

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

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA GELİŞTİRME TESTLERİNDE KULLANILAN
SİLİNDİR İÇİ BASINÇ SENSÖRLERİNİN DOĞRULUĞUNU KONTROL EDEN
SANAL MOTOR MODELİ OLUŞTURULMASI**

OZAN DOĞUKAN BOZDAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ORKUN ÖZENER**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA GELİŞTİRME TESTLERİNDE KULLANILAN
SİLİNDİR İÇİ BASINÇ SENSÖRLERİNİN DOĞRULUĞUNU KONTROL EDEN
SANAL MOTOR MODELİ OLUŞTURULMASI

Ozan Doğukan BOZDAĞ tarafından hazırlanan tez çalışması 12.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisansım ve tez çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Doğduğum andan itibaren bana en kıymetli varlıkları olduğumu hissettiren, benim için sayılamayacak kadar fedakârlıklar yapan canım annem Sevda DİLEK BOZDAĞ'a ve canım babam Özkan BOZDAĞ'a, doğduğu andan itibaren bana en güzel hisleri yaşatan karşılık beklemeden sevmenin ve fedakârlık yapmanın ne demek olduğunu öğrenmemi sağlayan biricik kardeşim Öykü Defne BOZDAĞ'a hayatımın her anında ve her konuda bana destek oldukları için teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimi yazarken benimle birlikte endişelenen, sevinen ve bana her zaman destek olan hayat arkadaşım Ebru KAYA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca iş yerinde gerekli desteği ve hoşgörüyü fazlasıyla gösteren değerli ekip liderim Didem AYDIN'a, tezi yazmamda ve veri toplamamda destek olan değerli FORD OTOSAN ailesine teşekkürü borç bilirim.

Ve adını yazamadığım ama yanımda olan herkese ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2019

Ozan Doğukan BOZDAĞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.1.1 Enerji İhtiyacı ve Emisyon Standartları.....	1
1.1.2 Dizel Motorları	2
1.1.2.1 Hava Yolu ve Yakıt Yolu	3
1.1.2.2 Dört Zamanlı Çevrim	4
1.1.2.3 Yanma ve Yanmanın Fazları.....	6
1.1.2.4 Püskürtme Basıncı ve Püskürtme Fazları.....	7
1.1.2.5 Silindir İçi Basınç.....	8
1.1.3 Yapay Sinir Ağları.....	8
1.2 Tezin Amacı	17
1.3 Orjinal Katkı	17
BÖLÜM 2	
METOD.....	18
2.1 Deney Motoru, Deney Ölçüm Elemanları, Veri Toplama ve Deney Otomasyon Yazılımları.....	18

2.1.1	Deney Motoru.....	18
2.1.2	Dinamometre.....	19
2.1.3	Yakıt Tüketimi Ölçümü	20
2.1.4	Yakıt Şartlandırıcısı	20
2.1.5	Silindir İçi Basınç Sensörleri ve Analiz Programı	22
2.1.6	Motor Kontrol Ünitesi Kontrolü.....	25
2.1.7	Hava Debisi Ölçümü	26
2.1.8	PUMA Otomasyon Sistemi	27
2.1.9	Test Odası Yerleşimi	27
2.1.10	EDOE Testinin Sonuçlarından Eğitim Veri Setinin Toplanması	28
2.1.11	Haritalama Testinin Sonuçlarından Test Veri Setinin Toplanması.....	30
2.2	YSA Yöntemi İle Silindir İçi Maksimum Basınç Modellemesi	31
2.3	Oluşturulan Modellerin Çevrimdışı Test Edilmesi	34
2.4	Oluşturulan Modellerden Çevrimdışı En İyi Sonucu Veren Modelin Çevrimiçi Gerçek Zamanlı Test Edilmesi	34
BÖLÜM 3		
SONUÇLAR		36
3.1	YSA Modellerinin Eğitim Veri Seti Sonuçları	36
3.2	YSA Modellerinin Çevrimdışı Test Veri Seti Sonuçları.....	37
3.3	En İyi Sonucu Veren YSA Modelinin Çevrimiçi Gerçek Zamanlı Sonuçları	43
3.3.1	Haritalama Testi Sonuçları.....	43
3.3.2	WHTC Testi Sonuçları	47
BÖLÜM 4		
SONUÇ VE ÖNERİLER		57
KAYNAKLAR		59
ÖZGEÇMİŞ		62

SİMGE LİSTESİ

CO	Karbonmonoksit
mg/çev	mg/çevrim
NO _x	Azotoksit
HC	Hidrokarbon
PMAX	Silindir içi maksimum basıncı

KISALTMA LİSTESİ

AÖN	Alt ölü nokta
API	Application Programming Interface
BR	Bayesian Regularization
ÇKA	Çok katmanlı algılayıcı
EDOE	Extended Design of experiment
ECU	Engine control unit (Motor kontrol ünitesi)
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
KMA	Krank mili açısı
LM	Levenberg-Marquardt
MSE	Mean squared error (Ortalama kare hata)
PCV	Pressure control valve (Basınç kontrol valfi)
PM	Partikül madde
PFP	Peak firing pressure (Maksimum yanma basıncı)
RMSE	Root mean squared error (Kök ortalama kare hata)
ÜÖN	Üst ölü nokta
ÜÖNÖ	Üst ölü noktadan önce
ÜÖNS	Üst ölü noktadan sonra
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
VCV	Volume control valve (Hacim kontrol valfi)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Dizel motoru yakıt yolu	3
Şekil 1.2 Dizel motoru hava yolu	4
Şekil 1.3 Dizel motoru dört zamanlı çevrimi teorik basınç-hacim diyagramı [4]	5
Şekil 1.4 °KMA başına ısı açığa çıkışının değişimi [3]	7
Şekil 1.5 YSA'nın genel yapısı [12]	9
Şekil 1.6 YSA'nın detaylı gösterimi [3]	10
Şekil 2.1 Deney motorunun tam yükteki güç ve moment eğrileri	19
Şekil 2.2 Motor deneylerinde kullanılmış olan AVL APA 204/8 model dinamometre	19
Şekil 2.3 Deneylerde kullanılmış olan AVL 735S ve AVL 753C kombinasyonu	21
Şekil 2.4 AVL GU22C silindir içi basınç sensörü resmi	23
Şekil 2.5 Kızdırma bujisi yuvası için silindir içi basınç sensörü adaptörü resmi	23
Şekil 2.6 AVL Indiset 620 cihazı	24
Şekil 2.7 AVL INDICOM programı kullanıcı arayüzü	25
Şekil 2.8 ATI Vision programı kullanıcı arayüzü [27]	25
Şekil 2.9 ABB Sensy Flow cihazı	26
Şekil 2.10 AVL Puma Open programı kullanıcı arayüzü	27
Şekil 2.11 Test odası şeması [26]	28
Şekil 2.12 MATLAB YSA başlatma menüsü	31
Şekil 2.13 "nftool" kullanıcı arayüzü	32
Şekil 2.14 Modelin çevrimiçi çalışma şematifi	34
Şekil 2.15 WHTC test çevrimi [33]	35
Şekil 3.1 Girdi seti 1 sensör-model çıktı farkı	38
Şekil 3.2 Girdi seti 2 sensör-model çıktı farkı	38
Şekil 3.3 Girdi seti 3 sensör-model çıktı farkı	39
Şekil 3.4 Girdi seti 4 sensör-model çıktı farkı	39
Şekil 3.5 Girdi setleri 3, 5 ve 6 sensör-model çıktı farkı	41
Şekil 3.6 En iyi sonucu veren YSA modeli şeması	42
Şekil 3.7 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı	43
Şekil 3.8 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör hata oranı	44
Şekil 3.9 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör regresyon grafiği	45
Şekil 3.10 WHTC testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı (düzeltilmemiş)	47
Şekil 3.11 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 1. grafik	48
Şekil 3.12 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 2. Grafik	48
Şekil 3.13 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 3. grafik	49
Şekil 3.14 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 4. Grafik	49

Şekil 3.15 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 5. grafik.....	50
Şekil 3.16 WHTC testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı (düzeltilmiş)	51
Şekil 3.17 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör regresyon grafiği...	52
Şekil 3.18 WHTC testi “Bölge 1” (25...60 bar) sensör-model çıktı farkı.....	53
Şekil 3.19 WHTC testi “Bölge 2” (61...95 bar) sensör-model çıktı farkı.....	54
Şekil 3.20 WHTC testi “Bölge 3” (96...120 bar) sensör-model çıktı farkı.....	54
Şekil 3.21 WHTC testi “Bölge 4” (121...140 bar) sensör-model çıktı farkı.....	55
Şekil 3.22 WHTC testi “Bölge 5” (141...155 bar) sensör-model çıktı farkı.....	55
Şekil 3.23 WHTC testi P _{MAX} değerlerinin bölgelere göre dağılımı.....	56

