinde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu teknikler zaman ve maliyet açısından efektif olduklarından olası tüm alternatif konstrüksiyon tiplerinin ve tüm alternatif püskürtme parametrelerinin aynı anda denenmesine olanak sağlamaktadırlar. Modelleme teknikleri ile istenen herhangi bir tek değişkenin istenen herhangi bir anda ve istenen herhangi bir fiziksel pozisyondaki değerini elde etmek mümkündür ki bu değerlerin bir çoğu ancak oldukça maliyetli deneysel yöntemler ile elde edilebilirler.

Uygulamaya bağlı olarak motordaki yanmanın modellenmesi için farklı tipteki modelleme teknikleri bulunmaktadır. Klasik modelleme teknikleri, temel üç ayrı kategoriye ayrılırlar. Karmaşıklıkları ve ihtiyaç duyulan bilgisayar işleme zamanları dikkate alınarak bir sıralama yapıldığında klasik modelleme tekniklerini şu şekilde sıralamak mümkündür. Termodinamik (tek boyutlu modeller), olgusal modeller (sanki boyutlu modeller), çok boyutlu modeller.

Termodinamik tabanlı analiz yapılan klasik modelleme tekniklerinin dışında özellikle son yıllarda içten yanmalı motorlarda kullanım alanı bulan yeni modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Bunların en önemlilerinden birisi de Yapay Sinir Ağları tekniğidir. Yapay Sinir Ağları tekniği, her ne kadar bir kara kutu uygulaması olsa da gerek termodinamik tabanlı modellerle göre çok kısa hesaplama zamanına sahip olması, gerekse ağa öğretilen örnekler sayesinde sistemin fiziğini çok çabuk kavrayabilmesi açısından oldukça avantajlıdır[28].

2.4.1 Termodinamik (1 boyutlu) Modeller.

Termodinamik modeller yanma odasının basitleştirilmiş bir tanımını kullanarak tüm dolgunun ideal olarak karıştığını öngörür. Bölgeler bağımsız ve ideal olarak kabul

edilmektedir. İçerisindeki kütle, basınç, sıcaklık ve konsantrasyon değerleri belirlenmektedir. Bu tip modelleme teknikleri oldukça efektiftirler ancak fakat karışım teşkili ve emisyon oluşumu gibi yerel proseslerin çok detaylı olarak incelenmesine olanak vermemektedirler. Bu tip modelleme teknikleri zamanın alt proses detayından daha önemli olduğu süreçlerde kullanılır. Sıfır boyutlu modelde, süreklilik ve enerji bağıntıları kullanılarak termodinamik hal büyüklükleri hesaplanmaktadır. Yanma sırasında açığa çıkan enerji hesaplamaya katılırken, gereken süre sabit değer olarak verilmektedir. Tek boyutlu model, genellikle tek bölgeli olmasının sağladığı basit yapısı nedeniyle hızlı hesaplama olanağı sunmaktadır. Yanma, ampirik yaklaşımla (Vibe bağıntıları vb.) modele katılmaktadır[28].

2.4.2 Olgusal (Sanki Boyutlu) Modeller

Olgusal modeller termodinamik modellerden daha karışıktırlar çünkü bu tip modeller yanma odasını farklı sıcaklık ve kompozisyonlarda çeşitli bölgelere bölerler. Bu modelleme tekniği bilgisayar işlem zamanı ile model hassasiyeti arasında belirli bir denge gözetir. Modeldeki uzaysal yaklaşım nedeni ile alt proseslerin, ısı açığa çıkışının ve emisyonların detaylı olarak incelenmesi mümkündür. Ancak bu tip modelleme tekniklerinde de kullanılmış olan çözünürlük halen yetersizdir ve proseste önemli yer tutan örneğin türbülanslı alan akışları çözülmemiştir[28] .

2.4.3 Çok Boyutlu Modeller

Çok boyutlu modeller ise kütle enerji ve momentum korunumu ile ilgili tüm diferansiyel denklem takımlarının zamana ve konuma bağlı olarak oldukça fazla sayıda küçük hesaplama hacimleri için tek tek çözüldüğü karmaşık bir tekniktir. Ek olarak proseste süre gelen kimyasal proses ve bunun akışkan mekaniği ile ilişkisini göz önüne alındığı üç boyutlu Navier-Stokes denklemlerinin çözüme dahil edilmesi çözüm tekniğini daha da karmaşıklştırmaktadır. Türbülanslı akışın dikkate alınması için alt modeller kullanılmaktadır. Ancak bu tip modelleme teknikleri bilgisayar hesaplama zamanı olarak diğer modellere göre oldukça uzun süreler gerektirmektedir. değişkenlerinin ilgili alan için entegrasyonunu içermektedir. KIVA ,Star CD, AVL Fire gibi

programlar bu amaçla kullanılan başlıca yöntemlerdendir. Üç boyutlu modellerde kullanılan yaklaşımlara aşağıda örnek verilmiştir:

- a) **Direkt Nümerik Simülasyon (DNS-Direct Numerical Simulation):** Herhangi bir türbülans modelinin kullanılmadığı ve Navier Stokes denklemlerinin zamana bağlı ve üç boyutlu sayısal çözüldüğü modelleme tipi, çözüm için süper bilgisayar ve uzun zamana gereksinim duymaktadır.
- b) **Büyük ölçekli Eddy akımı simülasyon (LES: Large Eddy Simulation) :** modeli, küçük ölçekli Eddy akımlarının modellenmesinin zorunlu olduğu büyük ölçekli hareketler, Navier Stokes denklemleri kullanılarak zamana bağlı üç boyutlu çözülmektedir. Temeli düşük geçirgenlikli filtrelemeye dayanmaktadır. Bu filtreleme Navier-Stokes denklemleri üzerine uzanır ki buda çözümleme zamanını kısaltır.
- c) **Reynolds ortalama Navier Stokes (RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes) modeli:** ,günümüz standartlarına daha uygundur. Saat ya da gün mertebesinde çözüm süresine gereksinim duyulmaktadır. Söz konusu, ampirik bağıntıları kullanan CFD yaklaşımında, türbülans, yanma, iki fazlı akım alt modelleri kullanılmaktadır[28].

2.4.4 Yapay Sinir Ağları Yöntemi

Yapay sinir ağları (YSA) metodu büyük ölçekte paralel dağıtımlı bir prosesör gibi çalışmaktadır. İç yapısı itibari ile birbirlerine bağlanmış olan ufak proses elemanlarından oluşurlar ki bu elemanlar birbirleri arasında deneysel bilgiye ait verileri saklarlar ve kullanım için uygun duruma getirirler. Yapay sinir ağları tanımlaması, dizayn edilen sistemde bir birine bağlı elemanlar kullanılması (bu elemanlar nöronlar olarak adlandırılmaktadır) ve bilginin bu nöronlar arasında transfer edilmesi ve saklanması nedeni ile insan beyninin çalışma mekanizmasına benzemesinden kaynaklanmaktadır. Yapay sinir ağları sistemi iki açıdan insan beynine benzer; i) bilgi çevre süre gelen olaylardan bir öğrenme prosesi sonucunda öğrenilir. ii) nöronlar arası ağırlıklar (sinaptik ağırlıklar) bilgiyi saklamak için kullanılırlar [29], [59]. YSA metodu çeşitli farklı tipteki farklı problemleri çözebilmek için farklı ağ modelleri kullanmaktadır.

Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) ağ yapısı belirli sayıdaki girdi verisini istenen çıktı setine bir ağ yapısı ile bağlayabileceğiniz bir ileri beslemeli YSA yapısıdır. ÇKA yapısındaki ağlar ana olarak üç katmandan oluşurlar. Birinci katman “girdi katmanı”dır ve sistemin çıktılarını etkilediği varsayılan girdi parametrelerinden oluşur. İkinci katman ise gizli katmandır. Bu katmanda girdiler, ağırlıklar ve bir eşik değeri ile birlikte önceden tanımlanmış olan doğrusal olmayan (non-lineer) bir fonksiyon ile matematiksel işleme girerler. Üçüncü katman ise çıktı katmanıdır. Temel olarak bakıldığında sisteme gösterilen girdiler sonucunda bir çıktı elde edilir ve bu çıktının olması gereken reel değeri ile farkı yeniden ağ üzerine dağıtılır ve istenen hata düzeyine gelinceye kadar YSA eğitilerek ağın sistemin fiziğini öğrenmesi sağlanır.

Doktora tezimde, deneysel metot, AVL BOOST programı ve YSA metodu birlikte fazlandırılmış püskürtme olgusu araştırılmış ve, o çalışma şartı için optimum pilot püskürtme stratejisinin (püskürtme miktarı, faz aralığı, püskürtme basıncı) ne olması gerektiği araştırılmıştır. Takip eden bölümde, doktora tezimde kullanmış olduğum AVL BOOST Programı ve YSA’larının kuramsal temeli detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

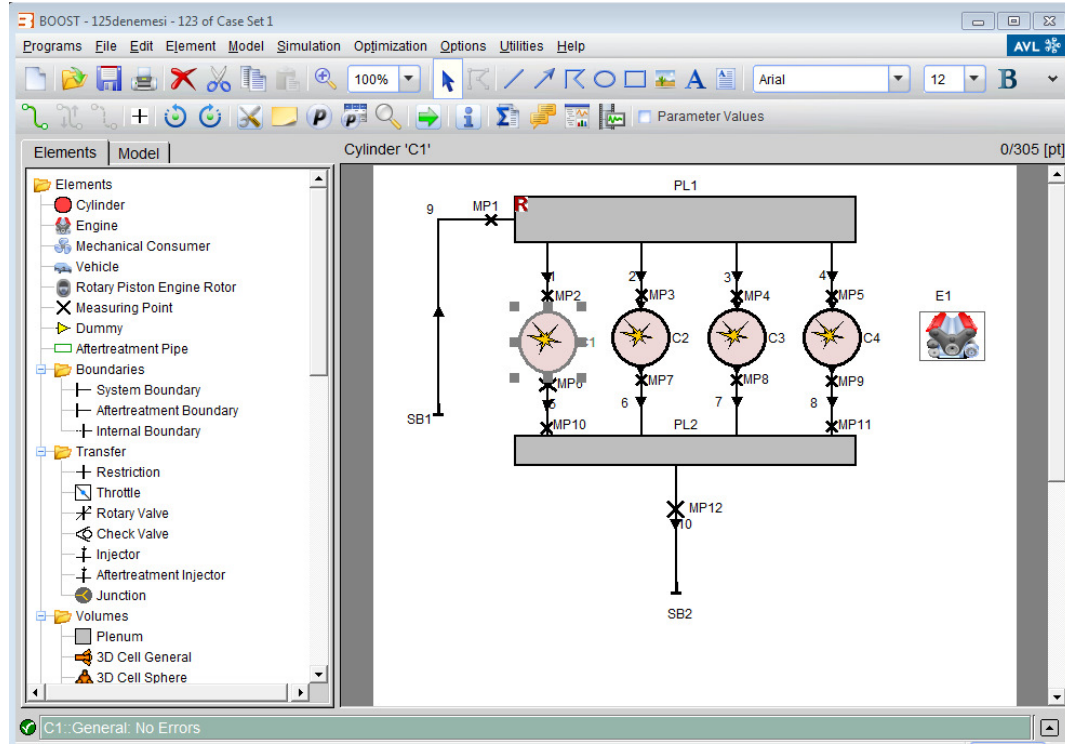
AVL BOOST PROGRAMI TEORİSİ, YAPAY SİNİR AĞLARI METODU VE İÇTEN YANMALI MOTORLARDAKİ KULLANIMI

3.1 Kullanılan Termodinamik Simülasyon Programı (Avl Boost)

Doktora tez çalışmamda gerçekleştirdiğim deney noktalarını bilgisayar ortamında modelleme ve deney ortamında alınan verileri bilgisayar ortamında da doğrulayabilmek için sanayi uygulamalarında ve bilimsel çalışmalarda kabul görmüş olan AVL firmasının üretmiş olduğu tek boyutlu (*1D- 1 Dimensional*) motor çevrimleri simülasyon programı olan BOOST programı kullanılmıştır [60].

Boost programı 2 veya 4 zamanlı, diesel veya benzinli motorları simüle edebilme kapasitesine sahiptir. Program girdi verilerini tasarlanan termodinamik motor modeline iletebilmek için ön grafik ara birimine sahiptir. Tasarlanacak sistemin ve simüle edilecek deney noktasının olan tüm karakteristik verileri (silindir sayısı, emme kanalları yapısı, egzoz kanalı yapısı, aşırı doldurma yapısı, çap, strok, devir, vb...) bu ara birimde sisteme girilir. Tüm verilerin sisteme girilmesinin ardından programın yapısında bulunan alt modellerden hangilerinin çevrim simülasyonu esnasında kullanılacağı belirlenir. Yanma termodinamiği simülasyonu alt kısmında kullanılmak üzere birden farklı alt model bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Vibe, DoubleVibe, Tablo, İki Bölgeli Tablo, Woschni/Anisits, Hires, Kullanıcı Tanımlı Model (KTM), KTM Yüksek Basınç, Sabit Hacim, Sabit Basınç, AVL Karışım Kontrollü Yanma , Vibe 2 bölge, Hedef Basınç Eğrili Model, Hedef Basınç Eğrili 2 bölgeli Model, Fraktal Model, HCCI 6 Bölgeli modelleridir. Alt modellerin de seçimi sonrası, sistemin sınır şartları ve deneyler esnasında dinamometre sistemi üzerinden toplanmış olan ve simülasyon için gerekli

olan veriler (aşağıda verilmektedir) sisteme girilerek model çalıştırılır ve sonuçlar analiz edilir.



Şekil 3. 1 AVL Boost programı kullanıcı ara yüzü ekran çıktısı.

3.1.1 Çevrim Modelinin Çalışabilmesi İçin Programa Girilmesi Gereken Veri Paketi

AVL Boost programında termodinamik bir motor çevrimi simülasyonu çalıştırılabilmek için programa girilmesi bir veri paketi grubu bulunmaktadır. Bu veriler bölümlere ayrılmış halde aşağıda verilmektedir.

3.1.1.1 Modelleneyecek Motora Dair Karakteristik Veriler

- Çap
- Strok
- Silindir sayısı
- Biyel uzunluğu
- Silindirlerin numaralandırılması

- Manifoldaların ve tüm hatların temel dizilimi
- Sıkıştırma oranı
- Ateşleme/püskürtme sırası
- Ateşleme/püskürtme aralıkları
- Valf sayısı
- Valf iç oturma yüzeyleri çapları
- Valf kalkış eğrileri
- Valf boşlukları
- Portların akış katsayıları(Referans alanı içerecek şekilde)
- Swirl/girdap sayısı (tanımı içerecek şekilde)

3.1.1.2 Aşırı Doldurma Sistemi Verileri

- Kompresör ve türbin haritaları(verimleri içerecek biçimde)
- Atık ısı (Waste-gate) valfinin kütle akış karakteristikleri
- Ara soğutucu boyutu ve sıcak etkenliği

3.1.1.3 Yakıt Verileri

- Yakıt tipi
- Yakıt alt ısı değeri
- Stokiyometrik hava-yakıt oranı

3.1.1.4 Sınır Şartları

- Ortam basıncı
- Ortam sıcaklığı
- Müsaade edilen maksimum dolgu sıcaklığı
- Hava filtresi ve ara soğutucunun basınç kayıpları

- Egzoz sisteminin basınç kaybı

3.1.1.5 Çizimler

- Emme sisteminin boyut ölçü ve çizimleri
- Egzoz sisteminin boyut ölçü ve çizimleri
- Silindir kafası grubunun ölçüleri (port geometrileri, valf pozisyonları vb.)

3.1.1.6 Ölçümler

- Motorun tam yük performansı
- Fren ortalama efektif basınç
- Fren özgül yakıt tüketimi
- Hava yakıt oranı
- Çevrim başına püskürtülen Yakıt debisi
- Emme hava debisi
- Volumetrik verim
- Emme ve egzoz sistemindeki ortalama basınç ve sıcaklıklar (ölçüm noktaları ile)
- Yanma verisi, Silindir için basınç eğrileri
- Sürtünme ölçüm sonuçları (yöntem ile birlikte)

3.1.1.7 Süreksiz Rejim Simülasyonları İçin

- Motorun ataleti
- Güç harcayan/çeken ekipmanların ataletleri
- Turboşarj rotor kompleksi ataleti
- Kompresör ataleti (Mekanik kontrollü kompresörler)

3.1.2 AVL Boost Programı Genel Teorisi ve Kullanılan Alt Modeller

AVL Boost programının genel teorisi, modellemeyi ele alış şekli ve işleyiş algoritması ve kullanılan alt modeller takip eden kısımda verilmektedir.

3.1.2.1 Bileşenlerin/Türlerin Transferi ve Gaz Özelliklerinin Hesaplanması

Gaz özellikleri, gaz sabiti ve ısı kapasitesi gibi sıcaklığı ,basınca ve gaz kompozisyona bağlı özellikler anlık kompozisyonla birlikte her bir hesap adımında hesaplanır. Programın ana yapısında gaz kompozisyonu ve bileşenlerin transferi için iki alt algoritma bulunmaktadır. Bunlar i) Klasik Bileşenlerin Transferi ii) Genel Türlerin Transferi modülleridir. Klasik bileşenlerin transferi metodu sistemi hava, yakıt buharı, yanma ürünleri ve yakıttan ibaret kabul ederek basitleştirilmiş bir hesap yöntemi kullanarak bileşiklerin kütleli oranlarını hesaplayarak işleyen bir yöntemdir. Genel bileşiklerin transferi metodu ise kullanıcı belirlenmiş olan bileşiklerin ayrı ayrı sisteme tanıtılmasının ardından bu bileşikler bazında gaz kompozisyonlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Minimum bileşik sayısı 7 dir ve elemanları Yakıt, O₂, N₂, CO₂, H₂O, CO, H₂dir. Her bir bileşen için korunum denklemleri ayrı ayrı çözülmektedir.

Doktora çalışmamda Klasik Bileşenlerin/Türlerin transferi metodunun kullanılmıştır.

Klasik Bileşenlerin/Türlerin Transferi ve Gaz Özellikleri Metodu:

Klasik bileşenlerin kullanımı metodunda yanma ürünleri (Hava-Yakıt oranı karakteristikleri ile birlikte) ve yakıt buharı için korunum denklemleri çözülmektedir.

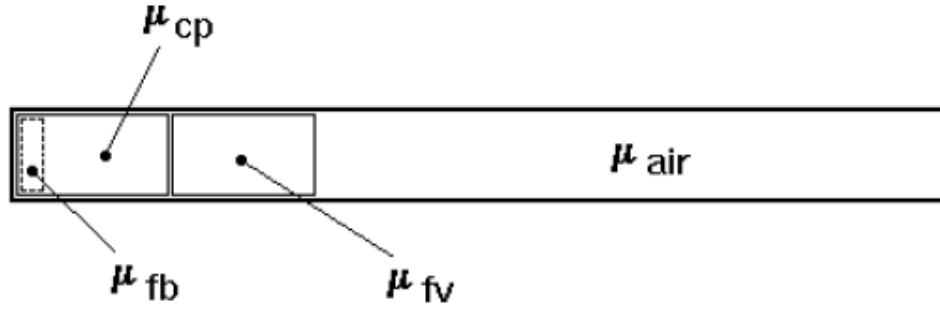
Havanın kütleli oranı,

$$w_{air} = 1 - w_{FV} - w_{CP} \quad (3.1)$$

Yanma ürünlerinin hava yakıt oranı ise,

$$AF_{CP} = \frac{w_{CP} - w_{FP}}{w_{FB}}$$

(3.2)



Şekil 3. 2 Göz önüne alınan kütle oranlarının gösterimi (air-hava)

Egzoz gazlarının, gaz özelliklerinin hesaplanması için AFR indeksi ölçü olarak kullanılmıştır. AFR'nin indeksinin ana tanımı, göz önüne alınan egzoz gazlarının kaynaklandığı yanma prosesinin gerçekleştiği AFR oranıdır. Egzoz gazlarının konsantrasyonu silindir içerisindeki yüksek sıcaklıkta gerçekleşen ayrışma göz önüne alınarak kimyasal denge hesabından hesaplanmıştır.

3.1.2.2 Basit Korunum Denklemleri

Silindirin termodinamik durumu termodinamiğin 1.yasasından hesaplanmıştır.

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = -p \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} \cdot h - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (3.3)$$

Silindir içerisindeki toplam kütle değişimini ise giren ve çıkan akışların toplamından hesaplanmıştır.

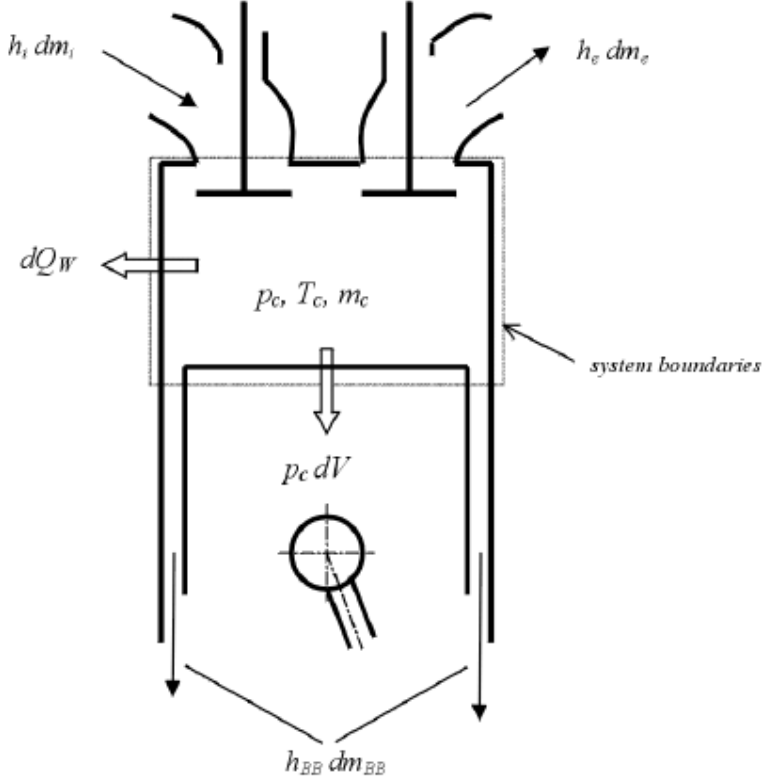
$$\frac{dm_c}{d\alpha} = \sum \frac{dm_i}{d\alpha} - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} - \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (3.4)$$

(3.3) denkleminden de görüleceği üzere termodinamiğin 1.yasası yüksek basınç çevrimi için uyarlandığında; silindir içerisindeki iç enerjinin değişimi piston işinin, yakıt ısı enerjisinin, duvar enerji kayıplarının ve kartere doğru sızan dolgu (blow-by) nedeni ile oluşan entalpi akışının toplamına eşittir.

Karışım teşkilinin silindir içerisinde gerçekleştiği diesel motorlarında ise bu denklemin kullanımında yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

- Silindir içerisinde giren yakıt ani yanmaktadır.

- Yanma ürünleri silindirin geri kalan kısmındaki dolgu ile anlık olarak üniform bir karışım oluşturmak üzere karışırlar.
- Bir sonuç olarak A/F oranı yanmanın başlangıcındaki yüksek değerinden yanmanın sonundaki son değerine doğru bir düşme gösterir.



Şekil 3. 3 Silindirin Enerji Balansı

Çözümlemesi ideal gaz denklemi ile birlikte göz önüne alındığında,

$$P_c = \frac{1}{V} m_c R_0 T_c \quad (3.5)$$

basınç, sıcaklık ve yoğunluk arasında ilişki kurulduğunda, oluşan denklem sistemi Runge-Kutta metodu ile sıcaklığa göre çözümlenebilir. Silindir sıcaklığı bilindiğinde ise silindir basıncı gaz denkleminde çözülebilir.

3.1.2.3 Emme ve egzoz kanallarındaki Kütle Akışının Hesaplanması

Emme ve egzoz kanallarındaki kütle akışları izentropik orifis akışı için kullanılan denklemler ile hesaplanmıştır. Kanallardaki akış verimlilikleri için durağan/denge durumundaki bir akış test düzeneği üzerindeki veriler kullanılmıştır.

Durağan bir orifisteki enerji denkleminde, kütle akışı denklemi elde edildiğinde;

$$\frac{dm}{dt} = A_{eff} \cdot p_{01} \cdot \sqrt{\frac{2}{R_0 T_{01}}} \psi \quad (3.6)$$

Ses altı (sub-sonik) hızlar için;

$$\psi = \sqrt{\frac{K}{K-1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_2}{P_{01}} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]} \quad (3.7)$$

Ses üstü (sonik) hızlar için;

$$\psi = \psi_{max} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \cdot \sqrt{\frac{K}{K+1}} \quad \text{dir.} \quad (3.8)$$

Gerçek efektif akış alanı ölçülmüş olan akış katsayılarından “ $\mu\sigma$ ” bulunabilir.

$$A_{eff} = \mu\sigma \cdot \frac{d_{vi}^2 \cdot \pi}{4} \quad (3.9)$$

Akış katsayısı “ $\mu\sigma$ ” valf kalkışı ile değişmektedir ve denge durumundaki bir akış test ünitesinde ölçülmüş değerler ile belirlenmektedir. Akış katsayısı “ $\mu\sigma$ ” ; iki nokta arasında belirli bir basınç düşüşü esnasında ölçülmüş olan gerçek kütle akışı ile aynı sınır koşullarında teorik izentropik akış miktarı arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır ve akış oranı sisteme iliştilirilmiş olan borunun kesit alanı ile de ilintilidir.

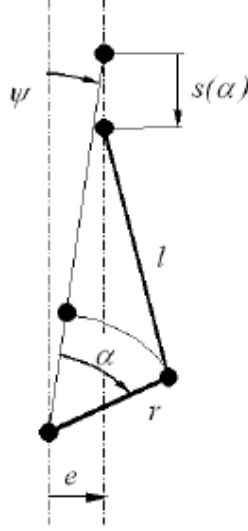
3.1.2.4 Dolgu Değişiminin Hesaplanması

Boost programı dolgu değişimi analizi için 3 varyasyona sahiptir bunlar; mükemmel karışma (4 zamanlı motorlar), mükemmel yer değiştirme(2 zamanlı motorlar) ve kullanıcı tanımlı dolgu değişimidir. Gerçekleştirilmiş olan simülasyonlarda 4 zamanlı motorlar için uygun olan mükemmel karışım yöntemi esas alınmıştır. Mükemmel karışım yöntemi egzoz gazlarının kompozisyonunun silindir içerisindeki gazların ortalama kompozisyonundan oluştuğunu kabul eder ve egzoz gazlarının enerji içeriğinin silindir içerisindeki gazların ortalama enerji içeriği ile aynı olduğunu kabul etmektedir. Bu durumda silindir içerisindeki havanın saflığının/temizliğinin krank açısı başına değişimi aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\frac{dR}{d\alpha} = \frac{1}{m_c} \cdot (1 - R) \cdot \frac{dm_i}{d\alpha} \quad (3.10)$$

3.1.2.5 Pistonun Hareketinin Hesabı

Standart krank mili, biyel kolu kombinasyonu için krank mili açısına ($KMA^\circ - \alpha$) ya bağlı piston yolu şu şekilde hesaplanmıştır:



Şekil 3. 4 Krank Mili Grubu

$$s = (r + 1) \cdot \cos \psi - r \cdot \cos(\psi + \alpha) - l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \cdot \sin(\psi + \alpha) - \frac{e}{l} \right)^2} \quad (3.11)$$

$$\psi = \arcsin \left(\frac{e}{r+l} \right) \quad (3.12)$$

3.1.2.6 Isı Transferinin Hesaplanması

Yanma odasının mevcut duvarlarına; silindir kafasına, pistonu ve silindir gömleğine doğru ısı transferi şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$Q_{wi} = A_i \cdot \alpha_w \cdot (T_c - T_{wi}) \quad (3.13)$$

Silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımı ise Üst Ölü Nokta (ÜÖN) ve Alt Ölü Noktadaki (AÖN) sıcaklıkların programa girilmesinin ardından kabul edilen logaritmik bir dağılım fonksiyonuna göre hesaplanmaktadır:

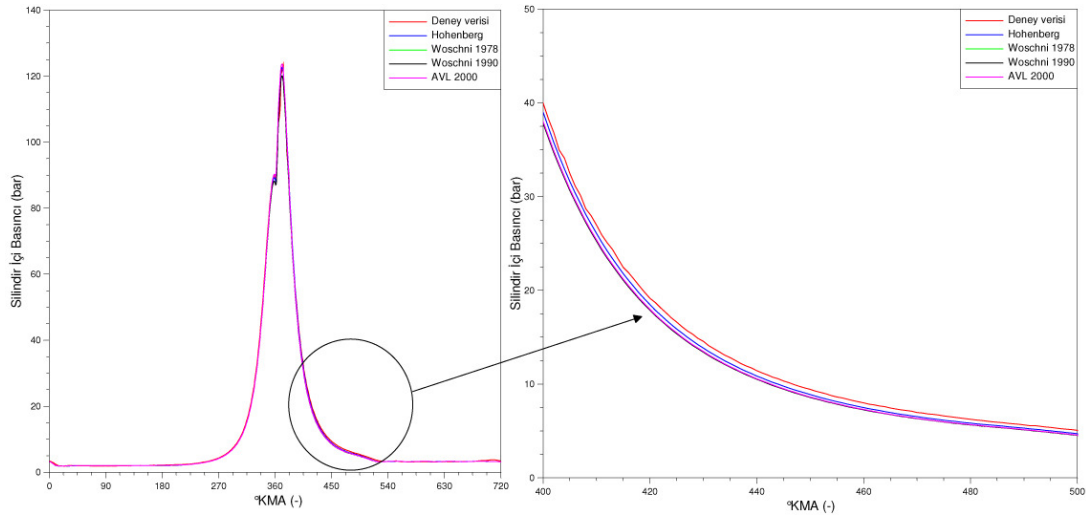
$$T_L = T_{L,TDC} \cdot \frac{1 - e^{-cx}}{x \cdot c} \quad (3.14)$$

$$c = \ln \left(\frac{T_{L,TDC}}{T_{L,BDC}} \right) \quad (3.15)$$

Direkt püskürtmeli Diesel motorlarında ısı transfer katsayısı “ α_w ” nin hesabı için ise BOOST programında 4 farklı alternatif bulunmaktadır. Bunlar Woshni-1978 [61], Woshni-1990[62], Hohenberg [63], AVL 2000Model [64],[65]korelasyonlarıdır. 4 ısı transfer denklemi kullanılarak ulaşılan basınç eğrileri aşağıda verilmiştir. Şekil 3.5 de görüleceği üzere elde edilen basınç eğrileri birbirlerine çok benzerdir. Ancak Hohenberg denklemi, diğer denklemlere göre özellikle genişleme ve egzoz fazlarında deneysel veri ile karşılaştırıldığında daha doğru sonuçlar vermektedir. Diğer denklemlerin sonuçları ise daha düşük çıkmıştır.

$$\alpha_w = 13.V^{-0.06}.p_c^{0.8}.t_c^{-0.4}.(c_m + 1.4)^{0.8} \quad (3.16)$$

şeklindedir.



Şekil 3. 5 Isı transfer modellerinin deney verisi ile uyumunun karşılaştırılması

3.1.2.7 Kanallarda Isı Transferinin Hesaplanması

Program dolgu değişimi esnasında emme ve egzoz kanallarındaki ısı transferini de göz önüne almaktadır. Bu ısı transferinin; supaplar çevresindeki yüksek sıcaklıklar nedeni ile standart bir borudaki akışa göre daha yüksek ısı transfer katsayısına ve sıcaklıklara neden olacaktır. BOOST programı; kanallardaki ısı transferi hesabı için modifiye edilmiş olan bir ZAPF modeli kullanmaktadır:

$$T_d = (T_u - T_w).e^{\left(-A_w \frac{\alpha_p}{m.c_p}\right)} + T_w \quad (3.17)$$

(3.17) denklemindeki “ α_p ” ısı transfer katsayısı akışın silindirin içine veya dışına olmasına göre değişmektedir.

Akışın silindirden dışarıya doğru olması durumunda;

$$\alpha_p = [C_4 + C_5 \cdot T_u - C_6 \cdot T_u^2] \cdot T_u^{0.44} \cdot \dot{m}^{0.5} \cdot d_{vi}^{-1.5} \cdot \left[1 - 0.797 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (3.18)$$

Akışın silindirden içeriye doğru olması durumunda ise ;

$$\alpha_p = [C_7 + C_8 \cdot T_u - C_9 \cdot T_u^2] \cdot T_u^{0.33} \cdot \dot{m}^{0.68} \cdot d_{vi}^{-1.68} \cdot \left[1 - 0.765 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (3.19)$$

şeklinde kullanılmıştır.

Çizelge 3. 1 Denklemlerde Kullanılmış Olan “C” katsayıları.

Egzoz Valfi		Emme Valfi	
C ₄	1.2809	C ₇	1.5132
C ₅	7.0451.10 ⁻⁴	C ₈	7.1625.10 ⁻⁴
C ₆	4.8035.10 ⁻⁷	C ₉	5.3719.10 ⁻⁷

3.1.2.8 Kartere Kaçan Dolgu Miktarının Hesaplanması (Blow-By)

Kartere kaçan dolgu miktarı, belirlenmiş olan dolgu kaçak aralığı mesafesi (blow-by gap) ve ortalama karter basıncından her bir adımda orifisteki akış denklemleri (3.6-3.8) kullanılarak hesaplanmaktadır. Efektif kaçak boşluk alanı; silindir duvarı ve dolgu kaçak aralığı mesafesinden hesaplanır:

$$A_{eff} = D \cdot \pi \cdot \delta \quad (3.20)$$

Eğer silindir içerisindeki basınç karter basıncını geçer ise, silindir basıncı ve sıcaklığı yukarı akış stagnasyon basıncı ve sıcaklığı olarak kabul edilir. Ortalama karter basıncı ise aşağı akış statik basıncını belirtmektedir. Gaz özellikleri silindirden alınır. Kartere kaçan dolgu silindirin içerisindeki gazlar ile aynı enerji içeriğine sahiptir. Eğer silindir içerisindeki basınç ortalama karter basıncından düşük ise, karter deki basınç yukarı akış stagnasyon basıncı olarak kabul edilirken, silindir içerisindeki basınç aşağıya doğru akış basıncı olarak kabul edilir. Yukarı akış stagnasyon sıcaklığı, piston duvar sıcaklığına eşit

kabul edilir ve gaz kompozisyonu; silindire tersine akış başlamadan hemen önceki silindiri terk eden gaz kompozisyonuna eşit kabul edilir.

3.1.2.9 Yanmanın Modellenmesi

Boost programı silindir içerisindeki yanma olayını değişik şekillerde modellemeye olanak sunmaktadır. Programın kullanımına müsaade ettiği yanma modelleme tekniklerini aşağıdaki gibi gruplamak mümkündür.

1) Isı açığa çıkışının önceden tanımlı olduğu modeller gurubu

i) Vibe Fonksiyonu Metodu Grubu

(a) Tek Vibe Fonksiyonu

(b) Tek Vibe Fonksiyonu (Çift Bölge)

(c) Çift Vibe Fonksiyonu

ii) Uzatılmış Isı Açığa Çıkış Metodu Gurubu

(a) Woshni/Anisits Modeli

(b) Hires Modeli

2) Isı açığa çıkışının hesaplandığı modeller gurubu

i) Kıvılcım Ateşlemeli Motor Model Gurubu

(a) Fraktal Yanma Modeli

(b) Açık Yanma Odalı Gaz Motor Modeli

ii) Sıkıştırma Ateşlemeli Motor Model Gurubu

(a) Karışım Kontrollü Yanma Model

iii) Tek Bölgeli HCCI Yanma Modeli

iv) 6 Bölgeli HCCI Yanma Modeli

3) Önceden Tanımlı Basınç Eğrisi Yardımı İle Analiz

4) İdeal Isı Açığa Çıkışı

i) Sabit Hacimde Yanma

ii) Sabit Basınçta yanma

5) Kullanıcı Tanımlı Yanma Modeli

i) Kullanıcı Modeli

ii) Kullanıcı Tanımlı Yüksek Basınç Çevrimi

Yukarıda gruplaması belirtilmiş olan yanma modelleri ve literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda Çift Vibe fonksiyonu kullanarak çok kısa bir çözümleme zamanında silindir içerisindeki ısı açığa çıkışını kabul edilebilir bir hata ile tespit etmek mümkündür. Ancak tez çalışmamın ana konusu olan bölünmüş püskürtme yapılan durumlarda ki ısı açığa çıkışının modellenmesinde, çift vibe fonksiyonlarının kullanımını, Vibe fonksiyonunun karakteristiği nedeni bölünmüş püskürtme proseslerinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, Vibe fonksiyonunu direk kullanan yada Vibe parametrelerini kullanan (Woshni/Anistis) modeller yerine bölünmüş püskürtme yapıldığı şartlarda diesel yanmasının kompleks yapısını daha hassas modelleyebilecek ve görece makul işlem zamanı gerektiren bir modelleme tekniğinin seçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, BOOST programının yukarıda listelenmiş olan modelleme teknikleri içerisinde programın yazılımcısı firma tarafından geliştirilmiş olan Karışım Kontrollü Yanma Modelleme Tekniği (Mixed Controlled Combustion –MCC) seçilmiştir [66].

3.1.2.10 Karışım Kontrollü Yanma Modelinin Teorisi (MCC)

Tez çalışmamda kullanılmış olan Karışım Kontrollü Yanma(Mixed Controlled Combustion-MCC) [67], [66]yanma modelinin teorik yapısı aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Kullanılmış olan model ön karışım kontrollü yanma (Premixed Combustion-PMC) ve difüzyon kontrollü yanma (MCC) prosesini aşağıdaki denklem ışığında genelleme yaparak ele almaya başlamaktadır.

$$\frac{dQ_{total}}{d\alpha} = \frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} + \frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} \quad (3.21)$$

3.1.2.11 Karışım Kontrollü Yanma Denklemleri

Karışım kontrollü yanma rejiminde ısı açığa çıkışı; mevcut olan yakıtın miktarı (f_1) ve türbülanslı kinetik enerjinin yoğunluğunun (f_2) bir fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. Model aşağıdaki gibi ifade edilebilir. ;

$$\frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} = C_{comb} \cdot f_1(m_f, Q_{MCC}) \cdot f_2(k, V) \quad (3.22)$$

ve

$$f_1(m_f, Q) = \left(m_f - \frac{Q_{MCC}}{LHV} \right) \cdot (W_{oxygen, available})^{C_{EGR}} \quad (3.23)$$

$$f_2(k, V) = C_{rate} \cdot \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V}} \quad (3.24)$$

3.1.2.12 Yakıt Jeti için Korunum Denklemleri

Girdap akımlarının ve ezilme (squish) hareketinin dağılımlarının, kinetik enerjiye katkılarının görece küçük olduğu düşünüldüğünde, MCC modelinde sadece spreyn kaynaklı kinetik enerji girdisi dikkate alınmıştır. Bu nedenle silindir içerisindeki dolguya aktarılan kinetik enerji miktarı püskürtme oranı ile belirlenmektedir ((3.25) denklemi sağ tarafındaki ilk terim grubu) . Dağılımın (saçılımın) ise kinetik enerji ile doğru orantılı olduğu kabul edilir ((3.25) denklemi sağ tarafındaki ilk terim grubu).

Türbülanslı Kinetik Enerjinin (TKE) değişimi hesabı için kullanılan denklem;

$$\frac{dE_{kin}}{dt} = 0.5 \cdot C_{turb} \cdot \dot{m}_f \cdot v_F^2 - C_{diss} \cdot E_{kin}^{1.5} \quad (3.25)$$

$$k = \frac{E_{kin}}{m_{F,1}(1+\lambda_{Diff} m_{stoich})} \quad (3.26)$$

3.1.2.13 Tutuşma Gecikmesinin Hesaplanması

MCC modeli tutuşma gecikmesinin modellenmesinde Andree ve Pachernegg[68] tarafından geliştirilmiş olan aşağıda verilmiş olan diferansiyel denklemin çözümüne dayanan bir hesaplama tekniği kullanmaktadır.

$$\frac{dl_{id}}{d\alpha} = \frac{T_{UB}-T_{ref}}{Q_{ref}} \quad (3.27)$$

Tutuşma gecikmesi integrali, tutuşma gecikmesi anında “ l_{id} ” 1.0 değerine ulaştığında ise ($=\alpha_{id}$ açısında) ,tutuşma gecikmesi “ τ_{id} ” şu şekilde hesaplanır.

$$\tau_{id} = \alpha_{id} - \alpha_{SOI} \quad (3.28)$$

3.1.2.14 Ön Karışımli Yanma Modeli Denklemleri

Ön karışımli yanma esnasında ortaya çıkan enerjiyi tanımlayabilmek için aşağıdaki şekilde ifade edilen bir Vibe fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$\frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m + 1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (3.29)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_{id}}{\Delta\alpha_c} \quad (3.30)$$

3.1.2.15 Damlacık Isınması ve Buharlaşması Model Denklemleri

MCC modeli metodolojisinde; damlacık buharlaşmasında denge sıcaklığını hesaplayabilmek için Sitkei [69] tarafından önerilmiş olan (3.31) denklemi iterasyon ile olarak çözülmektedir.

$$\lambda_c(T_c - T_d) = \frac{30.93 \cdot 10^4 \cdot \frac{T_d}{p_c}}{e^{\left(\frac{4150.0}{T_d}\right)} \cdot (20.0 + 0.26 \cdot (T_d - 273.15) + 0.3 \cdot (T_c - 273.15))} \quad (3.31)$$

Denge sıcaklığı kullanılarak buharlaşma hızı hesaplandığında;

$$v_e = 0.70353 \cdot \frac{T_d}{p_c \cdot e^{\left(\frac{4159.0}{T_d}\right)}} \quad (3.32)$$

Kullanılan “0.70353” parametresi modelin doğrulanmasına göre, modelin içerisindeki kullanıcı ara biriminden değiştirilebilmektedir.

Bu denklemler göz önüne alındığında, damlacık çapının zamana bağlı değişimi (ve buna karşılık gelen damlacık kütlesi) şu şekilde ifade edilebilir;

$$d_d = \sqrt{d_{d,0}^2 - v_e \cdot t} \quad (3.33)$$

3.1.2.16 Emisyonların Modellenmesi

Boost programında emisyonların hesaplanmasında kullanılmış olan modeller aşağıda verilmiştir.

3.1.2.17 Azot Oksit (NO_x) Oluşumunun Modellenmesi

Boost programında NO_x oluşumunun hesaplanabilmesi için Pattas ve Hafner'in[70] geliştirmiş olduğu model uygulanmıştır.

Aşağıda belirtilmiş olan 6 reaksiyon (Zeldovich mekanizmasını baz alan) NO_x hesaplanmasında esas alınmıştır.

Çizelge 3. 2 NO_x oluşum denklemleri

	Stokiometri	Oran $k_i = k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-T A_i}{T}\right)}$	k ₀ [cm ³ ,mol,s]	a[-]	T _A [K]
R1	N ₂ +O=NO+N	$r_1 = k_1 \cdot c_{N_2} \cdot c_O$	4.93E13	0.0472	38048.01
R2	O ₂ +N=NO+O	$r_2 = k_2 \cdot c_{O_2} \cdot c_N$	1.48E08	1.5	2859.01
R3	N+OH=NO+H	$r_3 = k_3 \cdot c_{OH} \cdot c_N$	4.22E13	0.0	0.0
R4	N ₂ O+O=NO+NO	$r_4 = k_4 \cdot c_{N_2O} \cdot c_O$	4.58E13	0.0	12130.6
R5	O ₂ +N ₂ =N ₂ O+O	$r_5 = k_5 \cdot c_{O_2} \cdot c_{N_2}$	2.25E10	0.825	50569.7
R6	OH+N ₂ =N ₂ O+H	$r_6 = k_6 \cdot c_{OH} \cdot c_{N_2}$	9.14E07	1.148	36190.66

Tüm reaksiyon oranları R'nin birimi [mol/cm³s] dir. Konsantrasyonlar ise denge konumundaki molar konsantrasyonlardır ve birimleri [mol/cm³] dir. N₂O konsantrasyonu şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$c_{N_2O} = 1.1802 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0.6125} \cdot e^{\left(\frac{9471.6}{T}\right)} \cdot c_{N_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}} \quad (3.34)$$

NO üretimi/yıkımının son oranı ise [mol/cm³s] cinsinden şu şekilde hesaplanmıştır.

$$r_{NO} = C_{PostProcMult} \cdot C_{KineticMult} \cdot 2.0 \cdot (1 - \alpha^2) \cdot \frac{r_1}{1 + \alpha \cdot A K_2} \cdot \frac{r_4}{1 + A K_4} \quad (3.35)$$

ve

$$\alpha = \frac{c_{NO,act}}{c_{NO,equ}} \cdot \frac{1}{C_{PostProcMult}} \quad (3.36)$$

$$AK_2 = \frac{r_1}{r_2 + r_3} \quad (3.37)$$

$$AK_4 = \frac{r_4}{r_5 + r_6} \quad (3.38)$$

dir.

3.1.2.18 Karbonmonoksit (CO) Oluşumunun Modellenmesi

Boost programında CO oluşumunun hesaplanabilmesi için Onorati'nin[71] geliştirmiş olduğu model uygulanmıştır.

Çizelge 3. 3 CO oluşum denklemleri

	Stokiometri	Oran
R1	CO+OH=CO ₂ +H	$r_1 = 6.76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{T}{1102.0}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{OH}$
R2	CO+O ₂ =CO ₂ +O	$r_2 = 2.51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055.0}{T}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{O_2}$

CO üretimi/yıkımının son oranı ise [mol/cm³.s] cinsinden şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$r_{CO} = C_{const} \cdot (r_1 + r_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (3.38)$$

Ve

$$\alpha = \frac{c_{CO,act}}{c_{CO,equ}} \quad (3.39)$$

dir.

3.1.2.19 İs Oluşumunun Modellenmesi

Boost programında İs oluşumunun hesaplanabilmesi için Schubiger, Boulouchos ve Eberle[72] geliştirmiş olduğu model uygulanmıştır.

$$\frac{dm_{is}}{d\varphi} = \frac{dm_{is,oluşum}}{d\varphi} - \frac{dm_{is,oksidasyon}}{d\varphi} \quad (3.40)$$

$$\frac{dm_{is,oluşum}}{d\phi} = A_B \cdot \left| \frac{dm_{yakıt}}{d\phi} \right|_{diff} \cdot \left(\frac{p_{cyl}}{p_{ref}} \right)^{n1} \cdot e^{\frac{T_{A,oluşum}}{T_{ort}}} \quad (3.41)$$

$$\frac{dm_{is,oksidasyon}}{d\phi} = A_0 \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{is})^{n2} \cdot \left(\frac{p_{O_2}}{p_{O_2ref}} \right)^{n3} \cdot e^{\frac{T_{A,oksidasyon}}{T_{ort}}} \quad (3.42)$$

(n1, n2 ve n3 model sabitleridir ve n1=1, n2=1 ve n3=1.3 tür)

3.1.2.20 Dinamik Silindir İçi Girdap(Swirl'in) Hesaplanması

Boost programı emme valfinin kalkışının bir fonksiyonu olarak emme prosesi boyunca girdap karakteristiklerini hesaplamaya olanak vermektedir. Emme prosesi boyunca, silindir içerisine giren kütlenin momentumunun momenti anlık kütle akış oranı ve anlık valf kalkışındaki üretilen girdap hareketine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Hesaplama zamanı sonunda silindir içerisindeki girdap oranı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$n_{sw}(t + \Delta t) = \frac{1}{m_c(t + \Delta t)} (m_c(t) \cdot n_{sw}(t) \cdot n_{sw}(t) + dm_i \cdot n_{swi}) \quad (3.43)$$

3.1.2.21 Duvar Sıcaklığı

Çevrimin ortalama sıcaklığı yüksek basınçlı çevrim esnasında silindirden ısı kayıplarını ve dolayısıyla verimi etkilemektedir. Dolgu değişimi boyunca, silindir duvarlarından ısı transferi taze dolguyu ısıtmaktadır ve motorun volumetrik verimini düşürmektedir. Silindir içerisindeki dolgu ile ortam arasındaki ısı akışının enerji dengesi silindir duvar sıcaklıklarını belirlemektedir.

Süreksiz simülasyonlarda, bu enerji dengesi silindir kafası/silindir gömleği ve pistondan hesaplanabilir. Ek olarak, portların enerji dengesi de göz önüne alınabilir. Bu bağlamda; tek bir çevrim boyunca yanma odası tarafına olan ortalama ısı akışını ve dış kısımdaki soğuyan ortama ısı transferini sınır şart olarak sınır şart olarak kullanan, tek(1) boyutlu kondüksiyon denklemi çözülür.

Bu kabullerle, aşağıda belirtilen kondüksiyon denklemi;

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (3.44)$$

çözülmemektedir. Sınır koşulun matematiksel formülasyonu;

$$q_{in} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.45)$$

$$q_{out} = \alpha_{CM} \cdot (T_{wo} - T_{cm}) \quad (3.46)$$

3.2 YAPAY SİNİR AĞLARI METODU

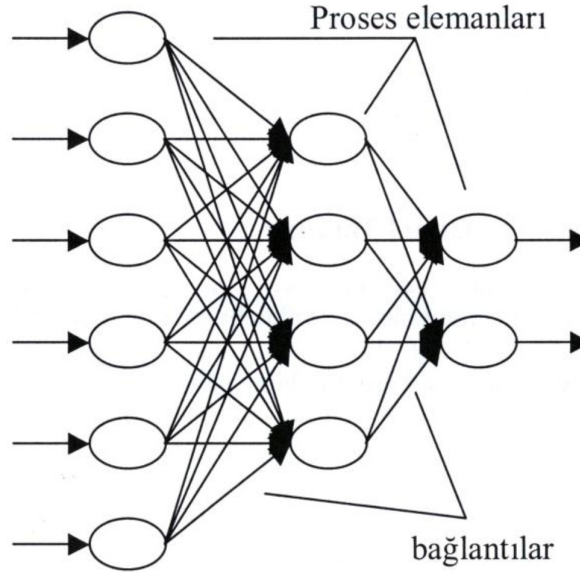
Doktora tez çalışmamda gerçekleştirmiş olduğum deneyle, r bilgisayar ortamında (AVL Boost programında) istenilen hassasiyette doğrulandıktan sonra , aynı motorun dinamometrede denememiş olduğum farklı işletme şartları (farklı devir,farklı püskürtme avansı ve farklı pilot püskürtme bölme oranları vb.) için performans ve emisyon parametre çıktıları doğrulanmış model yardımı ile elde edilmeye çalışmıştır.

İkinci aşama gerçekleştirmiş olduğum bu proses esnasında (denememiş noktaların model yolu ile tahmini ve yorumlanması) AVL Boost modelinin kalibrasyon parametrelerinin herhangi bir deney verisine ihtiyaç duymaksızın belirlenmesi gerekmektedir. Kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi esnasında herhangi bir interpolasyon algoritması (lineer, kübik, quadratik vb..) kullanımı yerine özellikle son 20 yıl içerisinde otomotiv ve içten yanmalı motorlar endüstrisi/bilimi alanında popüler bir biçimde yaygınlaşan ve güçlü bir matematiksel bir temele dayanan bir metod olan Yapay Sinir Ağları (YSA) metodu kullanılmıştır. Bu bölümde YSA'larının çalışma algoritması ve literatürdeki içten yanmalı motorlar üzerindeki mevcut uygulamaları kısaca olarak verilmiştir.

3.2.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri, herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen bilgisayar yazılımlarıdır. Bu sistemin ana temeli örneklerden genelleme yaparak öğrenmesidir [73] . Graupe [74], YSA merkezi sinir sistemindeki biyolojik sinir hücrelerini taklit etmeye çalışan yapılardır olarak ifade etmiştir. Liptak [75] ise YSA'nı biyolojik sinir sistemlerinin yapı ve süreçlerini taklit eden, karmaşık problemleri çözmek için kullanılan bir araç olarak tanımlamıştır. Haykin [59] de YSA'nı bir sinir ağı, basit işlem birimlerinden oluşan, deneyimsel bilgileri biriktirmeye yönelik doğal bir eğilimi olan ve bunların

kullanılmasını sağlayan yoğun bir şekilde paralel dağıtılmış bir işlemci olarak tanımlamıştır [76]. Yapay sinir ağları canlılarda bulunan sinir sisteminin çalışmasını elektronik ortama taşımayı hedefleyen bir programlama yaklaşımıdır. Yapay sinir ağlarının da canlılarda olduğu gibi öğrenme, hatırlama ve öğrendiklerini güncelleme gibi yeteneklerinin olması hedeflenmektedir. Sinir sisteminin davranışlarını kopyalayabilmek için yapısının da kopyalanması gerektiğini düşünen bilim adamları yapay sinir ağlarını modellerken de sinir sisteminin yapısını örnek almışlardır. Yapay sinir hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla oluşan bir yapay sinir ağı öğrenme algoritmalarından herhangi birini kullanarak öğrenme sürecini tamamladığında kullanıma hazır hale gelir. Yapay sinir ağı çalıştığı sürece öğrenme ve bilgilerini güncelleme yeteneğine de sahiptir. Yapay Sinir Ağları, biyolojik hücrelere benzer şekilde, birbirine hiyerarşik olarak bağlı ve paralel olarak çalışabilen yapay hücrelerden oluşmaktadır. Proses elemanı da denilen bu hücrelerin birbirleri ile bağlanmaları sonucu oluşan ağa yapay sinir ağı denmektedir.

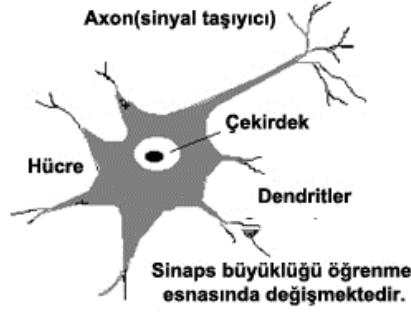


Şekil 3. 6 Yapay Sinir Ağlarının Genel Yapısı [75][73]

3.2.1.1 Yapay Sinir Ağları İnsan Sinir Sistemi Benzetişimi

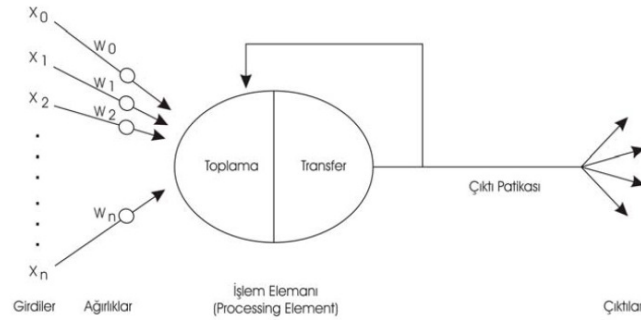
İnsanlar da elde edilen bilgilerin işleme olayı beyin de gerçekleşmektedir. Cerebral Cortex denilen "beyin" sahip olunan en karmaşık sinir ağlarına sahiptir. Sinir sisteminin en basit yapısı nöronlardır. Beyinde yaklaşık olarak 10^{10} sinir hücresi vardır ve hücre başına bağlantı sayısı ise 10^4 mertebesinde. Beynin sahip olduğu çalışma frekansı

100 Hz olup, fiziksel boyutları ise 1.3 kg ve 0.15 m² dir. Vücudun değişik yerleri ile bilgi alışverişi yapan ise nöron hücresidir. Biyolojik sinir sistemlerinin temel elemanı olan nöronlar 4 bölümde oluşmakta olup, bunlar sırası ile; dendrit, akson, çekirdek ve bağlantılardır. Dendritler sinir hücrelerinin ucunda yer alıp, ağaç kökü gibi bir görüntüye sahiptirler. Dendritler temel olarak bağlı oldukları nöron veya duyu organlarından aldıkları sinyalleri çekirdeğe iletme görevini gerçekleştirirler. Çekirdek de dendrit vasıtasıyla gelen sinyalleri bir araya toplayıp aksonlara iletir. Toplanan tüm bu sinyaller akson vasıtası ile işlenerek nöronun diğer ucunda bulunan bağlantılara gönderilir ve bu bağlantılar üretilmiş olunan bu yeni sinyalleri bir diğer nörona iletetek görevini tamamlamış olur. Şekil 3.6'da basit bir nöronun yapısına ilişkin resim verilmiştir.



Şekil 3. 7 Yapay Sinir Ağlarının Genel Yapısı

Yapay sinir ağlarının, insan sinir sisteminden sistematığı ve nöronların yapısı esinlendiği göz önüne alındığında yapay sinir ağlarında basit bir nöronun işleyişi Şekil 3.7'de ki gibidir[75].



Şekil 3. 8 YSA'nın Genel Yapısı

3.2.1.2 Yapay Sinir Hücresi

Biyolojik sinir ağlarının olduğu gibi yapay sinir ağlarının da sinir hücreleri vardır. Yapay sinir hücreleri mühendislik biliminde proses elemanları olarak adlandırılmaktadır ve her proses elemanının temelde 5 elemanı mevcuttur (Şekil 3.8).

- i) **Girdiler:** Bir yapay sinir hücresine (proses elemanına) dış dünyadan gelen bilgilerdir. Bunlar ağı öğrenmesi istenen örnekler tarafından belirlenir. Yapay sinir hücresine dış dünyadan olduğu gibi başka hücrelerden veya kendi kendisinden de bilgiler gelebilir[73].
- ii) **Ağırlıklar:** Ağırlıklar bir yapay hücreye gelen bilginin önemini ve hücre üzerindeki etkisini gösterir. Şekilde 3.8 deki w_0 ağırlığı x_0 girdi elemanının hücre üzerindeki etkisini göstermektedir. Ağırlıkların büyük ya da küçük olması önemli veya önemsiz olduğu anlamına gelmez. Bir ağırlığın değerinin sıfır olması o ağı için en önemli olay olabilmektedir. Eksi değerler önemsiz demek değildir. O nedenle artı veya eksi olması etkisinin pozitif veya negatif olduğunu gösterir. Sıfır olması ise herhangi bir etkinin olmadığını gösterir. Ağırlıklar değişken veya sabit değerler olabilirler [75].
- iii) **Toplama Fonksiyonu:** Bu fonksiyon hücreye gelen net girdiyi hesaplar. Bunun için değişik fonksiyonlar kullanılmaktadır. En yaygın olanı ağırlıklı toplam fonksiyonunu kullanmaktır. Burada her gelen girdi kendi ağırlığı ile çarpılarak toplanır. Böylece ağa gelen net girdi bulunmuş olur. Toplama fonksiyonu şu şekilde formülize edilmektedir.

$$NET = \sum_i^n G_i A_i \quad (3.47)$$

(3.44) formülünde G girdileri, A ağırlıkları, n ise bir hücreye gelen toplam girdi (proses elemanı) sayısını göstermektedir. Bir yapay sinir ağında bulunan proses elemanlarının tamamının aynı toplama fonksiyonuna sahip olmaları gerekmez. Her proses elemanı bağımsız olarak farklı toplama fonksiyonuna sahip olabilecekleri gibi hepsi aynı proses elemanına sahip olabilir. Hatta ağı bazı proses elemanları grup halinde aynı toplama fonksiyonuna sahip olabilir [73].

- iv) **Aktivasyon Fonksiyonu:** Bu fonksiyon hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye karşı üreteceği çıktıyı belirler. Toplama fonksiyonundaki olduğu gibi çıktıyı hesaplamak için değişik formüller kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan Çok Katmanlı Algılayıcı modelinde genel olarak aktivasyon fonksiyonu olarak türevi alınabilir bir sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Fonksiyon şu şekilde gösterilmektedir.

$$F(NE\text{T}) = \frac{1}{1+e^{-NE\text{T}}} \quad (3.48)$$

Net; proses elemanına gelen net girdi değerini göstermektedir. Toplama fonksiyonlarında olduğu gibi elemanlar için farklı aktivasyon fonksiyonları da kullanmak mümkündür.

- v) **Hücrenin Çıktısı:** Aktivasyon fonksiyonu tarafından belirlenen çıktı değeridir. Üretilen çıktı dış dünyaya veya başka bir hücreye gönderilir. Hücre kendi çıktısını kendisine girdi olarak da gönderebilir. Bir proses elemanının birden fazla çıktısı olmasına rağmen aslında sadece bir çıktısı olmaktadır. Aynı değer birden fazla proses elemanına girdi olarak gitmektedir[73].

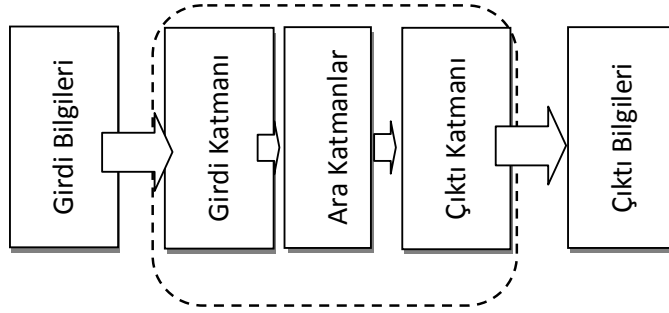
3.2.1.3 Yapay Sinir Ağının Yapısı

Bir yapay sinir ağı modeli temel olarak 3 katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar;

- i) **Girdi Katmanı:** BU katmandaki proses elemanları dış dünyadan bilgileri alarak arak katmanlara transfer etmekle sorumludur.
- ii) **Ara Katmanlar:** Girdi katmanından gelen bilgiler işlenecek çıktı katmanına gönderirler. Bu bilgilerin işlenmesi ara katmanlarda gerçekleştirilir. Bir ağı birden fazla ara katmanı olabilir.
- iii) **Çıktı Katmanı:** Bu katmandaki proses elemanları ara katmandan gelen bilgileri işleyerek ağı girdi katmanından sunulan girdi seti(örnek) için üretmesi gereken çıktıyı üretirler. Üretilen çıktı dış dünyaya gönderilir.

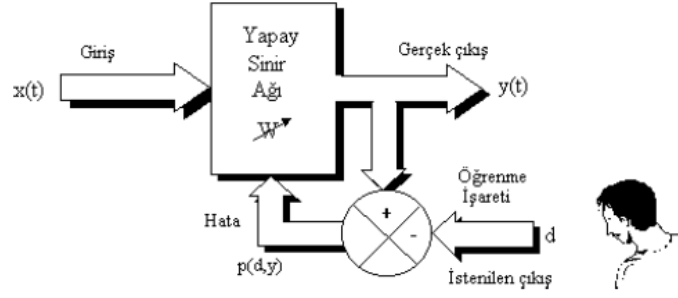
3.2.1.4 Yapay Sinir Ağlarının Genel Çalışma Prensibi

YSA'ların genel çalışma prensibi bir girdi setini (örnekleri) alarak onları çıktı setine çevirmektir. Bunun için ağ kendisine gösterilen girdiler için doğru çıktılar üretecek hale gelmesi (yani eğitilmesi) gerekmektedir. Ağa gösterilecek örnekler önce bir vektör haline getirilir. Bu vektör ağa girdi olarak verilir ve YSA bu vektör için bir çıktı üretir. Daha sonra ağın parametreleri doğru çıktıyı üretecek şekilde düzenlenir. Bu işleme ağın eğitilmesi denir. YSA'da genel olarak Danışmanlı (Öğretmenli), Danışmansız (Öğretmensiz) ve Destekleyici Öğrenme olmak üzere üç öğrenme metodundan söz etmek mümkündür. Danışmanlı öğrenmede ağa örnek olarak bir doğru çıkış verilir. Bu öğrenmede ağın ürettiği çıktılar ile hedef çıktılar arasındaki fark hata olarak ele alınır ve amaç bu hatayı en aza indirgeyebilmektir. Bu nedenle de bağlantıların ağırlıkları en uygun çıkışı verecek şekilde sürekli değiştirilir.



Şekil 3. 9 Yapay sinir ağı katmanlarının birbirleri ile ilişkileri

Doktora tezimde ki çalışmada AVL Boost modelinin kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde de danışmanlı öğrenme metodu seçilmiştir. Örnekler YSA ya gösterimi ve çıktı hataları sisteme yeniden dağıtılarak ağ doğru sonuç verir hale getirilmiştir. Şekil 3.18'de danışmanlı öğrenme yapısı görülmektedir. Widrow-Hoff tarafından geliştirilen delta kuralı ve Rumelhart ve McClelland tarafından geliştirilen genelleştirilmiş danışmanlı öğrenme algoritmasına örnek gösterilebilir [73], [77].



Şekil 3. 10 Danışmanlı öğrenme algoritması şematik şekli.

3.2.1.5 Yapay Sinir Ağlarının Tipleri

Yapay Sinir Ağlarında, çok çeşitli ağ modelleri ve bunlara bağlı öğrenme algoritmaları mevcuttur. Bu öğrenme algoritmalarına bağlı olarak YSA'nda yoğun olarak kullanılan ağ modellerini ise şu şekilde listelenebilir.

- i) Tek Katmanlı Algılayıcılar (TKA)
- ii) Çok Katmanlı Algılayıcılar (ÇKA)
- iii) Adaline/Madaline Modeli
- iv) LVQ Modeli
- v) ART Ağları
- vi) Elman Ağı
- vii) Hopfield Ağı
- viii)Counterpropagation Ağı
- ix) Cognitron ve Neocognitron Ağı
- x) SOM
- xi) Bileşik Ağlar

Doktora çalışmam esnasında; özellikle parametre tahmininde çok yoğun bir şekilde kullanılan ve içten yanmalı motorlarda yanma prosesi, performans ve emisyon parametrelerinin belirlenmesinde yoğun bir biçimde kullanılan Çok Katmanlı Algılayıcı – ÇKA (Multi LayerPerceptron) tipi yapay sinir ağları kullanılmıştır.

3.2.2 Çok Katmanlı Algılayıcılar

Çok katmanlı algılayıcılar doğrusal olmayan mühendislik problemlerinin çözümünde efektif olarak kullanılırlar. ÇKA'lar ana olarak XOR probleminin çözmek amacı ile yapılan çalışmalar neticesinde geliştirilmiştir. Rumelhart ve arkadaşları [78] tarafından geliştirilen bu modele hata yayma modeli veya geriye yayım modeli (backpropagation model) de denmektedir. Bu tip bir YSA için farklı öğrenme algoritmaları mevcuttur, çalışmamda ÇKA algılayıcılar ve danışmanlı öğrenme metotlarından biri olan Levenberg-Marquardt algoritması kombinasyonu kullanılmıştır [75][73]

3.2.2.1 Çok Katmanlı Algılayıcıların (ÇKA) Çalışma Prosedürü

ÇKA'ların çalışma prosedürlerini adım adım şu şekilde özetlemek mümkündür.

- i) **Örneklerin toplanması:** Ağın çözmesi istenilen olay için daha önce gerçekleşmiş örneklerin bulunmasıdır. Ağın test edilmesi için örneklerin (test seti) toplanması gerekmektedir. Ağın eğitilmesi sırasında test seti ağa hiç gösterilmez. Eğitim setindeki örnekler tek tek gösterilerek ağın olayı öğrenmesi sağlanır. Ağ olayı öğrendikten sonra test setindeki örnekler gösterilerek ağın performansı ölçülür.
- ii) **Ağın topolojik yapısının belirlenmesi:** Kaç tane girdi ünitesi, kaç tane ara katman, her ara katmanda kaç tane proses elemanı ve kaç tane çıktı elemanı olması gerektiği belirlenir.
- iii) **Öğrenme parametrelerinin belirlenmesi:** Ağın öğrenme katsayısı, proses elemanlarının toplanma ve aktivasyon fonksiyonları, momentum katsayısı gibi parametreler belirlenir.
- iv) **Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması:** Proses elemanlarını birbirlerine bağlayan ağırlık değerlerinin ve esik değer ünitesinin ağırlıklarının başlangıç değerlerinin atanması yapılır. Başlangıçta genellikle rasgele değerler atanır. Daha sonra ağa uygun değerleri öğrenme sırasında kendisi belirler.
- v) **Öğrenme setinden örneklerin seçilmesi ve ağa gösterilmesi:** Ağ örneklerin (Girdi/Çıktı değerleri) gösterilmesidir.

- vi) **Gerçeklesen çıktının beklenen çıktı ile karşılaştırılması:** Ağın ürettiği hata değerleri hesaplanır.
- vii) **Ağırlıkların değiştirilmesi:** Geri hesaplama yöntemi uygulanarak üretilen hatanın azalması için ağırlıkların değiştirilmesi yapılır.
- viii) **Örneklerin toplanması:** Ağın çözmesi istenilen olay için daha önce gerçekleşmiş örneklerin bulunmasıdır. Ağın test edilmesi için örneklerin (test seti) toplanması gerekmektedir. Ağın eğitilmesi sırasında test seti ağa hiç gösterilmez. Eğitim setindeki örnekler tek tek gösterilerek ağın olayı öğrenmesi sağlanır. Ağ olayı öğrendikten sonra test setindeki örnekler gösterilerek ağın performansı ölçülür.
- ix) **Ağın topolojik yapısının belirlenmesi:** Kaç tane girdi ünitesi, kaç tane ara katman, her ara katmanda kaç tane proses elemanı ve kaç tane çıktı elemanı olması gerektiği belirlenir.
- x) **Öğrenme parametrelerinin belirlenmesi:** Ağın öğrenme katsayısı, proses elemanlarının toplanma ve aktivasyon fonksiyonları, momentum katsayısı gibi parametreler belirlenir.
- xi) **Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması:** Proses elemanlarını birbirlerine bağlayan ağırlık değerlerinin ve esik değer ünitesinin ağırlıklarının başlangıç değerlerinin atanması yapılır. Başlangıçta genellikle rasgele değerler atanır. Daha sonra ağa uygun değerleri öğrenme sırasında kendisi belirler.
- xii) **Öğrenme setinden örneklerin seçilmesi ve ağa gösterilmesi:** Ağ örneklerin (Girdi/Çıktı değerleri) gösterilmesidir.
- xiii) **Gerçeklesen çıktının beklenen çıktı ile karşılaştırılması:** Ağın ürettiği hata değerleri hesaplanır.
- xiv) **Ağırlıkların değiştirilmesi:** Geri hesaplama yöntemi uygulanarak üretilen hatanın azalması için ağırlıkların değiştirilmesi yapılır.

3.2.2.2 Çok Katmanlı Algılayıcı Ağının Eğitilmesi

Sinir sisteminde olduğu gibi YSA da dış ortamdan ağa gelen bilgileri toplayarak aktivasyon fonksiyonuna gönderir. Aktivasyon fonksiyonu gelen bilgiler ışığında bir

tepki üretir ve ağa çıktı olarak gönderir. Sisteme çıktı olarak gönderilen değer ile çıktı olması beklenen değer arasındaki fark hata olarak değerlendirilir. Ağın daha düzgün sonuçlar vermesi için yani hata değerlerinin minimum değere sahip olması için ağa giriş yapan ve sonuca etki eden verilerin ağırlıkları değiştirilmesi yolu izlenir. Ağırlıklar her bir çevrimde yenilenerek amaca ulaşılmaya çalışılır. Eğer yapay sinir ağı verilen giriş değerleri neticesinde ağın üretmiş olduğu çıktı ile istenilen çıktı örtüşüyor ise ağırlık değerleri saklanır. Ağırlıkların değiştirilip istenilen değere ulaşılmaya çalışılan bu süreç ağın eğitilmesi olarak adlandırılır[76]. Ağın kendisine gösterilen girdi örneği için beklenen çıktıyı üretmesini sağlayacak ağırlık değerleri bulunmaktadır. Başlangıçta bu değerler rasgele atanmakta ve ağa örnekler gösterildikçe ağın ağırlıkları değiştirilerek zaman içerisinde istenen değerlere ulaşması sağlanmaktadır. Ağın en az hatanın olduğu ağırlık vektörüne ulaşması istenmektedir. O nedenle her iterasyonda ağırlık değerleri değiştirilerek hatanın düşmesi sağlanır. Bazen ağ farklı bir çözüme takılabilmekte ve performansı daha da iyileştirmek mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda kullanıcı tarafından belli bir tolerans değeri (ϵ) kadar hata kabul edilebilmektedir. Bazı durumlarda ağın takıldığı lokal sonuç kabul edilebilir hata düzeyinin üstünde kalabilir. ÇKA ağlarının yerel sonuçlara takılıp kalmaması için momentum katsayısı geliştirilmiştir. Bu katsayının kullanılmasıyla yerel çözümler kabul edilebilir hata düzeyinin altına çekilebilmektedir. Ağın performansını ölçmek için, ağın eğitildiği problem üzerinden hem eğitimde kullanılacak hem de test esnasında kullanılacak örnekler seçilir. Eğitim sırasında ağa sadece eğitim setindeki örnekler gösterilir. Ağ bunları öğrenince ağa hiç görmediği test setindeki örnekler verilir. Ağın performansı bu görmediği örnekler karşısında ürettiği doğru cevaplar oranı ile ölçülür.

$$P = \frac{D}{T} * 100 \quad (3.49)$$

Burada D test setinden doğru olarak cevaplandırılan örnek sayısını, T test setinde bulunan toplam örnek sayısını, P ise performans oranını göstermektedir[73]. YSA eğitimindeki önemli noktalardan biri eğitimi sağlayacak olan eğitim kümesinin seçilmesidir. Eğitim kümesinin çok büyük seçilmesi her zaman için eğitimin daha doğru olacağı anlamına gelmez. Eğitim kümesi oluşturulurken birbirine yakın bilgilerden ziyade, az miktarda da olsa birbirinden farklı ve bağımsız bilgilerin seçilmesi daha

verimli bir eğitim sağlar. Yapay sinir ağı öğrendikten sonra daha önce verilmeyen girişler verilir, sinir ağı çıkışıyla gerçek çıkışa yaklaşımının incelendiği test süreci başlatılır. Eğer yeni verilen örneklerle de doğru yaklaşıyorsa sinir ağı problemi öğrenmiş demektir. Sinir ağına verilen örnek sayısı optimum değerden fazla ise sinir ağı problemi öğrenmemiş, ezberlemiştir. Genelde eldeki örneklerin %80'i ağı verilir ağı eğitilir, daha sonra geri kalan %20'lik kısım verilir ağı davranışı incelenir, diğer bir deyişle ağı test edilir . Yapay Sinir Ağları ile bulunan çözümler her zaman için en iyi çözümlerdir denilemez. YSA, belli bir hata değeri kabul edilerek bu hataya göre çözümler üretir. Farklı bir ağı modeli veya parametrelerde yapılacak bir değişiklik sonucunda belki de ağı çok daha iyi bir sonuç üretebilir. Hata toleransı içerisinde kalmak kaydıyla YSA, en iyi çözümün dışında kalan yerel çözümleri de çözüm olarak kabul eder[76].

3.2.2.3 Çok Katmanlı Algılayıcıların Öğrenme Mekanizması

ÇKA'lar öğretmenli öğrenme stratejisine göre çalışırlar. Yani bu ağlara eğitim sırasında hem girdiler hem de o girdilere karşılık üretilmesi gereken (beklenen) çıktılar girilir. Ağı görevi her girdi için o girdiye karşılık gelen çıktıyı üretmektir. Ağı öğrenebilmesi için eğitim seti adı verilen ve örneklerden oluşan bir sete ihtiyaç vardır. Bu set içinde her örnek için ağı hem girdiler hem de o girdiler için ağı üretmesi gereken çıktılar belirlenmiştir. Öğrenme mekanizması ana olarak iki aşamadan oluşur [73].

- i) **İleriye Doğru Hesaplama** : Ağı çıktısını hesaplama safhasıdır. Bu safhada bilgi işleme eğitim setindeki bir örneği girdi katmanından ($G_1, G_2, \dots$) ağı gösterilmesi ile başlar. Girdi katmanında herhangi bir bilgi işleme olmaz. Gelen bilgiler herhangi bir değişiklik olmadan ara katmana gönderilir. Yani girdi katmanındaki k . Proses elemanının çıktısı ζ_k^i şu şekilde belirlenir.

$$\zeta_k^i = G_k \quad (3.50)$$

Ara katmandaki her proses elemanı girdi katmanındaki bütün proses elemanlarından gelen bilgileri bağlantı ağırlıklarının ($A_1, A_2, \dots$) etkisi ile alır. Önce ara katmandaki proses elemanlarına gelen net girdi NET_j^a şu formül kullanılarak hesaplanır.

$$NET_j^a = \sum_{k=1}^n A_{kj} \cdot \zeta_k^i \quad (3.51)$$

Burada A_{kj} k. girdi elemanını, j. ara katman elemanına bağlayan bağlantının ağırlık değerini göstermektedir. J. Ara katman elemanının çıktısı ise bu net girdinin aktivasyon fonksiyonunun (genellikle sigmoid) fonksiyonundan geçirilmesiyle hesaplanır. Bu fonksiyonunun türevi alınabilir olma zorunluluğu vardır (geriye doğru hesaplamada ilgili fonksiyonunun türevi alınacağından). Sigmoid fonksiyonun kullanılması halinde çıktı.

$$\zeta_j^a = \frac{1}{1 + e^{-(NET_j^a + \beta_j^a)}} \quad (3.52)$$

şeklinde olacaktır. Burada β_j ara katmanda bulunan j. Elemana bağlanan eşik değer elemanının ağırlığını göstermektedir. Bu eşik değer ünitesinin çıktısı sabit olup 1'e eşittir. Ağırlık değeri ise sigmoid fonksiyonun oryantasyonunu belirlemek üzere konulmuştur. Eğitim esnasında ağ bu değeri kendi belirlemektedir.

ii) **Geriye Doğru Hesaplama** : Bu safha ağırlıkların değiştirilmesi safhasıdır. Ağa sunulan girdi için ağın beklenen çıktıları (B1,B2,...) karşılaştırılır. Bunların arasındaki fark hata olarak kabul edilir. Amaç bu hatanın düşürülmesidir. O nedenle geriye doğru hesaplamada bu hata YSA'nın ağırlık değerleri üzerine dağıtılarak bir sonraki iterasyonla hatanın azaltılması sağlanır. Çok sayıda geri beslemeli eğitim algoritması mevcuttur. Bunlar farklı hesaplama çeşitlilikleri göstermektedirler. En çok kullanılanları delta kuralı, genelleştirilmiş delta kuralı ve Matlab programı içeriğinde bulunan ve çalışmamda tercih ettiğim ve numerik optimizasyon tekniklerini kullanan Levenberg – Marquardt(LM) algoritmasıdır. Bu algoritma ortalama boyutta bir ağ için en hızlı öğrenme algoritması ve daha az sayıda iterasyonla sonuca ulaşabildiğinden tercih edilmiştir[79].

3.2.2.4 Levenberg-Marquardt Algoritması

Temel olarak bu algoritma maksimum komşuluk fikri üzerine kurulmuş bir en az kareler hesaplama metodudur. $E(W)$ 'nin bir amaç fonksiyonu olduğu düşünülürse m tane hata terimi için $e_i^2(w)$ aşağıda verilmiştir.

$$E(w) = \sum_{i=1}^m e_i^2(w) = \|f(W)\|^2 \quad (3.53)$$

Bu eşitlikte $e_i^2(w) = (y_i - y_{di})^2$ dir. y_{di} , i sinirinin arzulanan çıkısını, y_i ise aynı sinirin asıl çıktısını temsil etmektedir. Burada, amaç fonksiyonu olan “ $f(w)$ ” fonksiyonunun Jacobiyeninin “ J ” nin , w noktasında bilindiği kabul edilir. LevenbergMarquardt algoritması kullanılarak yeni ağırlık vektörü w_{k+1} , bir önceki ağırlık vektörü w_k dan aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$w_{k+1} = w_k + \delta w_k \quad (3.54)$$

δw_k ise şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\delta w_k = -(J_k^T f(w_k))(J_k^T J_k + \lambda I)^{-1} \quad (3.55)$$

Denklem (3.51) deki J_k' 'in w_k da türetilmiş Jakobinini, λ Marquardt parametresini, I ise özdeşlik parametresini temsil etmektedir [80]. Levenberg-Marquardt algoritması aşağıdaki adımlardaki gibi özetlenebilir.

Adım 1: $E(w_k)$ yı hesapla.

Adım 2: λ için küçük bir değer ile başla ($\lambda=0.01$)

Adım 3: Denklem 3.51', δw_k için çöz ve $E(w_k + \delta w_k)$ 'yı hesapla.

Adım 4: Eğer $E(w_k + \delta w_k) \geq E(w_k)$ ise,

λ 'yı 10'un katsayısı ile arttır ve 3.adıma git.

Adım 5: Eğer $E(w_k + \delta w_k) \leq E(w_k)$ ise,

λ 'yı 10'un katsayısı ile azalt, $w_k : w_k \leftarrow w_k + \delta w_k$ yı güncelle ve 3.adıma git.

Hedef çıkışı hesaplamak için bir ÇKA'nın in LM algoritması kullanarak eğitilmesi, ağırlık dizisi w_0 a bir başlangıç değerinin atanması ile başlar ve hataların karelerinin toplamı e_i^2 'nin hesaplanmasıyla devam eder. Her e_i^2 terimi, hedef çıkış(y) ile gerçek çıkış (y_d) arasındaki farkın karesini ifade eder. Bütün veri seti için e_i^2 hata terimlerinin tamamının elde edilmesiyle, ağırlık dizileri 1. Adımdan 5.adıma kadar olan LM adımlarının uygulanmasıyla adapte edilir [79].

YSA'ları gerek tek başına bir yöntem olarak gerekse diğer modelleme yöntemleri ile birlikte kombine olarak çok fazla uygulama alanı bulmuşlardır. YSA'ların içten yanmalı motorlarda kullanımına dair literatür bilgileri giriş kısmında ayrıntılı bir biçimde verilmiştir.

YÖNTEM, KABULLER VE ALT MODELLER

Tez çalışmamda gerçekleştirilmiş olan deneyler ve modelleme çalışmalarının birbirleri ile nasıl kombine edildikleri, hangi verinin hangi kaynaktan alınarak nasıl işlendiğine dair işlem akış şeması, değişkenler, tanımları, yapılmış olan kabuller ve AVL Boost ve YSA hariç destekleyici uygulama için geliştirilmiş olan alt modeller bu bölümde verilmiştir.

4.1 Yöntem

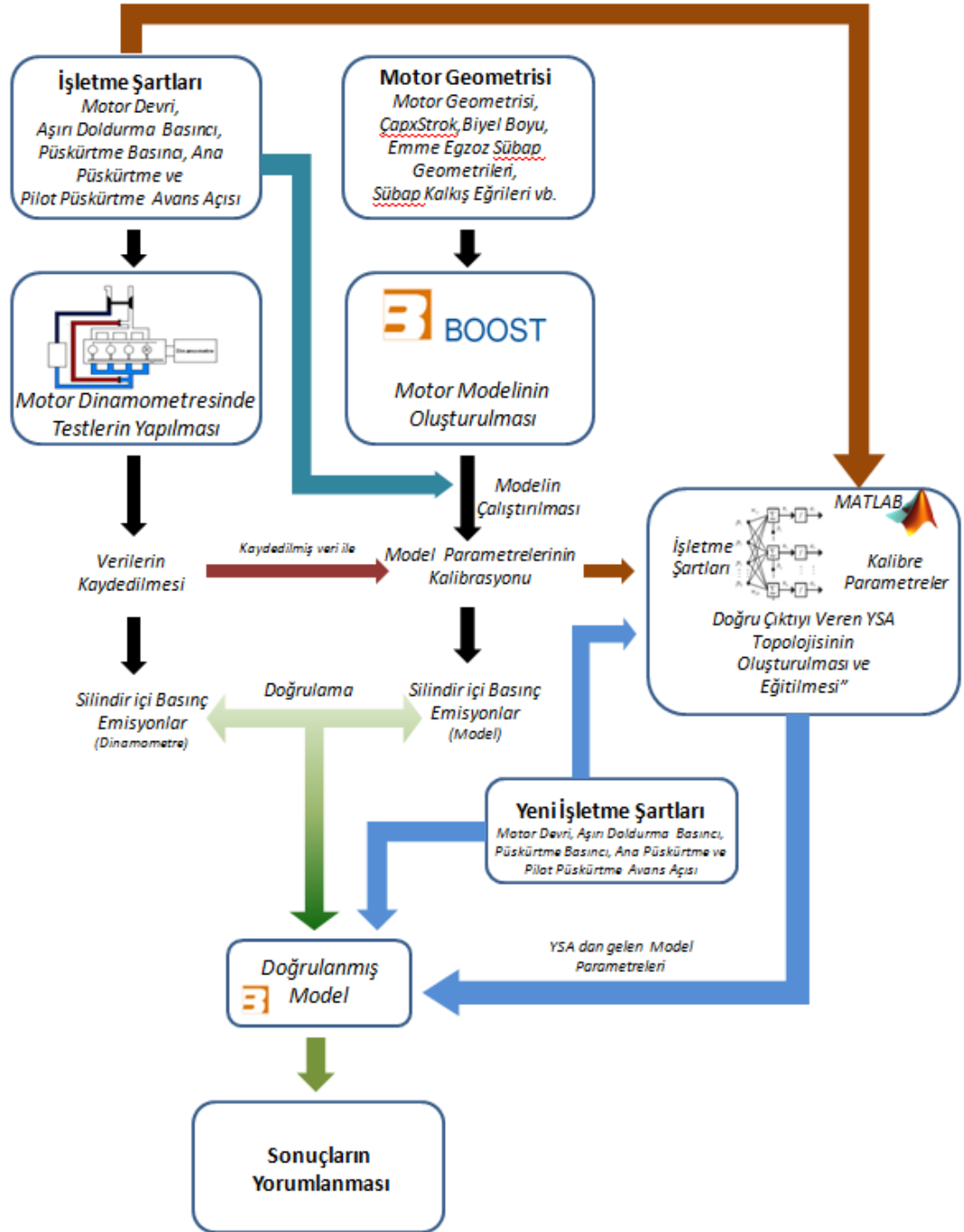
Tez çalışmamda pilot püskürtmenin performans ve emisyon açısından incelemesini yapabilmek için 3 aşamalı bir çalışma planı gerçekleştirilmiştir. Çalışma planının ana başlıkları şu şekildedir:

a) Motor deneyleri: Deneysel çalışmada 1.8 l ortak yakıt hatlı yüksek basınçlı püskürtme sistemi kullanan direkt püskürtmeli bir diesel motorda, belirlenen işletme şartlarında hem referans tek püskürtme deneyleri hem de farklı kütle ve avans açılarında pilot püskürtmenin gerçekleştirildiği deney noktaları (361 adet) denenmiş ve motorun performans ve emisyon parametreleri kayıt edilmiştir. Deney düzeneği, deneylerin yapılışı ve denenmiş olan noktaların detayı bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmiştir.

b) Tek boyutlu Termodinamik Paket Program Simülasyonu ve Motor Deneylerinin Sonuçlarının Doğrulanması: Deney motorunun tüm teknik verileri ve çalışma noktalarının motor işletme parametreleri AVL Boost tek boyutlu simülasyonuna girilerek, programın içerisinde deney motorunun tek boyutlu termodinamik bir modeli oluşturulmuştur. Modelleme aşamasında oluşturulmuş olan tek boyutlu

modelin çalışması için gerekli olan parametreler (Tutuşma Gecikmesi Parametresi, Buharlaşma Parametresi, Ön karışımli Yanma Parametresi vb.) deneyler esnasında kayıt edilmiş olan silindir içi basınç verilerine yaklaşabilmek için deneme yanılma yolu ile kalibre edilmiştir. Ek olarak modelin çalışabilmesi için gerekli olan silindir kovanı sıcaklığı, piston sıcaklığı, silindir kafa sıcaklığı bir sonraki bölümde anlatılan şekilde hesaplanmış ve modelde kullanılmıştır. Modelin ihtiyaç duyduğu püskürtme profili ise takip eden bölümdeki şekilde basit anlamda modellenerek tek boyutlu simülasyon modeline uygulanmıştır. Modelin çalışması için gerekli olan ve deney düzeneğinde ölçülmüş olan tüm basınç ve sıcaklık verileri ise kayıt edildikleri şekilde modele uygulanmışlardır. Bu aşamanın sonunda oluşturulan model deney motorunu belirli bir yaklaşımla (IOEB 10% hata) modelleyebilir duruma getirilmiştir. Parametre grupları ve doğrulama süreci takip eden bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

- c) Yeni deney noktalarının tek boyutlu termodinamik model ile simülasyonu:** Deney ve modelleme çalışmaları bittikten sonra; daha önce deney düzeneği üzerinde denenmemiş olan deney noktalarını içeren bir deney matrisi belirlenmiş ve bu noktaların performans ve emisyon çıktılarının tek boyutlu model ile belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Yeni deney noktalarının simülasyonu esnasında, tek boyutlu modelde kullanılacak olan kalibrasyon parametrelerinin, basınçların ve sıcaklıkların neler olması gerektiği ise Yapay Sinir Ağları metodundan yararlanılarak belirlenmiştir.
- d) Yeni deney noktalarının YSA metodu ile simülasyonu:** Belirlenmiş olan yeni deney matrisi sadece YSA metodu kullanılarak modellenmiş, performans ve emisyon çıktıları kayıt edilmiştir.
- e) Sonuçların Yorumlanması ve tartışma:** Deneyler ve her iki farklı simülasyon yöntemi ile elde edilmiş sonuçlar birlikte değerlendirilmiş pilot püskürtmenin optimum kullanım şeklinin nasıl kullanılması gerektiği araştırılmıştır.



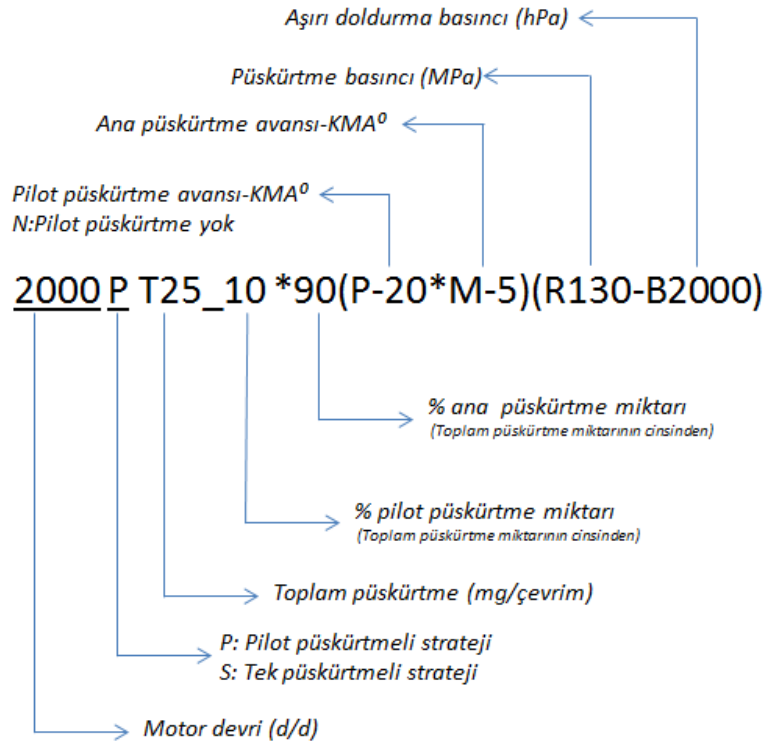
Şekil 4. 1 Tez çalışmamda kullanılmış olan yöntemin akış şeması

4.1.1 Motor Deneyleri

Bu aşamada daha önceden belirlenmiş olan işletme şartlarında deneyler gerçekleştirilmiş ve silindir içi basınç dataları, emisyon çıktıları ve motor üzerinden alınan tüm basınç ve sıcaklıklar bir dosyaya kaydedilmiştir. Kayıt edilen basınç ve sıcaklık verilerinin listesi deneysel düzenek kısmında detaylı olarak verilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği işletme şartları üretici tarafından öngörülen maksimum basınç (~150 bar) , maksimum turbo çıkış sıcaklığı (~800°C) vb. değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir.

4.1.1.1 Deney noktaları

Deney motorunun maksimum tork devirleri olan 2000 d/d , 2500 d/d ve 3750 d/d motor hızında aşağıdaki şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney noktalarının birbirinden rahatça ayrılabilmesi için bir isimlendirme sistemi oluşturulmuştur. Deney noktalarının isimlendirme sistemi aşağıdaki örnek üzerinde açıklanmıştır.



Şekil 4. 2 Tez çalışmamda kullanılmış olan deney numaralandırılmasının açıklaması

Referans Deney Noktaları

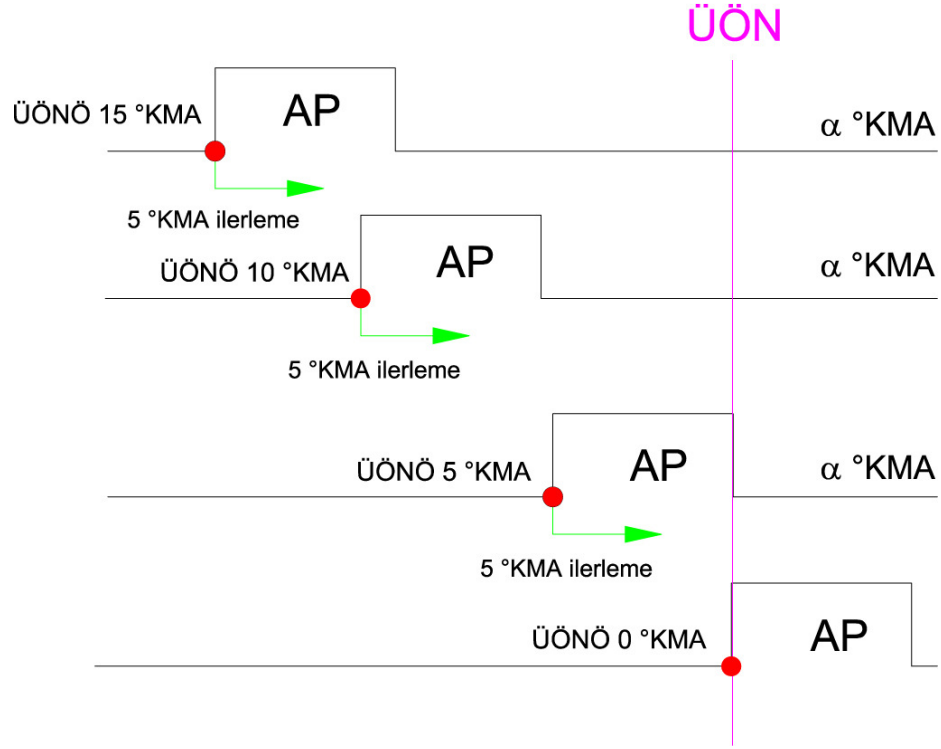
Tek püskürtmenin yapıldığı referans stratejilerin uygulandığı deney noktaları.

Çizelge 4. 1 Referans Strateji Tek Püskürtme Test Noktaları Çizelgesi

Motor DEvri (d/d)	Püskürtme Miktarı (mg/çevrim)	Emme Manifoldu Basıncı (bar)	Püskürtme Basıncı Varyasyonu (MPa)	Püskürtme avansı CA° (ÜÖNS*)
2000	25	2000	120,130,140	-15,-10,-5,0
	38	2200	130,140,150	
	43	2300	130,140,150	
2500	28	2000	120,130,140	-15,-10,-5,0
	37	2200	130,140,150	
	45	2300	130,140,150	
3750	25	2000	120,130,140	-15,-10,-5,0
	38	2200	130,140,150	
	40	2300	130,140,150	

ÜÖNS*: Üst Ölü Noktadan Sonra

Tek püskürtmenin yapıldığı referans stratejilerin uygulandığı deney noktaları. 4.1.1.1. deki kodlama algoritması ile kodlanmıştır. Her bir deney noktasına bir numara verilmiştir. Deney verisinin büyüklüğü nedeni ile bu numara sıralandırmasına göre karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Referans püskürtme stratejilerine göre , her bir deney numarasına karşılık gelen deney kodu aşağıdaki tabloda verilmiştir. Aşağıdaki tabloda deney esnasında denenen tüm noktalar verilmiştir. Ek olarak çizelge 4.2 de belirtilen 43 no'lu deneyde deney tezgahının kontrol algoritması devren çıkmış ve istenen deney matrisinin dışına çıkmıştır, ilgili deney numarası alttaki çizelgede verilmiş ancak sonuçları değerlendirme dışı bırakılmıştır.