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Hafif yolcu araçları Euro emisyon standartları gelişimi [3]	2
Çizelge 2.1 Deney motorunun teknik özellikleri.....	18
Çizelge 2.2 AVL APA 204/8 dinamometresi teknik özellikleri	20
Çizelge 2.3 AVL 735S yakıt tüketimi ölçüm cihazı teknik özellikleri	20
Çizelge 2.4 AVL 753C yakıt şartlandırıcısı cihazı teknik özellikleri	21
Çizelge 2.5 AVL GU22C silindir içi basınç sensörü teknik özellikleri	22
Çizelge 2.6 AVL Indiset 620 sistem özellikleri.....	24
Çizelge 2.7 ABB Sensy Flow teknik özellikleri.....	26
Çizelge 2.8 EDOE testi motor parametreleri aralığı.....	29
Çizelge 2.9 Motor haritalama testi motor parametreleri aralığı.....	30
Çizelge 2.10 YSA modellerinin girdi setleri	33
Çizelge 3.1 Eğitim veri seti RMSE (bar) değerleri	36
Çizelge 3.2 Test veri seti RMSE (bar) değerleri.....	37
Çizelge 3.3 Yeni eğitilen modellerin girdileri.....	40
Çizelge 3.4 Girdi setleri 3, 5 ve 6 RMSE değerleri.....	40
Çizelge 3.5 Çevrimiçi çalışan YSA modeli ile motor haritalama testi aralığı	46
Çizelge 3.6 WHTC testi PMAX bölgeleri	53

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA GELİŞTİRME TESTLERİNDE KULLANILAN
SİLİNDİR İÇİ BASINÇ SENSÖRLERİNİN DOĞRULUĞUNU KONTROL EDEN
SANAL MOTOR MODELİ OLUŞTURULMASI**

Ozan Doğukan BOZDAĞ

Makine Mühendisliği Otomotiv Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Orkun ÖZENER

İçten yanmalı motorların ürettiği zararlı egzoz gazların yasal sınırları gün geçtikçe daralmaktadır. Emisyon standartları denilen bu sınırlamaları sağlamak amacıyla motor üreticileri motor geliştirme çalışmalarının yanında motor geliştirme testleri yapmaktadırlar. Motor geliştirme testleri sırasında, motorun mekanik dayanımlarından birisi olan silindir içi yanmadan kaynaklı silindir içi maksimum basınç (P_{MAX}) değeri sürekli takip edilmeli ve sınırlar içerisinde kalınmalıdır. P_{MAX} değerleri, maliyetleri yüksek olan silindir içi basınç sensörleri ile takip edilmektedir. Sensörlere ek olarak anfi, bilgisayar gibi fazladan cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan sensörlerin silindir içine temas etmesi gerektiği için kızdırma bujileri sökülerek yerlerine silindir içi basınç sensörleri bir adaptör vasıtasıyla takılmaktadır. Sensör silindir içindeki yanmadan ötürü yüksek sıcaklık ve yüksek basınca maruz kalmakta ve bu sebeple zaman içerisinde sensör hassasiyeti ve ölçüm değerlerinde kaymalar meydana gelmektedir. Ölçüm değerlerinde kaymaların veya tutarsızlıkların meydana geldiği gözlemlendiğinde sensörlerin kalibre edilmesi gerekir. Sensörlerin kalibre edilmesi ise fazladan bir kalibratör cihaz ve referans sensörle sağlanmaktadır. Kızdırma bujilerine ve silindir içi basınç sensörlerine aynı anda ihtiyaç duyulduğu anlarda ise motor kafasına talaşlı işlem ile sensörlerin yerleştirileceği kanallar açılmalıdır. Bu talaşlı işlem yanma odası geometrisini bozduğu gibi aynı zamanda büyük çaba gerektirmektedir.

Gelişen teknoloji ve modelleme teknikleriyle çoğu sensörlerin kullanımı kalkmış veya azalmıştır. Bu tez çalışmasında, motor geliştirme testleri süresince kullanılan maliyetleri

yüksek olan silindir içi basınç sensörleri yerine geçebilecek ve/veya sensörlerin ölçümlemlerindeki kaymaları yakalayabilecek sanal sensör oluşturulabilirliği denenmiştir. Tez çalışmasında çok çeşitli modelleme tekniklerinden, hızlı işlem yapabilme kabiliyetli ve açıklanması güç olaylarda tahminleme yeteneği yüksek olan yapay sinir ağları tekniği seçilmiştir.

Yapay sinir ağları tekniği ile eğitilecek modellerin öncelikle girdileri belirlenmek istenmiş ve 4 farklı girdi seti oluşturulmuştur. İkinci olarak modellerin gizli nöron sayıları belirlenmek istenmiş ve nöron sayıları 2, 3, 4, 5, 10 ve 20 olacak şekilde 4 farklı girdi seti için toplamda 24 adet model eğitilmiştir. Bu 4 farklı girdi setiyle eğitilen 24 adet modelin sonuçları incelendiğinde 2 girdi seti daha oluşturulmuştur. Toplamda 26 adet model eğitilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Motor geliştirme testleri sırasında koşulan Genişletilmiş Deneysel Tasarım - EDOE (Extended Design of Experiments) testinin sonuçlarından elde edilen 2533 farklı çalışma noktasına ait ölçümler ile modeller eğitilmiştir. Eğitilen her bir model tekrardan motor geliştirme testleri sırasında koşulan motor haritalama testinin sonuçlarından elde edilen 196 farklı çalışma noktasına ait ölçümler ile çevrimdışı test edilmiştir. Haritalama testi sonuçlarına göre en iyi sonucu veren model seçilmiştir. En iyi sonucu veren model çevrimiçi gerçek zamanlı olarak motor geliştirme testleri süresince çalıştırılmış ve sonuçları kayıt altına alınmıştır.

Çevrimiçi gerçek zamanlı çalışan model motor haritalama testi süresince çalıştırılmıştır. Model ve sensör ölçümleri arasındaki fark ± 4 bar ve R değeri 0,99681 olarak kaydedilmiştir. Haritalama testinden sonra motorun hızlı manevralar yaptığı Dünya Uyumlaştırılmış Test Çevrimi - WHTC (World Harmonized Transient Cycle) testi süresince çalışan model ve sensör ölçümleri arasındaki fark ± 7 bar ve R değeri 0,9965 olarak kaydedilmiştir. WHTC testi daha detaylı incelendiğinde, ± 4 bar ve üstü farkların olduğu bölgelerin aslında yüksek basınç bölgeleri olmadığı görülmüştür. Motorun silindir içi maksimum basınç dayanımına yakın bölgelerde sensör ve model çıktıları arasındaki farkın ± 4 bar sınırında kaldığı gözlemlenmiştir.

Nihayetinde doğru girdiler, doğru nöron sayısı ve geniş eğitim seti ile eğitilen yapay sinir ağları modelinin sensörlere yakın tahminlemeler yaptığı ve sensörlerden daha hızlı tepki verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, silindir içi maksimum basınç, yapay sinir ağları, modelleme

CREATING VIRTUAL ENGINE MODEL CONFIRMING THE ACCURACY OF IN-CYLINDER PRESSURE SENSORS USED IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE DEVELOPMENT TESTS

Ozan Doğukan BOZDAĞ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Orkun ÖZENER

The legal limits of the harmful exhaust gases produced by internal combustion engines are decreasing day by day. In order to achieve these limitations, engine manufacturers carry out engine development studies as well as engine development tests. During engine development tests, one of the mechanical strength of the engine, the maximum pressure value caused by the internal combustion of the cylinder should be continuously monitored and should be kept within the limits. In-cylinder pressure values are monitored by in-cylinder pressure sensors with high costs. In addition to sensors, additional devices such as amplifiers, computers are needed. On the other hand, since the sensors need to be in contact with the in-cylinder, the glow plugs are removed and the in-cylinder pressure sensors are installed by means of an adapter. The sensor is exposed to high temperature and high pressure due to the combustion in the cylinder and therefore the sensor sensitivity and the measured values are shifted over time. Sensors must be calibrated when observation of drifts or inconsistencies occur. The calibration of the sensors is provided by an extra calibrator device and a reference sensor. In cases where the glow plugs and in-cylinder pressure sensors are needed at the same time, the passages in which the sensors are placed should be opened to the motor head. This machining process disrupts the geometry of the combustion chamber and also requires great effort.

Many sensors have been removed or decreased with improved technology and modeling techniques. In this thesis, it is possible to replace high cost in-cylinder

pressure sensors with virtual sensors and/or can capture drifts in the measurement of the sensors. In this thesis study, capable of fast processing and good predicting in hard to explain processes artificial neural network technique has been chosen from a wide variety of modeling techniques.

Firstly, artificial neural network inputs aimed to determine inputs so 4 different input sets created. Secondly, aimed to determine the number of secret neurons of the models and a total of 24 models were trained for 4 different input sets, with the number of neurons being 2, 3, 4, 5, 10 and 20. When the results of 24 models, which were trained with these 4 different input sets, were examined, 2 more sets of inputs were formed. A total of 26 models were trained and the results were compared.

Models were trained with the measurements of 2533 different working points obtained from the results of the Extended Design of Experiments (EDOE) test conducted during the engine development tests. Each model was tested offline with the measurements of 196 different operating points obtained from the results of the engine mapping test, which was run during the engine development tests. According to the results of the mapping test, the model with the best results was chosen. The best result model was run online in real time during engine development tests and the results were recorded.

The online real-time model was run during the engine mapping test. The difference between model and sensor measurements was ± 4 bar and the value of R was 0,99681. After the mapping test, the difference between the working model and the sensor measurements during the World Harmonized Transient Cycle (WHTC) test, where the engine performed fast maneuvers, was ± 7 bar and the R value was 0.9965. When the WHTC test was examined in more detail, it was observed that the regions where the differences of ± 4 bar and above were not actually high pressure zones. It has been observed that the difference between the sensor and model outputs in the regions near the maximum cylinder resistance of the engine remains at the limits of ± 4 bar.

Finally, it is concluded that the neural network model, which has been trained with the correct inputs, correct number of neurons and the wide training set, makes near estimations and reacts faster than the sensors.

Keywords: Diesel engine, in-cylinder maximum pressure, artificial neural networks, modeling

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

İnsanlığın başlangıcından günümüze en önemli ihtiyaçlardan birisi enerji ihtiyacıdır. İlkel çağlarda doğal kaynakların basitçe kullanılmasıyla karşılanan enerji ihtiyacı, günümüzde teknoloji ve bilimin gelişmesiyle daha karmaşık ve verimli yöntemlerle karşılanmaktadır.

1.1.1 Enerji İhtiyacı ve Emisyon Standartları

Enerji ihtiyacının giderek arttığı ulaşım sektöründe 2020 yılında 58,1 milyon galon/gün petrol kullanılacağı öngörülmektedir [1]. Karayolu ulaşımında kullanılan en yaygın tahrik sistemi, hafifliği ve güvenilirliğiyle içten yanmalı motorlardır. İçten yanmalı motor yakıtın yanması sonucu kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektedir. Yanma olayı sonucunda elde edilen mekanik enerjinin yanı sıra kirletici gazlar da açığa çıkmaktadır. Bu zararlı gazlar canlı yaşamını ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir.

İçten yanmalı motorların kullanımının yaygınlaşması ve kirletici gaz salınımının artmasıyla yerel yönetimler kirletici emisyon sınırlamaları geliştirmişlerdir. Ülkemizin de dahil olduğu karayolu taşıtlarının kirletici emisyon standartları Avrupa Birliği tarafından geliştirilmiş ve zamanla “Euro” standartları olarak anılmaya başlanmıştır. Avrupa Birliği, 91/441/EEC regülasyonu ile ilk defa taşıt kaynaklı kirletici emisyonları sınırlandırmıştır [2].

Çizelge 1.1’de görüldüğü üzere Euro standartları her bir aşamada geliştirilerek kirletici emisyon limitleri azaltılmıştır 59[3]. Elektronik, yazılım, kontrol ve sensör alanlarında gelişen teknoloji ile motorun hava ve yakıt değerleri kalibre edilerek yanma prosesi

kontrol edilmektedir. Motor kalibrasyon çalışmalarıyla ve egzoz sistemleriyle açığa çıkan kirletici gazların, emisyon standartlarınca belirlenen sınırlar içerisinde kalması sağlanmaktadır.

Çizelge 1.1 Hafif yolcu araçları Euro emisyon standartları gelişimi [3]

Araç Tipi	Aşama	Tarih	CO	THC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM
Dizel	Euro 1	1992	3,16	-	-	-	1,13	0,18
	Euro 2	1996	1	-	-	-	0,7	0,08
	Euro 3	2000	0,64	-	-	0,5	0,56	0,05
	Euro 4	2005	0,5	-	-	0,25	0,3	0,025
	Euro 5	2009	0,5	-	-	0,18	0,23	0,005
	Euro 6	2014	0,5	-	-	0,08	0,17	0,005
Benzin	Euro 1	1992	3,16	-	-	-	1,13	-
	Euro 2	1996	2,2	-	-	-	0,5	-
	Euro 3	2000	2,3	0,2	-	0,15	-	-
	Euro 4	2005	1	0,1	-	0,08	-	-
	Euro 5	2009	1	0,1	0,068	0,06	-	0,005
	Euro 6	2014	1	0,1	0,068	0,06	-	0,005
*Emisyon değerleri g/km cinsinden verilmiştir.								

Dizel motor kontrolü, püskürtme sistemleri ve hava kontrolündeki teknolojik gelişmeler ile iyileşen dizel motor, Batı Avrupa bölgesindeki dizel araç tercihini 1990 yılında 12% mertebelerinden 2009 yılında 50% mertebelerine yükseltmiştir [3]. Dizel motor tercihinde görülen bu artış oranı, çevre kirliliğinin kontrolü için emisyon regülasyonlarının daralmasına sebep olmuş ve bu sebeple kalibrasyon çalışmalarının önemini arttırmıştır.

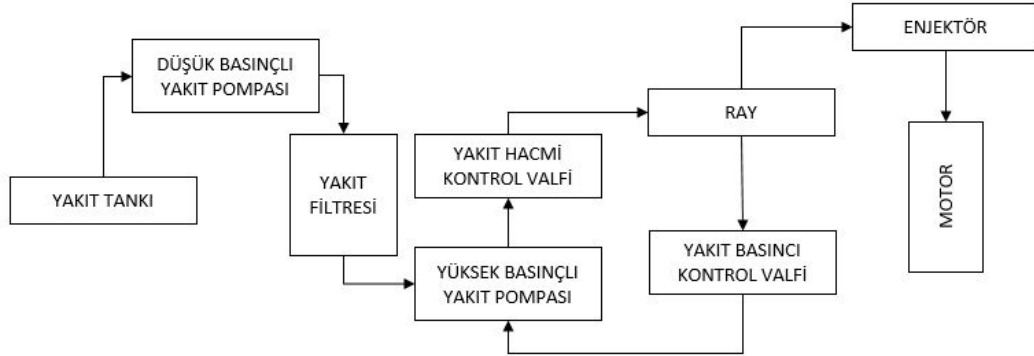
1.1.2 Dizel Motorları

Dizel motorları geçmişten günümüze birçok evrim geçirerek farklı yapılarla karşımıza çıkmaktadır. Çevrim prensiplerine göre iki zamanlı veya dört zamanlı; yakıt püskürtme sistemlerine göre direkt veya indirekt püskürtmeli; şarj sistemine göre superşarj veya turboşarj; egzoz gazı resirkülasyon (EGR) kullanan veya EGR'siz, aşırı doldurma su soğutuculu veya hava soğutuculu gibi çeşitli dizel motoru tipleri bulunmaktadır.

1.1.2.1 Hava Yolu ve Yakıt Yolu

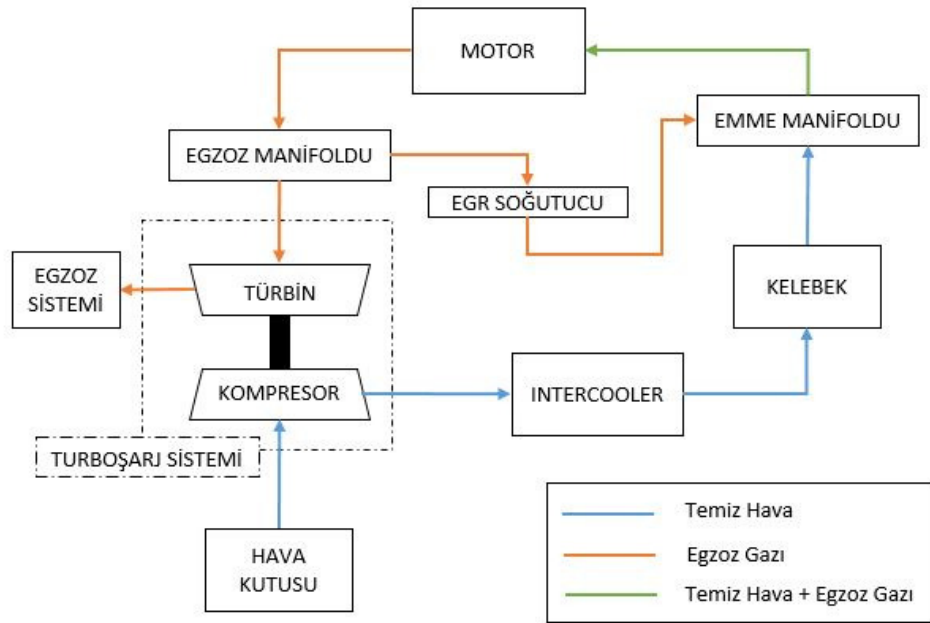
Dizel motorun temel bileşenlerini hava yolu ve yakıt yolu olarak ayırmak, motorun çalışma prensibini irdeleyebilmek adına önem taşımaktadır.