Şekil 4. 3 Referans püskürtme stratejilerinde püskürtme zamanının değiştirilmesi

Çizelge 4. 2 Referans Strateji Tek Püskürtme Test Noktaları Kod Çizelgesi

DN	Deney Kodu	DN	Deney Kodu
1	2000ST25_0*100(P-N*M-15)(R120-B2000)	60	2500ST37_0*100(P-N*M-15)(R140-B2200)
2	2000ST25_0*100(P-N*M-10)(R120-B2000)	61	2500ST37_0*100(P-N*M-10)(R140-B2200)
3	2000ST25_0*100(P-N*M-5)(R120-B2000)	62	2500ST37_0*100(P-N*M-5)(R140-B2200)
4	2000ST25_0*100(P-N*M0)(R120-B2000)	63	2500ST37_0*100(P-N*M0)(R140-B2200)
5	2000ST25_0*100(P-N*M-15)(R130-B2000)	64	2500ST37_0*100(P-N*M-15)(R150-B2200)
6	2000ST25_0*100(P-N*M-10)(R130-B2000)	65	2500ST37_0*100(P-N*M-10)(R150-B2200)
7	2000ST25_0*100(P-N*M-5)(R130-B2000)	66	2500ST37_0*100(P-N*M-5)(R150-B2200)
8	2000ST25_0*100(P-N*M0)(R130-B2000)	67	2500ST37_0*100(P-N*M0)(R150-B2200)
9	2000ST25_0*100(P-N*M-15)(R140-B2000)	68	2500ST45_0*100(P-N*M0)(R130-B2300)
10	2000ST25_0*100(P-N*M-10)(R140-B2000)	69	2500ST45_0*100(P-N*M-5)(R130-B2300)
11	2000ST25_0*100(P-N*M-5)(R140-B2000)	70	2500ST45_0*100(P-N*M-10)(R130-B2300)
12	2000ST25_0*100(P-N*M0)(R140-B2000)	71	2500ST45_0*100(P-N*M-15)(R130-B2300)
13	2000ST38_0*100(P-N*M-15)(R130-B2200)	72	2500ST45_0*100(P-N*M0)(R140-B2300)
14	2000ST38_0*100(P-N*M-10)(R130-B2200)	73	2500ST45_0*100(P-N*M-5)(R140-B2300)
15	2000ST38_0*100(P-N*M-5)(R130-B2200)	74	2500ST45_0*100(P-N*M-10)(R140-B2300)
16	2000ST38_0*100(P-N*M0)(R130-B2200)	75	2500ST45_0*100(P-N*M-15)(R140-B2300)
17	2000ST38_0*100(P-N*M-15)(R140-B2200)	76	2500ST45_0*100(P-N*M0)(R150-B2300)
18	2000ST38_0*100(P-N*M-10)(R140-B2200)	77	2500ST45_0*100(P-N*M-5)(R150-B2300)

Çizelge 4. 2 Referans Strateji Tek Püskürtme Test Noktaları Kod Çizelgesi (Devam)

DN	Deney Kodu	DN	Deney Kodu
19	2000ST38_0*100(P-N*M-5)(R140-B2200)	78	2500ST45_0*100(P-N*M-10)(R150-B2300)
20	2000ST38_0*100(P-N*M0)(R140-B2200)	79	2500ST45_0*100(P-N*M-15)(R150-B2300)
21	2000ST38_0*100(P-N*M-15)(R150-B2200)	80	3750ST25_0*100(P-N*M-15)(R120-B2000)
22	2000ST38_0*100(P-N*M-10)(R150-B2200)	81	3750ST25_0*100(P-N*M-10)(R120-B2000)
23	2000ST38_0*100(P-N*M-5)(R150-B2200)	82	3750ST25_0*100(P-N*M-5)(R120-B2000)
24	2000ST38_0*100(P-N*M0)(R150-B2200)	83	3750ST25_0*100(P-N*M0)(R120-B2000)
25	2000ST43_0*100(P-N*M-15)(R130-B2300)	84	3750ST25_0*100(P-N*M-15)(R130-B2000)
26	2000ST43_0*100(P-N*M-10)(R130-B2300)	85	3750ST25_0*100(P-N*M-10)(R130-B2000)
27	2000ST43_0*100(P-N*M-5)(R130-B2300)	86	3750ST25_0*100(P-N*M-5)(R130-B2000)
28	2000ST43_0*100(P-N*M0)(R130-B2300)	87	3750ST25_0*100(P-N*M0)(R130-B2000)
29	2000ST43_0*100(P-N*M-15)(R140-B2300)	88	3750ST25_0*100(P-N*M-15)(R140-B2000)
30	2000ST43_0*100(P-N*M-10)(R140-B2300)	89	3750ST25_0*100(P-N*M-10)(R140-B2000)
31	2000ST43_0*100(P-N*M-5)(R140-B2300)	90	3750ST25_0*100(P-N*M-5)(R140-B2000)
32	2000ST43_0*100(P-N*M0)(R140-B2300)	91	3750ST25_0*100(P-N*M0)(R140-B2000)
33	2000ST43_0*100(P-N*M-15)(R150-B2300)	92	3750ST38_0*100(P-N*M-15)(R130-B2200)
34	2000ST43_0*100(P-N*M-10)(R150-B2300)	93	3750ST38_0*100(P-N*M-10)(R130-B2200)
35	2000ST43_0*100(P-N*M-5)(R150-B2300)	94	3750ST38_0*100(P-N*M-5)(R130-B2200)
36	2000ST43_0*100(P-N*M0)(R150-B2300)	95	3750ST38_0*100(P-N*M0)(R130-B2200)
37	2000ST25_0*100(P-N*M-15)(R120-B2000)	96	3750ST38_0*100(P-N*M-15)(R140-B2200)
38	2000ST25_0*100(P-N*M-10)(R120-B2000)	97	3750ST38_0*100(P-N*M-10)(R140-B2200)
39	2000ST25_0*100(P-N*M-5)(R120-B2000)	98	3750ST38_0*100(P-N*M-5)(R140-B2200)
40	2000ST25_0*100(P-N*M0)(R120-B2000)	99	3750ST38_0*100(P-N*M0)(R140-B2200)
41	2000ST25_0*100(P-N*M-15)(R130-B2000)	100	3750ST38_0*100(P-N*M-15)(R150-B2200)
42	2000ST25_0*100(P-N*M-10)(R130-B2000)	101	3750ST38_0*100(P-N*M-10)(R150-B2200)
43	2500ST28_0*100(P-N*M-15)(R120-B1373)	102	3750ST38_0*100(P-N*M-5)(R150-B2200)
44	2500ST28_0*100(P-N*M-15)(R120-B2000)	103	3750ST38_0*100(P-N*M0)(R150-B2200)
45	2500ST28_0*100(P-N*M-10)(R120-B2000)	104	3750ST40_0*100(P-N*M-15)(R130-B2300)
46	2500ST28_0*100(P-N*M-5)(R120-B2000)	105	3750ST40_0*100(P-N*M-10)(R130-B2300)
47	2500ST28_0*100(P-N*M0)(R120-B2000)	106	3750ST40_0*100(P-N*M-5)(R130-B2300)
48	2500ST28_0*100(P-N*M-15)(R130-B2000)	107	3750ST40_0*100(P-N*M0)(R130-B2300)
49	2500ST28_0*100(P-N*M-10)(R130-B2000)	108	3750ST40_0*100(P-N*M-15)(R140-B2300)
50	2500ST28_0*100(P-N*M-5)(R130-B2000)	109	3750ST40_0*100(P-N*M-10)(R140-B2300)
51	2500ST28_0*100(P-N*M0)(R130-B2000)	110	3750ST40_0*100(P-N*M-5)(R140-B2300)
52	2500ST28_0*100(P-N*M-15)(R140-B2000)	111	3750ST40_0*100(P-N*M0)(R140-B2300)
53	2500ST28_0*100(P-N*M-10)(R140-B2000)	112	3750ST40_0*100(P-N*M-15)(R140-B2300)
54	2500ST28_0*100(P-N*M-5)(R140-B2000)	113	3750ST40_0*100(P-N*M-10)(R150-B2300)
55	2500ST28_0*100(P-N*M0)(R140-B2000)	114	3750ST40_0*100(P-N*M-5)(R150-B2300)
56	2500ST37_0*100(P-N*M0)(R130-B2200)	115	3750ST40_0*100(P-N*M0)(R150-B2300)
57	2500ST37_0*100(P-N*M-10)(R130-B2200)		
58	2500ST37_0*100(P-N*M-15)(R130-B2200)		
59	2500ST37_0*100(P-N*M-5)(R130-B2200)		
<i>*DN: Numarası</i>			

Pilot Püskürtmenin Yapıldığı Deney Noktaları

Pilot püskürtmenin yapıldığı deney noktalarında, ana püskürtme kütlesi 5% , 10% ve 15% oranında ana püskürtmeden çıkarılarak pilot püskürtme olarak sisteme sokulmuştur. Gerçekleştirilmek istenen deneyler deney test otomasyon sistemine girilmiş ve motor ilgili noktalarda çalıştırılmıştır. Deney sonrası yapılan analizde ise gerçekleşmesi istenen pilot püskürtme matrisi ve ilgili noktalardaki enjektör kalkış ve iniş sinyalleri krank açısına bağlı incelenmiştir. İnceleme sonucunda bazı deney noktalarında (özellikle pilot püskürtme ve ana püskürtme başlangıcı arasında 5 KMA olması istenen durumlarda) Deney test otomasyon sistemine girilen pilot püskürtme stratejileri alttaki tabloda verilmiştir. Tüm enjektör sinyalleri detaylı olarak incelendikten sonra gerçekleşmiş olan gerçek deney matrisi listesi ise tablo olarak verilmiştir. Tüm deneyin rahatça değerlendirilebilmesi için deney numaraları referans püskürtmeden itibaren kaldığı yerden devam ettirilmiştir.

a) 2000 d/d da yapılmış olan pilot püskürtme deneyleri: 2000 d/d yapılmış olan tek püskürtme referans deneyleri incelenmiş olup, minimum özgül yakıt sarfiyatını gerçekleştirmiş olan stratejiler seçilmiş ve ana püskürtme avansı bu noktalardaki ile aynı bırakılarak ana püskürtme kütlesinden 5%, 10% ve 15% çıkarılarak ana püskürtmeden 5 KMA^o, 10 KMA^o, 15 KMA^o önce sisteme sokulmuştur. Çizelge 4.3 te yapılmış olan deneylerin kodları, planlanan pilot püskürtme avansları (PPPA) ve ECU limitleri nedeni ile gerçekleşen pilot püskürtme avansları (GPPA) verilmiştir.

Çizelge 4. 3 2000 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi

DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
116	2000PT25_6*94(P-25*M-10)(R120-B2000)	25	25	25
117	2000PT25_6*94(P-20*M-10)(R120-B2000)	20	20	0
118	2000PT25_6*94(P-15*M-10)(R120-B2000)	15	18	-3
119	2000PT25_6*94(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
120	2000PT25_6*94(P-25*M-10)(R120-B2000)	25	25	0
121	2000PT25_6*94(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	25	-10
122	2000PT25_6*94(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	13	-3
123	2000PT25_7*93(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
124	2000PT25_7*93(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	25	-10
125	2000PT25_7*93(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	13	-3

Çizelge 4.3 2000 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi (devam)

DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
126	2000PT25_10*90(P-25*M-10)(R120-B2000)	25	25	0
127	2000PT25_10*90(P-20*M-10)(R120-B2000)	20	20	0
128	2000PT25_10*90(P-15*M-10)(R120-B2000)	15	18,2	-3,2
129	2000PT25_10*90(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
130	2000PT25_10*90(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	15	0
131	2000PT25_10*90(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	13,2	-3,2
132	2000PT25_10*90(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
133	2000PT25_10*90(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	15	0
134	2000PT25_10*90(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	13,7	-3,7
135	2000PT25_15*85(P-25*M-10)(R120-B2000)	25	25	0
136	2000PT25_15*85(P-20*M-10)(R120-B2000)	20	20	0
137	2000PT25_15*85(P-15*M-10)(R120-B2000)	15	15	0
138	2000PT25_15*85(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
139	2000PT25_15*85(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	15	0
140	2000PT25_15*85(P-10*M-5)(R130-B2000)	20	13,9	6,1
141	2000PT25_15*85(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
142	2000PT25_15*85(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	15	0
143	2000PT25_15*85(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	13,7	-3,7
144	2000PT38_5*95(P-25*M-10)(R130-B2200)	25	25	0
145	2000PT38_5*95(P-20*M-10)(R130-B2200)	20	20	0
146	2000PT38_5*95(P-15*M-10)(R130-B2200)	15	18,1	-3,1
147	2000PT38_5*95(P-25*M-10)(R140-B2200)	25	25	0
148	2000PT38_5*95(P-20*M-10)(R140-B2200)	20	20	0
149	2000PT38_5*95(P-15*M-10)(R140-B2200)	15	18,1	-3,1
150	2000PT38_5*95(P-25*M-10)(R150-B2200)	25	25	0
151	2000PT38_5*95(P-20*M-10)(R150-B2200)	20	20	0
152	2000PT38_5*95(P-15*M-10)(R150-B2200)	14	18,2	-4,2
153	2000PT38_10*90(P-25*M-10)(R130-B2200)	25	25	0
154	2000PT38_10*90(P-20*M-10)(R130-B2200)	20	20	0
155	2000PT38_10*90(P-15*M-10)(R130-B2200)	15	18,8	-3,8
156	2000PT38_10*90(P-25*M-10)(R140-B2200)	25	25	0
157	2000PT38_10*90(P-20*M-10)(R140-B2200)	20	20	0
158	2000PT38_10*90(P-15*M-10)(R140-B2200)	15	18,8	-3,8
159	2000PT38_10*90(P-25*M-10)(R150-B2200)	25	25	0
160	2000PT38_10*90(P-20*M-10)(R150-B2200)	20	20	0
161	2000PT38_10*90(P-15*M-10)(R150-B2200)	15	18,8	-3,8
162	2000PT38_15*85(P-25*M-10)(R130-B2200)	25	25	0
163	2000PT38_15*85(P-20*M-10)(R130-B2200)	20	20	0
164	2000PT38_15*85(P-15*M-10)(R130-B2200)	15	19,7	-4,7
165	2000PT38_15*85(P-25*M-10)(R140-B2200)	25	25	0
166	2000PT38_15*85(P-20*M-10)(R140-B2200)	20	25	-5

Çizelge 4.3 2000 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi (devam)

167	2000PT38_15*85(P-15*M-10)(R140-B2200)	15	19,6	-4,6
168	2000PT38_15*85(P-25*M-10)(R150-B2200)	25	25	0
169	2000PT38_15*85(P-20*M-10)(R150-B2200)	20	20	0
167	2000PT38_15*85(P-15*M-10)(R140-B2200)	15	19,6	-4,6
168	2000PT38_15*85(P-25*M-10)(R150-B2200)	25	25	0
169	2000PT38_15*85(P-20*M-10)(R150-B2200)	20	20	0
170	2000PT38_15*85(P-15*M-10)(R150-B2200)	15	19,4	-4,4
171	2000PT43_5*95(P-25*M-10)(R130-B2300)	25	25	0
172	2000PT43_5*95(P-20*M-10)(R130-B2300)	20	20	0
173	2000PT43_5*95(P-15*M-10)(R130-B2300)	15	18,2	-3,2
174	2000PT43_5*95(P-25*M-10)(R140-B2300)	25	25	0
175	2000PT43_5*95(P-20*M-10)(R140-B2300)	20	20	0
176	2000PT43_5*95(P-15*M-10)(R140-B2300)	15	18,6	-3,6
177	2000PT43_5*95(P-25*M-10)(R150-B2300)	25	25	0
178	2000PT43_5*95(P-20*M-10)(R150-B2300)	20	20	0
179	2000PT43_5*95(P-15*M-10)(R150-B2300)	15	18,3	-3,3
180	2000PT43_10*90(P-25*M-10)(R130-B2300)	25	25	0
181	2000PT43_10*90(P-20*M-10)(R130-B2300)	20	20	0
182	2000PT43_10*90(P-15*M-10)(R130-B2300)	15	19,1	-4,1
183	2000PT43_10*90(P-25*M-10)(R140-B2300)	25	25	0
184	2000PT43_10*90(P-20*M-10)(R140-B2300)	20	20,2	-0,2
185	2000PT43_10*90(P-15*M-10)(R140-B2300)	15	19	-4
186	2000PT43_10*90(P-25*M-10)(R150-B2300)	25	25	0
187	2000PT43_10*90(P-20*M-10)(R150-B2300)	20	20	0
188	2000PT43_10*90(P-15*M-10)(R150-B2300)	15	19,4	-4,4
189	2000PT43_15*85(P-25*M-10)(R130-B2300)	25	25	0
190	2000PT43_15*85(P-20*M-10)(R130-B2300)	20	20	0
191	2000PT43_15*85(P-15*M-10)(R130-B2300)	15	20	-5
192	2000PT43_15*85(P-25*M-10)(R140-B2300)	25	24,8	0,2
193	2000PT43_15*85(P-20*M-10)(R140-B2300)	20	20	0
194	2000PT43_15*85(P-15*M-10)(R140-B2300)	15	19,9	-4,9
195	2000PT43_15*85(P-25*M-10)(R150-B2300)	25	25	0
196	2000PT43_15*85(P-20*M-10)(R150-B2300)	20	20	0
197	2000PT43_15*85(P-15*M-10)(R150-B2300)	15	20,1	-5,1
PPPA: Planlanan pilot püskürtme avansı-ÜÖNÖ				
GPPA:Gerçekleşen pilot püskürtme avansı-ÜÖNÖ				

a) 2500 d/d ve 3750 d/d yapılmış olan pilot püskürtme deneyleri: 2000 d/d yapılmış olan pilot püskürtme deneyleri incelenmiş ve ana püskürtme avansının ÜÖNÖ 15 °KMA, 10 °KMA da elde edilmiş olan maksimum silindir içi basınç değerlerinin motorun teknik olarak izin verilen maksimum basınç limitinin (150

bar) üzerine geçtiği görülmüş ve deney stratejisi bu aşamada mecburi olarak değiştirilmek zorunda kalınmıştır ve ana püskürtme avansı ÜÖNÖ 5 °KMA' da sabitlenmiştir. Çizelge 4.5 te yapılmış olan deneylerin kodları, planlanan pilot püskürtme avansları (PPPA) ve ECU limitleri nedeni ile gerçekleşen pilot püskürtme avansları (GPPA) verilmiştir. Ek olarak çizelge 4.5 de belirtilen 333 no'lu deneyde deney tezgahının kontrol algoritması devren çıkmış ve istenen deney matrisinin dışına çıkmıştır, ilgili deney numarası alttaki çizelgede verilmiş ancak sonuçları değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Çizelge 4. 4 Planlanan deney matrisi

Motor DEvri (d/d)	Toplam Püskürtme Miktarı (mg/çevrim)	Emme Manifoldu Basıncı (hPa)	Püskürtme Basıncı Varyasyonu (MPa)	Ana Püskürtme avansı KMA° (ÜÖNS*)	Pilot Püskürtme avansı KMA° (ÜÖNS*)
2500	28	2000	120,130,140	- 5	-20,-15, -10,-5
	37	2200	130,140,150		
	45	2300	130,140,150		
3750	25	2000	120,130,140		-20,-15, -10,-5
	38	2200	130,140,150		
	40	2300	130,140,150		

Çizelge 4. 5 2500 d/d ve 3750 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi

DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
198	2500PT28_5*95(P-30*M-15)(R120-B2000)	30	30	0
199	2500PT28_5*95(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	15	0
200	2500PT28_5*95(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	15,4	-5,4
201	2500PT28_6*94(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
202	2500PT28_6*94(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	15	0
203	2500PT28_6*94(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	15,4	-5,4
204	2500PT28_6*94(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
205	2500PT28_6*94(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	15	0
206	2500PT28_6*94(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	15,5	-5,5
207	2500PT28_10*90(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	20	0
208	2500PT28_10*90(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	15,8	-0,8
209	2500PT28_10*90(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	15,7	-5,7
210	2500PT28_10*90(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
211	2500PT28_10*90(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	15,7	-0,7
212	2500PT28_10*90(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	15,7	-5,7
213	2500PT28_10*90(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
214	2500PT28_10*90(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	15,8	-0,8
215	2500PT28_10*90(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	15,7	-5,7
216	2500PT28_15*85(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	20	0
217	2500PT28_15*85(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	16,7	-1,7
218	2500PT28_15*85(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	16,8	-6,8
219	2500PT28_15*85(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20	0
220	2500PT28_15*85(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	16,5	-1,5
221	2500PT28_15*85(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	16,6	-6,6
222	2500PT28_15*85(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20	0
223	2500PT28_15*85(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	16,5	-1,5
224	2500PT28_15*85(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	17	-7
225	2500PT28_5*95(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	20	0
226	2500PT37_5*95(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	20	0
227	2500PT37_5*95(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	15,4	-0,4
228	2500PT37_5*95(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	15,4	-5,4
229	2500PT37_5*95(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	20	0
230	2500PT37_5*95(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	15,5	-0,5
231	2500PT37_5*95(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	15,5	-5,5
232	2500PT37_5*95(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	20	0
233	2500PT37_5*95(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	15,5	-0,5
234	2500PT37_5*95(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	15,6	-5,6
235	2500PT37_10*90(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	20	0

Çizelge 4.5 2500 d/d ve 3750 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi(devam)

DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
236	2499PT37_10*90(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	16,3	-1,3
237	2500PT37_10*90(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	16,3	-6,3
238	2500PT37_10*90(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	20	0
239	2500PT37_10*90(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	16,2	-1,2
240	2500PT37_10*90(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	16,2	-6,2
241	2500PT37_10*90(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	20	0
242	2500PT37_10*90(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	16,8	-1,8
243	2500PT37_10*90(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	16,3	-6,3
244	2500PT37_15*85(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	20	0
245	2500PT37_15*85(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	17,3	-2,3
246	2500PT37_15*85(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	17,4	-7,4
247	2500PT37_15*85(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	20	0
248	2500PT37_15*85(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	17,1	-2,1
249	2500PT37_15*85(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	17,1	-7,1
250	2500PT37_15*85(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	20	0
251	2500PT37_15*85(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	17	-2
252	2500PT37_15*85(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	17,1	-7,1
253	2499PT45_5*95(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20	0
254	2500PT45_5*95(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	15,5	-0,5
255	2500PT45_5*95(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	15,5	-5,5
256	2500PT45_5*95(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	20	0
257	2500PT45_5*95(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	15,6	-0,6
258	2500PT45_5*95(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	15,5	-5,5
259	2500PT45_5*95(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	20	0
260	2500PT45_5*95(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	15,6	-0,6
261	2500PT45_5*95(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	15,7	-5,7
262	2500PT45_10*90(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20	0
263	2500PT45_10*90(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	16,7	-1,7
264	2500PT45_10*90(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	16,7	-6,7
265	2500PT45_10*90(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	20	0
266	2500PT45_10*90(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	16,6	-1,6
267	2500PT45_10*90(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	16,6	-6,6
268	2500PT45_10*90(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	20	0
269	2500PT45_10*90(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	16,6	-1,6
270	2500PT45_10*90(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	16,6	-6,6
271	2500PT45_15*85(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20	0
272	2499PT45_15*85(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	18	-3
273	2500PT45_15*85(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	17,9	-7,9
274	2500PT45_15*85(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	20	0
275	2500PT45_15*85(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	17,7	-2,7

Çizelge 4.5 2500 d/d ve 3750 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi(devam)

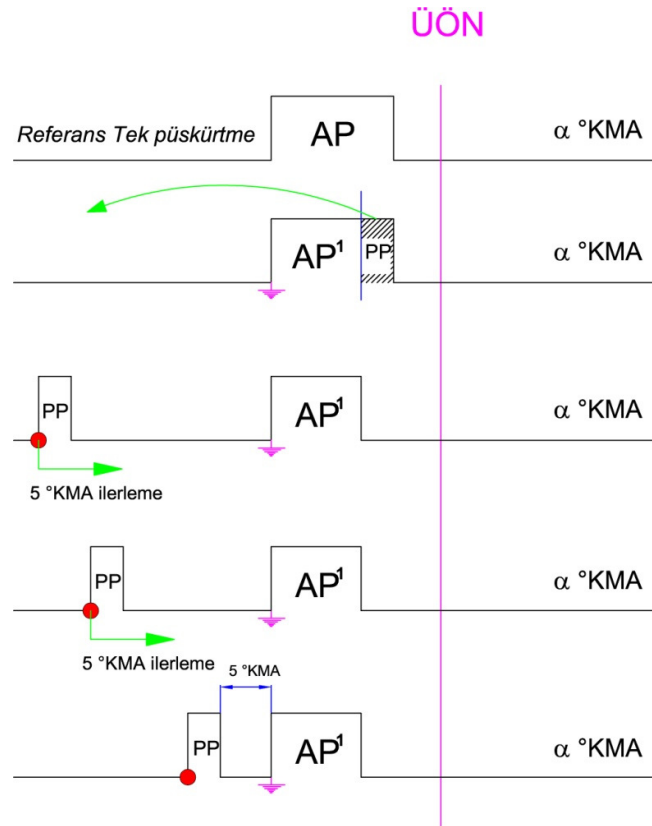
DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
276	2499PT45_15*85(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	17,7	-7,7
277	2500PT45_15*85(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	20	0
278	2500PT45_15*85(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	17,5	-2,5
279	2499PT45_15*85(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	17,5	-7,5
280	3750PT25_6*94(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	20,1	-0,1
281	3750PT25_6*94(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	20,2	-5,2
282	3750PT25_6*94(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	20,2	-10,2
283	3750PT25_6*94(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20,3	-0,3
284	3750PT25_6*94(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	20,3	-5,3
285	3750PT25_6*94(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	20,3	-10,3
286	3750PT25_7*93(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20,3	-0,3
287	3750PT25_7*93(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	20,3	-5,3
288	3750PT25_7*93(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	20,4	-10,4
289	3750PT25_10*90(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	20,5	-0,5
290	3750PT25_10*90(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	20,7	-5,7
291	3750PT25_10*90(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	20,5	-10,5
292	3750PT25_10*90(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	20,5	-0,5
293	3750PT25_10*90(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	20,7	-5,7
294	3750PT25_10*90(P-10*M-5)(R130-B2000)	10	20,7	-10,7
295	3750PT25_10*90(P-20*M-5)(R140-B2000)	20	20,6	-0,6
296	3750PT25_10*90(P-15*M-5)(R140-B2000)	15	20,8	-5,8
297	3750PT25_10*90(P-10*M-5)(R140-B2000)	10	20,6	-10,6
298	3750PT25_15*85(P-20*M-5)(R120-B2000)	20	22	-2
299	3750PT25_15*85(P-15*M-5)(R120-B2000)	15	21,8	-6,8
300	3750PT25_15*85(P-10*M-5)(R120-B2000)	10	22	-12
301	3750PT25_15*85(P-20*M-5)(R130-B2000)	20	21,8	-1,8
302	3750PT25_15*85(P-15*M-5)(R130-B2000)	15	21,8	-6,8
303	3750PT38_5*95(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	20,3	-0,3
304	3750PT38_5*95(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	20,5	-5,5
305	3750PT38_5*95(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	20,3	-10,3
306	3750PT38_5*95(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	20,5	-0,5
307	3750PT38_5*95(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	20,5	-5,5
308	3750PT38_5*95(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	20,4	-10,4
309	3750PT38_5*95(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	20,6	-0,6
310	3750PT38_5*95(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	20,6	-5,6
311	3750PT38_5*95(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	20,6	-10,6
312	3750PT38_10*90(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	21,7	-1,7
313	3750PT38_10*90(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	21,7	-6,7
314	3750PT38_10*90(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	21,7	-11,7
315	3750PT38_10*90(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	21,7	-1,7

Çizelge 4.5 2500 d/d ve 3750 d/d içi pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi(devam)

DN	Deney Kodu	PPPA	GPPA	FARK
316	3750PT38_10*90(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	21,5	-6,5
317	3750PT38_10*90(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	21,5	-11,5
318	3750PT38_10*90(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	21,8	-1,8
319	3750PT38_10*90(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	21,6	-6,6
320	3750PT38_10*90(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	21,8	-11,8
321	3750PT38_13*87(P-20*M-5)(R130-B2200)	20	22,8	-2,8
322	3750PT38_13*87(P-15*M-5)(R130-B2200)	15	22,8	-7,8
323	3750PT38_13*87(P-10*M-5)(R130-B2200)	10	22,9	-12,9
324	3750PT38_13*87(P-20*M-5)(R140-B2200)	20	23,4	-3,4
325	3750PT38_13*87(P-15*M-5)(R140-B2200)	15	22,6	-7,6
326	3750PT38_13*87(P-10*M-5)(R140-B2200)	10	22,6	-12,6
327	3750PT38_13*87(P-20*M-5)(R150-B2200)	20	22,6	-2,6
328	3750PT38_13*87(P-15*M-5)(R150-B2200)	15	22,5	-7,5
329	3750PT38_13*87(P-10*M-5)(R150-B2200)	10	22,4	-12,4
330	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20,5	-0,5
331	3750PT40_5*95(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	20,5	-5,5
332	3750PT40_5*95(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	20,5	-10,5
333	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	-	-
334	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20,5	-0,5
335	3750PT40_5*95(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	21,3	-6,3
336	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	20,3	-0,3
337	3750PT40_5*95(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	20,5	-10,5
338	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	21,2	-1,2
339	3750PT40_5*95(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	20,4	-5,4
340	3750PT40_5*95(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	20,3	-10,3
341	3750PT40_5*95(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	20,6	-0,6
342	3750PT40_5*95(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	20,6	-5,6
343	3750PT40_5*95(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	20,7	-10,7
344	3750PT40_10*90(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	21,9	-1,9
345	3750PT40_10*90(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	21,9	-6,9
346	3750PT40_10*90(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	21,9	-11,9
347	3750PT40_10*90(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	21,8	-1,8
348	3750PT40_10*90(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	21,8	-6,8
349	3750PT40_10*90(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	21,7	-11,7
350	3750PT40_10*90(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	22,7	-2,7
351	3750PT40_10*90(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	21,8	-6,8
352	3750PT40_10*90(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	21,8	-11,8
353	3750PT40_12*88(P-20*M-5)(R130-B2300)	20	23,6	-3,6
354	3750PT40_12*88(P-15*M-5)(R130-B2300)	15	22,8	-7,8
355	3750PT40_12*88(P-10*M-5)(R130-B2300)	10	22,8	-12,8

Çizelge 4.5 2500 d/d ve 3750 d/d için pilot püskürtme test noktaları kod çizelgesi
(devam)

356	3750PT40_12*88(P-20*M-5)(R140-B2300)	20	23,4	-3,4
357	3750PT40_12*88(P-15*M-5)(R140-B2300)	15	22,5	-7,5
358	3750PT40_12*88(P-10*M-5)(R140-B2300)	10	22,6	-12,6
359	3750PT40_12*88(P-20*M-5)(R150-B2300)	20	22,5	-2,5
360	3750PT40_12*88(P-15*M-5)(R150-B2300)	15	23,3	-8,3
361	3750PT40_12*88(P-10*M-5)(R150-B2300)	10	23,3	-13,3
PPPA: Planlanan pilot püskürtme avansı-ÜÖNÖ				
GPPA: Gerçekleşen pilot püskürtme avansı-ÜÖNÖ				

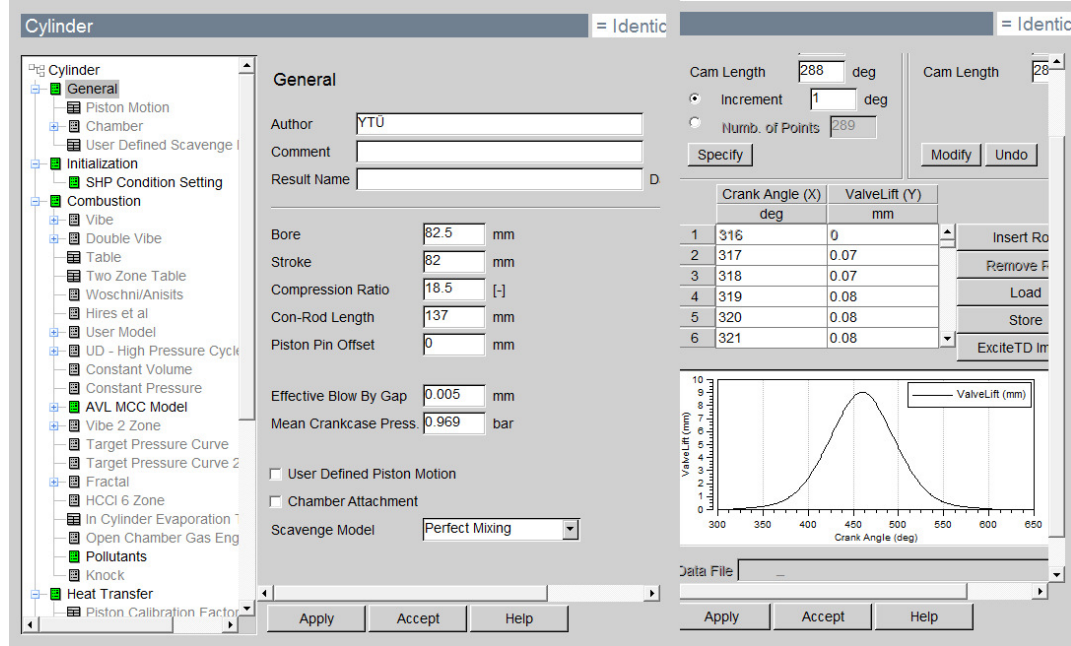


Şekil 4. 4 Referans püskürtme stratejilerinde püskürtme zamanının değiştirilmesi

4.1.2 Tek Boyutlu Termodinamik Paket Program Simülasyonun Yapılması Motor Deneylerinin Sonuçlarının Doğrulanması

4.1.2.1 Geometrik Verilerin Programa Girişi

Bu aşamada deney motorunun geometrik verileri AVL Boost programına girilerek deney motorunun bilgisayar modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4. 5 Boost Programı motor geometri veri giriş ekranı

4.1.2.2 Termodinamik Modelin Doğrulanması ve Kalibrasyonu

Model; deneylerdeki işletme şartlarında çalıştırılmış ve model çıktısı silindir içi basınç verisinin ve emisyon değerlerinin deney tezgahından alınan silindir içi basınç ve emisyon değerlerine belirli bir yaklaşım değerinde uyum gösterebilmesi için model parametrelerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelin çalışması için gerekli olan bazı basınç ve sıcaklık verileri veya boyutsuz büyüklükler ise a) eğer motor deneylerinde veri olarak direk toplanmışlarsa kayıt edilen veri havuzundan direk olarak girilmiştir b) eğer motor deneylerinde veri olarak direk toplanmamış ancak elde olan toplanmış verilerden hesapla türetililecek ise ilgili veri oluşturulan alt model hesaplanmış ve elde edilen sonuç girilmiştir.

Boost programı teorisinde de belirtildiği gibi, hesaplama dinamiğinde kullanılmış olan denklemlerin bir çoğu kalibrasyon (ayar) parametreleri içermektedir. Program bu parametreleri, bir tablo vasıtası ile belirleyerek deney noktanıza göre ayarlayabilmenize olanak sağlamaktadır. Bu tablo vasıtası ile, ek olarak hesaplamalarınızın başlangıcında kabul etmiş olduğunuz sıcaklık ve basınç gibi değerleri, yada normalize püskürtme oranı veya gerekli ise herhangi bir *.dat,*xls vb. uzantılı bir dosyayı sisteme tanıtabilmeye olanak sağlamaktadır. (yada dinamometre üzerinden o deney noktasında toplanan verileri) girebilmenize de olanak sağlamaktadır.

Model	Combustion_Parameters	Emission	AFR	Temperatures	Pressures
Case Set 1	Head_Calib_Fac	Piston_Calib_F	Liner_Calib	Tur_Parameter	Disp_Parameter
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0.5	0.5	0.5	1	1
Case Set 1	NOX_Kin	NOX_Post	co_kin	SOOT_CON	SOOT_PRO
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1	0.466142338	0.87	60.0	1
					New
Case Set 1	AFR	AFR_C1	AFR_inpipe	AFR_C8	AFR_C7
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	37.69	37.69	37.69	37.69	37.69
Case Set 1	T_ExVal_O	T_Exh_Man	T_Exh_Plenum	T_Plenum_SB2	T_SB2
	degC	degC	degC	degC	degC
1	575	440	430	420	412.7
					New
Case Set 1	P_ExVal_O	P_Exh_Man	P_Exh_Plenum	P_Plenum_SB2	P_SB2
	bar	mbar	mbar	mbar	mbar
1	6	3470	3470	3460	3448.7
					New

Şekil 4. 6 Boost Programı parametre veri giriş ekranı

Model parametreleri, sıcaklık ve basınç değerleri ve boyutsuz büyüklükler iki grup halinde aşağıda verilmiştir. Bu parametreler ve değerler, kullanılmış olan kısaltmaları, deney noktasındaki deneysel silindir içi basınç verisini doğrular iken ilgili parametrenin değiştirilme yada belirlenme yöntemi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4. 6 Yanma Parametre Grubu

Parametre Kısaltması	Parametre Adı	Parametre Tayin Yöntemi
PRM_{YNM}	Yanma Kalibrasyon Parametresi	Model içi belirleme
PRM_{TG}	Tutuşma Gecikmesi Kalibrasyon Parametresi	Model içi belirleme
P_{ESK}	Emme valfi kapandığı andaki silindir içi basınç	Deneyssel
M_{top}	Toplam Püskürtme Miktarı	Deneyssel
M_{pil}	Pilot püskürtme miktarı	Deneyssel
P_{ypb}	Püskürtme basıncı	Deneyssel
N	Motor devri	Deneyssel
KF_{KOV}	Silindir kovani ısı transfer kalibrasyon faktörü	=1
KF_{KAF}	Silindir kafası ısı transfer kalibrasyon faktörü	=1
KF_{PIS}	Piston ısı transfer kalibrasyon faktörü	=1
T_{PIS}	Piston sıcaklığı	Alt model ile
T_{KAF}	Silindir kafa sıcaklığı	Alt model ile
T_{KOV1}	Silindir kovani iç yüzey üst ölü nokta sıcaklığı	Alt model ile
T_{KOV1A}	Silindir kovani iç yüzey alt ölü nokta sıcaklığı	Alt model ile
AFR	Hava yakıt karışım oranı	Hesap ile
T_{EGMAN}	Egzoz manifold sıcaklığı	Deneyssel
P_{EGMAN}	Egzoz manifold basıncı	Deneyssel
T_{EGSA}	Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi sıcaklığı	Deneyssel verilerden hesap ile
P_{EGSA}	Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi basıncı	Deneyssel
Q_{EHAV}	Emme hava debisi	Deneyssel
T_{EHAV}	Emme hava sıcaklığı	Deneyssel
P_{MAN}	Emme manifold basıncı	Deneyssel
$SOEB$	Motor sürtünme ortalama efektif basıncı	Alt model ile
$PR_{PÜS}$	Püskürtme Profili	Alt model ile

Çizelge 4. 7 Emisyon Parametre Grubu

PRM_{NOX}	Azot oksit emisyonu kalibrasyon parametresi	Model içi belirleme
PRM_{CO}	Karbon monoksit emisyonu kalibrasyon parametresi	Model içi belirleme
PRM_{IS}	İs emisyonu kalibrasyon parametresi	Model içi belirleme

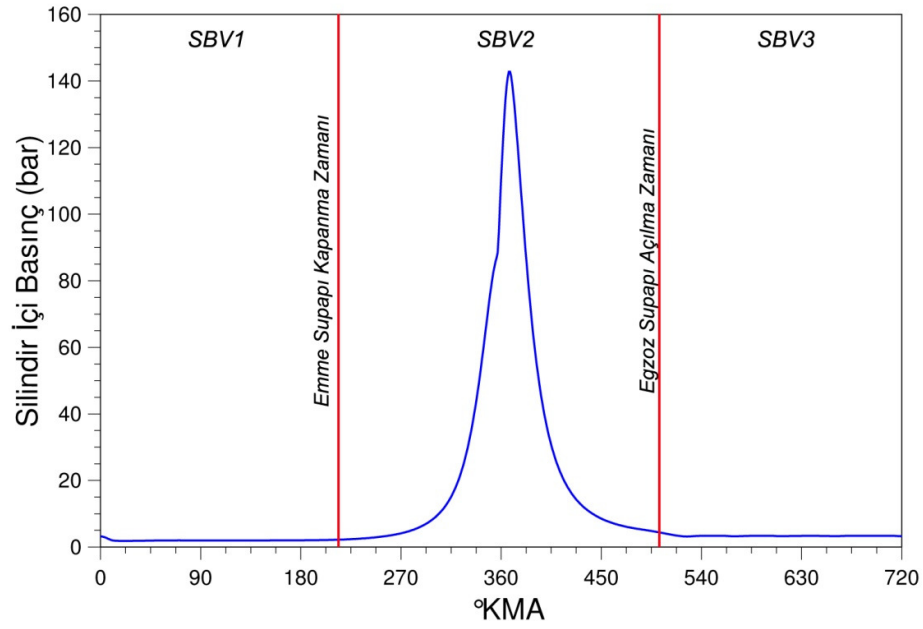
Modelin doğrulanmasında ana kriter ; model çıktısı basınç eğrisi ile dinamometre den alınan basınç eğrisinin birbiri ile uyumudur. Hedef olarak deneysel olarak elde edilen ortalama indike basınç ile simülasyondan elde edilen basınç verisinin $\pm 10\%$ 'luk hata aralığında birbirine yaklaşması hedeflenmiştir. Değerlendirme aşamasında deneysel verinin $\sim 90\%$ 'lık kısmında bu aralığa ulaşılmıştır. Ancak verinin yaklaşık $\sim 10\%$ kısmında ise bu hata aralığına yaklaşmak mümkün olmamıştır. Kullanılmış olunan simülasyon programının tek boyutlu olduğu göz önüne alındığında olası 3 boyutlu etkilerin modellenmesi ve etkilerinin (spreyin duvara çarpması, vb..) modellenmesi mümkün olmadığından $\sim 10\%$ 'luk kısım elde edilen olası en iyi yaklaşım değerinde bırakılmıştır.

Ortalama indike basınca ek olarak model çıktıları ile deneysel verinin uyumunu değerlendirmek için aşağıda belirtilen kriterler belirlenmiş ve veriler bu kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Detaylı değerlendirebilme için basınç eğrisi bütün olarak değerlendirilmesine ek olarak 3 farklı kısma ayrılarak da değerlendirilmiştir. Bu 3 kısım şu şekilde belirlenmiştir;

1.Kısım (Emme Kısımı): Üst Ölü noktadan, emme supabı kapanana kadar ki kısım-SBV1

2.Kısım(Yüksek Basınç Kısımı) : Emme supabı kapandığı andan itibaren egzoz supabı açılana kadar olan kısım-SBV2

3.Kısım(Egzoz Kısımı) : Egzoz supabı açıldığı andan ,egzoz zamanının sonuna kadar olan kısım-SBV3



Şekil 4. 7 Silindir içi basınç verisi değerlendirme kısımları

Değerlendirmede kullanılan tüm kriterler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4. 8 Değerlendirme kriterleri

<i>Kısaltma</i>	<i>Değerlendirme Kriteri</i>
OR _{OİB}	İndike ortalama efektif basınç (IOEB) oranı (4 silindir için ortalama veri) ($OİB_{SIM}/OİB_{MOTOR}$)
OR _{OEB}	Fren ortalama efektif basınç (FOEB) oranı (OEB_{SIM}/OEB_{MOTOR})
OR _{SOB}	Sürtünme ortalama efektif basınç (SOEB) oranı (SOB_{SIM}/SOB_{MOTOR})
OR _{be}	Özgül yakıt sarfiyatı oranı (ÖYS) oranı ($ÖYS_{SIM}/ÖYS_{MOTOR}$)
OR _{FTRK}	Fren torku (FTRK) oranı ($FTRK_{SIM}/FTRK_{MOTOR}$)

Çizelge 4. 8 Değerlendirme kriterleri

OR _{FGÜÇ}	Fren gücü (FGÜÇ) oranı ($FGÜÇ_{SIM}/FGÜÇ_{MOTOR}$)
R _{SBV1} , R _{SBV2} R _{SBV3}	Deney silindir içi basınç verisi(SBV) ve simülasyon silindir içi basınç verisinin emme süreci (SBV1) , sübaplar kapalı yüksek basınç prosesi boyunca(SBV2) ve egzoz süreci boyunca (SBV3) regresyonu- (Korelasyon katsayısı-R) $R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
OMH	Ortalama mutlak hata (Belirlenen bölgede motor deneylerinden elde edilen silindir içi basınç verisi ve simülasyondan elde edilen basınç verisinin arasındaki ortalama mutlak hata oranı) $OMH = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Simülasyon Değeri} - \text{Hedef Değer} }{n}$
EFEKTİF VERİM (%) η_{ef}	Motor efektif verimlerinin karşılaştırılması . (Motor milinden alınan fren gücünü, motora birim zamanda sokulan ısı enerjisine oranı (%)).
OR _{NOX_1}	Simülasyon parametrelerinin 1 olarak kullanıldığı durumlardaki NO_x emisyonları oranı $(NO_{x_SIM_1}/NO_{x_MOTOR})$
OR _{CO_1}	Simülasyon parametrelerinin 1 olarak kullanıldığı durumlardaki CO emisyonları oranı (CO_{SIM_1}/CO_{MOTOR})
OR _{IS_1}	Simülasyon parametrelerinin 1 olarak kullanıldığı durumlardaki İS emisyonları oranı (IS_{SIM_1}/IS_{MOTOR})

Uyumluluk analizinin değerlendirilebilmesi için Matlab ortamında bir kod yazılmış ve simülasyonlar ile deney verileri yukarıda verilen kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

4.1.3 Yeni Deney Noktalarının Tek Boyutlu Termodinamik Model İle Simülasyonu

4.1.3.1 Yeni Deney Noktaları

Deney, modelleme ve her iki aşamanın birbirileri ile karşılıklı analiz çalışmaları bittikten sonra; daha önce deney düzeneği üzerinde denenmemiş olan deney noktalarını içeren bir deney matrisinin belirlenmesi ve bu noktaların performans ve emisyon çıktılarının tek boyutlu model termodinamik ile belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Yeni deney noktalarının simülasyonu esnasında, tek boyutlu modelde kullanılacak olan kalibrasyon parametrelerinin, basınçların ve sıcaklıkların neler olması gerektiği ise yapay sinir ağıları metodundan yararlanılarak belirlenmiştir.

Yeni deney matrisi şu şekilde belirlenmiştir. Belirlenen ve aşağıda verilen değişkenler tam faktöriyel şekilde tüm varyasyonlar denenmiştir. Belirlenen toplam varyasyon sayısı 2160 tir.

Çizelge 4. 9 Tek püskürtme yapıldığı durumlarda simülasyon deney matrisi

Motor Devri (d/d)	Toplam Püskürtme Miktarı (mg/çevrim)	Pilot Püskürtme Miktarı (% Toplam Püskürtme)	Emme Manifoldu Basıncı (hPa)	Püskürtme Basıncı Varyasyonu (MPa)	Ana Püskürtme avansı KMA° (ÜÖNÖ*)	Pilot Püskürtme avansı KMA° (Ana püskürtme ile arası mesafe)
2000	25	5	2000	110		
2500	38	10	2200	120	5	5
	43	15	2400	130	10	10
		20		140		15
				150		

4.1.3.2 Yeni Parametrelerin Tayini ve Modelin Çalıştırılması

Deney düzeneğinde denenmemiş noktalardaki performans ve emisyon parametreleri hakkında yorum yapabilmek için, denenmemiş noktalardaki model parametrelerinin ve

programın çalışması için gerekli sıcaklık ve basınçların belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktalar için deney verisi elimizde olmadığından, deney motorunun belirlenen yeni işletme şartları Yapay Sinir Ağları'na girilmiş ve YSA vasıtası ile yeni model parametreleri, sıcaklık ve basınç değerleri belirlenmiş ve model bu yeni parametreler ile çalıştırılmıştır. Yeni model parametreleri ve veri grubunun belirlenmesi esnasında içten yanmalı motorlar biliminde performans ve emisyon tahmininde en çok kullanım alanı bulan [Çok Katmanlı Algılayıcı tipinde YSA'lar kullanılmıştır. YSA'lar tek ara katmanlı dizayn edilmiştir. Nöron sayısının belirlenmesinde ise başlangıç olarak 10 değeri atanmıştır. Parametre tahmin kabiliyetinin istenen düzeye ulaşmaması durumunda nöron sayısının artırılması yoluna gidilmiştir.

YSA'nın eğitimi için kullanılacak olan 361 test noktasının işletme parametreleri, YSA'nın eğitimi esnasında girdi parametresi olarak YSA'ya gösterilmiştir. Bu amaçla belirlenmiş olan parametreler şunlardır.

YSA Girdi Katmanı Parametreleri

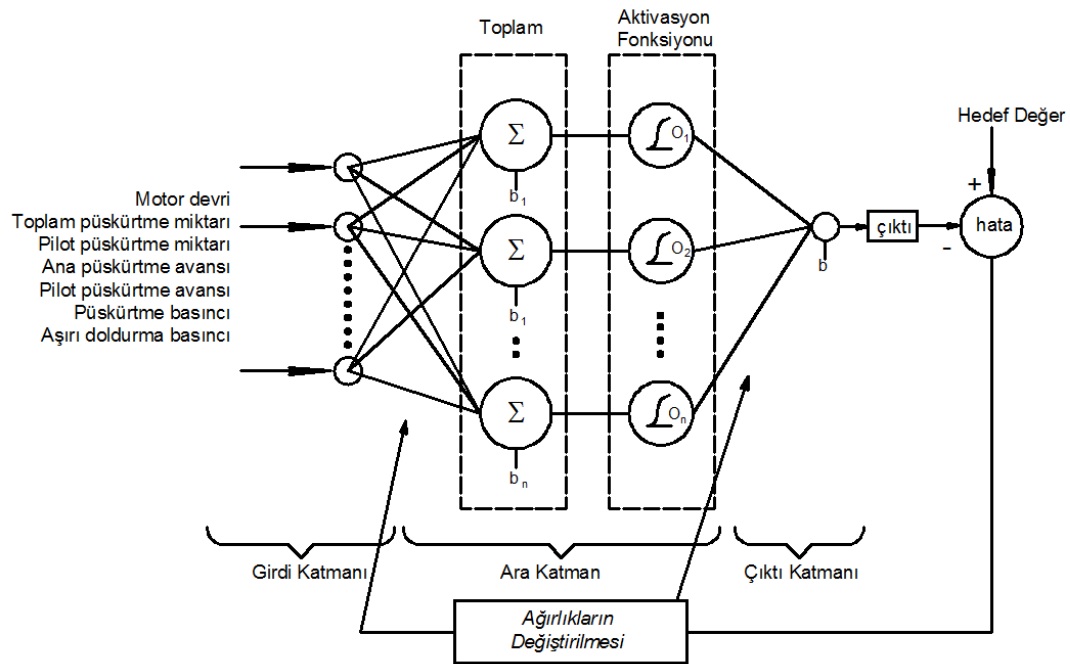
- 1) *Motor devri (d/d)(n)*
- 2) *Toplam püskürtme miktarı(mg/çev)(m_{top})*
- 3) *Pilot püskürtme miktarı (mg/çev) (m_{pil})*
- 4) *Ana püskürtme avansı (KMA°/çev) (av_{ap})*
- 5) *Pilot püskürtme avansı(KMA°/çev) (av_{pil})*
- 6) *Püskürtme Basıncı(MPa) (p_{püs})*
- 7) *Aşırı Doldurma Basıncı (hPa)(p_{man})*

YSA'dan Çıktı Olarak Alınan Parametreler ,Sıcaklık ve Basınç Değerleri

- 1) *Yanma kalibrasyon parametresi (PRM_{YNM})*
- 2) *Tutuşma gecikmesi parametresi (PRM_{TG})*
- 3) *Silindir kafa sıcaklığı (T_{KAF})*
- 4) *Silindir kovani alt ölü nokta sıcaklığı (T_{KOVIA})*
- 5) *Silindir kovani üst ölü nokta sıcaklığı (T_{KOV})*

- 6) Piston Sıcaklığı (T_{Pis})
- 7) Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi basıncı (T_{EGSA})
- 8) Egzoz supabı açıldığı anda silindir içi sıcaklığı (P_{GSA})
- 9) Egzoz manifoldu sıcaklığı (T_{EGMAN})
- 10) Egzoz manifoldu basıncı (P_{EGMAN})
- 11) Azot oksit emisyonu parametresi (PRM_{NOX})
- 12) Karbon monoksit emisyonu parametresi (PRM_{CO})
- 13) İS emisyonu parametresi (PRM_{IS})

2160 deney noktası için yeni parametreler, sıcaklık ve basınçlar belirlendikten sonra, bir sonraki bölümde belirtilen püskürtme modelinin yardımı ile her noktada istenen püskürtme stratejisinin püskürtme profili oluşturulmuş ve sisteme yüklenmiş ve simülasyon programı çalıştırılmıştır. Bir sonraki aşamada çıkan sonuçlar analiz ederek yorumlanmıştır.



Şekil 4. 8 Modelin yeni parametrelerini tahmin eden YSA yapısı

4.1.4 Yeni Deney Noktalarının YSA İle Simülasyonu

Bu aşamada bir önceki bölümde (4.1.3) belirlenmiş olan 2160 deney noktasındaki performans ve emisyon çıktılarının (tork,özgül yakıt sarfiyatı ve emisyonlar) sadece YSA yöntemi ile belirlenmesi yoluna gidilmiştir.

Motorun belirlenen işletme şartındaki çıktı parametrelerini simüle edebilmek için her bir çıktı için ayrı YSA'lar dizayn edilmiştir. Dizayn edilen YSA'ların girdi parametreleri, bir önceki bölümde belirtilmiş olan girdi parametreleri ile aynı seçilmiştir (*Motor devri, Toplam püskürtme miktarı, Pilot püskürtme miktarı, Ana püskürtme avansı ,Pilot püskürtme avansı ,Püskürtme Basıncı , Aşırı Doldurma Basıncı*).

Yapay sinir ağından çıktı olarak istenen performans ve emisyon parametre grubu ise şunlardır.

1. Motor Torku (N.m)
2. Özgül Yakıt Sarfiyatı (gr/kwh)
3. Azot oksit(NOx) emisyonları (gr/kw.h)
4. Karbonmonoksit Emisyonları (gr/kw.h)
5. İs Emisyonları (FSN)
6. Ortalama indike basınç (bar)
7. Ortalama efektif basınç (bar)

Deney verileri tek püskürtme stratejisi ve pilot püskürtmeli püskürtme stratejiler olarak iki ayrı faza yapay sinir ağlarına gösterilmiş ve her iki strateji içinde iki ayrı yapay sinir ağları oluşturulmuştur.

Yapay sinir ağlarının çözümlenmesinde MATLAB programının Yapay Sinir Ağları araç kutusundan[81] yararlanılmıştır. Deney sonuçlarını doğrulama ve denenmemiş noktaları tahmin edebilmek için literatürde bu tip uygulamalar için en çok tercih edilen yöntem olan çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) yöntemi kullanan bir yapay sinir ağı oluşturulmuş olup aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid fonksiyon kullanılmıştır. Dizayn edilen ağ nöron sayısının belirlenmesi göz önüne alındığında artan nöron sayısı ile birlikte ağın tahmin kabiliyetinin arttığı literatürdeki bilgilerden

bilinmektedir [32] . Bu durum göz önüne alınarak nöron sayısı başlangıç için 10 olarak seçilmiş, simülasyon hassasiyetinin artmadığı noktalarda nöron sayısını arttırılması yoluna gidilmiştir. Dizayn edilen ağların simülasyon kapasiteleri ve simüle ettiği değerler grafik olarak sonuçlar kısmında verilmiştir.

4.1.5 Sonuçların ve Kullanılmış Olan Yöntemin Yorumlanması

Son olarak deney düzeneğinde elde edilmiş veriler, tek boyutlu termodinamik modelden elde edilen veriler ve YSA'lerden elde edilen veriler birlikte değerlendirilerek grafik ortama aktarılmış ve sonuçlar literatürde göz önüne alınarak kullanılan yöntemlerin doğrulukları ve pilot püskürtmenin optimum kullanım şartları birlikte yorumlanmıştır.

4.2 ALT MODELLER

4.2.1 Enjektör Modeli

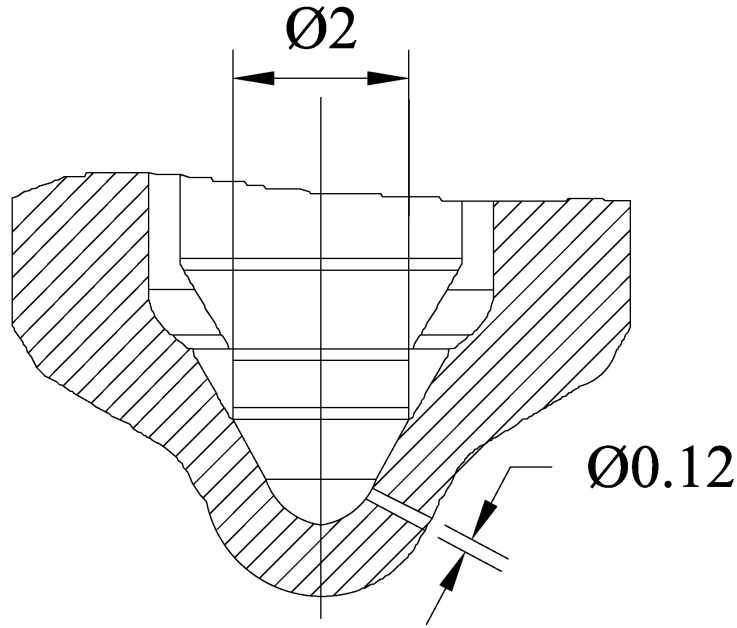
Gerçekleştirilmiş olan simülasyonda ihtiyaç duyulan en önemli verilerden birisi püskürtülen yakıtın krank açısına bağlı değişimini veren püskürtme oranıdır. Püskürtme oranı oluşturulmuş olan bir alt model ile ana modele entegre edilmiştir. Enjektör modelini oluşturabilmek için; enjektör iğnesinin kalkışını ve yeniden yerine oturduğunu tayin edebilmeye olanak sağlayan enjektör elektronik hattı üzerinde bağlı olan bir pens ampermetre sinyalinden ve enjektör meme geometrisinden yararlanılmıştır Hazırlanmış ve tüm çalışma boyunca kullanılmış olan bu modelin detayları aşağıda verilmiştir.

4.2.1.1 Enjektör Alt Modeli Çalışma Prensipleri

Deneylerde kullanılan enjektör Siemens VDO Automotive kuruluşu tarafından üretilmiş yüksek basınçlı selenoid bobin kontrollü dizel enjektörüdür. Teknik detayları tablo 4.10'da, enjektör memesinin teknik resmi ise Şekil 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4. 10 Enjektör Verileri

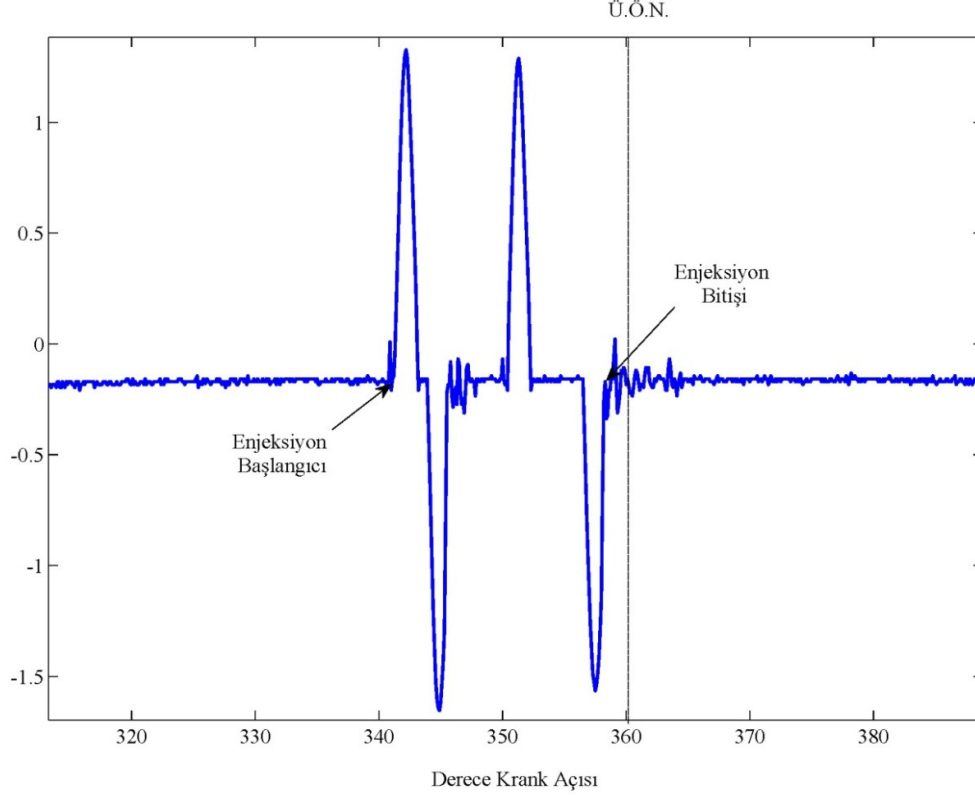
Üretici	Siemens VDO Automotive
Meme delik sayısı	7
Meme delik çapı "mm"	0,12
Maksimum iğne kalkış yüksekliği "mm"	0,25
Akış katsayısı C_d	0,79
Maksimum çalışma basıncı "Bar"	1600
Meme tipi	μ -Sac nozul
Maksimum meme sıcaklığı "°C"	290



Şekil 4. 9 Enjektör Memesinin Kesit Resmi

Silindir içerisine enjekte edilen yakıtı ölçmek amacıyla deney motorunun birinci enjektörünün üzerine indüktif etki ile sinyal üreten sensör yerleştirilmiştir. Şekil 4.6'de görülen örnek sinyal çıktısında, ilk artışın görüldüğü 340 °KA, ön püskürtmenin başladığı başka bir deyişle enjektör iğnesinin ilk hareket etmeye başladığı andır, bunu iğnenin yerine oturması olayını gösteren ters yönde bir gerilim artışı takip etmektedir. Ana püskürtmede silindir içerisine gönderilen yakıt miktarı daha fazla olduğu için iğne kalkışı ile iğnenin

yuvasına oturmasını gösteren ters yönlü pikler arasında yaklaşık 4°KA'na karşılık gelen bir açık kalma periyodu bulunmaktadır. Bu sinyal genişlikleri hem tek püskürtme hem de pilot püskürtme uygulanan stratejiler için tek tek incelenerek belirlenmişlerdir ve devir veya diğer işletme parametrelerine bağlı olarak değişip değişmedikleri tayin edilmiş ve modele dahil edilmişlerdir.



Şekil 4. 10 Enjektör üzerine bağlanmış olan sensordan alınan örnek sinyal.

Silindir içersine enjekte edilen yakıtın miktarının krank açısına bağlı olarak belirlenebilmesi için, sıkıştırılamaz akışlarda Bernoulli eşitliğinden faydalanılmıştır. Yakıt enjeksiyon sürecinin hesaplanmasında şu kabuller yapılmıştır:

- Akışkan yoğunluğu akış esnasında sabittir.
- Viskoz sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir.

Bernoulli denklemi

$$\frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (4.1)$$

Sürekli akış kütleli debisi

$$Q = \rho V A C d \quad (4.2)$$

Yakıtın memeden çıkış hızının hesaplanması

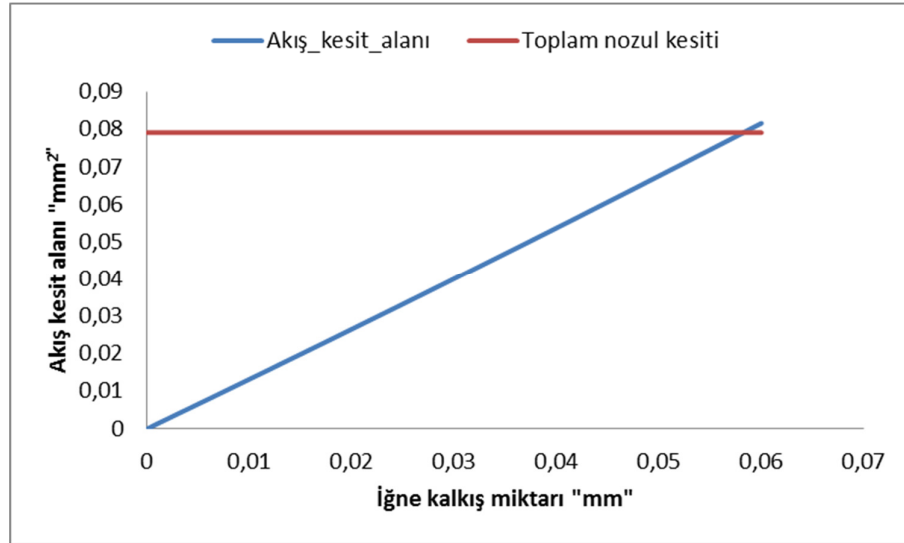
$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} \quad (4.3)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4.4)$$

Enjekte edilen yakıt miktarı mg/°KA cinsinden (4.5) formülünden elde edilmiştir.

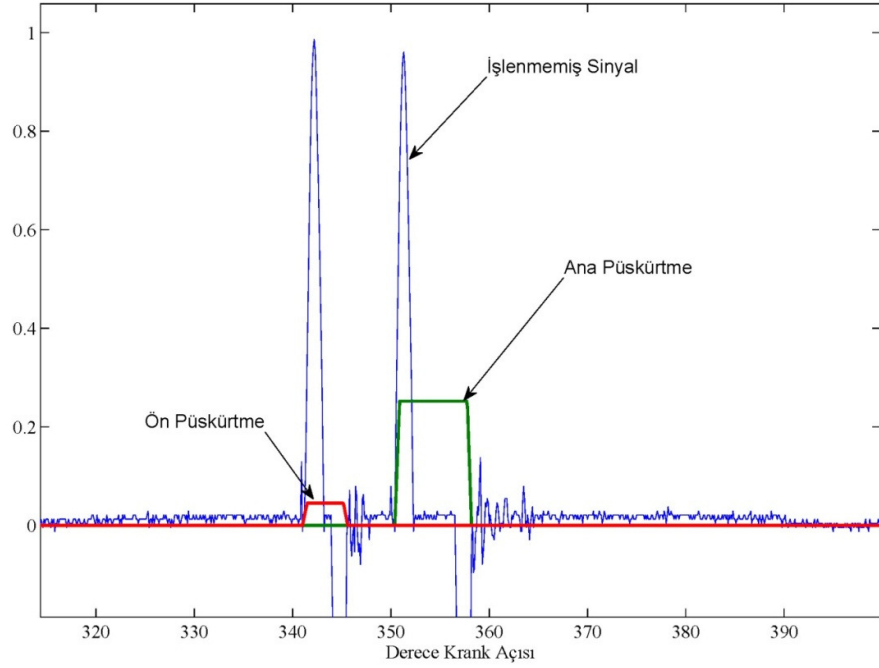
$$Q = \rho \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} A C d \frac{dt}{d\theta} \quad (4.5)$$

Enjektör kalkışı esnasında akışkanın aktığı kesitin değişimi, enjektör geometrisinden faydalanarak hesaplanmıştır ve şekil 4.7de görülmektedir. İğne kalkışı esnasında iğne ile meme arasında kalan kesit alanı, şekilden anlaşılabileceği üzere belirli kalkış miktarına kadar meme üzerindeki deliklerin toplam alanından küçük kalmaktadır. Bu durum enjekte edilen akışkan miktarını sınırlamaktadır. Yakıt miktarı modellenirken akışkanın geçtiği kesit alanının iğne kalkışına göre değişimi de göz önüne alınmıştır. Bu sayede hem açılma ve kapanma süresi hem de bu süreye bağlı olarak değişen kesit alanı modele dahil edilmiştir.



Şekil 4. 11 İğne kalkışına bağlı kesit alanının değişimi

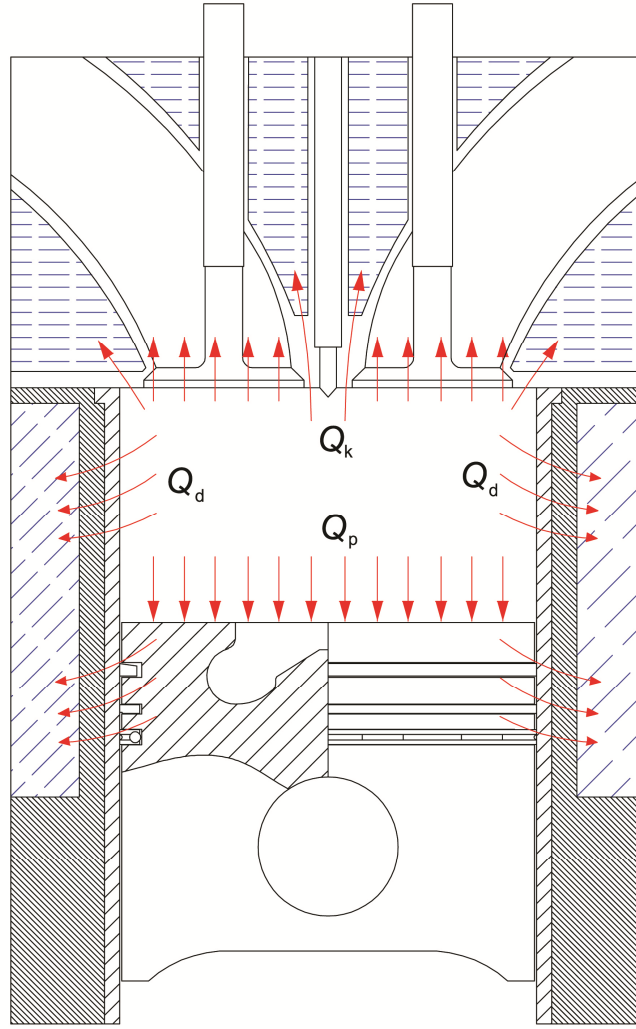
Şekil 4.8'de ham sinyal ve modellenen yakıt enjeksiyonu eğrileri aynı eksen takımında gösterilmiştir.



Şekil 4. 12 Enjeksiyon sinyali ve model çıktısı püskürtme oranının aynı şekilde gösterimi

4.2.2 Silindir İçi Parçaların Sıcaklık Modeli

Gerçekleştirilmiş olan Boost programı simülasyonlarında ihtiyaç duyulan önemli verilerden birisi de yanan iş dolgusu ile direk temasta olan motor parçalarının sıcaklıklarıdır. Boost programı bu verilerin belirli bir yaklaşımla sisteme girilmesini ön görmektedir. Program daha sonra daha önceden seçilmiş olan ısı transfer modeline göre bu sıcaklıkları kullanarak ısı transferi hesaplarını gerçekleştirmektedir. Gerekli olan sıcaklıklar ; piston ortalama sıcaklığı (T_{pis}) , silindir duvarı üst ölü nokta yüzey sıcaklığı (T_{kovi}), silindir duvarı alt ölü nokta yüzey sıcaklığı (T_{kovia}), silindir kafası ortalama sıcaklığı (T_{kafy}) dır. Bu sıcaklıklar belirli kabuller yapılarak aşağıdaki gibi hesaplanmışlardır.



Şekil 4. 13 Silindir içerisindeki ısı akışının gösterimi

Parçaların sıcaklıkları hesaplanırken , silindir içerisinden dışarıya doğru akan ısıanın ana olarak 3 kısım halinde sistemden parçalara doğru aktığı kabul edilmiştir. *(Silindir içerisinde dolgu ile direk temas halinde olan parçaların hesabı yapılacağından egzoz sıcaklığı burada gösterilmemiştir).* Bu akış şu şekilde sınıflandırılmıştır;

Q_d : silindir içerisinden silindir duvarına doğru akan ısı.

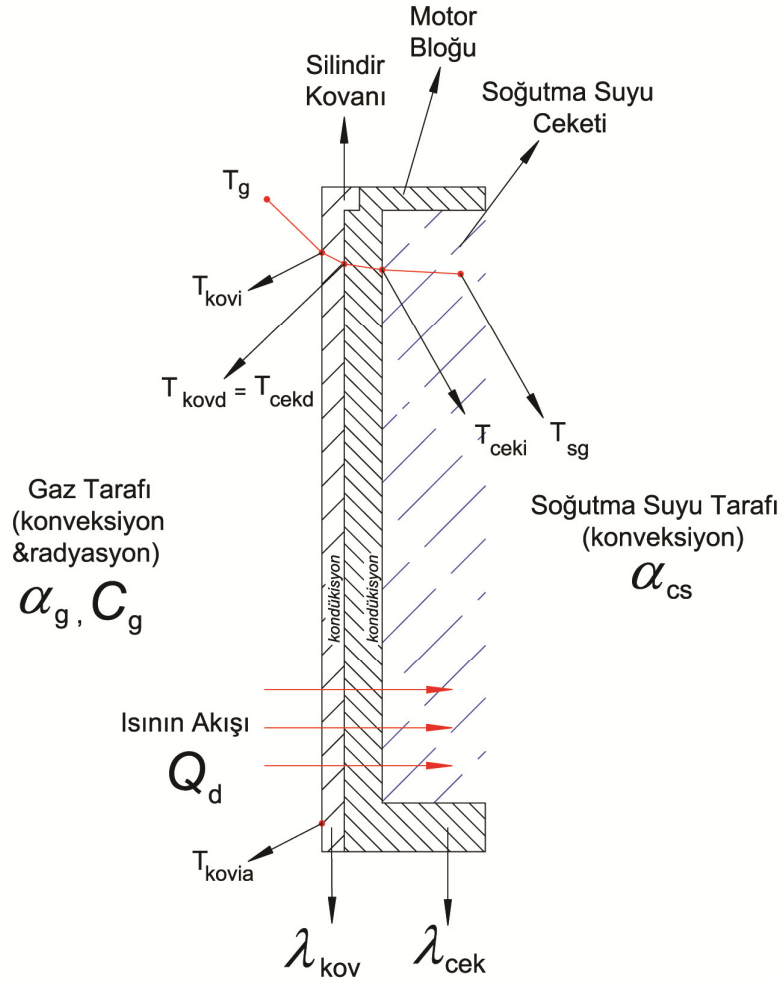
Q_p : silindir içerisinden pistona doğru akan ısı.

Q_k : silindir içerisinden silindir kafasına doğru akan ısı.

Bu ısı akışı vasıtasıyla bu parçaların sıcaklıkları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

4.2.2.1 Silindir Duvarı Sıcaklığının Hesaplanması

Silindir duvarındaki ısı akışının şematik modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 14 Silindir içerisindeki ısı akışının gösterimi

Bu modeli ana olarak 4 aşamada incelemek mümkündür.

- İş dolgusundan silindir duvarına ısı transferi: *konveksiyon ve ısıtım ile*
- Silindir duvarından silindir bloğuna ısı transferi: *kondüksiyon ile*
- Silindir bloğundan soğutucu kanalı çeperine ısı transferi: *kondüksiyon ile*
- Soğutucu kanalın iç çeperinden soğutucu akışkana ısı transferi: *konveksiyon ile*

Silindir duvarı sıcaklığı hesaplanırken yapılmış olan kabuller şu şekildedir;

- i) Isı akışının her yönde kararlı olduğu kabul edilmiştir.
- ii) Soğutma kanalı iç çeperi, soğutucu akışkan arası konveksiyon ısı transfer katsayısı: $\alpha_{cs} = 3000 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- iii) Silindir bloğu/su ceket malzemesinin kondüksiyon ısı iletim katsayısı : $\lambda_{cek} = 150 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- iv) Silindir kovanı malzemesi kondüksiyon ısı iletim katsayısı : $\lambda_{kov} = 50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- v) Silindir kovanı kalınlığı: $S_{kov} = 3 \text{ mm}$
- vi) Su ceket kalınlığı: $S_{cek} = 5 \text{ mm}$
- vii) Birim yüzeydeki ısı transferi hesaplanırken, her bir silindirin üst yüzey alanının % 50 sinin soğutma suyu ile temas ettiği varsayılmıştır.
- viii) Silindir duvarı alt ölü nokta sıcaklığının, silindir duvarı üst yüzey sıcaklığından yaklaşık $\sim 30^\circ\text{C}$ az olduğu kabulü yapılmıştır.
- ix) Silindir bloğu su ceket ile silindir kovanı arasındaki iç yüzey direnci ihmal edilmiştir.
- x) Su ceket dış sıcaklığı ile silindir kovanı dış sıcaklığı temas ettikleri her noktada birbirine eşit kabul edilmişlerdir.

İlgili kabuller Siteki'nin referans kitabı [82] dikkate alınarak yapılmıştır.

Soğutma suyunun motora silindir bloğuna giriş ve çıkış sıcaklıkları ile birlikte soğutma suyu debisi bilindiğinden soğutma suyuna transfer olan toplam ısı miktarı hesaplanabilmektedir.

$$Q_{ss} = m_{ss} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (4.6)$$

Q_{ss} : Soğutma suyuna transfer olan ısı miktarı

m_{ss} : Soğutma suyu debisi.

c_p :Suyun özgül ısınma ısı

Δt : Soğutma suyunun motor bloğu çıkışı ve girişi arasındaki sıcaklık farkı.

Bu ısı akışının kararlı olduğu kabulü ile birim yüzey alanından soğutma suyuna transfer olan ısı miktarı hesaplanmak istenirse;

$$A_{top} = A_{kov} + A_{kaf} \quad (4.7)$$

A_{top} : Soğutma suyu ile temas eden toplam yüzey alanı. (4 silindir için)

A_{kov} : Silindir kovanında soğutma suyu ile temas eden toplam yüzey alanı. (4 silindir için)

A_{kaf} : Silindir kafasında soğutma suyu ile temas eden yüzey alanı. (4 silindir için - Her bir silindir için iş dolgusu ile temas eden dairesel yüzeyin 50% sinin direk olarak soğutma suyu ile temas ettiği kabul edilmiştir.)

$$A_{kov} = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot S \cdot 4 \quad (4.8)$$

$$A_{kaf} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot 4 \cdot 0.5 \quad (4.9)$$

D:Silindir çapı

S:Piston stroku

Denklem (4.6-4.9) göz önüne alındığında; birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarı

$$q = Q/A \quad (4.10)$$

olacaktır.

q: birim yüzey alanından transfer olan ısı miktarı

Soğutma suyunun ilk andaki (motor bloğuna giriş) sıcaklığı, son sıcaklığı(motor bloğundan çıkış) ve debisi bilindiğinden, bu sıcaklık artışını sağlayabilecek olan su ceket i iç yüzey sıcaklığı (A noktasındaki sıcaklık) ısı transfer denkleminde şu şekilde hesaplanabilir;

$$q = \frac{T_{ceki} - T_{sg}}{\alpha_{cs}} \quad (4.11)$$

T_{ceki} : Su ceket i iç sıcaklığı

T_{sg} :Soğutma suyu giriş sıcaklığı

Denklem (4.11) düzenlenirse;

$$T_{ceki} = q \cdot \alpha_{cs} + T_{sg} \quad (4.12)$$

halini alır.

Su ceket i iç yüzey sıcaklığı bilindiğinden, ceket dış yüzey sıcaklığı silindirik duvarlarda kondüksiyonla ısı iletim prensipleri doğrultusunda şu şekilde hesaplanabilir.

$$q = \frac{T_{cekd} - T_{ceki}}{\frac{r_{ceki} \cdot \ln \frac{r_{ceki}}{r_{cekd}}}{\lambda_{cek}}} \quad (4.13)$$

Denklem (4.13) düzenlenirse

$$T_{cekd} = q \cdot \frac{r_{ceki} \cdot \ln \frac{r_{ceki}}{r_{cekd}}}{\lambda_{cek}} + T_{ceki} \quad (4.14)$$

T_{cekd} : Su ceket i dış sıcaklığı

T_{cekd} ile silindir kovanı dış sıcaklığı (T_{kovd}) birbirine eşit kabul edilmiş ve yüzey direnci ihmal edilmiştir. " $T_{cekd} = T_{kovd}$ " dir. Su ceket i dış sıcaklığı hesaplandığından silindir kovanı dış sıcaklığı biliniyordur ve su ceketinde olduğu gibi silindir kovanı içinde kondüksiyon ile silindirik duvarda ısı iletim mekanizması denklemleri uygulanır ise ;

$$q = \frac{T_{kovi} - T_{kovd}}{\frac{r_{kovd} \cdot \ln \frac{r_{kovd}}{r_{kovi}}}{\lambda_{kov}}} \quad (4.15)$$

Denklem (4.15) düzenlenirse

$$T_{kovi} = q \cdot \frac{r_{kovd} \cdot \ln \frac{r_{kovd}}{r_{kovi}}}{\lambda_{kov}} + T_{kovd} \quad (4.16)$$

T_{kovi} : Silindir kovanı iç sıcaklığı

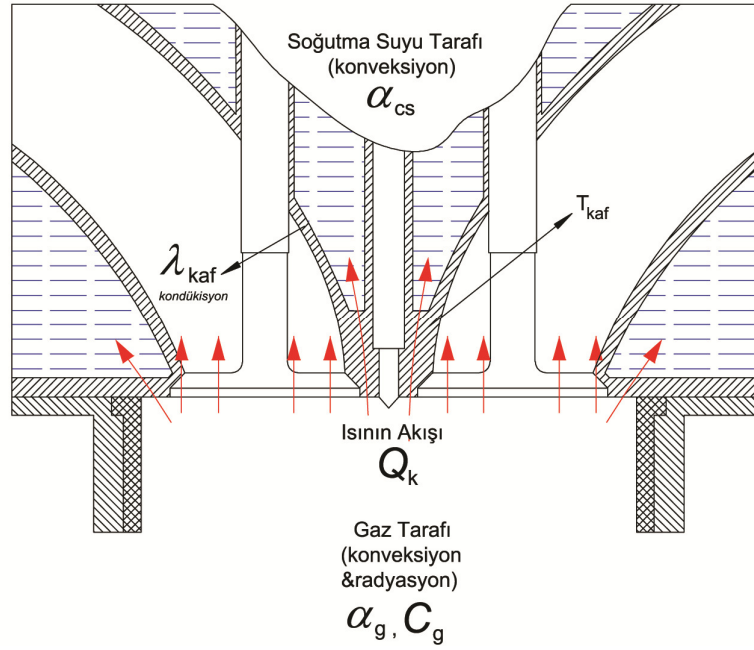
T_{kovd} : Silindir kovanı dış sıcaklığı

Hesaplanmış olan T_{kovi} silindir kovanı iç yüzeyinin üst ölü noktadaki (ÜÖN) sıcaklığı olarak kabul edilmiş ve silindir kovanının alt ölü noktadaki (AÖN) sıcaklığının ÜÖN' daki sıcaklığa göre ~ 30 °C derece az olduğu ($T_{kovia} = T_{kovi} - 30$) kabulü yapılmıştır.

T_{kovia} : Silindir kovanı sıcaklığı (AÖN)

4.2.2.2 Silindir Kafası Sıcaklığının Hesaplanması

Silindir kafasındaki ısı akışının şematik modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 15 Silindir kafasına olan ısı akışının gösterimi

Silindir duvarı sıcaklığı hesaplanırken yapılmış olan kabuller şu şekildedir;

- Isı akışının her yönde kararlı olduğu kabul edilmiştir.
- Silindir kafası cidarının su ile temas eden yüzeylerinin ortalama ~10 mm kalınlıkta olduğu kabul edilmiştir.
- Soğutma kanalı iç çeperi, soğutucu akışkan arası konveksiyon ısı transfer katsayısı: $\alpha_{cs} = 3000 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$
- Birim yüzeydeki ısı transferi hesaplanırken , her bir silindirin üst yüzey alanının % 50 sinin soğutma suyu ile temas ettiği varsayılmıştır.
- Silindir kovani malzemesi kondüksiyon ısı iletim katsayısı : $\lambda_{kaf} = 150 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$

Silindir kafasındaki soğutma suyunun ilk (T_{sg}) ve son (T_{sc}) sıcaklıkları ve soğutma suyu debisi bilindiğinden bu sıcaklık artışını sağlayan silindir kafasındaki su kanalı iç yüzey sıcaklığı ($T_{kafi} = T_{ceki}$) soğutma ceketinin iç yüzeyi sıcaklığı T_{ceki} ile aynı olacaktır. Silindir kafası ortalama kalınlığı bilindiğinden düz duvardaki kondüksiyon mekanizması denklemleri

kullanılarak silindir kafasının yanma odası tarafındaki yüzeyin sıcaklığı şu şekilde hesaplanabilir;

$$q = \frac{T_{kafi} - T_{kafy}}{\frac{S_{kaf}}{\lambda_{kaf}}} \quad (4.17)$$

T_{kafi} : Silindir kafası iç sıcaklığı (su kanalı tarafı)

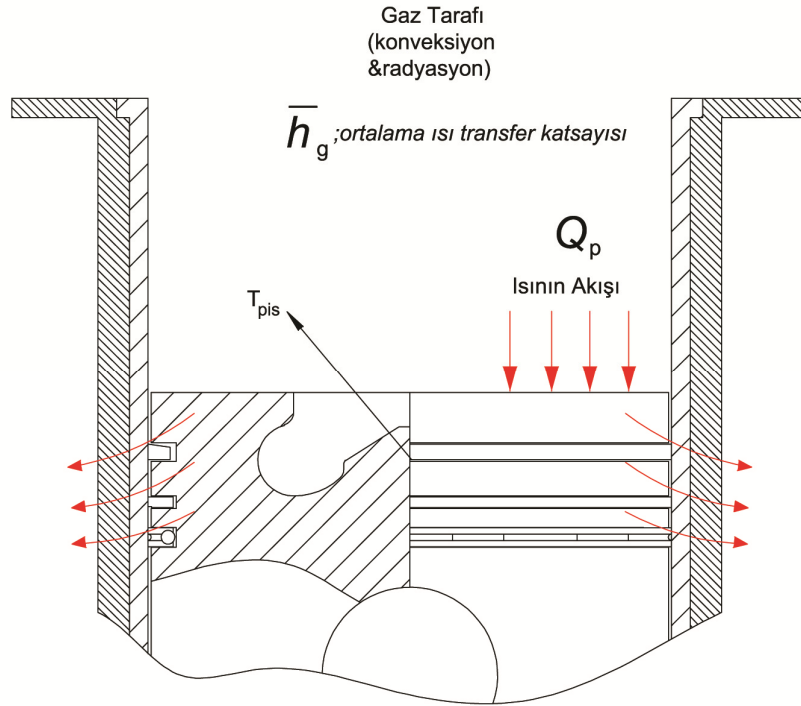
T_{kafy} : Silindir kafası yanma odası tarafı yüzey sıcaklığı

Denklem (4.17) düzenlenirse ortalama T_{kafy} şu şekilde ifade edilebilir;

$$T_{kafy} = q \cdot \frac{S_{kaf}}{\lambda_{kaf}} + T_{kafi} \quad (4.18)$$

4.2.2.3 Piston Ortalama Sıcaklığının Hesaplanması

Yanma odasındaki iş dolgusundan piston üst yüzeyine ısı akışının şematik modeli aşağıdaki gibidir.



Şekil 4. 16 Pistona olan ısı akışının gösterimi

Silindir duvarı sıcaklığı hesaplanırken yapılmış olan kabuller şu şekildedir;

- i) Isı akışının kararlı olduğu kabul edilmiştir.
- ii) Piston ortalama sıcaklığı piston merkezinde termal gerilmeyi yaratacak olan yüksek ve düşük sıcaklığın ortalaması olarak kabul edilmiştir.
- iii) Piston malzemesi kondüksiyon ısı iletim katsayısı : $\lambda_{kaf}= 150 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ dir.
- iv) Dolgudan pistonu ısı transferinde, ayrı ayrı bir konveksiyon katsayısı ve radyasyon katsayısı hesaplanmamıştır. Ortalama ısı transfer katsayısı kabulü yapılmıştır. Kabul edilen ortalama ısı transfer katsayısı $h_g= 240 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ dir.
- v) Piston üzerinden transfer olan ısı miktarı $Q_p=2000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmiş ve hesaplar bu şekilde yapılmıştır.
- vi) Piston sıcaklığının sadece devre bağlı olarak değiştiği kabul edilmiş olup, her bir motor devri için işletme şartlarına bakılmaksızın tek bir ortalama piston sıcaklığı kabulü yapılmıştır.
- vii) Belirli bir motor hızına ait olan ortalama sıcaklık; o devir şartında gerçekleşmiş olan tüm deney noktalarındaki ayrı ayrı ortalama silindir içi sıcaklıkların aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.
- viii) Tekil olarak, silindir ortalama sıcaklığı; ana püskürtme başladığı andan itibaren takip eden 100 °KMA boyunca silindir içi sıcaklığın aritmetik ortalaması olarak kabul edilmiştir.
- ix) Ortalama piston üst yüzey et kalınlığı 23 mm dir.
- x) Boyutsuz Biot sayısı $Bi=0,1$ dir.
- xi) Bağlı koordinat $\eta_2=0,9$ (Piston eteğine bağlı)
- xii) Bağlı koordinat $\eta_1=0,7$ (Piston eteğine bağlı)

İlgili kabuller [82] , [83] doğrultusunda yapılmıştır. Bu kabuller ile piston yüzeyi ve piston merkezi sıcaklıkları şu şekilde hesaplanabilir;

- piston üst yüzey merkezinde

$$T_{pisy m} = T_g - \frac{Q_{pis}}{A_{pis}} \cdot \left[\frac{1}{\bar{h}_g} + \frac{D}{\lambda} \Psi \right] \quad (4.19)$$

$T_{pisy m}$: Piston yüzey merkez sıcaklığı

T_g : Ortalama gaz sıcaklığı

Q_{pis} : Piston üzerinden transfer olan ısı miktarı

A_{pis} : Piston yüzey alanı

Ψ : boyutsuz sayı =0,05 (*Bi sayısı, piston üst yüzey et kalınlığı ve piston çapı yardımı ve bağıl koordinatlar η_2 ve η_1 yardımı ile belirlenir*)

-piston merkezinde

$$T_{pisc} = T_g - \frac{Q_{pis}}{A_{pis}} \cdot \left[\frac{1}{\bar{h}_g} + \frac{S}{\lambda} \cdot \xi + \frac{D}{\lambda} \Psi_c \right] \quad (4.20)$$

ξ : Boyutsuz sayı (h =piston cidar kalınlığı, x =piston üst yüzeyinden itibaren mesafe ; olmak üzere [$\xi=x/h$] dir. Piston merkezi için $\xi=1$ dir)

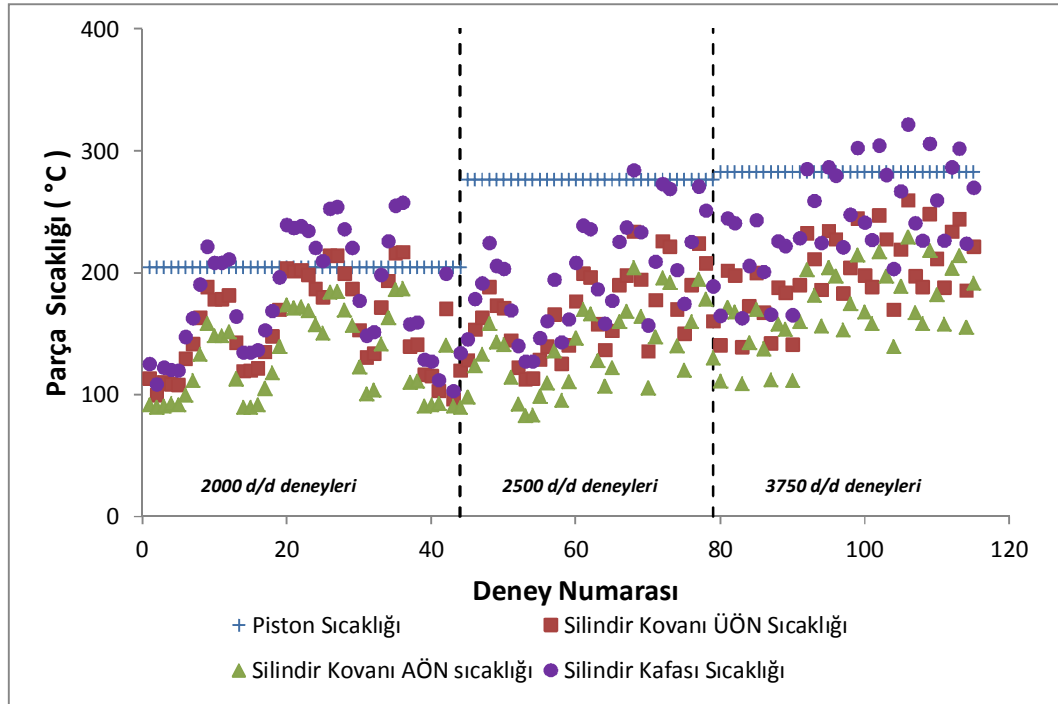
Ψ_c : boyutuzuz sayı=0,2 (*Bi sayısı, piston üst yüzey et kalınlığı ve piston çapı yardımı ve bağıl koordinatlar η_2 ve η_1 yardımı ile belirlenir*)

Denklem (4.19) ve (4.20) nin hesaplanan sonuçları ile piston sıcaklığı;

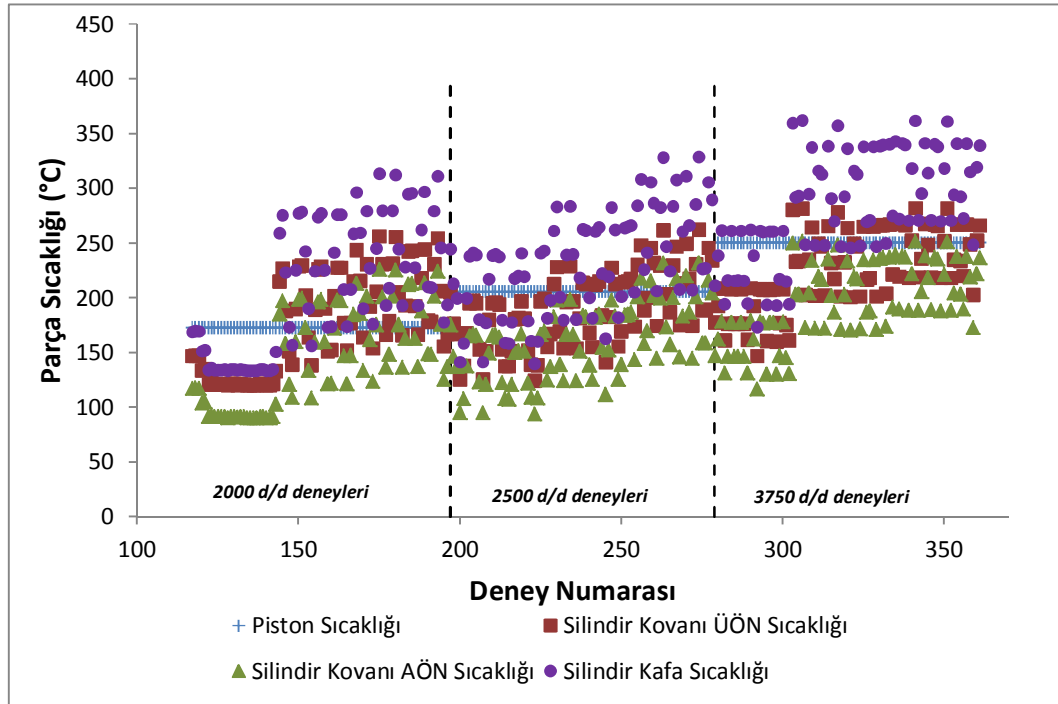
$$T_{pis} = (T_{pisy m} + T_{pisc})/2 \quad (4.21)$$

Şeklinde olur.

Hesaplanan piston sıcaklıklarındaki dalgalanmaların çok büyük olmasından dolayı, piston sıcaklıkları her bir devir verisi için ortalaması alınarak kullanılmışlardır.