Motorun yakıt yolunda yakıt tankı, düşük basınçlı yakıt pompası, yakıt filtresi, yüksek basınçlı yakıt pompası, yakıt hacmi kontrol valfi (VCV) , yakıt rayı (common-rail), yakıt basıncı kontrol valfi (PCV) ve yakıt enjektörleri bulunmaktadır. Şekil 1.1’de görülebileceği üzere yakıt tankından pompa ile çekilen yakıt, filtrelenerek yüksek basınçlı yakıt pompasına aktarılır. Motor kontrol ünitesi - ECU (Engine Control Unit) tarafından gelen bilgilere göre yakıt hacim kontrol valfi istenen miktarda yakıtın raya gitmesini sağlar. Tekrardan ECU’den gelen bilgilere göre yakıt basıncı kontrol valfi istenen düzeyde ray basıncı oluşmasını sağlar. Ray basıncı oluşuktan sonra ECU enjektörlere püskürtme sinyali göndererek püskürtmenin gerçekleşmesini sağlar.



Şekil 1.1 Dizel motoru yakıt yolu

Motorun hava yolunda ise, hava kutusu, kompresör, intercooler, kelebek, egzoz gazı resirkülasyonu soğutucu, emme manifoldu, egzoz manifoldu ve türbin bulunmaktadır. Egzoz gazının enerjisini yakalayan türbin bir mil vasıtasıyla kompresöre dönme enerjisini aktarır. Kompresör vakum görevi görerek ortamdaki havayı hava filtresinde filtreleyerek intercoolera basınçlandırarak gönderir. Basınçlanmış havaya aşırı doldurma denilmektedir. İdeal gaz denkleminde yola çıkarak basınçlanan havanın ısınacağı bilinmektedir. Kompresör yardımıyla basınçlandırılan hava intercooler da soğutularak hacmi küçültülür. Bu işlemin sebebi ise silindir içine olabildiğince fazla hava almaktır. Soğutulmuş basınçlı hava kelebek vasıtasıyla debi kontrolüne girer ve oradan



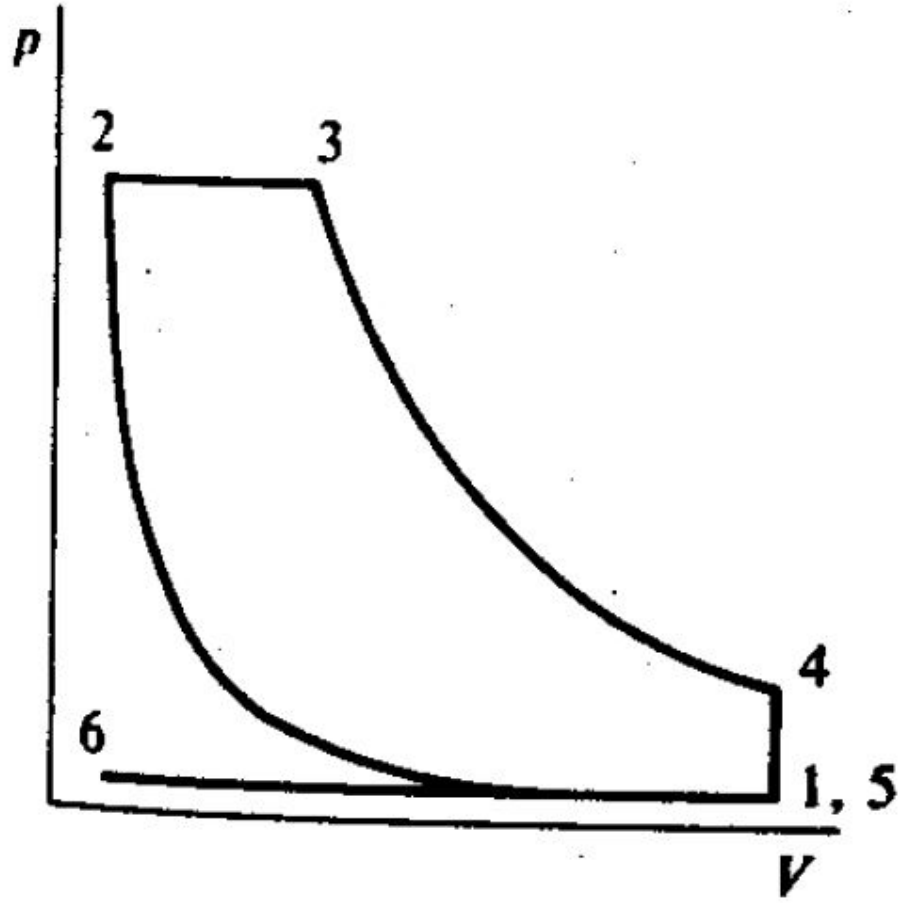
Şekil 1.2 Dizel motoru hava yolu

EGR kullanmak şart değildir. EGR, yanma sonucu çıkan egzoz gazlarının, egzoz manifoldundan EGR soğutucuda soğutulduktan sonra tekrar emme manifolduna gönderilmesidir. EGR'nin amacı egzoz gazlarının yüksek ısı kapasitesini kullanarak silindir içini soğutmak ve temiz hava miktarını düşürerek yanmayı verimsizleştirmektir. Yanma verimi düştükçe, yanma maksimum sıcaklığı ile açığa çıkan NO_x emisyonları miktarı da düşecektir [4].

1.1.2.2 Dört Zamanlı Çevrim

Dört zamanlı içten yanmalı bir dizel motorunun kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye çevirirken takip edeceği zamanlar; emme zamanı, sıkıştırma zamanı, tutuşma ve genişleme zamanı, egzoz zamanıdır. Dört zamanlı bir dizel motoru tam bir çevrimi 720 °KMA'da tamamlar.

Şekil 1.3’de gösterildiği üzere 1 ve 2 noktaları arası sıkıştırma, 2 ve 3 noktaları arası ve 3 ve 4 noktaları arası genişleme, 4 ve 6 noktaları arası egzoz, 6 ve 1 noktaları arası emme olayları gerçekleşir [4].



Şekil 1.3 Dizel motoru dört zamanlı çevrimi teorik basınç-hacim diyagramı [4]

Emme zamanında hava yolunu takip ederek silindir içine ulaşan hava veya hava egzoz karışımı, emme supaplarının açılmasıyla piston AÖN'ya doğru ilerlerken silindire dolar. Emme zamanını takiben sıkıştırma zamanı başlar. Sıkıştırma zamanında silindir içindeki havanın, pistonun ÜÖN'ya doğru hareket etmesiyle hacmi azalır, basıncı ve sıcaklığı artar. Silindir içinde sıkıştırılarak sıcaklığı ve basıncı arttırılan hava dizel yakıtının yanması için uygun ortamı yaratır. Sıkıştırma zamanının sonlarına doğru yakıt yolu vasıtasıyla silindir içine dizel yakıt püskürtülür. Silindir içine püskürtülen dizel yakıtı, ısınmış hava ile tepkimeye girerek tutuşmaya başlar. Sıkıştırma zamanı sonunda tutuşmaya başlayan hava-yakıt karışımı pistonu uyguladığı kuvvetle tutuşma ve yanma zamanını başlatır. Tutuşma ve yanma zamanı, piston AÖN'ya ulaşınca kadar devam eder. Piston biyel kolu vasıtasıyla kuvveti krank miline aktarır ve dönme momenti oluşturur. Krank mili volan vasıtasıyla aktarma organlarına döndürme momenti

uygular. Tutuşma ve yanma zamanı sonunda piston tekrardan ÜÖN'ya hareketine başlar. Piston, ÜÖN'ya ulaşana kadar silindir içerisindeki egzoz gazını egzoz supaplarının açılmasıyla egzoz manifolduna süpürerek egzoz zamanını tamamlar. Dört zamanlı bir motor için çevrim tamamlanmıştır. Devamında emme zamanıyla motor dönüşüne devam edecektir.