Şekil 4. 17 Tek püskürtme stratejisi deneyleri için hesaplanmış parçacık sıcaklıkları



Şekil 4. 18 Pilot püskürtme stratejisi deneyleri için hesaplanmış parçacık sıcaklıkları

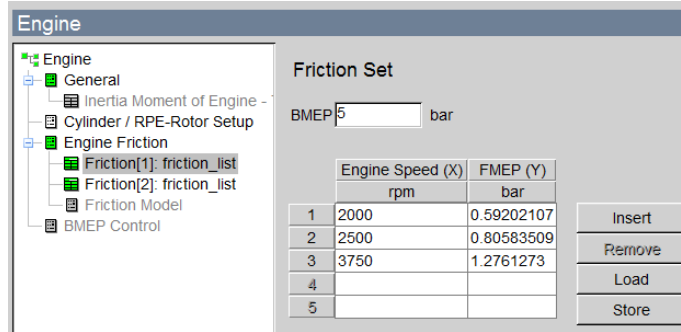
4.2.3 Sürtünme Modeli

BOOST programında simülasyonlar gerçekleştirilirken girilmesi gereken verilerden birisi de motorun sürtünme değerleridir. Bu değerler programa direk olarak tablo şeklinde girilebileceği gibi program içerisinde mevcut olan modeller vasıtasıyla da hesaplamak mümkündür.

Yapmış olduğumuz deneylerde basınç verisi elimizde olduğundan bu basınç verisi üzerinden silindir içi ortalama indike basınçları (OİB) hesaplamak mümkündür. Aynı şekilde deneyler sonucunda dinamometre milindeki fren torku (FTORK) ve fren gücü (FGÜÇ) de da bilindiğinden bu verilerden hareketle ortalama efektif basınçların (OEB) hesaplanması mümkündür. OEB hesaplandıktan sonra, OİB’de bilindiğinden; sürtünme ortalama efektif basıncı (SOB)

$$SOB = OİB - OEB \quad (4.22)$$

şeklinde hesaplanabilir. Yapılmış olan 361 deney noktası için sürtünme ortalama efektif basınçları hesaplanabildiğinden; modele tablo vasıtası ile sürtünme değerlerinin girişi seçilmiştir.

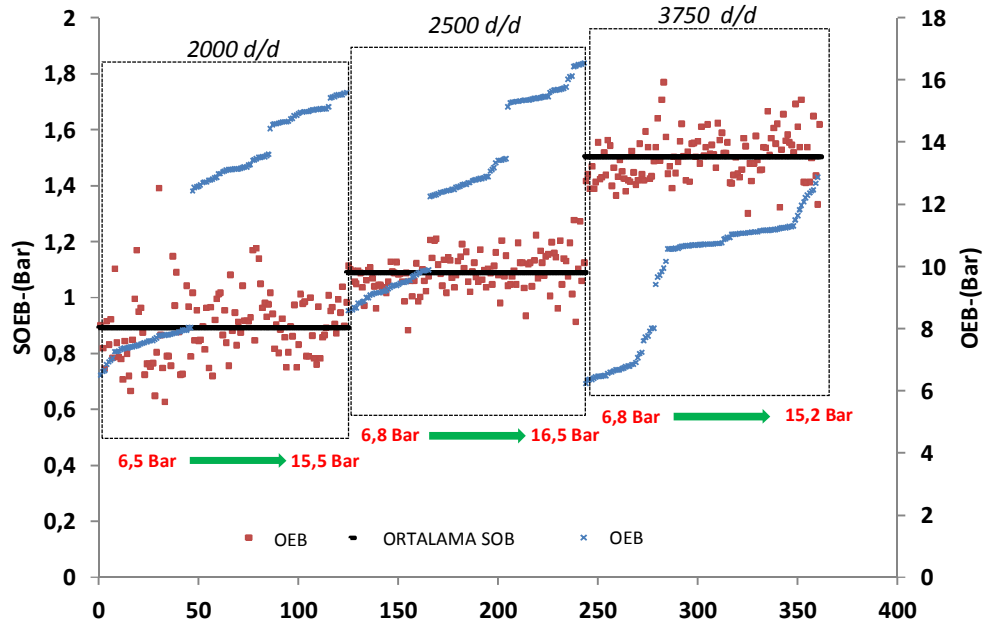


Şekil 4. 19 Boost programı sürtünme ortalama efektif basınç girişi

BOOST programına sürtünme verilerinin giriş ekranı Şekil 4.13 de görülmektedir. Programa bir alt ve bir üst sınır motor OEB (Brake Mean Effective Pressure - BMEP) şartı tanımlanması gerekmektedir. Tanımlanmış olan bu OEB sınırlarında motorun çalışma devirlerinde elde edilmiş olan SOB değerlerinin devre bağlı olarak girilmesi gerekmektedir. Program ara değerlerin hepsini lineer interpolasyon yolu ile kendi belirlemektedir. Bu değerleri belirleyebilmek açısından elde edilmiş olan tüm SOEB

değerleri dere bağı olarak bir araya getirilerek motorun sürtünme genel karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Aşağıdaki 4.14 no'lu grafikte deneyler devir aralıklarına göre gruplanmışlar ve , bu gruplarda artan OEB değerlerine göre kendi içlerinde yeniden düzenlenmişler ve ilgili noktadaki SOB değerleri de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4. 20 Deneylerde elde edilmiş olan SOB değerleri

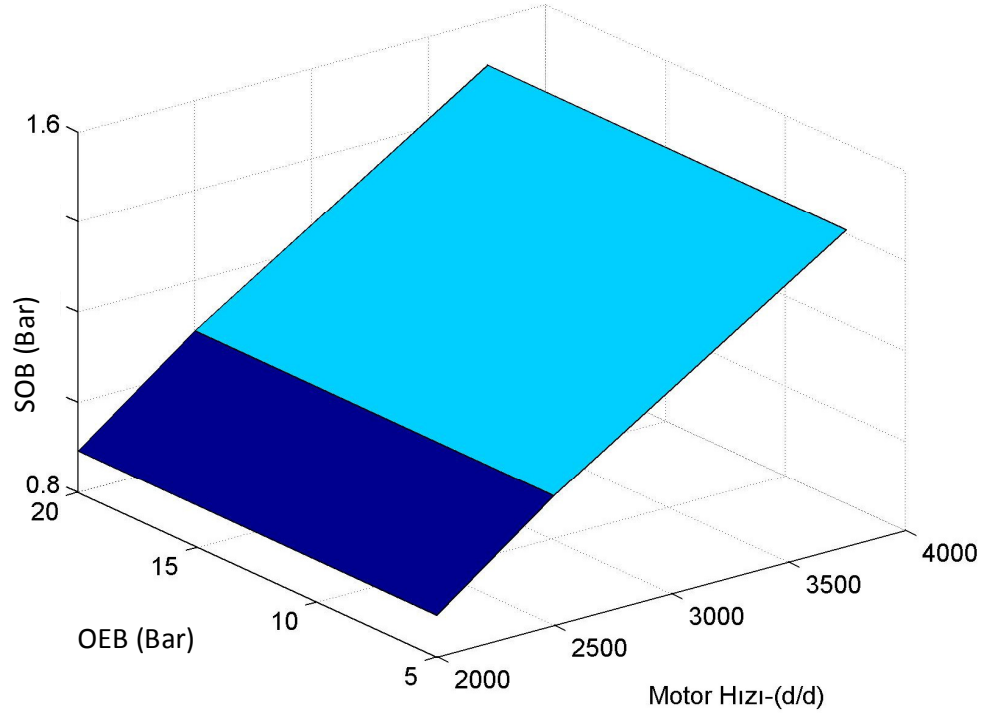
Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi SOB daha çok devre bağı olarak değişmekte olup, OEB'ye bağı olarak daha az değişkenlik göstermektedir. BOOST programına giriş amacı ile iki işletme şartı (en düşük OEB ve en yüksek OEB) için tanımlanacak devir bantlarındaki SOB'lerin tabloda ortalama olarak tanımlanması gerekmektedir. Her üç devir şartı için ortalama SOB'ler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

2000 d/d = 0,89316 Bar

2500 d/d = 1,08892 Bar

3750 d/d = 1,50231 Bar

Elde edilen veriler seçilmiş olan bir minimum OEB (5 Bar) bir maksimum OEB (20 Bar için) sisteme girilmiştir. Boost programı bu iki motor işletme şartları arasındaki



Şekil 4. 21 BOOST programı SOB lineer interpolasyonu 3 boyutlu görüntüsü

tüm şartlar için, motor SOB'sine bağımlı olmaksızın sadece devre bağılı olarak lineer interpolasyon gerçekleştirmektedir. Bu algoritma neticesinde kabul edilmiş olan SOB haritasının 3 boyutlu görüntüsü Şekil 4.15'te verilmiştir.

DENEY EKİPMANLARI, DENEYLERİN YAPILIŞI, YAKIT ÖZELLİKLERİ VE YAPILMIŞ OLAN DENEYLERİN GRUPLANMASI

Doktora Tez çalışmamın kapsamı doğrultusunda, doğrulanmış bir model elde edebilmek için gerekli olan deneyler Ford Otosan AŞ. Gölcük tesislerinde bulunan motor test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Deney motoru ve deney esnasında kullanılan dinamometre ve ölçüm ekipmanlarının özellikleri ve deneylerin nasıl gerçekleştirildiği aşağıda verilmektedir.

5.1 Deney Motoru , Deney Ölçüm Elemanları , Veri Toplama Ve Deney Otomasyon Yazılımları

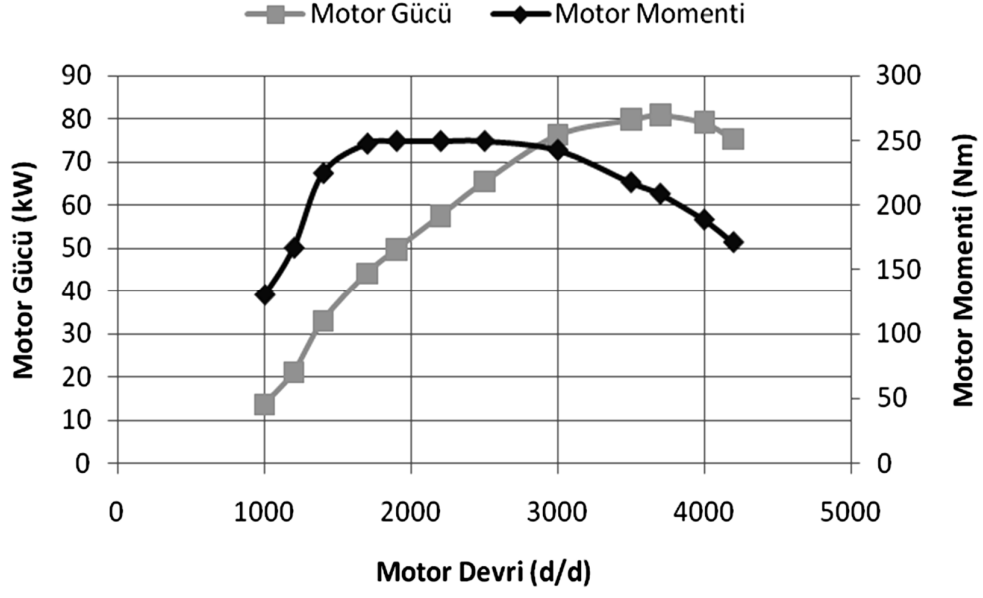
5.1.1 Deney Motoru

Çalışmada 4 stroklu, 4 silindirli, 1.8 litre silindir hacmine sahip, değişken geometrili turbo (VGT) ve EGR sistemine sahip bir binek araç diesel motoru kullanılmıştır. Motor'un standart kalibrasyonunda maksimum torku olan 250 Nm değerini 1700-2500 d/d motor devirleri arasında sağlamaktadır. Motorun yakıt püskürtme sistemi Siemens firması tarafından üretilmiş olan bir ortak hat yakıt püskürtme sistemidir. Motorun teknik özellikleri Çizelge 5.1'de, motorun karakteristik güç ve moment grafiği Şekil 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Özellik	Değer/Model
Tipi	Ford 1.8 LynxTDCI 110 PS VNT cDPF in
Silindir hacmi (cm ³)	1753
Silindir sayısı (adet)	4
Silindir çapı (mm)	82.5
Strok (mm)	82
Kompresyon oranı	18.5:1
Motor devri (dev/dak)	3750
Motor gücü (kW)	81
Maksimum Tork (Nm)	250 Nm @ 1700-2500 d/dak
Püskürtme Sistemi	Ortak Hatlı Yüksek Basınç Sistemi (Siemens)
Supap Adedi	16
Motorun Ataleti (kgm ²)	0.2168
Maks.Silindir İçi Basınç (bar)	150
Maks. Turbo Giriş Sıcaklığı (°C)	800
Maks. Turbo Sonrası Sıcaklık (°C)	705
Maks. Turbo Devri (d/d)	226000
Soğutucu Akışkan (l/s)	2.3 l/s@4500 d/d 0,6 l/s@rölanti
Emme Valf Açıklığı(mm)	0,35 ± 0,065
Egzos Valf Açıklığı(mm)	0,50 ± 0,065
Enjektör Sıkma Torkları (Nm)	36,5 ± 3,5
Enjektör	Siemens,7 delikli mikrosac
Enjektör pul kalınlığı(mm)	2,0 mm
Yüksek basınç boruları (mm)	3 x 187 l
Yüksek basınç pompası	4M5Q-9B395-AD
Turboşarj	Garret GT17 VGT
Rölanti Devri (d/d)	850
Maks. Yüksüz Devri (d/d)	4800

Deney motorunun araç üzerinde mevcut durumda bulunan fabrika çıkışı kalibrasyonu ile elde edilmiş olan tam yükte güç ve moment eğrileri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 5. 1 Deney Motorunun Tam Yükteki Moment ve Güç Eğrileri

5.1.2 Dinamometre

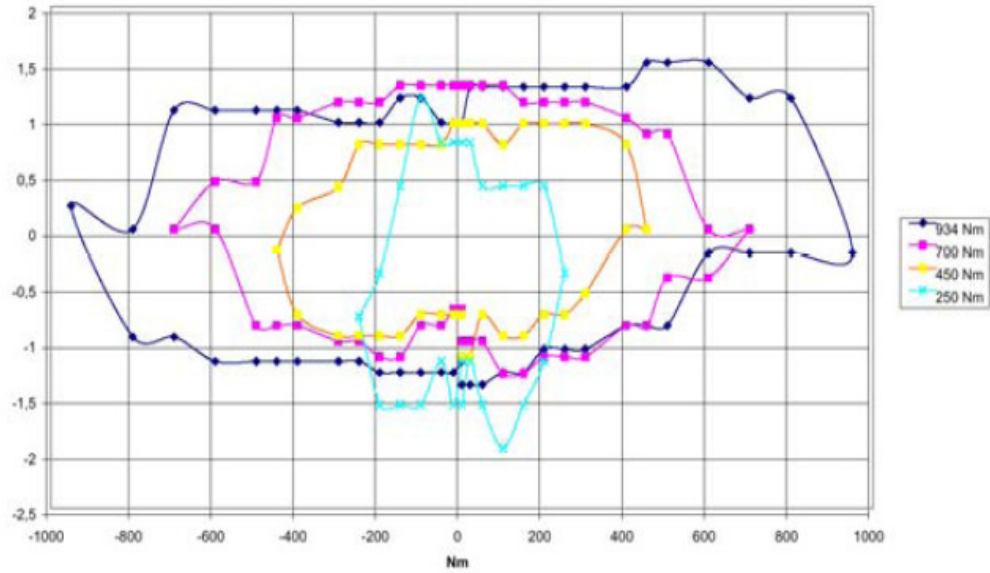
Gerçekleştirilmiş olan deneylerde kullanılan dinamometrenin tipi AVL DynoExact APA 204/8 dir. İlgili dinamometrenin özellikleri ve ölçüm hassasiyeti aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. 2 Deneylerde kullanılmış olan AVL APA 204/8 Dinamometresi

Çizelge 5. 2 AVL APA 204/8 Dinamometresi özellikleri

Özellik	Değer/Model
Tipi	AVL DynoExactAPa 204/8
Moment	934 Nm @ 0-4000 dev/dak
Güç	220 kW (295hp)@4000-9000 d/d
Frenleyici Tipi	Asenkron
Kontrol Şekli	Aktif-Pasif
Bölge Sayısı	4
Voltaj Devresi	IGBT
Tork Hesabı	1kHz-4kHz
Tork Tepkisi	<3ms
Harmonikler	<4,5%
Koruma Sınıfı	IP 23
Soğutma Tipi	Fanlı-Cebri
Yatak Sıcaklığı Ölçüm Tipi	PT100
İç Sıcaklık ölçüm Tipi	PTC Rezistör
Hız Ölçümü	1024 Pulse /Optik Enkoder
Çalışma Sıcaklık Aralığı	+5 /+40 °C
Çalışma Nem Aralığı	max.95% (yoğunlaşmamış)
Aşırı Yükleme Kapasitesi	25% (15 dak.da 1 dak.)
Yük hücresi <i>(Tork Ölçümü için)</i> Sıcaklık Kayması - Hassasiyette - Sıfır noktasında	C3 sınıfı <0,008 % <0,012 5%
Toplam Sistem Hassasiyeti	0,3 %FS



Şekil 5. 3 Deneylerde kullanılmış olan AVL APA 204/8 Dinamometresinin Güç bantlarına göre % hassasiyet eğrileri .

5.1.3 Yakıt Sarfiyatı Ölçümü

Deneyler esnasında yakıt sarfiyatı Coriolis prensibi ile yakıt sarfiyatı ölçümü yapan AVL 735S yakıt sarfiyat ölçüm cihazı kullanılmıştır. İlgili cihazın özellikleri ve ölçüm hassasiyeti aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5. 3 AVL 735S Yakıt Sarfiyatı Ölçüm Cihazı özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm aralığı	0...125 kg/h
Çalışma Nem Aralığı	$\leq \%80 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\leq \%50 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Sistematik ölçüm hassasiyeti	$U_s=0,12\%$
Ölçüm Tipi	Coriolis /Kütlesel Akış
Çalışma Sıcaklığı	5...55 $^{\circ}\text{C}$

Çizelge 5.3 AVL 735S Yakıt Sarfiyatı Ölçüm Cihazı özellikleri (devam)

Özellik		Değer
Yoğunluk Ölçüm Sapması		± 0.5 kg/m ³
Standart Sapma	0.1 s	% 0.01
	1 s	% 0.004
	5 s	% 0.0025
	10 s	% 0.002
	T90	230 ms
	T10-90	125 ms
Ölçüm Frekansı		20 Hz
Yakıt Besleme Basıncı		0,1 – 0,8 Bar
Yakıt Besleme Sıcaklığı		-10... +40 °C
Yakıt Çıkış Basıncı		0,05 – 0,5 bar (Ayarlanabilir)

5.1.4 Yakıt Şartlandırıcısı

Deneyler esnasında motor gönderilen yakıt AVL 753C tipi yakıt sıcaklık şartlandırıcısı ile şartlandırılmıştır. Tüm deneyler esnasında yakıt sıcaklıkları ~28-29 °C aralığında sabit tutulmuştur. Kullanılmış olan yakıt şartlandırıcısının özellikleri, hassasiyeti ve yakıt sarfiyatı ölçer ile birlikte çalışırken ki genel görünümü aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5. 4 AVL 753C yakıt sıcaklık şartlandırıcısı cihazı özellikleri

Özellik	Değer
Soğutma kapasitesi	1,6 kW
Isıtma kapasitesi	1,6 kW
Sıcaklık kontrol aralığı	10...80 °C
Sıcaklık stabilitesi	0,02 °C
Standart sapma	max. ±1 °C
Motor dönüş sıcaklığı	max. 90 °C
Motor besleme sıcaklığı	10...30 °C

Çizelge 5. 4 AVL 753C yakıt sıcaklık şartlandırıcısı cihazı özellikleri (devam)

Özellik	Değer
Çalışma sıcaklığı	5 °C...40 °C
Yakıt yoğunluğu	> 0.7 g/cm ³
Çıkış besleme basıncı	~0...6 bar
Geri dönüş basıncı	~0...0,5 bar



Şekil 5. 4 Deneylerde kullanılmış olan AVL 735S yakıt sarfiyatı ölçüm ve AVL 753C yakıt sıcaklığı kontrol cihazı kombinasyonu.

5.1.5 İS Ölçer

Deneyler esnasında egzoz gazlarını is miktarını ölçmek için , egzoz hattı üzerinden emdiği gaz numunesini önce bir filtre üzerinden geçirerek daha sonra bu kağıdın opaklığını ölçerek filtre is numarası (*FSN-Filter Smoke Number*) olarak çıkış değeri veren

AVL 415S cihazı kullanılmıştır. İlgili cihazın özellikleri, ölçüm hassasiyeti ve görünümü aşağıdaki çizelge ve şekilde verilmiştir.

Çizelge 5. 5 AVL 415S is ölçer cihazı özellikleri

Ölçüm Prensipleri		Kağıt Filtre Koyulaşması
Çıkış Değeri		FSN (Filter Smoke Number)- mg/mm ³ (İs Yoğunluğu)
Ölçüm Aralığı	İs değeri	0...10 FSN
	Kirlilik Yüzdesi	0...100 %
Çalışma Sıcaklığı		5...55 °C
Algılama Limiti		0.002 FSN – 0.02 mg/m ³
Çözünürlük		0.001 FSN – 0.01 mg/m ³
Tekrarlanabilirlik		≥ 0.05 FSN
Çalışma Nem Aralığı		≤ %95 yoğunlaşma olmadan
Egzoz Gaz Basıncı		-100...+400 mbar
Örnekleme noktasındaki Egzoz Sıcaklığı		600 °C –standart prob



Şekil 5. 5 Deneylerde kullanılmış olan AVL 415S is ölçüm cihazı

Deneyler esnasında elde edilmiş olan FSN değeri aşağıdaki formülasyonlar gr/kwh'e çevrilmiştir.

1.aşamada ölçülen FSN değeri ilgili cihaz üreticisinin [84] no'lu kaynakta vermiş olduğu formül ile mg/m³ çevrilmişlerdir.

$$C \left(\frac{mg}{m^3} \right) = \frac{1}{0.405} * 4.95 * FSN * e^{0.38*FSN} \quad (5.1)$$

Daha sonra da Maiboom [85] tarafından aşağıda verilmiş olan formül kullanılarak kütleli dönüşüm yapılmıştır.

$$\dot{Q}_{exhaust} = \dot{Q}_{yakıt} \cdot \left[\frac{1+AFR_{st}}{\rho_{yg}} + \frac{(\lambda-1).AFR_{st}}{\rho_h} \right] \quad (5.2)$$

$\dot{Q}_{exhaust}$: Egzoz hacimsel debisi (m³/h)

$\dot{Q}_{yakıt}$: Yakıt debisi (kg/h)

ρ_{yg} : Yanmış gaz yoğunluğu(egzoz)-(kg/m³)

ρ_a : Hava yoğunluğu-(kg/m³)

5.1.6 Egzoz Emisyonları Ölçüm Cihazı (CO,CO₂,NO_x,THC)

Deneyler esnasında egzoz gazlarındaki CO, CO₂, NO_x, THC miktarı ölçmek için Horiba MEXA 7100 DEGR cihazı kullanılmıştır. İlgili cihazın özellikleri, ölçüm hassasiyeti ve genel görünümü aşağıdaki şekil ve çizelgelerde verilmiştir. İlgili cihazda kullanılan sensör tiplerinin kısaltmaları şu şekildedir.

- NDIR: Non-Dispersive Infrared Detector (Saçılımsız kızılötesi dedektörü)
- CLD: Chemiluminescence Detector (Kemilüminesans/kimyasal ışılda dedektörü)
- FID: Flame Ionisation Detector (Alev iyonizasyon dedektörü)
- MPA: Magnophneumatic Detector (Magnopnömatik dedektörü)

Çizelge 5. 6 Horiba 7100 DEGR cihazı sensörleri ve ölçüm aralıkları

Ölçülen Gaz	Kullanılan Analizör	Ölçüm Aralığı
CO (Düşük)	NDIR	0-2000 ppm
CO (Yüksek)	NDIR	2000-15000 ppm
CO ₂	NDIR	0-20 % hacim
NO / NO _x	CLD	0-15000ppm
THC	FID	0-15000ppm
O ₂	MPD	0-5 % hacim

CO, CO₂ ölçümleri NDIR ölçüm prensibi ile çalışan infrared (kızıl ötesi) analizörler (IRD) tarafından yapılmıştır. IRD analizöründe ölçümler, gazların farklı dalga boylarına olan ışık geçirgenliklerinin farklı olmasından faydalanılarak yapılmaktadır. THC ölçümünün yapıldığı FID analizörleri ise; THC'nin bir alev içerisinde geçirilmesi sonucu iyonize olmasına bağlı olarak elektrik geçirgenlik oranının değişmesi prensibine göre çalışmaktadır. NO_x ölçümlerinin yapıldığı CLD analizörleri ise NO gazının NO₂'ye dönüşmesi sırasında ışık yayılımı gerçekleşmesi ve bu ışığın ölçülmesi prensibine bağlı olarak çalışmaktadır. Egzoz gazından alınan numune ilk olarak NO_x çevirici bir ünite içerisinde geçirilerek NO'ya dönüştürülür. Çevirici içerisinde oluşan reaksiyon 6.2 denklemindeki gibi gerçekleşir.



Oksijen ölçümü ise MPD analizörü ile oksijenin manyetik alan karşısında hareket yönünde meydana gelen sapmanın ölçülmesiyle gerçekleştirilir.



Şekil 5. 6 Deneylerde kullanılmış olan Horiba Mexa 7100 DEGR egzoz emisyon ölçüm cihazı

Deneyler esnasında kullanılmış olan Horiba Mexa 7100 DEGR cihazının algılayıcı/sensor bazında hassasiyetleri Euro 5 emisyon standardında öngörülen ölçüm limitleri ile karşılaştırılmış olarak aşağıdaki üç çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5. 7 Horiba 7100 DEGR cihazı IRD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması

Tanım	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	2%	2%
Tekrarlanabilirlik	155 ppm altı %1	0.50%
	155 ppm üstü %2	
Gürültü	10 saniyede %2 altı FS	5 saniyede %1 altı FS
Sıfır Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS ¹
Span Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS
Yoğuşan Suya Tepkisi	<1%	<1%

¹ FS: Full Scale : Tüm Ölçüm bandı Boyunca

Çizelge 5. 8 Horiba 7100 DEGR cihazı CLD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması

Tanım	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	2%	2%
Tekrarlanabilirlik	155 ppm altı %1	0.50%
Gürültü	10 saniyede %2 altı FS	10 saniyede %2 altı FS
Sıfır Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS
Span Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS
NOx Çevirici Kontrolü	>%95	>%95
CO ₂ Yoğuşma Etkisi	<%3 FS	<%1 FS
Kondens Etkisi	<%3 FS	<%2 FS

Çizelge 5.9 Horiba 7100 DEGR cihazı FID analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması

Tanım	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	2%	2%
Tekrarlanabilirlik	155 ppm altı %1	0.50%
	155 ppm üstü %2	
Gürültü	10 saniyede %2 altı FS	5 saniyede %1 altı FS
Sıfır Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS
Span Kayması	1 saatte %2 FS	1 saatte %1 FS
CO Interferencecheck	<1%	<1%
O2 Interferencecheck	±%5	±%2

Çizelge 5.10 Horiba 7100 DEGR cihazı MPD analizörlerinin teknik özellikleri, hassasiyetleri ve Euro 5 emisyonu regülasyonu (715/2207EC) limitleri karşılaştırılması

Tanım	Regülasyon Limiti	Cihaz Limiti
Toplam Hata	-	2%
Tekrarlanabilirlik	-	0.50%
Gürültü	-	<%5
Sıfır Kayması	-	1 saatte %1 FS
Span Kayması	-	1 saatte %1 FS

5.1.7 Basınç Analiz Sistemi

Deneyler esnasında silindir içi basınç ve piston konum verisinin aynı anda eş zamanlı olarak toplanabilmesi için AVL Indiset 620 Basınç Analiz ve veri toplama sistemi ve Indicom yazılımı kullanılmıştır. Kullanılmış olan sistemin özellikleri, hassasiyeti ve genel görünümü ekte verilmiştir.

Çizelge 5.11 AVL Indiset 620 Yanma Analiz Sistemi Özellikleri

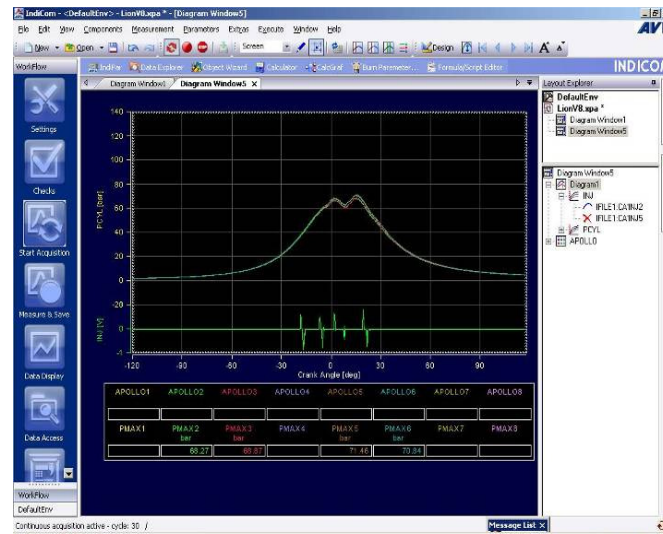
Özellik	Değerler
Toplam analog kanal sayısı	8/16
Kanal başına örnekleme oranı	14bit/800kHz-kanal başına
Çözünürlük	0.025/0.05/0.2/0.2/1 °CA
Dahili hafıza	128 Mb-8 Kanal için
Analog giriş	+7- 10 V
Dijital giriş kanalları	2 giriş kanalı/modül
Dijital çıkış kanalı	8 çıkış kanalı/modül
Bekleme girişi	TTL uyumlu giriş soketi/diğer cihazlarla senkronizasyon için

Çizelge 5.11 AVL Indiset 620 Yanma Analiz Sistemi Özellikleri

Özellik	Değerler
Kontrol girişi	3 giriş-CDM ve Tetik sinyali için
Sinyal giriş Tipi (Devir/konum)	Krank açısı sinyali/halletkili veyaindüktifsensör
Gerçek zamanlı ölçümler	Tek değer, Isı Açığa Çıkış Oranı, Ortalama İndike Basınç (IMEP),vuruntu, maksimum artışlar, ortalama değerler vb.
Çalışma sıcaklığı	0°C...50°C
Yazılım	Indicom



Şekil 5.7 Deneylerde kullanılmış olan silindir içi veri toplama sistemi AVL Indiset 620



Şekil 5.8 Deneylerde kullanılmış olan Indicom programı ara yüzü

5.1.8 Emme Havaşı Debisi Ölçümü

Deneyler esnasında emme havaşı debisi motorun kendi MAF (Mass Air Flowmeter- Hava Kütlesi Akış Ölçer) sensörünün haricinde çok hassas bir ölçüm elemanı olan ABB SensyFlow tipi bir hava akış ölçer ile ölçülmüştür.

Çizelge 5.12 ABB Sensy Flow hava akış ölçer özellikleri

Özellik	Değerler
Sensör	Seramik
Gövde	Paslanmaz Çelik
Ölçüm Hatası	$\leq \pm 0.9 \%$
Tekrarlı birlilik	$<0.2\%$
Ortam Sıcaklığı Etkisi	$<0.05\%$
Ortam basıncı Etkisi	$<0.2\%/100\text{kPa}$
Tepki Zamanı	0.5s
Çalışma sıcaklık aralığı	-25 °C... 150°C
Ölçüm aralığı	0.....2000 kg/h (DN80)

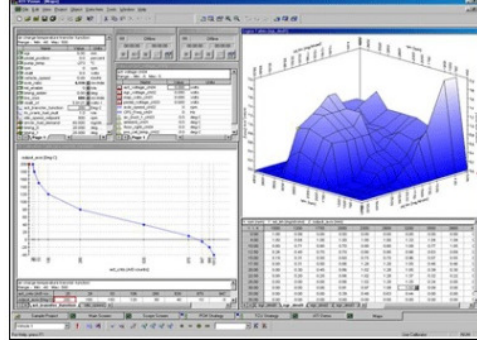


Şekil 5. 9 Deneylerde kullanılmış olan emme havaşı debi ölçeri ABB Sensy Flow

5.1.9 Motor Kontrol Ünitesi Kontrolü

Deneyler esnasında motorun kendisine ait olan motor kontrol ünitesini - ECU (Engine Control Unit) kontrol edebilmek ve kontrol ünitesi içerisinde mevcut durumda bulunan

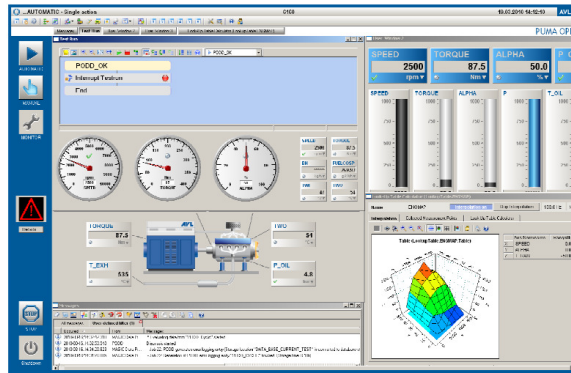
haritaları deney ve kalibrasyon stratejilerimiz doğrultusunda değiştirebilmek için ATI Vision[86] programı kullanılmıştır. Motor parametreleri motor çalışırken değiştirilmiştir.



Şekil 5. 10 Motor Kontrol Ünitesi Parametrelerini değiştirebilmek için kullanılmış an olan ATI Vision programı ekran çıktısı

5.1.10 Deney Otomasyon Sistemi

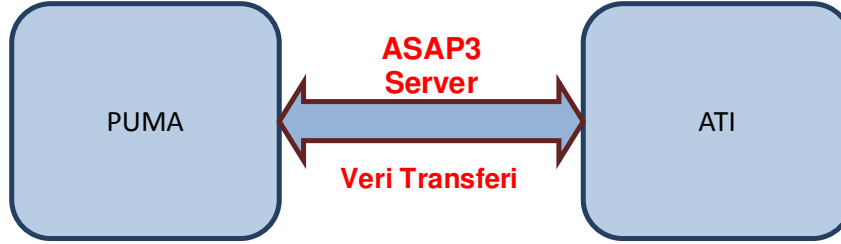
Deneyler esnasında, motor dinamometresi kontrol etmek, tüm ölçüm ekipmanları(basınç, sıcaklık, yanma verileri vb.), yazılımları ve ECU kontrol yazılımından gelen verileri almak, kaydetmek ve belirlenmiş olan deney stratejisi gereği tüm gerekli olan tüm kontrol sinyal proseslerinin aktarımı sağlamak ve tüm sistemin otomatik olarak çalıştırılabilmesi için AVL Puma OPEN 1.4 400 test otomasyon sistemi kullanılmıştır.



Şekil 5. 11 Tüm test sistemini kontrol edebilmek için kullanılmış olan AVL PUMA Open 1.4 400 ekran çıktısı.

Deney otomasyon sistemi F-FEM I/O'lar ile 100.000 veriye kadar veri akışı gerçekleştirebilmektedir. Sistem 1 kHz e kadar gerçek zamanlı veri işleyebilme ve 20.000 değere kadar durağan denge konumunda ölçüm yapabilme kapasitesine

sahiptir. Aynı zamanda 1000 kanaldan 100,000 veri değeri akışında sürekli ölçüm yapabilmektedir. ECU kontrol protokolleri olan ASAP3, ASAM-MCD3MC ve iLinkRT protokolleri ile iletişim kurabilmektedir. Motor kontrol ünitesi ve test otomasyon sistemi arasındaki iletişim (PUMA sisteminden -> ECU ya veya ECU dan PUMA'ya) ASAP 3 serverı sayesinde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 12 Deney sistemi ve Motor Kontrol ünitesi iletişimi

5.1.11 Deneylerin yapılması

Deneyler motorun satışta olan versiyonundaki limit parametreler göz önüne alınarak belirlenmişleridir. Deneyler motorun maksimum tork devri olan 2000 d/d , 2500 d/d ve maksimum güç devri olan 3750 d/d' a gerçekleştirilmişlerdir. Deneyler başlanılmadan önce motorun ticari kalibrasyonunda yer alan yakıt püskürtme miktarları ve aşırı doldurma basınçları incelenerek bu değerlere çok yakın ancak limitte olmayan değerler seçilmişleridir. Seçilen değerler 4.1.1 no'lu kısımda detaylı olarak anlatılmışlardır.

Her bir deney noktasına geçişte, motorun 40 saniyeye boyunca rejime girmesi için beklenmiş ve sonraki 20 saniyelik süreç boyunca ölçümler alınarak kayıt edilmiş ve motor bir sonraki çalışma noktasına geçilmiştir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

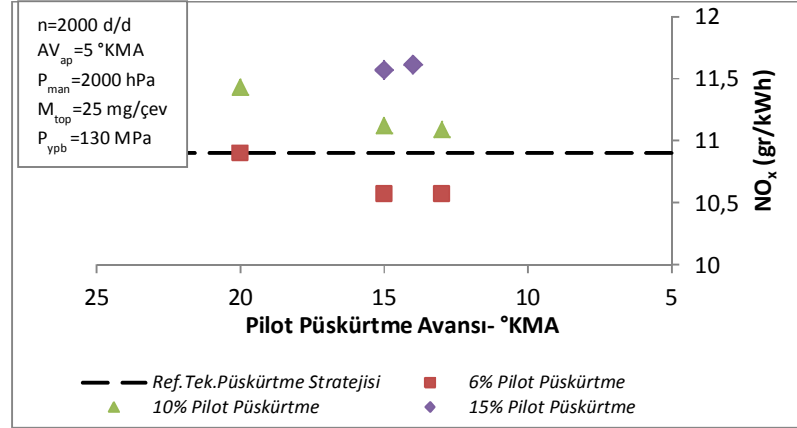
Tez çalışmamda elde edilmiş olan deney verileri kullanılmış olan metotlar için aşağıda irdelenmiştir.

6.1 Motor Deneyleri Sonuçları

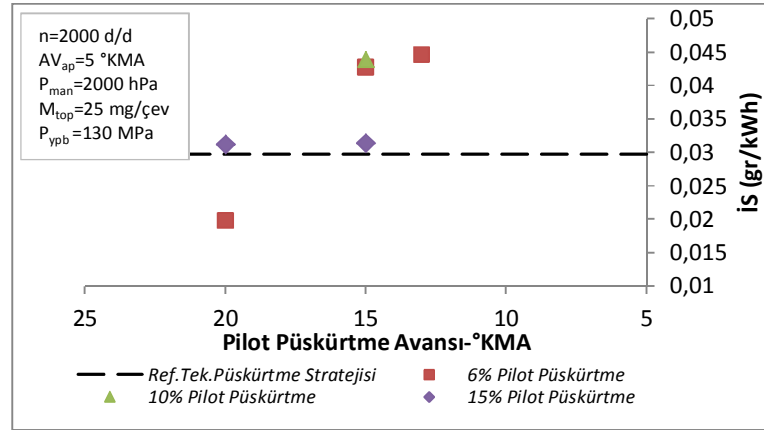
Deney test düzeneğinde elde edilmiş olan sonuçlar grafiğe dökülmüş halde aşağıda verilmiştir. 6.1.1 kısmında verilmiş olan tüm grafiklerde belirtilmiş olan Avans açıları üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) değerler olarak pozitif işaretli olarak verilmişlerdir. Değiştirilen iki parametreye bağlı olarak , diğer tüm parametreleri sabit tutulmuş ve deney sonuçları bu şekilde verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, NO_x , CO, CO_2 , THC, $\dot{I}_s$, b_e , OiB, OEB, PMAX ve TMAX değerleri karşılaştırmalı olarak verilmişlerdir. Her grafik üzerinde ilgili deney şartı için gerçekleşmiş olan tek püskürtme stratejisinde elde edilmiş olan değer referans bir çizgi ile belirtilmiş ve parametrelerin bu referans parametreye göre değişimleri incelenmiştir.

6.1.1 Pilot Püskürtme Avansına Ve Pilot Püskürtme Parametresine Bağlı Olarak Motor Performans Ve Emisyonlarının Değişimi

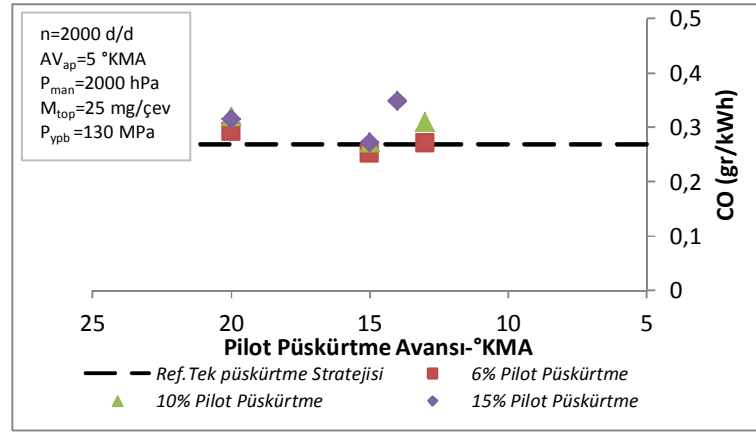
6.1.1.1 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler



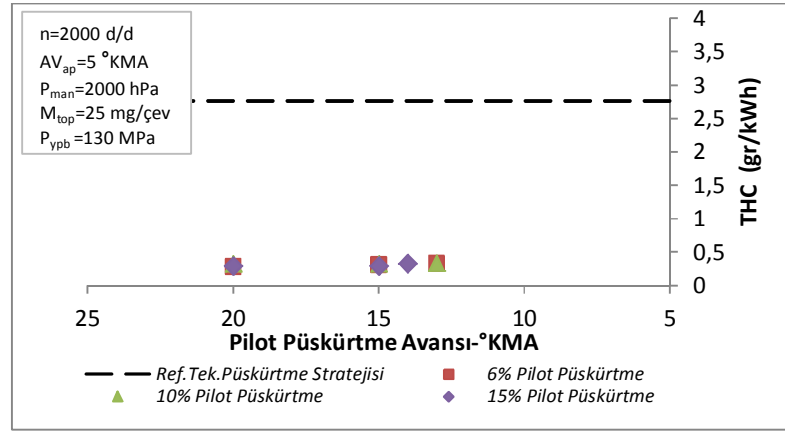
Şekil 6. 1 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



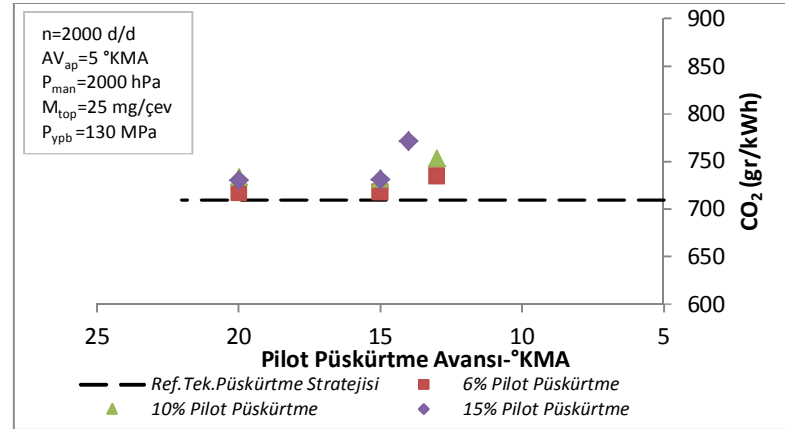
Şekil 6. 2 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı iş değişimi



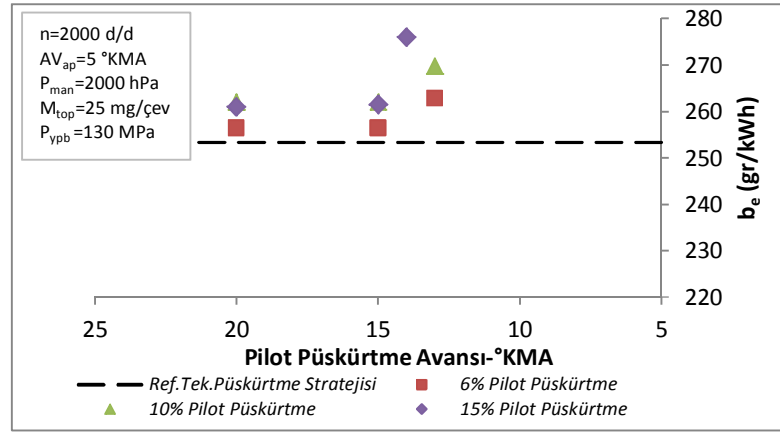
Şekil 6. 3 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, P_{ypb}=130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO değişimi



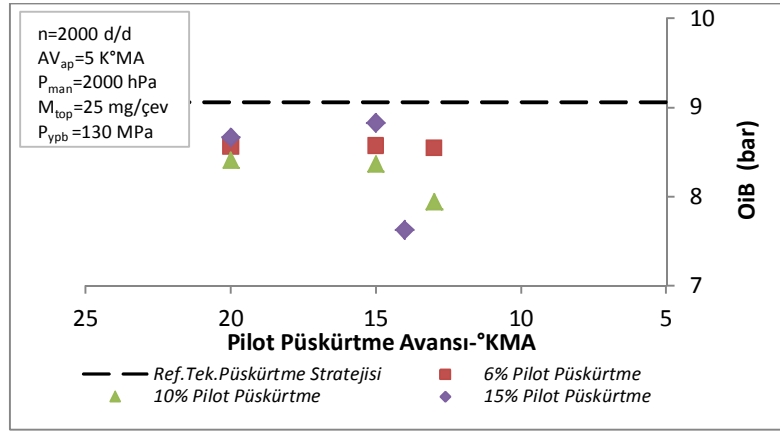
Şekil 6. 4 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, P_{ypb}=130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} e bağlı THC değişimi



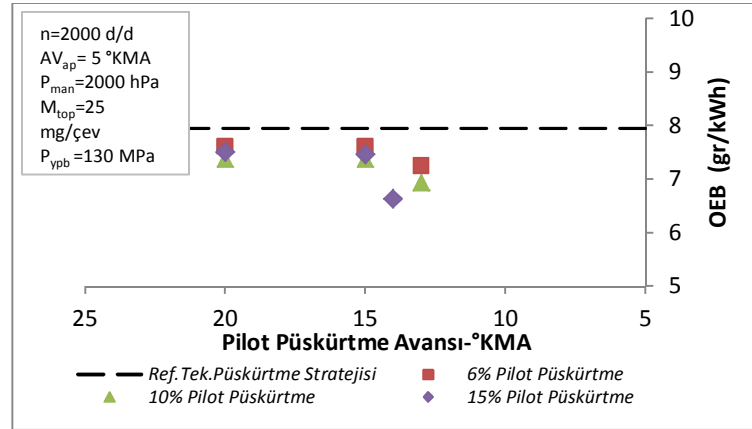
Şekil 6. 5 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, P_{ypb}=130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO₂ değişimi



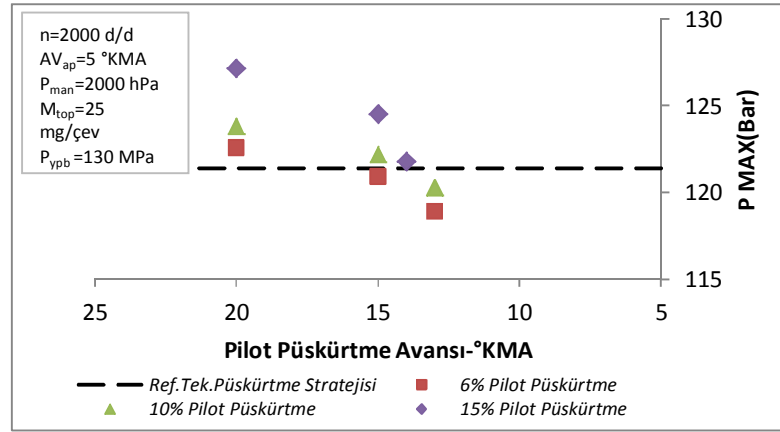
Şekil 6. 6 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi



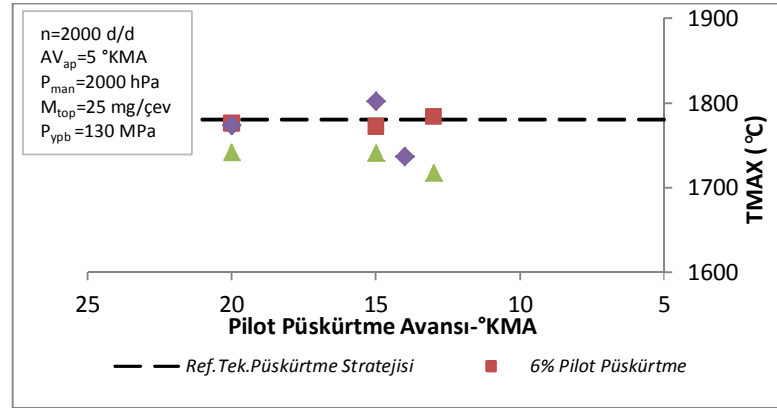
Şekil 6. 7 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 8 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değişimi

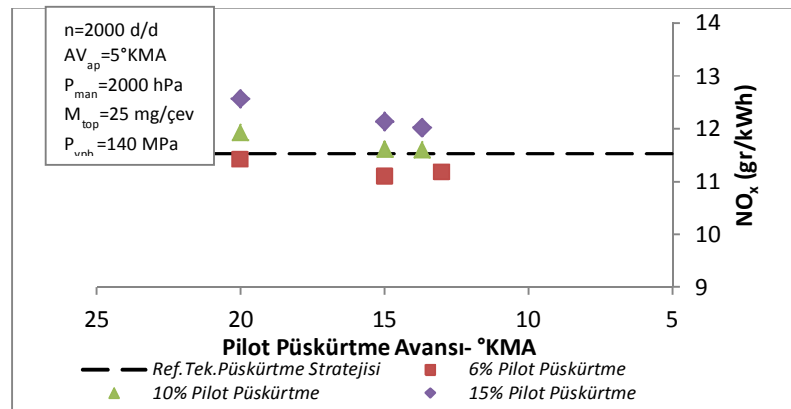


Şekil 6. 9 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı P MAX değişimi

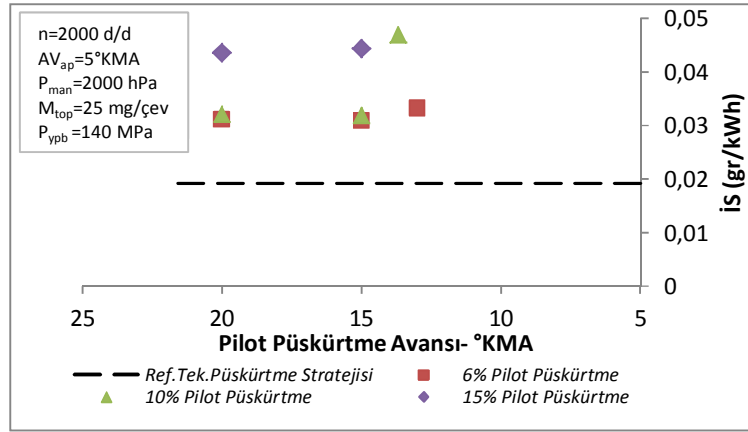


Şekil 6. 10 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=130 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı TMAX değişimi

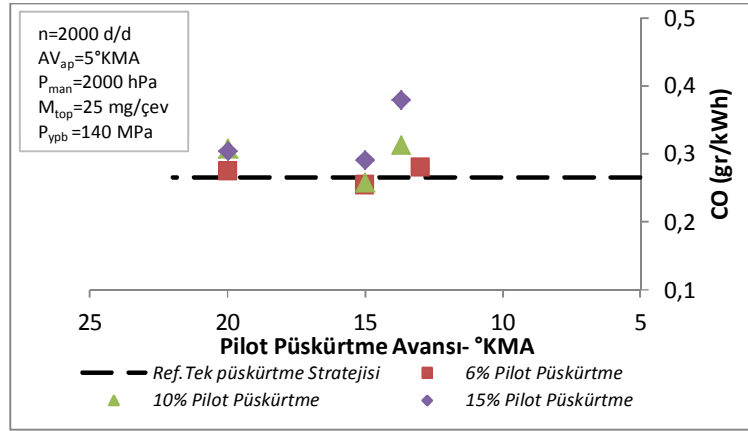
6.1.1.2 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler



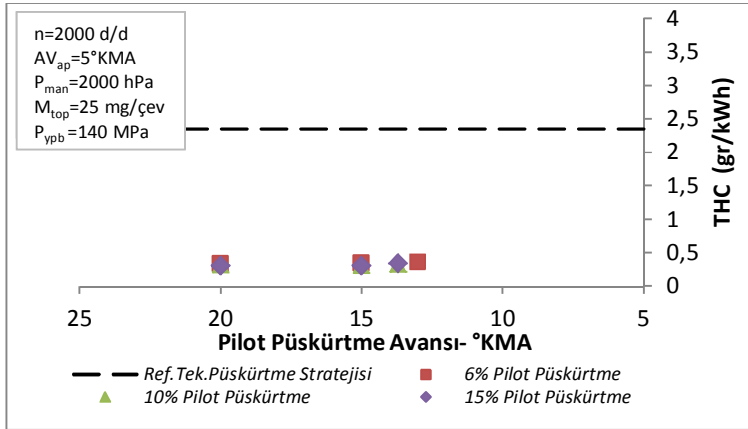
Şekil 6. 11 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı NO_x değişimi



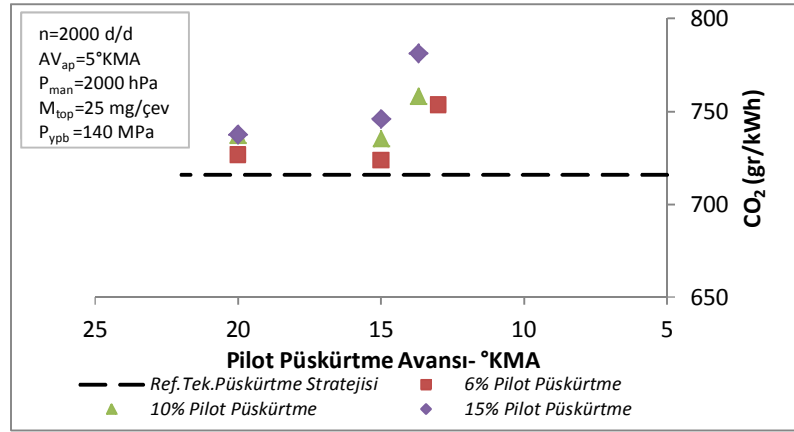
Şekil 6. 12 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı is değişimi



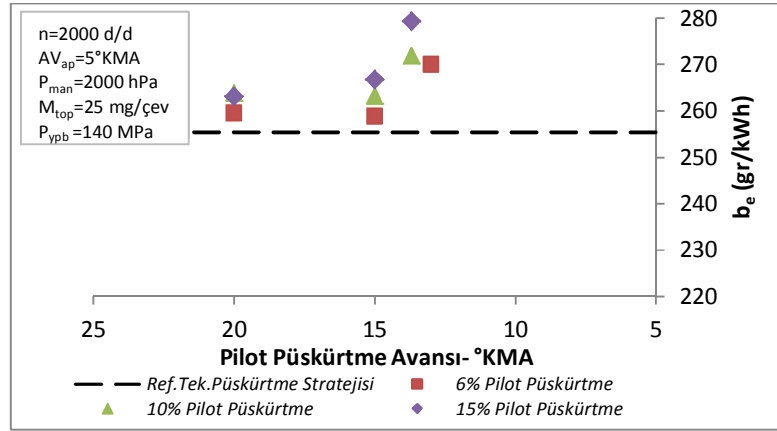
Şekil 6. 13 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO değişimi



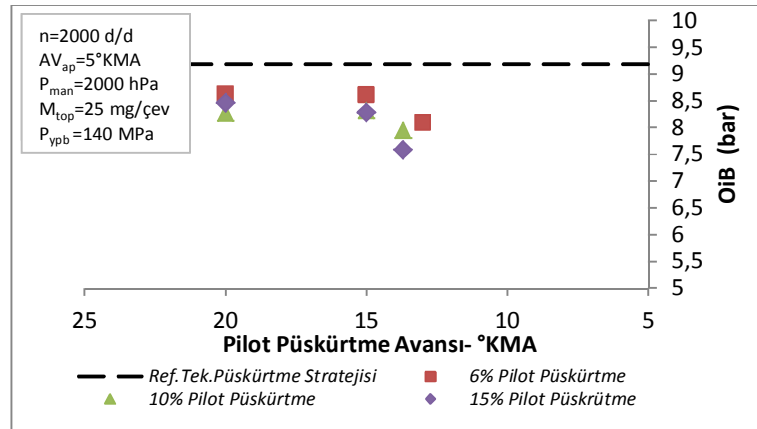
Şekil 6. 14 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı THC değişimi



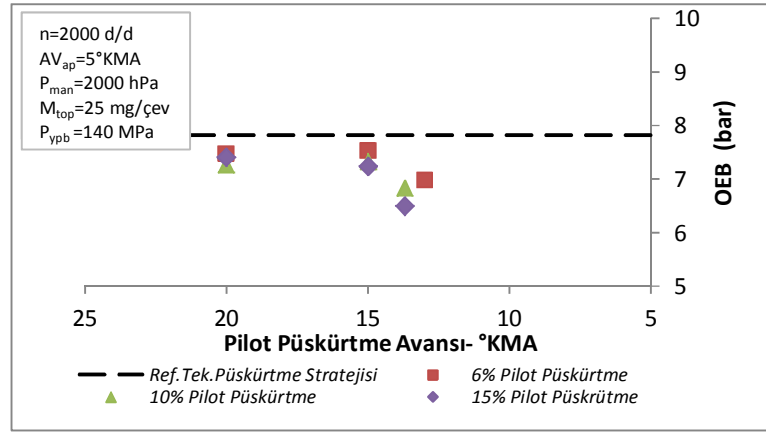
Şekil 6. 15 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO₂ değişimi



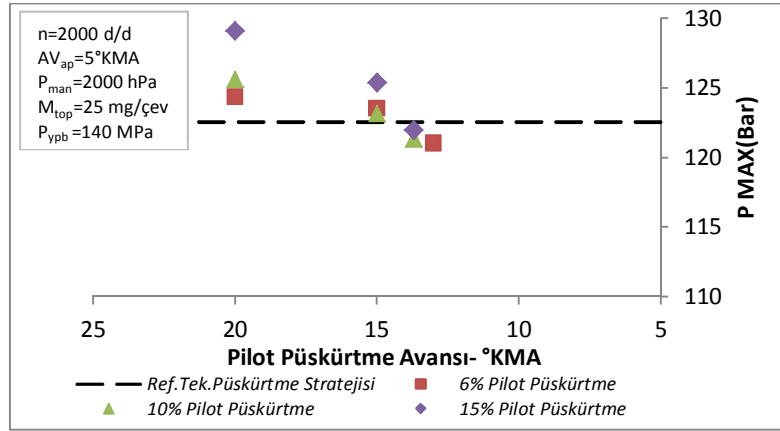
Şekil 6. 16 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı b_e değişimi



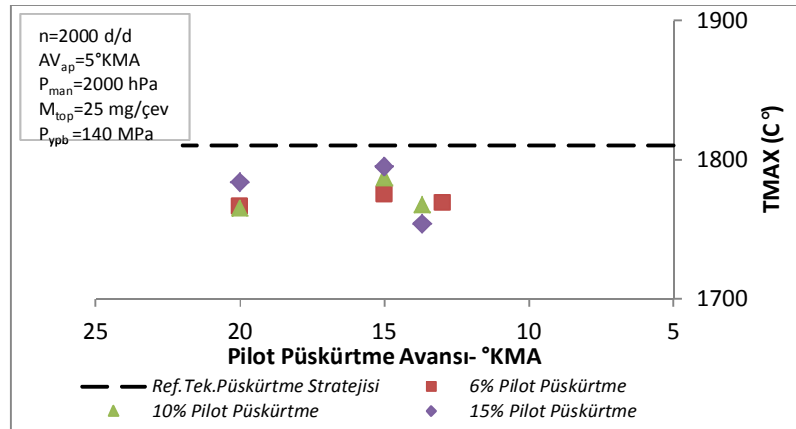
Şekil 6. 17 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/çev, P_{yph}=140 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 18 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=140 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değişimi



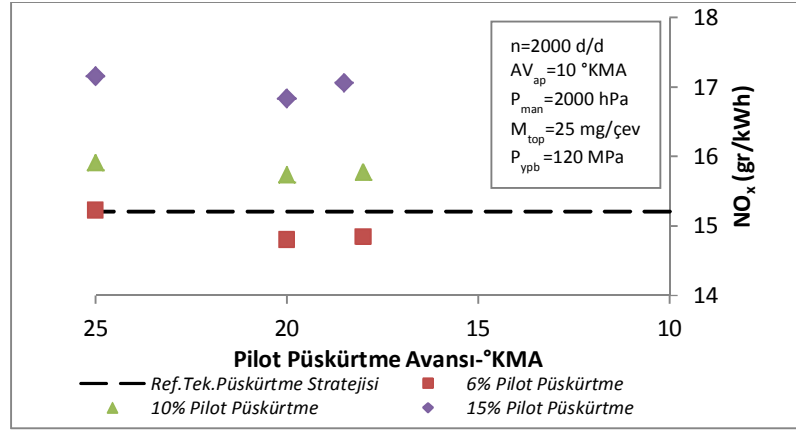
Şekil 6. 19 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=140 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı P MAX değişimi



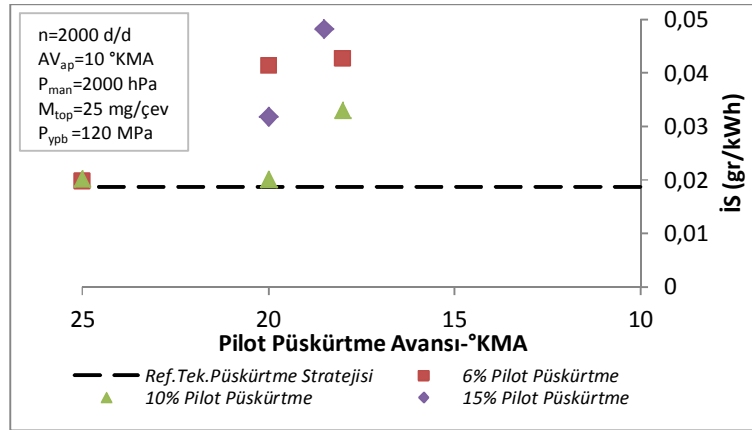
Şekil 6. 20 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=140 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı TMAX değişimi

6.1.1.3 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa

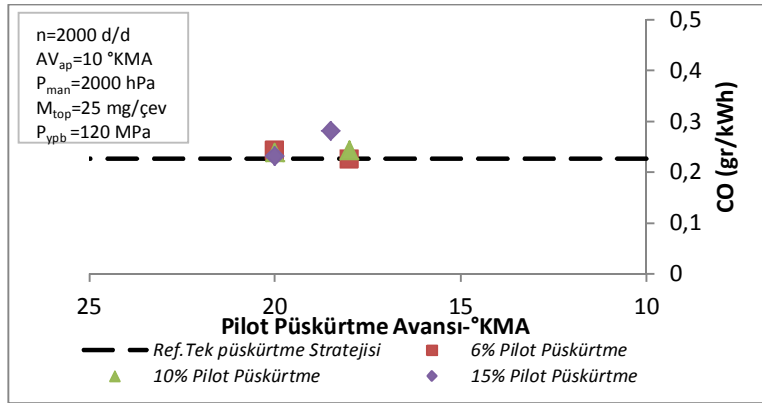
Şartında Yapılmış Olan Deneyler



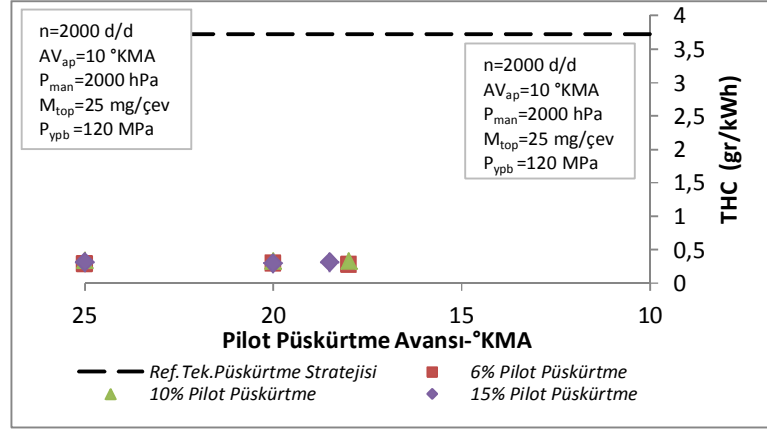
Şekil 6. 21 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x Değişimi



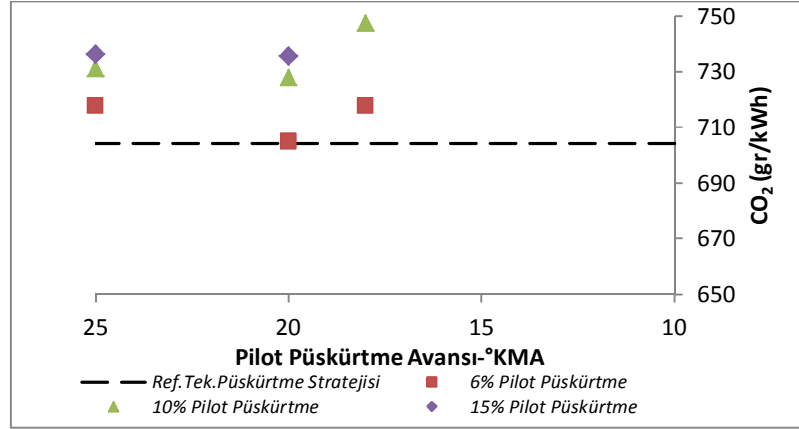
Şekil 6. 22 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $İS$ Değişimi



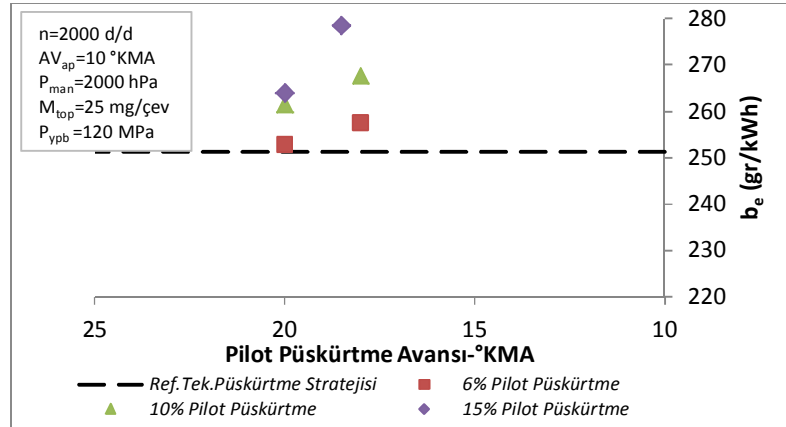
Şekil 6. 23 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO Değişimi



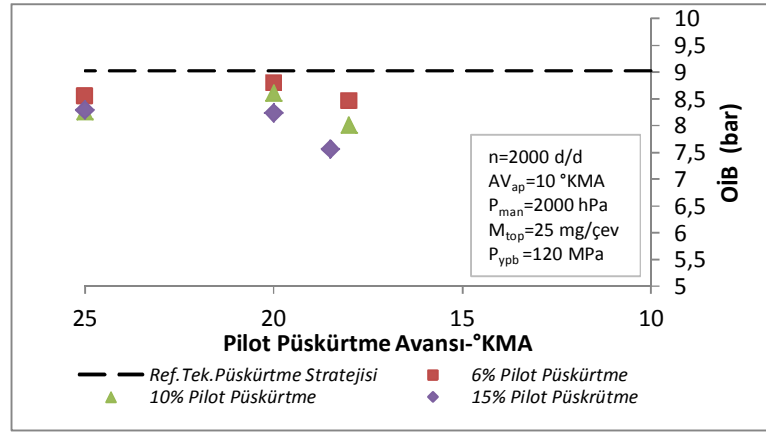
Şekil 6. 24 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı THC değişimi



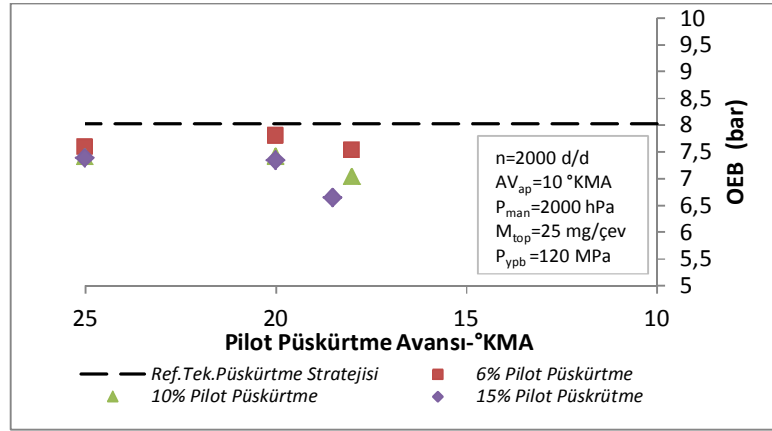
Şekil 6. 25 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO_2 değişimi



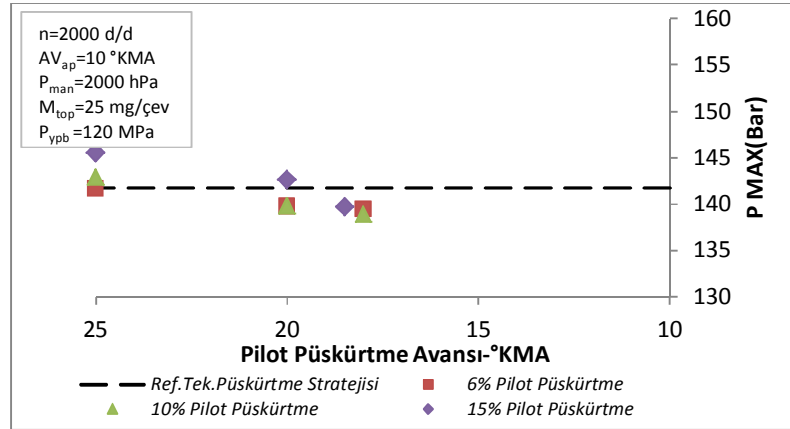
Şekil 6. 26 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi



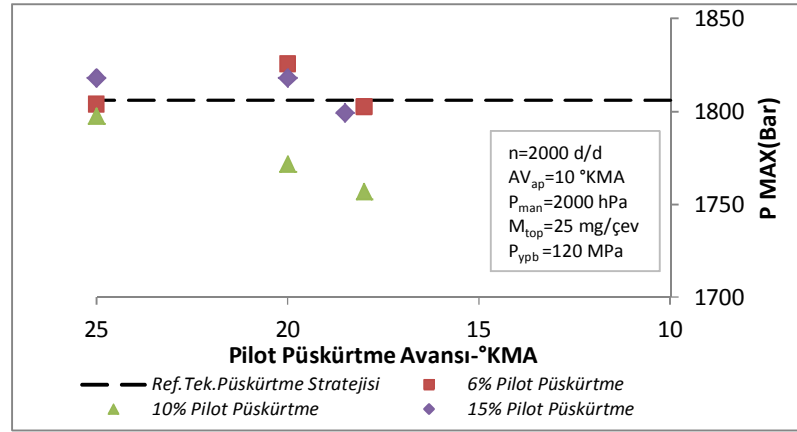
Şekil 6. 27 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 28 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değişimi

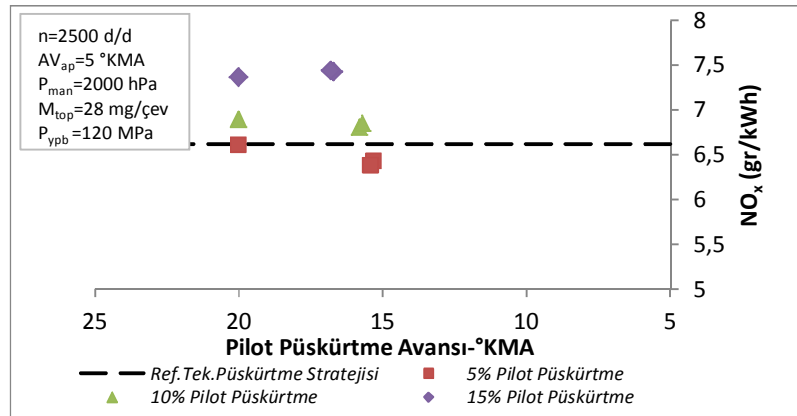


Şekil 6. 29 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı P MAX değişimi

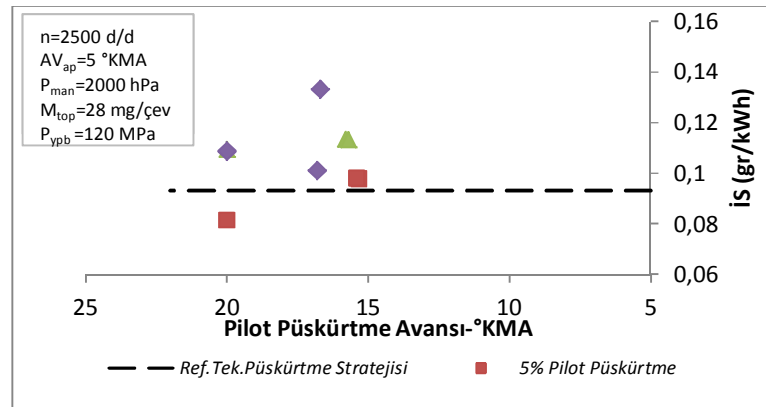


Şekil 6. 30 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı TMAX değişimi

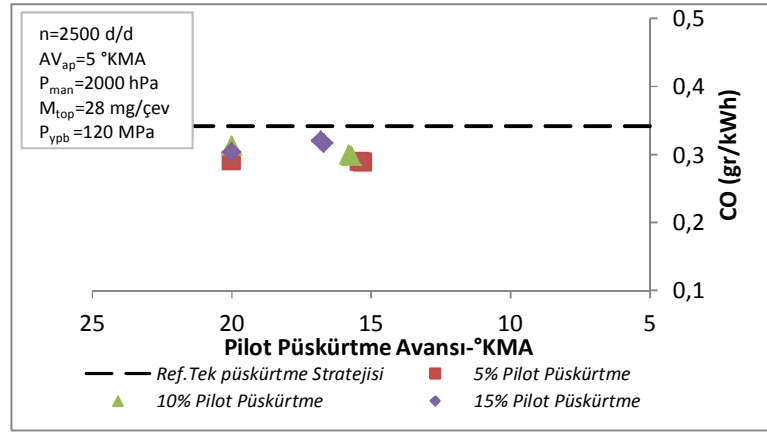
6.1.1.4 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler



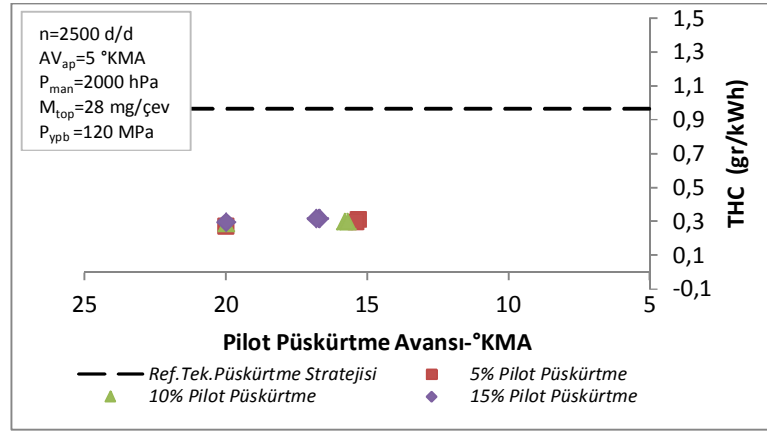
Şekil 6. 31 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



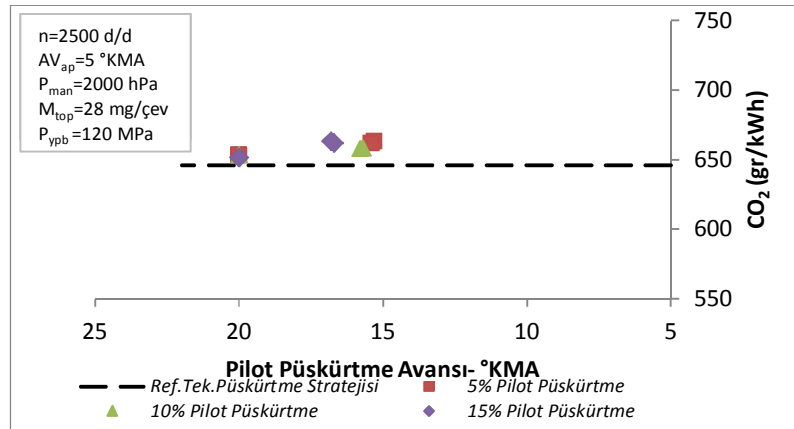
Şekil 6. 32 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı İS değişimi



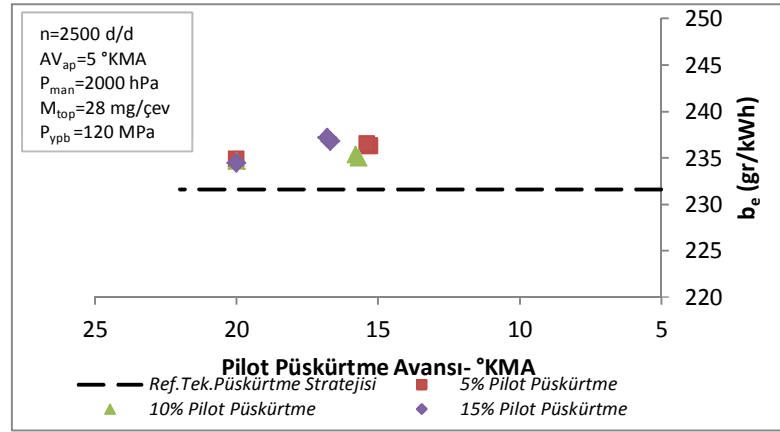
Şekil 6. 33 n=2500 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=28 mg/çev, P_{yph}=120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO değişimi



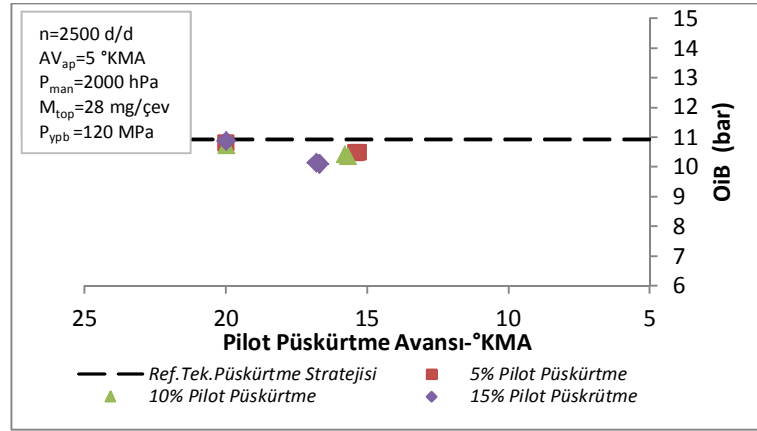
Şekil 6. 34 n=2500 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=28 mg/çev, P_{yph}=120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı THC değişimi



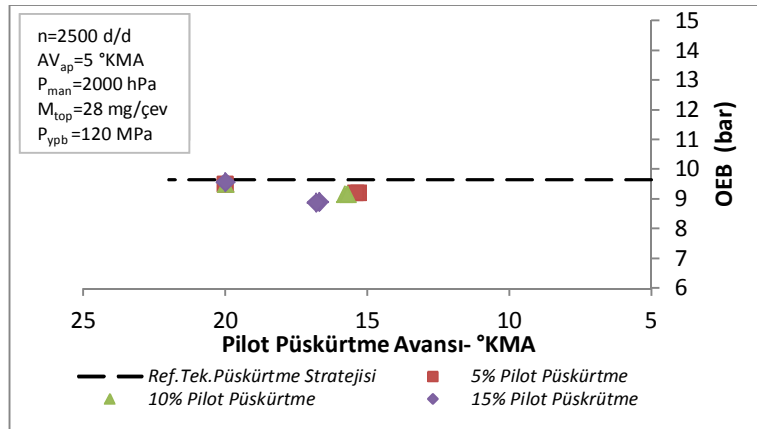
Şekil 6. 35 n=2500 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=28 mg/çev, P_{yph}=120 MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO₂ değişimi



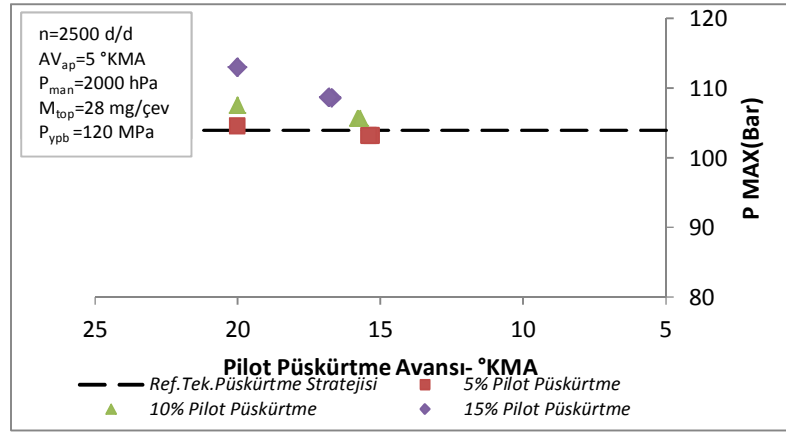
Şekil 6. 36 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=28 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=120 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi



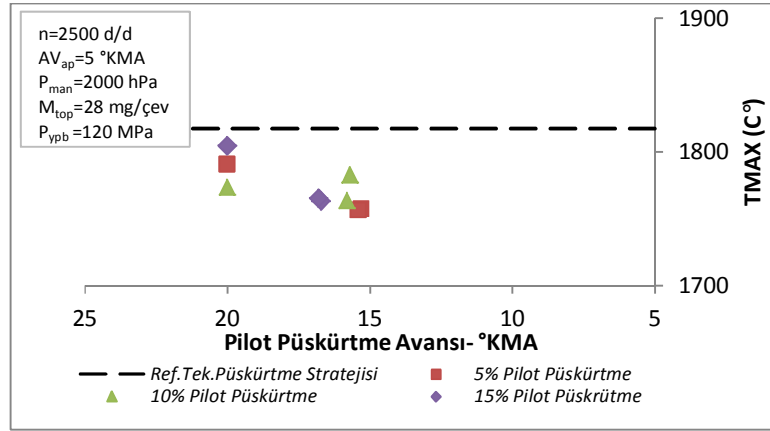
Şekil 6. 37 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=28 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=120 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 38 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=28 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=120 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değişimi



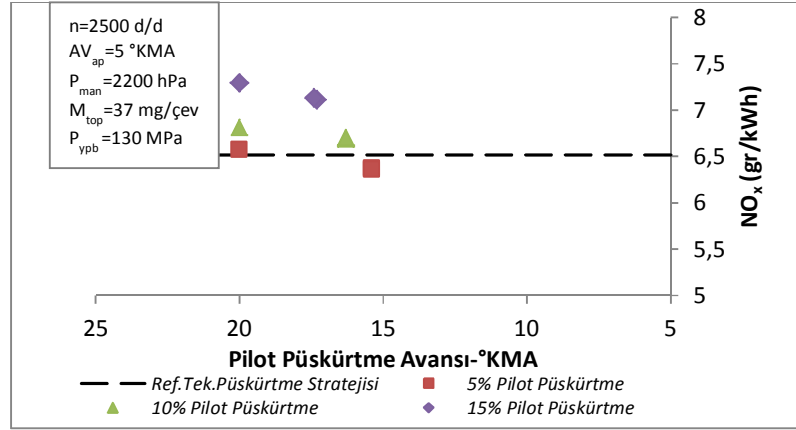
Şekil 6. 39 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=28 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=120 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı P_{MAX} değişimi



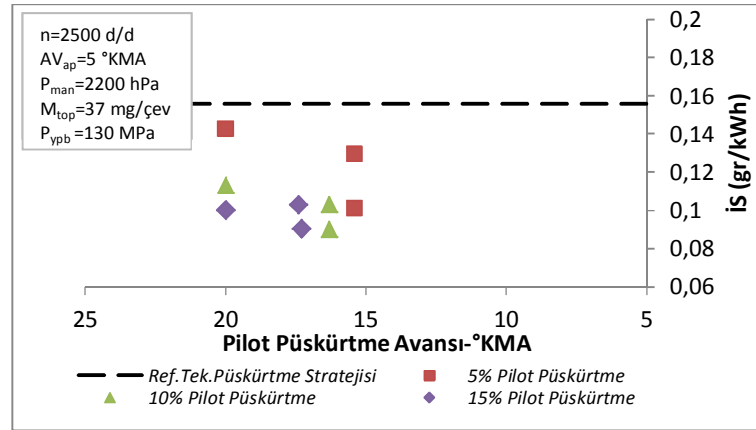
Şekil 6. 40 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=28 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=120 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı T_{MAX} değişimi

6.1.1.5 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa

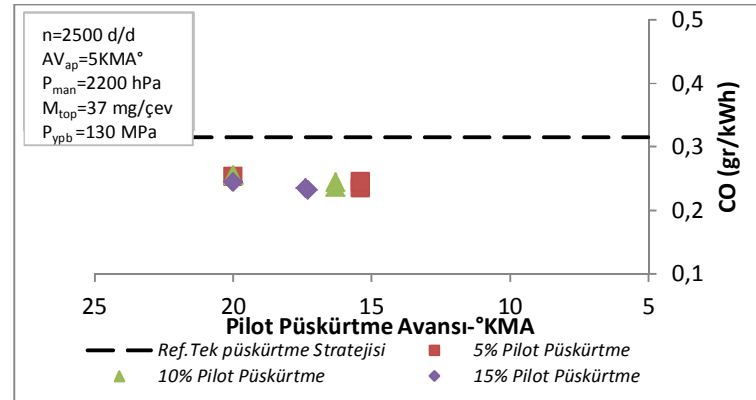
Şartında Yapılmış Olan Deneyler



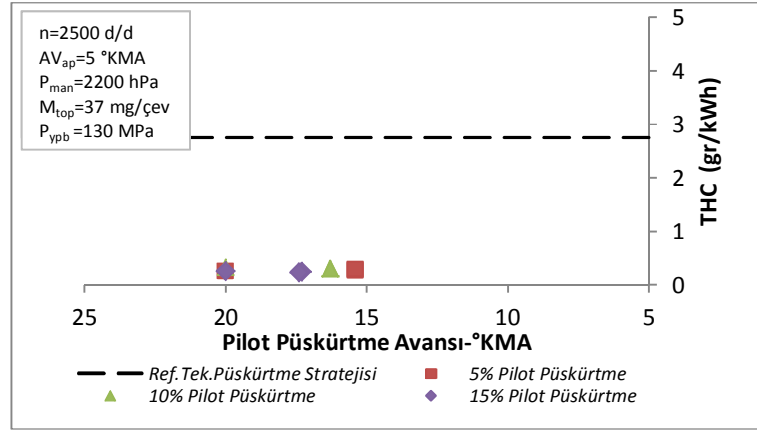
Şekil 6. 41 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



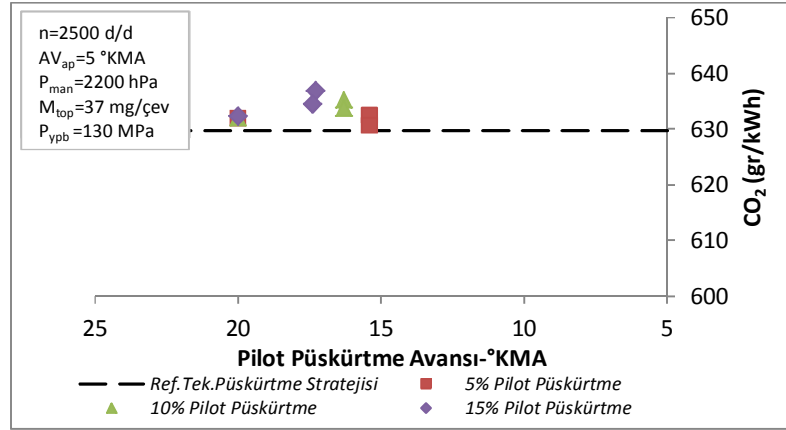
Şekil 6. 42 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı $İS$ değişimi



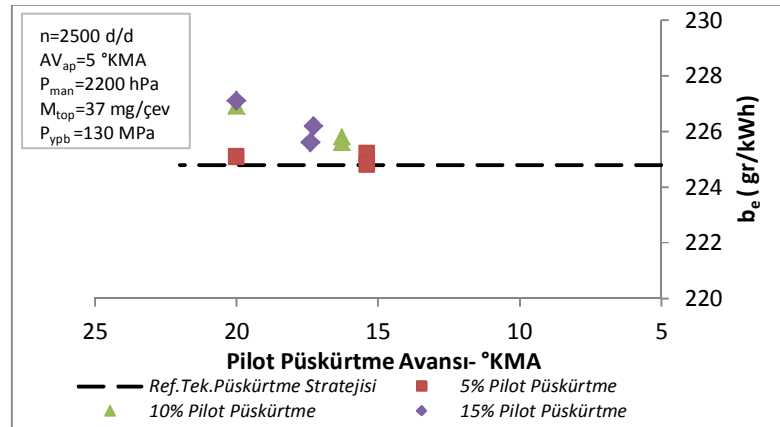
Şekil 6. 43 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi



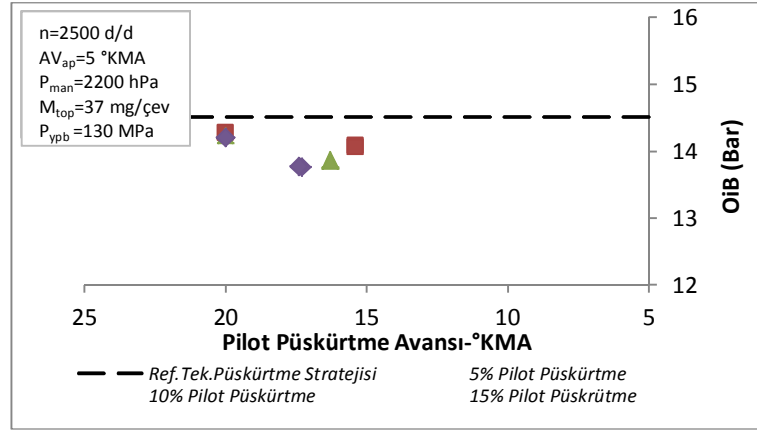
Şekil 6. 44 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı THC değişimi



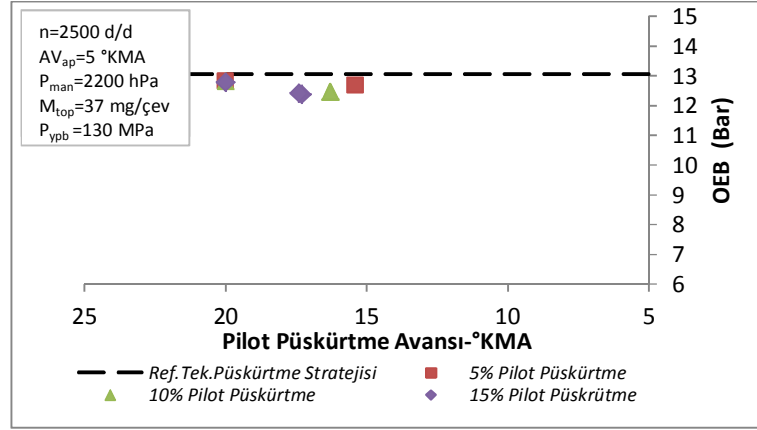
Şekil 6. 45 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO_2 değişimi



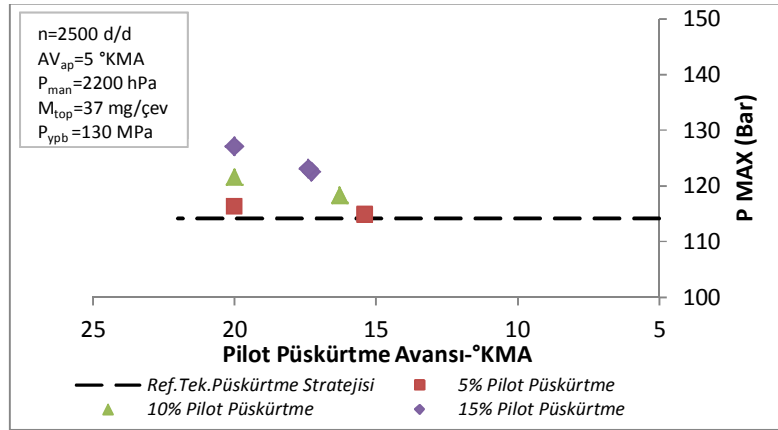
Şekil 6. 46 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi



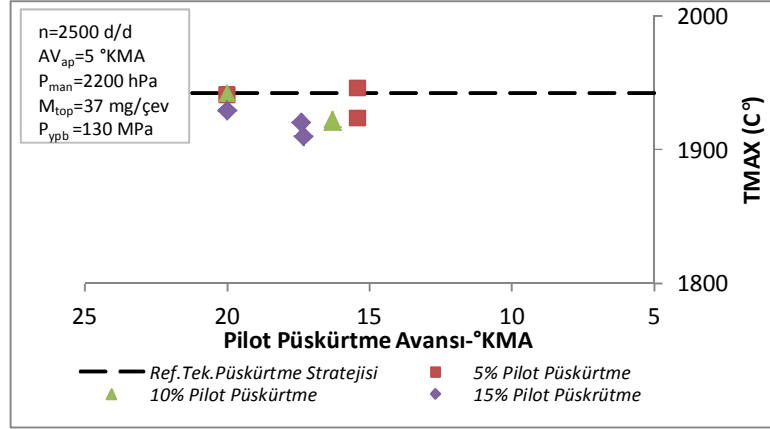
Şekil 6. 47 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 48 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değişimi

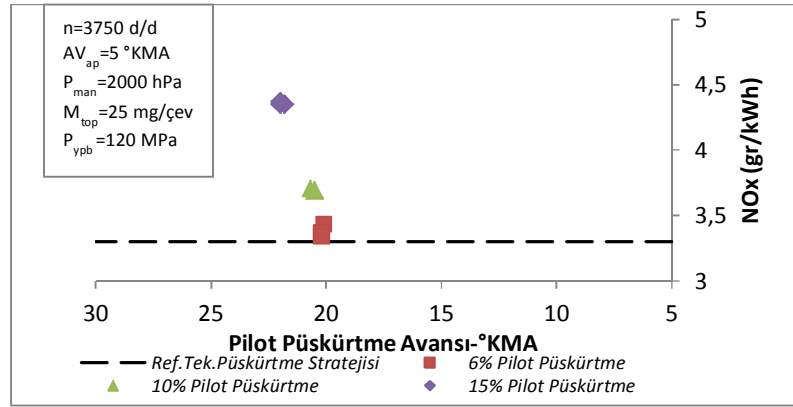


Şekil 6. 49 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=37 \text{ mg/çev}$, $P_{ypb}=130 \text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı P MAX değişimi