1.1.2.3 Yanma ve Yanmanın Fazları

Dizel motorlarında yakıt yolu ve hava yolu, motorun sıkıştırma zamanı sonlarına doğru silindir içinde buluşmaktadır. Silindir içinde bulunan sıkıştırılmış ve ısınmış havanın içerisine yüksek basınçta püskürtülen yakıtın, hava ile karışmış kısmı süratle yanar. Devam eden süreçte, türbülanslı bir biçimde yayılan alev ortamına püskürtülmeye devam eden ve difüze olan yakıtın kendi kendine yanması ile dizel yanması tamamlanır (Şekil 1.4) [3].

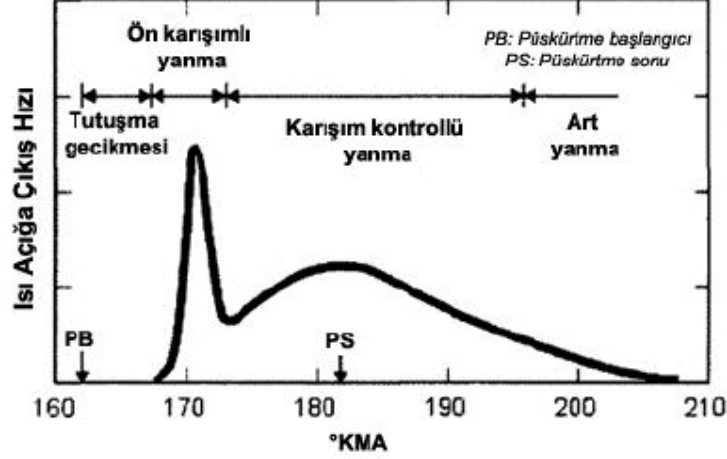
Tutuşma Gecikmesi: Silindir içine yakıt püskürtülmeye başlandığı andan, ilk tutuşma gerçekleşene kadar bir müddet süre geçmektedir bu süreye tutuşma gecikmesi denilir. Yanma olayı ÜÖN'ya ne kadar yakın gerçekleşirse yanmadan elde edilen kuvvet o kadar artacaktır. Tutuşma gecikmesi sebebiyle yakıt tam ÜÖN'da değil daha öncesinde püskürtülmektedir. Motor hızı arttıkça, yakıt püskürtme avansı da tutuşma gecikmesini karşılamak için artacaktır.

Ön Karışımli Yanma: Yakıtın silindir içine püskürtüldükten sonra ki ilk yanma evresidir. Yüksek hızda tutuşma gerçekleşir ve ilk alev bu fazda ortaya çıkar. Bu fazda birim °KMA bazında en yüksek ısı açığa çıkar [3]. Yanma esnasındaki ilk basınç dalgalanması bu fazda olduğundan dizel gürültüsü en çok bu fazda ortaya çıkar [5].

Karışım Kontrollü Yanma: Ön karışımli yanma fazından sonra **karışım kontrollü yanma** süreci başlar. Hali hazırdaki alev yayılımının üzerine yakıt püskürtülmesiyle devam eden bu fazda, hava-yakıt karışım oranı ile yanma kontrol edilir. Maksimum silindir içi sıcaklığına ve maksimum silindir içi basıncına bu fazda ulaşılır [5].

Art Yanma: Genişleme zamanının sonlarına gelindiğinde de silindir içinde çok düşük miktarda ısı salınımı gerçekleşebilmektedir. Karışım kontrollü yanma fazından sonra gerçekleşen bu ısı salınımına **art yanma** denilmektedir. Egzoz zamanına yaklaştıkça art yanma ve ısı salınımı azalır [3].

Yanma prosesleri süresince dizel motorunun silindiri içinde ısı salınımıyla bağlantılı basınç açığa çıkmaktadır [5]. Bu basınç sayesinde pistonlara uygulanan kuvvet ile krank milinin dönmesi ve aracın tahriği sağlanmaktadır.



Şekil 1.4 °KMA başına ısı açığa çıkışının değişimi [3]

1.1.2.4 Püskürtme Basıncı ve Püskürtme Fazları

Günümüz teknolojilerinin gelişmesiyle modern dizel motorlarında kullanılan yakıt sistemleri de gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan ortak ray sistemi ortaya çıkmıştır. Yakıt yolunda belirtildiği üzere yüksek basınç yakıt pompasıyla ve valflerle ray basıncı kontrol edilmektedir. Ray basıncı direkt olarak enjektörlerden püskürtülen yakıt basıncı olarak düşünülebilir. Püskürtme basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla karışım formasyonuna etki eden faktörlerden birisidir [3]. Püskürtme basıncı arttıkça, yakıt damlacıklarının çapı küçüleceği için hava ile daha iyi karışacak ve yanma prosesini iyileştirecektir. İyileşen yanma prosesi sonucunda açığa çıkan silindir içi basınç miktarı da artacaktır [5].

Gelişen yakıt sistemlerinin diğer bir avantajı ise birden fazla püskürtme yapılmasına imkan sağlamalarıdır. Bunlar öncü püskürtme (pilot injection), ana püskürtme (main injection), artçı püskürtme (post injection) olarak tanımlanmaktadır. Öncü püskürtme, ana püskürtmenin daha istikrarlı bir yanma meydana getirmesi için silindir içini hazırlama amacıyla kullanırken; artçı püskürtme egzoz sistemi ihtiyaçları için kullanılmaktadır.

1.1.2.5 Silindir İçi Basınç

Dizel motorlarında giderek artan tork ve performans ihtiyacına karşılık, emisyon limitlerindeki azalma ve yakıt tüketimindeki iyileşme istekleri motor üreticilerine büyük bir yük getirmektedir.

Yanmanın verimiyle doğru orantılı olan tork, performans ve yakıt tüketimindeki iyileşme, silindir içindeki termal ve mekanik yüklerin de artmasına sebep olmaktadır. Genişleme zamanı başlarında, karışım kontrollü yanma fazında silindirin içindeki basınç yanmadan dolayı yükselir. Bu basınç yükselmesi süresince basıncın en yüksek olduğu değere silindir içi maksimum basınç (P_{MAX}) denilmektedir. Motorun sağlıklı çalışmaya devam edebilmesi için gerekli şartlardan birisi de yanma esnasındaki hiçbir basınç değerinin P_{MAX} dayanım sınırını geçmemesidir. P_{MAX} 200 bar'lara kadar ulaşmaktadır (ağır ticari araçlarda daha da üzerine çıkabilir). Motorun P_{MAX} dayanımı yükseldikçe daha verimli bir yanma elde edilebilecek ve motordan alınan tork miktarı da artacaktır [6]. Motor geliştirme testleri sırasında P_{MAX} dayanımına dikkat edilerek motordan alınması hedeflenen tork değeri için hava-yakıt değerleri ayarlanır.

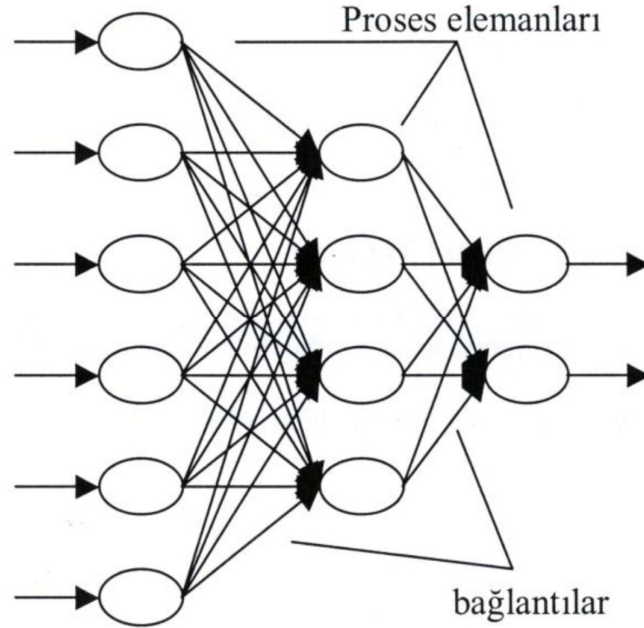
1.1.3 Yapay Sinir Ağları

Otomotiv sektöründe kullanılan çok sayıda modelleme tekniği vardır. Bazıları büyük ve karmaşık algoritmalar kullanmaktadır. Bu modelleme teknikleri hesaplama için genellikle fazla hesaplama zamanına ve işlemci gücüne ihtiyaç duyar. Dizel motorlarda maksimum dönüş hızı (6000 rpm) göz önüne alındığında, 3000 P_{MAX} noktası oluşur ve bu noktaların tümünün önceden tanımlanmış bir doğrulukta hesaplanması gerekir.