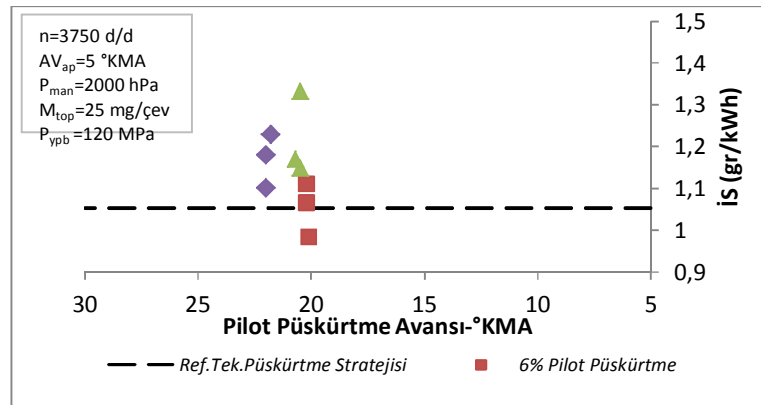


Şekil 6. 50 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı TMAX değişimi

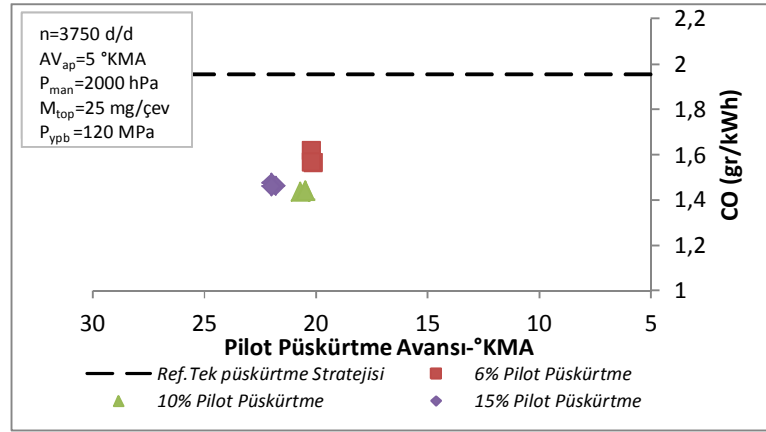
6.1.1.6 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa Şartında Yapılmış Olan Deneyler



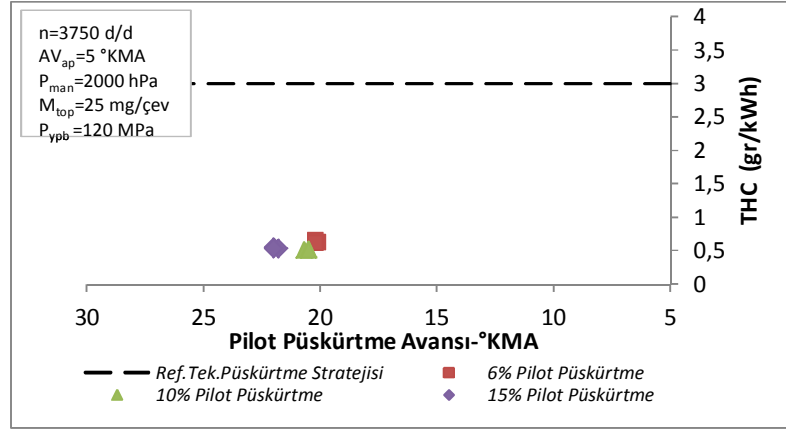
Şekil 6. 51 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



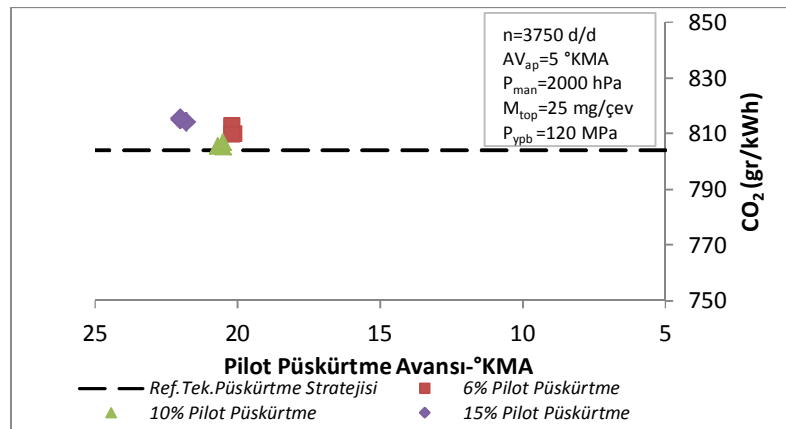
Şekil 6. 52 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı is değişimi



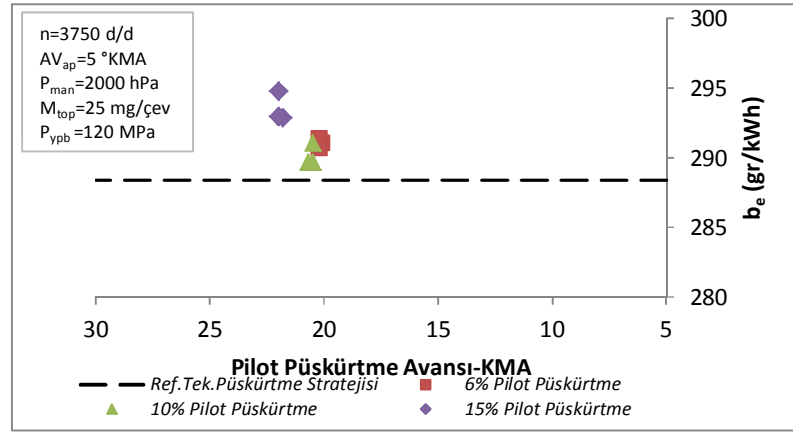
Şekil 6. 53 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi



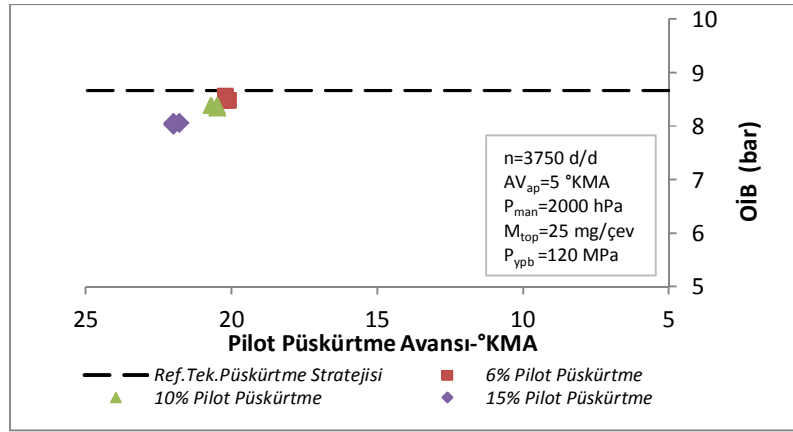
Şekil 6. 54 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı THC değişimi



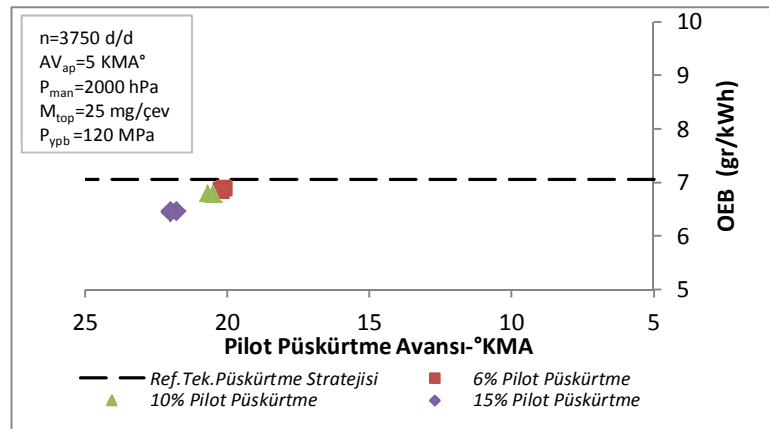
Şekil 6. 55 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO₂ değişimi



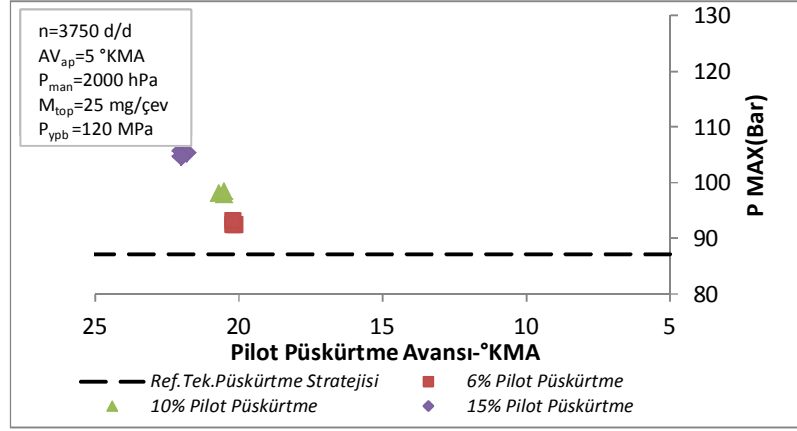
Şekil 6. 56 n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değışimi



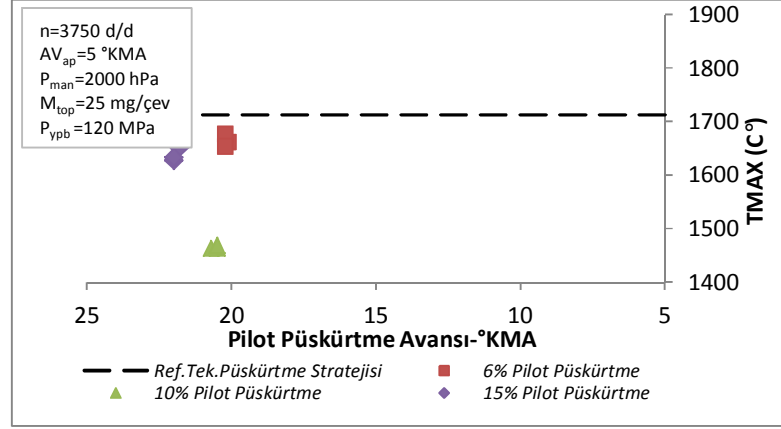
Şekil 6. 57 n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değışimi



Şekil 6. 58 n=3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OEB değışimi



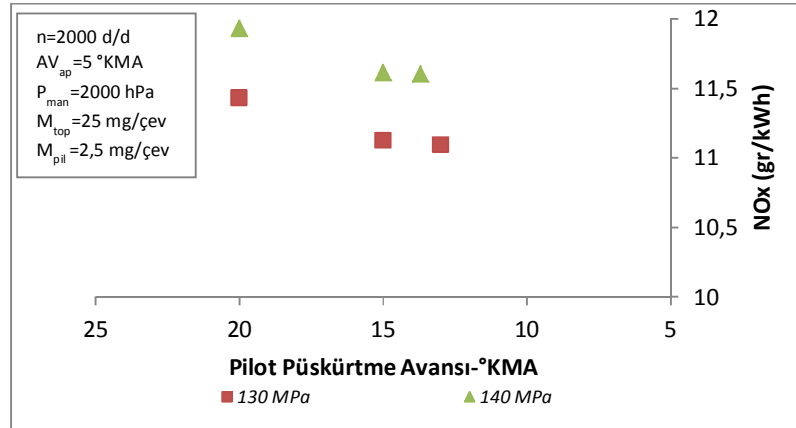
Şekil 6. 59 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı P MAX değişimi



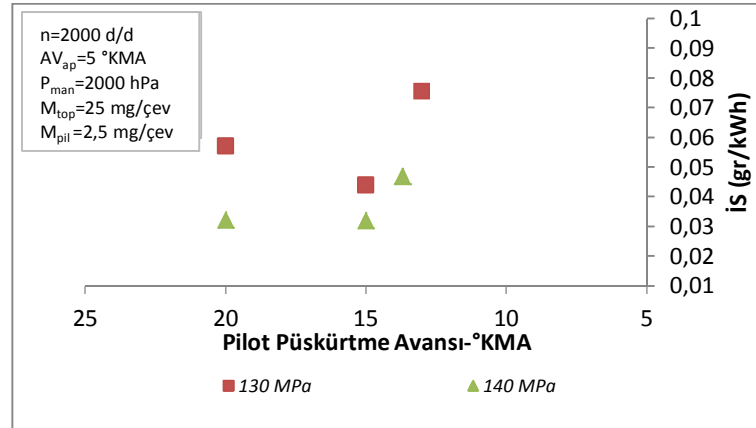
Şekil 6. 60 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı T MAX değişimi

6.1.2 Motor Performans Ve Emisyonlarının Pilot Püskürtme Avansına Ve Püskürtme Basıncı Parametresine Bağlı Olarak Değişimi

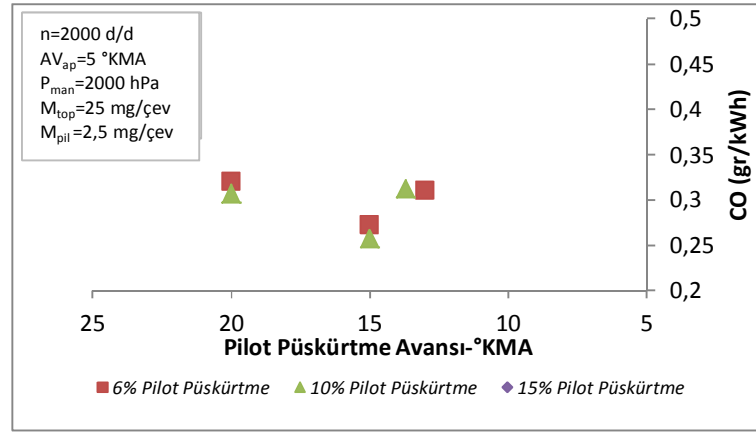
6.1.2.1 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler



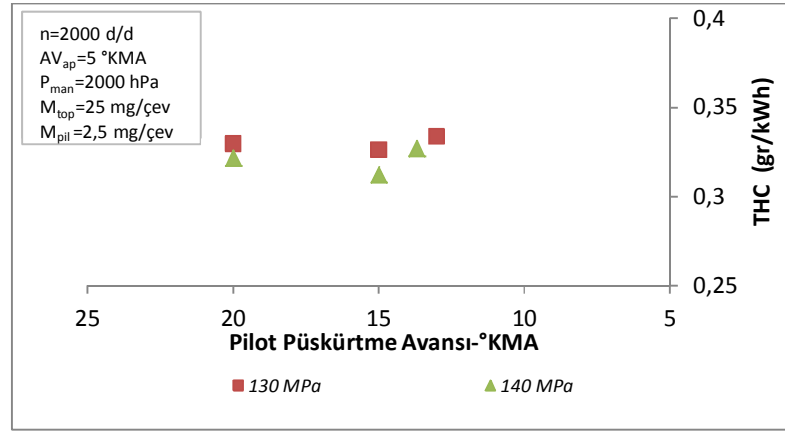
Şekil 6. 61 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi



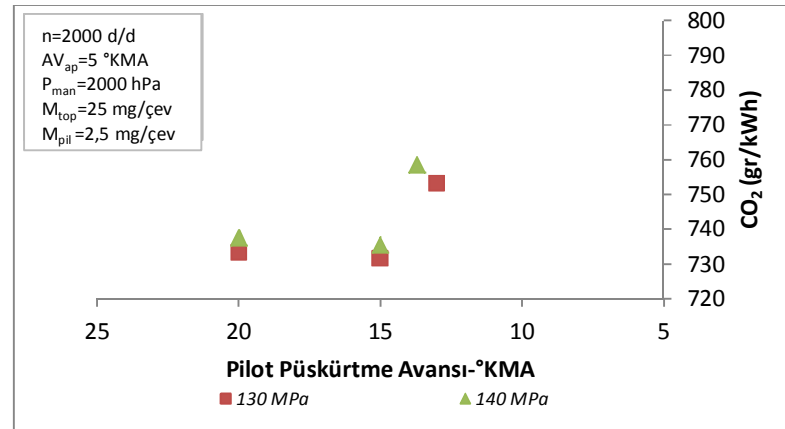
Şekil 6. 62 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $\dot{W}$ değişimi



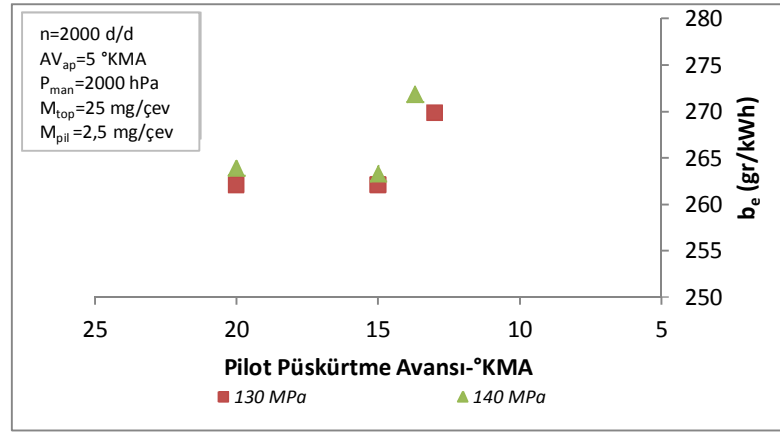
Şekil 6. 63 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



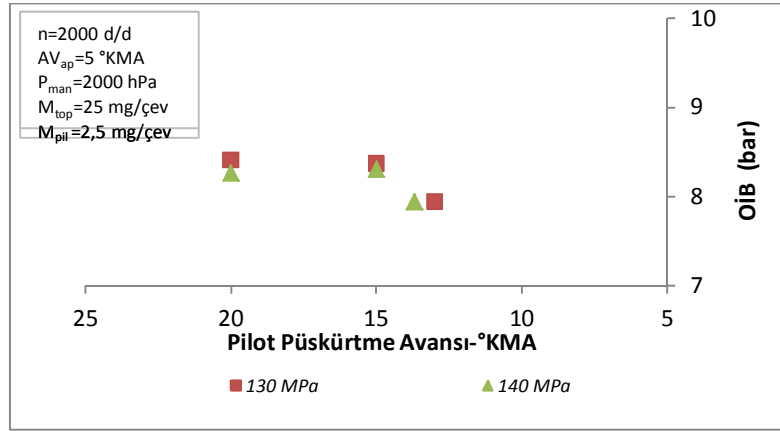
Şekil 6. 64 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi



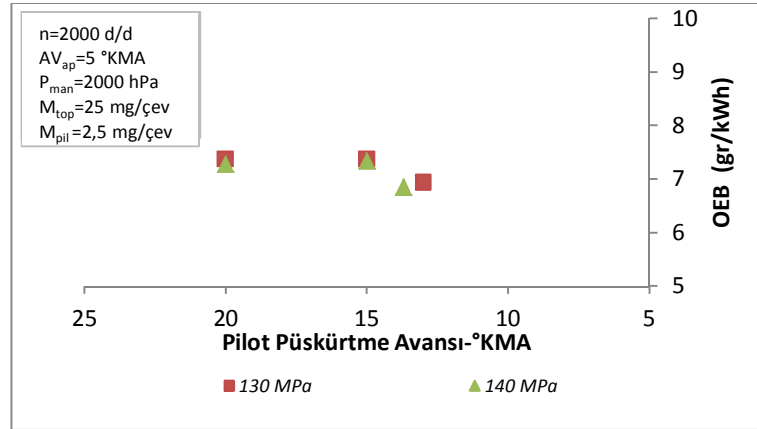
Şekil 6. 65 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO₂ değişimi



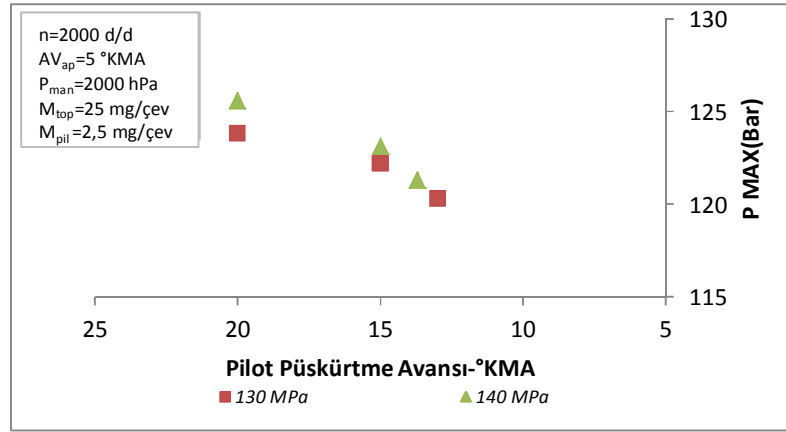
Şekil 6. 66 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,5 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi



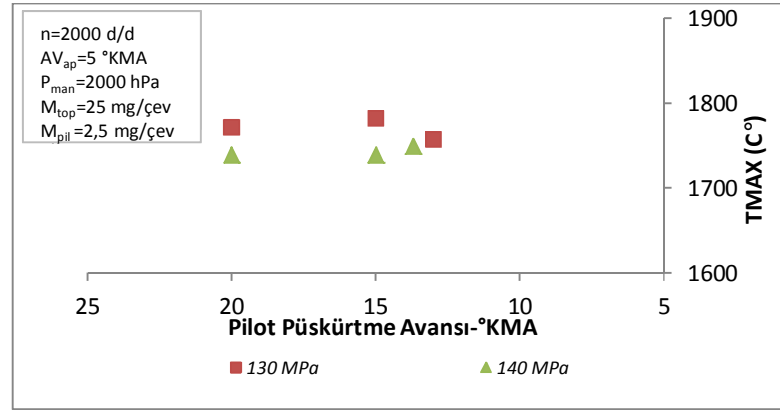
Şekil 6. 67 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,5 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OIB değişimi



Şekil 6. 68 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,5 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi

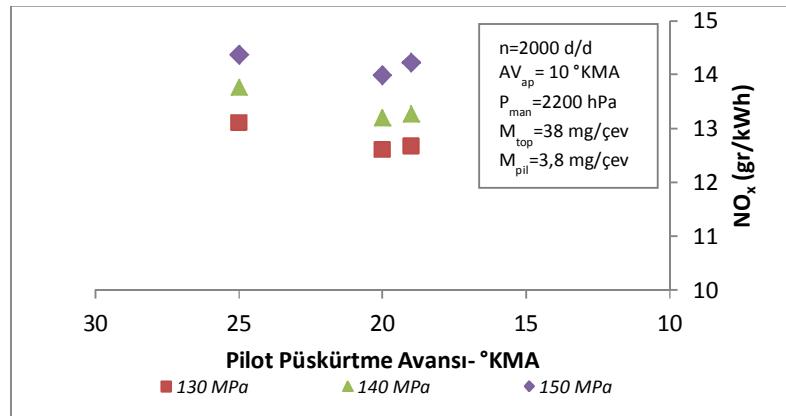


Şekil 6. 69 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,5 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı P_{MAX} değişimi

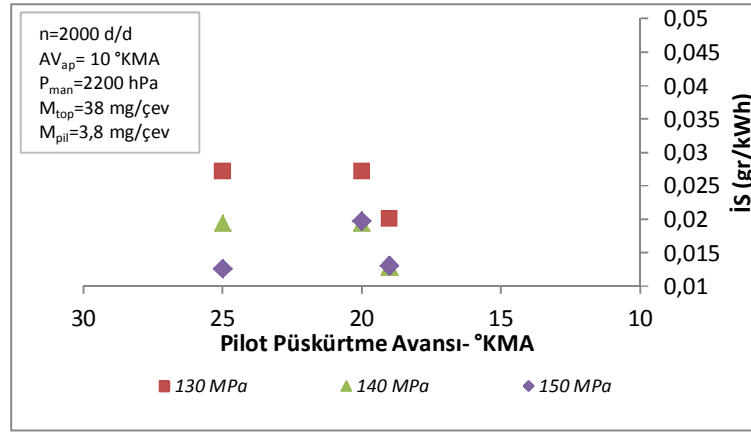


Şekil 6. 70 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2000 \text{ hPa}$, $M_{top}=25 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,5 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı T_{MAX} değişimi

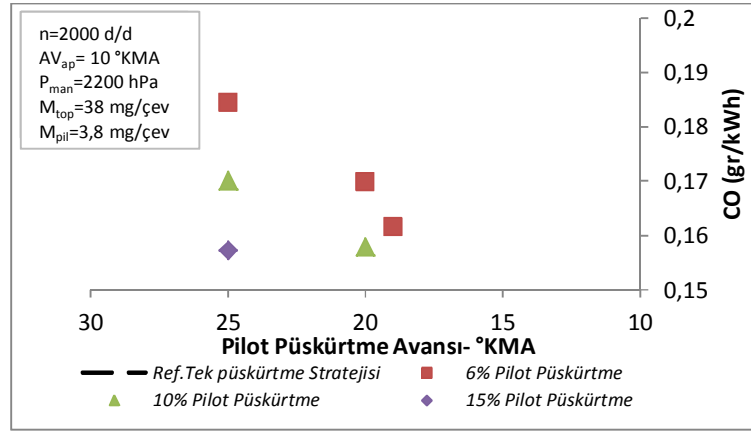
6.1.2.2 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8 \text{ mg/çev}$ Şartında Yapılmış Olan Deneyler



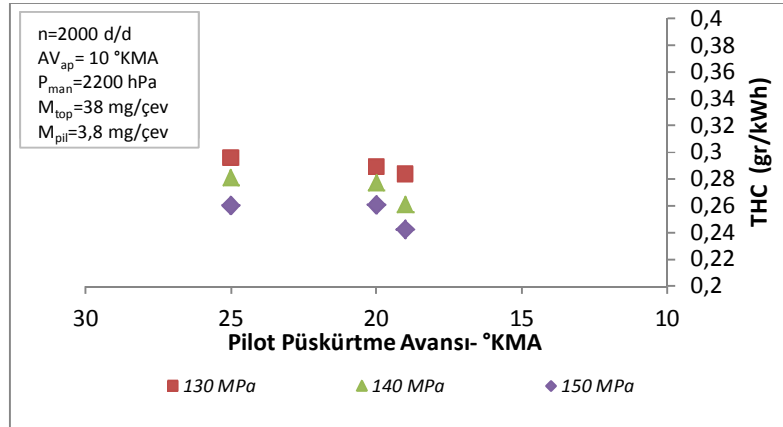
Şekil 6. 71 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi



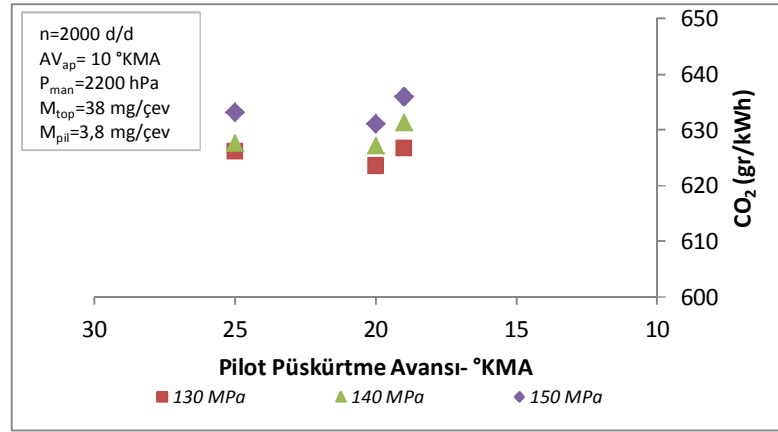
Şekil 6. 72 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı i_s değişimi



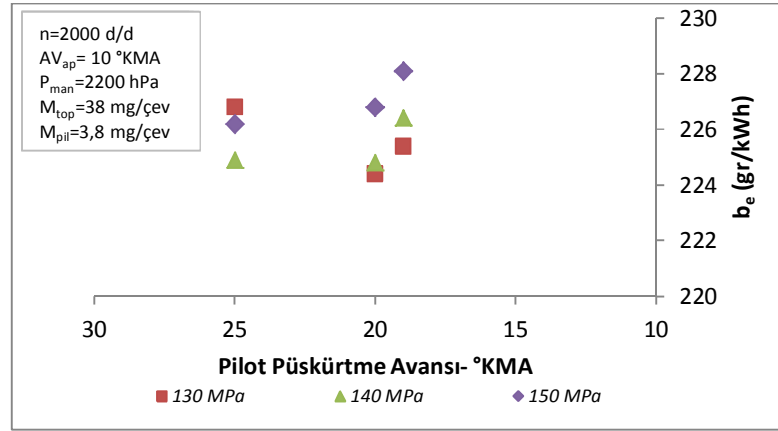
Şekil 6. 73 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



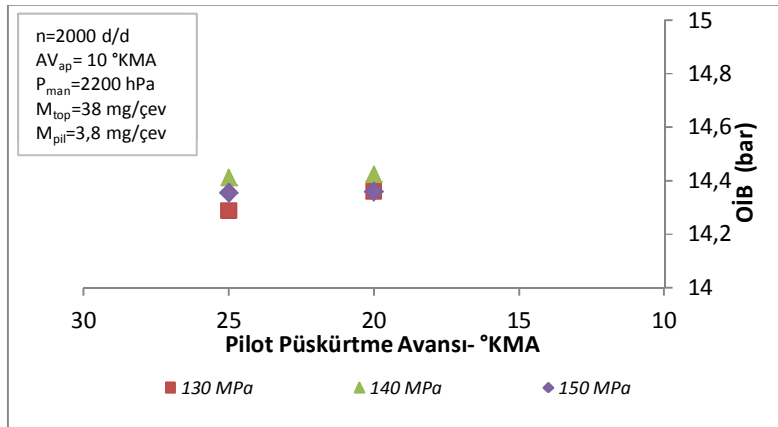
Şekil 6. 74 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ \text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi



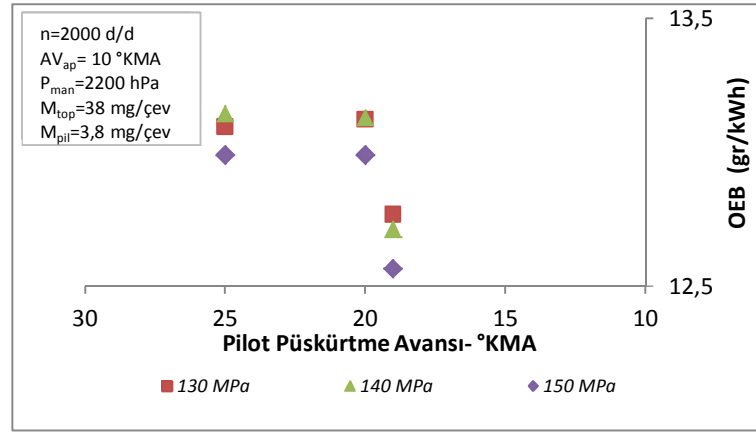
Şekil 6. 75 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO_2 değişimi



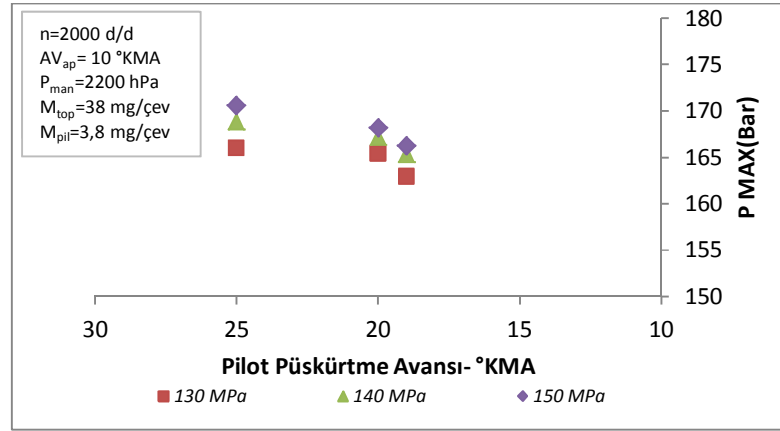
Şekil 6. 76 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi



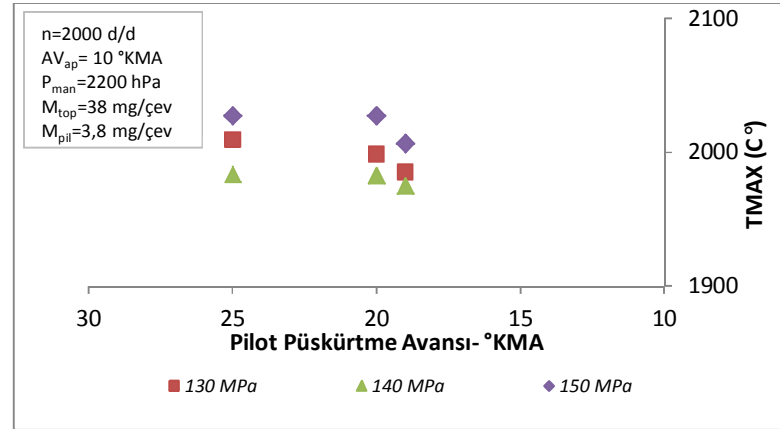
Şekil 6. 77 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 78 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8\text{mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi



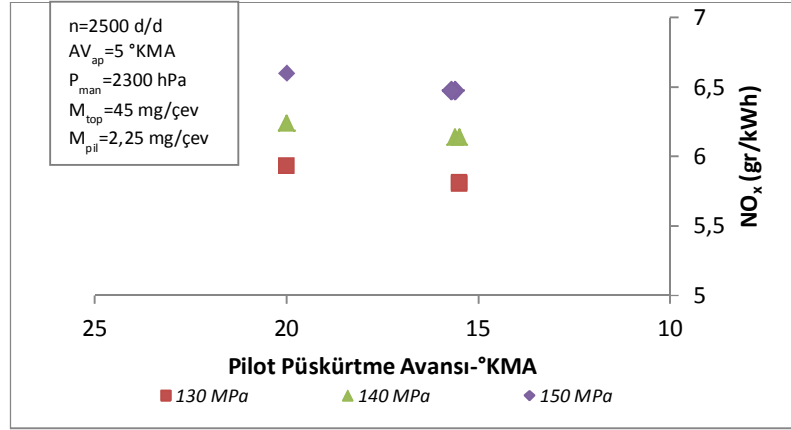
Şekil 6. 79 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8\text{mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı P MAX değişimi



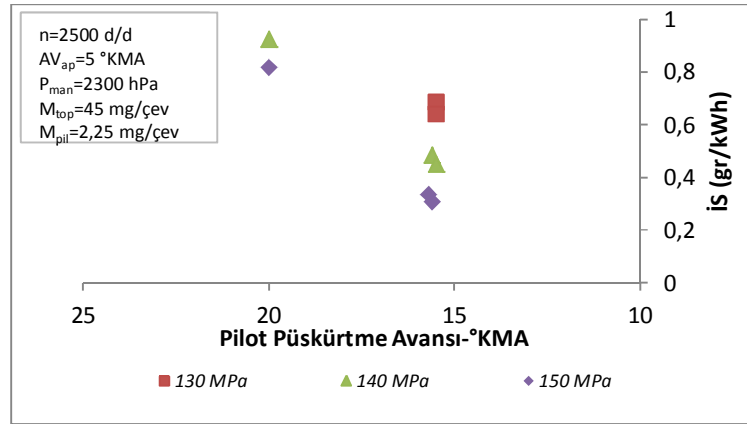
Şekil 6. 80 $n=2000 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2200 \text{ hPa}$, $M_{top}=38 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=3,8\text{mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi

6.1.2.3 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev

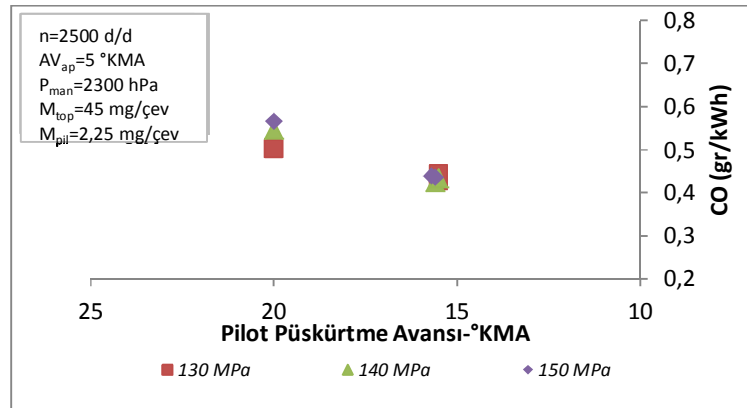
Şartında Yapılmış Olan Deneyler



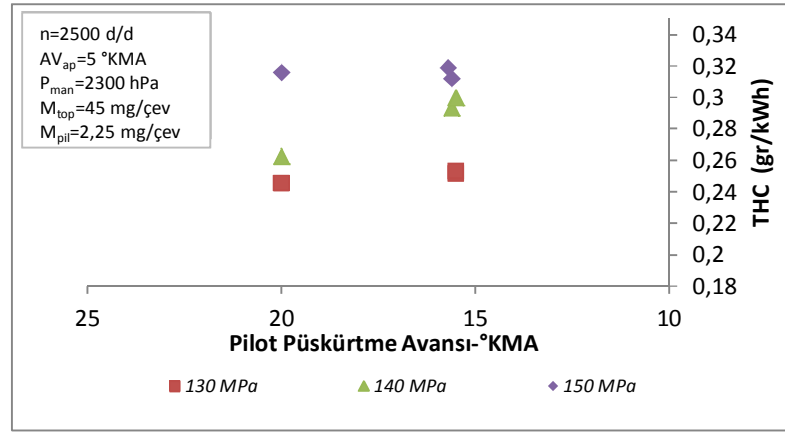
Şekil 6. 81 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi



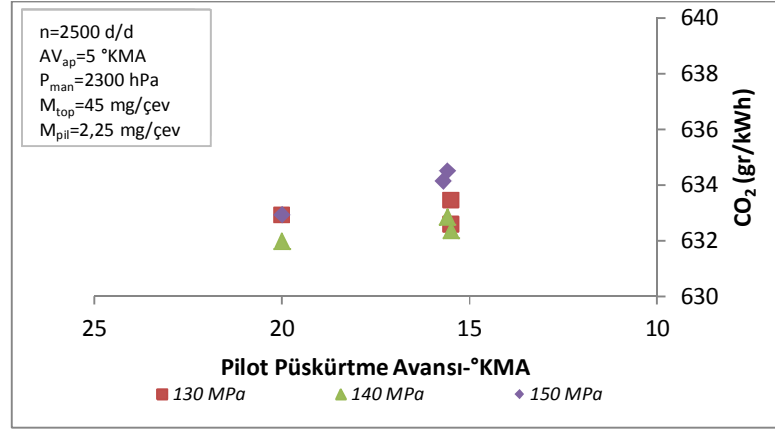
Şekil 6. 82 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $\dot{I}S$ değişimi



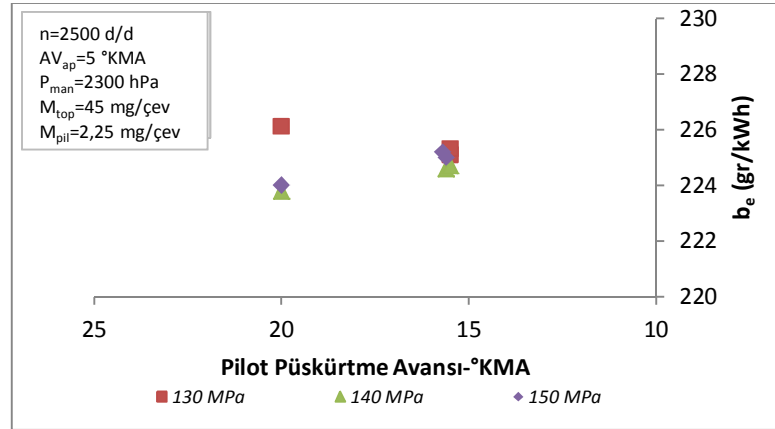
Şekil 6. 83 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



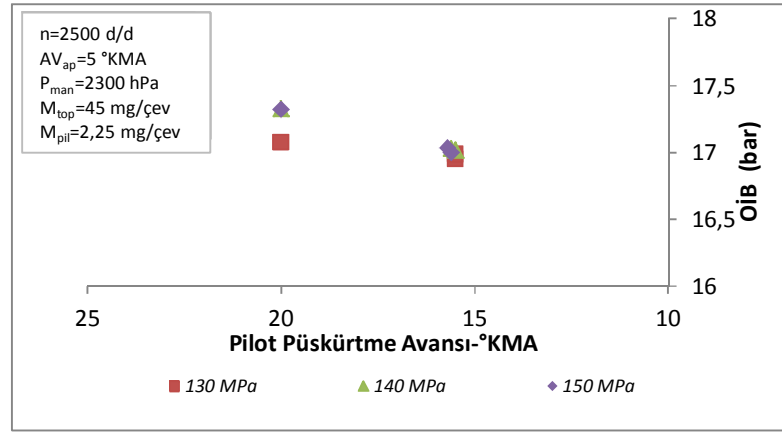
Şekil 6. 84 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi



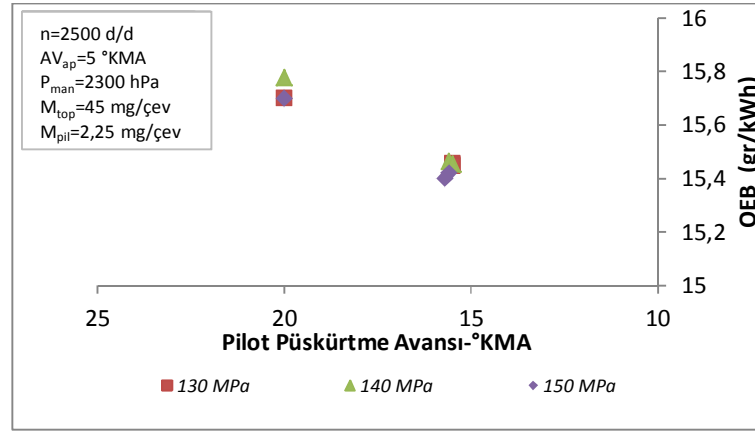
Şekil 6. 85 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO_2 değişimi



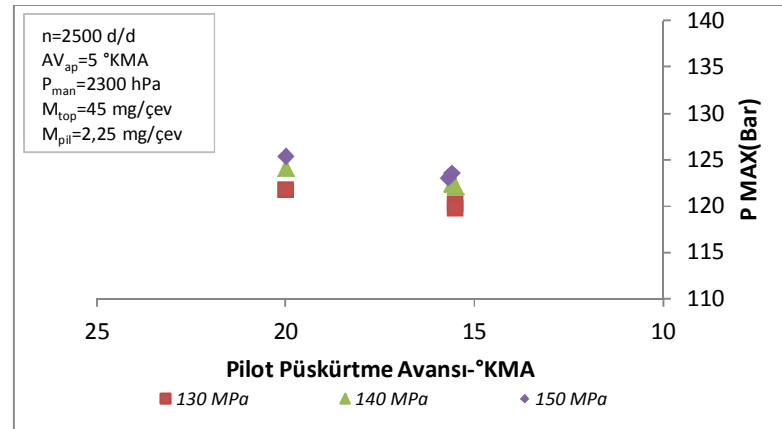
Şekil 6. 86 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi



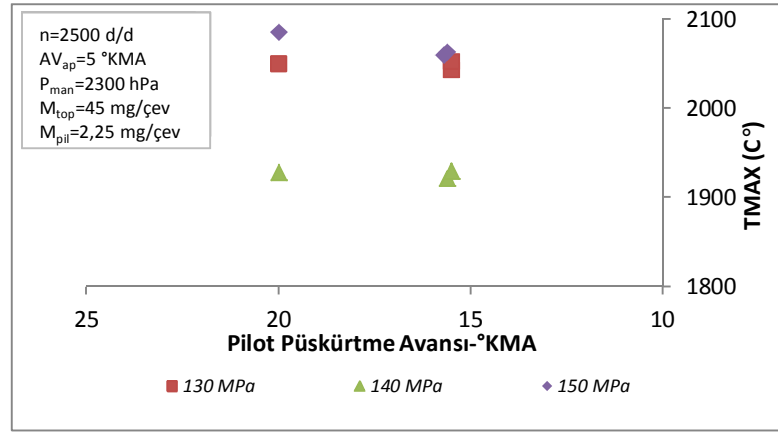
Şekil 6. 87 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2300 \text{ hPa}$, $M_{top}=45 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,25 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 88 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2300 \text{ hPa}$, $M_{top}=45 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,25 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi

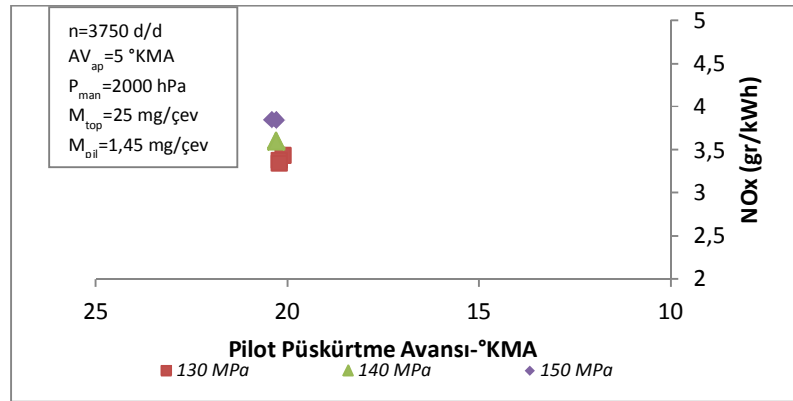


Şekil 6. 89 $n=2500 \text{ d/d}$, $AV_{ap}=5 \text{ °KMA}$, $P_{man}=2300 \text{ hPa}$, $M_{top}=45 \text{ mg/çev}$, $M_{pil}=2,25 \text{ mg/çev}$ şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı P MAX değişimi

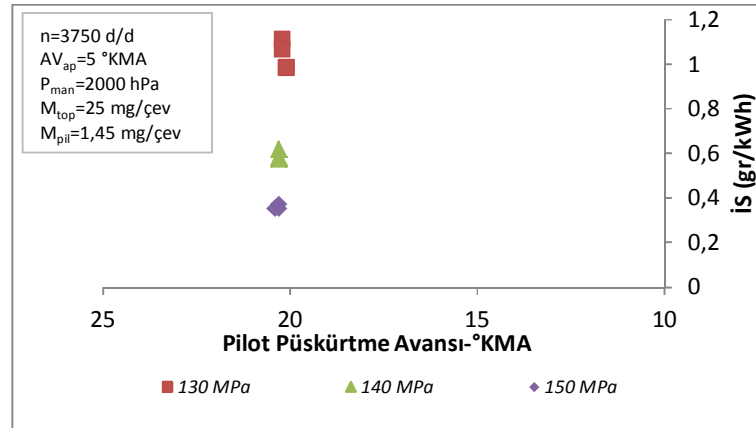


Şekil 6. 90 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi

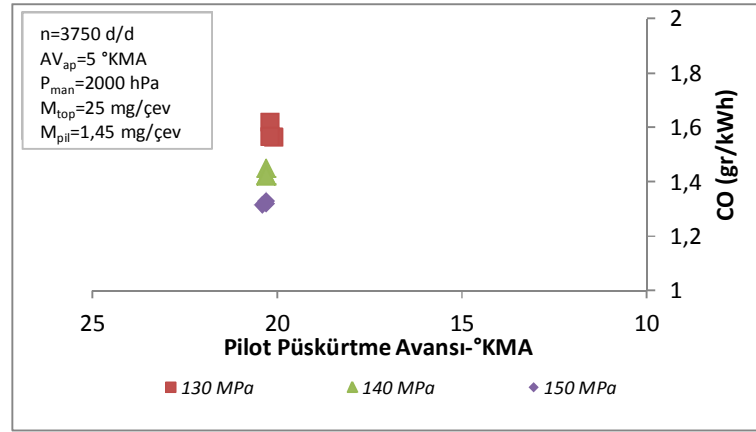
6.1.2.4 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev Şartında Yapılmış Olan Deneyler



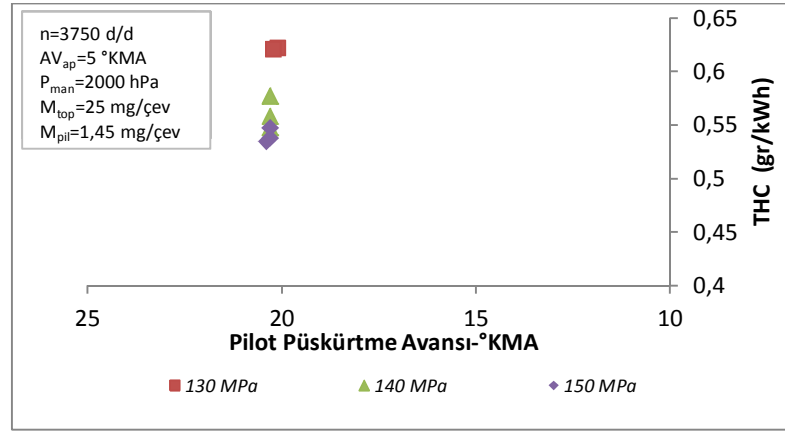
Şekil 6. 91 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi



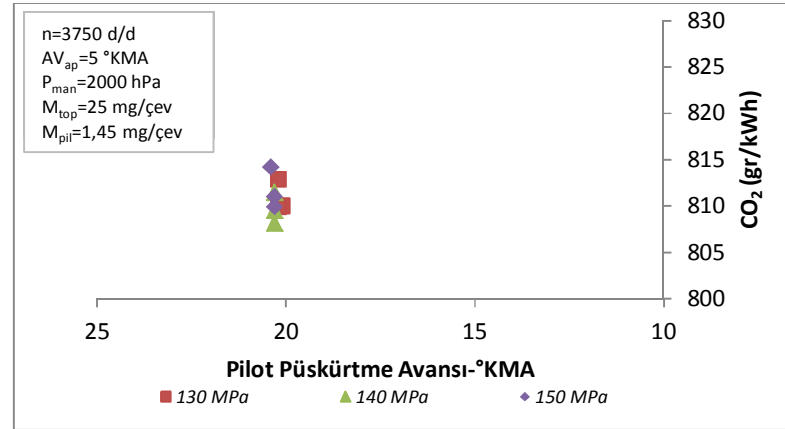
Şekil 6. 92 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı İS değişimi



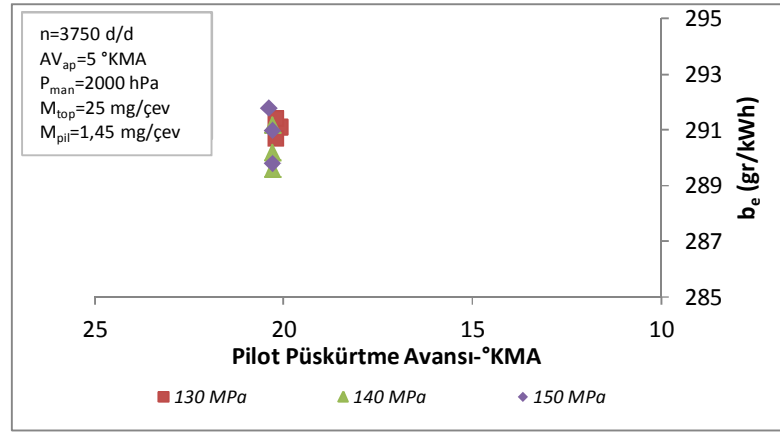
Şekil 6. 93 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



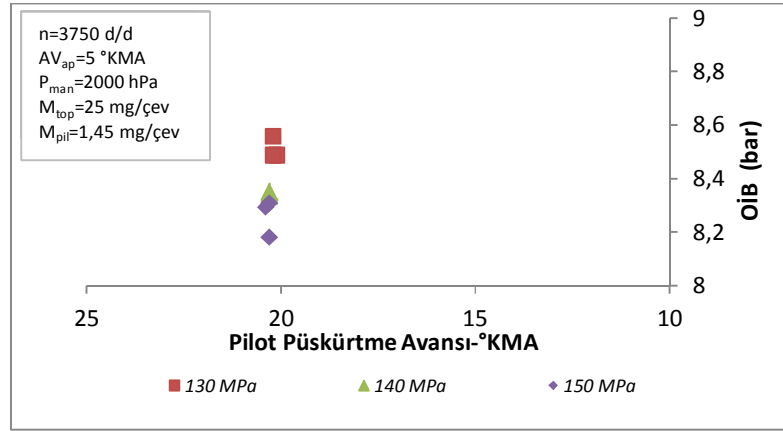
Şekil 6. 94 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı THC değişimi



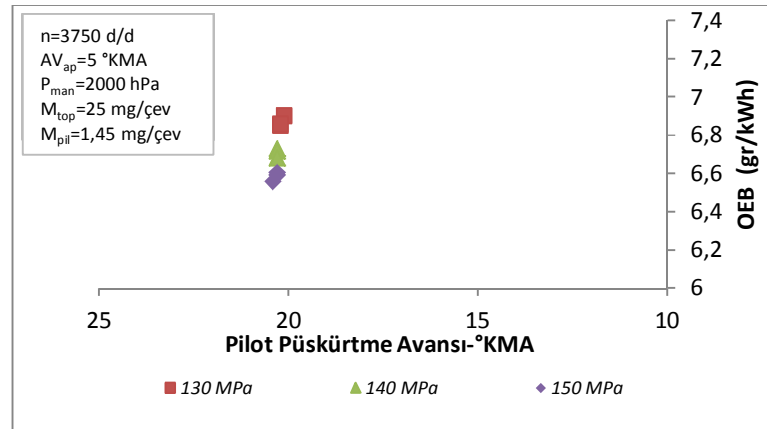
Şekil 6. 95 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO₂ değişimi



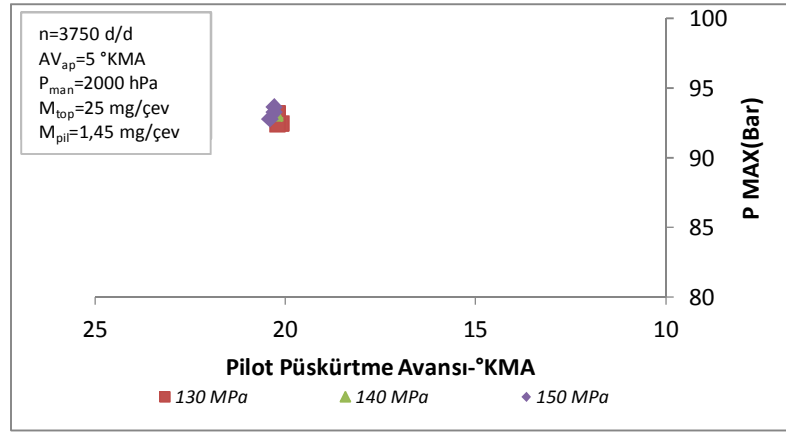
Şekil 6. 96 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi



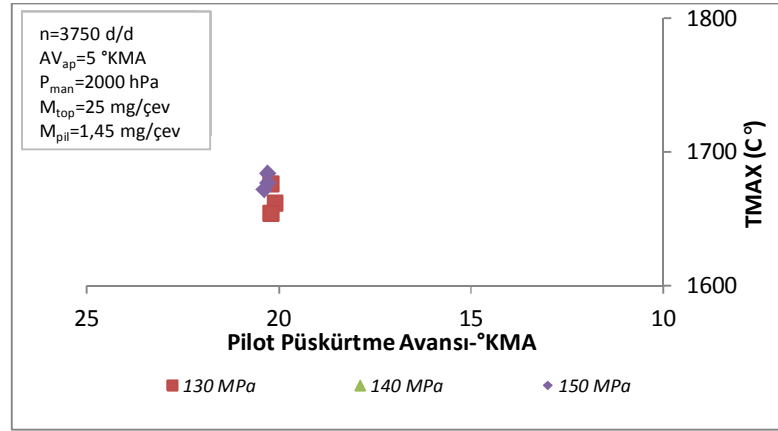
Şekil 6. 97 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 98 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OEB değişimi



Şekil 6. 99 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı P MAX değişimi



Şekil 6. 100 $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi

6.1.3 Deney Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

6.1.3.1 Deneylerde Elde Edilen NO_x Sonuçları

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için;

- i) 2000 d/d ve 2500 d/d yapılan ana püskürtme avansının 5 ve 10 ° KMA olarak değiştiği deneylerde toplam püskürtme kütlesinin 5–6%'sı kadar pilot püskürtme yapıldığı ve pilot püskürtme avansı ile ana püskürtme avansı arasındaki sürenin 20 °KMA ve daha az olduğu durumlarda tüm stratejilerin (2500 d/d 37 mg/çev stratejisi hariç) referans tek püskürtme stratejisine göre daha az NO_x emisyonu üretmiştir. 2500 d/d 37 mg/çev durumu için ise NO_x emisyonu çok az bir miktarda artmıştır.

- ii) 3750 d/d gerçekleştirilmiş olan deneylerin sonuçları incelendiğinde 6% pilot püskürtme yapılması durumlarında avans açısına bağlı olmaksızın NO_x emisyonlarının arttığı görülmüştür.
- iii) 2000 d/d, 2500 d/d ve 3750 d/d yapılan, ana püskürtme avansının 5,10 ° KMA olarak değiştiği ve toplam püskürtme kütlesinin 10 % ve 15 %'lik kısmının pilot püskürtme olarak sisteme sokulduğu deneylerde, tüm deneylerde açığa çıkan NO_x emisyonun pilot püskürtme avansına bağlı olmaksızın referans stratejiye göre artmıştır.
- iv) Aynı miktarda pilot püskürtme kütlesinin sisteme sokulduğu durumlarda, pilot püskürtme kütlesinin büyüklüğünden bağımsız olarak pilot püskürtme avansının öne çekilmesi ile birlikte açığa çıkan NO_x miktarının arttığı görülmüştür.

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için;

- i) 2000 d/d, 2500 d/d ve 3750 d/d yapılan deneylerde, toplam püskürtme kütlesinin, ana püskürtme avansının ve pilot püskürtme kütlesinin sabit tutularak yapılan karşılaştırmalarda püskürtme basıncının artışı ile birlikte tüm durumlarda NO_x emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir.
- ii) 2000 d/d, 2500 d/d ve 3750 d/d yapılan deneylerde, toplam püskürtme kütlesinin, ana püskürtme avansının ve pilot püskürtme kütlesinin sabit olduğu durumlarda aynı püskürtme basıncının uygulandığı stratejilerde pilot püskürtme avansının öne alınması ile birlikte NO_x emisyonlarının artmıştır.

6.1.3.2 Deneylerde Elde Edilen NO_x Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Toplam püskürtülen yakıt miktarı sabit kalmak şartı ile pilot püskürtmenin yapıldığı durumlarda, pilot püskürtmenin ardından yapılan ana püskürtmenin TG'si, tek püskürtme yapılan referans stratejilerde ki ana püskürtme için elde edilen TG değerlerinden daha düşüktür. Diğer bir ifadeyle pilot püskürtmenin yapılması tüm şartlarda ana püskürtmenin TG'sini kısaltmıştır. TG'nin kısalma etkisini verilmiş olan HRR diyagramlarındaki ana püskürtme etkisinin HRR'sinin yükseliş eğrisinden de görmek de mümkündür. Deneylerde sonucunda elde

edilen TG'nin kısıltma etkisi literatür de elde edilmiş olan sonuçlarla uyum içerisinde [22] ,[87]. Yapılmış olan pilot püskürtmenin yanması silindir içi sıcaklığını yükseltmektedir. Pilot püskürtmenin ardından yapılan ana püskürtme de sıcaklığı yükselmiş bu ortama püskürtüldüğünden, daha kısa sürede yanmaktadır. Silindir içi sıcaklık grafikleri incelendiğinde, pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda ana püskürtmenin yapıldığı °KMA'da silindir içi sıcaklığının tek püskürtme stratejisinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

- b) TG'nin düşmesi ana püskürtmenin ön karışimli fazında yanan toplam yakıt miktarının da düşmesine yol açmıştır ki bu nedenle pilot püskürtme yapılan tüm HRR grafiklerinde HRR pikinin düştüğü görülmektedir.
- c) TG'nin düşmesi ile birlikte, tek püskürtme stratejisi ile karşılaştırıldığında daha az miktarda yakıt NO_x oluşumunda en önemli safha olan ön karışimli yanma aşamasına katılmaktadır. Daha az miktarda yakıtın ön karışimli yanması, buna ek olarak HRR pikinin düşmesi nedeni ile pilot püskürtme yapılan stratejide azalan alev sıcaklığı nedeni ile ortaya çıkan NO_x miktarı düşmektedir.
- d) NO_x emisyonu grafikleri incelendiğinde, pilot püskürtmenin uygulanması hedef olan NO_x azaltımını sağladığı gibi, uygulanmış olan bazı stratejilerde beklenenin aksine NO_x emisyonlarının arttığı görülmüştür. Şekil 6.1-11-21-31-41 incelendiğinde ilgili motor işletme şartlarında 6% pilot püskürtme şartlarının hepsinde bütün pilot avans değerleri için NO_x emisyonlarının azaldığı görülmüş olsa da, 10% ve 15 % pilot püskürtme stratejileri bütün pilot püskürtme için NO_x emisyonlarının arttığı, Şekil 6.51 deki stratejide ise bütün motor işletme şartları için pilot püskürtmenin NO_x emisyonlarını arttığı görülmüştür. Pilot püskürtme miktarı arttırıldıkça NO_x emisyonlarının artışı beklenen bir sonuçtur [88], [89] . Genel eğilim olarak pilot püskürtme kütlesi sabit tutulmak şartı ile pilot püskürtme avansı ana püskürtmeden geriye doğru çekildikçe NO_x emisyonlarının çok az bir miktar artma eğiliminde olduğu görülmüştür. NO_x emisyonunun arttığı stratejiler incelendiğinde, tüm stratejilerde TG'nin düştüğü buna bağlı olarak HRR değerinin de maksimum değerinin düştüğü, aynı miktarda pilot püskürtmenin daha erkene çekildiği stratejilerde HRR pikinin

diğer pilot püskürtmeli şartlara göre düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Diğer bir ifade ile ön karışimli yanma fazında yanan yakıt miktarı azalmış ve TG düşmüş olmasına rağmen NO_x miktarı artmıştır. Literatürde yapılan incelemede [10] , [87] pilot püskürtme uygulamalarında her zaman NO_x emisyonlarını düşürmediği ve aksine belirlenen pilot püskürtme stratejisine bağlı olarak NO_x emisyonlarını artırabileceğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni ise pilot püskürtmenin kütlesinin toplam püskürtülen yakıt miktarı ile karşılaştırıldığında her ne kadar düşük olsa da pilot püskürtme kendi ürettiği NO_x emisyonlarının sistemden toplam çıkan NO_x emisyonlarını arttırması olarak göstermişlerdir Okude vd.[10] bu etkiyi, yüksek miktarda pilot püskürtme yapıldığı durumlarda püskürtmenin yapıldığı an ile yanmanın başladığı an arasındaki kısa sürede yetersiz karışma sonucunda pilot püskürtme spreynin içerisindeki yüksek miktarda stokiometrik oranda yakıt bulunmasından dolayı çabuk yanmaya ve daha yüksek NO_x seviyelerine sebep olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar spreyn iç kısmındaki hava fazlalık katsayısının değişimin araştırmışlardır. Yapılan inceleme neticesinde ÜÖNÖ 30°KMA şartında yapılan püskürtme de, pilot püskürtmenin tutuşmaya başladığı anda spreyn içerisinde $\lambda \leq 1.6$ şartını sağlayan (Tanaka [90] tarafından NO_x oluşumu için belirlenmiş olan kriter) kütle oranının 10%, pilot püskürtmenin ÜÖNÖ 20 °KMA şartında yapıldığı durumda ise $\lambda \leq 1.6$ şartını sağlayan bu kütle oranının 30% civarında olduğu görülmüştür ki buda erken pilot püskürtme stratejisinde pilot püskürtme tutuşmasının fakir, geç pilot püskürtme esnasında ise pilot püskürtme tutuşmasının görece olarak zengin spreyn karışımı ortamında gerçekleşmesini ve dolayısıyla daha yüksek ısı açığa çıkış oranı ve NO_x emisyonu artışını açıkladığını belirtmişlerdir.

- e) Diğer tüm işletme parametrelerinin aynı bırakılarak, püskürtme basıncının arttırıldığı tüm stratejilerde NO_x emisyonlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. NO_x emisyonlarının tüm deneyler için artış gösteriyor olması literatür ile uyumlu bir sonuç olarak karşımıza çıkmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça spreyn atomizasyonu iyileşmekte, başlangıç aşamasında ve devam eden sürede (aynı sürede daha fazla yakıt içeri girdiğinden) ön karışimli yanma safhasında ısı açığa çıkış hızı ve HRR piki yükselmekte ve daha hızlı bir yanma meydana geldiği, lokal

sıcaklıkların arttığı, toplam yanma süresinin kısaldığı ve bunun pik basıncı artırdığı, düşük püskürtme basınçlı durumlarda yanma prosesinin ilk aşamalarında sistemin içerisinde bulunan yakıtın az olmasından ötürü pik basıncın düştüğü, daha yüksek devirlerde içerdeki hava miktarının artmasından ötürü, silindir içi basınç yükselme etkisinin azalmaktadır [25] , [91]

6.1.3.3 Deneylerde Elde Edilen İS Emisyonu Sonuçları

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneyde 6% pilot püskürtmenin $20^{\circ}KMA$ pilot püskürtme ile yapıldığı strateji hariç, tüm pilot püskürtme avans ve kütlelerinde, is emisyonunun aynı miktarda kütlenin tek püskürtme stratejisi olarak sisteme sokulduğu durumlarda elde edilen is emisyonlarına göre artmıştır. Aynı şartta 6% pilot püskürtmenin $20^{\circ}KMA$ stratejisi ile uygulandığı stratejide ise emisyonları tek püskürtme referans stratejisine göre 50% azalmışlardır.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerin tümünde, is emisyonunun pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans deneyinde elde edilmiş olan veriye göre arttığı görülmüştür.
- iii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerin tümünde, is emisyonunun pilot püskürtme avansına ve kütlesinden bağımsız olarak, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans deneyinde elde edilmiş olan veriye göre arttığı görülmüştür.
- iv) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, 5% pilot püskürtmenin $20^{\circ}KMA$ avans açısında uygulandığı strateji hariç is emisyonlarının aynı işletme şartlarında yapılmış olan is emisyonlarına göre arttığı görülmüştür.

- v) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerinde tümünde is emisyonlarının, pilot püskürtme kütlesinden ve pilot püskürtme avansından bağımsız olarak aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme stratejisinde elde edilen değere göre azalmıştır.
- vi) $n=3750$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerin tümünde is emisyonları; 6% pilot püskürtmenin $20^{\circ}KMA$ avans ile uygulandığı strateji şartı haricinde arttığı görülmüştür.

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncının değişimi için;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerin hepsinde pilot püskürtme avansına bağlı olmaksızın tüm deney şartları için püskürtme basıncı arttıkça is emisyonları azalmıştır.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde püskürtme basıncının 130 MPa dan 140 ve 150 MPa arttırılması tüm şartlar için is emisyonlarını azalmıştır. Bu işletme şartında pilot püskürtme avansının 140 MPa dan 150 MPa çıkarılması $25^{\circ}KMA$ stratejisi durumunda is emisyonlarını azaltırken, pilot püskürtme avansının $20^{\circ}KMA$ olması durumunda ise basıncın 140 MPa'dan 150 MPa'a yükselmesi durumunda is emisyonlarının hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür.
- iii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerin is emisyon neticeleri incelendiğinde, tüm deney şartları için püskürtme basıncının arttığı tüm şartlarda is emisyonlarının düştüğü gözlemlenmiştir.
- iv) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerin is emisyon neticeleri incelendiğinde, tüm deney şartları için püskürtme basıncının arttığı tüm şartlarda is emisyonlarının düştüğü gözlemlenmiştir.

6.1.3.4 Deneylerde Elde Edilen İS Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Pilot püskürtme yapılan şartlar incelendiğinde aşağıda genel olarak (birkaç istisnai şart haricinde) is emisyonlarının pilot püskürtme uygulaması ile birlikte arttığı görülmüştür. Pilot püskürtme yapılan şartlarda is emisyonlarının artması literatürde yayımlanmış olan sonuçlarla genel itibari uyum içerisindedir. Pilot püskürtmenin yapılması TG'yi kısalttığından ve ön karışimli fazda yanan yakıt miktarı azaldığından dolayı, referans stratejilerle karşılaştırıldığında yakıtın daha büyük miktarda kısmi difüzyonlu yanma fazında yanmaktadır ve dolayısıyla yanan yakıt ortamına püskürtülen daha fazla yakıt miktarı yakıt ile havanın yetersiz karışma etkisinden dolayı is oluşumunu tetiklemektedir [10], [88].
- b) Erken pilot püskürtmelerde; püskürtmenin silindir duvarına çarpma etkisi çok daha belirgin olduğundan *(buna ek olarak silindir içerisindeki basınç düşük olduğundan spreyn penetrasyonu daha fazla olabildiğinden)* is miktarında da ki artış diğer stratejilere göre daha fazla olmuştur. Bu sonuç literatürde elde edilmiş olan sonuçlar [92] no'lu referansla uyum içerisindedir[92].
- c) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde ise tüm şartlar için is miktarının azaldığı görülmüştür. Ön karışimli yanma fazında artan yakıt miktarın artması nedeniyle azalan ana püskürtme miktarı ve silindir içi sıcaklığı Azot oksit emisyonlarını arttırırken is emisyonlarını azaltıcı yönde etki göstermiştir.
- d) Püskürtme basıncının artması ile birlikte iyileşen pülverizasyon neticesindeki artan oksidasyona bağlı olarak is emisyonlarında azalma görülmüştür. Elde edilen sonuçlar [25] no'lu literatür ile uyum içerisindedir .

6.1.3.5 Deneylerde Elde Edilen CO Emisyonu Sonuçları

a) Pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, pilot püskürtme avansının $20^{\circ}KMA$ olduğu tüm şartlarda CO emisyonları referans tek püskürtme stratejisine göre az bir miktar artmıştır. Pilot püskürtme avansının $15^{\circ}KMA$ olarak

uygulandığı stratejilerde 6% ve 10% pilot püskürtme durumlarında CO emisyonlarının referans tek püskürtme stratejisine göre az bir miktar düştüğü gözlemlenirken, 15% pilot püskürtme yapılan durumlarda ise CO emisyonlarının referans stratejiye göre hemen hemen aynı kaldığı, 13°KMA pilot püskürtme avansı uygulanan stratejilerde ise pilot püskürtme uygulanan tüm stratejilerde CO emisyonlarının referans stratejiye göre arttığı görülmüştür.

- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000\text{ hPa}$, $M_{top}=25\text{ mg/}\text{}\text{cev}$, $P_{ypb}=140\text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde, 15°KMA pilot püskürtme avansı ve 6–10% pilot püskürtme kütlelerinde pilot püskürtme yapıldığı durumlar haricinde tüm deney şartlarında CO emisyonları referans tek püskürtme stratejisine göre artmıştır. 6-10% pilot püskürtme kütlelerinin ve 15°KMA avans açısında uygulandığı stratejilerde ise CO emisyonlarında referans stratejiye göre azalma görülmüştür.
- iii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000\text{ hPa}$, $M_{top}=25\text{ mg/}\text{}\text{cev}$, $P_{ypb}=120\text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde 20 ve 25 °KMA pilot püskürtme stratejilerinin uygulandığı tüm durumlarda, CO emisyonları referans tek püskürtme stratejisine göre artmıştır. 6% pilot püskürtme kütlelerinde ve 17 °KMA pilot avansı stratejisinde ise CO miktarı referans strateji ile aynı kalırken, 17°KMA pilot püskürtme avansında 10% pilot püskürtme yapılması durumunda CO avansı referans tek püskürtme stratejisine göre çok az artmıştır.
- iv) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000\text{ hPa}$, $M_{top}=28\text{ mg/}\text{}\text{cev}$, $P_{ypb}=120\text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlelerinden bağımsız olarak tüm deney şartlarında CO emisyonları aynı işletme şartlarında ve aynı ana püskürtme avansında yapılmış olan tek püskürtme stratejisine göre azalmıştır.
- v) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $P_{man}=2000\text{ hPa}$, $M_{top}=37\text{ mg/}\text{}\text{cev}$, $P_{ypb}=120\text{ MPa}$ şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlelerinden bağımsız olarak tüm deney şartlarında CO

emisyonları aynı işletme şartlarında ve aynı ana püskürtme avansında yapılmış olan tek püskürtme stratejisine göre azalmıştır.

vi) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütesinden bağımsız olarak tüm deney şartlarında CO emisyonları aynı işletme şartlarında ve aynı ana püskürtme avansında yapılmış olan tek püskürtme stratejisine göre azalmıştır.

b) Pilot püskürtme avansına ve püskürtme basıncı değişimi için;

i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansının 15 ve 20 KMA olduğu stratejilerde püskürtme basıncının artması ile birlikte CO emisyonlarının düştüğü görülmüştür.

ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde uygulanan tüm stratejiler için püskürtme basıncın artışı ile birlikte CO emisyonlarının azaldığı görülmüştür.

iii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansının $20^{\circ}KMA$ olduğu stratejilerde püskürtme basıncı arttıkça CO miktarının azaldığı, ancak $15^{\circ}KMA$ pilot püskürtme avansının uygulandığı stratejilerde basıncın artışı ile birlikte CO'nun değişmediği görülmüştür.

iv) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan tüm deneylerde pilot püskürtme basıncı arttıkça CO miktarının azaldığı görülmüştür.

6.1.3.6 Deneylerde Elde Edilen CO Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

a) 2000 d/d da gerçekleştirilen pilot püskürtme stratejilerinde genel eğilimin CO emisyonu değerinin yükselmesi yönünde olduğu, CO emisyonu değerinin aynı bırakılması ya da çok az bir miktarda düşümünün sağlanabilmesi için en uygun

pilot püskürtme avansının ana püskürtme avansından 10 °KMA kadar uzaklaştırıldığı durumlar olduğu görülmüştür.

- b) 2500 d/d ve 3750 d/d yapılan deneler incelendiğinde ise tüm durumlarda CO emisyonlarının referans stratejiye göre azaldığı gözlemlenmiştir.
- c) CO emisyonlarının oluşumu ana olarak hava fazlalık katsayısı ile ilişkilidir. Fakir karışım ile çalışan diesel motorlarında çok yüksek miktarlarda değillerdir [55]. Yakıtın oksidasyon hızı oksijen konsantrasyonuna, gazların sıcaklığına ve reaksiyon oluşması için kalan zamana bağlıdır. Diesel motorları fakir karışım ile çalışırlar bu nedenle CO emisyonları diesel motorlarında çok daha düşüktür. Bununla birlikte karışımın homojen olmaması, yerel oksijen noksanlığı, farklı sıcaklık seviyeleri ya da farklı bölgelerdeki sıcaklıkların yanmayı CO₂ formunda tamamlayamayacak değerde oluşu CO emisyonuna neden olur [93]. Deneye sonuçları incelendiğinde CO emisyonlarında gözlemlenen düşme ve artışların çok düşük miktarlarda olduğu 0.5-1 gr/kWh civarında olduğu ve pilot püskürtme durumunda da tek püskürtme stratejisinde elde edilmiş olan değerlere çok yakın değerler elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Netice olarak pilot püskürtmenin CO emisyonları üzerine etkisi çok fazla olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.1.3.7 Deneylerde Elde Edilen Özgül Yakıt Sarfiyatı (b_e) Sonuçları

a) Pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesine değişimi için;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, b_e 'nin pilot püskürtme yapılan tüm stratejilerde aynı işletme şartlarında ve aynı toplam miktarda gerçekleştirilmiş olan referans tek püskürtme stratejisine göre arttığı görülmüştür. b_e 'nin referans stratejiye göre en düşük artışı 6% pilot püskürtme kütlesinin 13,15,20°KMA pilot püskürtme avansı uygulandığı stratejilerde görülmüş olup, 6% pilot püskürtme kütlesinin 15,20°KMA pilot püskürtme avansında sisteme sokulması durumunda elde edilen b_e değerleri hemen hemen aynı olsa da, pilot püskürtme avansının 13 °KMA 'ya

ötelenmesi ile b_e miktarı artmıştır. % 10 ve 15% pilot püskürtme kütlelerinin 15 ve 20°KMA pilot püskürtme avanslarında sisteme sokulması durumunda elde edilen b_e değerleri hemen hemen aynıdır. 10 % pilot kütleli stratejide pilot püskürtme avansının 13°KMA ya, 15% pilot kütleli stratejide pilot püskürtme avansının 14°KMA ya çekilmiş olması 15 ve 20°KMA'larda aynı pilot kütle oranlarında yapılan pilot püskürtme stratejilerine göre b_e 'yi arttırmıştır.

ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, b_e 'nin pilot püskürtme yapılan tüm stratejilerde aynı işletme şartlarında ve aynı toplam miktarda gerçekleştirilmiş olan referans tek püskürtme stratejisine göre arttığı görülmüştür. b_e 'nin referans stratejiye göre en düşük artışı 6% pilot püskürtme kütlelerinin 13,15,20°KMA pilot püskürtme avansı uygulandığı stratejilerde görülmüş olup, 6% pilot püskürtme kütlelerinin 15,20°KMA pilot püskürtme avansında sisteme sokulması durumunda elde edilen b_e değerleri hemen hemen aynı olsa da, pilot püskürtme avansının 13 °KMA 'ya ötelenmesi ile b_e miktarı artmıştır.10% pilot püskürtme yapıldığı stratejide, pilot püskürtme avansının 15 ve 20°KMA olduğu durumlarda elde edilen b_e 'nin birbiri ile hemen hemen aynı olduğu, 13 KMA° pilot püskürtme avansı uygulanması durumunda ise b_e 'nin arttığı görülmüştür.15% pilot püskürtme uygulandığı durumlarda ise pilot püskürtme avansının 20 °KMA dan 15°KMA ya ve 13 °KMA ötelendiği durumlarda b_e 'nin arttığı, en yüksek b_e 'nin pilot püskürtme avansının 13 °KMA olduğu durumlarda oluştuğu görülmüştür.

iii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, b_e 'nin pilot püskürtme yapılan tüm stratejilerde aynı işletme şartlarında ve aynı toplam miktarda gerçekleştirilmiş olan referans tek püskürtme stratejisine göre arttığı görülmüştür. En düşük b_e 'nin 6% oranında pilot püskürtme yapıldığı durumlarda oluştuğu, pilot püskürtme kütlelerinin 10% ye yükseltilmesinin b_e 'yi arttırıldığı görüldüğü, pilot kütlelerinin 15% ye yükseltilmesinin ise en büyük b_e değeri ile sonuçlandığı görülmüştür. Aynı pilot püskürtme

oranında pilot püskürtme avansının etkisi incelendiğinde 6%, 10% oranında pilot püskürtme yapılan durumlarda, pilot püskürtme avansının 20°KMA dan 17 °KMA ya çekilmesinin b_e 'nin artması ile sonuçlandığı görülmüştür. 15% oranında pilot püskürtme kütlesi yapılan durumlarda ise motorun püskürtme sistemi 20 °KMA dan daha önce pilot püskürtmeye izin vermediğinden pilot püskürtme avansına bağlı bir değerlendirme yapılamamıştır.

- iv) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, b_e 'nin pilot püskürtme yapılan tüm stratejilerde aynı işletme şartlarında ve aynı toplam miktarda gerçekleştirilmiş olan referans tek püskürtme stratejisine göre arttığı görülmüştür. Aynı miktarda pilot püskürtme yapılan stratejilerde pilot püskürtme avansının 20°KMA dan ana püskürtmeye daha yakın bölgeye ötelendiği (16-17°KMA) durumlarda b_e 'nin arttığı görülmüştür.
- v) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansından ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak hemen hemen aynı kaldığı, ancak sadece 15% oranında pilot püskürtmenin 20°KMA pilot püskürtme avansında sisteme sokulduğu stratejide b_e 'nin çok az arttığı görülmüştür.
- vi) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde , b_e 'nin pilot püskürtme yapılan tüm stratejilerde aynı işletme şartlarında ve aynı toplam miktarda gerçekleştirilmiş olan referans tek püskürtme stratejisine göre arttığı görülmüştür. Püskürtme sisteminin planlanan şekilde farklı avanslarda pilot püskürtme yapılmasına olanak vermemesinden ötürü pilot püskürtme avansına bağlı olarak bir sonuç yorumu yapmak mümkün olmamıştır.

b) Pilot püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değişimi için;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme basıncı arttıkça b_e 'nin çok az bir miktarda da olsa arttığı, aynı püskürtme basıncında 20°KMA ve

15°KMA avansla gerçekleştirilen pilot püskürtme stratejilerinde b_e 'nin hemen hemen aynı kaldığı ancak 13°KMA pilot püskürtme avansı için b_e 'nin yükseldiği görülmüştür.

ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde; pilot püskürtme avansının 25°KMA olduğu durumda, b_e 'nin en düşük değerinden en büyük değerine doğru sırasıyla 140MPa,150MPa ve 130 MPa püskürtme basınçlarında olduğu, pilot püskürtme avansının 20°KMA ve 18°KMA olduğu durumlarda ise b_e 'nin en düşük değerinden en büyük değerine doğru sırasıyla 130MPa,140MPa ve 150 MPa püskürtme basınçlarında olduğu (diğer bir ifadeyle bu pilot püskürtme avanslarında basıncın artışı ile b_e 'nin arttığı), aynı püskürtme basıncında pilot püskürtme avansının değişiminin b_e üzerine etkisi incelendiğinde 130 MPa basınçta pilot püskürtme avansının 25°KMA dan 20°KMA ya ötelenmesinin b_e 'yi azalttığı, pilot püskürtme avansının 20°KMA'dan 18°KMA ya çekilmesinin ise b_e 'yi arttırdığı, 130MPa basınçta yapılan pilot püskürtmeli stratejide en düşük b_e 'nin 20°KMA pilot püskürtme avansında olduğu, 140 MPa püskürtme basıncında gerçekleşen stratejide pilot püskürtmenin 25°KMA'dan ve 20°KMA'ya ötelendiği stratejide b_e 'nin çok fazla değişmediği, ancak pilot püskürtme avansının 20°KMA'dan 18°KMA'ya ötelendiği durumda b_e 'nin arttığı, 150 MPa püskürtme basıncı uygulandığı durumlarda, pilot püskürtme avansının 25°KMA'dan ve 20°KMA'ya ve 18 °KMA'ya ötelendiği stratejide b_e 'nin çok az arttığı görülmüştür.

iii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtme avansının 20°KMA olduğu durumlarda çok az farkla da olsa püskürtme basıncının 140 ve 150 MPa olduğu durumlarda b_e 'nin en düşük olduğu, 130 MPa püskürtme basıncında ise b_e 'nin bir miktar yükseldiği, 15°KMA pilot püskürtme avansı uygulanan stratejide ise püskürtme basıncına bağlı olmaksızın tüm b_e 'lerin hemen hemen aynı oldukları görülmüştür.

iv) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev ve $AV_{pil}=20^{\circ}$ şartında yapılmış olan deneylerde püskürtme basıncına bağlı olmaksızın tüm b_e 'lerin birbirleri ile hemen hemen aynı değerde oldukları görülmüştür. Püskürtme basıncı bu işletme şartlarında b_e 'yi değiştirmemiştir. Püskürtme sistemi pilot püskürtme avansını $20^{\circ}KMA$ 'dan daha ileriye doğru değiştirilmesine olanak vermediğinden bu şartlarda pilot püskürtme avansının da etkisini incelemek mümkün olmamıştır.

6.1.3.8 Deneylerde Elde Edilen Özgül Yakıt Sarfiyatı (b_e) Emisyonu Sonuçlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Deneyler neticesinde elde edilen b_e değerleri karşılaştırıldığında, pilot püskürtme yapılan durumlarda genel olarak özgül yakıt sarfiyatının, aynı işletme şartlarında yapılmış olan referans püskürtme stratejilerde göre artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Özgül yakıt sarfiyatının artışı pilot püskürtme kütlesinin artışı açısından yorumlandığında ise pilot püskürtme kütlesi arttıkça, özgül yakıt sarfiyatının daha da arttığı görülmektedir. CO_2 emisyonlarının eğilimi de özgül yakıt sarfiyatının eğilimi ile aynı sonuçları vermektedir. Literatürde yapılan incelemelerde yüksek miktarlarda pilot püskürtme miktarının hem NO_x hem de Is emisyonlarını hem de özgül yakıt sarfiyatını kötü yönde etkilediği bilinmektedir[87] . Dürnholz yapmış olduğu araştırmada pilot püskürtmenin b_e üzerinde optimum kullanımı için ana püskürtmenin yanmaya başlamadan önce 6% yakıtın yanmış olması gerektiği önermesini yapmıştır. Bu miktardan fazlası negatif etki göstermektedir. Pierpont ve Montgomery'de [94] yapmış oldukları çalışmada, çok küçük miktarlarda yapılmış olan pilot püskürtmenin b_e 'yi üzerinde çok fazla etkisi olmadığı, ancak pilot püskürtme miktarı arttıkça b_e 'nin kötü yönde etkilendiğini belirtmişlerdir.
- b) Sisteme girecek olan toplam yakıtın bölünerek bir kısmının üst ölü noktada daha uzak bir mesafede sisteme sokuluyor olması, daha düşük sıcaklıkta sisteme giren bir yakıt kütlesi nedeni ile termal verimi negatif yönde etkilemektedir. Bunun tam tersi olarak yakıt kütlesinin daha fazla oranda bir kısmının üst ölü

noktaya yakın bölgelerde sisteme giriyor olması özgül yakıt sarfiyatını düşürücü yönde etki yapmaktadır [88] .

- c) Tüm bu etkiler karşılaştırıldığında 5% pilot den küçük değerlerde pilot püskürtme yapılmasının b_e 'yi çok fazla etkilemeyeceği, ancak pilot püskürtme miktarının 5% den fazla arttırılmasının b_e 'yi az bir miktarda arttıracığı (5-10%) sonucuna ulaşılmıştır.
- d) Pilot püskürtmeli stratejilerin tamamında püskürtme basıncının artması 2000 d/d yapılan deneylerde, hemen hemen tüm şartlarda özgül yakıt sarfiyatını çok azda (2-4 gr/kWh) olsa artırıcı yönde etki göstermiştir. Püskürtme basıncının artması atomizasyonu iyileştirerek yakıtın termal olarak sistemde efektif olarak kullanılabilirliğini arttırmaktadır [25]. Bu noktada beklenen özgül yakıt sarfiyatının düşmesidir, ancak bu etkinin tam tersi istikamette elde edilen az miktarda artışın nedeni ise püskürtme basıncının istenilen değere çıkarılması neticesinde yüksek basınç pompasının çektiği gücün artması olarak açıklanabilir[89] . Bu nedenle bazı şartlarda yakıtın basıncının artması sonucu elde edilen termal avantaj yüksek basınç pompasının çektiği güç neden ile bertaraf edilebilir veya bir miktar avantaj sağlayıcı bir durumda kalabilir. Bu nedenle deney sonuçlarında bazı şartlarda püskürtme basıncının artırımına bağlı olarak b_e 'nin düştüğü OİB'nin arttığı görülmüştür. Bu şartlarda pompanın bu artım için çektiği gücün etkisi termal olarak ortaya çıkan güç ile bertaraf edilmiştir.

6.1.3.9 Deneylerde Elde Edilen Ortalama İndike Efektif Basınç (OİB) Sonuçları

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, OİB pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans stratejisine göre pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak düşmüştür. $20^{\circ}KMA$ da yapılan pilot püskürtmeli stratejilerde pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak üç strateji de aynı

OİB değerini gerçekleştirmişlerdir. Pilot püskürtme avansının 15°KMA ötelendiği durumlarda OİB'nin çok fazla değişmediği ancak, çok az olsa da 15% pilot püskürtme oranındaki strateji de OİB'nin en yüksek olduğu, daha sonra sırasıyla 6 ve 10 % pilot püskürtme kütlesi ile yapılan pilot püskürtme stratejilerinin geldiği görülmüştür. Pilot püskürtme avansının 13 °KMA ya çekildiği durumlarda ise bütün pilot püskürtme oranları için OİB'nin düştüğü, en düşük değerinin 15% oranında pilot püskürtme yapıldığında, daha sonra 10% oranında pilot püskürtme yapıldığında, en yüksek OİB'nin ise 6% oranında pilot püskürtme yapıldığı durumlarda olduğu görülmüştür.

- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=140$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde OİB pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans stratejisine göre pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak düşmüştür. OİB değeri pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak tüm pilot püskürtme avanslarında hemen hemen aynı değeri almış olmakla birlikte, OİB pilot püskürtme avansına bağlı olarak incelendiğinde pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak 20 ve 15 °KMA' deki stratejilerde çok yakın OİB'ler elde edilirken, pilot püskürtme avansının 13 °KMA'ya çekildiği durumda IOEB 'nin düştüğü görülmüştür.
- iii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde OİB pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans stratejisine göre pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak düşmüştür. Pilot püskürtme kütlelerin değişimine göre OİB incelendiğinde pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte azda olsa OİB'nin düştüğü görülmüştür. Aynı şekilde 20 ve 25 °KMA'da pilot püskürtme stratejisinin deneylerde IOEB hemen hemen aynı kalırken, püskürtme avansının 13 °KMA'ya çekilmesi ile birlikte OİB az bir miktar düşmüştür.

- iv) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=28$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde $20^{\circ}KMA$ 'da pilot püskürtme yapılan stratejilerde OİB aynı işletme şartlarında (toplam püskürtme kütlesi aynı) yapılmış olan tek püskürtmeli referans stratejide elde edilen OİB değeri ile aynı değerde kalmıştır. $15^{\circ}KMA$ 'da pilot püskürtme yapılan stratejide ise pilot püskürtme kütle oranından bağımsız olarak OİB çok az bir miktar düşmüştür.
- v) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=37$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde, OİB pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans stratejisine göre pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak düşmüştür. $20^{\circ}KMA$ 'da yapılan deneylerde pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak aynı OİB'ler elde edilmiştir, pilot püskürtme avansının $15-16^{\circ}KMA$ ya çekildiği stratejilerde ise IOEB ($20^{\circ}KMA$) stratejisine göre az bir miktar düşmüştür.
- vi) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılmış olan deneylerde OİB pilot püskürtme yapılan tüm durumlarda, aynı işletme şartlarında yapılmış olan tek püskürtme referans stratejisine göre pilot püskürtme avansına ve pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak az bir miktar düşmüştür.

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncının değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde, püskürtme basıncının artması OİB üzerinde çok fazla etki etmemiştir.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2200$ hPa, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=3,8$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde püskürtme basıncının artması OİB üzerinde çok fazla etki etmemiştir.
- iii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2300$ hPa, $M_{top}=45$ mg/çev, $M_{pil}=2,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde $20^{\circ}KMA$ pilot püskürtme yapıldığı durumlarda püskürtme basıncının 130 MPa'dan 140 ve 150 MPa çıkarılması

OİB'yi çok az bir miktar arttırmıştır. (140 MPa ve 150 MPa için elde edilen değerler hemen hemen aynıdır). 15 °KMA pilot püskürtme yapıldığında elde edilen OİB değerler ise birbirleri ile aynıdır.

iv) 3750 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev şartında yapılmış olan deneylerde pilot püskürtmeli stratejilerde pilot püskürtme basıncının 130 MPa dan 140 MPa ve 150 MPa çıkarılması az da olsa OİB yi azaltmıştır. Bu işletme stratejisinde, püskürtme sistemi 20 °KMA'dan daha önce pilot püskürtme yapmaya izin vermediğinden farklı avanslarda değerlendirme yapmak mümkün olmamıştır.

6.1.3.10 Deneylerde Elde Edilen Ortalama İndike Basınç Sonuçları Yorumlanması ve Tartışma

- a) Deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde pilot püskürmenin kütlesine ve yapıldığı avans açısına bağlı olarak referans püskürtmeye göre OİB'nin 1-1.5 Bar arasında değişen değerlerde düştüğü, pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte bu düşüş oranının az bir miktarda da olsa daha fazla arttığı görülmüştür. (Doğal olarak aynı yorumu OEB içinde yapmak mümkündür.) . Bu sonuçlar incelendiğinde pilot püskürtmenin yapılması ile birlikte indike verimin düştüğü pilot püskürtme ile birlikte termal olarak dönüştürülebilirliği belirli bir miktar yakıtın ÜÖN dan önce daha düşük sıcaklıklı bir ortamda sisteme sokulmasından kaynaklı olarak düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Ortaya çıkan etki b_e 'nin değişimine etken olan faktörlere benzerdir.
- b) Püskürtme basıncının artırılması ile beklenen OİB'de bir miktar artırmıştır. Ancak deney sonuçları incelendiğinde bazı deney şartlarında OİB'nin az bir miktarda olsa düştüğü gözlemlenmiştir. Abdullah vd.[25] açıklamasında basıncın artmasının atomizasyonu artırarak daha iyi bir yanmaya sebep olacağını belirtmiştir. Sonuçlar bu doğrultuda değerlendirildiğinde, basıncın artması yanma prosesine pozitif yönde etki yapsa da geometrik etkilerden dolayı (spreyin pistonun üst bölgesine veya silindir duvarına çarpması vb nedenlerle) bu etkinin ortadan kalkmış olabileceğini söylemek mümkündür. Ancak bu

etkinin daha net olarak araştırılabilmesi için 3 boyutlu bir akışkanlar dinamiğinin analizinin yapılması gerekmektedir.

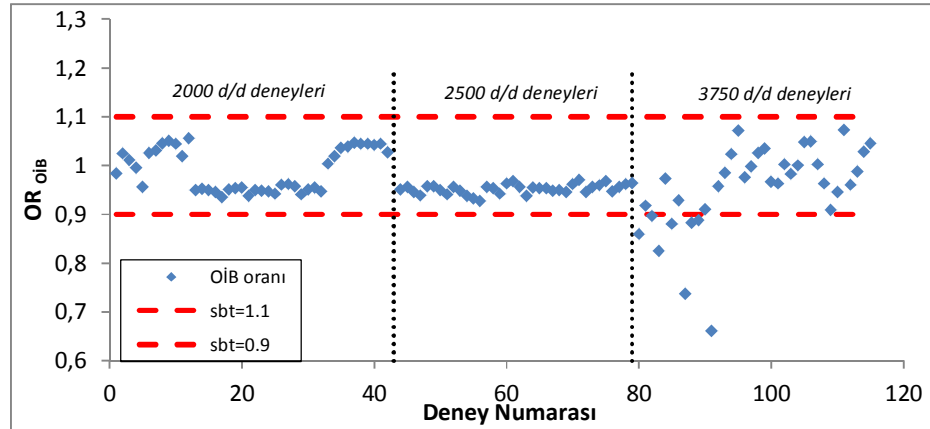
6.2 Tek Boyutlu Termodinamik Paket Program Simülasyonu Ve Motor Deneylerinin Sonuçlarının Doğrulanması Aşamasının Sonuçları

Boost termodinamik modelin doğrulanması esnasında yapılan karşılaştırma da motor deneyleri esnasında elde edilmiş olan silindir içi basınç verisinden yararlanılmıştır. Simülasyonda elde edilen basınç verisinin aşağıda verilen kriterleri sağlaması durumunda modelin doğru çalıştığı (doğru kalibre edildiği) kabul edilmiştir.

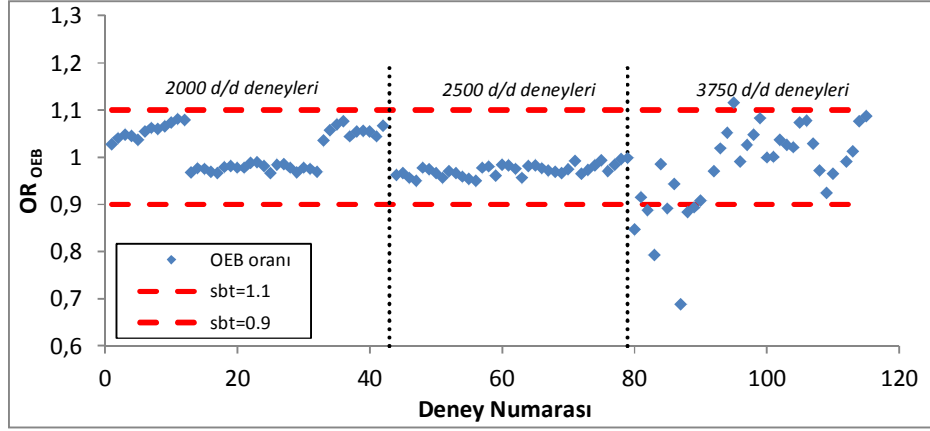
Simülasyonun motor deneyleri verileri tarafından doğrulanması açısından bazı karşılaştırma kriterleri belirlenmiş ve bu kriterlerin sonuçları aşağıda tablo halinde verilmiştir. Örnek basınç karşılaştırma grafikleri takip eden kısımda verilmiştir.

Doğrulama aşamasında kullanılan değerlendirme kriterleri ve hesaplama yöntemleri 4.1.2.2 kısmında detaylı olarak verilmiştir. Tezimin bu kısmında ise bu kriterlerin değişim grafikleri verilmiştir. Verilen tüm oranlar (simülasyon değeri/deneysel değer) şeklinde verilmiştir.

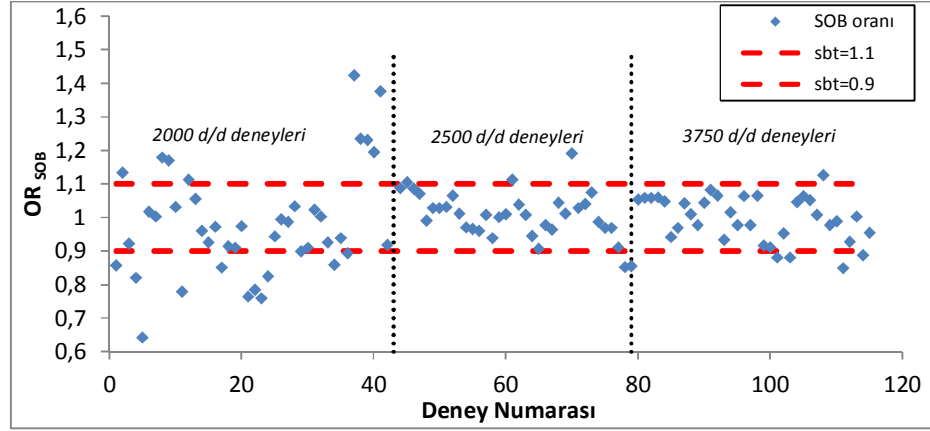
6.2.1 REFERANS DENEYLERİN DOĞRULANMASI AŞAMASININ SONUÇLARI



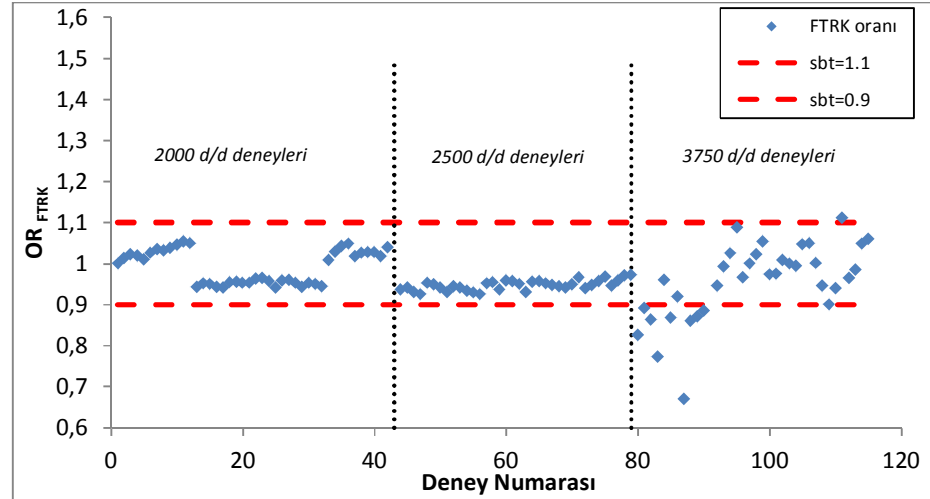
Şekil 6. 101 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OİB'lerin birbirleri oranları.



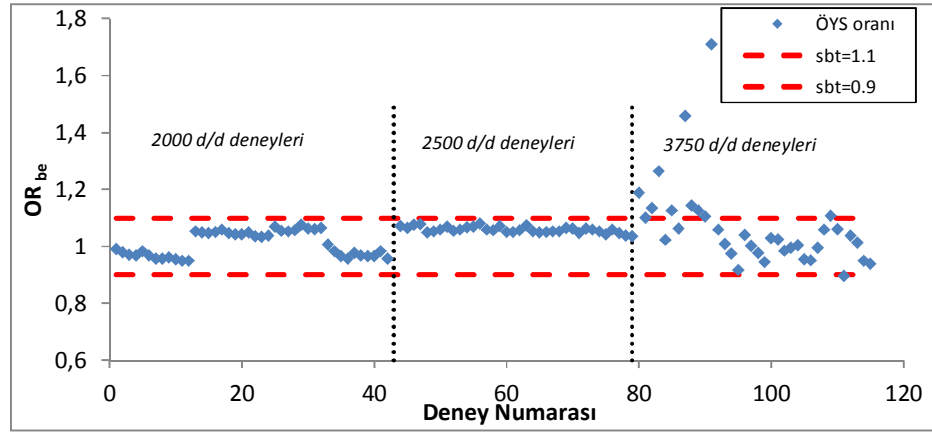
Şekil 6. 102 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OEB'lerin birbirleri ile oranları.



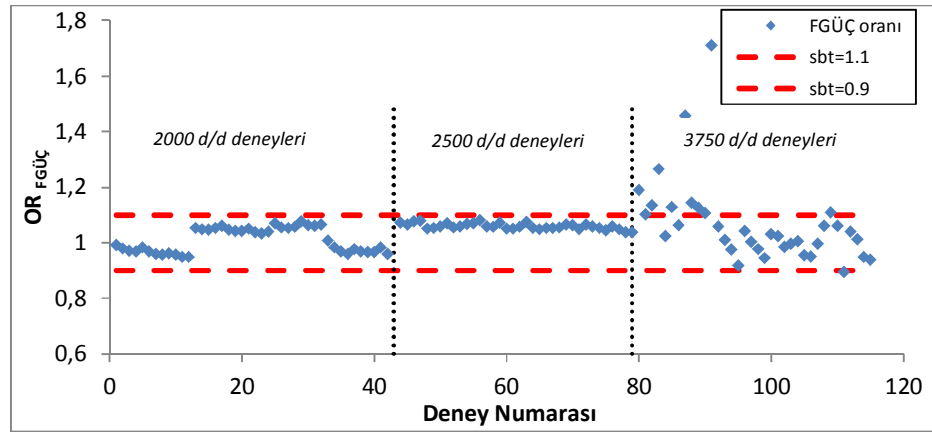
Şekil 6. 103 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş SOB'lerin birbirleri oranları.



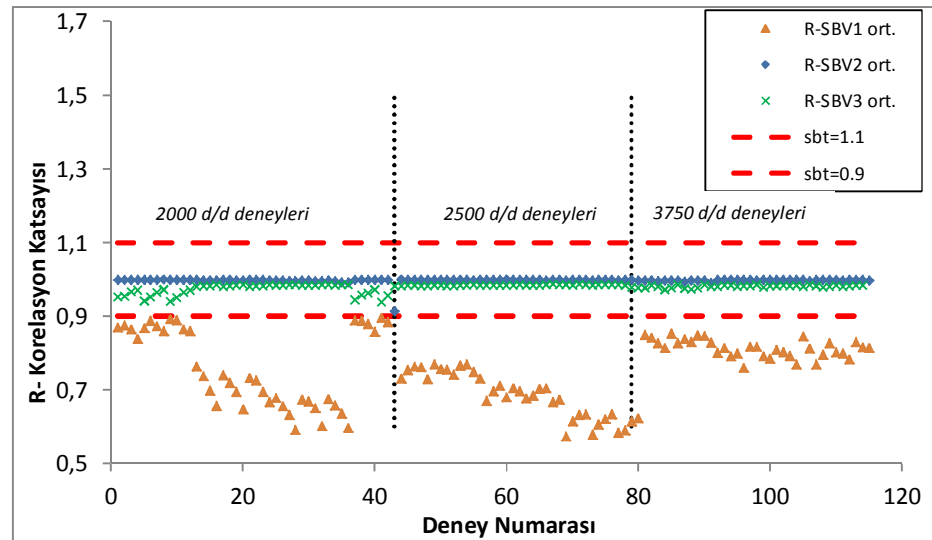
Şekil 6. 104 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FTRK'lerin birbirleri ile oranları.



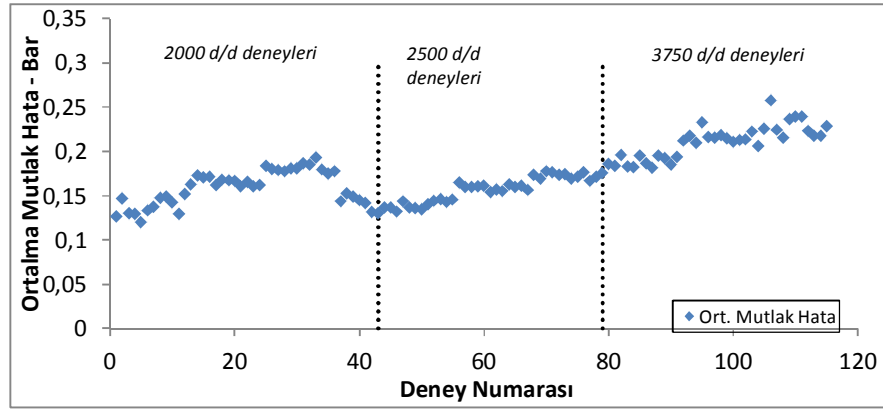
Şekil 6. 105 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş b_e 'lerin birbirleri ile oranları.



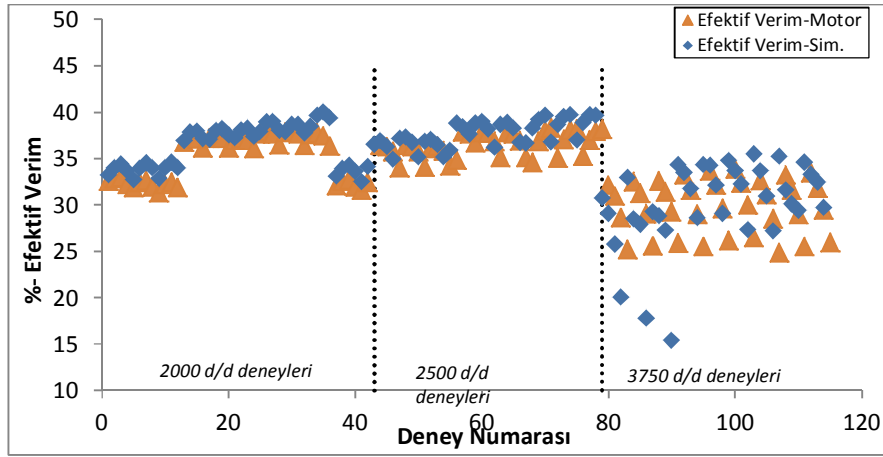
Şekil 6. 106 Deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FGÜÇ'lerin birbirleri ile oranları.



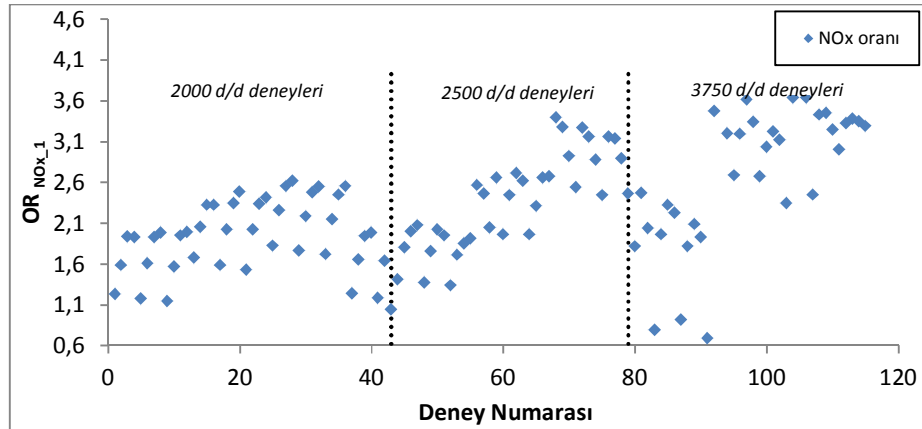
Şekil 6. 107 Basınç verisinin önceden belirlenmiş bölümlerinde deney ve simülasyon verisi arasındaki korelasyon katsayıları



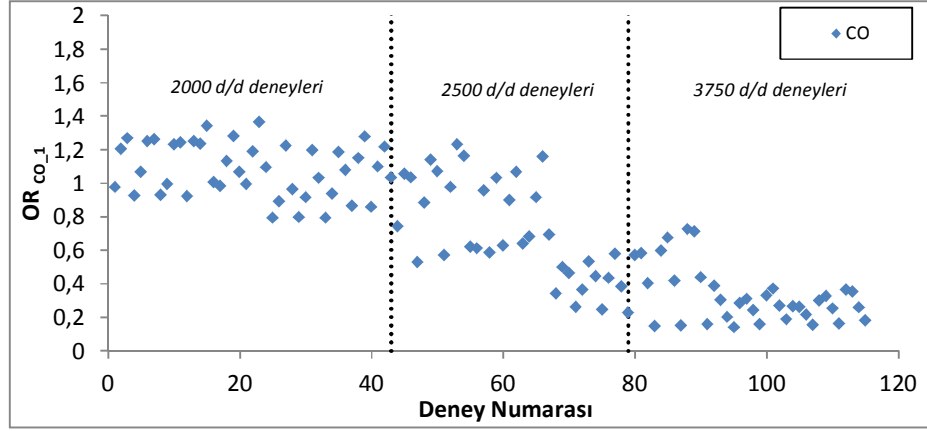
Şekil 6. 108 Basınç verisinin SBV1 kısmında (emme) deney ve simülasyon verisi arasındaki ortalama mutlak hata



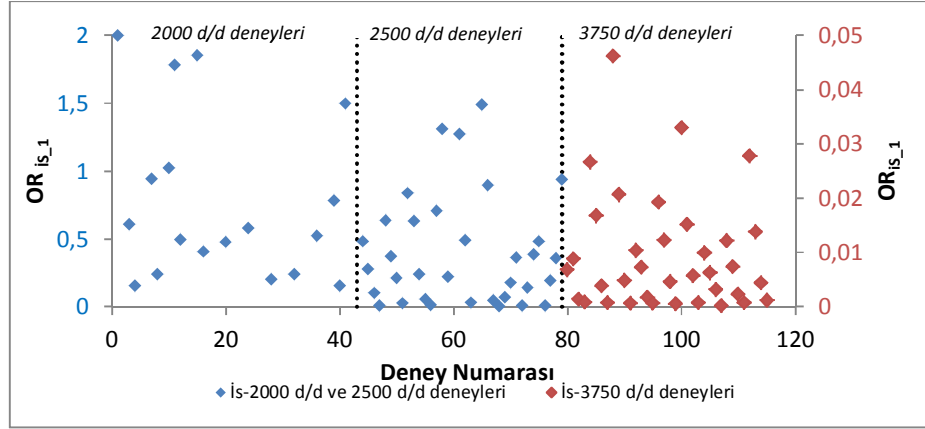
Şekil 6. 109 Deney ve simülasyon sonucunda elde edilmiş olan % efektif verimler



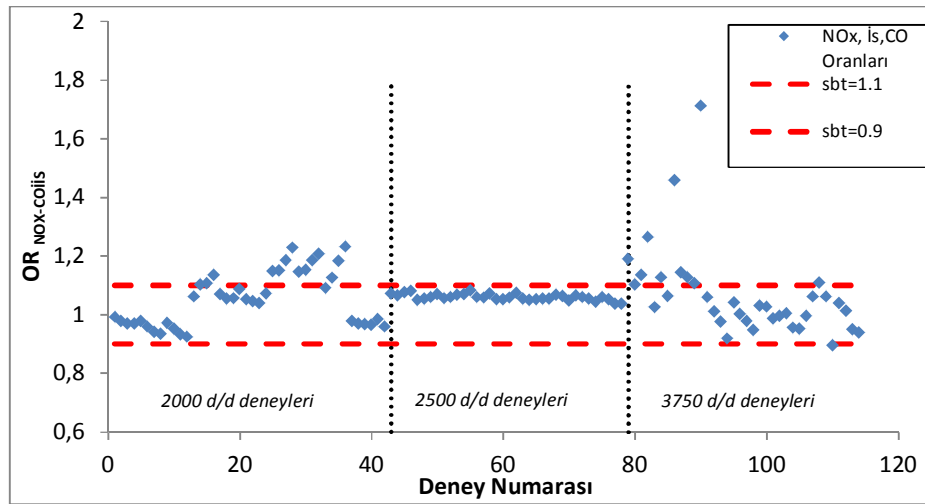
Şekil 6. 110 Simülasyonda emisyon NO_x kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen NO_x değerlerinin, deneylerden elde edilen NO_x değerlerine oranı



Şekil 6. 111 Simülasyonda emisyon CO kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen CO değerlerinin, deneylerden elde edilen CO değerlerine oranı

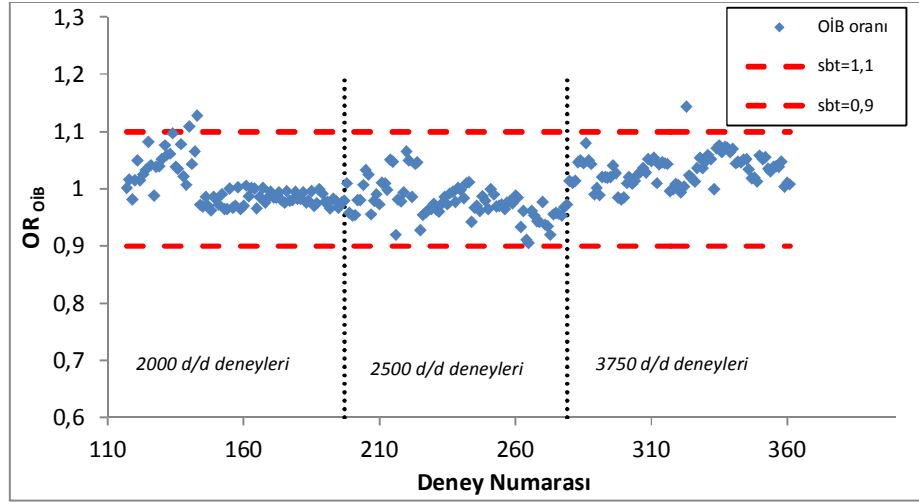


Şekil 6. 112 Simülasyonda emisyon İS kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen İS değerlerinin, deneylerden elde edilen İS değerlerine oranı

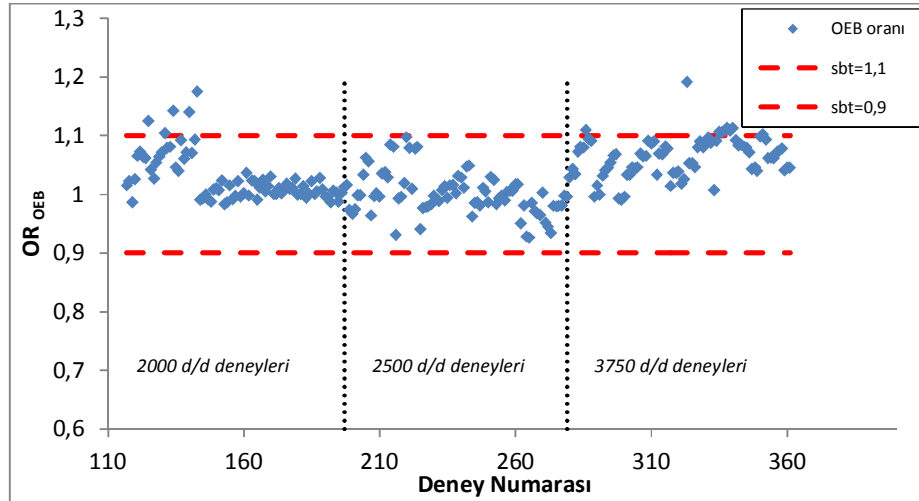


Şekil 6. 113 Hata oranları b_e hata oranına eşitlenmiş emisyonların hata oranları

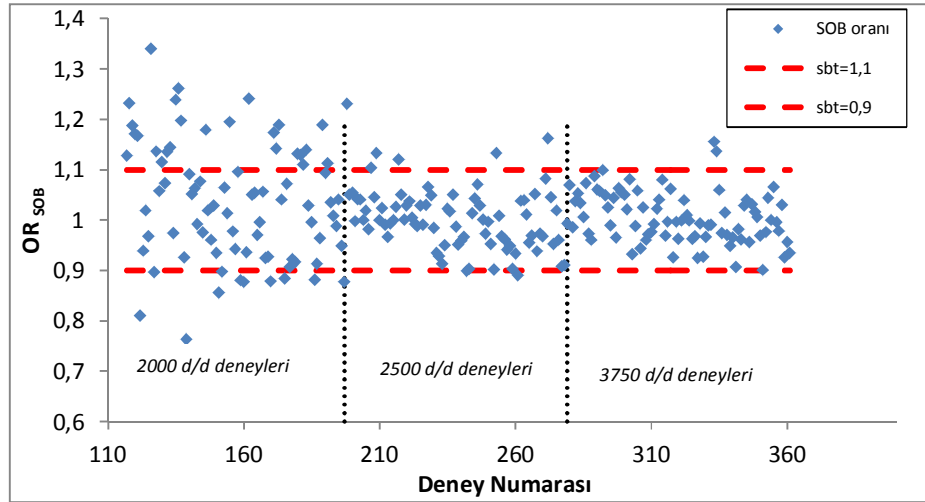
6.2.2 PİLOT PÜSKÜRTMELİ DENEYLERİN DOĞRULANMASI AŞAMASININ DONUÇLARI



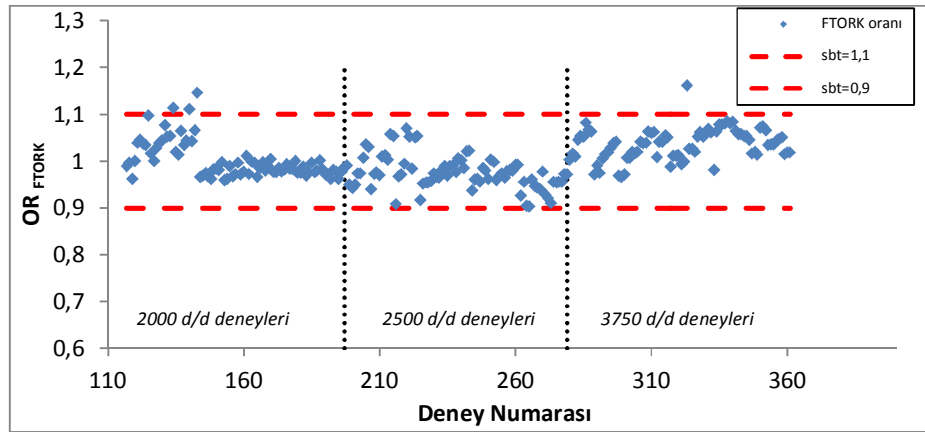
Şekil 6. 114 Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OİB'lerin birbirleri ile oranları.



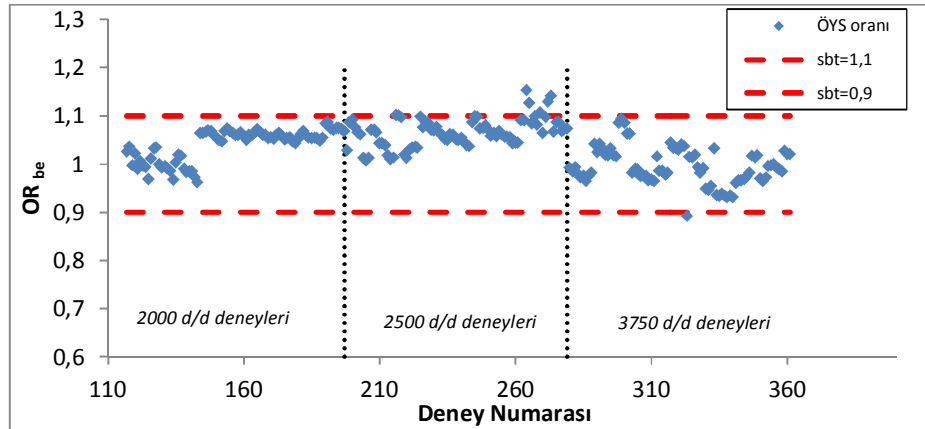
Şekil 6. 115 Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş OEB'lerin birbirleri ile oranları.



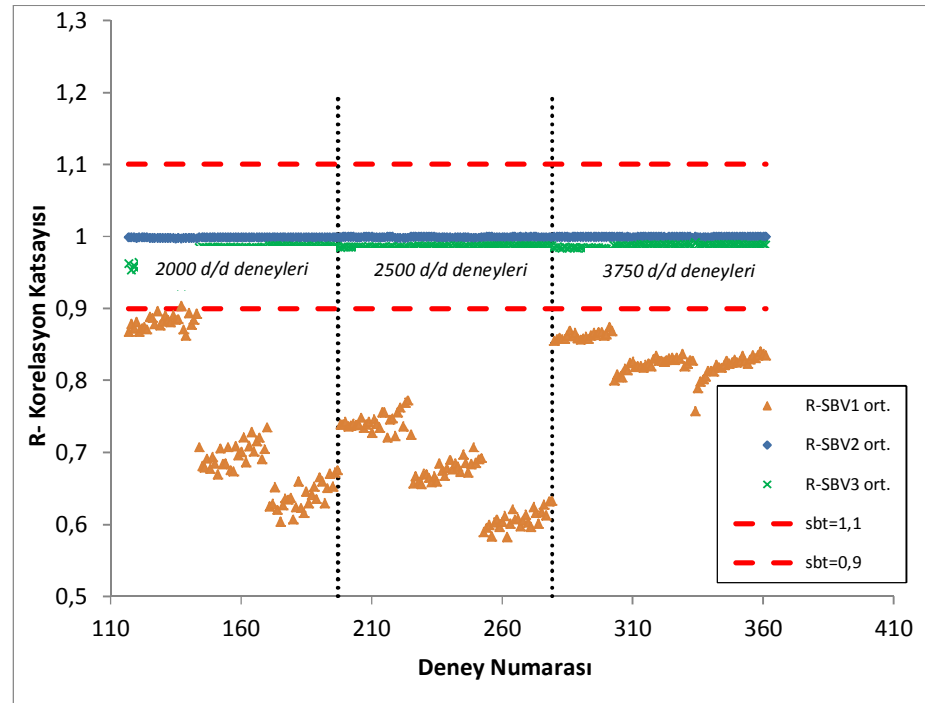
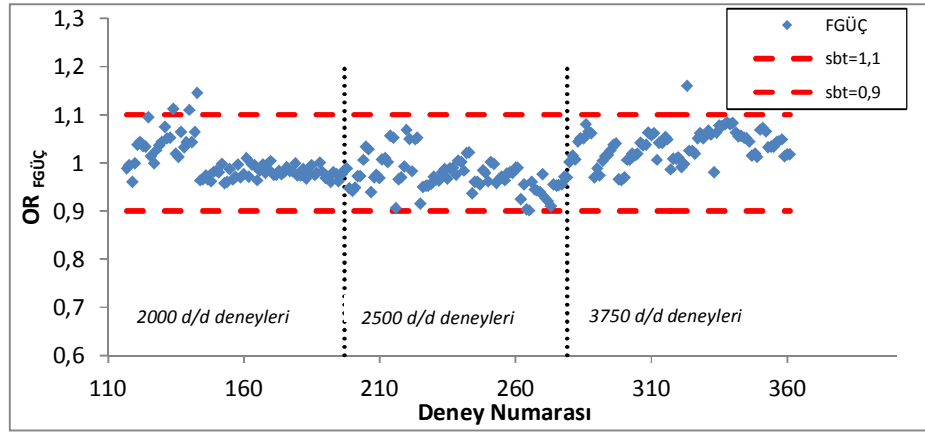
Şekil 6. 116 Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş SOB'lerin birbirleri ile oranları.

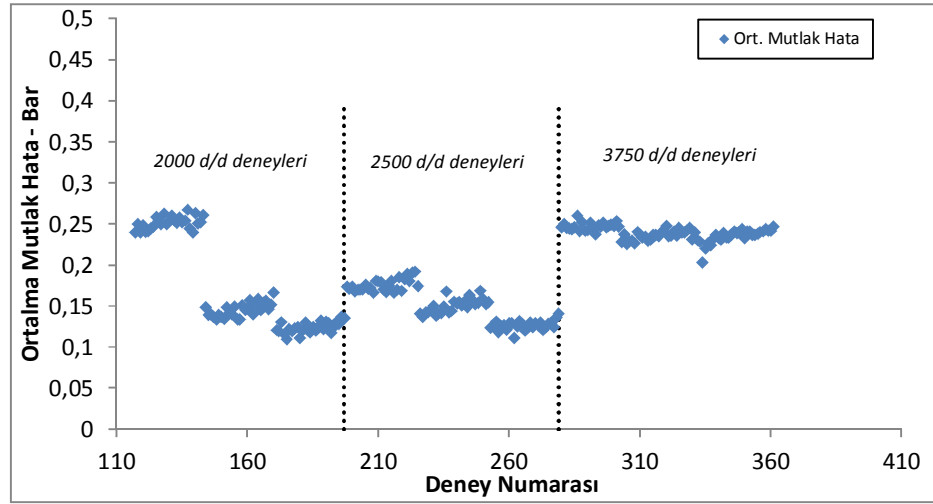


Şekil 6. 117 Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş FTORK'ların birbirleri ile oranları.



Şekil 6. 118 Pilot püskürtmeli deneyler ve simülasyonda elde edilmiş b_e 'lerin birbirleri ile oranları.

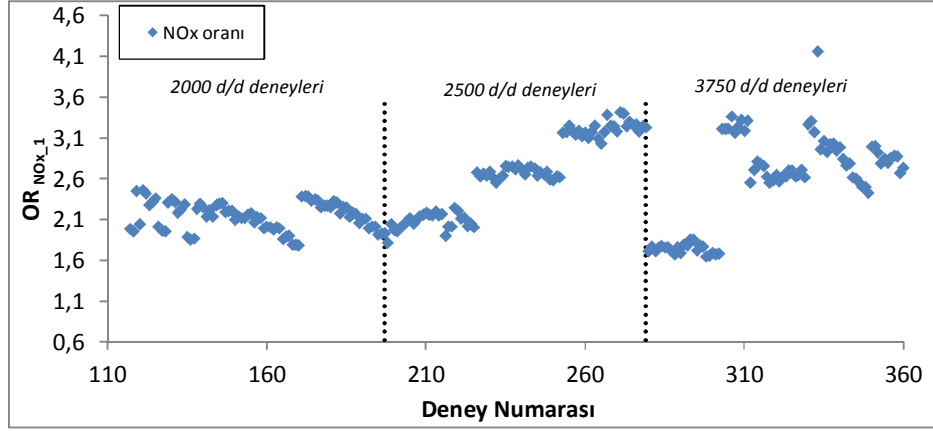




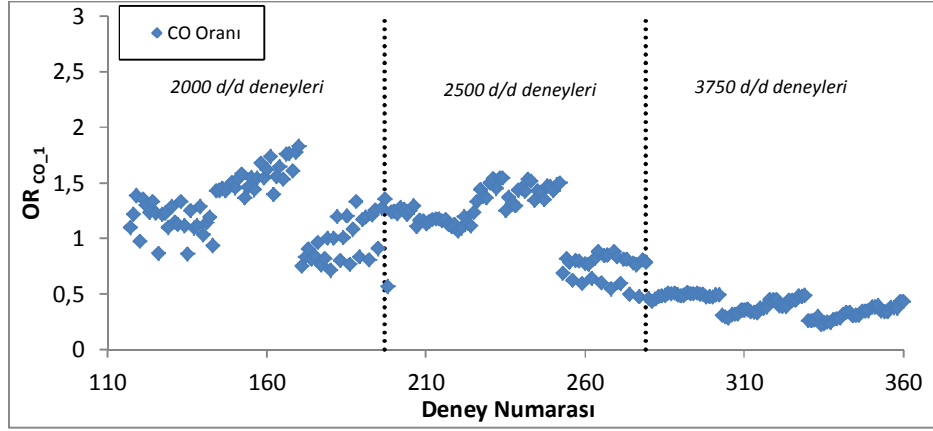
Şekil 6. 121 Basınç verisinin SBV1 kısmında (emme) deney ve simülasyon verisi arasındaki ortalama mutlak hata



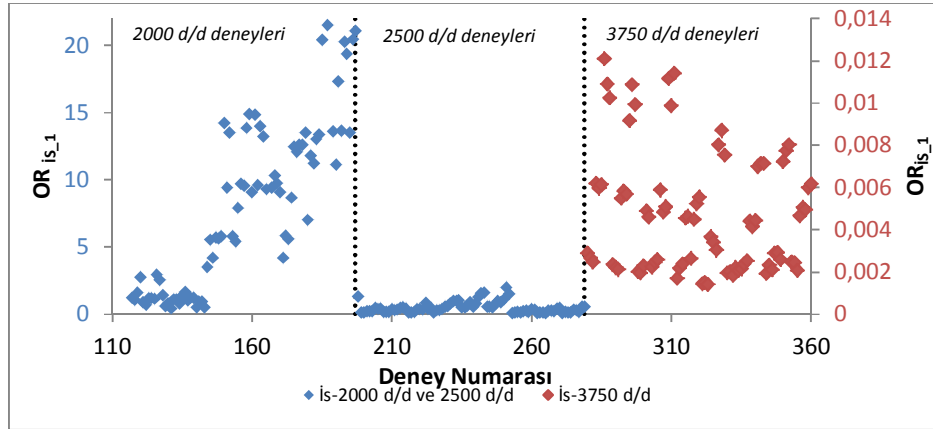
Şekil 6. 122 Deney ve ve simülasyon sonucunda elde edilmiş olan % efektif verimler



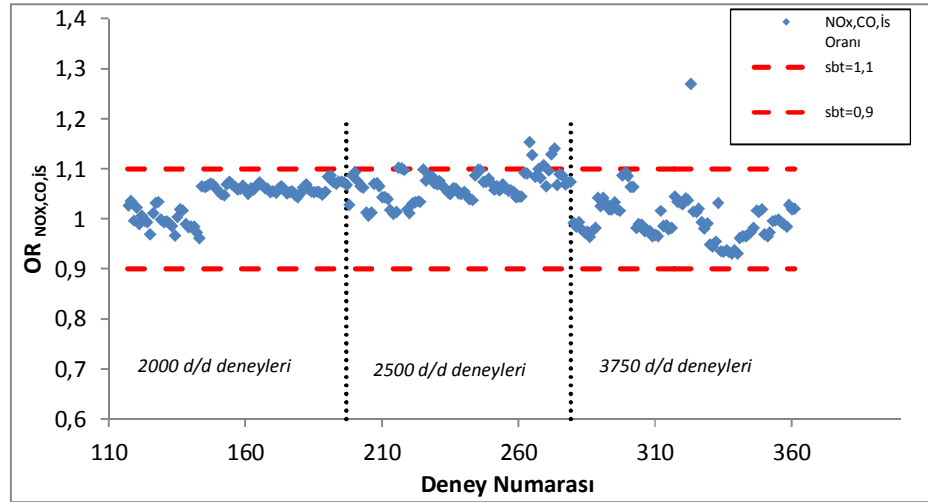
Şekil 6. 123 Simülasyonda emisyon NO_x kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen NO_x değerlerinin, deneylerden elde edilen NO_x değerlerine oranı



Şekil 6. 124 Simülasyonda emisyon CO kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen CO değerlerinin, deneylerden elde edilen CO değerlerine oranı



Şekil 6. 125 Simülasyonda emisyon is kalibrasyon parametresin 1 olması durumunda elde edilen is değerlerinin, deneylerden elde edilen is değerlerine oranı



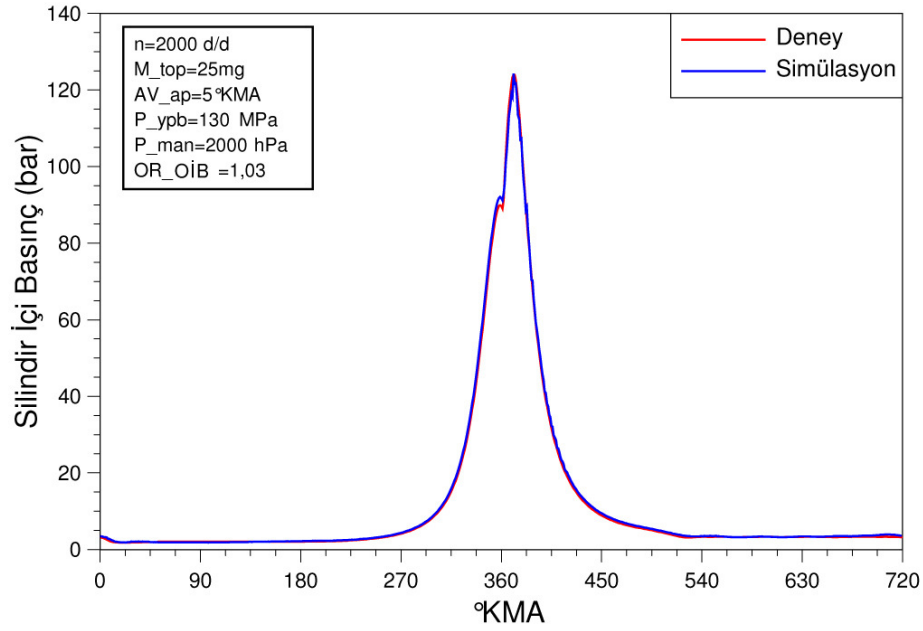
Şekil 6. 126 Simülasyon kalibrasyon parametreleri ile belirlenen egzoz emisyonları % hataları

6.3 Deneylerden Elde Edilen Ve Simülasyondan Elde Edilen Verilerin Silindir İçi Basınç Grafiklerinin Karşılaştırılması, Isı Açığa Çıkış Grafikleri Ve Sıcaklıklar

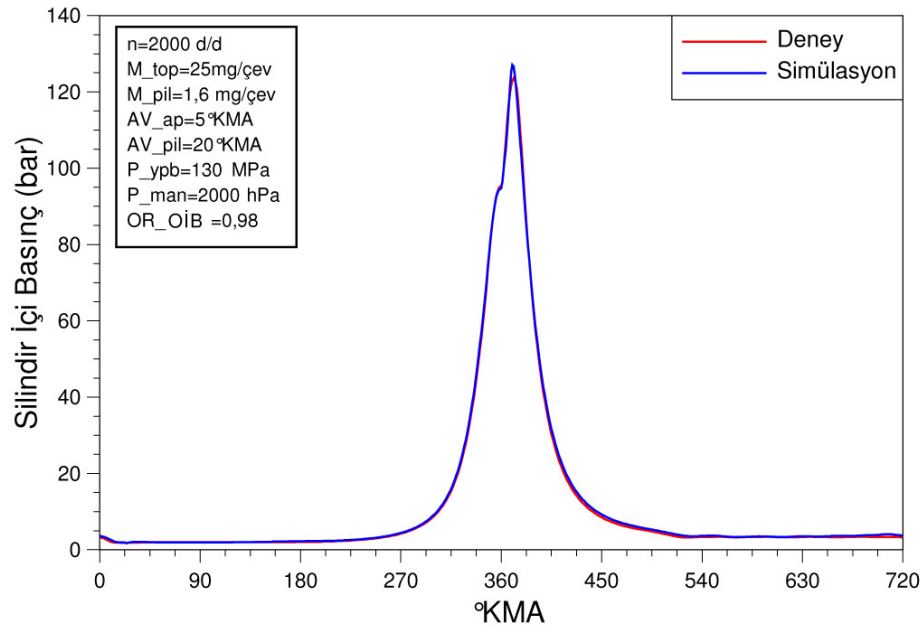
Deneyler esnasında elde edilmiş olan silindir içi basınç verileri ve simülasyonlardan elde edilen basınç verileri belirlenmiş veri grupları için karşılaştırmalı olarak verilmişlerdir. Buna ek olarak pilot püskürtmenin motor performans ve emisyon çıktı parametrelerinin analizi için ısı açığa çıkış hızları, sıcaklık grafikleri verilmişlerdir. Pilot püskürtme stratejisi (PP), ana püskürtme stratejisi (AP) olarak adlandırılacaktır. Pilot püskürtme ve ana püskürtmenin birlikte kullanıldığı stratejileri (PP+AP) , sadece referans ek püskürtmenin kullanıldığı strateji ise (AP) olarak adlandırılacaktır. Analizi yapılacak olan veri setinin önce silindir içi basınç verilerinin doğrulandığını göstermek amacıyla deneyden ve simülasyondan elde edilen silindir içi basınç verileri karşılaştırmış, ısı açığa çıkış hızı ve silindir içi sıcaklık grafikleri çizilmiştir. Çizilen verilerin bir kısmı örnek olarak takip eden kısımda verilmiştir.

6.3.1 $n=2000$, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{ypb}=130$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa Şartında

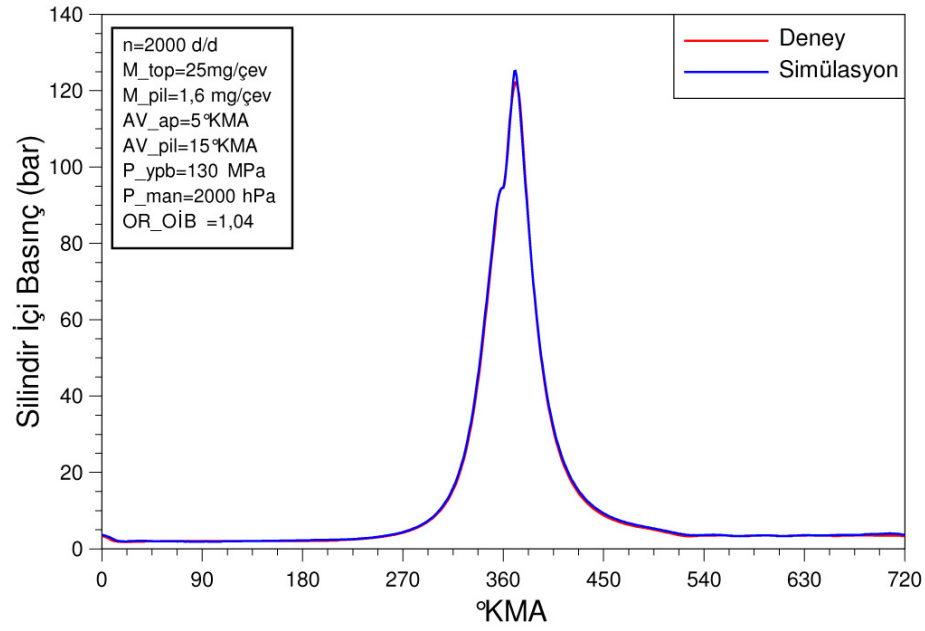
Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırması.



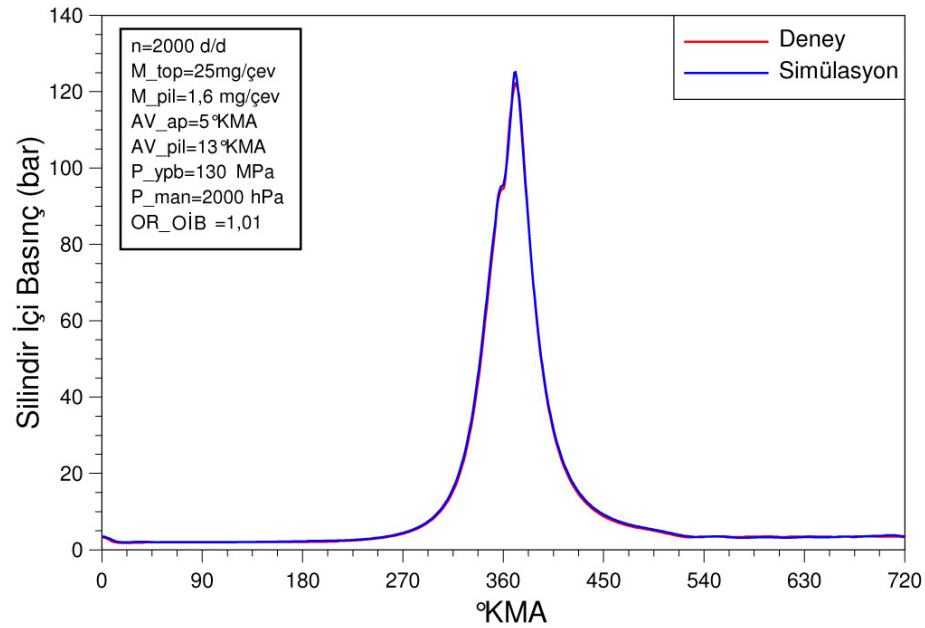
Şekil 6. 127 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa şartında, deney silindir içi basıñç verisi ve simölasyon çıktıısının karşılaştırılması



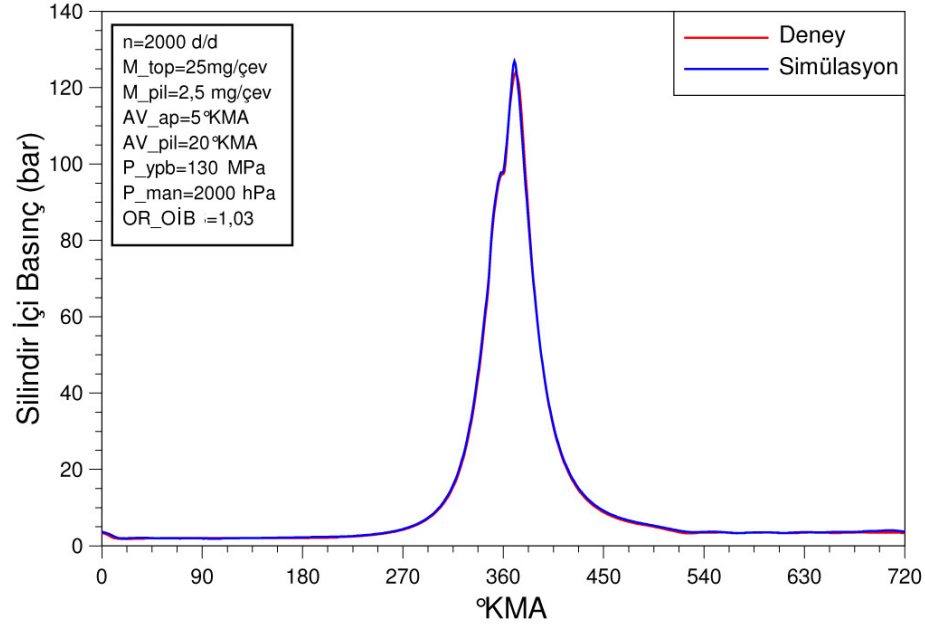
Şekil 6. 128 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basıñç verisi ve simölasyon çıktıısının karşılaştırılması



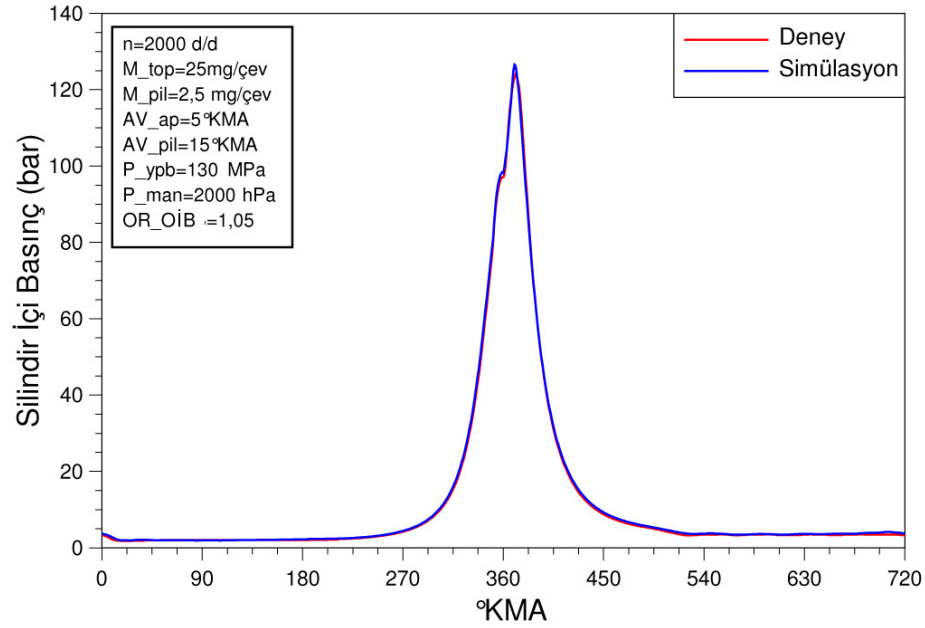
Şekil 6. 129 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



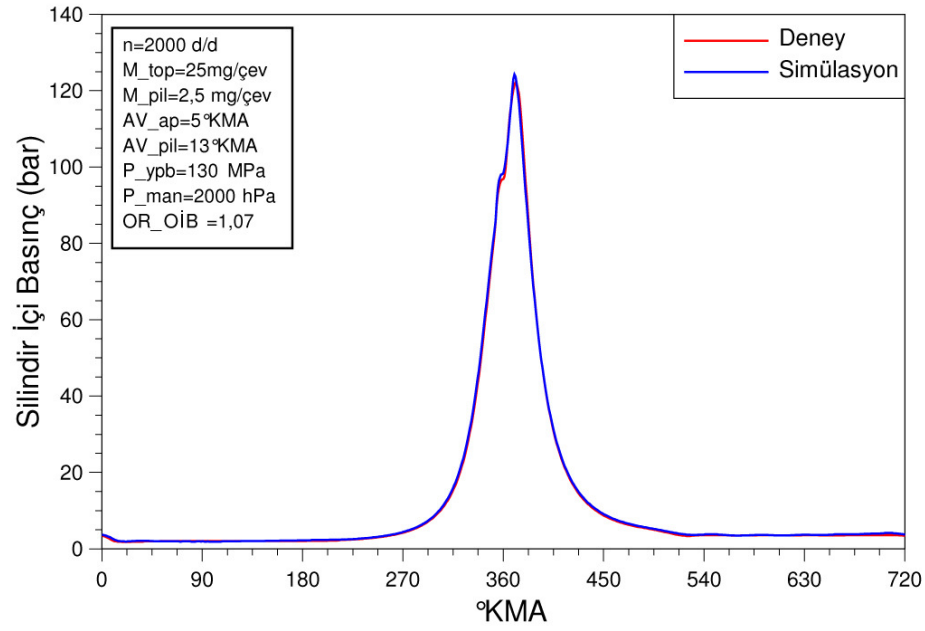
Şekil 6. 130 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=13^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



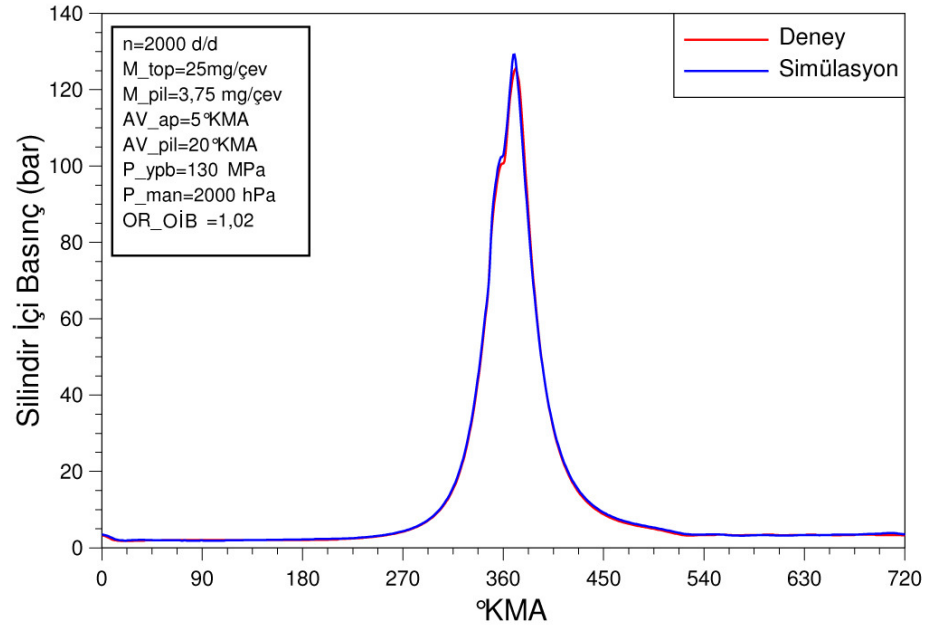
Şekil 6. 131 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



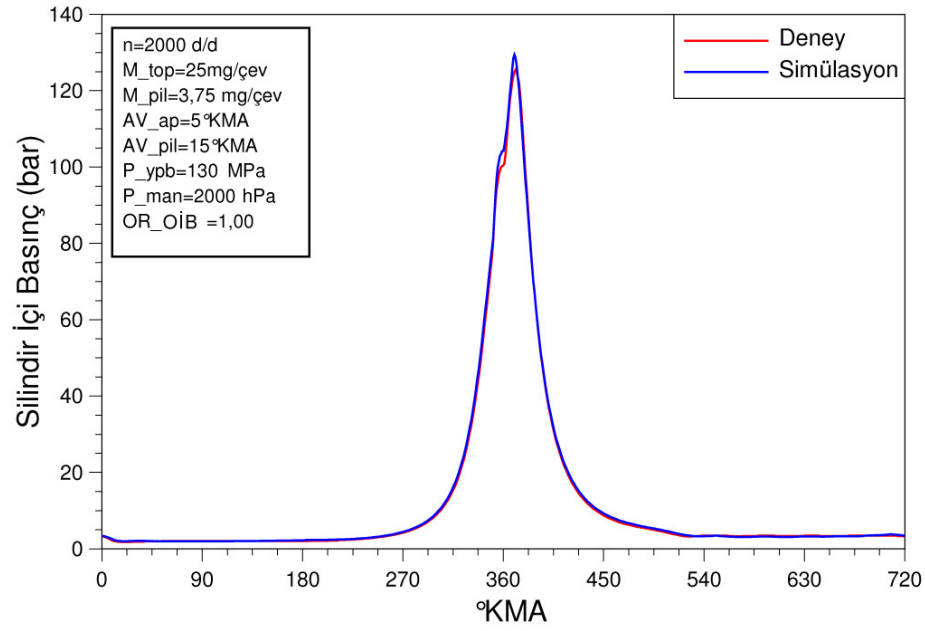
Şekil 6. 132 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



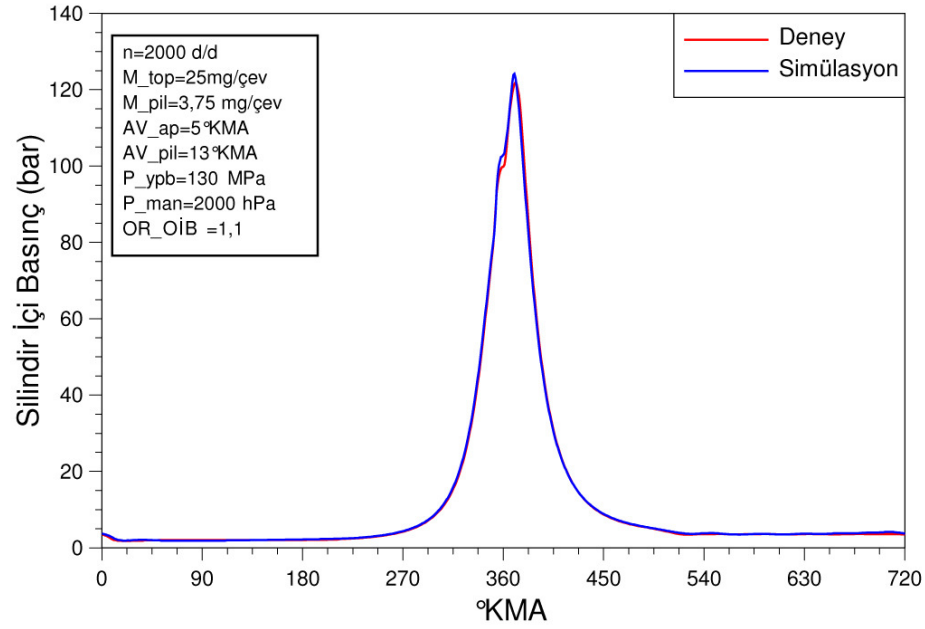
Şekil 6. 133 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $AV_{pil}=13^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



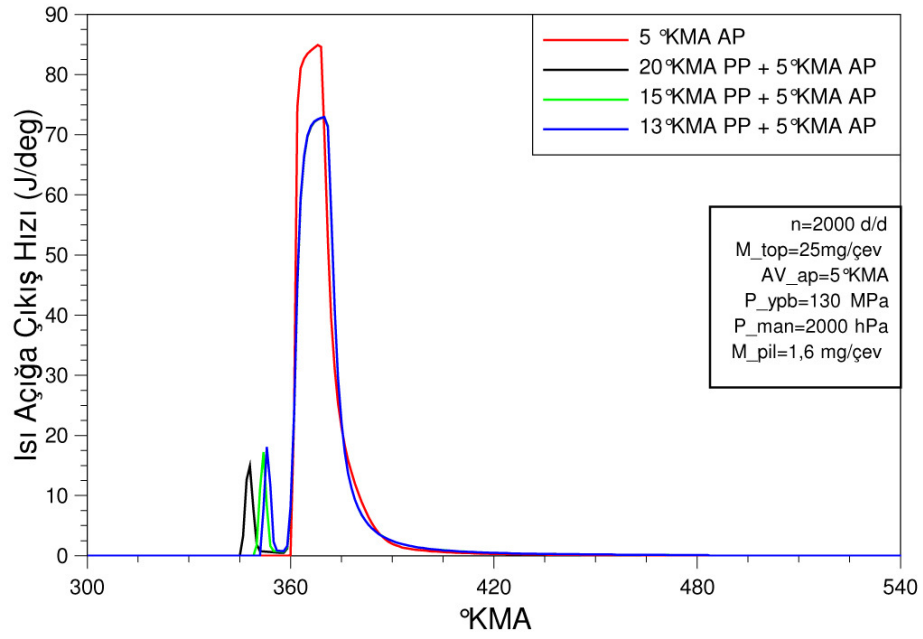
Şekil 6. 134 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $AV_{pil}=20^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



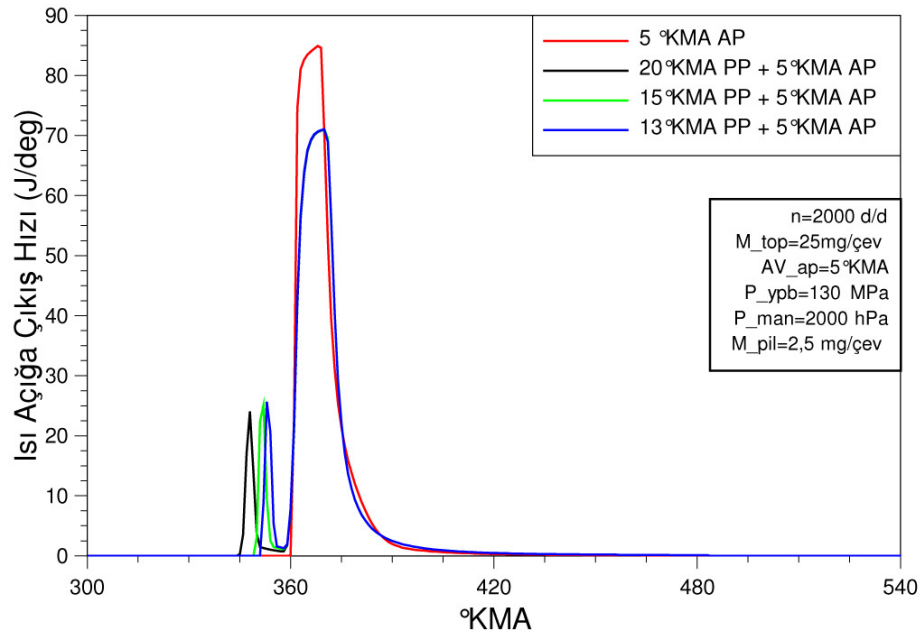
Şekil 6. 135 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



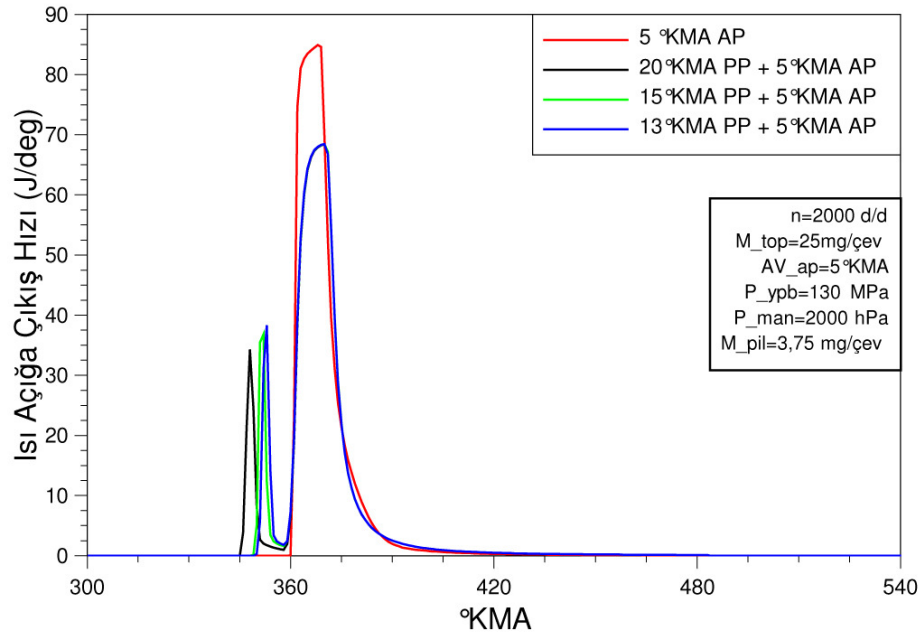
Şekil 6. 136 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=13^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



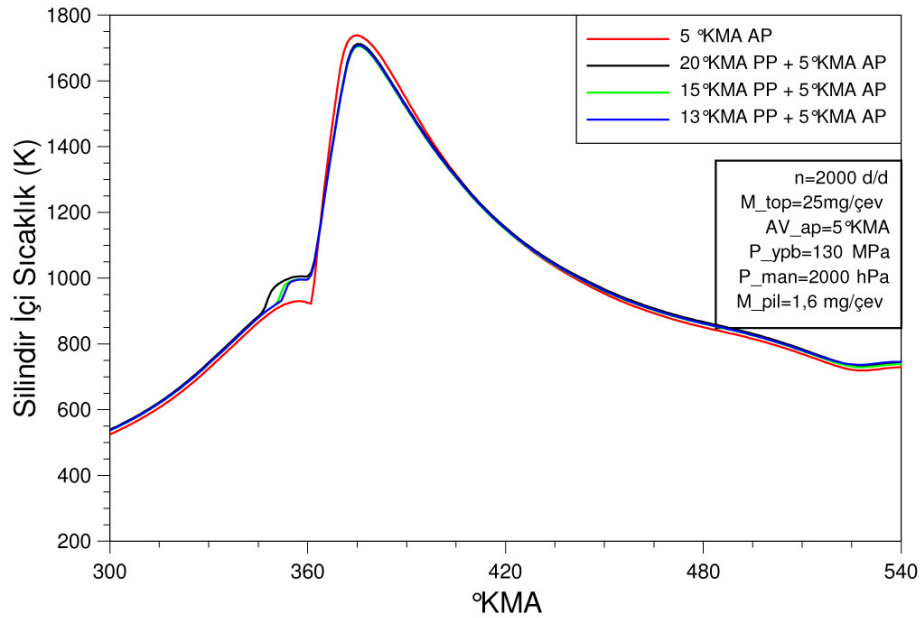
Şekil 6. 137 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,6$ mg/cev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.



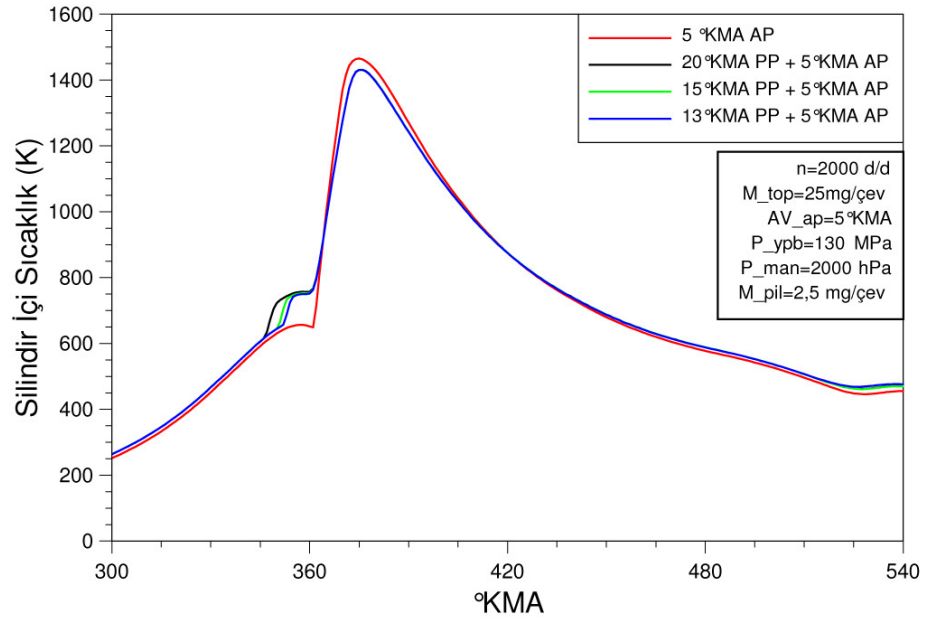
Şekil 6. 138 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.



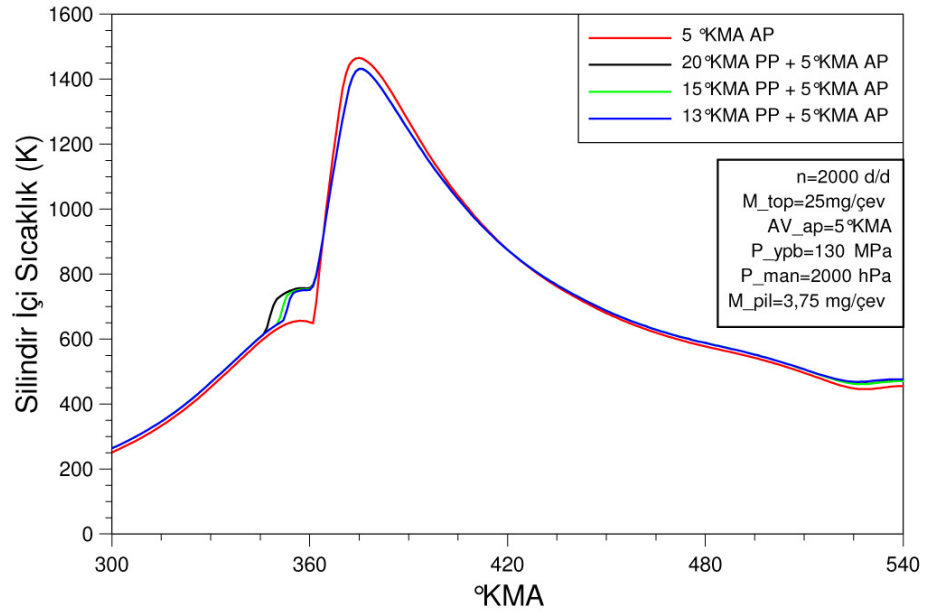
Şekil 6.139 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 6. 140 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.



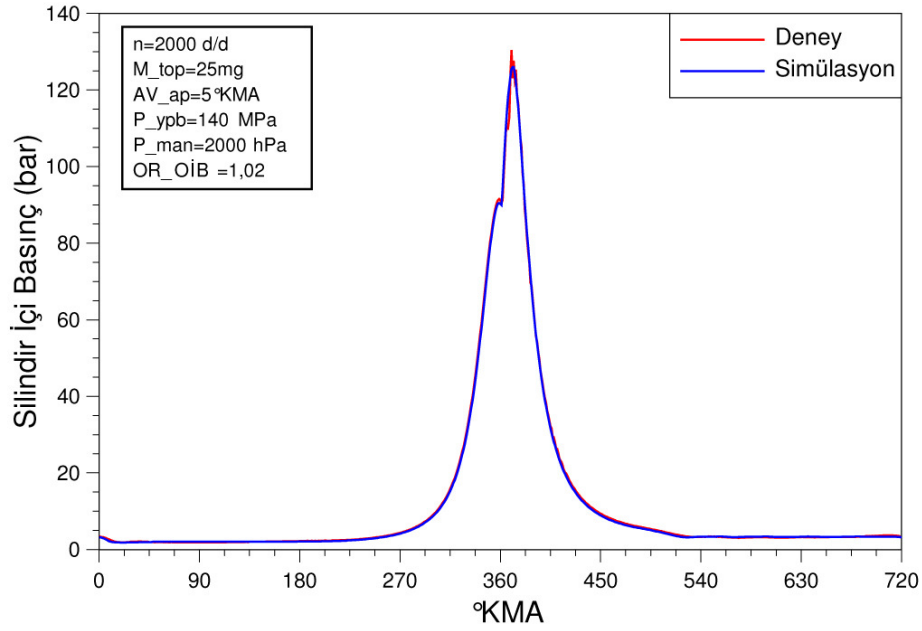
Şekil 6. 141 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.



Şekil 6. 142 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri silindir içi sıcaklarının karşılaştırılması.

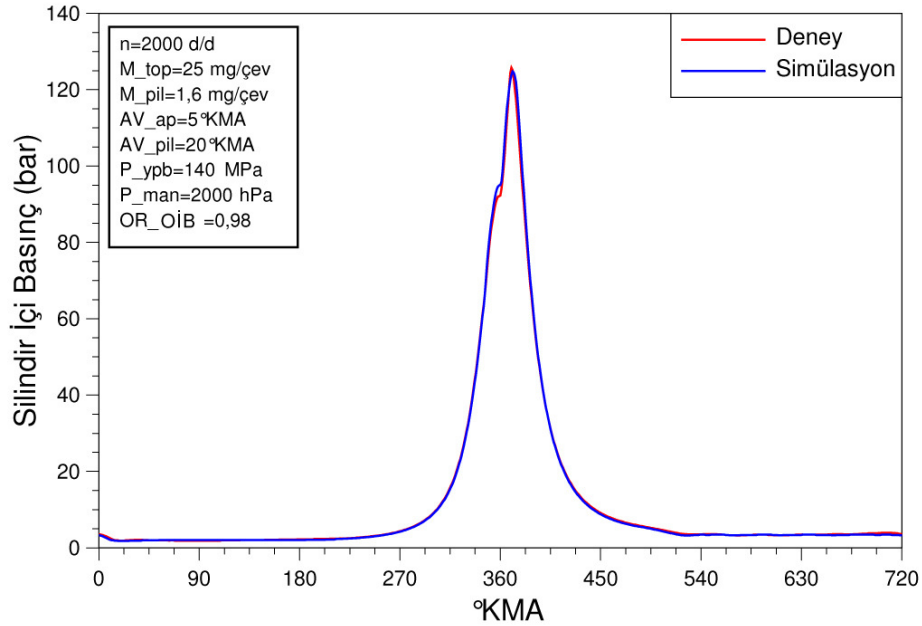
6.3.2 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{ypb}=130$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa

Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırması.



Şekil 6. 143 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa

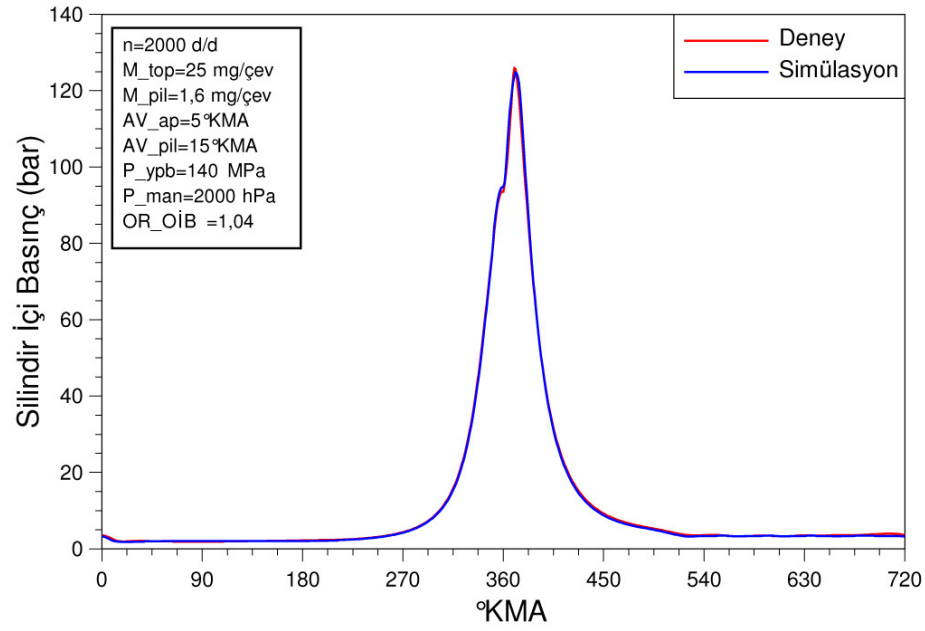
şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



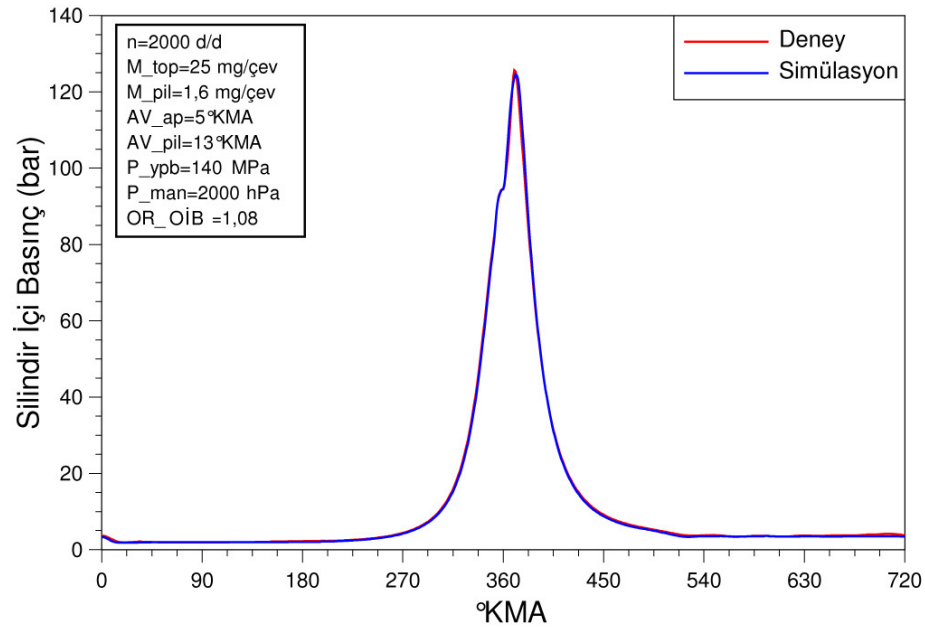
Şekil 6. 144 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev,

$M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi

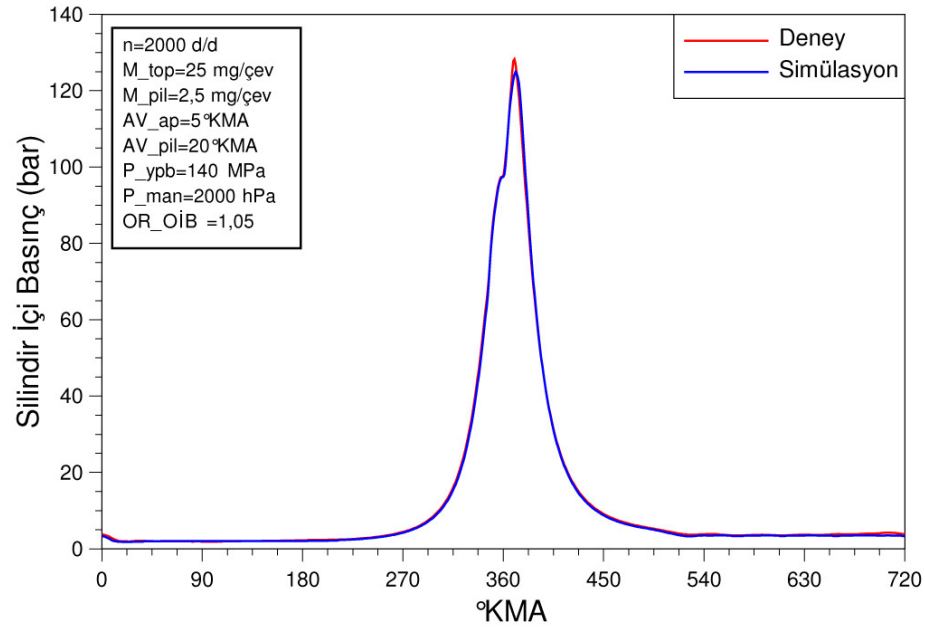
ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



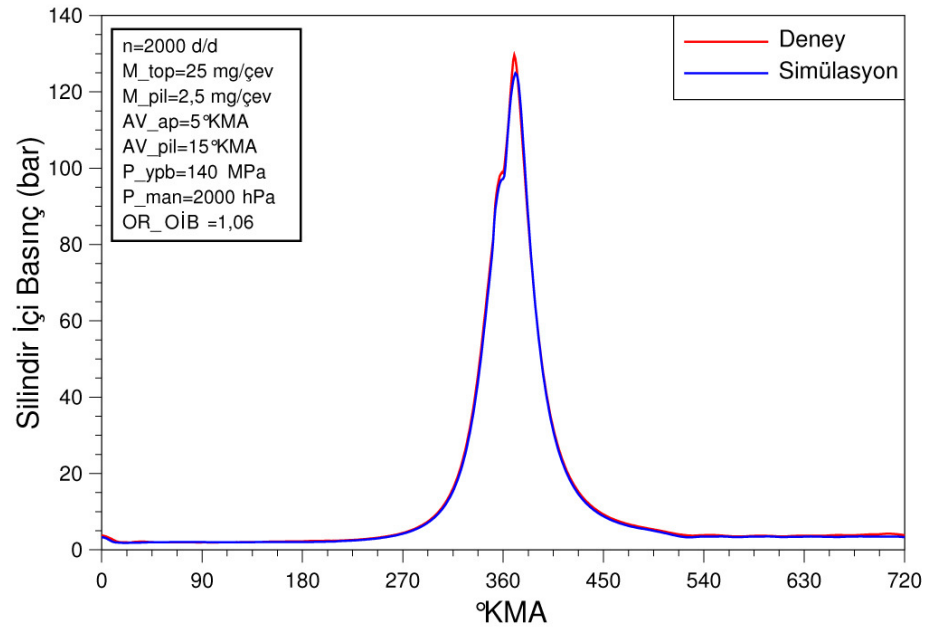
Şekil 6. 145 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=15^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



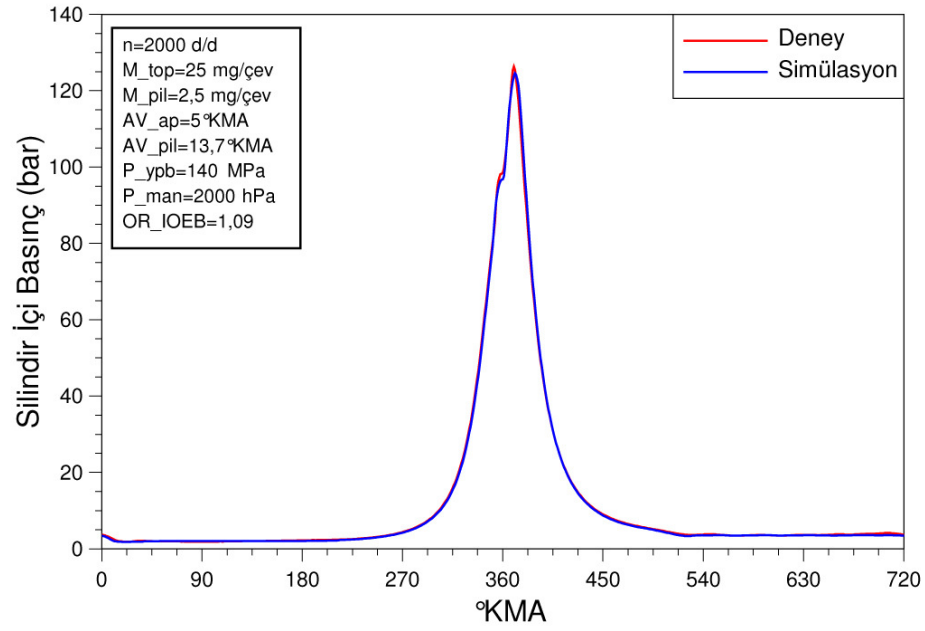
Şekil 6. 146 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $AV_{pil}=13^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



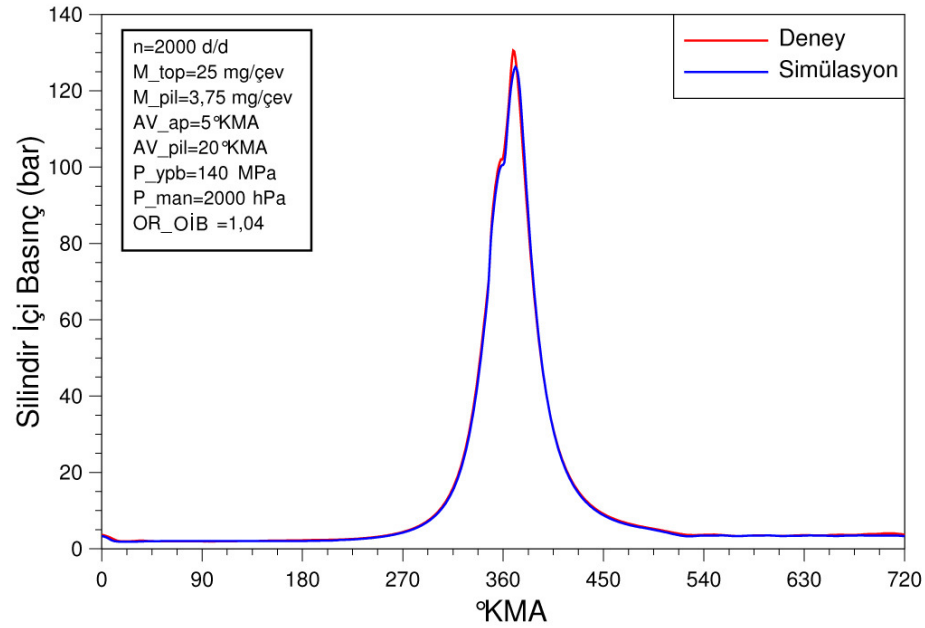
Şekil 6. 147 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



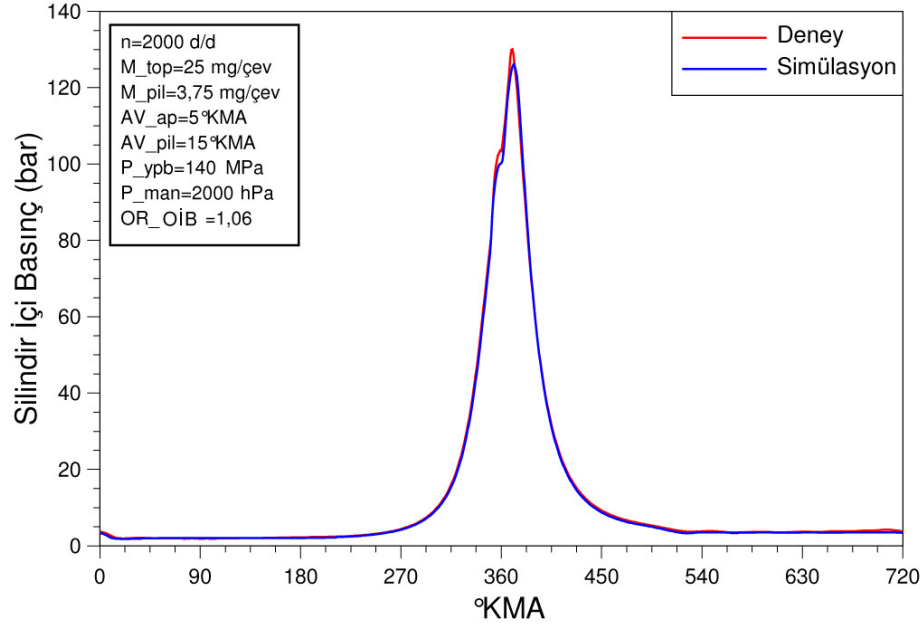
Şekil 6. 148 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



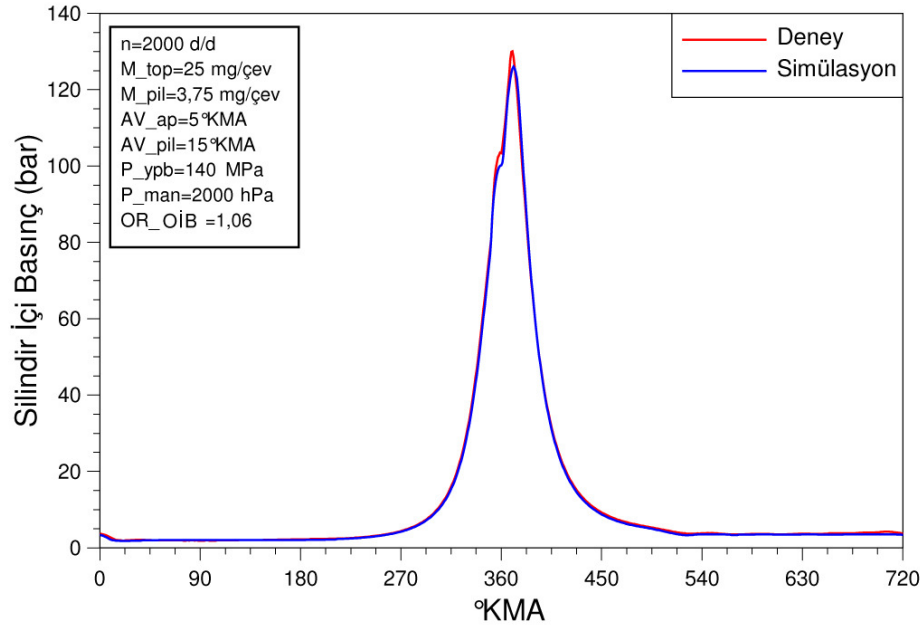
Şekil 6.149 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, AV_{pil}=13,7°KMA, M_{top}=25 mg/çev, M_{pil}=2,5 mg/çev, P_{man}=2000 hPa, P_{ypb}=140 MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



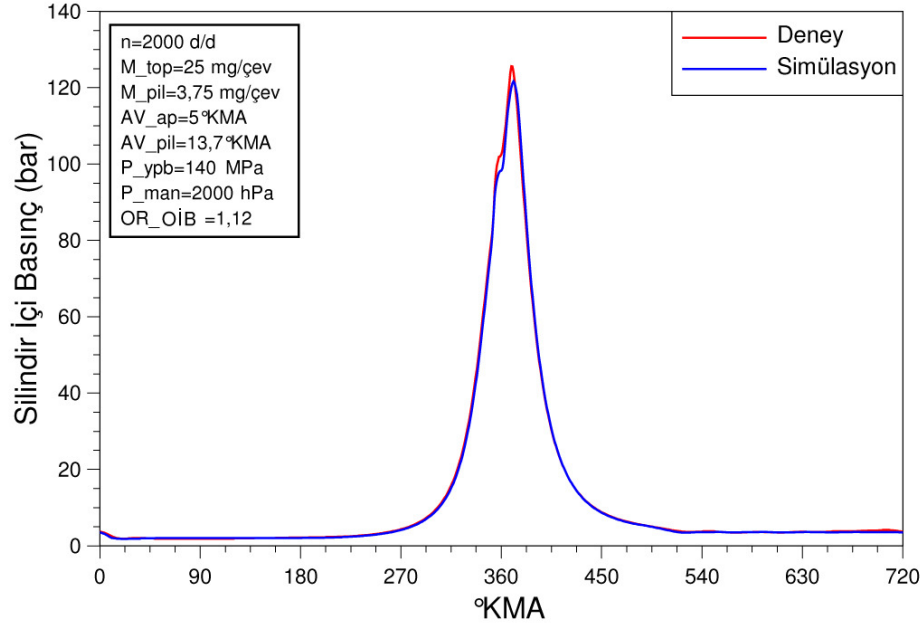
Şekil 6. 150 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, AV_{pil}=20°KMA, M_{top}=25 mg/çev, M_{pil}=3,75 mg/çev, P_{man}=2000 hPa, P_{ypb}=140 MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



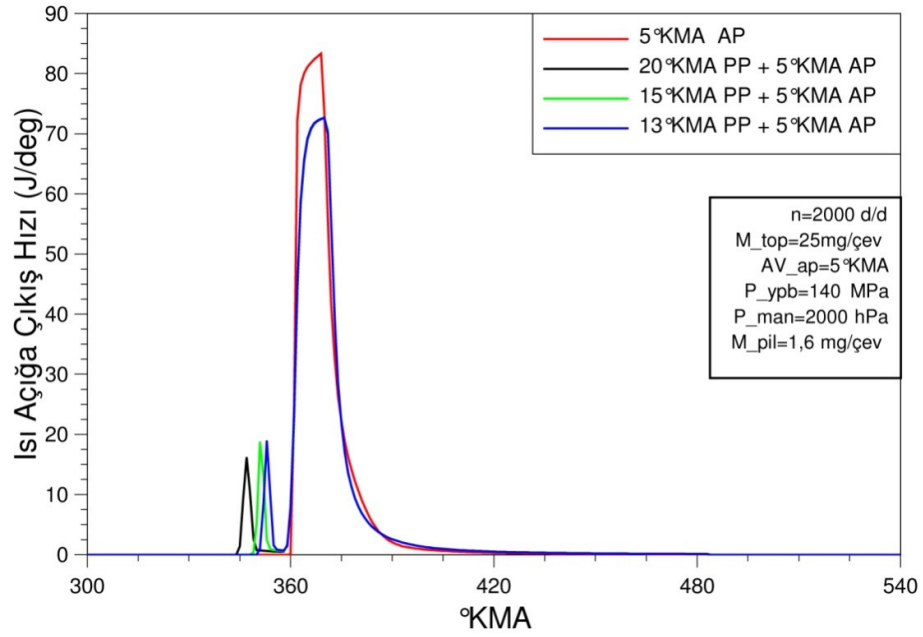
Şekil 6. 151 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



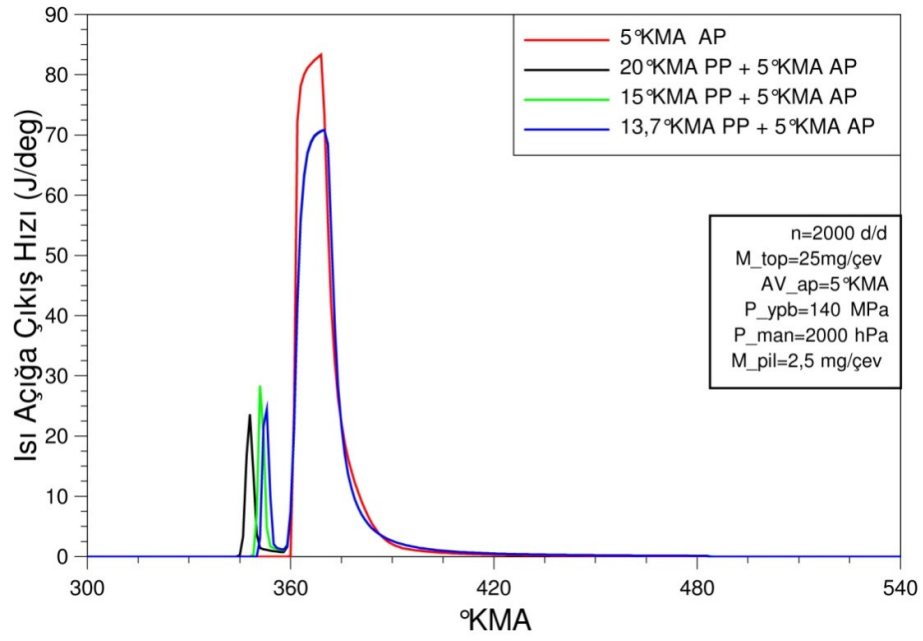
Şekil 6. 152 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=15^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



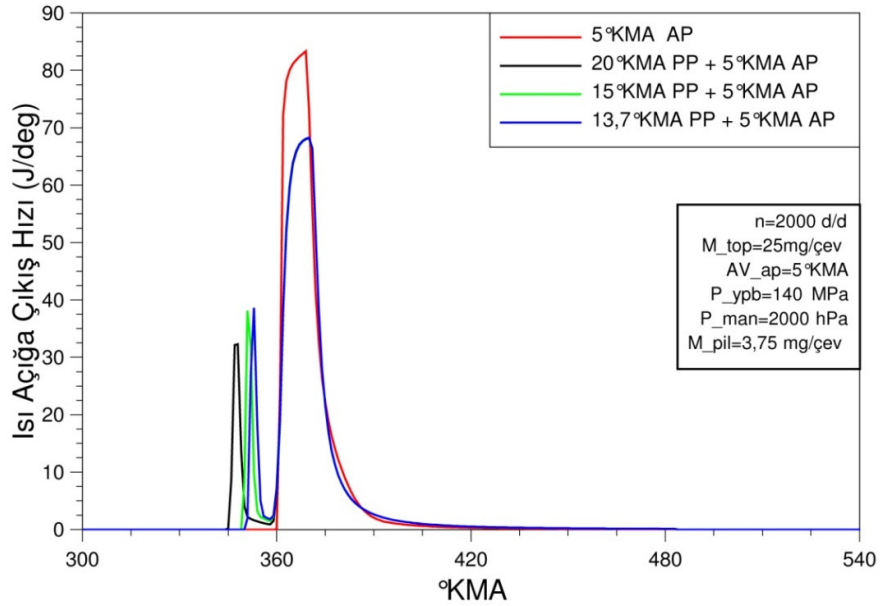
Şekil 6. 153 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=13,7^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



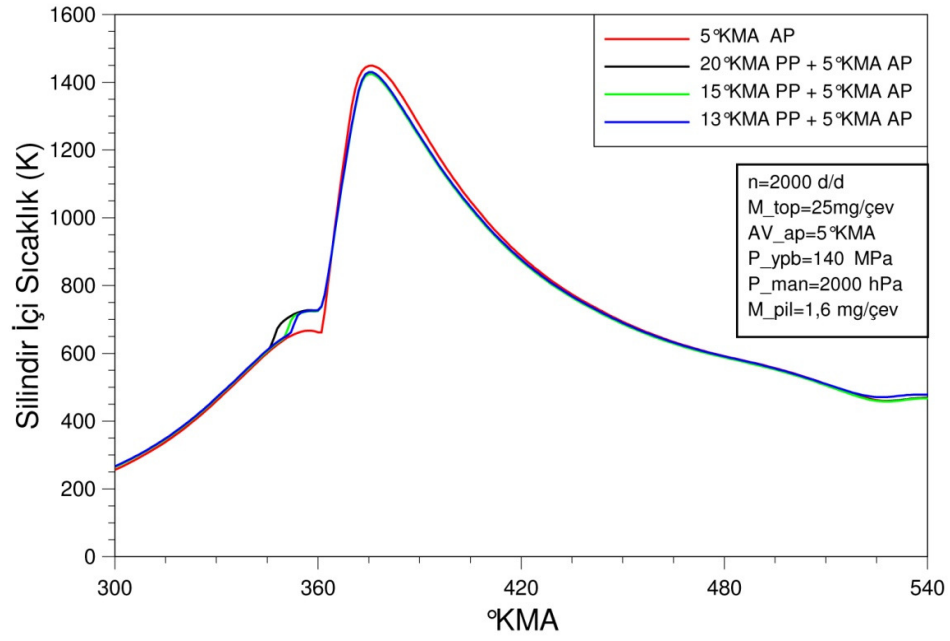
Şekil 6. 154 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



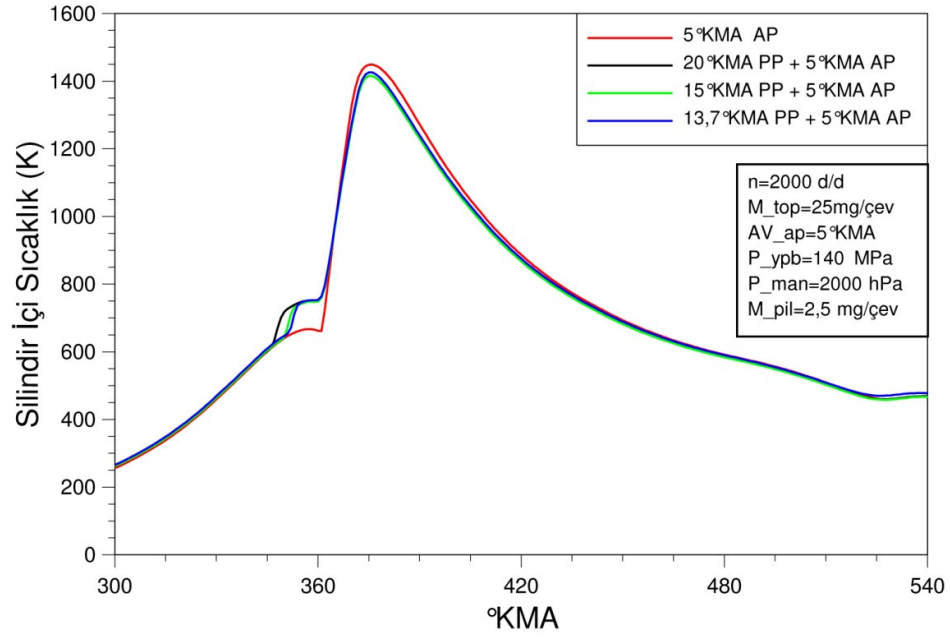
Şekil 6. 155 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



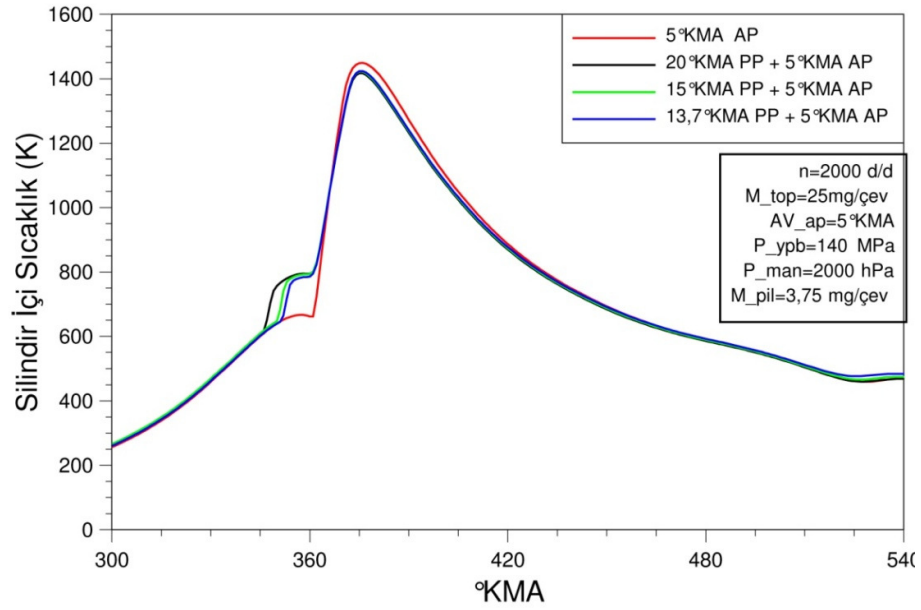
Şekil 6. 156 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



Şekil 6. 157 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,6$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması

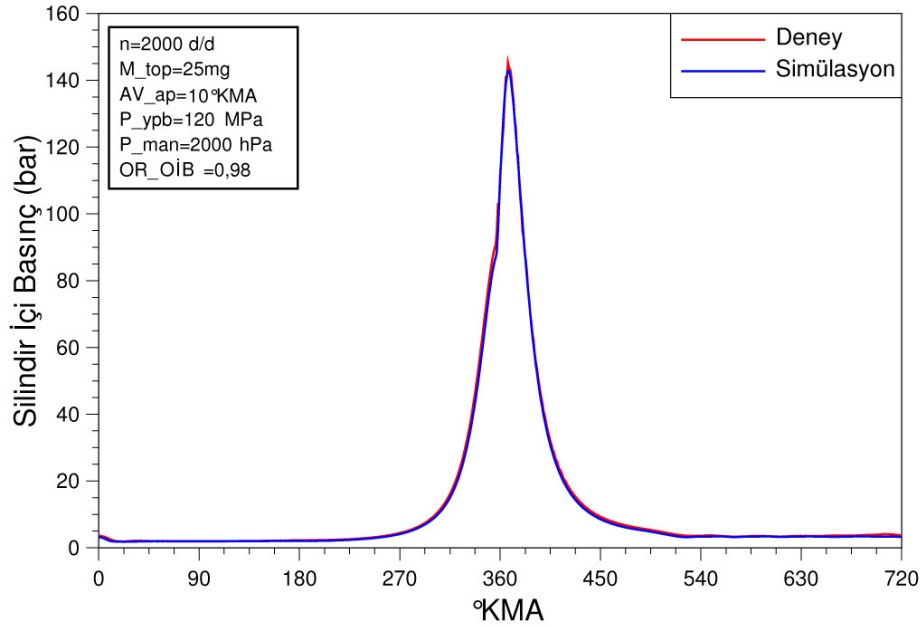


Şekil 6. 158 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması

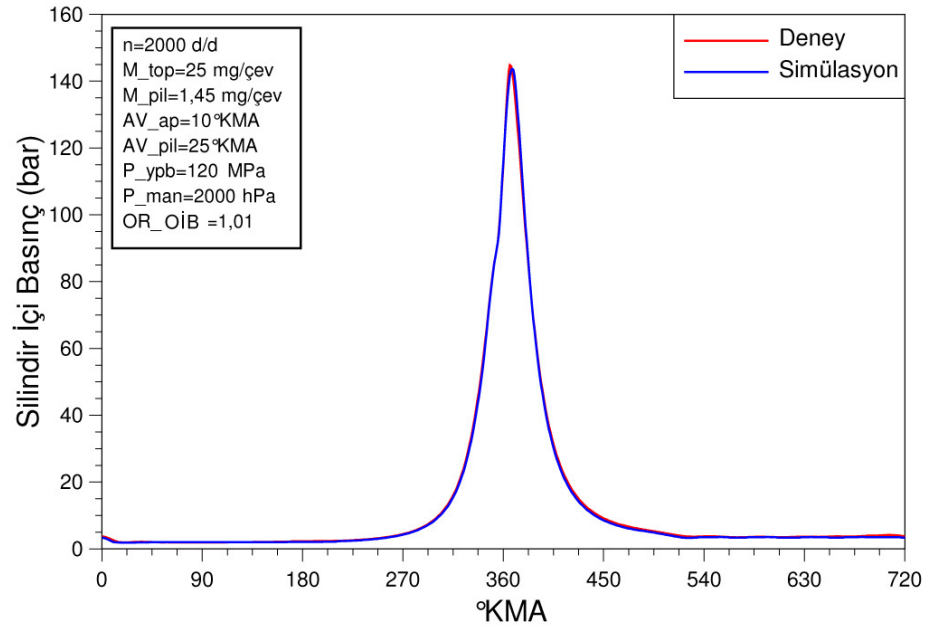


Şekil 6. 159 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması

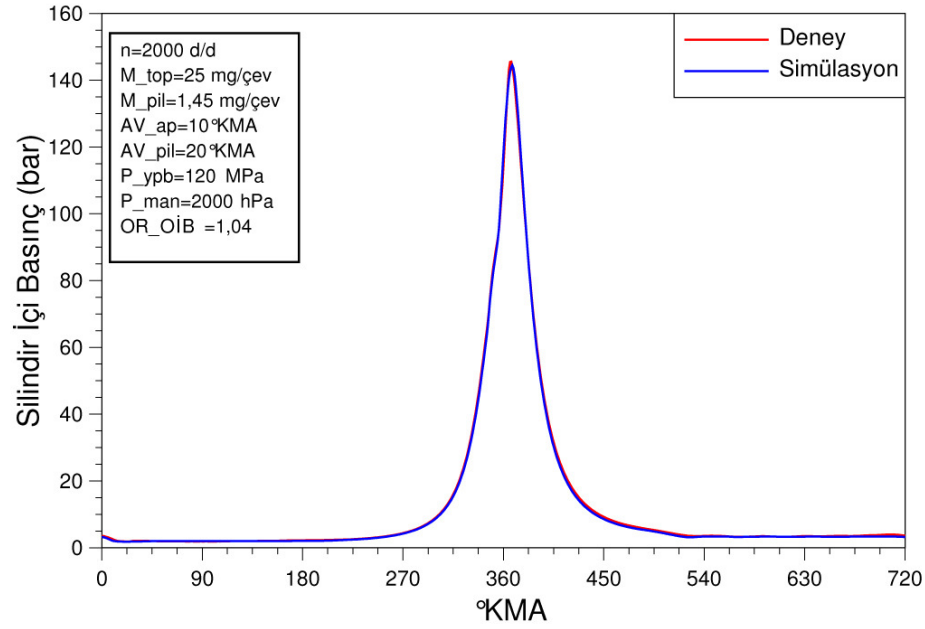
6.3.3 $n=2000$, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ\text{KMA}$, $P_{ypb}=120$ MPa, $P_{man}=2000$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırması.