Yapay sinir ağları (YSA) yaklaşımı, doğrusal olmayan ve çok boyutlu bir sistemi açıklamak için karmaşık matematiksel denklemler gerektirmeyen yeni ve hızlı bir hesaplama metodudur. Yapay nöron, YSA terminolojisinde, gelişmiş matematik sistemi ile insan beyni arasındaki sinyallerin insan vücudundaki sinapslar aracılığıyla aktarılmasını da içeren benzerlikleri göstermek için kullanılmaktadır [9], [10], [11].

YSA, mevcut verilerle beslenerek gelecekteki durumların sonuçlarını tahmin edebilmektedir. YSA'nın genel yapısı Şekil 1.5'de verilmiştir [12]. Haykin [11] "YSA, deneyimsel bilgileri saklama ve kullanım için uygun hale getirme eğilimi olan birbirine bağlı basit işlem birimlerinden oluşan, büyük ölçüde paralel dağıtılmış bir işlemcidir.

İnsan beynine iki açıdan benzemektedir: Birincisi, bilgi ağ ortamı tarafından bir öğrenme süreci yoluyla edinilir; ikincisi ise sinaptik ağırlıklar olarak bilinen neron kuvvetleri bilgiyi depolamak için kullanılır.” tabirini kullanmaktadır. Ayrıca, Haykin’in kitabında detaylı bir matematiksel YSA modeli bulunmaktadır [11].



Şekil 1.5 YSA'nın genel yapısı [12]

YSA metodunda sinir ağlarını sinir hücreleri oluşturur. Yapay sinir hücreleri mühendislik alanında proses elemanları olarak tanımlanmaktadır ve 5 elemanı bulunur (Şekil 1.6).

Bu elemanlar;

- i) **Girdiler:** Yapay sinir hücrelerine (proses elemanlarına) dışarıdan gelen bilgilerdir. Bu bilgiler ağı öğrenmesi istenen örneklemeler yoluyla seçilir. Yapay sinir hücresine dışarıdan gelen bilgiler dışında diğer hücrelerden veya kendisinden de bilgiler gelebilir [12].
- ii) **Ağırlıklar:** Proses elemanlarına ulaşan bilginin eleman üzerindeki etkisini ve önemini belirtir.
- iii) **Toplama Fonksiyonu:** Bu fonksiyon ile yapay sinir hücresine ulaşan net girdi hesaplanır. Farklı türde fonksiyonlar bulunmaktadır. En yaygın kullanılanı ise ağırlıklı toplam fonksiyonudur. Sinir hücresine ulaşan her girdi kendi ağırlığı ile çarpılarak toplanır. Bu işlem sonucunda ağa ulaşan net girdi hesaplanır.

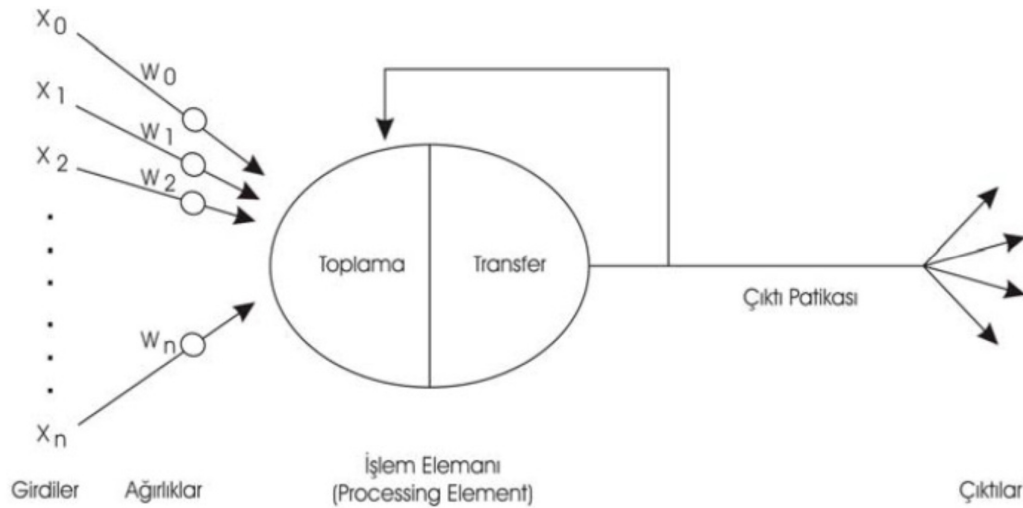
Toplama fonksiyonu aşağıdaki gibi formülize edilmektedir. (1.1) Formülünde n bir hücreye gelen toplam girdi sayısını, G girdileri ve A ise ağırlıkları göstermektedir. Bir YSA'da tüm sinir hücrelerinin aynı toplama fonksiyonuyla çalışmaları gerekmez. Her bir sinir hücresi bağımsız olarak farklı toplama fonksiyonuna sahip olabilirler. Ağın bazı sinir hücreleri grup olarak aynı toplama fonksiyonuna da sahip olabilir [12].

$$NET = \sum_i^n G_i A_i \quad (1.1)$$

- iv) **Aktivasyon Fonksiyonu:** Sinir hücresine gelen net girdi ile işlem yaparak hücrenin ürettiği çıktıyı hesaplar. Aynı toplama fonksiyonunda olduğu gibi farklı formüller ile çıktı hesaplanabilir. En yaygın kullanılan Çok Katmanlı Algılayıcı modelinde olduğu gibi aktivasyon fonksiyonu genel olarak türevi alınabilir bir sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır (1.2).

$$F(NET) = \frac{1}{1+e^{-NET}} \quad (1.2)$$

- v) **Hücrenin Çıktısı:** Aktivasyon fonksiyonu ile hesaplanan çıktı değeridir. Bu çıktı başka bir hücreye veya dışarıya gönderilir. Hücre bu çıktıyı kendisine girdi olarak gönderebilir. Bu değer birden fazla sinir hücresine girdi olarak gidebilir [12].



Şekil 1.6 YSA'nın detaylı gösterimi [3]

Bir YSA modeli temelde 3 katmandan meydana gelir. Bu katmanlar;

- i) **Girdi Katmanı:** Bu katmanda sinir hücreleri dışarıdan gelen bilgileri alır ve ara katmanlara iletir.
- ii) **Ara Katmanlar:** Girdi katmanından iletilen bilgiler bu katmanda işlenir ve çıktı katmanına iletilir. Bir ağda birden fazla ara katman olabilir.
- iii) **Çıktı Katmanı:** Bu katmanda ise ara katmandan gönderilen bilgiler işlenerek çıktı üretilir.

YSA'nın genel çalışma prensibi girdileri çıktılarına çevirmektir. Bu işlemin ağ tarafından yapılabilmesi için eğitilmesi gerekir. Eğitim setleri ağa verilir ve ağ bu setleri kullanarak daha önce de bahsedilen ağırlıkları belirleyerek öğrenme işlemi yapar. Eğitim süresince ağın en iyi sonucu vermesi için ağırlıklar sürekli değiştirilir.

YSA'da çeşitli ağ yapıları ve öğrenme algoritmaları bulunmaktadır. Bu ağ yapılarından en sık kullanılanı ve içten yanmalı motorlarda yanma prosesi, emisyon ve performans değerlerinin belirlenmesinde yoğun bir şekilde kullanılan Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) tipi YSA'dır [3].

ÇKA'ların çalışma adımları;

- i) **Örneklerin toplanması:** Ağın eğitilmesi için önceden gerçekleştirmiş örneklerin toplanmasıdır. Ağ eğitildikten sonra test edilmesi için test setinin toplanması gerekmektedir. Buradaki önemli bir husus olarak test seti, ağın eğitimi sırasında kullanılmamaktadır. Böylece ağın eğitim seti ile eğitildikten sonra test seti ile performansı ölçülebilir.
- ii) **Ağın topolojik yapısının belirlenmesi:** Ağa ait kaç adet girdi, kaç adet ara katman, her ara katmanda kaç adet sinir hücresi ve kaç adet çıktı hücresi olması gerektiği belirlenir.
- iii) **Öğrenme parametrelerinin belirlenmesi:** Sinir hücrelerinin toplanma ve aktivasyon fonksiyonları, öğrenme katsayısı ve momentum katsayısı gibi değerler belirlenir.
- iv) **Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması:** Sinir hücreleri arasındaki bağın ağırlık değerlerinin ve eşik değer ünitesinin ağırlıklarının ilk değerleri seçilir. Bu seçim genellikle rasgeledir. Ağ eğitimi sırasında bu değerler değişir ve ağın

doğru sonuç vermesi için en uygun değerler haline gelir.