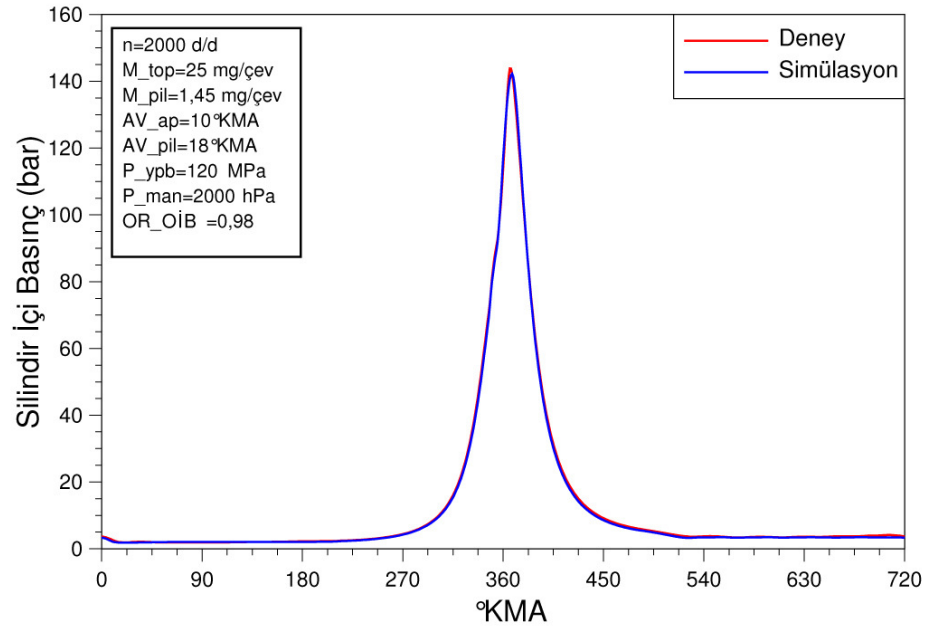
Şekil 6. 160 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



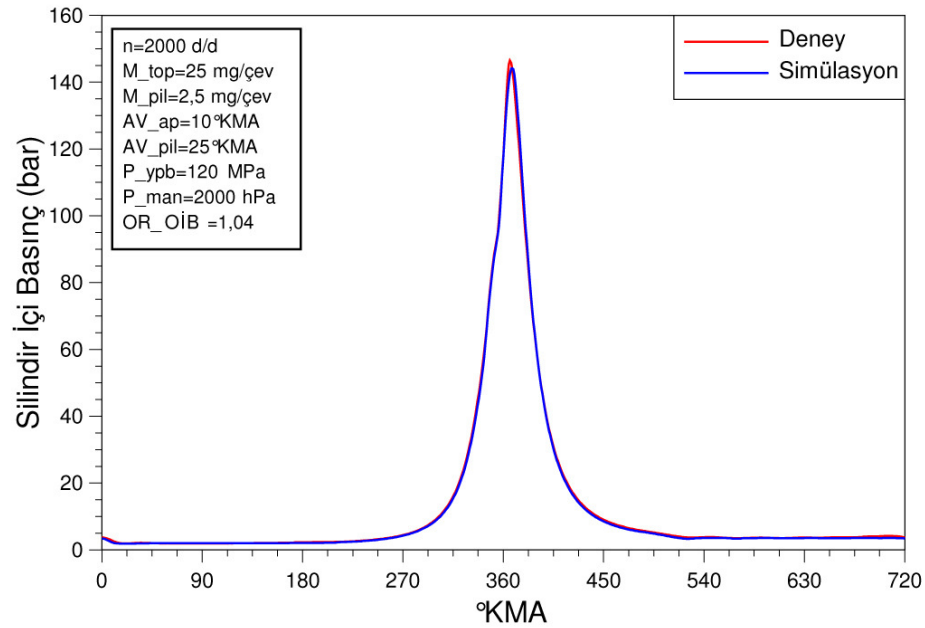
Şekil 6. 161 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=25^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



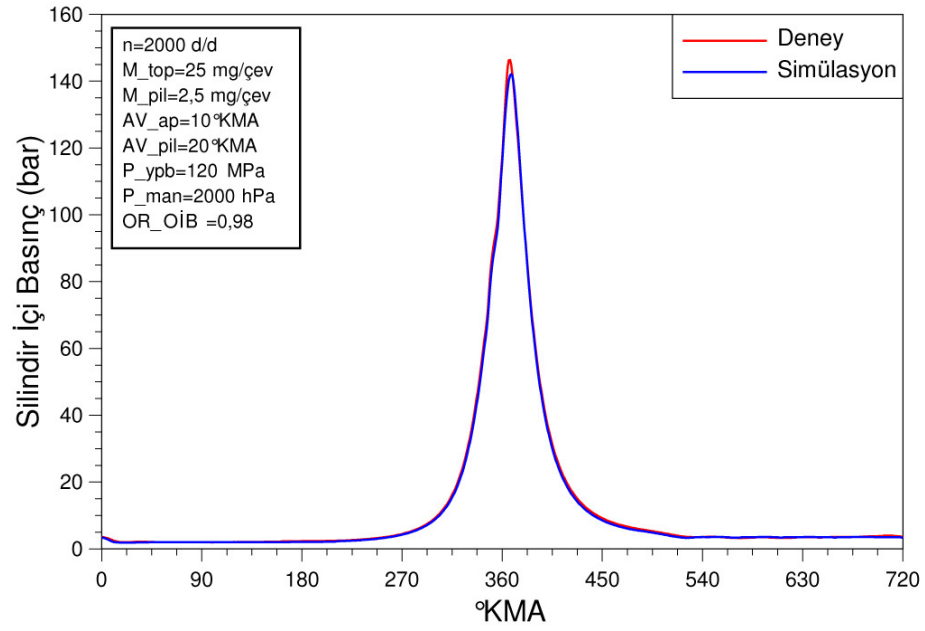
Şekil 6. 162 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



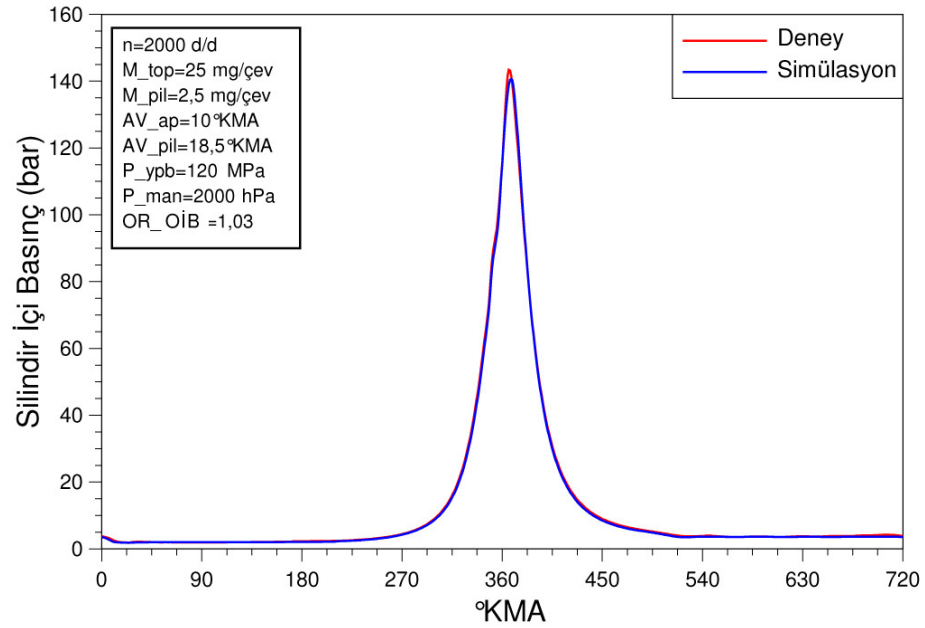
Şekil 6. 163 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=18^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



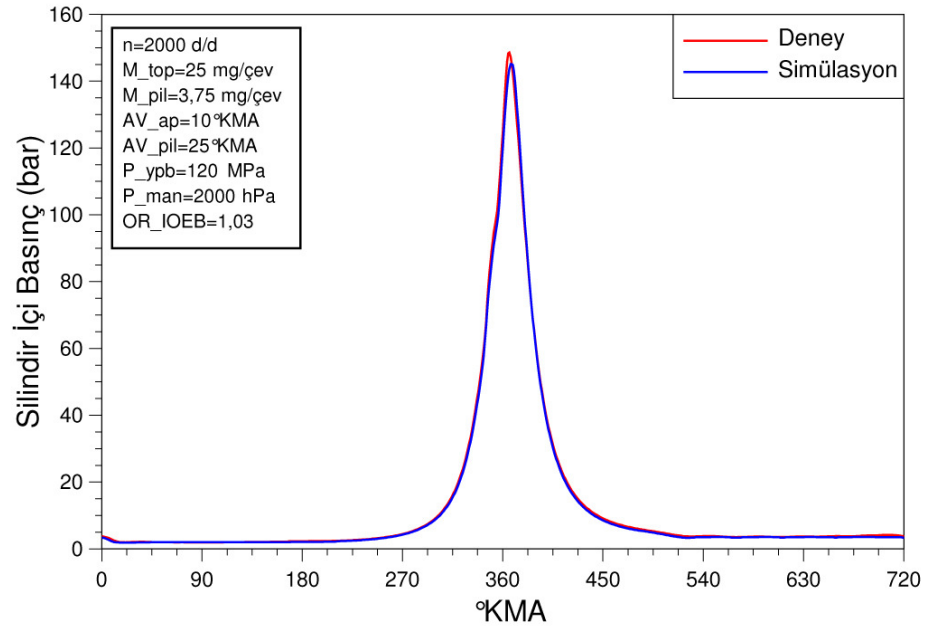
Şekil 6. 164 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=25^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



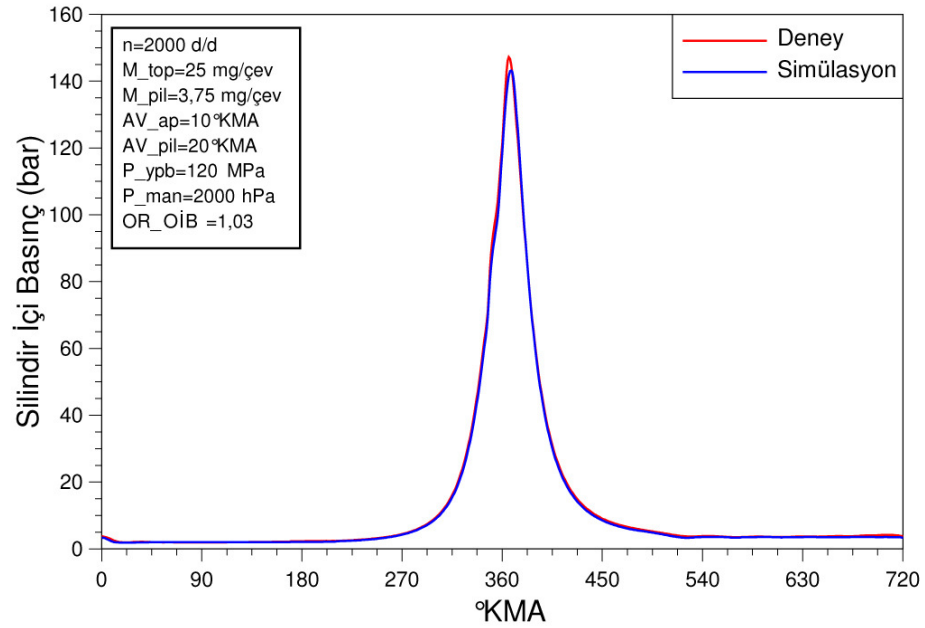
Şekil 6. 165 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



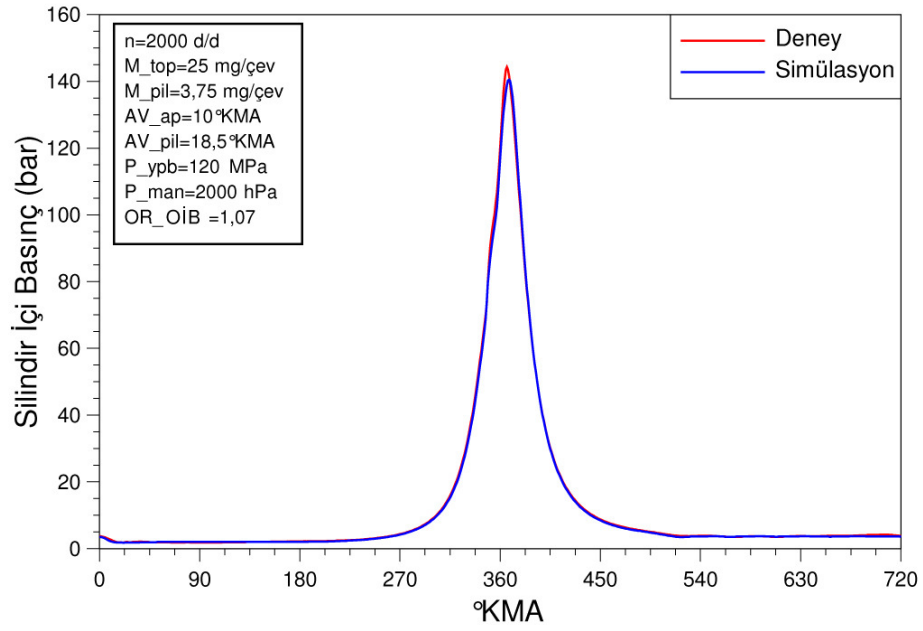
Şekil 6. 166 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=18,5^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



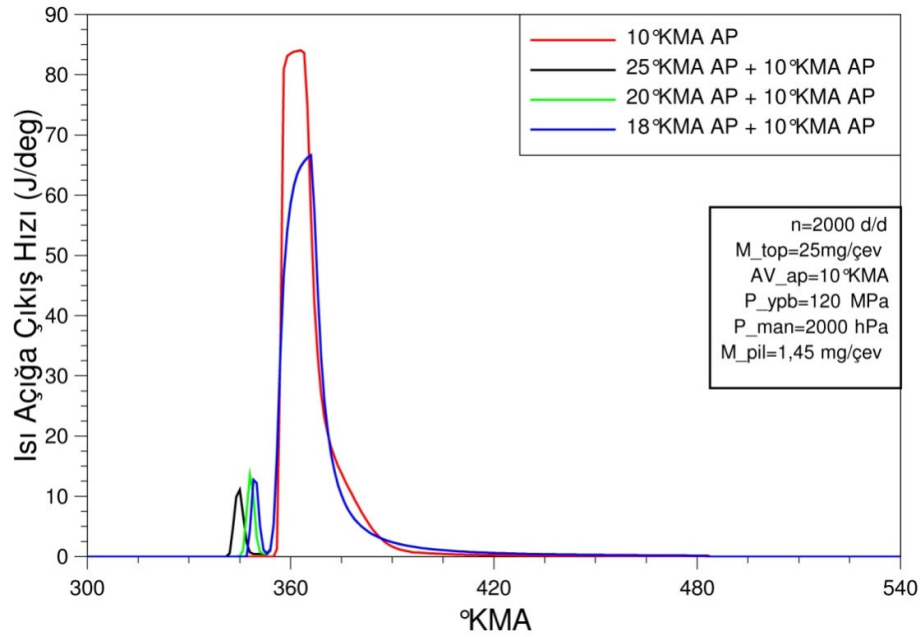
Şekil 6. 167 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=25^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



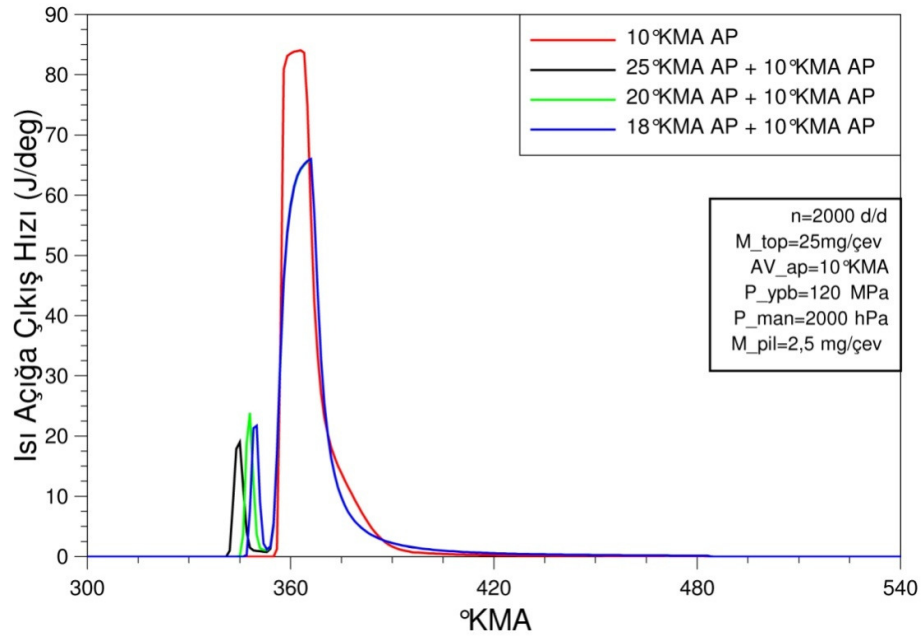
Şekil 6. 168 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



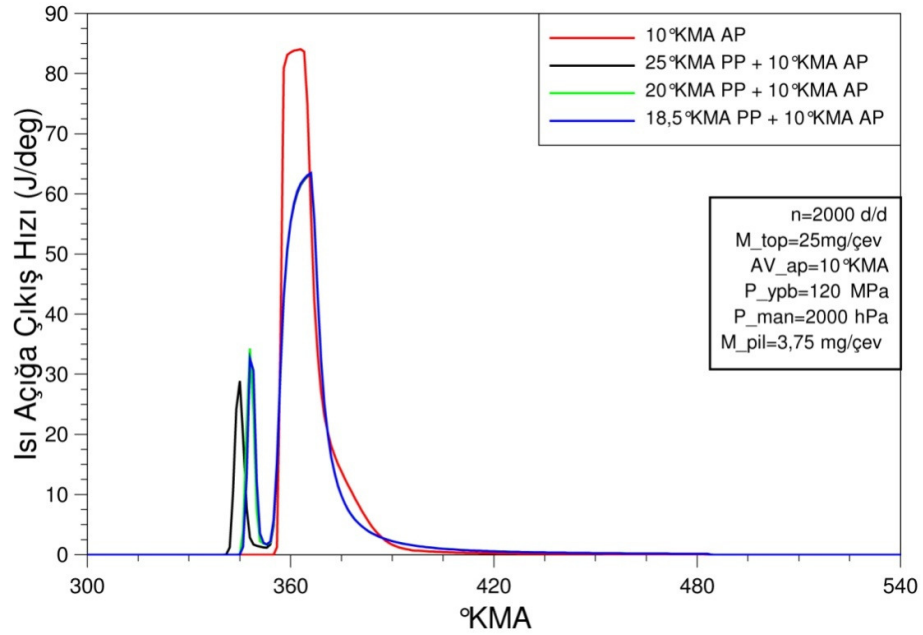
Şekil 6. 169 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=18,5^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



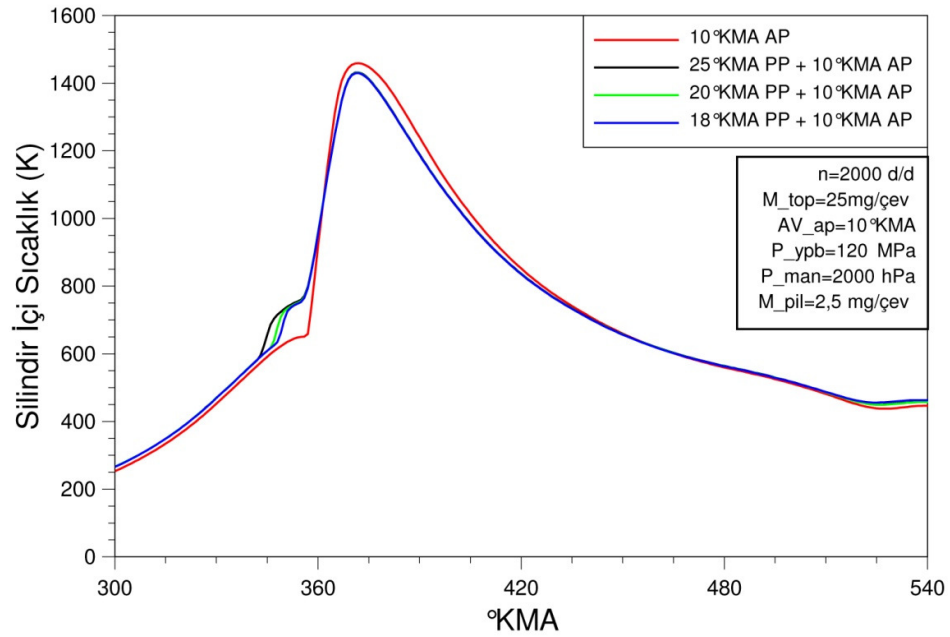
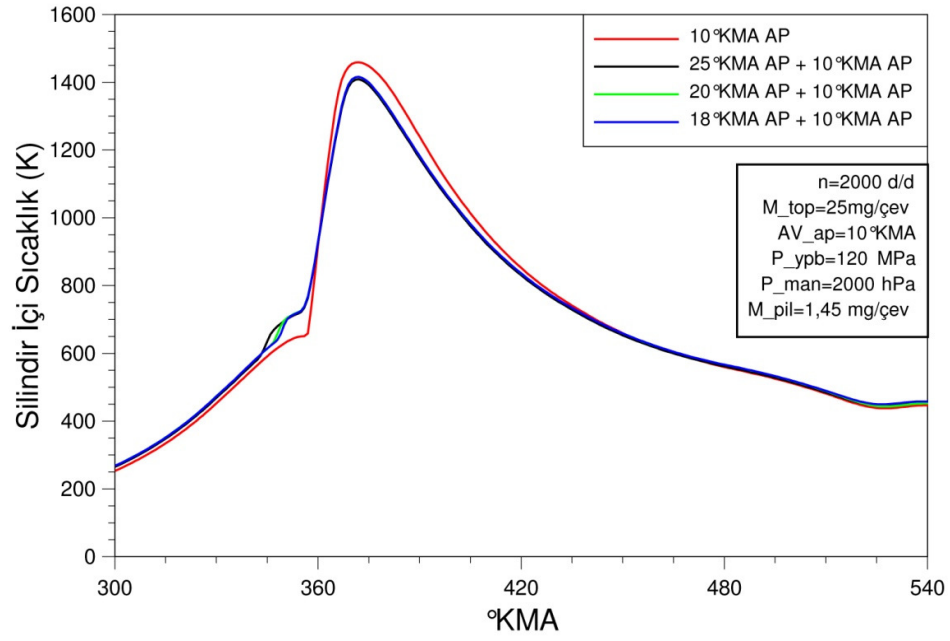
Şekil 6. 170 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,45$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması

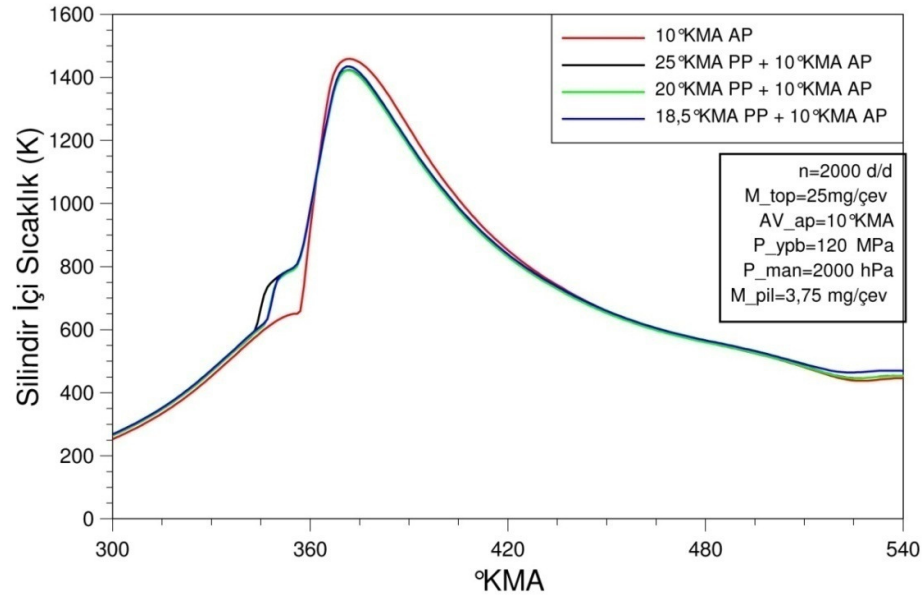


Şekil 6. 171 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, M_{top}=25 mg/çev, M_{pil}=2,5 mg/çev, P_{man}=2000 hPa, P_{ypb}=120 MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



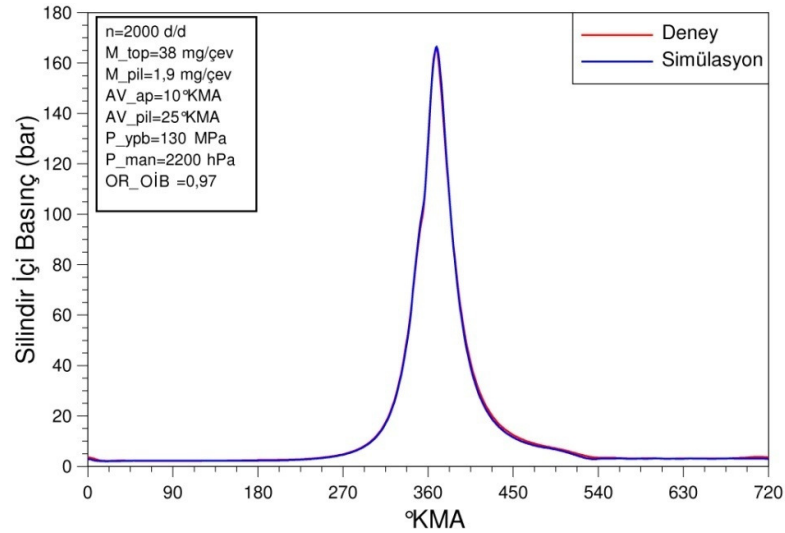
Şekil 6. 172 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, M_{top}=25 mg/çev, M_{pil}=3,75 mg/çev, P_{man}=2000 hPa, P_{ypb}=120 MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



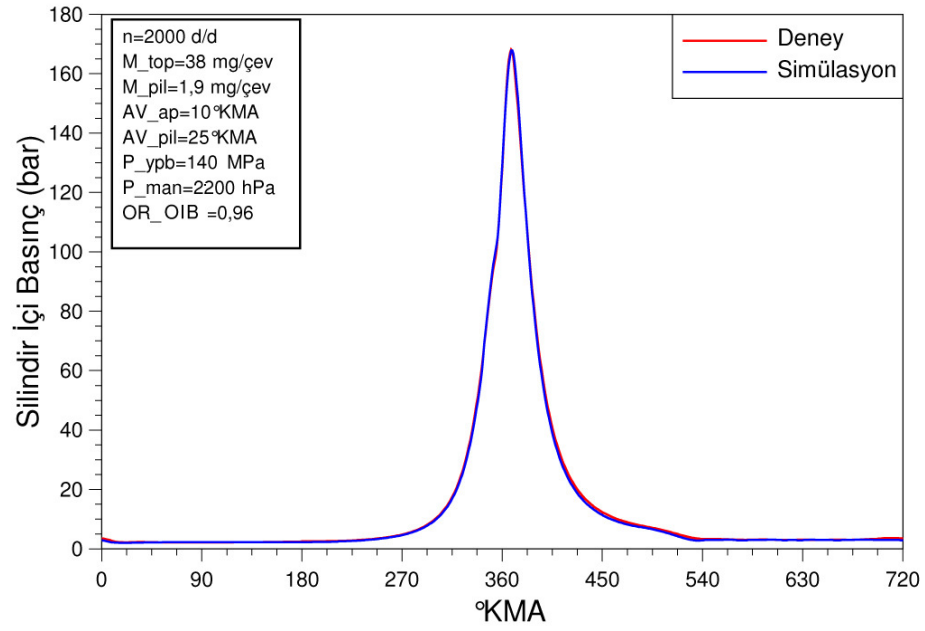


Şekil 6. 175 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=3,75$ mg/çev, $P_{man}=2000$ hPa, $P_{ypb}=120$ MPa şartında referans AP stratejisi ve farklı AP+PP stratejileri için silindir içi sıcaklıkların karşılaştırılması

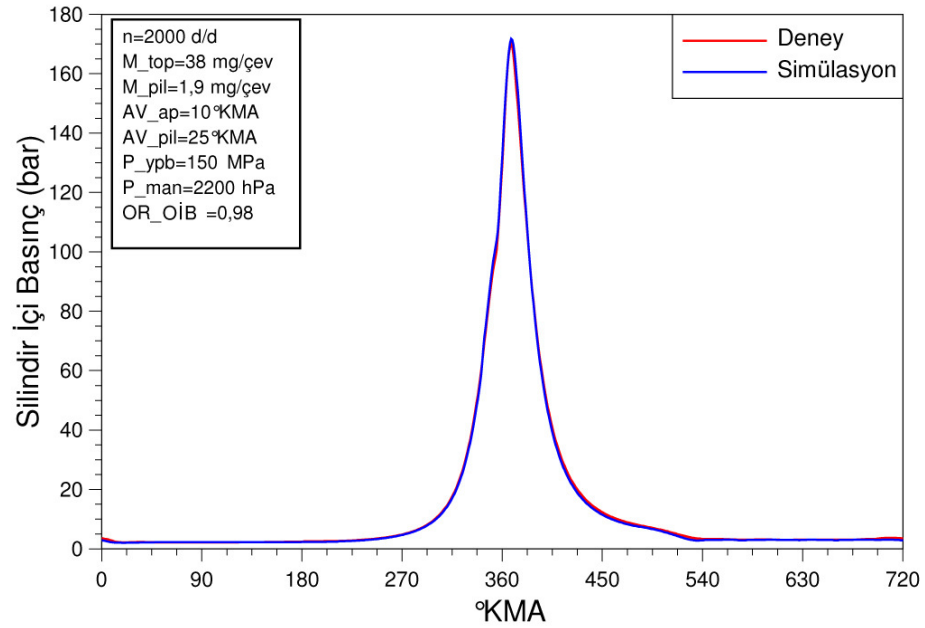
6.3.4 $n=2000$ d/d, $M_{top}=38$ mg/çev, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{ypb}=130,140,150$ MPa, $P_{man}=2200$ hPa Şartında Yapılmış Olan Deney Verilerin Karşılaştırması.



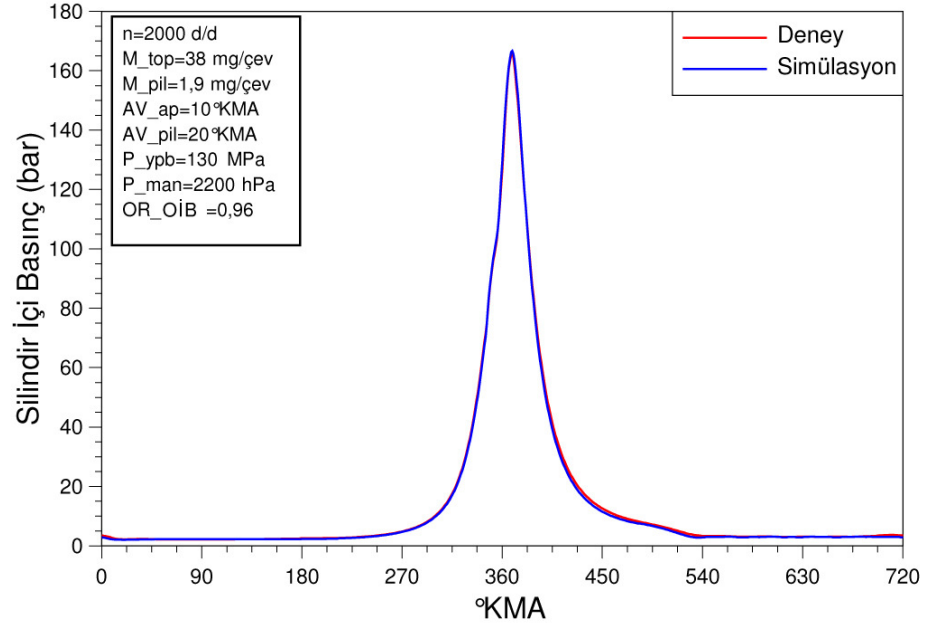
Şekil 6. 176 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=25^\circ KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



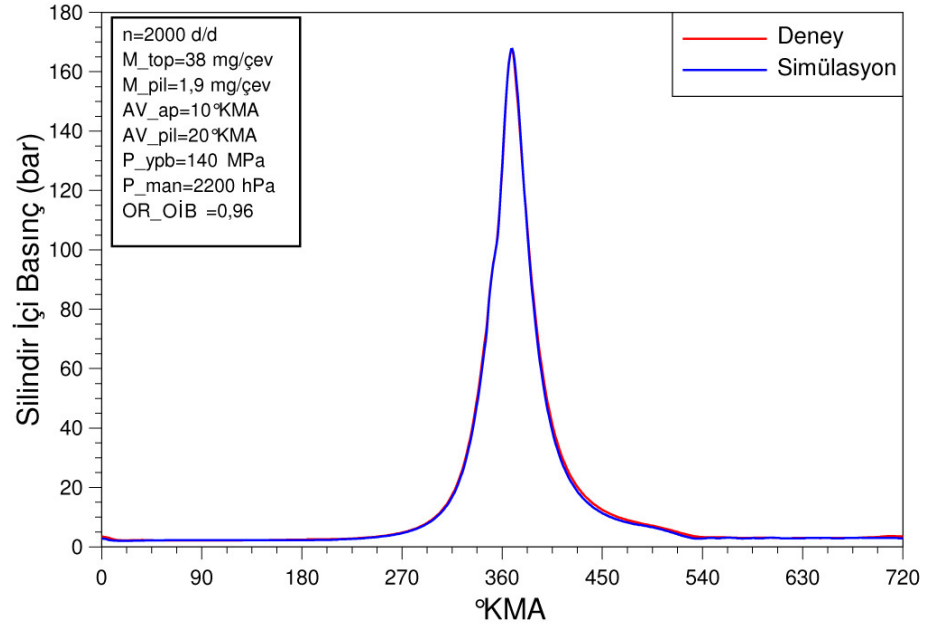
Şekil 6. 177 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



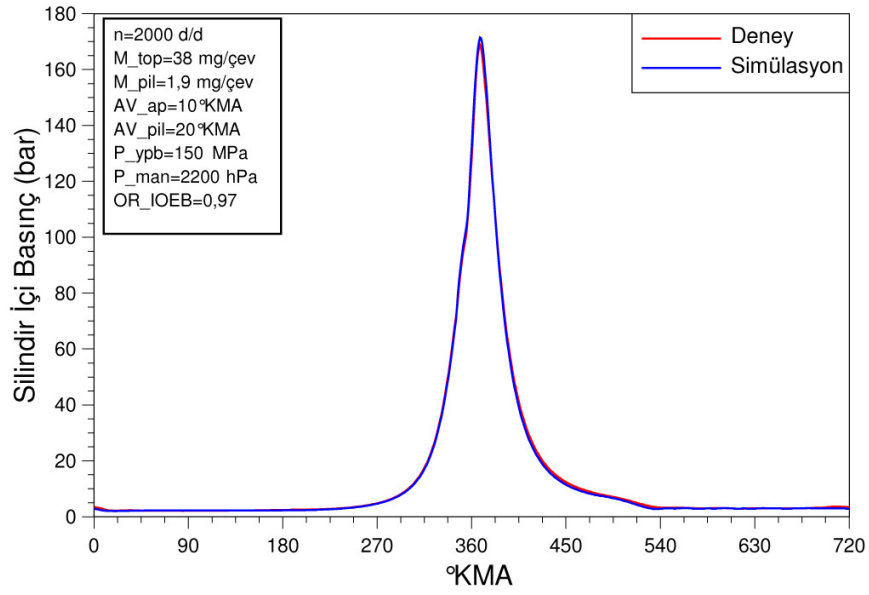
Şekil 6. 178 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=150$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



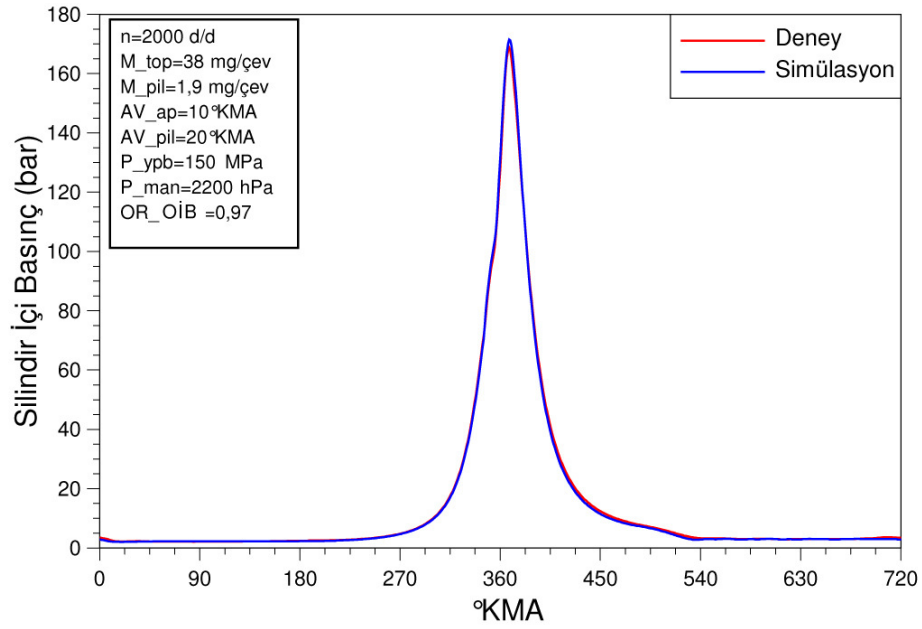
Şekil 6. 179 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



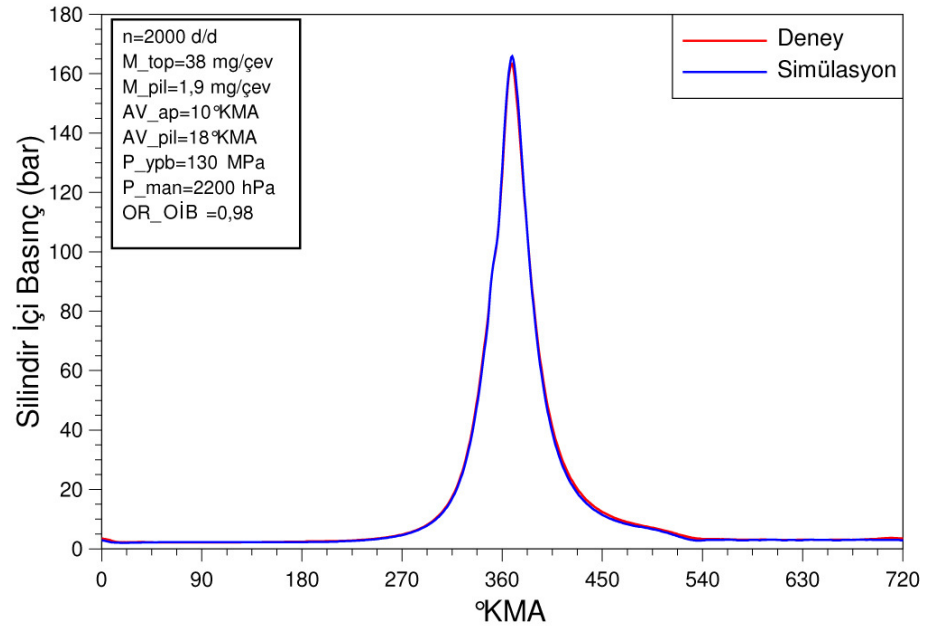
Şekil 6. 180 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $AV_{pil}=20^\circ KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



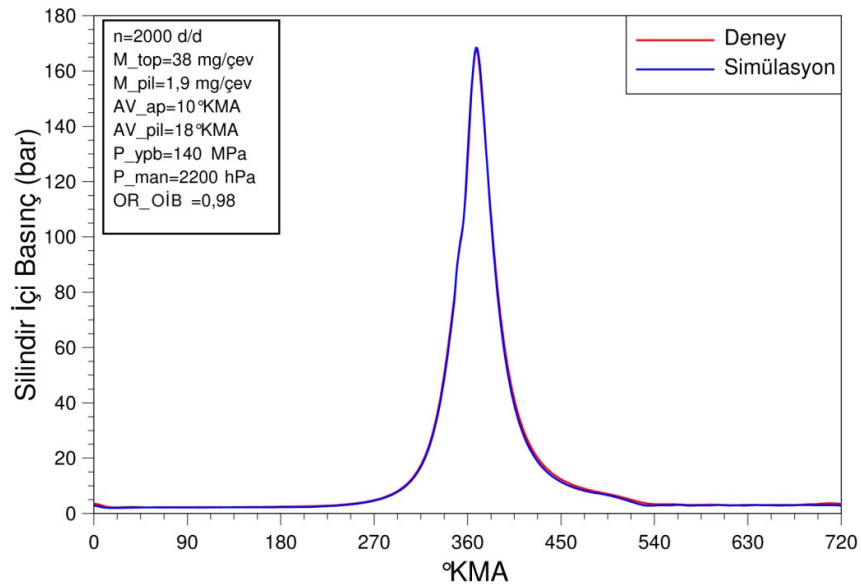
Şekil 6. 181 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $AV_{pil}=20^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=150$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması



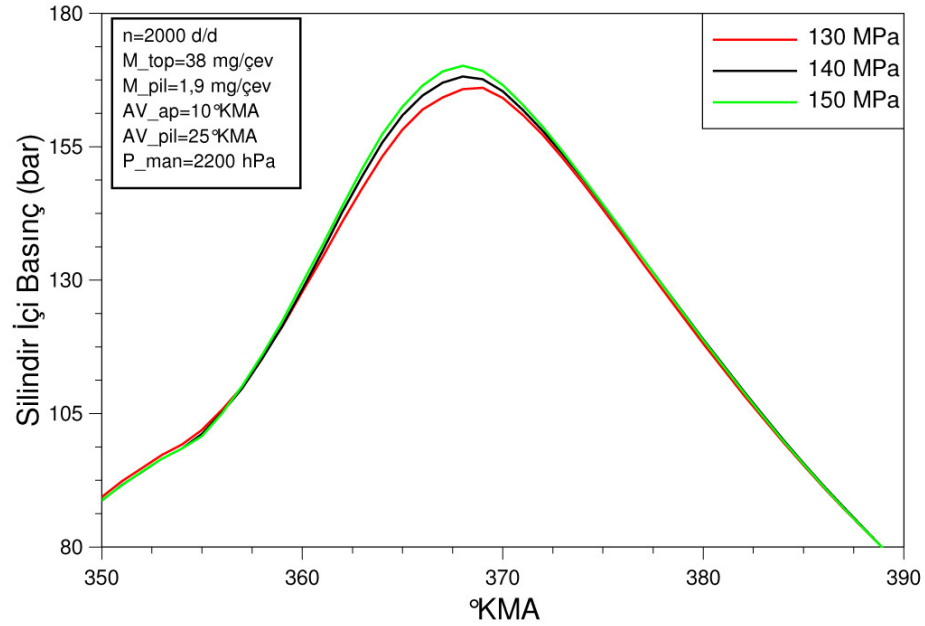
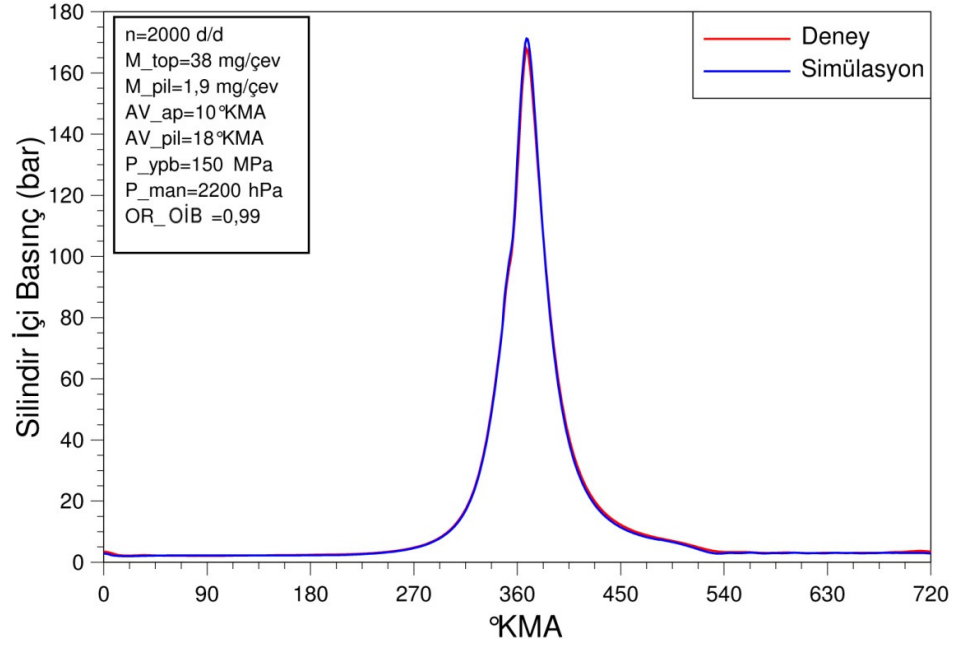
Şekil 6. 182 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $AV_{pil}=18^\circ\text{KMA}$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması

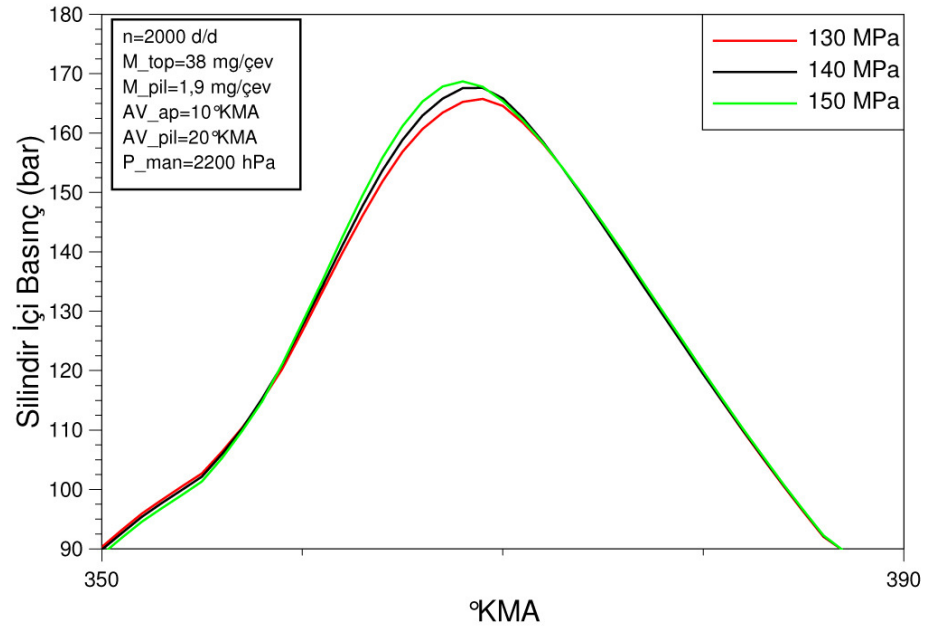


Şekil 6. 183 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=130$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması

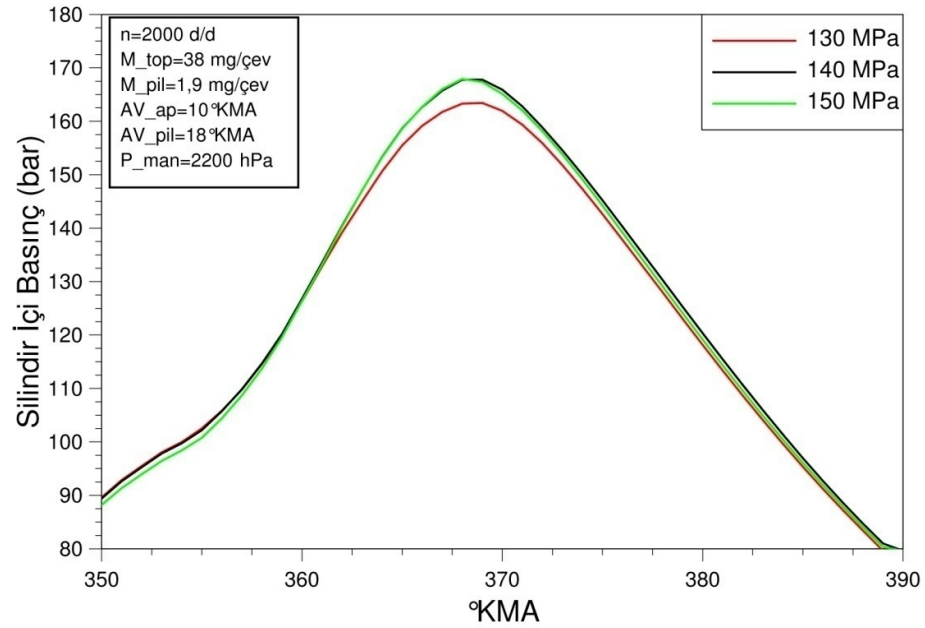


Şekil 6. 184 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, $P_{ypb}=140$ MPa şartında deney silindir içi basınç verisi ve simülasyon çıktısının karşılaştırılması

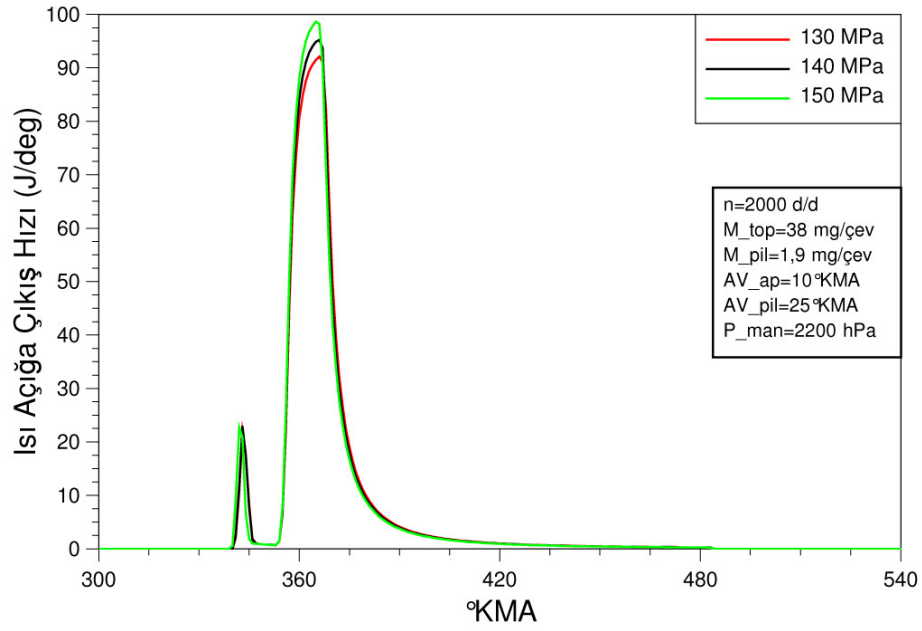




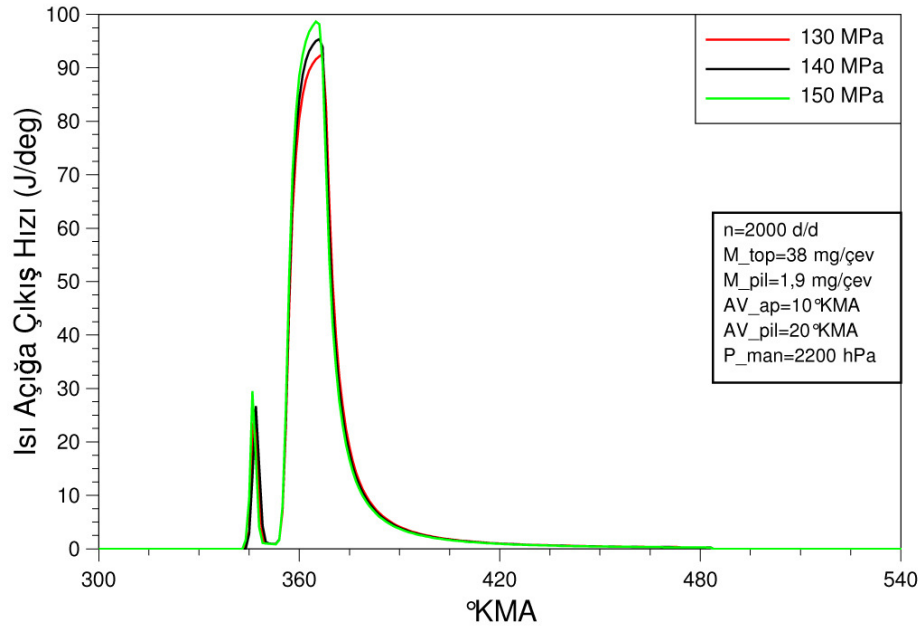
Şekil 6. 187 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=20^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklık verilerinin karşılaştırılması



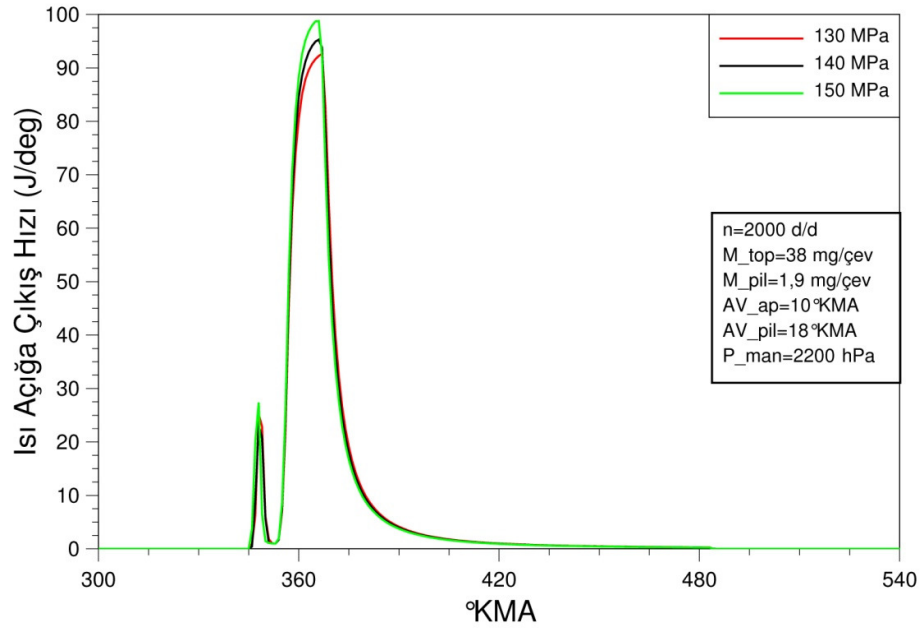
Şekil 6. 188 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklık verilerinin karşılaştırılması



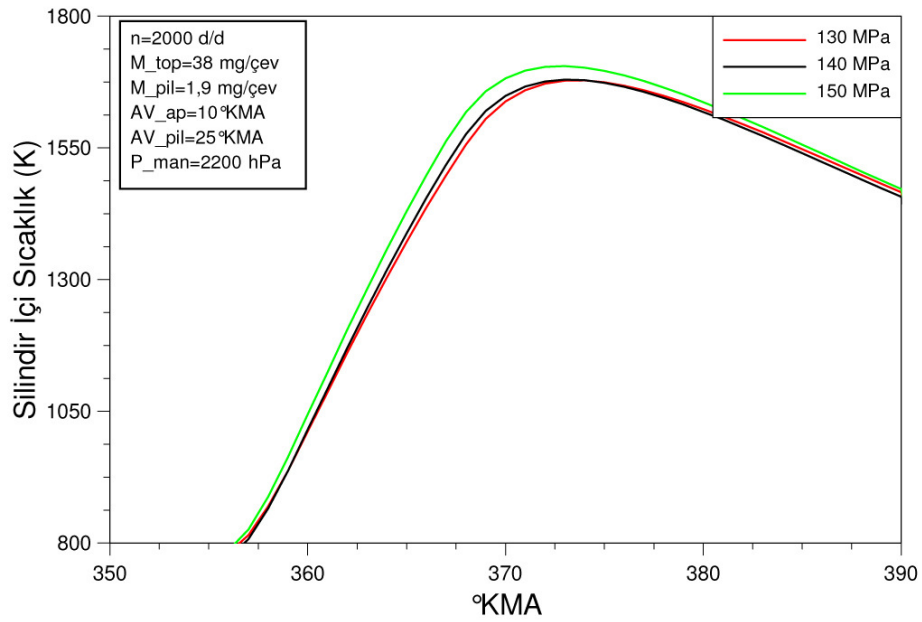
Şekil 6. 189 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, AV_{pil}=25°KMA, M_{top}=38 mg/çev, M_{pil}=1,9 mg/çev, P_{man}=2200 hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



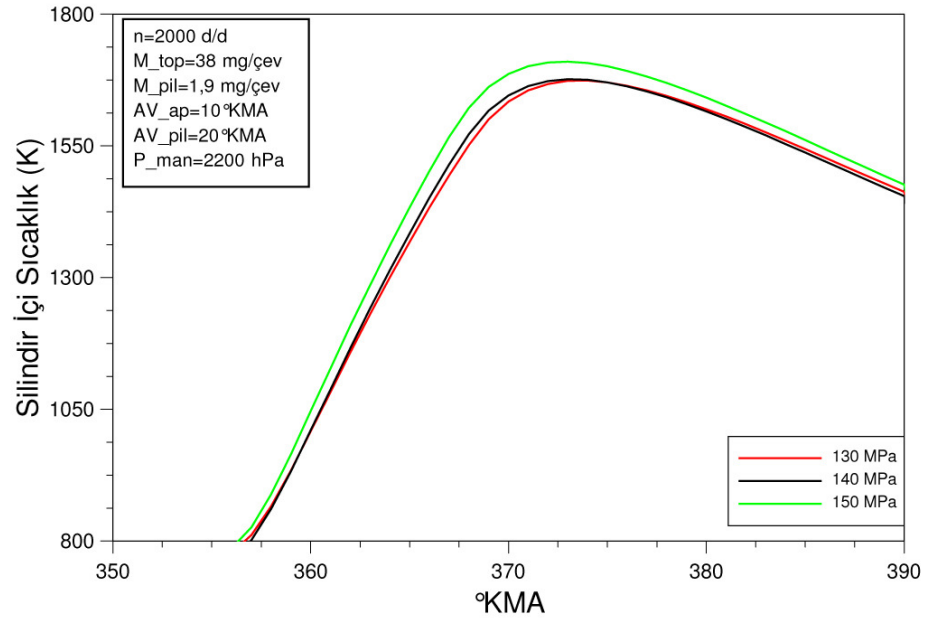
Şekil 6. 190 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, AV_{pil}=20°KMA, M_{top}=38 mg/çev, M_{pil}=1,9 mg/çev, P_{man}=2200 hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



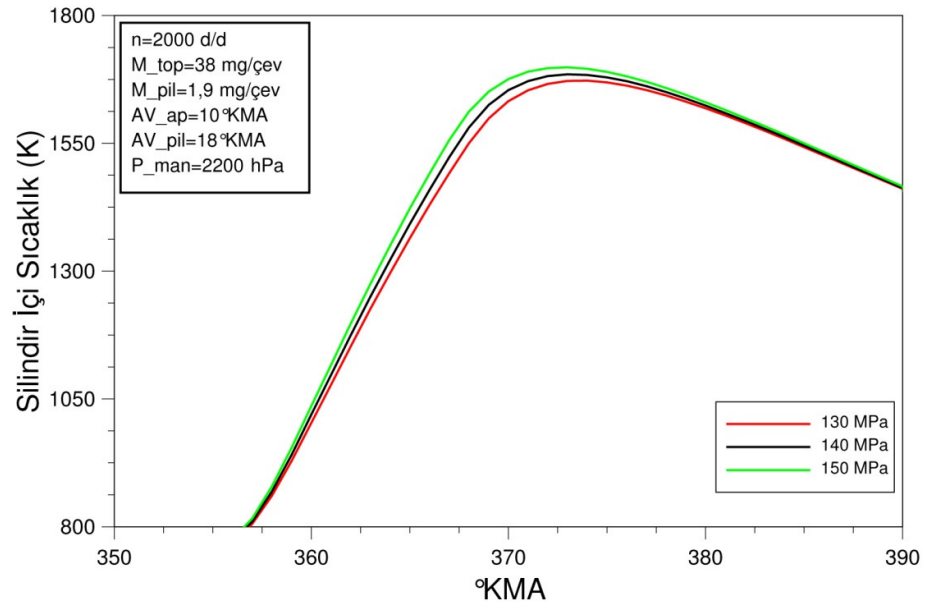
Şekil 6. 191 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=18^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin ısı açığa çıkış hızlarının karşılaştırılması



Şekil 6. 192 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $AV_{pil}=25^{\circ}KMA$, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 6. 193 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10$ °KMA, $AV_{pil}=20$ °KMA, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 6. 194 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10$ °KMA, $AV_{pil}=18$ °KMA, $M_{top}=38$ mg/çev, $M_{pil}=1,9$ mg/çev, $P_{man}=2200$ hPa, şartında yapılmış deneylerin silindir içi sıcaklıklarının karşılaştırılması

6.4 YSA Ve Tek Boyutlu Termodinamik Programın Birlikte Kullanılması

Yapay sinir ağıları metodu ile belirlenecek olan BOOST programı simülasyon parametreleri, bu parametreler için dizayn edilmiş olan YSA'ların özellikleri ve hassasiyetleri takip eden bölümde verilmiştir. 4. bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmış olan yöntemin doğruluk oranının test edilebilmesi açısından 10 adet örnek eğitim, doğrulama ve test aşamasında herhangi bir şekilde oluşturulan YSA'lara gösterilmemiş ve dinamometre üzerinde denenmiş 10 nokta için yöntemin hassasiyeti irdelenmiştir.

Parametrelerin, sıcaklıkların, basınçların tahmininde kullanılan YSA'nın 7 ağ girdisi şu şekildedir,

- a) Motor hızı ($d/d(n)$)
- b) Toplam püskürtülen yakıt kütlesi (mg/çevrim) (m_{top})
- c) Pilot püskürtmede püskürtülen yakıt kütlesi (mg/çevrim) (m_{pil})
- d) Aşırı doldurma basıncı (bar) (P_{man})
- e) Yakıt püskürtme basıncı (bar) (P_{ypb})
- f) Pilot püskürtme başlama açısı-KMA° (AV_{pil})
- g) Ana püskürtme başlama açısı-KMA°(AV_{ap})

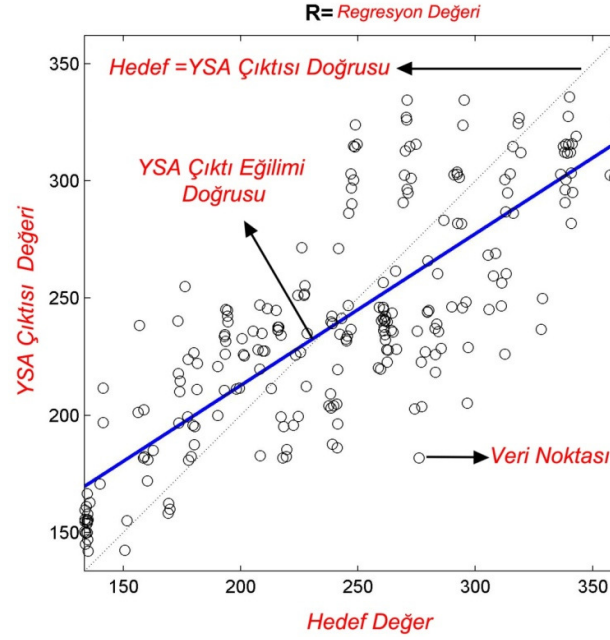
Laboratuvar ortamındaki deneyler boyunca 115 tek püskürtme yapılan deney, ve 246 pilot püskürtmenin yapıldığı toplam 361 deney gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Boost programı ile doğrulanmış ve doğrulama esnasında deneme yanılma yolu ile belirlenen simülasyon kalibrasyon parametreleri, sıcaklık ve basınçlar her bir deney noktası için belirlenmiştir ve hesaplanmıştır(361 nokta için) . Daha sonra motor test standında denenmemiş olan 2160 adet pilot püskürtme yapılan deney noktası için Boost programının çalıştırılması işlemine geçilmiştir. Bu aşamada yeni deney noktalarındaki program kalibrasyon parametreleri ve programın çalıştırılabilmesi için gerekli basınç ve sıcaklıklar belirlenirken bir önceki aşamada oluşturulmuş olan YSA metodundan yararlanılmıştır. Motor test standında denenmemiş olan ve belirlemiş olduğumuz yöntem ile modellenecek deney matrisi şu şekilde oluşturulmuştur.

Çizelge 6. 1 Deney matrisinin oluşturulması

Motor hızı (d/d)	2000,2500
Toplam püskürtülen yakıt kütlesi (mg/çevrim)	25,35,43
Pilot püskürtmede püskürtülen yakıt kütlesi (mg/çevrim) (MF _{pilot}) <i>Ana püskürtmenin % kütlesi cinsinden</i>	* 5,10,15,20 %
Aşırı doldurma basını (bar)	2 , 2.2 , 2.4
Yakıt püskürtme basıncı (bar)	1100,1200,1300,1400,1500
Ana püskürtme başlama açısı/avansı -KMA° <i>ÜÖN'dan önce</i>	5, 10
Pilot püskürtme başlama açısı-KMA° <i>Ana püskürtme avansının uzaklığı cinsinden , ÜÖN dan önce</i>	+5,+10,+15
Toplam Simülasyon Noktası Sayısı	2160

* 5% değeri içeri giren yakıt miktarı arttıkça büyüdüğünden, ve aşırı miktarda pilot püskürtmenin NOx emisyonlarını kötü yönde etkilediği dinamometre deneylerinde görüldüğünden, 35 ve 43 mg/çevrim püskürtülen noktalarda 5% değeri 1,25 mg/çevrim ile değiştirilmiştir.

YSA'lar ile kalibrasyonu yapılan parametreler, YSA'nın bu parametreleri tahmin yaklaşımları ve motor çalışma parametrelerine göre kalibre edilen diğer parametreler ve değişimleri aşağıda verilmiştir. Parametre tahmininde kullanılan YSA'ların hepsi literatürde özellikle de içten yanmalı motorların performans ve emisyon tahminlerinde kullanılan ÇKA tipindeki YSA'lardır. Simüle edilecek her kalibrasyon parametre grubu için ayrı bir ağ grubu oluşturulmuştur. Her bir YSA tek bir ara katmandan içermektedir. Ara katman aktivasyon fonksiyonu olarak "tanjant sigmoid" fonksiyonu, çıkış katmanında ise lineer fonksiyon kullanılmıştır. YSA'larda başlangıç olarak nöron sayısı rastlantısal olarak "10" belirlenmiş, eğer istenen doğruluk hassasiyeti istenen değere ulaşmaz ise bu sayının artırılması yoluna gidilmesi şeklinde bir YSA dizayn stratejisi belirlenmiştir, ancak 10 nöron ile dizayn edilen YSA'ların tamamı istenen (yeterli) doğruluk neticesine ulaştığından buna gerek duyulmamıştır. Eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquadt eğitim algoritması kullanılmıştır. Veri gurubu her YSA oluşumu için 70% eğitim, 15% doğrulama 15% test için ayrılmıştır.

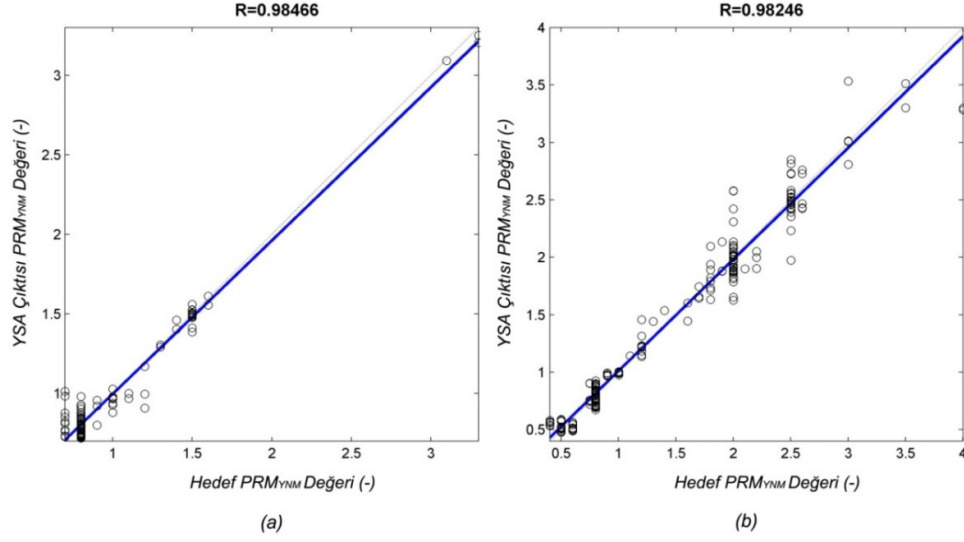


Şekil 6. 195 Hedef değerleri ve YSA çıktıların karşılaştırılmasının yapıldığı grafiklerin anlatımı.

6.4.1 Tek Püskürtmenin Yapıldığı Durumlarda Belirlenen Boost Programı Kalibrasyon Parametreleri Ve Simülasyon İçin Gerekli Olan Basınç Ve Sıcaklık Değerleri

6.4.1.1 Yanma Parametresi (PRM_{VM})

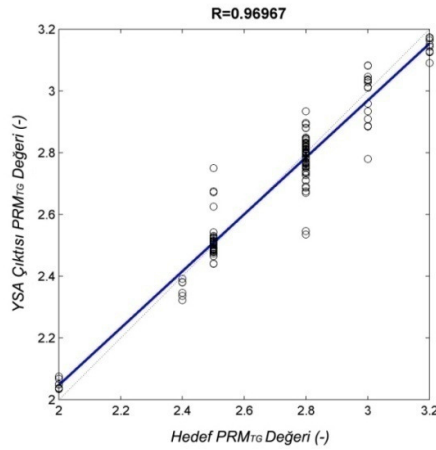
Yanma parametresi püskürtülen yakıtın yanması esnasında enerjinin açığa çıkış karakteristiğini düzelten bir parametre olup BOOST simülasyonunun kalibrasyonu esnasında belirlenmiştir. Daha sonra bu parametreyi tahmin eden 10 nöronlu iki YSA dizayn edilmiştir. YSA'ların korelasyon katsayıları grafiklerin üzerinde verilmiştir..



Şekil 6. 196 PRM_{YNM} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.2 Tutuşma Gecikmesi Parametresi (PRM_{TG})

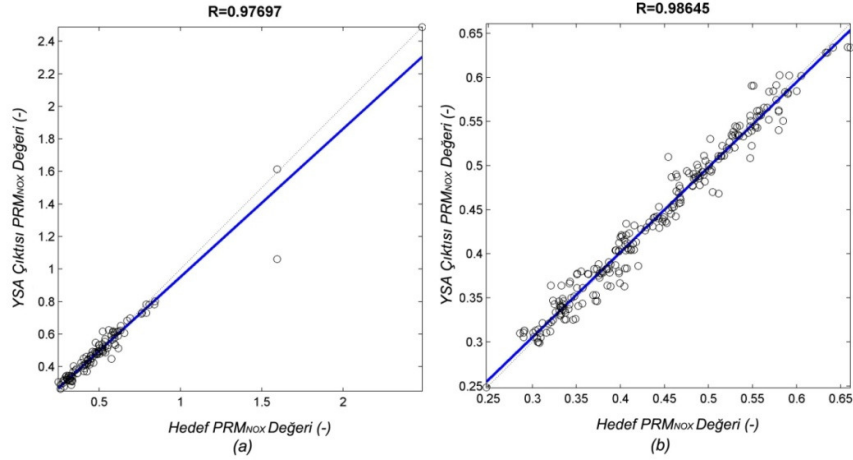
Tutuşma gecikmesi parametresi, püskürtülen yakıtın tutuşma gecikme karakteristiğini düzelten bir kalibrasyon parametresidir, bu parametre BOOST simülasyonunun kalibrasyonu esnasında deneme yanılma yolu ile belirlenmiştir. Tek püskürtme stratejilerinde PRM_{TG} ; 2000 ve 2500 d/d hızı için “1,8” değerini almaktadır. Pilot püskürtme stratejisi için dizayn edilmiş olan YSA’nın regresyon grafiği ve korelasyon katsayıları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. 197 Pilot püskürtmeli strateji için PRM_{TG} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması

6.4.1.3 Azot Oksit Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{NOx})

NO_x emisyonu kalibrasyon parametre grubu motor NO_x emisyonu çıktılarının hatasını, Boost simülasyonunun hesaplamış olduğu b_e hatasına eşitleyen parametre grubudur. Şekil 6.224'de 10 nöronlu YSA'ların hesaplanmış olan PRM_{NOx} 'ları tahmin yaklaşımları görülmektedir. YSA'nın tahmin regresyonları grafiklerin üzerinde verilmiştir.

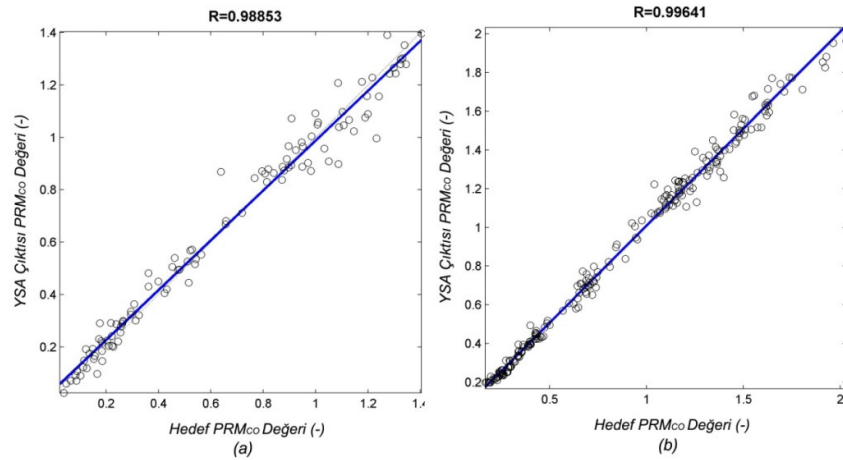


Şekil 6. 198 PRM_{NOx} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması

a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.4 Karbon Monoksit Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{CO})

Karbon monoksit emisyonu kalibrasyon parametre grubu motor CO emisyonu çıktılarının hatasını, Boost simülasyonunun hesaplamış olduğu (b_e) hatasına eşitleyen parametre grubudur.

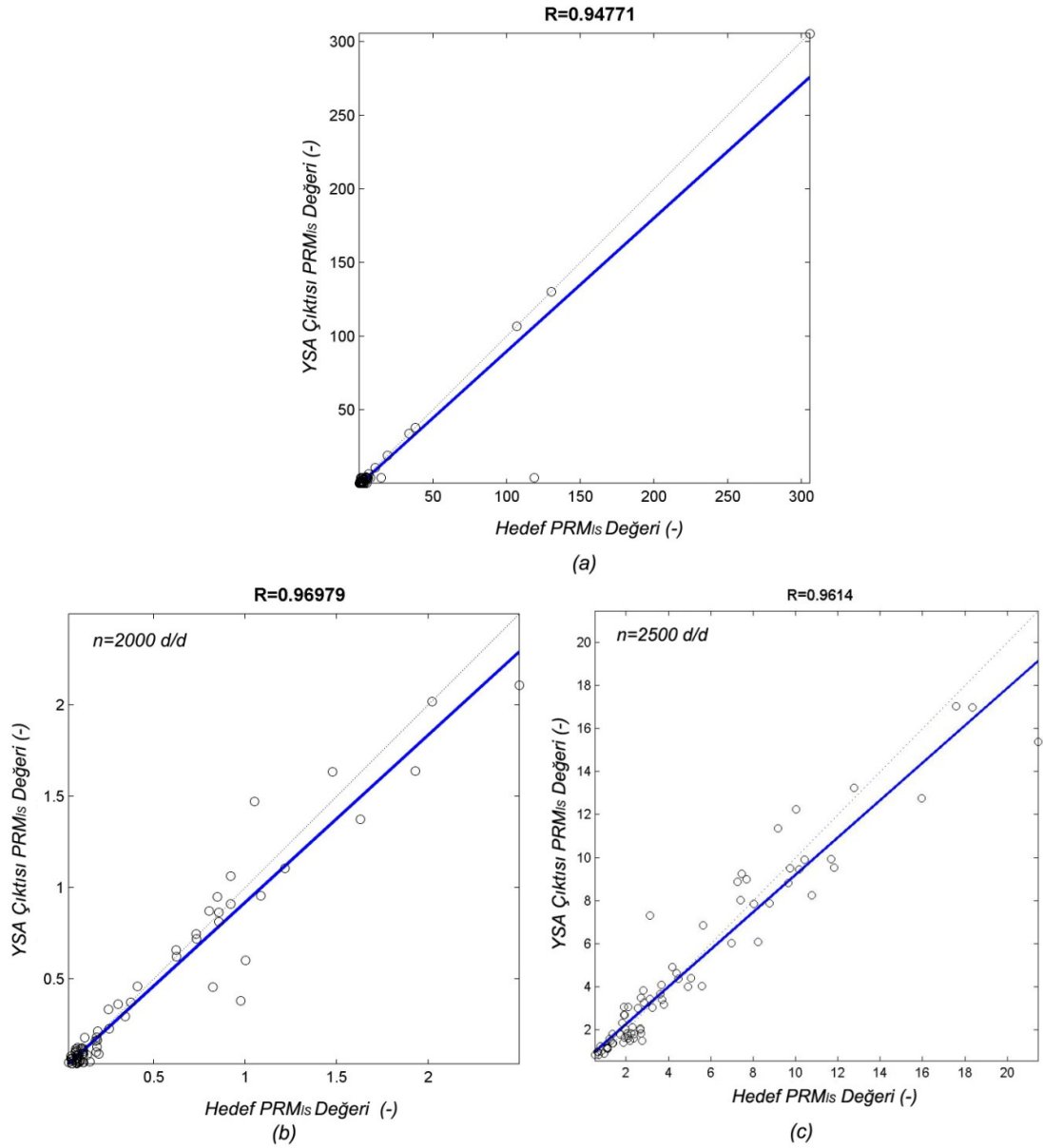


Şekil 6. 199 PRM_{CO} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması

a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.5 İs Emisyonu Kalibrasyon Parametresi (PRM_{is})

İs emisyonu kalibrasyon parametre grubu motor is emisyonu çıktıların hatasını, Boost simülasyonunun hesaplamış olduğu b_e hatasına eşitleyen parametre grubudur. Pilot püskürtme yapılan durumlarda, is emisyon parametre grubu hasiyeti arttırmak için her devir için kendi aralığında incelenmiştir.



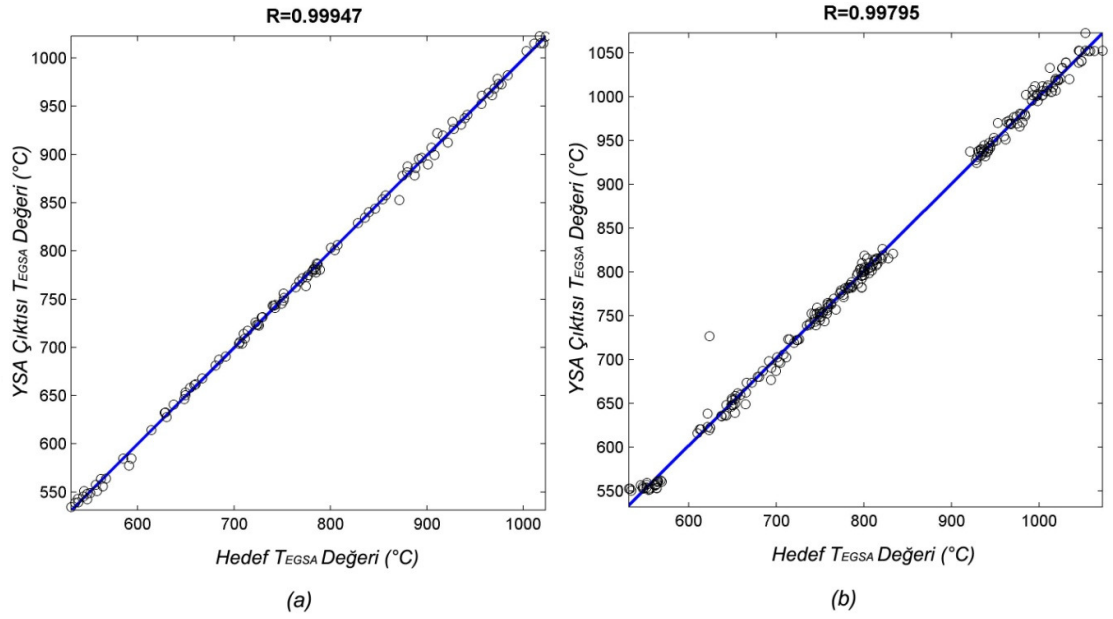
Şekil 6. 200 PRM_{is} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması

a) tek püskürtme stratejisi için b) pilot püskürtmeli strateji için ($n=2000$ d/d)

c) pilot püskürtmeli strateji için ($n=2500$ d/d)

6.4.1.6 Egzoz Supabı Açıldığı Anda Silindir İçi Sıcaklık Değeri (T_{EGSA})

T_{EGSA} parametre grubu motorun egzoz supabı açıldığı anda silindir içi sıcaklığını ifade eden ve dinamometre deneyleri esnasında kaydedilmiş olan basınç verisinden yararlanılarak belirlenen parametre grubudur.

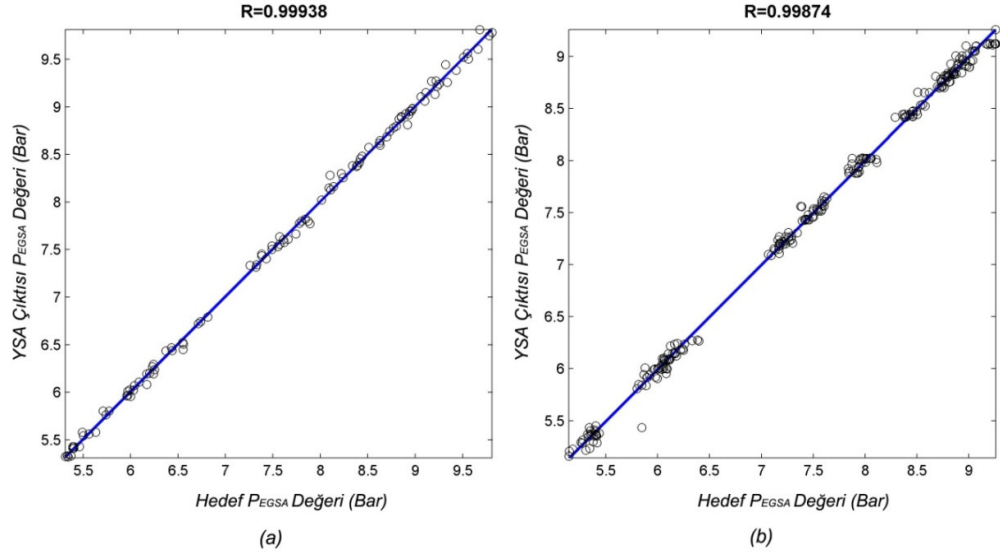


Şekil 6. 201 T_{EGSA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması

a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.7 Egzoz Supabı Açıldığı Anda Silindir İçi Basınç Değeri (P_{EGSA})

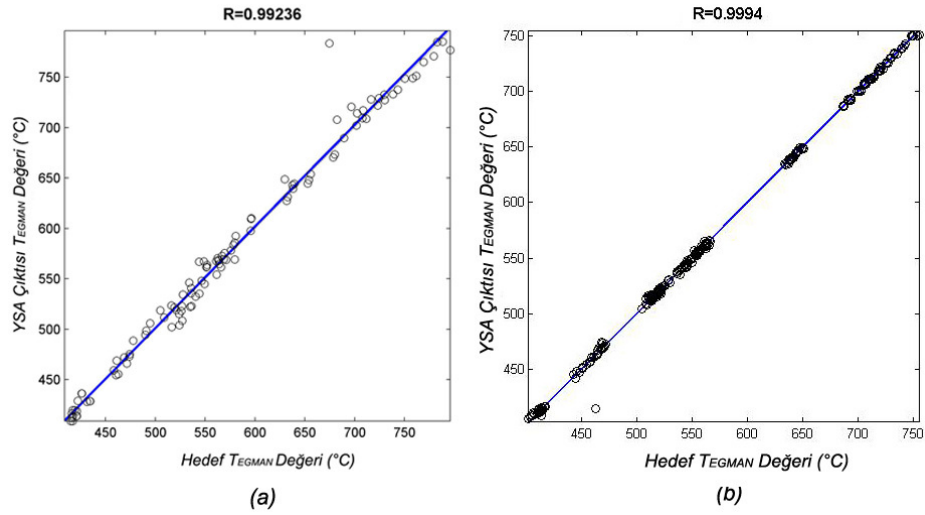
P_{EGSA} parametre grubu motorun egzoz supabı açıldığı anda silindir içi basıncını ifade eden ve dinamometre deneyleri esnasında kaydedilmiş olan basınç verisi üzerinden egzoz supabı açıldığı andaki değerin tespiti ile belirlenen parametre grubudur.



Şekil 6. 202 P_{EGSA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a) tek püskürtme stratejisi için b) pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.8 Egzoz Manifold Sıcaklık Değeri (T_{EGMAN})

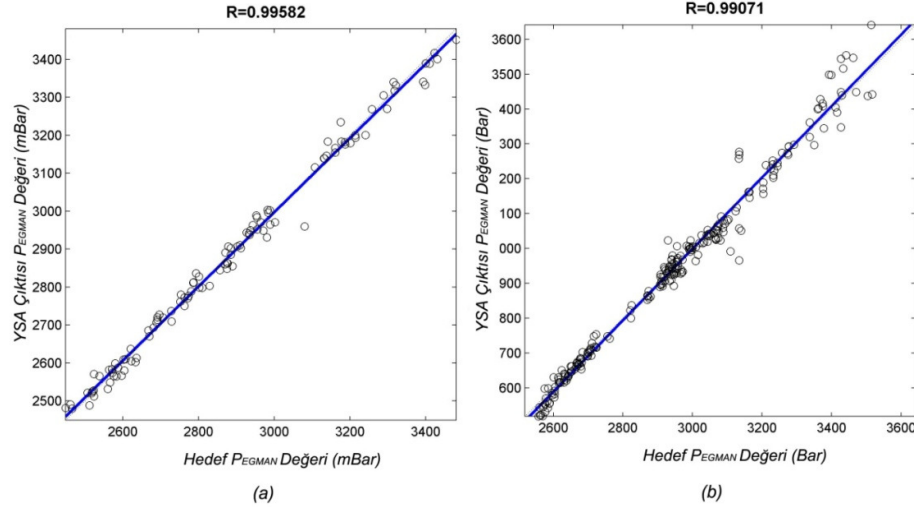
T_{EGMAN} parametre grubu motorun egzoz manifoldu üzerinden dinamometre testleri esnasında ölçülen parametre grubudur.