- v) **Öğrenme setinden örneklerin seçilmesi ve ağa tanıtılması:** Girdi ve çıktı değerlerinin ağa tanıtılmasıdır.
- vi) **Gerçekleşen çıktının beklenen çıktı ile karşılaştırılması:** Ağın çıktısının gerçekleşen değere göre hata miktarı hesaplanır.
- vii) **Ağırlıkların değiştirilmesi:** Geri hesaplama metoduyla hatanın azaltılması için ağırlıkların değiştirilmesidir.

V, vi ve vii adımları YSA en iyi sonuca ulaşana kadar tekrarlanabilir.

ÇKA yapay sinir ağının eğitilmesinde de aynı sinir sisteminde olduğu gibi dışarıdan gelen bilgiler toplanarak aktivasyon fonksiyonuna gönderilir. Bu fonksiyona gelen bilgiler ile tepki üretilir ve ağa çıktı olarak gönderilir. Sistemden çıktı olarak gelen değer ile beklenen değer arasındaki fark hata olarak kabul edilir. Hata değerinin minimum olması için yani ağın daha doğru sonuçlar vermesi için, ağa giren ve sonucu etkileyen verilerin ağırlıkları değiştirilir. Her bir öğrenme aşamasında (iterasyonda) ağırlıklar yenilenerek hata değeri minimuma indirilmeye çalışılır. Ağın çıktısı ile beklenen değer kabul edilebilir bir hata değerinde ise ağırlıklar saklanır. Bu kabul edilebilir hata değeri genellikle kullanıcı tarafından belirlenir. Bu aralığa ulaştığında ağ öğrenmeyi durdurur ve uygulamalarda kullanmak için uygun hale gelir.

Ağın çıktısının hesaplandığı aşamada eğitim setindeki bir bilginin, girdi katmanından ağa gösterilmesi ile öğrenme başlar. Girdi katmanına gelen bilgi işlenmeden bir sonraki hücrelere gönderilir. Girdi katmanındaki tüm sinir hücrelerinden gelen veriler ağırlıklarıyla işlenerek ara katmandaki sinir hücrelerine gelir. İlk olarak net girdi şu şekilde hesaplanır.

$$NET_j^a = \sum_{k=1}^n A_{kj} C_k^i \quad (1.3)$$

Burada A_{kj} k. girdi hücrelerini, j. ara katman hücrelerine bağlayan bağlantının ağırlık değeridir. Bu net girdinin aktivasyon fonksiyonunun sigmoid fonksiyonundan geçirilmesiyle J. ara katman elemanının çıktısı hesaplanır. Sigmoid fonksiyonunun kullanılması ile çıktı aşağıdaki gibidir.

$$C_j^a = \frac{1}{1 + e^{-(NET_j^a + \beta_j^a)}} \quad (1.4)$$

β_j ara katmandaki J. hücreye bağlanan eşik değer hücresinin ağırlığını göstermektedir. Buradaki eşik değer ünitesinin çıktısı sabit olup değeri 1'dir. Ağırlık değeri ise sadece sigmoid fonksiyonunun yönelimini belirlemek üzere bulunmaktadır. Ağırlık eğitimi sırasında bu değer ağı tarafından belirlenmektedir.

Ağırlıklar belirlendikten sonra geriye doğru hesaplama yöntemiyle ağırlıklar üzerinde değiştirmeler uygulanır. Her bir iterasyon ile gerçekleşen ve tahmin edilen arasındaki hata miktarı düşürülmeye çalışılır. ÇKA ağların eğitiminde kullanılabilecek geri beslemeli eğitim algoritmalarından birisi Levenberg-Marquardt (LM) eğitim algoritmasıdır. Bu algoritma numerik optimizasyon tekniklerini kullanmakta ve MATLAB programı içerisinde bulunmaktadır. Öte yandan LM eğitim algoritması ortalama boyuttaki ağlar için en hızlı algoritmadır. LM eğitim algoritması az sayıda iterasyonla sonuca ulaşabildiğinden ötürü sıkça tercih edilir.

Basite indirildiğinde LM algoritması maksimum komşuluk düşüncesi üzerine kurulmuş en az kareler hesaplama yöntemidir. $E(w)$ bir amaç fonksiyonu olarak düşünüldüğünde m adet hata terimi $e_i^2(w)$ için aşağıdaki gibidir.

$$E(w) = \sum_{i=1}^m e_i^2(w) = \|f(w)\|^2 \quad (1.5)$$

Bu eşitlikte $e_i^2(w) = (y_i - y_{di})^2$ kullanılır. y_{di} , i sinir hücresinin istenen çıktısını, y_i değeri ise aynı sinir hücresinin gerçek çıktısını göstermektedir. " $f(\cdot)$ " amaç fonksiyonunun Jacobiyeini " J "nin, w noktasında bilindiği kabul edilir. LM algoritması ile yeni ağırlık vektörü w_{k+1} , bir önceki ağırlık vektörü olan w_k 'dan aşağıdaki hesaplamayla bulunur.

$$w_{k+1} = w_k + \delta w_k \quad (1.6)$$

δw_k değeri aşağıda verilmiştir.

$$\delta w_k = -(J_k^T f(w_k))(J_k^T J_k + \lambda I)^{-1} \quad (1.7)$$

(1.3) de bahsedilen $J_k f$ 'in w_k da türetilmiş Jakobinini, λ özdeşlik parametresini ve λ Marquardt parametresini belirtmektedir.

LM algoritması kullanılırken ilk önce $E(w_k)$ hesaplanır. Sonrasında λ 'ya 0.01 gibi bir değer verilerek hesaplara başlanır. (1.3) δw_k değeri için çözülür ve $E(w_k + \delta w_k)$ hesaplanır. Eğer $E(w_k + \delta w_k)$ değeri $E(w_k)$ değerinden büyük ise λ , 10 katsayısı ile arttırılır ve tekrar (1.3) çözülür. Eğer ki $E(w_k + \delta w_k)$ değeri $E(w_k)$ değerinden küçük ise λ , 10 katsayısı ile azaltılır, bu durumda w_k ve δw_k değerleri güncellenerek (1.3) tekrardan çözülür.

İstenen çıktıyı hesaplamak adına bir ÇKA'nın LM algoritmasıyla eğitilmesi, ağırlık vektörü w_0 a bir başlangıç değerinin verilmesiyle başlar ve hataların karelerinin toplamı olan e_i^2 'nin hesaplanması ile devam eder. Her bir e_i^2 değeri, istenen çıktı (y) ile gerçek çıktı (y_d) arasındaki farkın karesi anlamını taşır. Bütün bilgi seti için e_i^2 hata değerlerinin tamamının bulunmasıyla, ağırlık vektörü LM algoritması uygulanarak adapte edilir [3].

YSA'lar tek başına bir metod olarak kullanılabildiği gibi istenildiği halde diğer modelleme teknikleri ile birlikte kullanıma uygundur. Son on yılda, özellikle mühendislik problemleri için alternatif çözüm sunan bir teknoloji olarak YSA, otomotiv endüstrisinde kabul görmüş ve önem kazanmıştır. Bazı bilimsel çalışmaların gösterdiği gibi YSA, silindir içi basınç, yakıt tüketimi, gaz ve is emisyonu değerlerini tahmin etmek için çok popüler bir modelleme tekniğidir [9], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

Özener vd. [9] YSA tekniğiyle girdileri ve nöron sayıları birbirinden farklı modeller eğitmişlerdir. İlk olarak standart bir girdi paketi hazırlayarak model girdileri olarak motor hızı, ana enjeksiyon avansı, enjeksiyon miktarı, ray basıncı, emme manifoldu hava basıncı, emme manifoldu hava sıcaklığı, hava debisi, egzoz gaz sıcaklığı, soğutma suyu motor giriş sıcaklığı, soğutma suyu motor çıkış sıcaklığı seçmişlerdir. İlk modelin THC tahmini istenilen doğrulukta olmadığı için yeniden YSA modelleri eğitmişlerdir. Bu modellerde ilk modelin girdilerine ek olarak maksimum silindir içi basınç, motor kafa yüzeyi sıcaklığı, turboşarj türbin girişi egzoz sıcaklığı, yağ sıcaklığı ve yağ basıncı eklenmiştir. Ayrıca ikinci seri modellerde nöron sayıları da farklı seçilmiştir. Yeni girdilerle eğitilen modellerdeki sonuçlarda ilk modele göre iyileşme gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda nöron sayılarındaki artış ile tüm modellerin çıktılarında bir iyileşme kaydedilmiş ve girdi sayılarının artmasının THC tahminini iyileştirdiğini gözlemlenmiştir.