Şekil 6. 203 T_{EGMAN} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a) tek püskürtme stratejisi için b) pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.9 Egzoz Manifold Sıcaklık Değeri (P_{EGMAN})

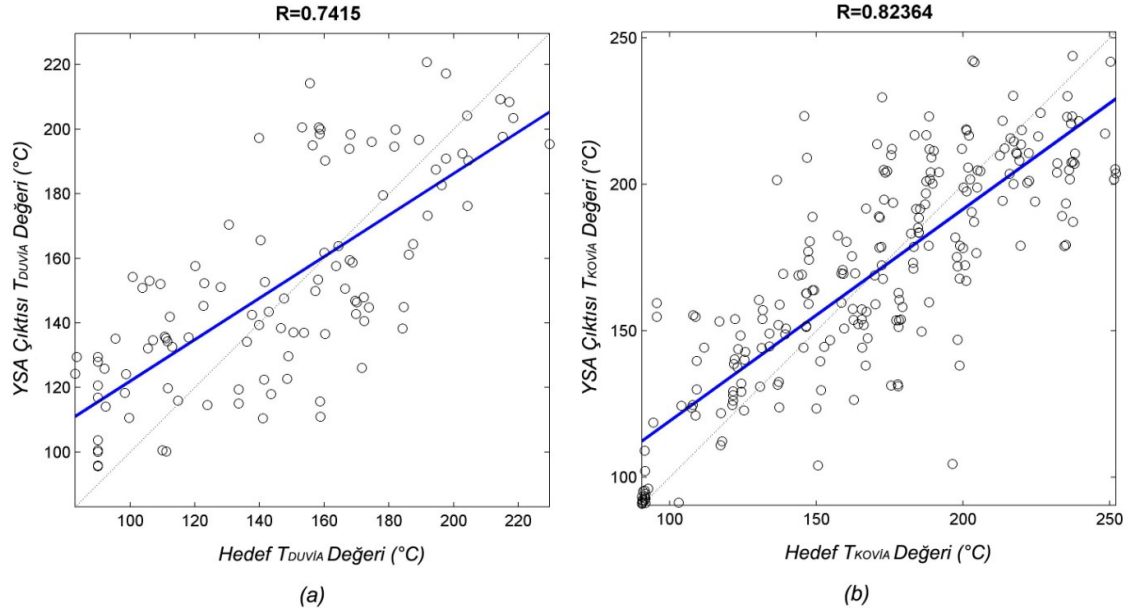
P_{EGMAN} parametre grubu motorun egzoz manifold basıncını ifade eden ve dinamometre deneyleri esnasında kaydedilmiş olan parametre grubudur.



Şekil 6. 204 P_{EGMAN} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a) tek püskürtme stratejisi için b) pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.10 Silindir Kovanı AÖN Sıcaklığı (T_{KOVIA}) Ve Silindir Kovanı ÜÖN Sıcaklığı (T_{Kovi})

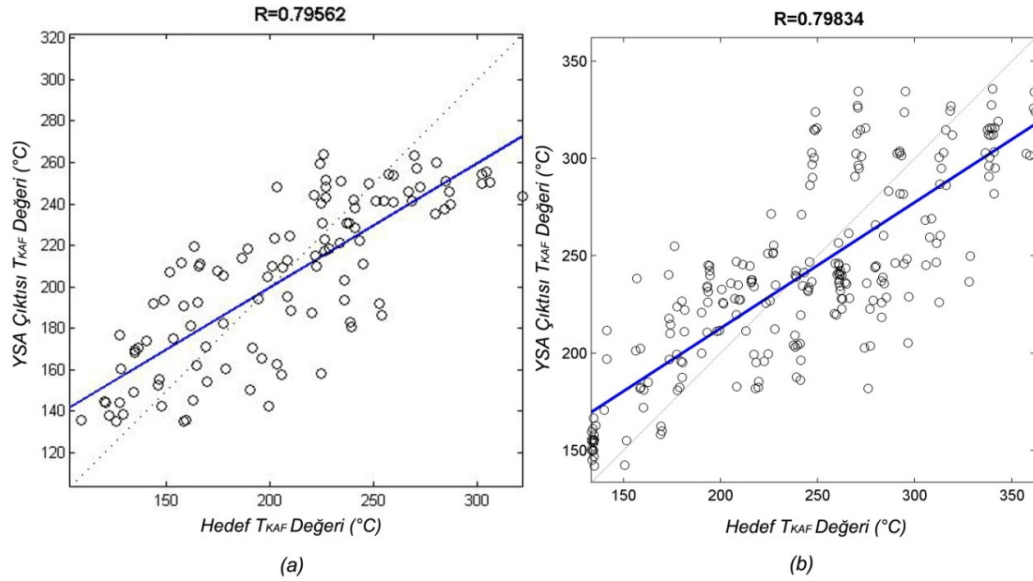
T_{KOVIA} parametre grubu motorun silindir kovanı alt ölü nokta sıcaklığını ifade eden, ve dinamometre testleri esnasında elde edilmiş diğer değerler üzerinden ısı transferi esaslarına göre hesaplanmış olan parametre grubudur. Şekil 6.231'de 10 nöronlu bir YSA'nın hesaplanmış olan T_{KOVIA} tahmin yaklaşımı görülmektedir. YSA'nın tahmin regresyonu $\sim 74\%$ tür. YSA'nın nöron sayısını arttırılmasına rağmen tahmin kabiliyeti arttırılamadığından bu şekilde bırakılmıştır. T_{Kovi} ise silindir kovanı üst ölü nokta sıcaklığıdır ve $T_{KOVIA}+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. 205 T_{KOVIA} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.11 SİLİNDİR KAFASI SICAKLIĞI (T_{KAF})

T_{KAF} parametre grubu motorun silindir kafa sıcaklığını ifade eden ve dinamometre testleri esnasında elde edilmiş diğer değerler üzerinden ısı transferi esaslarına göre hesaplanmış olan parametre grubudur.



Şekil 6. 206 T_{KAF} parametresi Hedef değerleri ve YSA çıktıları karşılaştırması
a)tek püskürtme stratejisi için b)pilot püskürtmeli strateji için

6.4.1.12 Piston Sıcaklığı (T_{PIS})

T_{PIS} parametre grubu motorun piston sıcaklığını ifade eden ve deneyler esnasında elde edilmiş verilerden motor hızına bağlı olarak ortalama olarak hesaplanmış olan parametre grubudur. 2000 d/d motor hızı için $T_{PIS}=173^{\circ}\text{C}$, 2500 d/d motor hızı için $T_{PIS}=206^{\circ}\text{C}$ olduğu kabul edilmiştir.

6.4.1.13 Emme Supabı Kapandığı Anda Silindir İçi Basınç (P_{ESK})

Emme valfi kapandığı anda silindir içi basıncı, aşırı doldurma basıncı + 0,250 bar kabulü yapılmıştır.

6.4.1.14 Blow By Değeri (PRM_{BLOW})

Blowby değeri blow by akışını hesaplayabilmek için yapılmış olan bir çap kabulüdür. Boost programı bu değeri kullanarak standart olarak nozülde akış hesabı yapmaktadır. Hesabın detayı tezimin teori bölümünde verilmiştir. Tüm hesaplamalar (tek püskürtme+pilot püskürtme) boyunca kabul edilen blow-by değeri “0.0038” mm dir.

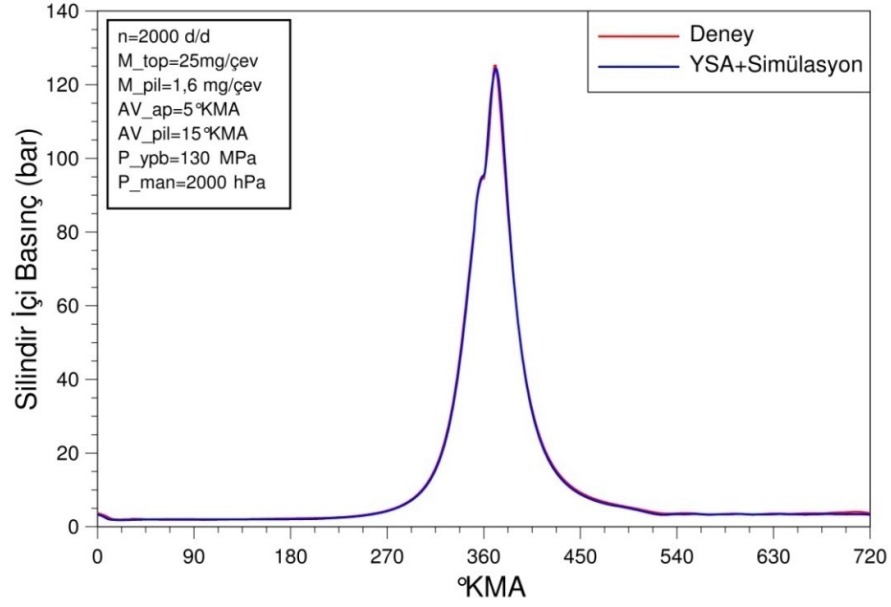
6.4.1 YSA+Tek Boyutlu Termodinamik Simülasyon Programının Birlikte Kullanımının Doğrulanması.

Kalibrasyon parametreleri YSA tarafından belirlenen tek boyutlu termodinamik simülasyon programının 10 deneme noktasında yaklaşık hassasiyetin irdelemek için silindir içi basınç grafikleri ve ilgili tablolar aşağıda verilmiştir. (Bu 10 nokta YSA dizaynında herhangi bir şekilde kullanılmamış ve modelleme aşamasının herhangi bir kısmına dahil edilmemiştir.)

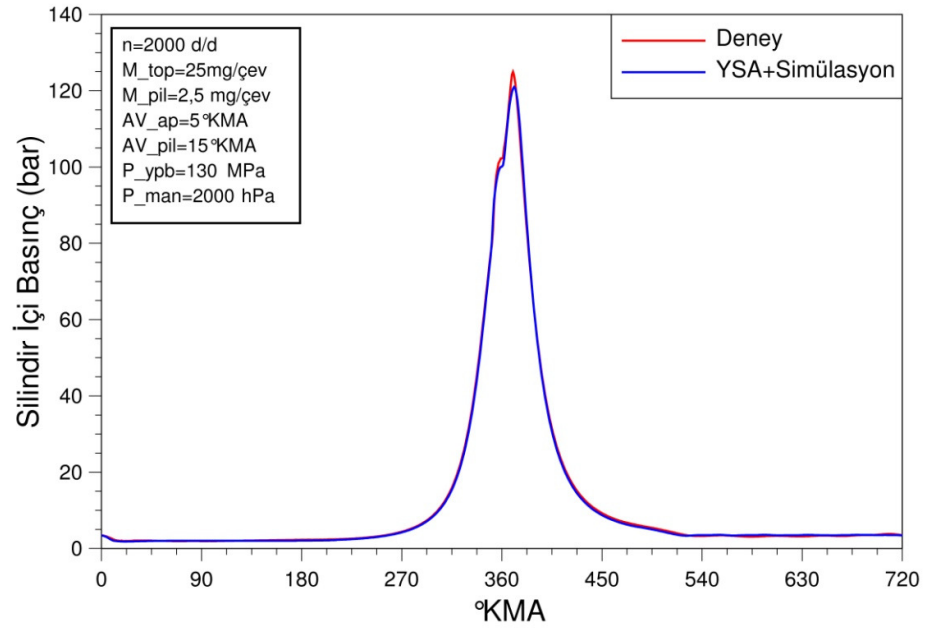
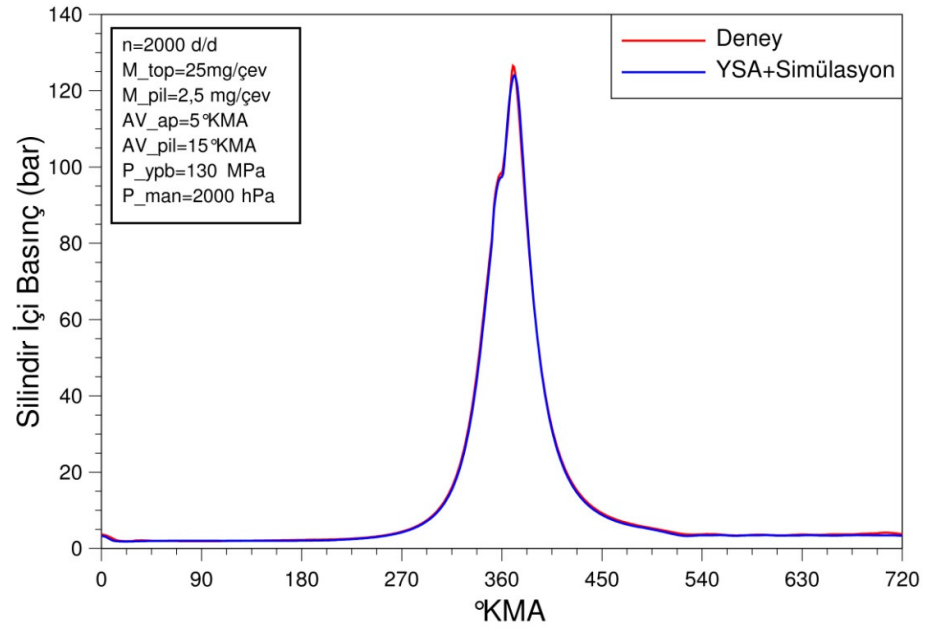
Çizelge 6. 2 Doğrulama için seçilen 10 deney noktasının özellikleri

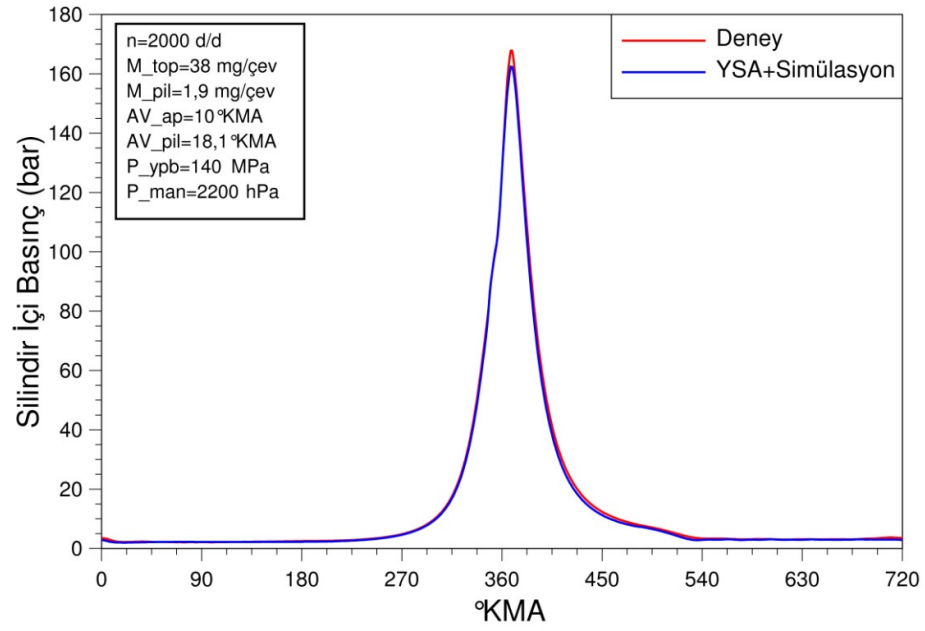
No	n	M _{top}	AV _{ap}	AV _{pil}	P _{man}	M _{pil}	P _{ypb}
-	d/d	mg/çev	°KMA	°KMA	hPa	mg/çev	MPa
1	2000	25	5	14,8	2000	1,596	130
2	2000	25	5	14,9	2000	2,496	130
3	2000	25	5	14,9	2000	3,748	130
4	2000	38	10	18,1	2200	1,896	140
5	2000	38	10	24,8	2200	5,696	130
6	2500	28	5	15,4	2000	1,598	130
7	2500	28	5	16,8	2000	4,196	120
8	2500	37	5	20	2200	3,696	130
9	2500	37	5	17,1	2200	5,548	140
10	2500	45	5	15,7	2300	2,248	150

Avans değerleri (AV) ÜÖNÖ için verilmiştir.

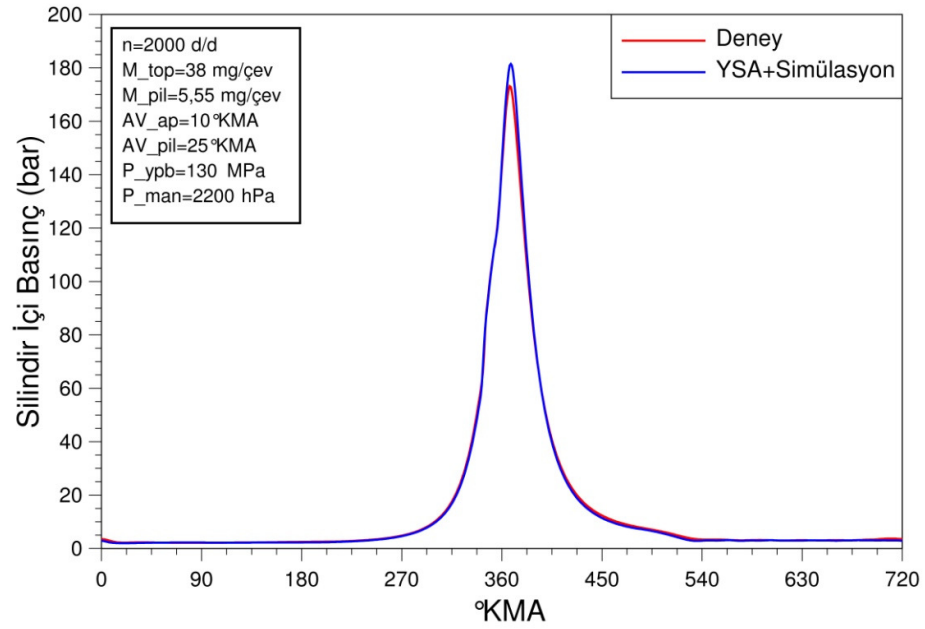


Şekil 6. 207 No:1 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması

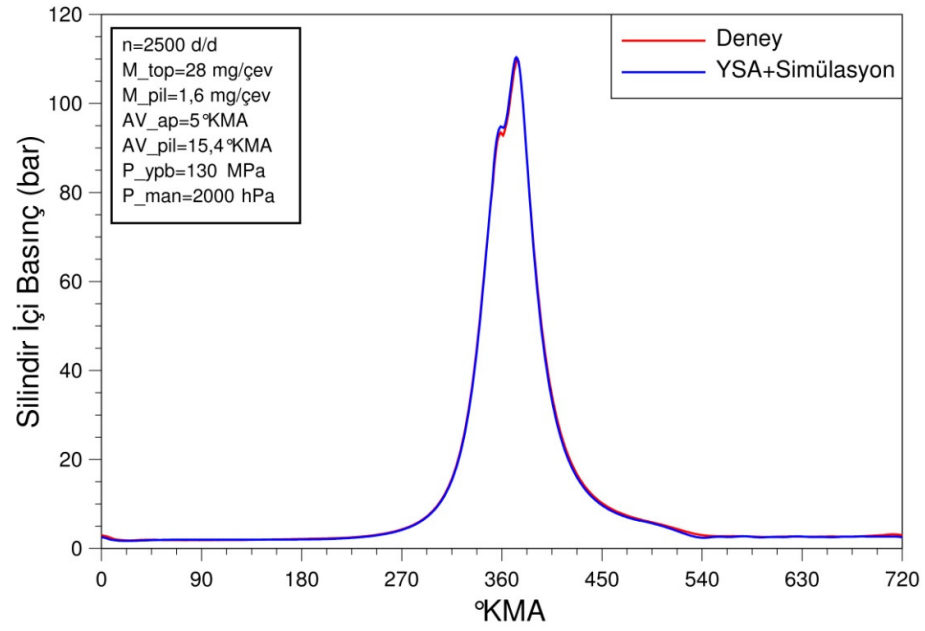




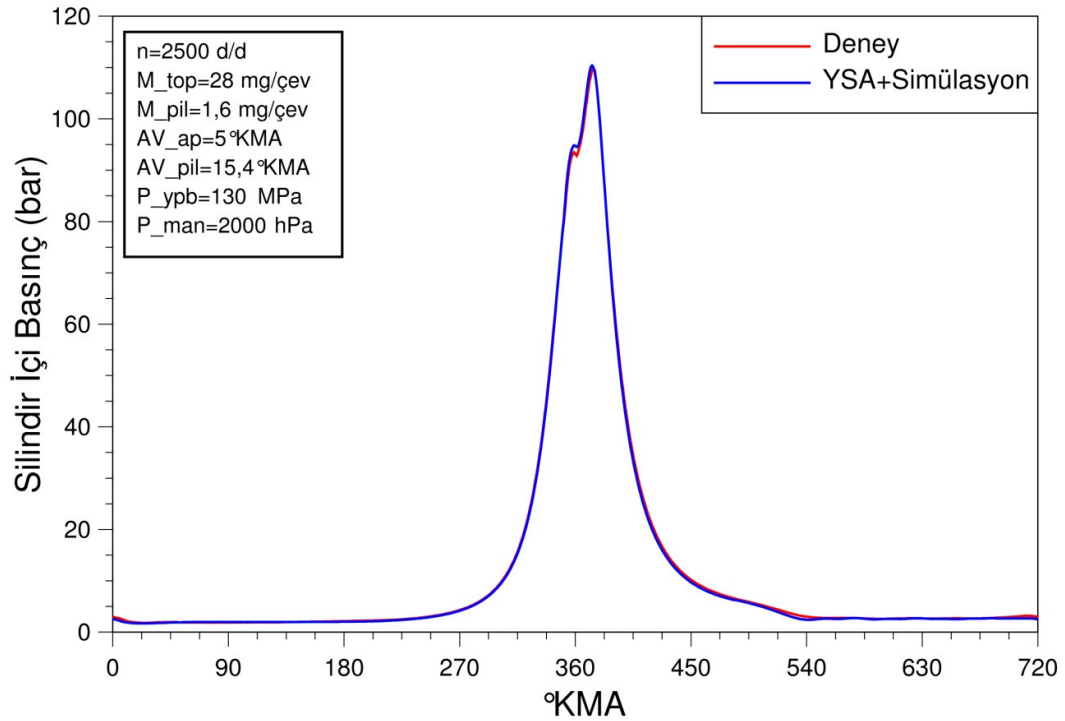
Şekil 6. 210 No:4 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



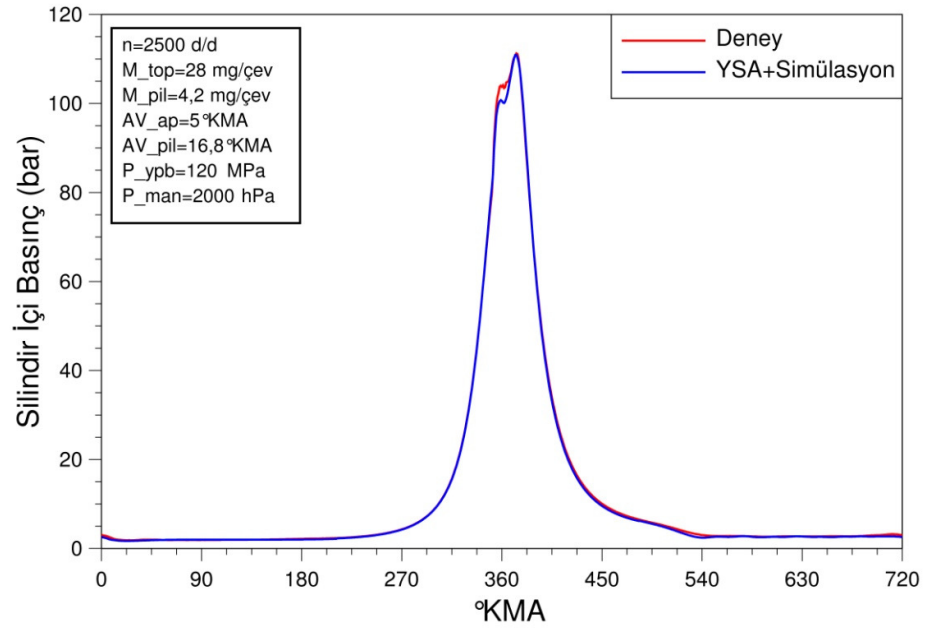
Şekil 6. 211 No:5 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



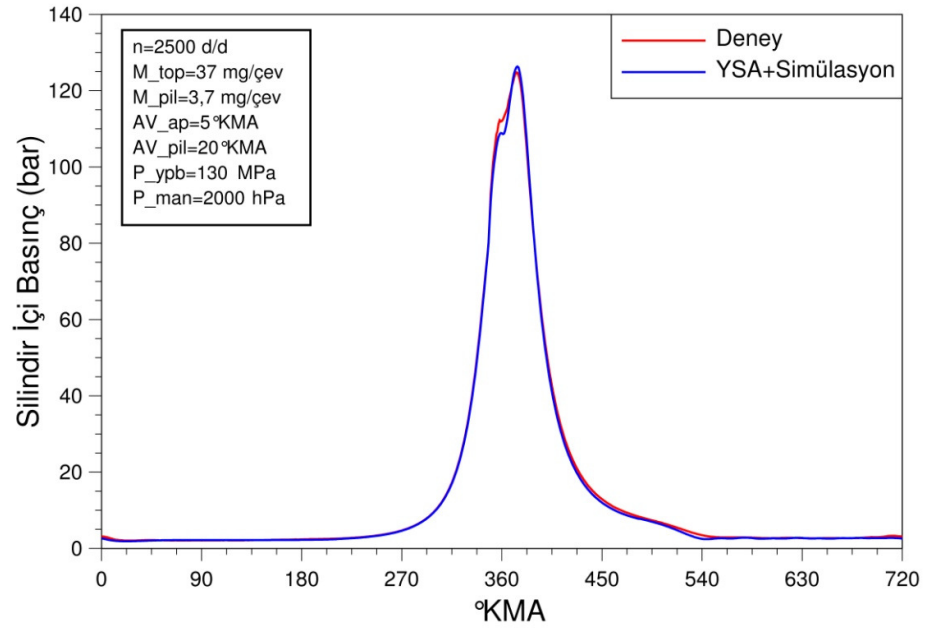
Şekil 6. 212 No:5 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



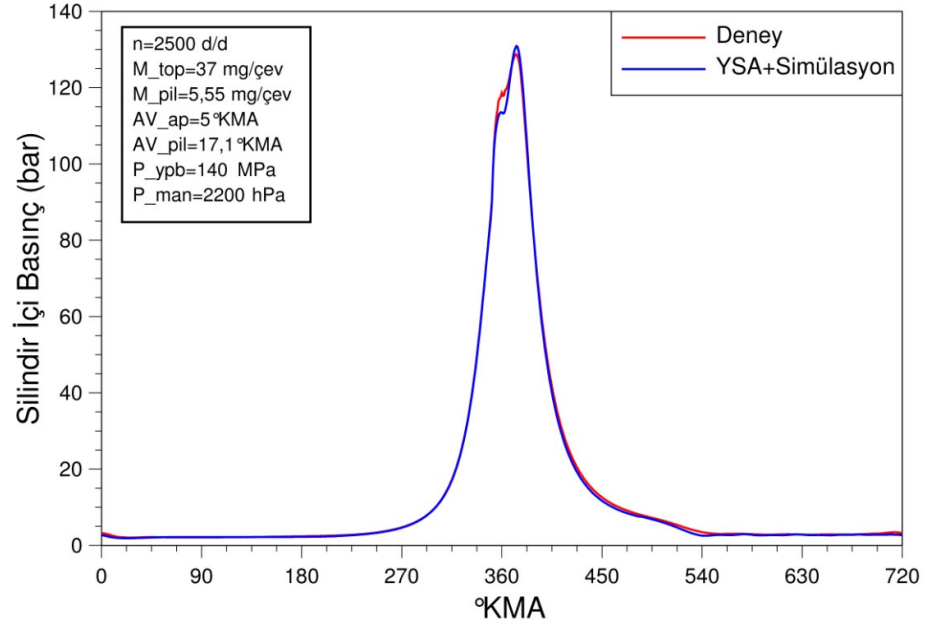
Şekil 6. 213 No:6 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



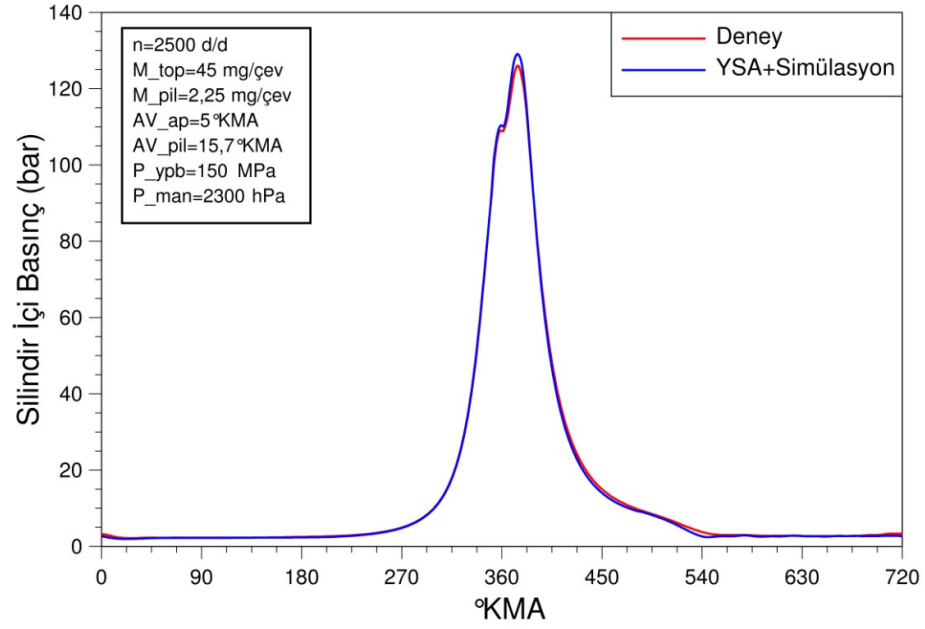
Şekil 6. 214 No:7 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



Şekil 6. 215 No:8 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



Şekil 6. 216 No:9 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması



Şekil 6. 217 No:10 doğrulama deney noktası için deneysel veri silindir içi basınç grafiği ve simülasyon basınç verisinin karşılaştırılması

Çizelge 6. 3 Doğrulama için seçilen 10 deney noktanın deneysel ve simülasyon çıktılarının karşılaştırılması

No	NO _x	CO	İs	OİB	SOB	b _e
1	1,06	1,08	1,27	1,07	1,05	1,00
2	1,01	1,06	1,46	1,09	1,07	0,99
3	0,97	1,18	1,53	0,98	1,01	1,05
4	1,04	1,12	0,61	0,98	0,96	1,11
5	1,14	1,02	1,26	1,06	1,05	1,01
6	1,06	1,05	0,82	1,03	1,01	1,05
7	1,04	1,04	1,33	1,03	1,02	1,08
8	1,09	1,02	1,75	1,01	1,01	1,03
9	1,10	1,04	1,07	1,02	1,01	1,07
10	1,09	1,04	0,70	1,02	1,02	1,05

-Hücrelerdeki tüm değerler ilgili performans veya emisyon parametre çıktısı için (Simülasyon Değeri/Deney Değeri) şeklinde hesaplanmıştır.
-YEŞİL: 10% hata sınırının içinde kalanlar
-KIRMIZI: 10% hata sınırının dışında kalanlar

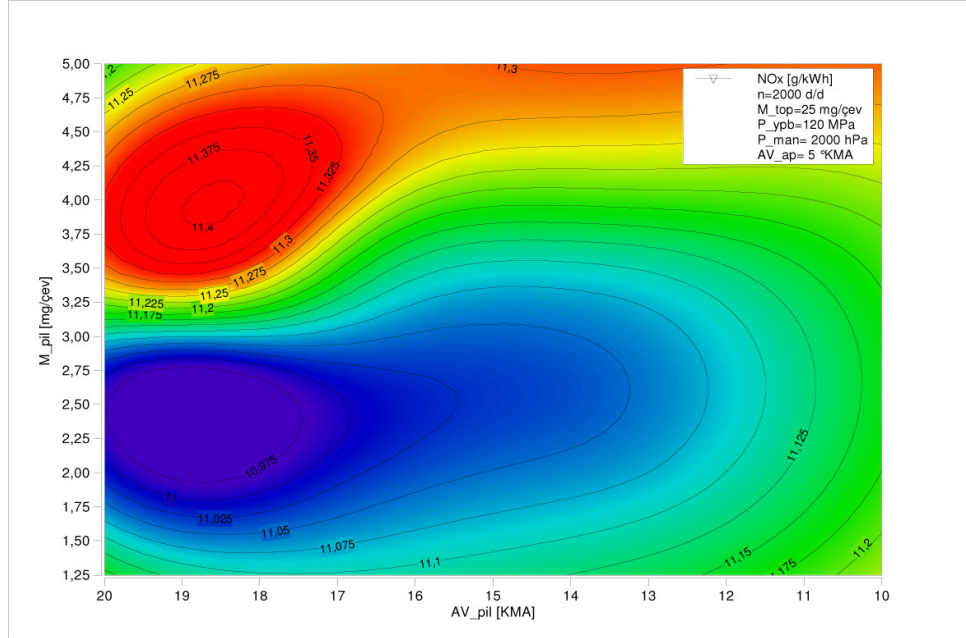
6.4.2 YSA+Tek Boyutlu Termodinamik Simülasyon Programının Birlikte Kullanımı İle Elde Edilen Performans Parametrelerinin ve Emisyonların Analiz Grafikleri.

Uygulanan yöntem ile belirlenmiş olan motor performans ve emisyon parametreleri A) pilot püskürtme avansı(AV_{pil}) ve pilot püskürtme kütlesi (M_{pil})'nin değişimi ve B) pilot püskürtme avansı (AV_{pil}) ve püskürtme basıncı (P_{ypb}) değişimi için (2 şer deney şartı) incelenmiş ve OİB, b_e, NO_x, İs, CO emisyon değerleri aşağıda verilmiştir. Grafikler pilot püskürtme yapılan durumlar için verilmiş olup, ilgili değişken için referans tel püskürtme değeri grafik başlığı içerisinde verilmiştir. Grafikler oluşturulurken;

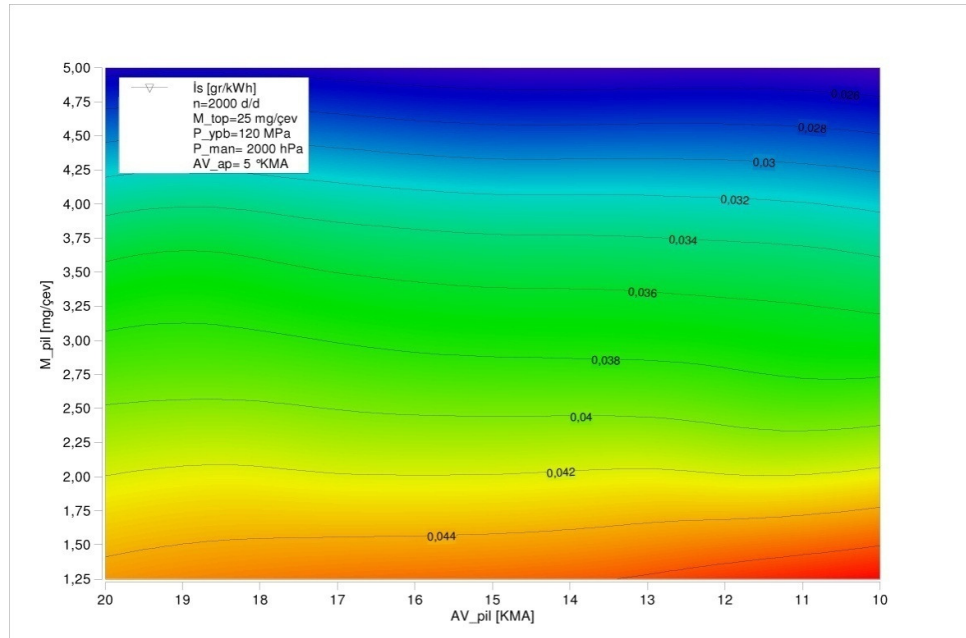
- **A grubu için** : X eksen= AV_{pil} , Y eksen= M_{pil} , Z eksen= Çıktı olarak şekilde düzenlenmiştir. Elde edilen veri seti, kullanılarak kontur grafiği haline dönüştürülmüş ve değişimin anlaşılabilmesi için renklendirilmiştir.
- **B grubu için** : X eksen= AV_{pil} , Y eksen= P_{ypb} , Z eksen= Çıktı olarak şekilde düzenlenmiştir. Elde edilen veri seti, kontur grafiği haline dönüştürülmüş ve değişimin anlaşılabilmesi için renklendirilmiştir.

6.4.3 Pilot Püskürtme Avansı ve Pilot Püskürtmesine Bağlı Değişim Grafikleri

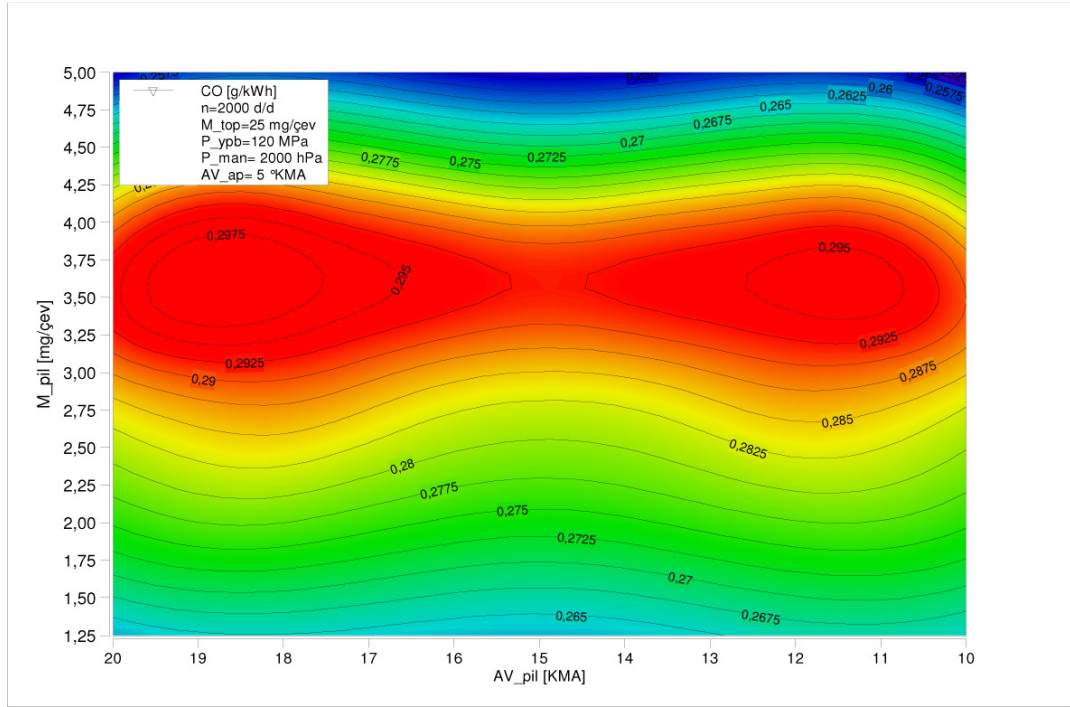
6.4.3.1 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/çev, $P_{man}=2000$ d/d, $Y_{ypb}=120$ MPa şartında yapılan deneyler.



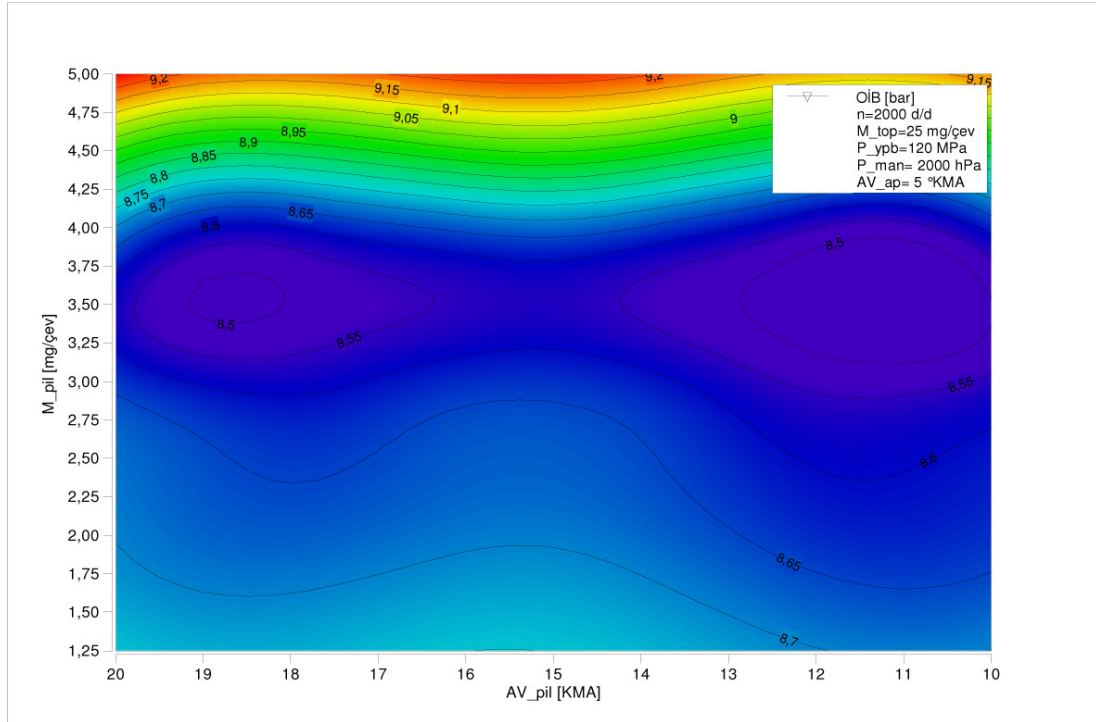
Şekil 6. 218 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev,,45 mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



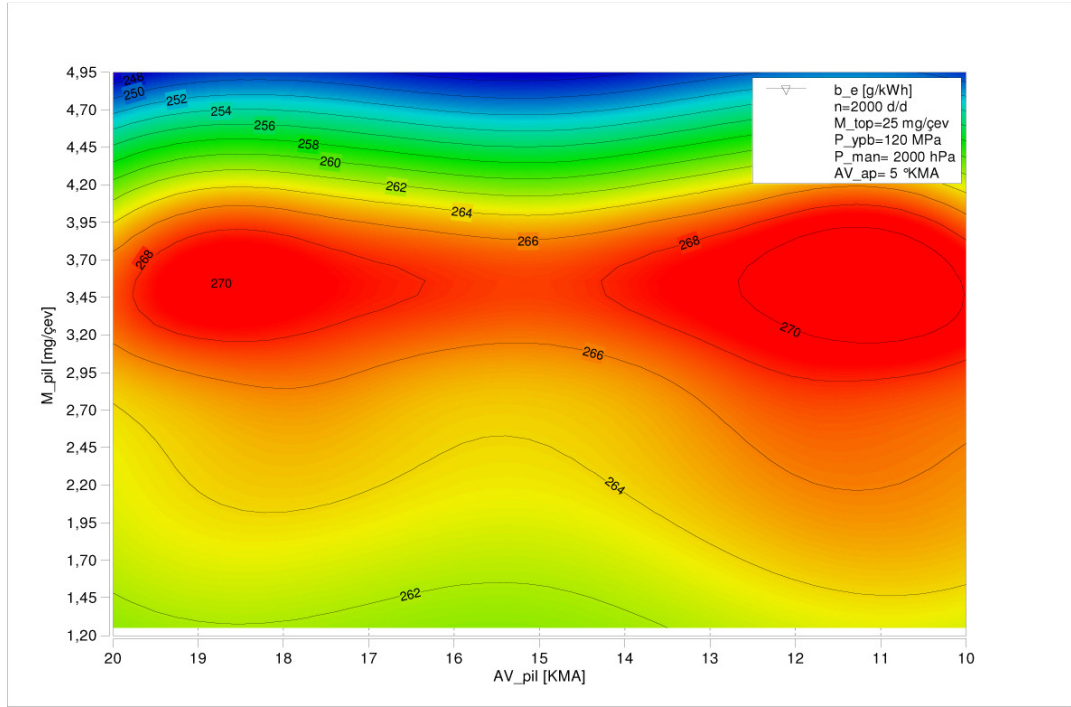
Şekil 6. 219 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı Is değişimi



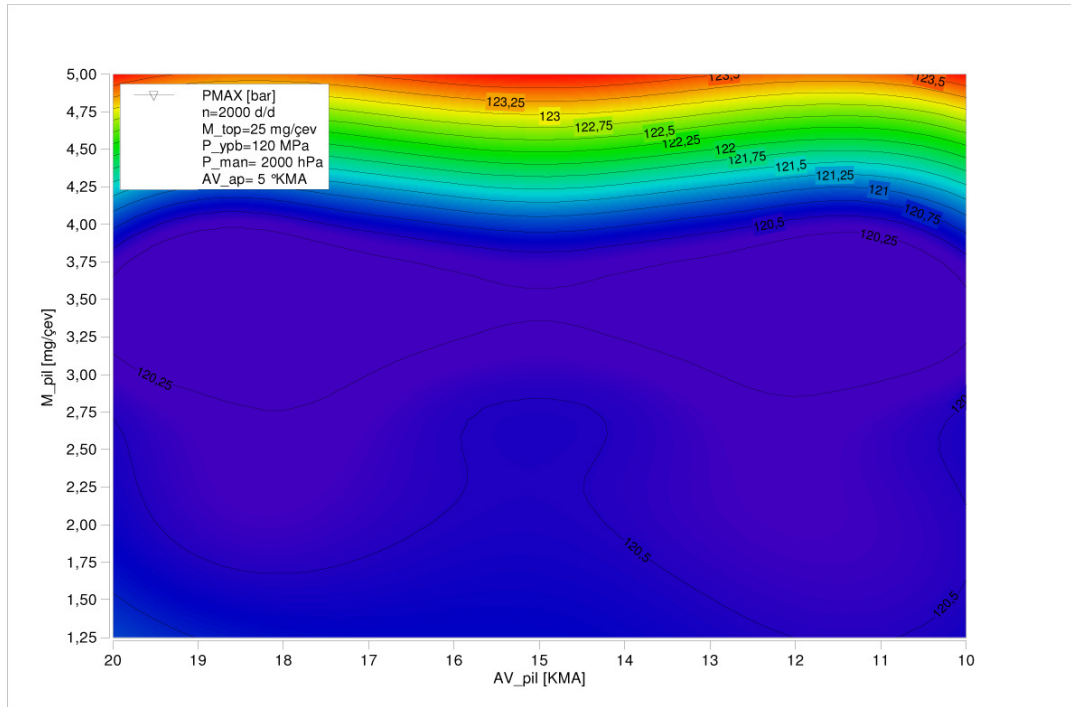
Şekil 6. 220 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı CO değişimi



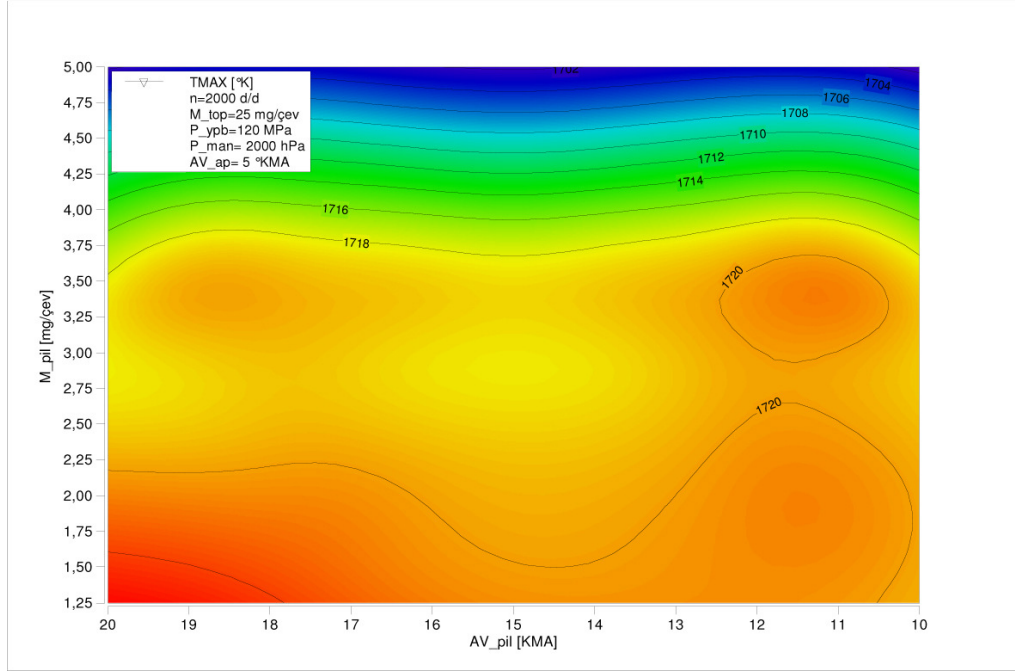
Şekil 6. 221 n=2000 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 222 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi

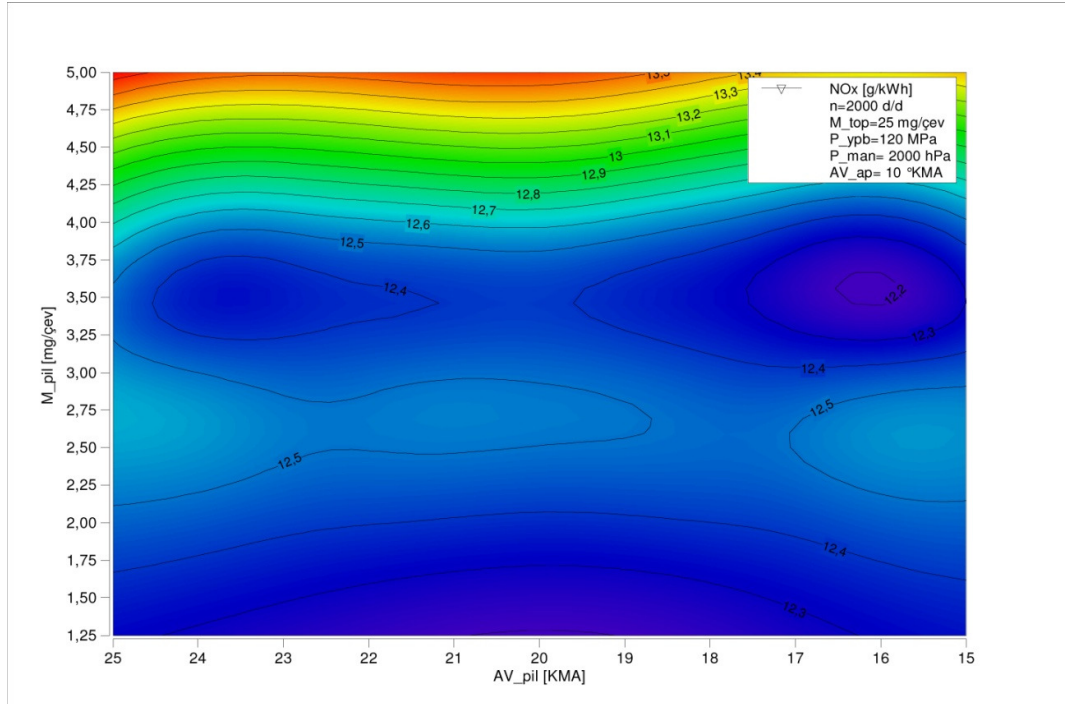


Şekil 6. 223 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı PMAX değişimi

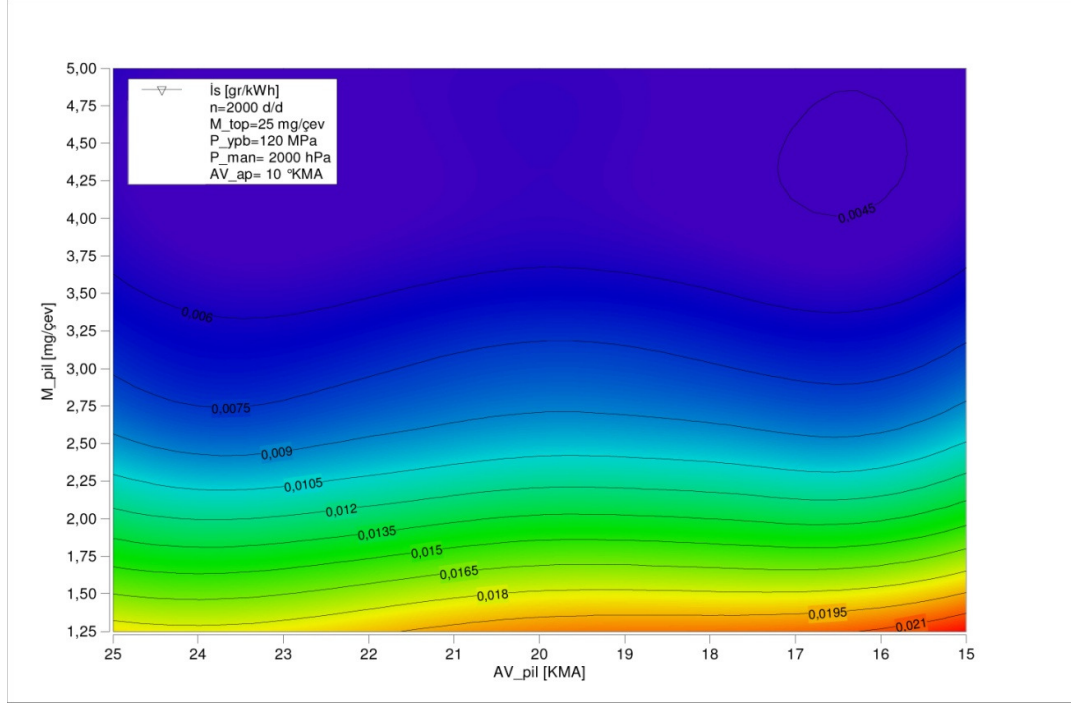


Şekil 6. 224 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı TMAX değişimi

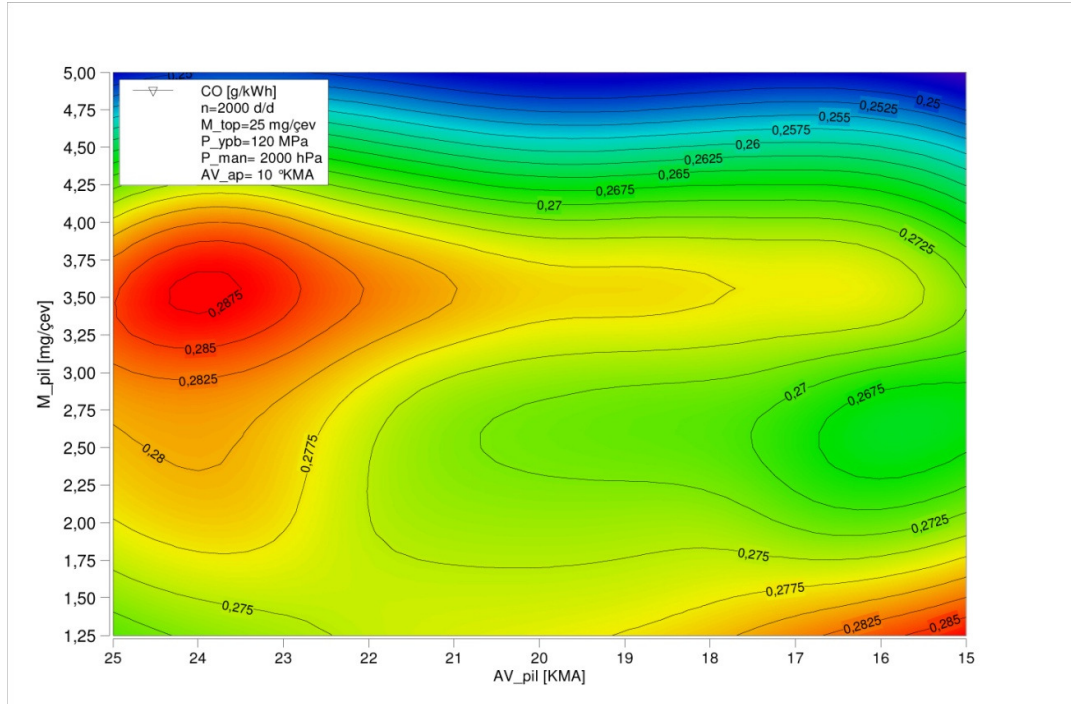
6.4.3.2 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/cev, $P_{man}=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{ypb}=120$ MPa şartında yapılan deneyler.



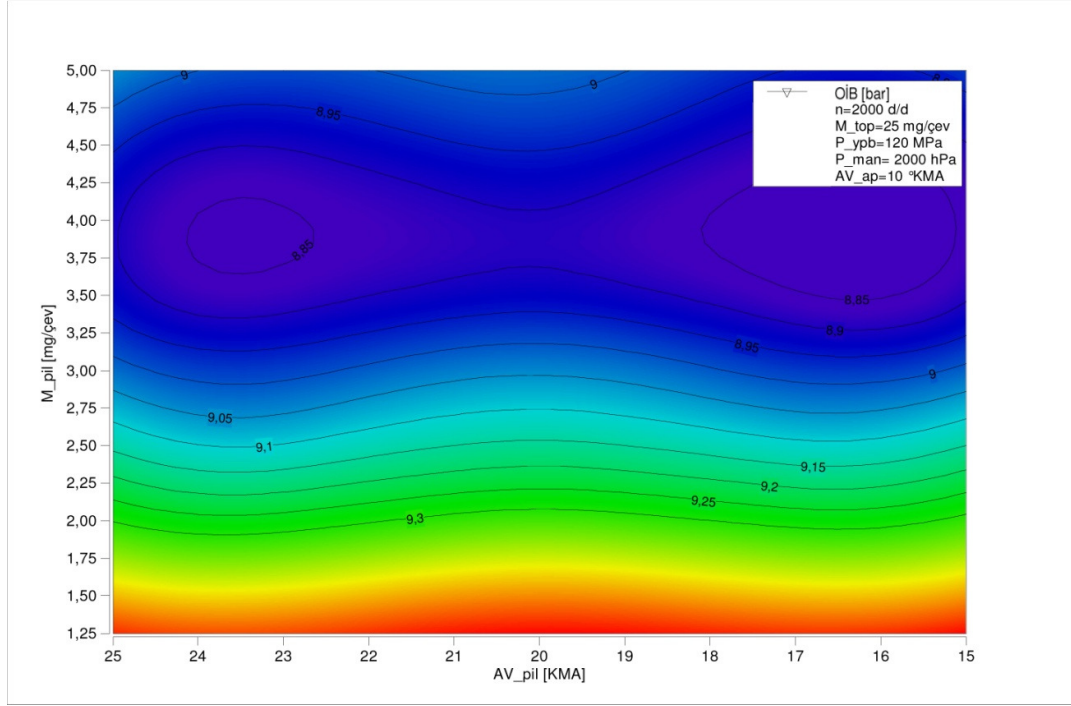
Şekil 6. 225 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



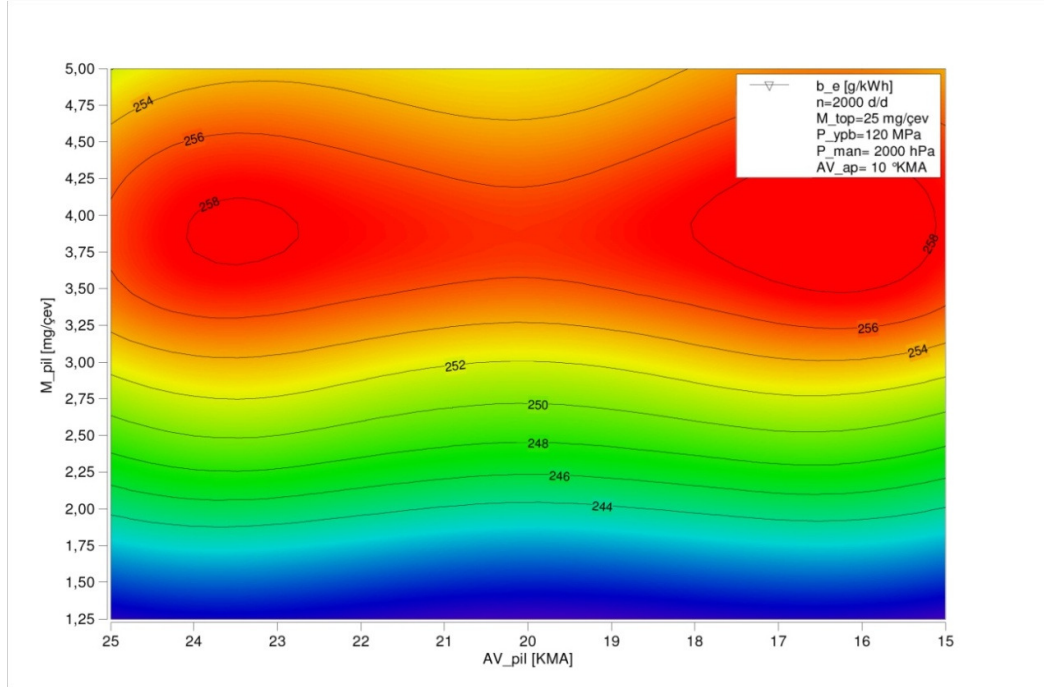
Şekil 6. 226 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı Is değişimi



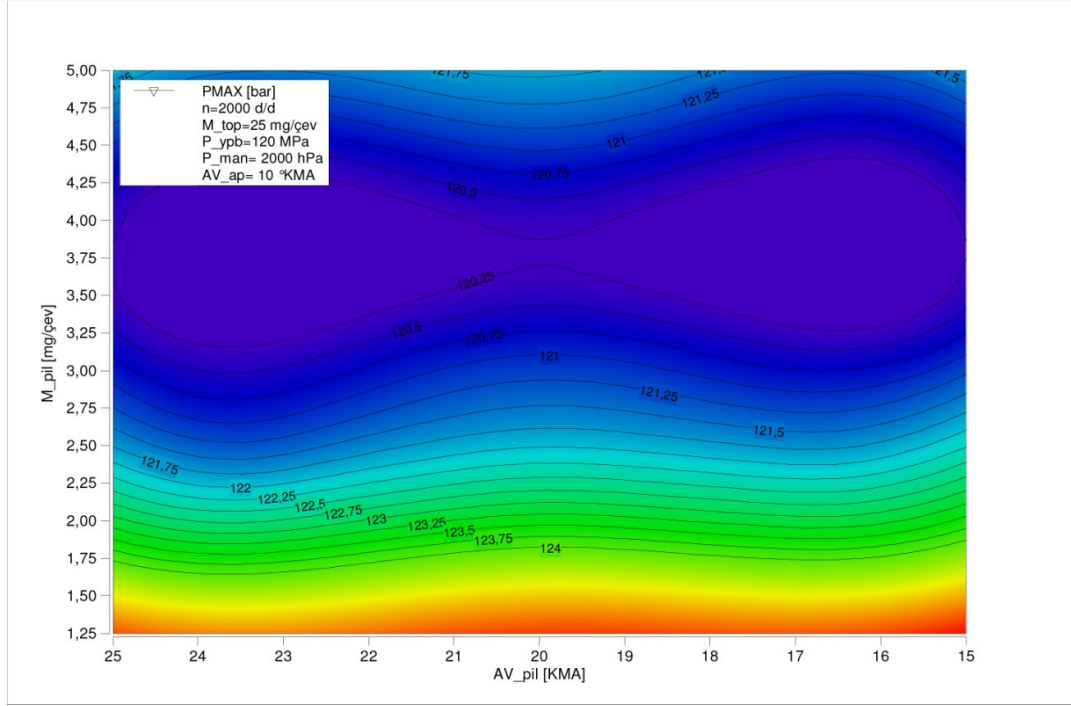
Şekil 6. 227 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi



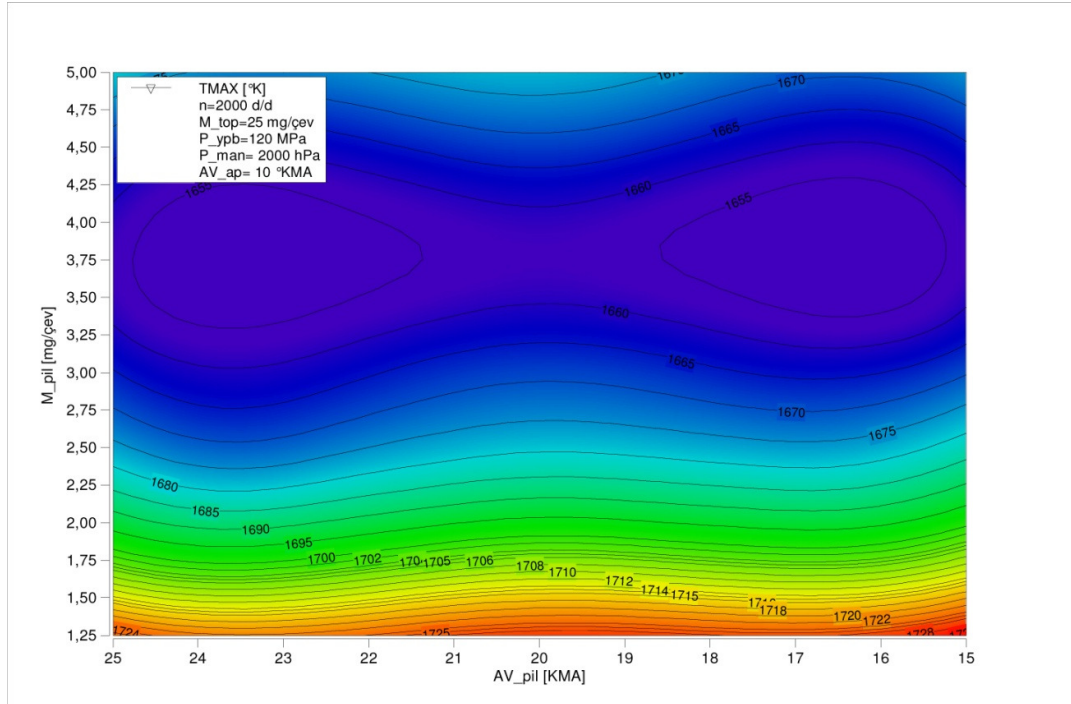
Şekil 6. 228 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 229 n=2000 d/d, AV_{ap}=10°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı b_e değişimi



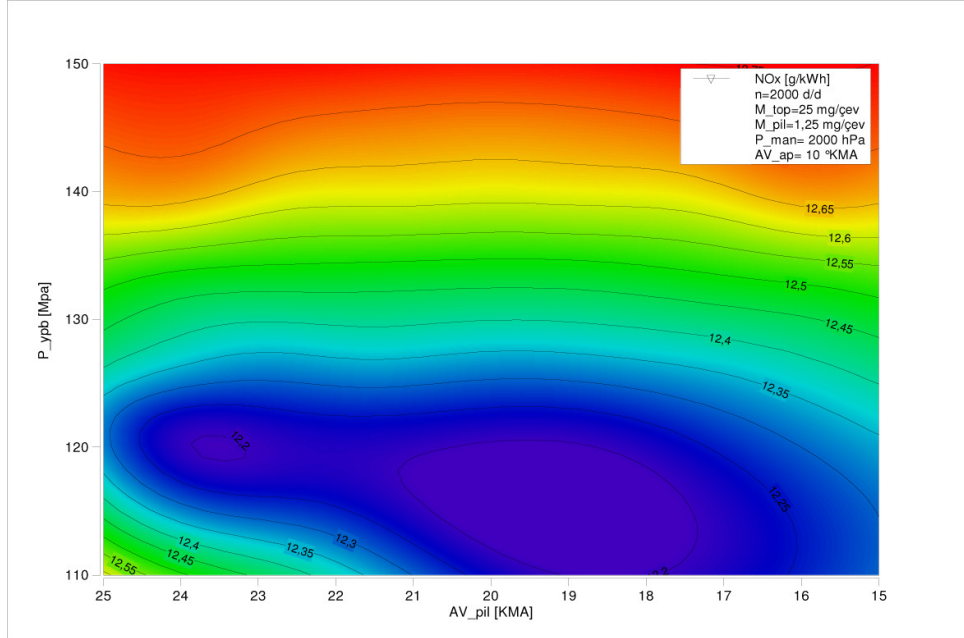
Şekil 6. 230 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ$ KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı PMAX değişimi

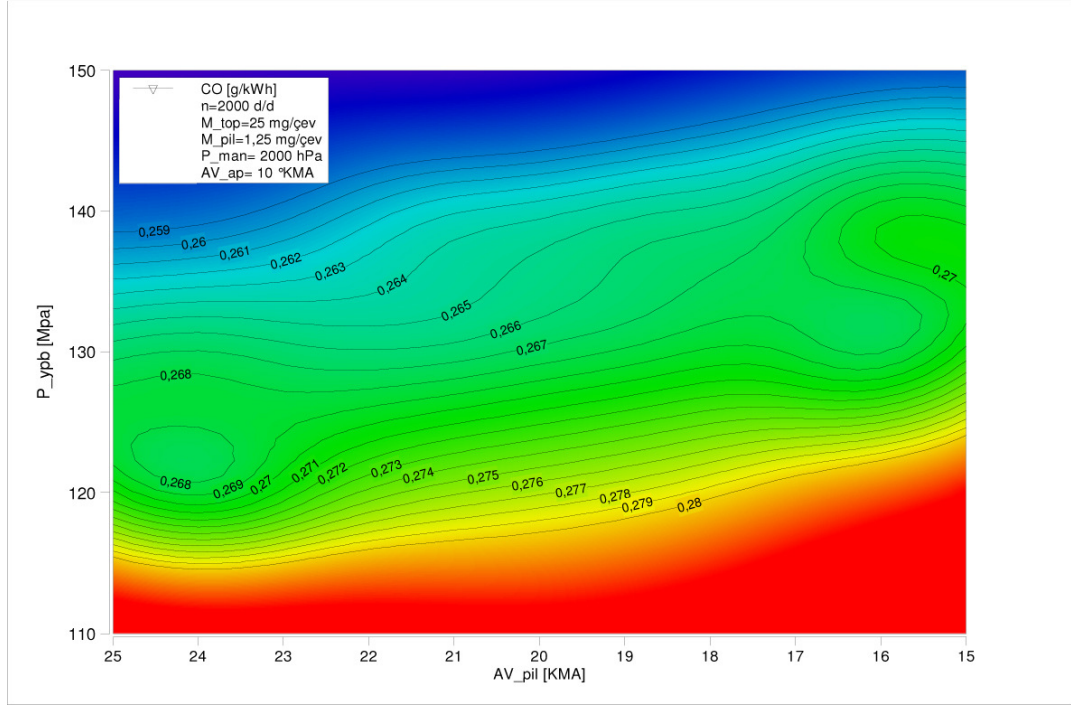


Şekil 6. 231 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ$ KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı TMAX değişimi

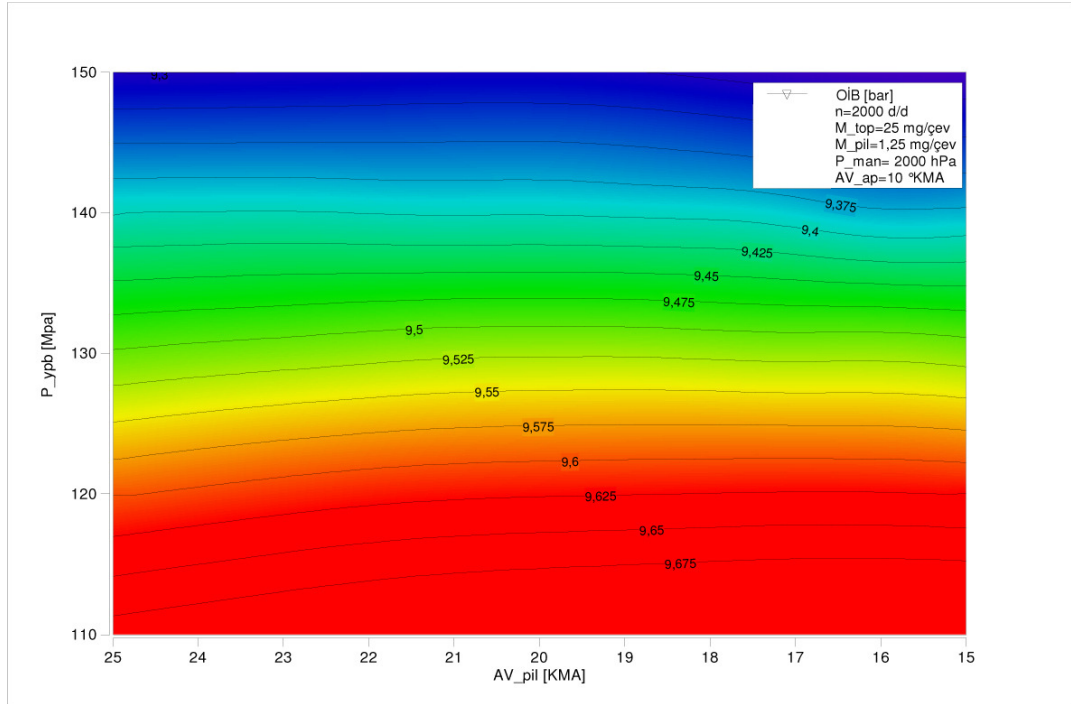
6.4.4 Pilot Püskürtme Avansı ve Pilot Püskürtme Basıncına Bağlı Değişim Grafikleri

6.4.4.1 $n=2000$ d/d, $M_{\text{tot}}=25$ mg/çev, $AV_{\text{ap}}=10^\circ\text{MA}$, $P_{\text{man}}=2000$ d/d, $M_{\text{pil}}=1,25$ mg/çev şartında yapılan deneyler.

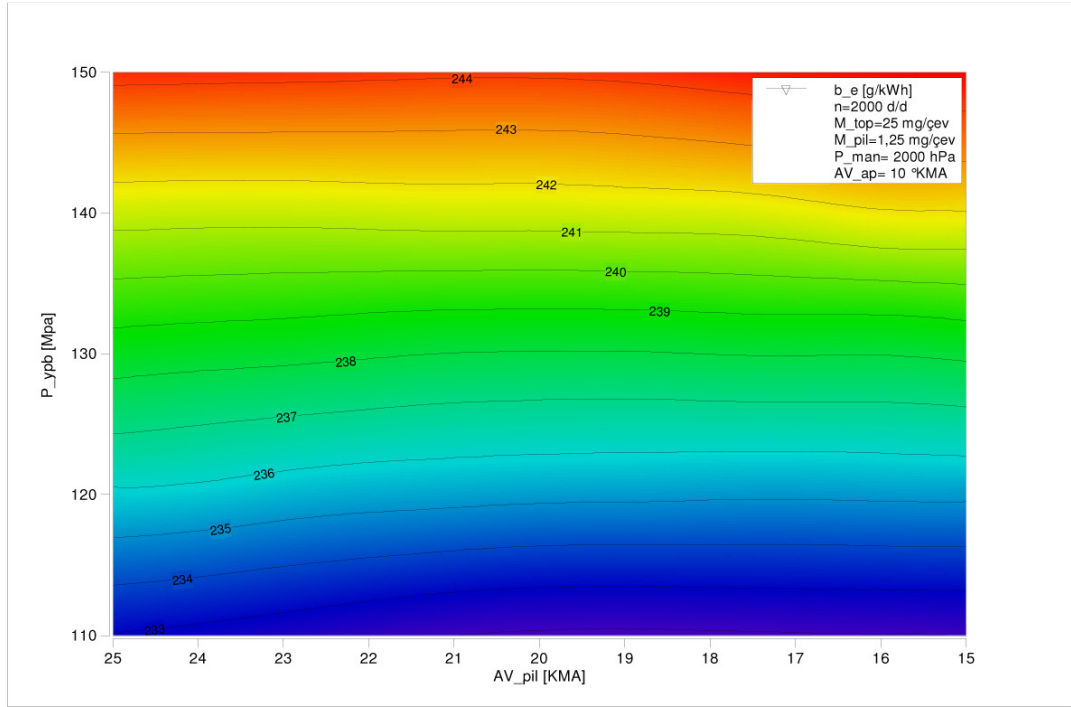




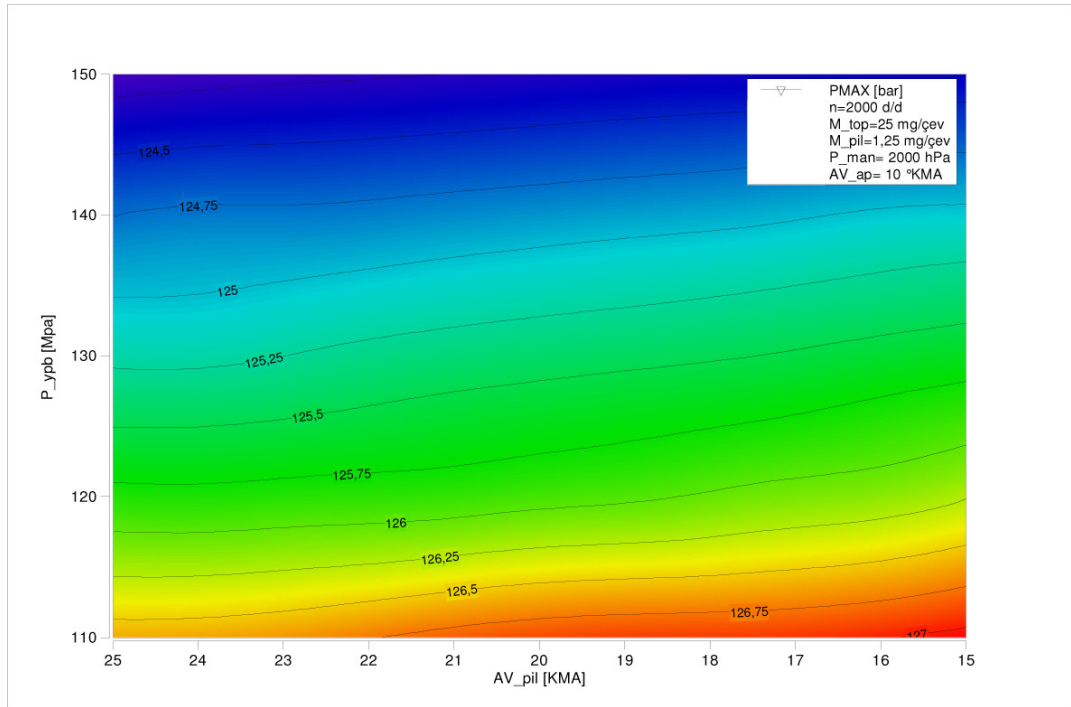
Şekil 6. 234 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



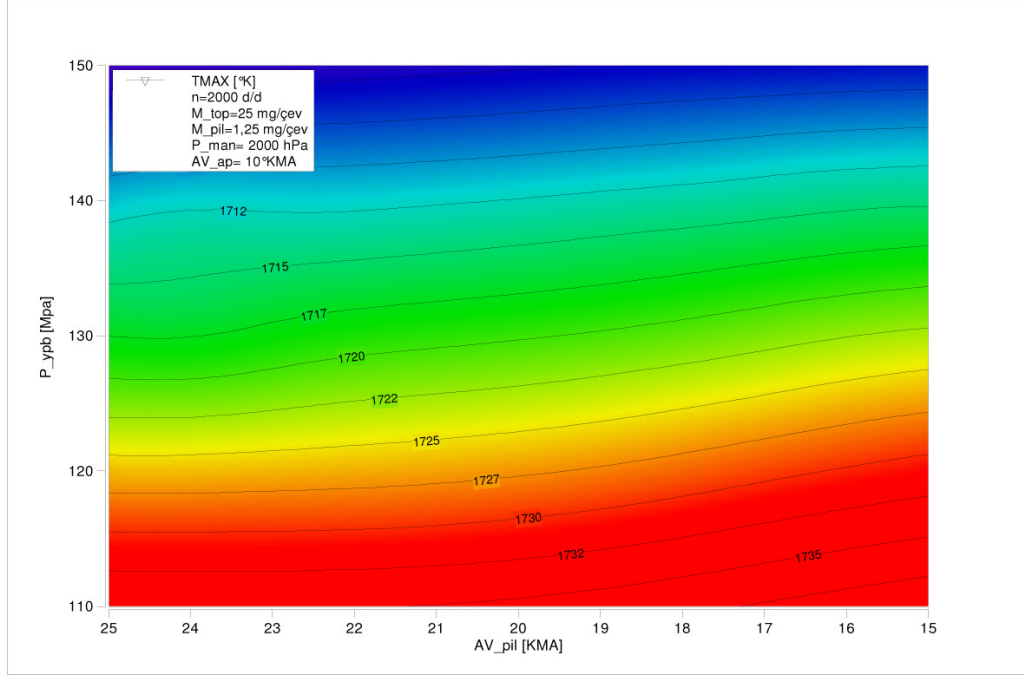
Şekil 6. 235 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OIB değişimi



Şekil 6. 236 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi

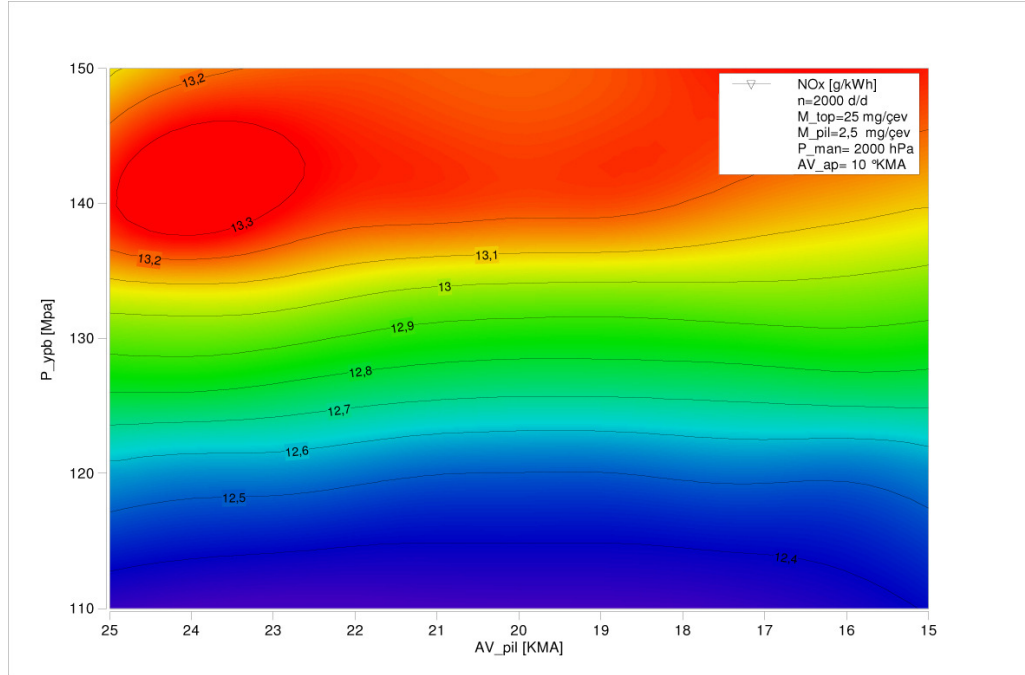


Şekil 6. 237 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı $PMAX$ değişimi

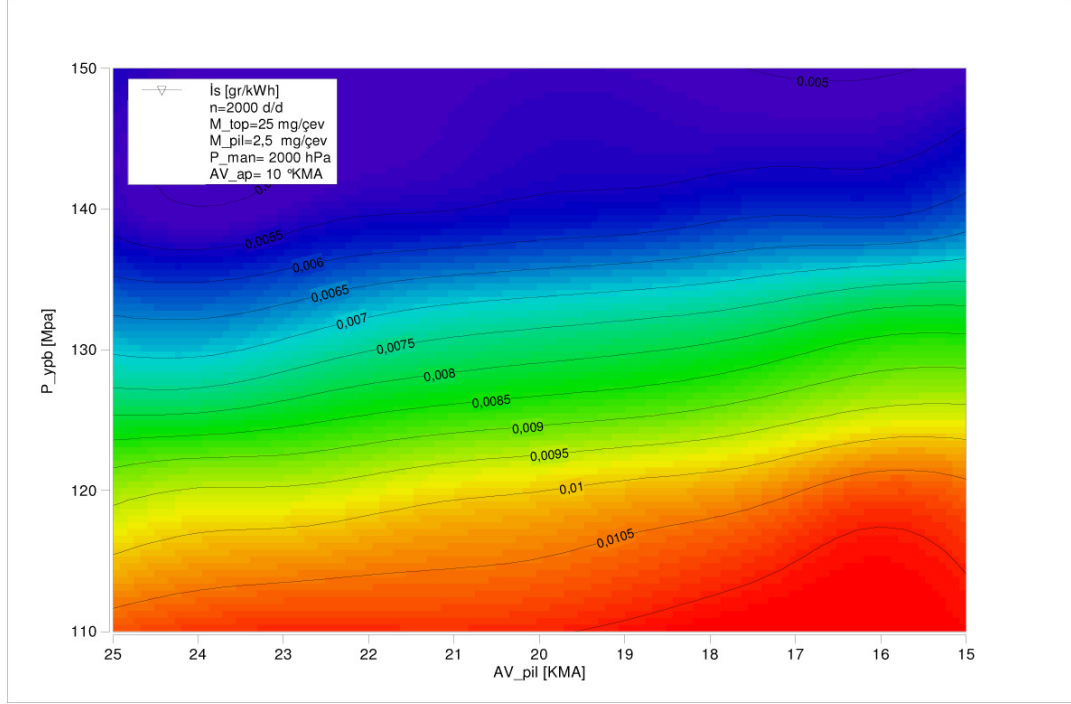


Şekil 6. 238 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı TMAX değişimi

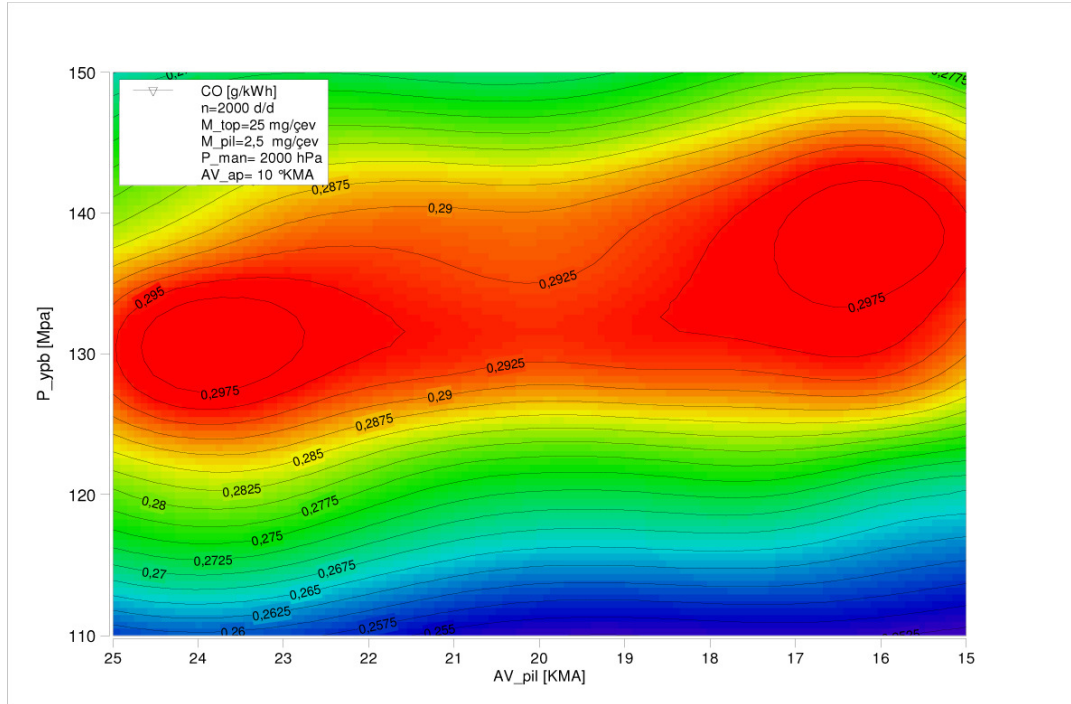
6.4.4.2 $n=2000$ d/d, $M_{tot}=25$ mg/cev, $P_{man}=2000$ d/d, $M_{pil}=2,5$ mg/cev, $AV_{ap}=10^\circ KMA$ şartında yapılan deneyler.



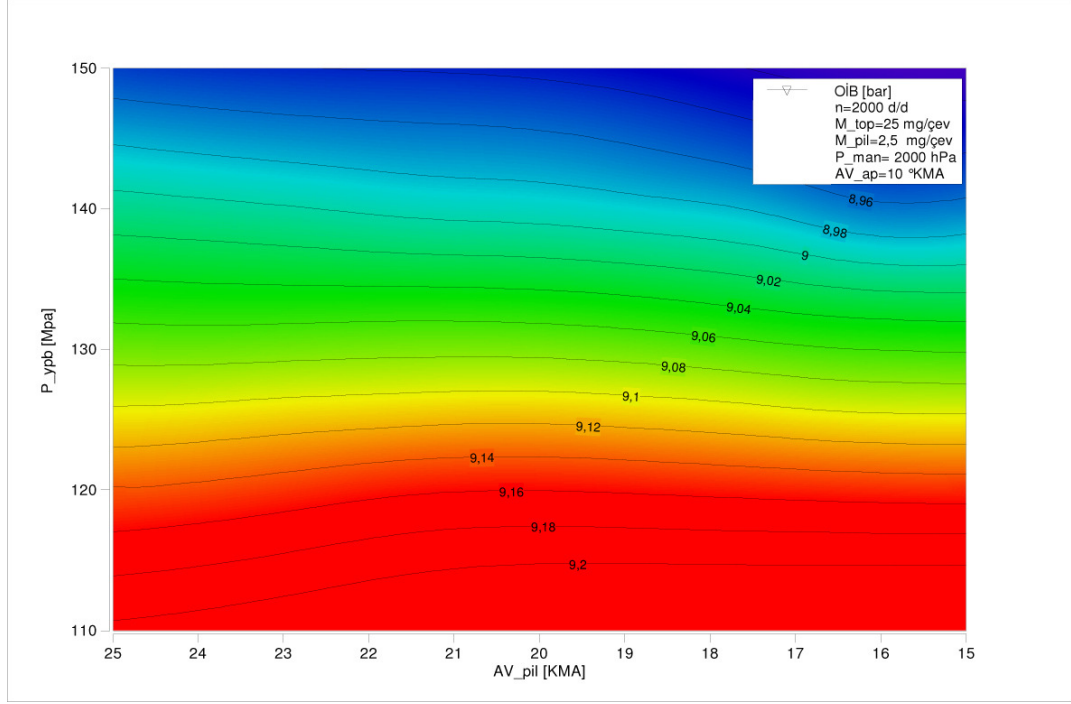
Şekil 6. 239 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi



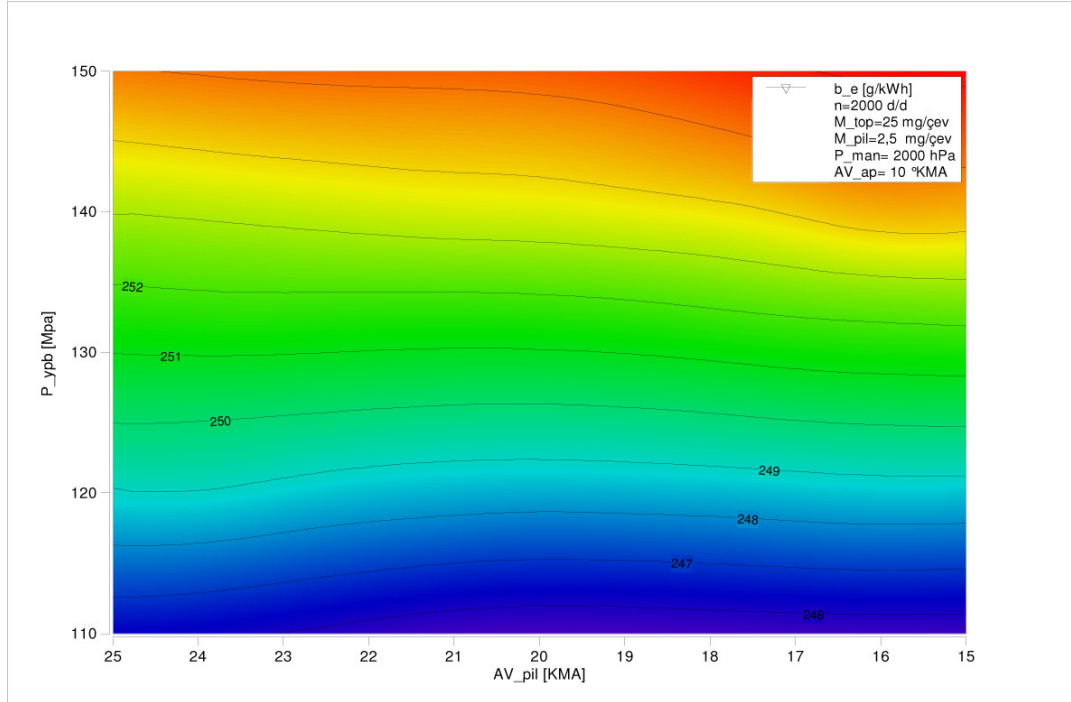
Şekil 6. 240 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı Is değişimi



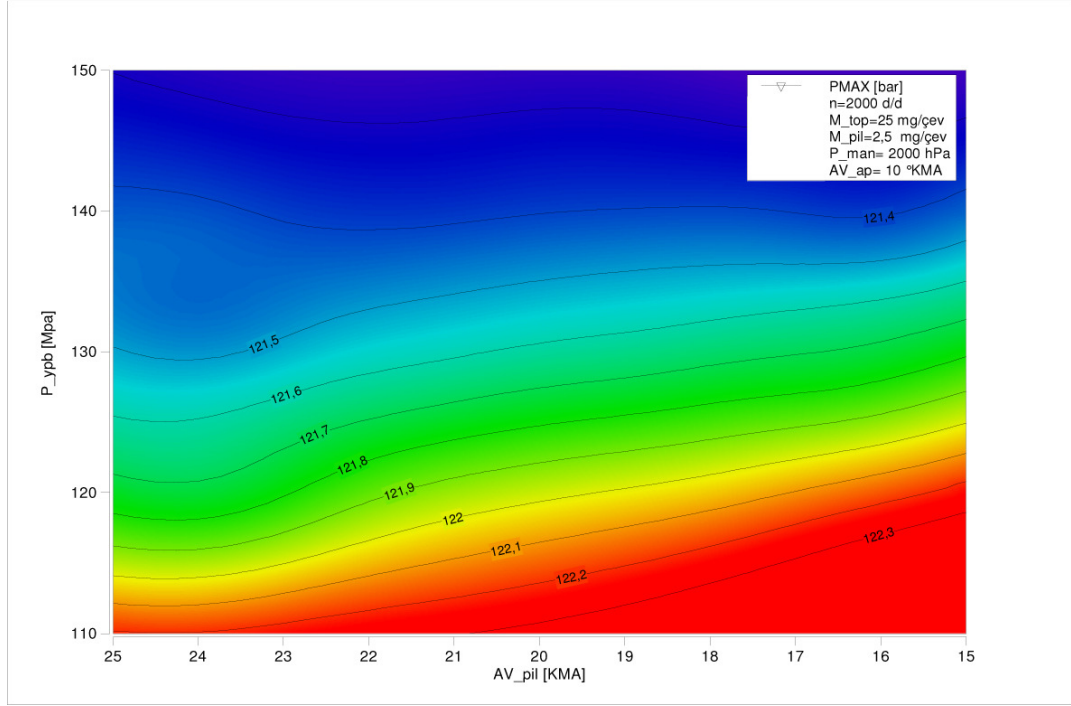
Şekil 6. 241 n=2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



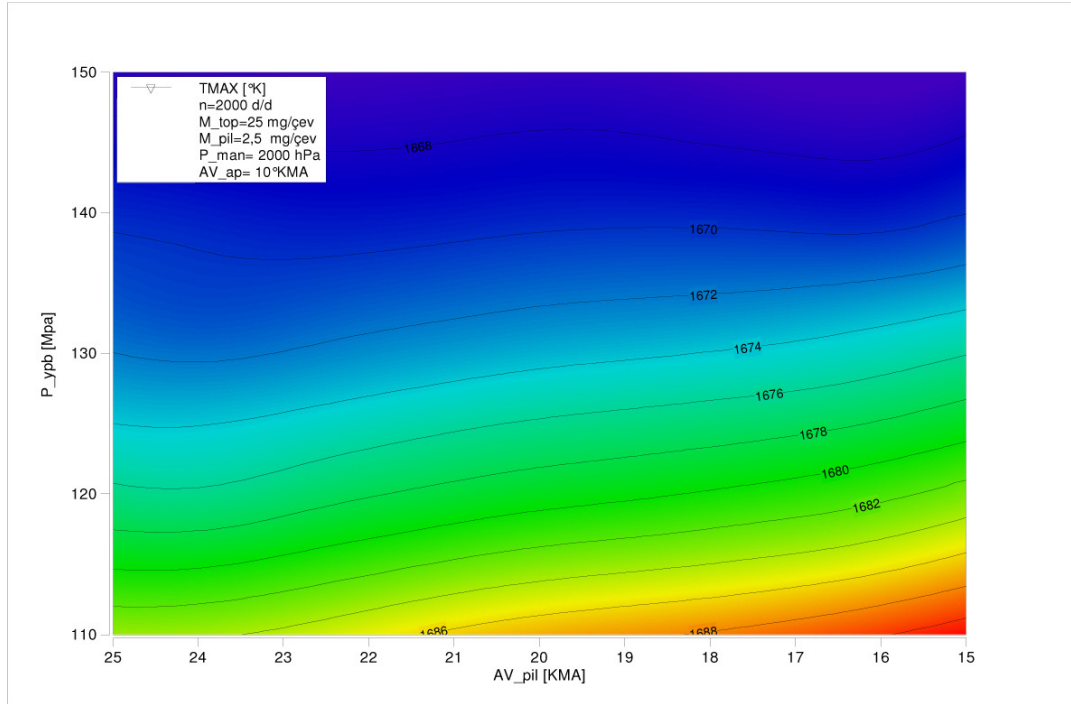
Şekil 6. 242 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi



Şekil 6. 243 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=2,5$ mg/cev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi



Şekil 6. 244 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı PMAX değişimi



Şekil 6. 245 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=10^\circ\text{KMA}$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan deneyde AV_{pil} ve P_{ypb} ’e bağlı TMAX değişimi

6.4.5 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

6.4.5.1 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda NO_x Emisyonları

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev şartı için yapılmış olan simülasyonda, pilot püskürtme kütlesinin 3 mg/çev olduğu şarta kadar pilot püskürtme kütlesinin sabit tutulduğu ve pilot püskürtme avansının geriye doğru çekildiği şartlarda NO_x emisyonu miktarının azaldığı, pilot püskürtme miktarının 3 mg/çev üzerinde olduğu durumda ise pilot püskürtme avansının geriye doğru çekildiği şartlarda NO_x emisyonun arttığı görülmüştür. 10-15°KMA pilot püskürtme değeri arasında, pilot püskürtme avansı sabit tutulduğu durumlarda pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte NO_x emisyonlarının arttığı, pilot püskürtme avansının 15-20 °KMA olduğu aralıkta ise pilot püskürtme kütlesinin önce çok az düştüğünü ancak 2.75 mg/.ev pilot püskürtme kütlesinden fazla durumlarda ise NO_x miktarının yükselmiştir..
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda 4mg/çev şartına kadar, pilot püskürtme kütlesinden ve pilot püskürtme avansından bağımsız olarak hemen hemen aynı değerde kalmıştır. 4mg/çev değer ve üzerinde ise pilot püskürtme miktarının 5 mg/çev'e yükselmesi ile birlikte tüm pilot püskürtme avanslarında NO_x miktarının artmıştır.

b) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncının değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak tüm pilot püskürtme avanslarında NO_x emisyonu miktarının arttığı sonucu elde edilmiştir.

- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlar da da bir önceki şartla benzer olarak NO_x emisyonu miktarının arttığı sonucu elde edilmiştir.

6.4.5.2 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda NO_x Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Modelleme ile elde edilen değerler incelendiğinde; pilot püskürtme miktarı arttırıldığı tüm şartlarda pilot püskürtme avansına bağlı olmaksızın tüm işletme şartlarında NO_x miktarının artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Model çıktısı ile elde edilen eğilim [87] , [10] ve numaralı literatür ile uyumludur.
- b) Püskürtme basıncının etkisi incelendiğinde ise ; deneylerdeki sonuçlara ve literatürdeki bilgilerle uyumlu olarak [25] , püskürtme basıncının artması ile birlikte NO_x emisyonlarının arttığı görülmüştür.
- c) Bu modelleme tekniği ile elde edilen sonuçlar deneyler ile elde edilmiş olan sonuçlar ile uyum içerisindedir.

6.4.5.3 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda İs Emisyonları

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonda pilot püskürtme avansının tüm değerleri için pilot püskürtme kütlesi arttırıldıkça is miktarının azaldığı sonucu elde edilmiştir. Pilot püskürtme kütlesinin ~ 1.25 mg/çev olduğu durumda İs miktarı en yükseğe çıkmıştır.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyon şartlarında pilot püskürtme kütlesinin 1.25 mg/çev'den 5 mg/çev'e çıkarılması İs miktarını düşürmüştür. En yüksek İs miktarı 1.25 mg/çev değerinde oluşmuştur.

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncı değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte is emisyonları düşmüştür.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak tüm pilot püskürtme avansları için püskürtme basıncının artması ile birlikte is emisyonları düşmüştür.

6.4.5.4 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda Is Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Modelleme ile elde edilen değerler incelendiğinde; pilot püskürtme miktarı arttırıldığı tüm şartlarda pilot püskürtme avansına bağlı olmaksızın tüm işletme şartlarında is miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Çevrim başına püskürtülen yakıt miktarının sabit olduğu göz önüne alındığında pilot püskürtme miktarının artması ana püskürtme miktarını azaltmaktadır. Pilot püskürtmenin artması da silindir içi sıcaklığı arttırmaktadır. Dolayısıyla ana püskürtme miktarının azalması ile birlikte sıcaklığında artıyor olması is miktarını azaltacaktır.
- b) Püskürtme basıncının etkisinin model çıktısı incelendiğinde tüm şartlarda pilot püskürtmenin arttırılması is emisyonlarını düşürmektedir. Bunun nedeni daha iyi atomizasyonu nedeni ile ısı transfer yüzeyinin artması ve daha iyi karışım teşkili, sonucunda is oksidasyonunun artmasıdır. Aynı sonuç [72] no'lu literatürde de elde edilmiştir

6.4.5.5 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda CO Emisyonları

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda 4.25 mg/çev pilot püskürtme kütlesine kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte CO miktarının arttığı, pilot püskürtme kütlesinin 4.25 mg/çev üzerine çıkarılması durumunda ise CO miktarının azaldığı görülmüştür.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda, 15-20 °KMA pilot püskürtme avansı aralığı 4 mg/çev pilot püskürtme oranına kadar önce hafif azaldığı sonra yeniden arttığı, 20-25 °KMA pilot püskürtme avansı aralığında ise 4.25 mg/çev pilot püskürtme kütlesine kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte CO miktarının arttığı, pilot püskürtme kütlesinin 4.25 mg/çev üzerine çıkarılması durumunda ise CO miktarının pilot püskürtme avansından bağımsız olarak azaldığı görülmüştür.

b) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncın değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının arttığı tüm şartlar için CO emisyonlarının azaldığı sonucu elde edilmiştir.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda 140 MPa değer kadar pilot püskürtme basıncından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması CO değerlerini arttırmış, basıncın 140 MPa'dan 150 MPa kadar yükseltilmesi durumunda ise CO emisyonlarında bir miktar düşme yaşandığı sonucun ulaşılmıştır.

6.4.5.6 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda CO Emisyonlarının Yorumlanması ve Tartışma

- a) Model ile elde edilen Pilot püskürtme miktarının, toplam püskürtme yüzdesi içerisindeki payı arttıkça genel eğilim olarak CO emisyonlarının arttığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuç pilot püskürtmenin miktarının artırılmasının esnasında sprej içerisindeki lokal zengin bölgelerin arttığı [25] da göz önüne alındığında CO'nun artması beklenebilir sonuçtur ve daha önce elde edilmiş olan sonuçlar ile uyumludur. CO emisyonlarının, belirli bir pilot püskürtme kütlelerinden sonra artma eğilimine girmesi ise; ön püskürtme ile sisteme sokulan miktarın artmasından dolayı silindir içi sıcaklığın arttığı ve dolayısıyla da, CO oksidasyonun arttırarak açığa çıkan CO miktarını azaltmıştır.

6.4.5.7 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda OİB'nin değişimi.

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda 4.25 mg/çev pilot püskürtme şartına kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak OİB'nin hemen hemen aynı kaldığı, pilot püskürtme kütlelerinin 4.2 mg/çev üzerine çıktığı şartlarda ise OİB'nin az bir miktar arttığı görülmüştür.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme kütlelerinin 3-5 mg/çev olduğu durumlarda OİB'nin pilot püskürtme avansından bağımsız olarak hemen hemen aynı çıktığı, pilot püskürtmenin 3 mg'dan az olduğu durumlarda ise OİB'nin bir miktar arttığı görülmüştür.

b) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncı değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte OİB'nin çok az bir miktar düştüğü görülmüştür.

- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte OİB'nin çok az bir miktar düştüğü görülmüştür.

6.4.5.8 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda OİB'nin Yorumlanması ve Tartışma

- a) Pilot püskürtme kütlesinin artışına bağlı olarak yapılan iki analizde tam olarak birbirinin zıttı iki eğilim ile karşılaşmıştır. Birinci eğilimde (Şekil 6.221) pilot püskürtmenin kütlesinin artması (aynı pilot püskürtme avansında) OİB'yi arttırmış, ikinci grafikteki eğilim ise (Şekil 6.228) tam tersi yönde bir etki ile karşılaşmış ve pilot püskürtme kütlesinin artımı ile birlikte OİB'nin azaldığı görülmüştür. Her iki etkide incelendiğinde, bu modelleme tekniğinin beklenen çıktısının pilot püskürtme miktarının arttıkça daha düşük sıcaklıkta sisteme sokulan yakıt miktarının artmasına bağlı olarak OİB'nin az bir miktar düşmesidir (Pülverizasyonun yanmanın iyileşmesine yaptığı etki, termal verimin düşmesi ile dengelenerek negatif yönde etkiye ulaşmaktadır) . Bu açıdan bakıldığında modelleme tekniği sistem çıktılarını doğru modellemede (Şekil 6.261) de yetersiz kalmışlardır.
- b) Her iki grafikte (Şekil 6.235, 6.242) püskürtme basıncın artırılması OİB'yi az da olsa düşürecek yönde etki ettiği sonucuna ulaşmıştır. Abdullah vd. [25] 'no lu çalışmalarında basıncın artmasının atomizasyonu arttırarak daha iyi bir yanmaya sebep olduğu ve bu durumda OİB'nin bir miktar artmasının beklenebilir sonuç olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, pilot püskürtme miktarı ile artan yanma sıcaklığının neden olduğu ısı kaybı (sıcaklık artmasının bağlı ısı transferinin artmasının) IOEB düşmesine neden olmaktadır. .

6.4.5.9 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda b_e 'nin değişimi.

- a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme kütlelerinin 4 mg/çev değerine kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak b_e 'nin arttığı, pilot püskürtme kütlelerinin 4 mg/çev'den 5 mg/çev'e yükseldiği durumda ise b_e 'nin bir miktar azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, şartında yapılmış olan simülasyonlarda, pilot püskürtme kütlelerinin 4 mg/çev olduğu değere kadar arttırılması pilot püskürtme avansından bağımsız olarak b_e 'nin arttığı, pilot püskürtme kütlelerinin 4 mg/çev'den 5 mg/çev'e yükseltilmesi durumunda ise b_e 'nin çok az bir miktar azaldığı sonucuna

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncının değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncın artması ile birlikte b_e 'nin arttığı görülmüştür.
- ii) 2000 d/d, $AV_{ap}=10^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=2,5$ mg/çev şartında yapılmış olan simülasyonlarda pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncın artması ile birlikte b_e 'nin arttığı görülmüştür.

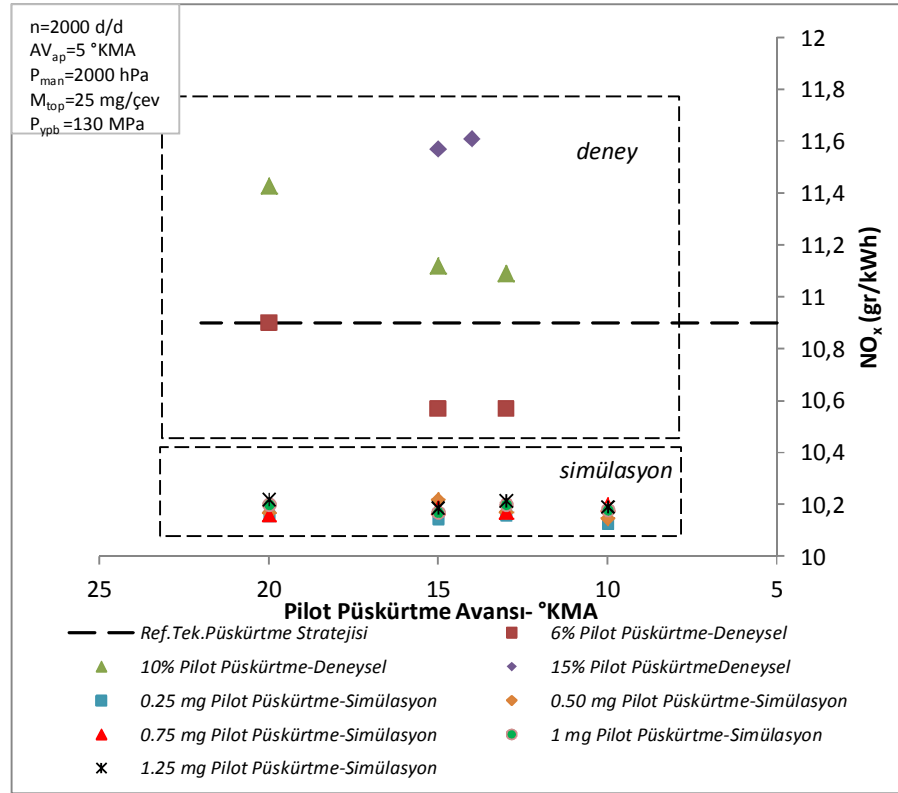
6.4.5.10 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Durumunda b_e 'nin Değişiminin Yorumlanması ve Tartışma

- a) b_e 'nin değişimi Şekil 6.262 ve Şekil 2.269 da verilmiştir. Modelleme sonuçları, deney sonuçlarından elde edilen veriler ile doğru orantılı olarak , pilot püskürtme miktarının arttıkça b_e 'nin arttığı görülmektedir. Pilot püskürtme yapılan durumlarda ÜÖN dan uzak bölgede sisteme sokulan yakıt miktarının artması nedeni ile bu beklenebilir bir sonuçtur.
- b) Püskürtme basıncının artması ile b_e 'nin değişimi Şekil 6.276 ve Şekil 6.283'de verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi püskürtme basıncının artması özgül yakıt sarfiyatını çok az bir miktar da olsa arttırıcı yönde etki yapmıştır.

Püskürtme basıncının artması nedeni ile özgül yakıt sarfiyatında meydana gelen değişim, pompanın güç ihtiyacındaki artışa da bağlıdır. Bu nedenle püskürtme basıncının artmasının yanmayı iyileştirmesi nedeni ile beklenen özgül yakıt sarfiyatı azalmasını yanı sıra püskürtme pompası güç ihtiyacı artması sebebi ile özgül yakıt sarfiyatındaki olumsuz sonuç ortaya çıkabilir.

6.4.6 Tek Boyutlu Termodinamik Program ve YSA'nın Ortak Kullanımı Yöntemi İle Pilot Püskürtmenin Çok Küçük Mikatlar Yapılması Durumunda NO_x Emisyonunun Değerlendirilmesi

Aşağıdaki grafik üzerinde belirtilmiş olan motor işletme şartında püskürtme sisteminin minimum püskürtebileceği pilot püskürtme miktarı 1.6 mg/çevrim dir. Püskürtme sistemi 1.6 mg/çevrimin altında püskürtme gerçekleştirememektedir. Tez çalışmasında oluşturulan termodinamik model kullanılarak 1,6 mg/çev den daha az miktarda pilot püskürtülmeye olanak sağlayan enjektörlerin kullanılması durumunda ortaya çıkacak NO_x emisyon değerlerini belirlemek üzere yeni püskürtme profilleri oluşturulmuştur. Toplam püskürtme miktarı değiştirilmemiş 25 mg/çevrim olarak sabit tutulmuş ve pilot püskürtme kütleleri sırasıyla ; 0.25 mg/çevrim, 0.5 mg/çevrim, 0.75 mg/çevrim, 1mg/çevrim ve 1.25 mg/çevrim olarak denenmiştir. Bu şartlar için YSA destekli termodinamik simülasyon AVL BOOST programı çalıştırıldığında elde edilen NO_x değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. 246 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=130$ MPa, şartında yeni pilot püskürtme kütleleri için AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi

NO_x değerleri incelendiğinde 1.5 mg'ın altında yapılmış olan tüm püskürtmeler için NO_x değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu etki; küçük miktarlarda yapılmış olan pilot püskürtmenin genel amacına uygun olarak ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini ve ön karışımli yanma fazının pikini düşürmesinden dolayı silindir içi sıcaklığın düşmesi ve NO_x oluşumunun azalmasından kaynaklanmaktadır.

6.5 YSA 'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılması

Bu bölümde YSA metodunun tek başına bir yöntem olarak kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar , metodun doğrulanması ve ilgili grafikler verilmiştir.

Dizayn edilen YSA'ların girdi parametreleri motor devri (d/d), ana püskürtme miktarı (mg/çev), pilot püskürtme miktarı (mg/çev), ana püskürtme avansı (°KMA), pilot püskürtme avansı (°KMA),aşırı doldurma basıncı (hPa), yakıt püskürtme basıncı (MPa) dir. Dizayn edilen YSA'ların çıktıları ise NO_x , CO, İS, b_e , OİB ve OEB'dir. Dizayn edilen tüm ağlar ÇKA tipindedir ve tanjant sigmoid bir aktivasyon fonksiyonu kullanmaktadır

ve başlangıç olarak hepsi ara katmanlarında 10 nöron kullanacak şekilde dizayn edilmişlerdir. YSA'ların eğitimleri esnasında elde edilen regresyon değerleri (R) aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 6. 4 Tek püskürtme durumu için YSA'ların regresyon durumu

YSA Çıktısı	Regresyon-R
NO _x	0.99899
CO	0.99766
iS	0.9877
b _e	0.9945
OİB	0.99862
OEB	0.9999

Çizelge 6. 5 Pilot püskürtme durumu için YSA'ların regresyon durumu

YSA Çıktısı	Regresyon-R
NO _x	0.99985
CO	0.99831
iS ₂₀₀₀	0.91752
iS ₂₅₀₀	0.94947
b _e	0.99687
OİB	0.99859
OEB	0.99886

6.5.1 YSA 'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılmasının Doğrulanma Aşaması

Kullanılmış olan yöntemin doğrulanması için, 15 deney noktası seçilmiş ve bu noktalar YSA'nın dizaynı esnasında (eğitim, doğrulama ve test) YSA' ya herhangi bir şekilde gösterilmemişlerdir. Seçilmiş olan test noktalarının özellikleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6. 6 Pilot püskürtme durumu için YSA'ların regresyon durumu

No	n	M _{top}	AV _{ap}	AV _{pil}	P _{man}	M _{pil}	P _{ypb}
-	d/d	mg/çev	°KMA	°KMA	hPa	mg/çev	MPa
1	2000	25	0	-	2000	-	140
2	2000	38	0	-	2200	-	150
3	2000	25	15	-	2000	-	130
4	2500	37	0	-	2200	-	130
5	2500	37	0	-	2200	-	150
6	2000	25	5	14,8	2000	1,596	130
7	2000	25	5	14,9	2000	2,496	130
8	2000	25	5	14,9	2000	3,748	130
9	2000	38	10	18,1	2200	1,896	140
10	2000	38	10	24,8	2200	5,696	130
11	2500	28	5	15,4	2000	1,598	130
12	2500	28	5	16,8	2000	4,196	120
13	2500	37	5	20	2200	3,696	130
14	2500	37	5	17,1	2200	5,548	140
15	2500	45	5	15,7	2300	2,248	150
Avans değerleri (AV) ÜÖNÖ için verilmiştir.							

Bu 15 noktanın özellikleri dizayn edilmiş YSA'lara girilmiş ve sonuçlar dinamometreden alınmış olan sonuçlarla karşılaştırılmışlardır. Sonuçlar aşağıdaki tabloda oran şeklinde (YSA Çıktısı / Deney Sonucu) belirtilmiştir.

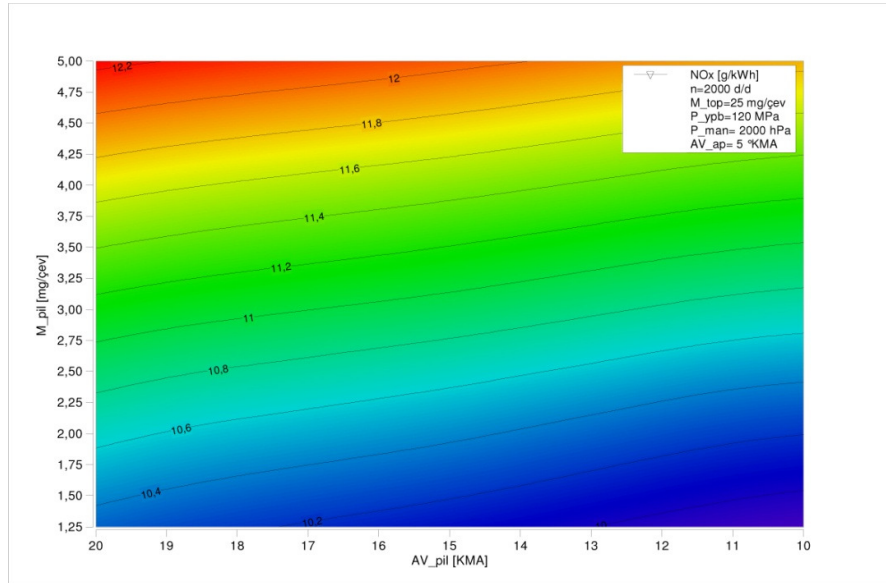
Çizelge 6. 7 YSA yönteminin tek başına kullanımı durumunda 15 deney noktasının doğrulmasının değerlendirilmesi.

No	NO _x	CO	İS	OİB	OEB	b _e
1	1,03	1,38	1,99	1,04	1,02	0,99
2	1,03	0,85	0,39	1,01	1,00	0,99
3	0,99	0,12	8,09	1,11	1,01	0,99
4	1,06	1,12	0,69	0,98	0,99	1,01
5	1,09	1,24	1,62	0,99	1,00	0,99
6	1,01	1,16	0,92	0,98	0,98	1,02
7	1,00	1,15	1,01	0,99	1,00	1,00
8	1,02	1,24	1,89	0,90	0,98	1,00
9	0,99	0,99	0,69	1,00	1,00	0,99
10	0,99	0,88	1,12	1,01	0,99	1,00
11	0,99	0,99	0,63	1,00	1,00	1,00
12	0,98	0,95	0,89	1,00	1,03	1,00
13	1,00	0,97	1,15	0,99	0,99	1,00
14	1,01	1,04	1,38	1,00	1,01	0,99
15	1,00	0,98	1,41	1,00	1,01	1,01
-Hücrelerdeki tüm değerler ilgili performans veya emisyon parametre çıktısı için (Simülasyon Değeri/Deney Değeri) şeklinde hesaplanmıştır.						
-YEŞİL: 10% hata sınırının içinde kalanlar						
-KIRMIZI: 10% hata sınırının dışında kalanlar						

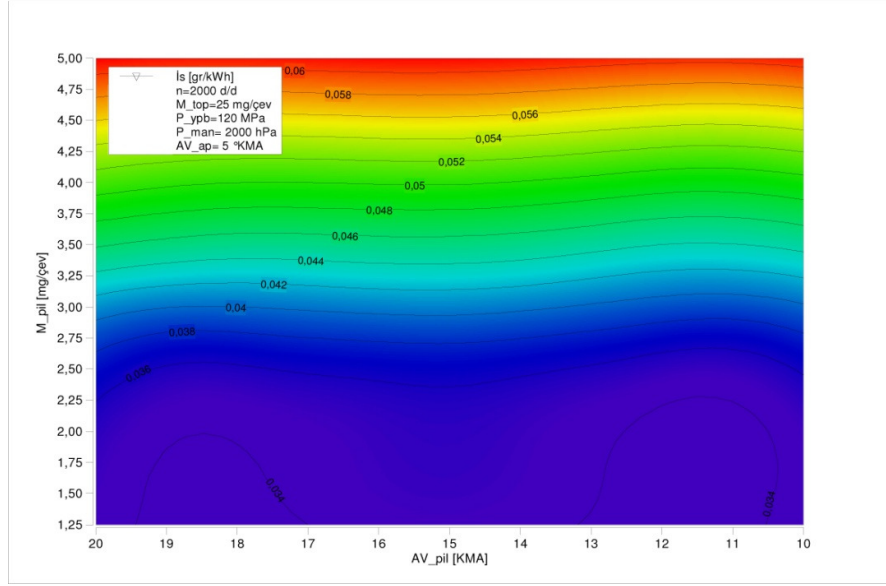
Çizelge 6.7 incelendiğinde, YSA'nın tek başına kullanımının is emisyonları hariç kabul edilebilir sınırla içerisinde kaldığı görülmektedir. CO Emisyonlarının çıktıları ise, doğrulma bandının 50% sinden fazlasında ± 10 bandının içerisinde kalmıştır. Dizayn edilen YSA'lara daha önceden oluşturulmuş olan ve Çizelge 4.9 da verilmiş olan deney matrisi (bir önceki bölümde YSA+ Termodinamik model analiz edilen ve 2160 noktadan oluşan deney matrisi) girdi olarak girilmiş ve çıktılar kontur grafikleri halinde aşağıdaki bölümde verilmiştir.

6.5.2 YSA 'nın Tek Başına Bir Yöntem Olarak Kullanılması Durumunda Elde Edilen Motor Performans Parametrelerinin ve Emisyonlarının Analiz Grafikleri.

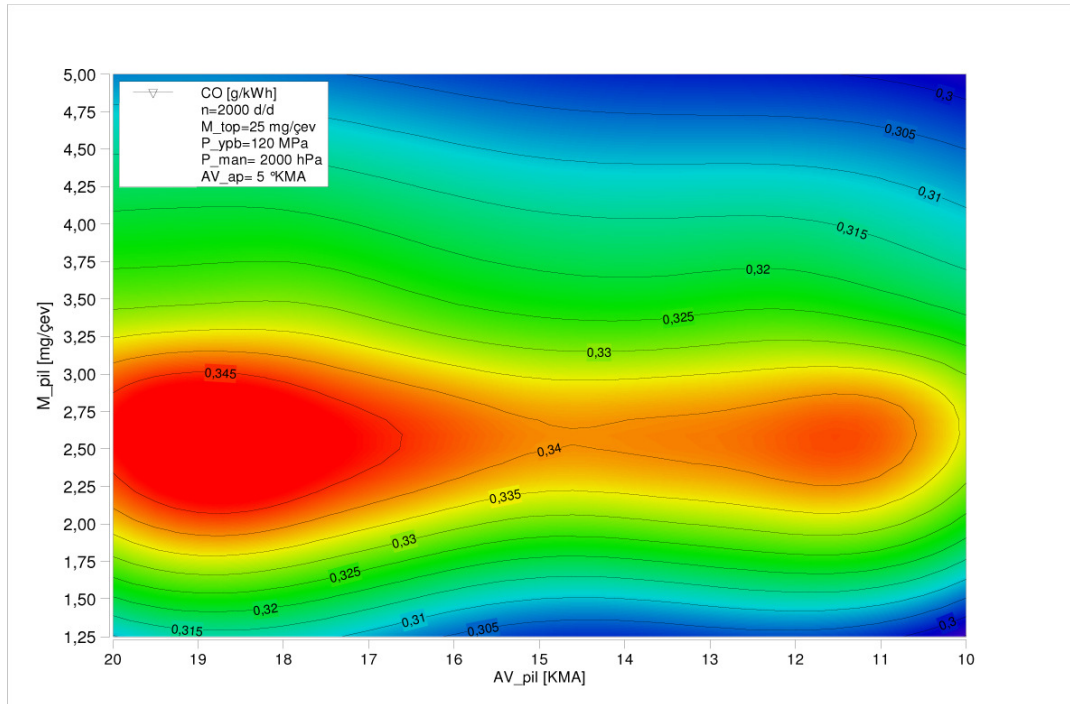
6.5.2.1 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.



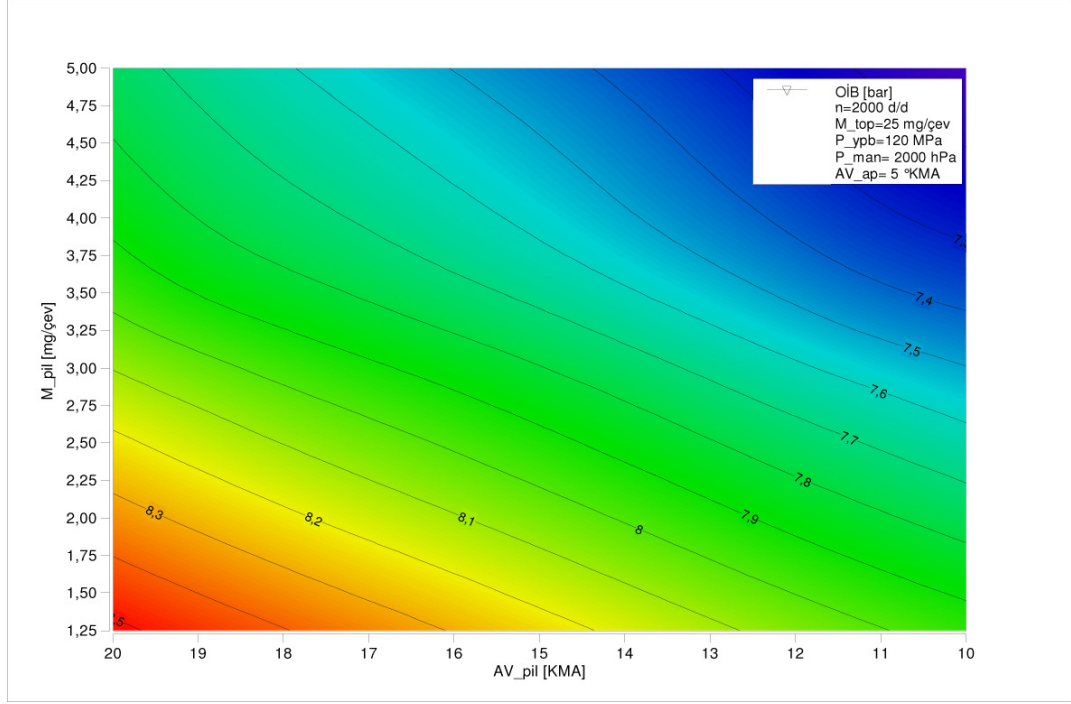
Şekil 6. 247 $n=2000$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



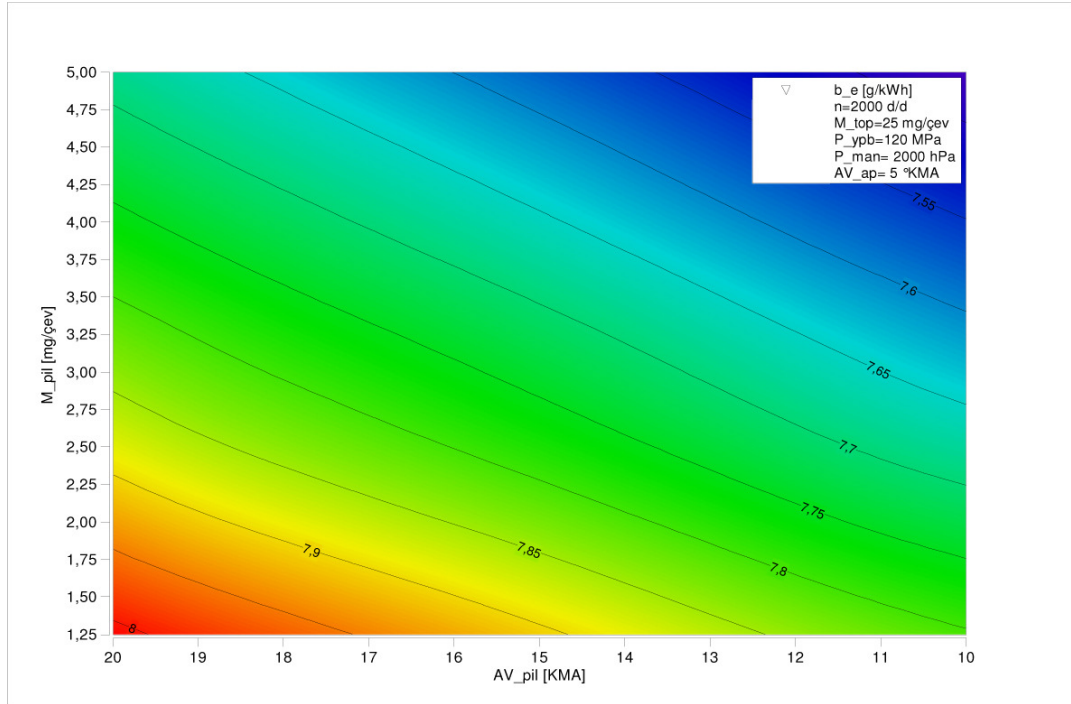
Şekil 6. 248 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı I_s değişimi



Şekil 6. 249 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı CO değişimi



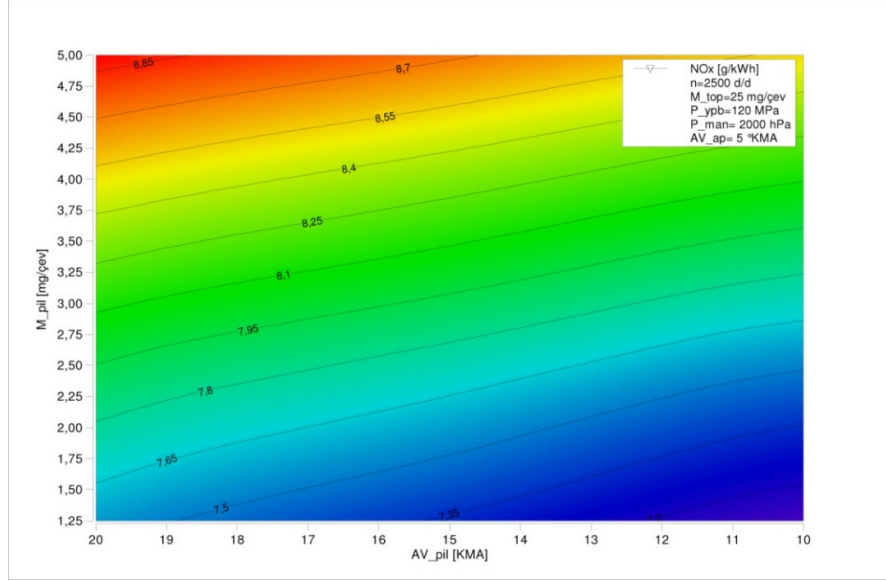
Şekil 6. 250 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı OİB değişimi



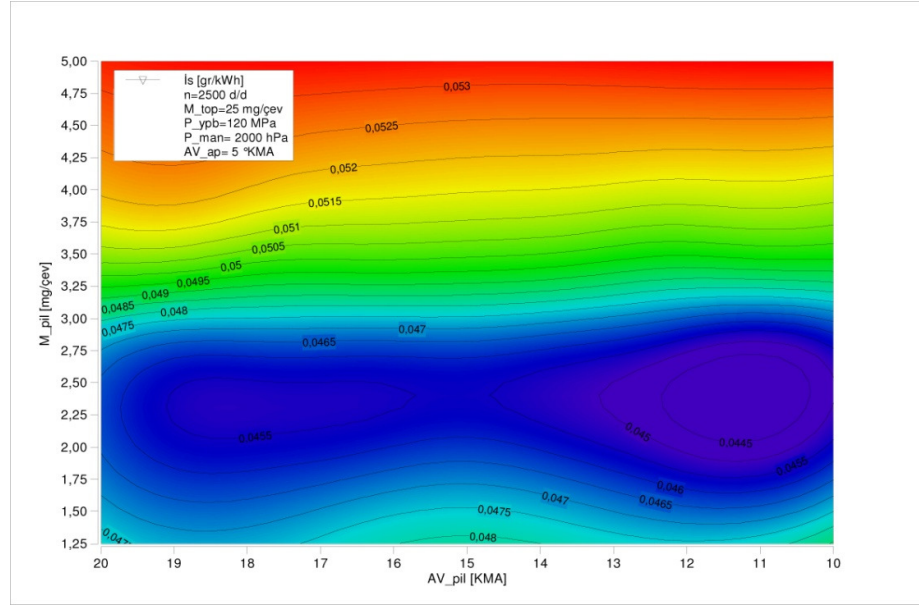
Şekil 6. 251 n=2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi

6.5.2.2 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin

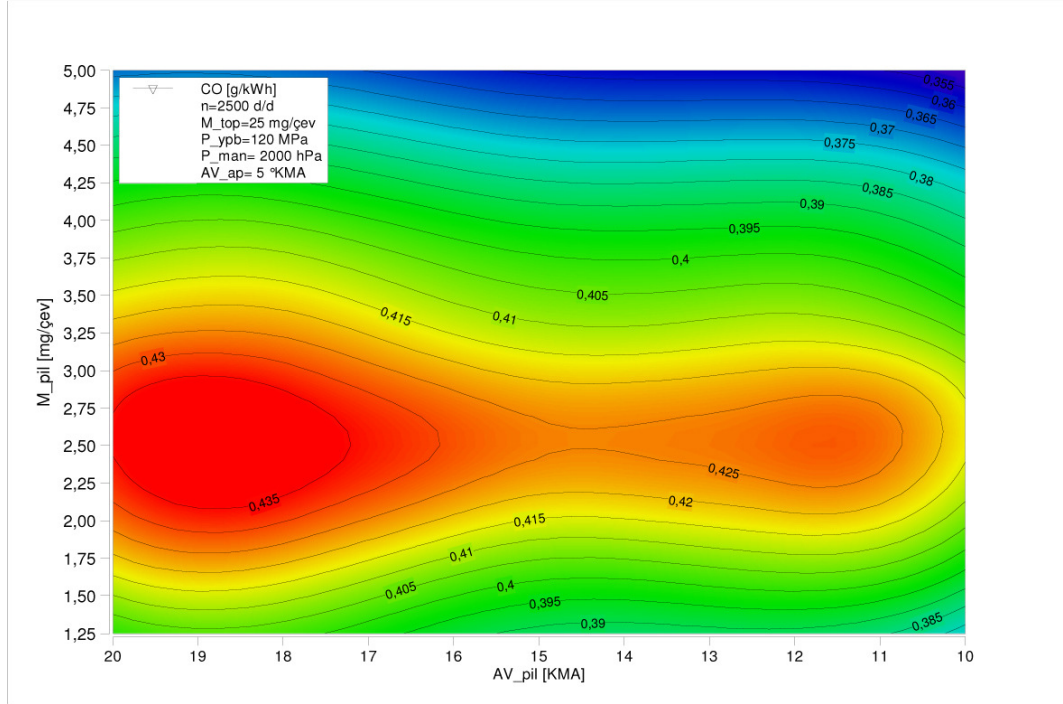
Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.



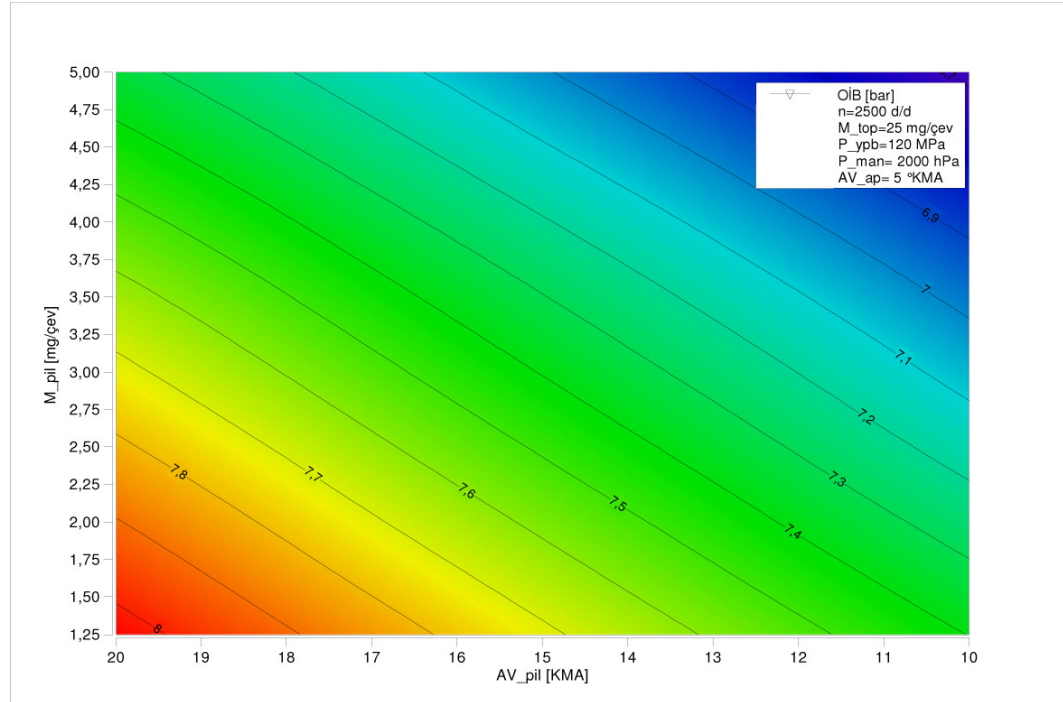
Şekil 6. 252 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı NO_x değişimi



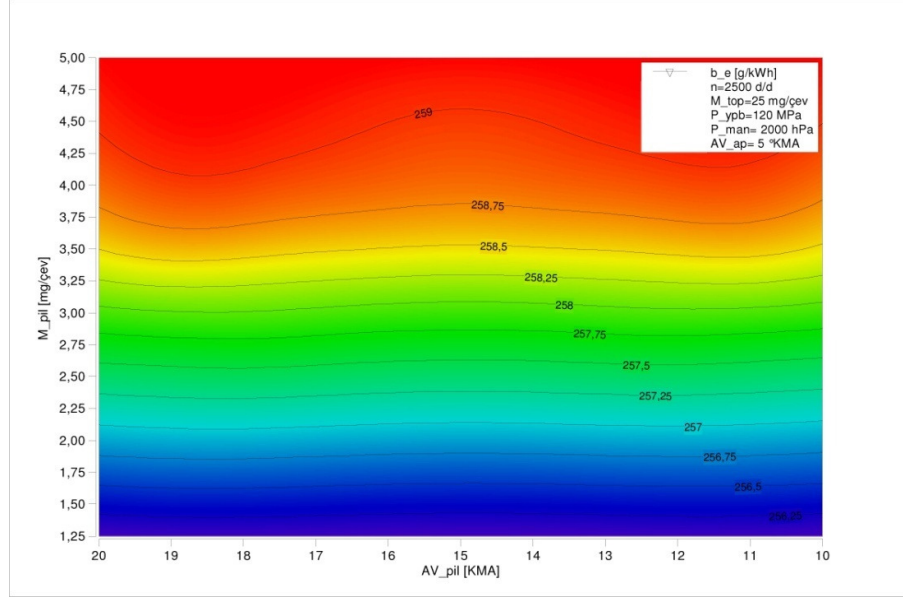
Şekil 6. 253 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı Is değişimi



Şekil 6. 254 n=2500 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, P_{ypb}=120 MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı is CO değişimi

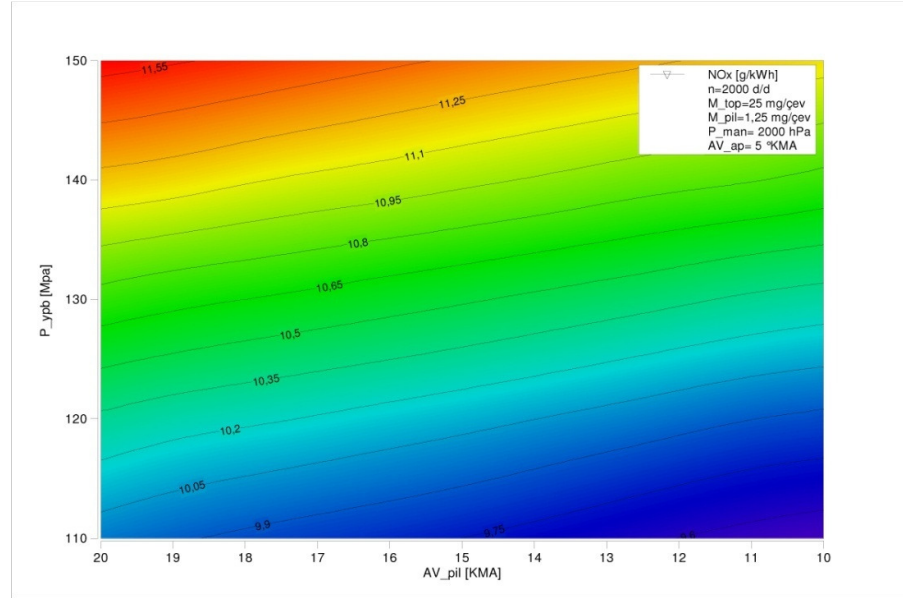


Şekil 6. 255 n=2500 d/d, AV_{ap}=5°KMA, P_{man}=2000 hPa, M_{top}=25 mg/cev, P_{ypb}=120 MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil}'e bağlı OİB değişimi

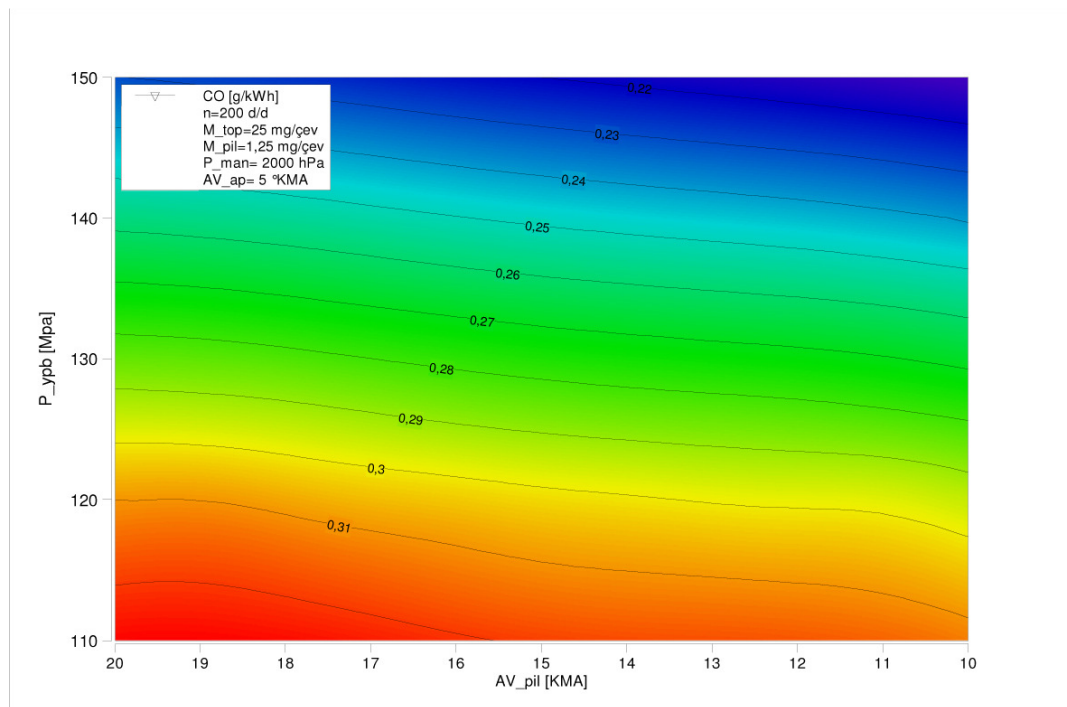
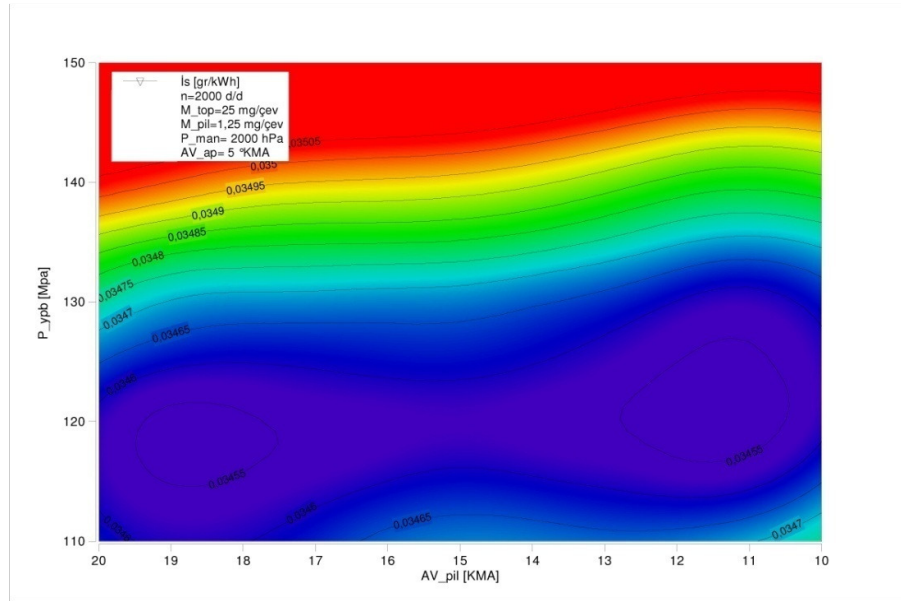


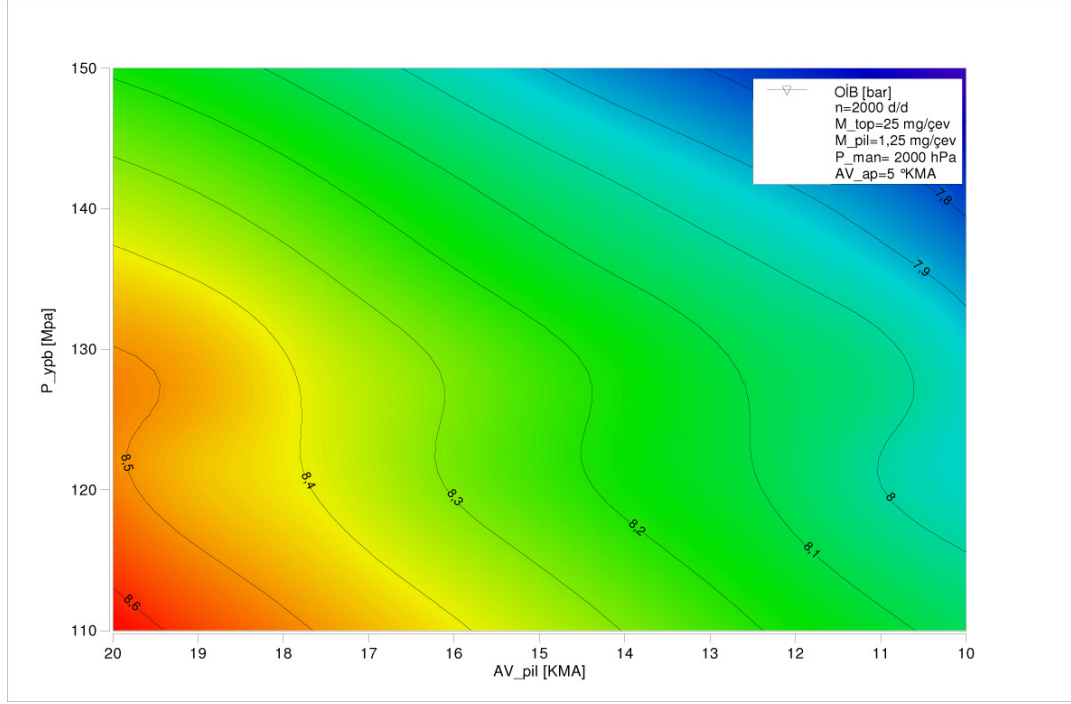
Şekil 6. 256 $n=2500$ d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı b_e değişimi

6.5.2.3 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı YSA Analizleri.

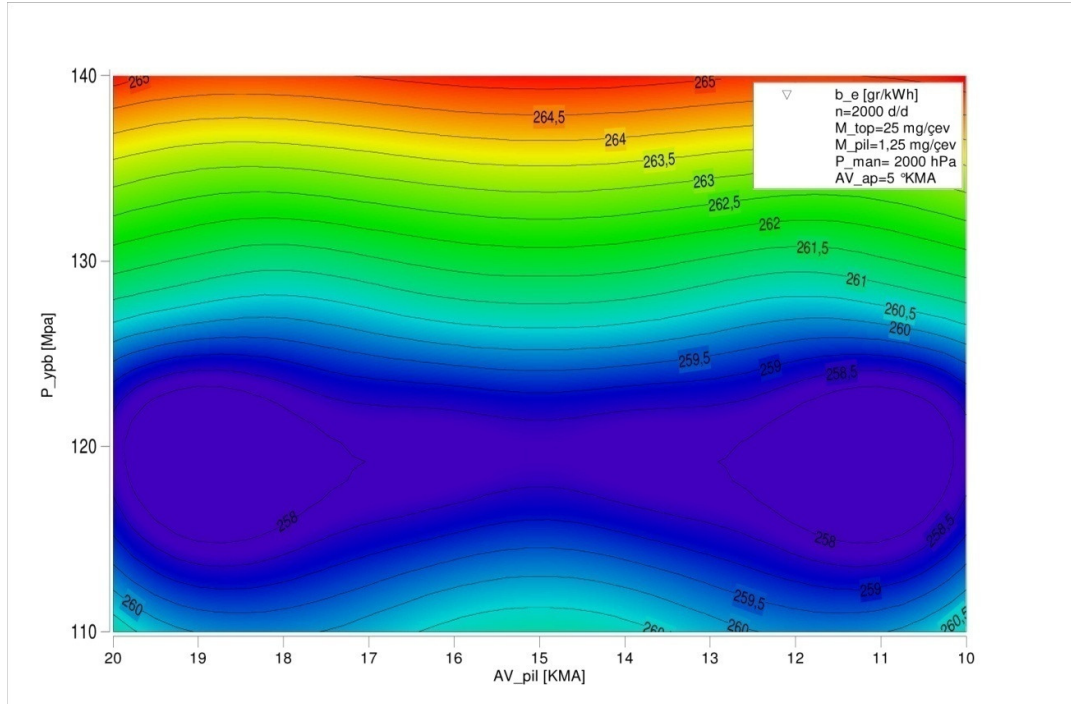


Şekil 6. 257 $n=2000$ d/d, $M_{top}=25$ mg/cev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev, şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı NO_x değişimi





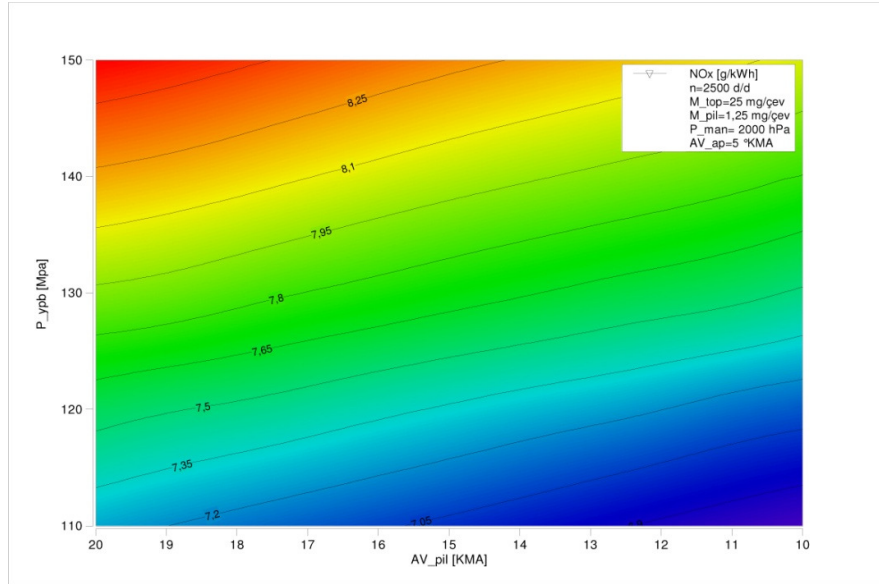
Şekil 6. 260 n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/cev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OİB değişimi



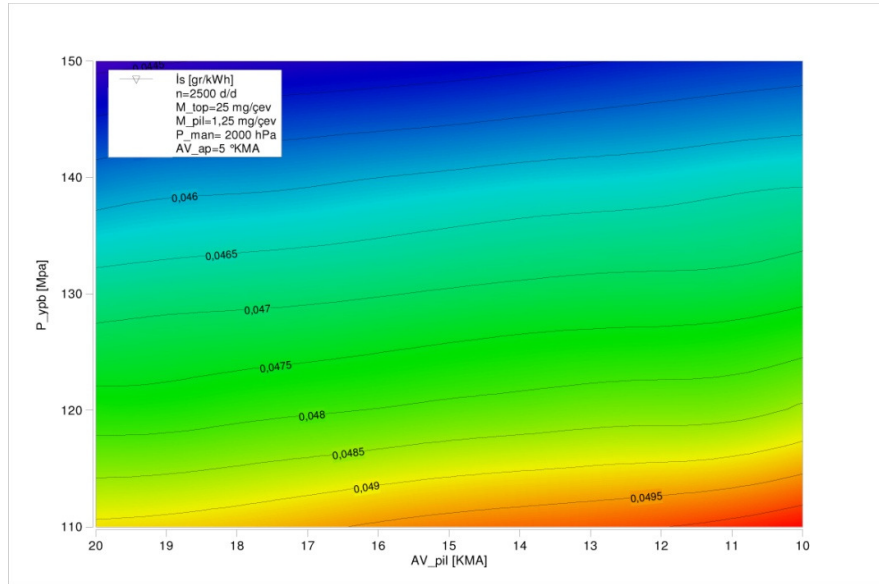
Şekil 6. 261 n=2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/cev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi

6.5.2.4 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$

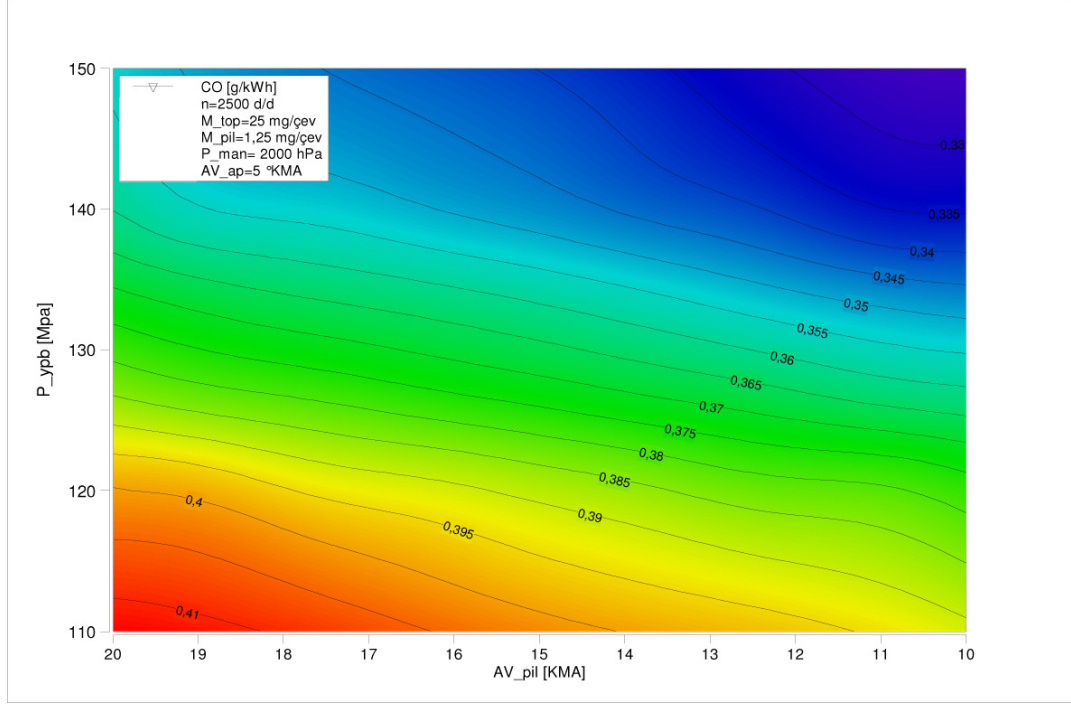
hPa Deney Şartı İçin Yapılmış Olan AV_{pil} ve M_{pil} 'e bağlı YSA Analizleri.



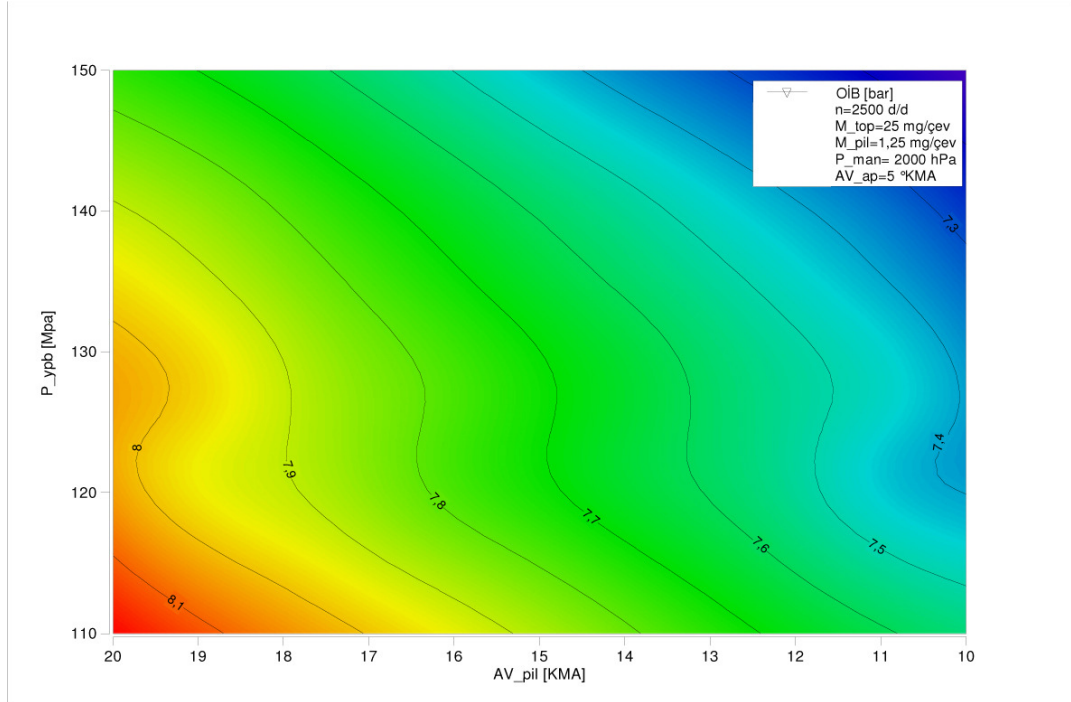
Şekil 6. 262 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev , şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pyrb} 'e bağlı NO_x değişimi



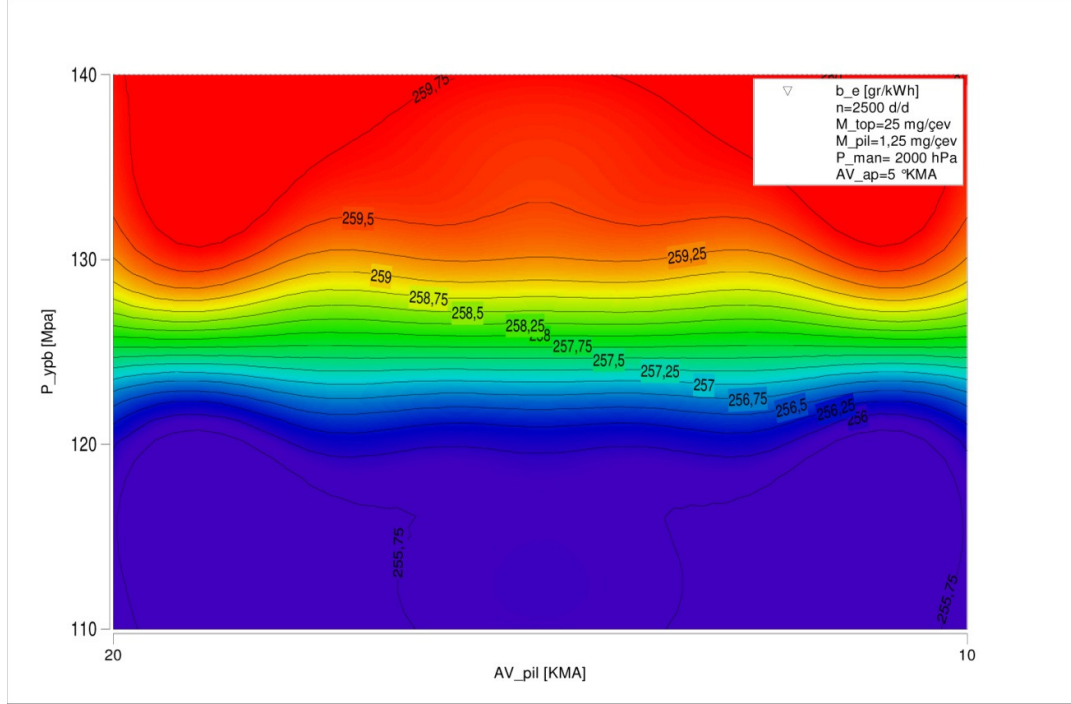
Şekil 6. 263 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{pyrb} 'e bağlı is değişimi



Şekil 6. 264 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı CO değişimi



Şekil 6. 265 $n=2500$ d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5$ °KMA, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı OilB değişimi



Şekil 6. 266 n=2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/cev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $M_{pil}=1,25$ mg/cev şartında yapılmış olan YSA analizinde AV_{pil} ve P_{ypb} 'e bağlı b_e değişimi

6.5.3 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda Elde Edilen Sonuçların Yorumlanması

YSA'nın tek başına kullanılması durumunda verilen sonuçlar aşağıda kısımda verilmiş ve yorumlanmıştır. YSA'nın tek başına kullanılması sadece bir matematik korelasyon üretme tekniği olduğundan herhangi bir termodinamik yoruma yer verilmemiş olup grafiklerin eğilimlerinin doğru olup olmadığı hakkında yorumlara yer verilmiştir.

6.5.3.1 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda NO_x Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/cev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde, pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte NO_x miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

- ii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde, pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte NO_x miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

b) Pilot püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa şartına yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncı arttıkça NO_x emisyonlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte NO_x emisyonlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.5.3.2 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda İS Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte is miktarının sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte is miktarının sonucuna ulaşılmıştır.

b) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme basıncı değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde püskürtme

basıncının artması ile pilot püskürtme avansından bağımsız olarak birlikte iş miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

- ii) 2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncı arttıkça iş miktarının düştüğü sonucuna ulaşılmıştır.

6.5.3.3 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda CO Emisyonları İçin Elde Edilen Sonuçlar

a) Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde, 2.75 mg/çev değerine kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesi arttıkça CO emisyonu miktarı arttığı, pilot püskürtme kütlesi 2.75 mg/çev'den 5 mg/çev'e yükseltildiği şartlarda CO miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde 2.75 mg/çev değerine kadar pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesi arttıkça CO emisyonu miktarı arttığı, pilot püskürtme kütlesi 2.75 mg/çev'den 5 mg/çev'e yükseltildiği şartlarda CO miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

b) Pilot püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde, pilot psükürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte CO emisyonlarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^\circ KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev yapılmış olan YSA analizinde pilot psükürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte CO emisyonlarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.5.3.4 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda OİB İçin Elde Edilen Sonuçlar

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte OİB'de az bir miktar düşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinin artması ile birlikte OİB'de az bir miktar düşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

b) *Pilot püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte IOEB'de az bir miktar düşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak püskürtme basıncının artması ile birlikte OİB'de az bir miktar düşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

6.5.3.5 YSA'nın Tek Başına Kullanımı Durumunda b_e İçin Elde Edilen Sonuçlar

a) *Pilot püskürtme avansı ve pilot püskürtme kütlesi değişimi için ;*

- i) 2000 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesinden bağımsız olarak pilot püskürtme kütlesi arttıkça b_e'nin az bir miktar azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

- ii) 2500 d/d, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $P_{ypb}=120$ MPa, şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme kütesinden bağımsız olarak pilot püskürtme kütesi arttıkça b_e 'nin az bir miktar arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

b) Pilot püskürtme avansı ve püskürtme basıncı değişimi için ;

- i) 2000 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme basıncı arttıkça b_e 'nin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ii) 2500 d/d, $M_{top}=25$ mg/çev, $AV_{ap}=5^{\circ}KMA$, $P_{man}=2000$ hPa, $M_{top}=25$ mg/çev, $M_{pil}=1,25$ mg/çev şartında yapılmış olan YSA analizinde pilot püskürtme avansından bağımsız olarak pilot püskürtme basıncı arttıkça b_e 'nin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.5.3.6 YSA Metodunun Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonuçlar incelendiğinde YSA'nın bazı performans ve emisyon değerlerini doğru eğilimlerle tahmin ettiği ve doğruluğun YSA eğitimine katılan örnek sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla yüksek sayısı da örnekleme (deney sonucu ile) dizayn edilecek YSA'ların bu tür çalışmalarda yararlı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- i. Pilot püskürtme doğru miktarda ve doğru avans açısında yapıldığında NO_x azatılımının da etkin bir biçimde kullanmak mümkündür.
- ii. Ön püskürtmenin % olarak deney tasarımı toplam püskürtme miktarına balı olarak ön püskürtme miktarını artırması nedeni ile sonuçlar beklentilerin dışında gerçekleşmektedir. Ön püskürtme miktarının mg/çevrim cinsinden temel alınarak deney tasarlanması daha uygundur.
- iii. Pilot püskürtmenin hem NO_x hem de yanma gürültüsü azatılımının da etkin olarak kullanılabilmesi için genel olarak küçük miktarlarda pilot püskürtme yapılması gerekmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler genel olarak değerlendirildiğinde deneylerin gerçekleştirilmiş olduğu motorda pilot püskürtmenin değerinin 1.5 mg/çev geçmediği sürece etkin olarak kullanılabilirdiği görülmüştür. Piezo aktivasyonlu enjektör sistemlerinin gelişimi, pilot püskürtmenin kendi içerisinde daha küçük fazlara ayrılabilmesi ve enjektör bekleme zamanlarının kısılması daha ileri düzeyde azot oksit kontrolünün daha iyi yapılmasına olanak tarmaktadır.
- iv. Deney motorunun işletme şartları sabit tutulmak kaydı ile pilot püskürtme kütlesinin deney motorun 1.6 mg/çev altında püskürtülmesi durumunda azot oksit emisyonlarının azalacağı sonucuna ulaşılmıştır.
- v. Pilot püskürtmenin ana püskürtmeden çok önce sisteme sokulması da pilot püskürtme zamanlamasını olumsuz etkilemektedir. Yapılan deneyler ve

modellemeler pilot püskürtmenin etkin olarak ana püskürtmeden 10-20 °KMA arasında kalacak şekilde sisteme püskürtülmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

- vi. Pilot püskürtme miktarını uygun olarak seçildiği stratejilerde is emisyonlarındaki artış görülmektedir. NO_x emisyonları ile birlikte aynı anda is emisyonlarının da kontrolü ancak daha sonradan sisteme sokulacak olan art püskürtmeler ile mümkündür. Yada püskürtme basıncının arttırılması is emisyon miktarını bir miktar düşürebilir ancak basıncın artması daha iyi atomizasyona sebep olduğundan daha iyi yanma ve NO_x artışına sebep olacaktır bu nedenle de bu uygulamanın yapıldığı durumlarda EGR stratejisi devreye alınarak püskürtme basıncının yaratmış olduğu olumsuz etki giderilebilir.
- vii. Püskürtme basıncının arttırılması yanmaya pozitif yönde etki etse de kimi durumlarda yüksek basınç pompasının çektiği güç püskürtme basıncının yarattığı pozitif etkinin üzerine geçebilmektedir. Ancak netice olarak yakıt sarfiyatını kötü yönde etkileyen bu faktör ihmal edilebilecek düzeydedir. Püskürtme basıncının motor üzerinde bulunan diğer ek sistemler (EGR,SCR,DPF vb.) sistemler göz önünde bulundurularak o duruma özgül olarak belirlenmesi gerekmektedir ancak bu şekilde performans ve emisyon değerlerine çok fazla zarar vermeden etkin bir biçimde kullanılabilir.
- viii. AVL Boost programının kullanımı, özellikle parametrik analiz yapımı ve optimizasyon problemlerinin çözümünde belirli bir noktaya kadar yaklaşım açısından oldukça faydalı bulunmuştur. Ancak ilgili programın çok geniş bir veri bandı içerisinde doğrulanması gerektiği ortadadır.
- ix. AVL Boost programının parametrelerinin YSA ile kalibrasyonu ve sonuçları incelendiğinde ilgili tekniğin büyük oranda doğru sonuç verdiği görülmüş olsa da program kalibrasyon parametrelerinin çok daha büyük bir veri havuzu ile doğrulanması gerektiği ortadadır. Ancak yüksek oranda yapışmış olan doğrulamanın ardından YSA'nın daha doğru kalibrasyon parametreleri tercih edebileceği ortadadır. İlgili metodoloji ancak doğrulama deney matrisinin içerisinde kalan alanlarda doğru olarak çalışabilmektedir. Kalibrasyon

parametrelerinin doğrulandığı bandın dışındaki alanlarda doğru sonuçların güvenilirliği tartışmalıdır.

- x. YSA'nın tek başına kullanımı çıktı değerleri. İlgili sonuçlar incelendiğinde YSA metodu büyük deney matrisleri kullanıldığı durumlarda ara parametre tahmininde doğru olarak kullanılabileceğini ancak çok düşük sayıdaki deney matrisi sonuçları ile motor performans parametrelerini tahmin etmede yetersiz görülmüştür.
- xi. Tüm bu veriler ışığında tek boyutlu analizlerin, yeterli deney verisi ile kalibre edilmesi durumunda kabul edilebilir sınırlar içerisinde doğru sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- xii. Çalışma esnasında geliştirilmiş olan modelleme tekniğinin (termodinamik model+yapay sinir ağları metodu ile) motor kalibrasyonunda efektif olarak kullanılabileceği, yeterli sayıda ön test yapılması koşulu ile özellikle azot oksit emisyonları ve performans değerlerinin belirlenmesinde yapılması öngörülen deney sayısını yaklaşık %50 oranda azaltabileceği ve ilgili noktaların simülasyon sonuçlarının güvenilir bir biçimde kullanılabileceği, ancak ilgili yöntemin is emisyonlarının belirlenmesinde kullanılabilmesi için daha doğru sonuçlar veren is modellerinin termodinamik model içerisinde entegre edilmesi gerektiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

-
- [1] OPEC, (2010). World Oil Outlook, Vienna.
 - [2] IEA, (2003). Energy to 2050-Scenarios for a sustainable future., Paris.
 - [3] IEA, (2010). CO2 Emissions from fuel combustions, Paris.
 - [4] European Comission,Transport & Environment, <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm>, 5 Aralık 2012
 - [5] 70/220/EEC (1970), Hafif Taşıtlar için Emisyon Standartları Direktifi, Avrupa Birliği, Brüksel.
 - [6] 88/77/EEC (1988), Ağır Taşıtlar için Emisyon Standartları Direktifi,Avrupa Birliği, Brüksel.
 - [7] 692/2008, (2008), Avrupa Komisyonu Emisyon Regülasyonları ,Avrupa Birliği, Brüksel.
 - [8] ACEA, (2010). Avrupa Birliği Ekonomik Raporu, Brüksel.
 - [9] TÜİK, (2009). Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri, Ankara.
 - [10] Okude, K. , Mori, K. , Shiino, S. , Yamada, K. ve Matsumoto, Y., (2007). "Effects of Multiple Injections on Diesel Emission and Combustion Characteristics", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2007-2001-4178.
 - [11] Vanegas, A. , Won, H. , Felsch, C. , Gauding, M. ve Peters, N., (2008). "Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injections on Pollutant Formation in a Common-Rail DI Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2008-2001-1191.
 - [12] Zhang, L., (1999). "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 1999-1901-3493.
 - [13] Badami, M. , Mallamo, F. , Millo, F. ve Rossi, E. E., (2002). "Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2002-2001-0503.
 - [14] Carlucci, P. , Ficarella, A. ve Laforgia, D., (2003). "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2003-2001-0700.

- [15] Lee, J. , Jeon, J. , Park, J. ve Bae, C., (2009). "Effect of Multiple Injection Strategies on Emission and Combustion Characteristics in a Single Cylinder Direct-Injection Optical Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2009-2001-1354.
- [16] Shayler, P. J. , Brooks, T. D. , Pugh, G. J. ve Gambrill, R., (2005). "The Influence of Pilot and Split-Main Injection Parameters on Diesel Emissions and Fuel Consumption", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2005-2001-0375.
- [17] Minami, T. , Takeuchi, K. ve Shimazaki, N., (1995). "Reduction of Diesel Engine NOx Using Pilot Injection", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 950611.
- [18] Ishida, M. , Chen, Z.-L. , Luo, G.-F. ve Ueki, H., (1994). "The Effect of Pilot Injection on Combustion in a Turbocharged D. I. Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 941692.
- [19] Goldwine, G. ve Sher, E., (2009). "Experimental investigation of the effect of split injection on diesel engine performance", Int. J. Vehicle Design, 50 (1-4).
- [20] P Carlucci , A Ficarella ve Laforgia, D. (2005). "Effects on combustion and emissions of early and pilot fuel injections in diesel engines ", International Journal of Engine Research, 6(1): 43-60.
- [21] Soruşbay, C. , İmren, A. ve Ergeneman, M., (2007). "Control of NOx emissions from diesel engines by the optimisation of fuel injection strategies", Int. J. Vehicle Design, 45(1-2).
- [22] Chen, S. K., (2000). "Simultaneous Reduction of NOx and Particulate Emissions by Using Multiple Injections in a Small Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2000-2001-3084.
- [23] Hotta, Y. , Inayoshi, M. , Nakakita, K. , Fujiwara, K. ve Sakata, I., (2005). "Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2005-2001-0928.
- [24] Desantes, J. M. , Arrègle, J. , López, J. J. ve García, A., (2007). "A Comprehensive Study of Diesel Combustion and Emissions with Post-injection", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2007-2001-0915.
- [25] Abdullah, N. R. , Mamat, R. , Rounce, P. , Tsolakis, A. , Wyszynski, M. L. ve Xu, H. M., (2009). "Effect of Injection Pressure with Split Injection in a V6 Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2009-2024-0049.
- [26] Hountalas, D. T. , Kouremenos, D. A. , Binder, K. B. , Schwarz, V. ve Mavropoulos, G. C., (2003). "Effect of Injection Pressure on the Performance and Exhaust Emissions of a Heavy Duty DI Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2003-2001-0340.

- [27] Tennison, P. J. ve Reitz, R., "An Experimental Investigation of the Effects of Common-Rail Injection System Parameters on Emissions and Performance in a High-Speed Direct-Injection Diesel Engine", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ASME, 123: 167-174.
- [28] Stiesch, G., 2003, *Modeling Engine Spray and Combustion Processes*, Springer.
- [29] He, Y. ve Rutland, C. J., (2004). "Application of artificial neural networks in engine modelling", *International Journal of Engine Research*, 5(4): 281-296.
- [30] Zhou, H. , Cen, K. ve Fan, J., (2004). "Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks", *Energy*, 29(1): 167-183.
- [31] Karonis, D. , Lois, E. , Zannikos, F. , Alexandridis, A. ve Sarimveis, H., (2003). "A Neural Network Approach for the Correlation of Exhaust Emissions from a Diesel Engine with Diesel Fuel Properties", *Energy & Fuels*, 17(5): 1259-1265.
- [32] Oğuz, H. , Saritas, I. ve Baydan, H. E., (2010). "Prediction of diesel engine performance using biofuels with artificial neural network", *Expert Systems with Applications*, 37(9): 6579-6586.
- [33] University of Wisconsin, KIVA-ERC Code, <http://www.erc.wisc.edu/modeling/kiva.php> ,5 Aralık 2012
- [34] Aceves, S. M. , Flowers, D. L. , Chen, J. Y. ve Babajimopoulos, A., (2006). "Fast Prediction of HCCI Combustion with an Artificial Neural Network Linked to a Fluid Mechanics Code", *Society of Automotive Engineers*, SAE Paper No: 2006-2001-3298.
- [35] Los Alamos National Lab, KIVA3V, <http://www.lanl.gov/orgs/t/t3/codes/kiva.shtml> ,5 Aralık 2012
- [36] Reaction Design, CHEMKIN, <http://www.reactiondesign.com/products/open/chemkin.html> , 5 Aralık 2012
- [37] Canakci, M. , Ozsezen, A. N. , Arcaklioglu, E. ve Erdil, A., (2009). "Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil", *Expert Systems with Applications*, 36(5): 9268-9280.
- [38] Parlak, A. , Islamoglu, Y. , Yasar, H. ve Egrisogut, A., (2006). "Application of artificial neural network to predict specific fuel consumption and exhaust temperature for a Diesel engine", *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9): 824-828.
- [39] Çelik, V. ve Arcaklioğlu, E., (2005). "Performance maps of a diesel engine", *Applied Energy*, 81(3): 247-259.
- [40] Mathworks Company, MATLAB, <http://www.mathworks.com/company/>, 5 Aralık 2012

- [41] Ghobadian, B. , Rahimi, H. , Nikbakht, A. M. , Najafi, G. ve Yusaf, T. F., (2009). "Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network", *Renewable Energy*, 34(4): 976-982.
- [42] M. Ghazikhani ve Mirzaii, I., (2011). "Soot emission prediction of a waste-gated turbo-charged DI diesel engine using artificial neural network", *Neural Computing and Applications*, 10(1): 303-308.
- [43] Kara Togun, N. ve Baysec, S., (2010). "Prediction of torque and specific fuel consumption of a gasoline engine by using artificial neural networks", *Applied Energy*, 87(1): 349-355.
- [44] Yuanwang, D. , Meilin, Z. , Dong, X. ve Xiaobei, C., (2002). "An analysis for effect of cetane number on exhaust emissions from engine with the neural network", *Fuel*, 81(15): 1963-1970.
- [45] Sayin, C. , Ertunc, H. M. , Hosoz, M. , Kilicaslan, I. ve Canakci, M., (2007). "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine using artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, 27(1): 46-54.
- [46] Najafi, G. , Ghobadian, B. , Tavakoli, T. , Buttsworth, D. R. , Yusaf, T. F. ve Faizollahnejad, M., (2009). "Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network", *Applied Energy*, 86(5): 630-639.
- [47] Deh Kiani, M. K. , Ghobadian, B. , Tavakoli, T. , Nikbakht, A. M. ve Najafi, G., (2010). "Application of artificial neural networks for the prediction of performance and exhaust emissions in SI engine using ethanol- gasoline blends", *Energy*, 35(1): 65-69.
- [48] Yusaf, T. F. , Yousif, B. F. ve Elawad, M. M., (2011). "Crude palm oil fuel for diesel-engines: Experimental and ANN simulation approaches", *Energy*, 36(8): 4871-4878.
- [49] Shivakumar , Srinivasa Pai, P. ve Shrinivasa Rao, B. R., (2011). "Artificial Neural Network based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection timings", *Applied Energy*, 88(7): 2344-2354.
- [50] Krijnsen, H. C. , van Leeuwen, J. C. M. , Bakker, R. , Calis, H. P. A. ve van den Bleek, C. M., (2001). "Inferential NO_x Emission Prediction in Feedforward Reductant Control for SCR", *Topics in Catalysis*, 16-17(1): 337-341.
- [51] Mohamed Ismail, H. , Ng, H. K. , Queck, C. W. ve Gan, S., (2012). "Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends", *Applied Energy*, 92(0): 769-777.
- [52] Borman, L. G. ve K., R. W., (1998), *Combustion Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- [53] Yavaşlıoğlu, İ., (1990), *İçten Yanmalı Motorlar*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- [54] Lakshminarayanan, P. A. ve Yoghesh, V. A., (2010), Modelling Diesel Combustion, Springer Munich.
- [55] Heywood, J., (1988), Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co., New York.
- [56] Mollenhauer, K. ve Tschöke, H., (2010), Handbook of Diesel Engine, Springer, Munich.
- [57] Baumgarten, C., (2006), Mixture Formation in Internal Combustion Engines (Heat and Mass Transfer) Springer, Munich.
- [58] Sekmen, Y., Çınar, C., Erduranlı, P. ve Boran, E., (2004). "Dizel Motorlarında Enjeksiyon Basıncı ve Maksimum Yakıt Miktarının Motor Performansı ve Duman Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi", Politeknik Dergisi,, 7(4): 321-326. .
- [59] Haykin, S., (1998), Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall, New Jersey.
- [60] AVI List GmbH, AVL BOOST, <https://www.avl.com/web/ast/boost> ,5 Aralık 2012
- [61] Woschni, G., (1967). "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in Internal Combustion Engines", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 6700931.
- [62] Woschni, G., (1991). "Einfluß von Rußablagerungen auf den Wärmeübergang zwischen Arbeitsgas und Wand im Dieselmotor", Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors, Graz:
- [63] Hohenberg, G., (1980). "Experimentelle erfassung der Wandwärme von kolbenmotoren", Habilitationsschrift-TU Graz:
- [64] Schlick, H., Pirker, G., Chmela, F. ve Wimmer, A., "Weiterentwicklung eines nulldimensionalen Brennratenmodells für direktgezündete Gasmotoren auf Basis der Computertomographie (Improving the predictive capability of a zerodimensional combustion model for open-chamber gas-engines based on tomographic combustion analysis)", Conference, Motorische Verbrennung, 19./20.March 2009, Munich
- [65] Wimmer, A., Pivec, R. ve Sams, T., (2000). "Heat Transfer to the Combustion Chamber and Port Walls of IC Engines – Measurement and Prediction", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2000-2001-0568.
- [66] Chmela, F. ve Orthaber, G., (1999). "Rate of Heat Release Prediction for Direct Injection Diesel Engines Based on Purely Mixing Controlled Combustion", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 1999-1901-0186.
- [67] Chmela, F., Orthaber, G. ve Schuster, W., (1998). "Die Vorausberechnung des Brennverlaufs von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung auf der Basis des Einspritzverlaufs", MTZ, 59 7-8.
- [68] Andree, A. ve Pachernegg, S. J., (1969). "Ignition Conditions in Diesel Engines", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 690253.

- [69] Sitkei, G., (1964), Kraftstoffausbreitung und Verbrennung bei Dieselmotoren, Springer Verlag, Munich.
- [70] Pattas, K. ve Häfner, G., (1973). "Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung", MTZ, 12: 397-404.
- [71] Onorati, A. , Ferrari, G. ve D'Errico, G., (2001). "1D Unsteady Flows with Chemical Reactions in the Exhaust Duct-System of S.I. Engines: Predictions and Experiments", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2001-2001-0939.
- [72] Schubiger R.A. , Boulouchos K. ve Eberle M.K, (2002). "Rußbildung und Oxidation bei der dieselmotorischen Verbrennung", MTZ, 5(342-35):
- [73] Öztemel, E., (2003), Artificial Neural Networks, Papatya Publishing, İstanbul.
- [74] Graupe, D., (1997), Principles Of Artificial Neural Networks, World Scientific Publishing, USA.
- [75] Liptak, B. G., (1995), Expert Systems – Neural Networks, Taylor Francis Group, London.
- [76] Ayvaz, E., (2012), Yapay sinir ağları ve paralele akışlı ısı eşanjörlerinde uygulanması, Yüksek Lisans, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [77] Korkmaz, E., (2011), Yapay sinir ağları ve ranque-hilsch vorteks tüpünde uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [78] Rumelhart, D. E. , Hinton, G. E. ve Williams, R. J., (1986). "Learning representations by back-propagating errors", Nature 323, 323(6088): 533-536.
- [79] Helvacı, Ö., (2007), Artificial Neural Network Applications For Pumps Centrifugal, Master Thesis, Osmangazi University, Eskişehir.
- [80] Hagan, M. T. ve Menhaj, M. B., (1994). "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm", IEEE Transactions on Neural Networks, 5(6): 989-993.
- [81] Beale, H. M. , Hagan, T. M. ve Demuth, H. B., 2010, "Matlab Neural Network Toolbox User Guide," TheMathworks Inc., Massachusetts.
- [82] Sitkei, G., (1973), Heat Transfer and Thermal Loading in Internal Combustion Engines, Akademiai Kiado, Budapest.
- [83] Deniz, O., (2006), İçten yanmalı motorlarda ısı transferi ve ısıl gerilmeler-Ders notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [84] AVL, (2005), AVL 415S Application Notes, Graz-Austria.
- [85] Maiboom, A. , Tazua, X. ve He´ tet, J., (2008). "Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine", Energy, 33: 22-34.

- [86] ATI Vision Engine Calibration Software, <http://www.accuratetechnologies.com/>, 5 Aralık 2012
- [87] Dürnholz, M. , Endres, H. ve Frisse, P., (1994). "Preinjection A Measure to Optimize the Emission Behavior of DI-Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 940674.
- [88] Nehmer, D. A. ve Reitz, R. D., (1994). "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 940668.
- [89] Shundoh, S. , Komori, M. , Tsujimura, K. ve Kobayashi, S., (1992). "NOx Reduction from Diesel Combustion Using Pilot Injection with High Pressure Fuel Injection", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 920461.
- [90] Tanaka, K., (2001). "Study of Homogeneous Charge Compression Ignition using a Rapid Compression Machine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2001-2001-1033.
- [91] Karra, P. ve Kong, S.-C., (2008). "Diesel Emission Characteristics Using High Injection Pressure with Converging Nozzles in a Medium-Duty Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No(1): 2008-2001-1085.
- [92] Hardy, W. L. ve Reitz, R. D., (2006). "An Experimental Investigation of Partially Premixed Combustion Strategies Using Multiple Injections in a Heavy-Duty Diesel Engine", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 2006-2001-0917.
- [93] Özkan, M., (2006). "Taşıt ve Çevre Dersi Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Müh.Bölümü:
- [94] Pierpont, D. A. , Montgomery, D. T. ve Reitz, R. D., (1995). "Reducing Particulate and NOx Using Multiple Injections and EGR in a D.I. Diesel", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No: 950217.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Orkun ÖZENER
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.06.1980 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : oozener@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Mak.Müh/Enerji	YTÜ	2007
Lisans	Mak.Müh/Enerji	YTÜ	2004
Lise	Fen Bilimleri	BEM Koleji	1998

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005-	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2004-2005	Mekanik Oto Servis Hizmetleri	Servis Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. *“Cycle-skipping strategies for pumping loss reduction in spark ignition engines: An experimental approach”* Energy Conversion Management,2012
Levent YÜKSEK, **Orkun ÖZENER**, Tarkan SANDALCI
2. *“Artificial neural networks approach in predicting engine-out emissions and performance parameters of a turbo charged diesel engine”* Thermal Science,2012-12-10
Orkun ÖZENER, Levent YÜKSEK, Muammer ÖZKAN
- 3 *“Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics”* Fuel,2012
Orkun ÖZENER, Levent YÜKSEK, Alp Tekin ERGENÇ, Muammer ÖZKAN
- 4 *“Performance, emission, and heat release analyses of a direct injection diesel engine running on diesel and soybean ester blends”* Turkish Journal Of Engineering & Environmental Sciences,2012
Alp Tekin ERGENÇ, Levent YÜKSEK, **Orkun ÖZENER**
- 5 *“Emission And Performance Investigation Of Rapeseed Methyl Ester And Diesel Fuel”* Machines Technologies Materials , 2012-12-10Alp Tekin ERGENÇ,**Orkun ÖZENER**,Levent YÜKSEK,Onur ACUR
- 6 *“The Effect and Comparison of Biodiesel-Diesel Fuel on Crankcase Oil, Diesel Engine Performance and Emissions”*, FME Transactions
Levent YÜKSEK,Hakan KALELİ,**Orkun ÖZENER**,Berk ÖZOĞUZ

Bildiri

1. *“Artificial Neural Networks Approach in Predicting Engine-Out Emissions and Performance Parameters of a Turbo Charged Diesel Engine”*, International Journal of arts and Science Conference 28 Mart-01 Nisan 2012, -Viyana
Orkun ÖZENER, Levent YÜKSEK, Muammer ÖZKAN
2. *“Effects Of Soybean Biodiesel On A Di Diesel Engine Performance, Emission And Combustion Characteristics”*, 12th International Combustion Symposium, 25 Mayıs 2012-Kocaeli
Orkun ÖZENER, Levent YÜKSEK, Alp Tekin ERGENÇ, Muammer ÖZKAN
3. *“Optimization of Fuel Consumption of a Bus used in City Line with Regulation of*

Driving Characteristics”, International Conference on Aerospace, Mechanical, Automotive and Materials Engineering,30-31 Ocak 2012-Dubai
Muammer ÖZKAN, **Orkun ÖZENER**, İrfan YAVAŞLIOL

4. *“The Effect and Comparison of Biodiesel-Diesel Fuel on Crankcase Oil, Diesel Engine Performance and Emissions”*, Serbiatrib,2009

Levent YÜKSEK,Hakan KALELİ,**Orkun ÖZENER**,Berk ÖZOĞUZ

5. *“An Experimental NO_x Reduction Potential Investigation of the Partial HCCI Application on a High Pressure Fuel Injection Equipped Diesel Engine by Implementing Fumigation of Gasoline Port Injection”*, International Conference on Fuels and Combustion in Engines 1-3 Nisan 2009

Alp Tekin ERGENÇ, Levent YÜKSEK, **Orkun ÖZENER**, Övün IŞIN

6. *“Comparison of Fuel Consumption and Emissions of an Urban Bus Fuelled with Diesel and Biodiesel”*, 3rd International Symposium on Environment,25-28 Mayıs 2012-Atina

Muammer ÖZKAN, **Orkun ÖZENER**, Berk ÖZOĞUZ, Levent YÜKSEK

7. *“Modeling the Effects on Fuel Cost When Farmers Produce Their Own Biodiesel Fuel”*, 3rd International Symposium on Environment,25-28 Mayıs 2012-Atina

Muammer ÖZKAN, Berk ÖZOĞUZ, **Orkun ÖZENER**

Proje

1. *“Modern Diesel Motorlarında Optimum Pilot ve Art Püskürtme Stratejisinin Belirlenmesi”*, 2011

YTÜ 2011-06-01-DOP01,Araştırmacı

2. *“Yakıt olarak motorin kullanılmasına yönelik tasarlanmış Diesel motorda Bio-Diesel kullanılması durumu için optimum EGR stratejisinin belirlenmesi ve EGR stratejisi açısından motorin kullanımıyla aradaki farkların belirlenmesi”*,2009

YTÜ BAPK 26-06-01-04, Araştırmacı