Sediako vd. [13] YSA yapısıyla ağır ticari dizel motorunu modellemişlerdir. Bu çalışmada en çok dikkat çeken konu ise YSA yapısındaki bir modelin çok hızlı ve doğru hesap yapabilmesidir. Çalışma sonucunda YSA tekniğiyle oluşturulmuş bir modelin, hızlı çalışan ve benzer hesaplamalar yapan fiziksel modellere göre 300 kat daha hızlı hesap yaptığı gözlemlenmiştir.

He ve Rutland [14], çok katmanlı YSA'da silindir içi basınç, silindir içi sıcaklık, silindir cidarlarından ısı transferi, NO_x emisyonları ve is emisyonlarını tahmin etme üzerine çalıştılar. 7 kontrol parametresi (motor hızı, motor yükü, ana enjeksiyon avansı, ray basıncı, ana enjeksiyon miktarı, emme manifoldu hava basıncı ve EGR miktarı) ile YSA tekniği kullanarak farklı tipte (nöron sayıları ve katman sayıları farklı) modeller eğiterek sonuçları gözlemlenmiştir. Modellerin çıktıları incelendiğinde YSA tekniğinin kabul edilebilir sonuçlar verdiğini kaydetmişlerdir.

Zhou vd. [15] çalışmalarında, büyük boyutlu buhar kazanına ait farklı çalışma koşullarında yeteri kadar veri ile eğitilen YSA modelinin çok hızlı hesap yaparak doğru sonuçlar verdiğini gözlemlenmiştir. Öte yandan genetik algoritma ile birleştirilen bir YSA modelinin NO_x gibi emisyon değerlerini göz önünde bulundurarak optimum çalışma noktalarını bulabileceğine değinmişlerdir.

Bertram ve Kong [16] çalışmalarında, turboşarjlı, 100MPa-240MPa arası ray basıncına sahip direkt enjeksiyonlu dizel motorunda YSA modellemesi yapmışlardır. Çok katmanlı YSA tekniğinde "Bayesian Regularized" eğitim algoritması ile modelin doğruluğunun arttığını gözlemlenmiştir.

Uzun [17] yaptığı çalışmada motor hızı, motor yükü ve krank mili açısını YSA modeli girdisi olarak kullanmış ve sonucunda yakıt tüketimini tahminlemeye çalışmıştır. Model oluşturmak için MATLAB programını kullanmıştır.

Yuanwang vd. [18] yaptıkları çalışmalarında dizel yakıttaki toplam setan sayısı, baz setan sayısı ve setan geliştiricisi, toplam setan sayısı ve azot içeriği girdileriyle bir motordan çıkan egzoz emisyonlarını (hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), partikül madde (PM) ve azotoksit (NO_x)) tahminlemek için çok katmanlı YSA modeli oluşturmuştur. Sonuçları incelediğinde yüksek doğrulukta tahminleme yapabilmek için çok miktarda eğitim verisi gerektiği kanısına varmışlardır.

Çanakçı vd. [19] atmosferik, in-direkt püskürtmeli ve su soğutmalı dizel motorunun farklı yakıtlar ile (biyodizel ve dizel) çalıştırılması durumunda emisyonları ve performansı tahminlemek adına YSA yöntemini kullanmışlardır.

Parlak vd. [20] çalışmalarında tek silindirli Ricardo E6 tipi motor üzerindeki çeşitli yük durumlarında ve farklı motor hızlarında sabit püskürtme avansında deneysel veriler elde etmişlerdir. Bu verileri kullanarak YSA yöntemiyle oluşturdukları model ile özgül yakıt tüketimi ve egzoz sıcaklığını tahmin etmeye çalışmışlardır.

Ganapathy vd. [21] yakıt olarak jatrofa yağı kullanan bir dizel motoru üzerinde yaptıkları testler sonucu topladıkları veriler ile YSA modeli eğitmişlerdir. Bu model ile hidrokarbon (HC), is ve azotoksit (NO_x) tahminlemişlerdir.

Oğuz vd. [22] direkt püskürtmeli dizel motorunda dizel, biyodizel, etanol ile çalıştırılmasında motor torkunu, gücünü ve yakıt tüketimini tahminlemek için YSA metodunu kullanmışlardır.

Lucas vd. [23] çalışmalarında 8 farklı tip yakıt ile 5 farklı çalışma koşullarında dizel motorunu test etmişlerdir. Topladıkları veriler ile YSA modeli kuran araştırmacılar yakıt içeriklerini girdi, motor hızı ve torku çıktı olarak kullanmışlardır.

Boruah vd. [24] YSA tekniğiyle eğittikleri 5 farklı model ile içten yanmalı motorlarda performans çıktılarını tahminlemeye çalışmışlardır. Her modelde ÇKA tipinde tek bir gizli katman ve farklı nöron sayıları kullanmışlardır. YSA modellerinde motor devri, motor yükü, yakıt tüketimi ve hava-yakıt oranı gibi girdiler kullanarak silindir içi efektif basıncı, volumetrik verimi, özgül yakıt tüketimi gibi değerleri tahminlemeye çalışmışlardır. Modeller arası kıyaslama yapabilmek için Root Mean Squared Error (RMSE) gibi istatistiksel yöntemler kullanmışlardır.

Bizon vd. [25] YSA tekniğini kullanarak motor bloğuna monte ettikleri bir ivmeölçeri girdi olarak kullanarak silindiri içi basınç değerlerini tahminlemeye çalışmışlardır. Motorun çalışmasının titreşimini YSA modeline girdi olarak kullanan araştırmacılar pik basınç noktası ile titreşimin en yoğun olduğu noktayı gözlemleyebilmişlerdir. Oluşturulan modeli seçilmiş 6 motor çalışma noktasında test etmişlerdir. Modeli daha sonra çevrimiçi test eden araştırmacılar, ivmeölçer kullanarak 2 farklı motor çalışma noktasında 2 bara kadar tahminleme yapabilmişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Önerilen tez çalışmasının amacı, motor geliştirme testleri süresince silindir içi basınç sensörlerinin yerini bir aşamadan sonra alabilecek sanal sensör oluşturulmasıdır. Bu sanal sensörün işlem hızı ve yetkinliği açısından YSA tekniği kullanılarak oluşturulabilirliği deneysel olarak test edilecektir. Sanal sensör olarak kullanılacak YSA modelinin girdileri ve nöron sayıları tez çalışması sırasında teorik ve deneysel verilerle tayin edilecektir. Modelin daha sonra çevrimiçi gerçek zamanlı şekilde çalışılabilirliğinin mümkünlüğü de tezin amacı içerisinde.

1.3 Orjinal Katkı

Gün geçtikçe daralan emisyon standartlarını karşılamak için motor üreticileri, motor geliştirme çalışmalarının maliyetlerini düşürmek ve verimliliğini arttırmak için mümkün olan en az sayıda sensör kullanma eğilimindedir. Silindir içi basınç sensörleri, yüksek maliyetleri ve kullanım dezavantajları sebebiyle çalışmalara konu olmuşlardır. Silindir içi basınç sensörleriyle ilgili birçok deneysel ve/veya teorik kıymetli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar belirli birkaç motor çalışma noktasında gerçekleştirilmiş ve/veya harici eklenen bir aparattan girdi alınarak gerçek zamanlı çalıştırılmıştır. Fakat motor geliştirme testleri süresince silindir içi basınç sensörlerinin yerini tutabilecek bir sanal sensör kullanılabilmesi için motorun hemen hemen her çalışma koşulunu kapsama ihtiyacı olduğu açıkça görülmektedir. Öte yandan harici bir aparat ihtiyacı olmaması da sanal sensörün tercih edilme sebebi olacaktır. Silindir içi basınç sensörlerinin en önemli çıktılarından birisi olan P_{MAX} değeri YSA tekniğiyle modellenerek sensör ihtiyacı belirli bir aşamadan sonra azaltılabilir ve hatta bu ihtiyaç kaldırılabilir. Sensörlerin okudukları değerlerin kaymaları saptanabilir. Gerektiğinde YSA modelleri ECU'ya gömülerek ve/veya bilgisayar ortamında çalıştırılarak sensör ihtiyacı olmadan P_{MAX} hakkında motor geliştiricilerine fikir verebilir. Tez çalışması sonucunda elde edilecek bilgiler ile motor üreticileri kendi motor geliştirme testlerini daha verimli hale getirebileceklerdir.

BÖLÜM 2

METOD

2.1 Deney Motoru, Deney Ölçüm Elemanları, Veri Toplama ve Deney Otomasyon Yazılımları

Tez çalışmam süresince verilerimi elde ettiğim motor, test ve ölçüm sistemleri bu bölümde anlatılacaktır.

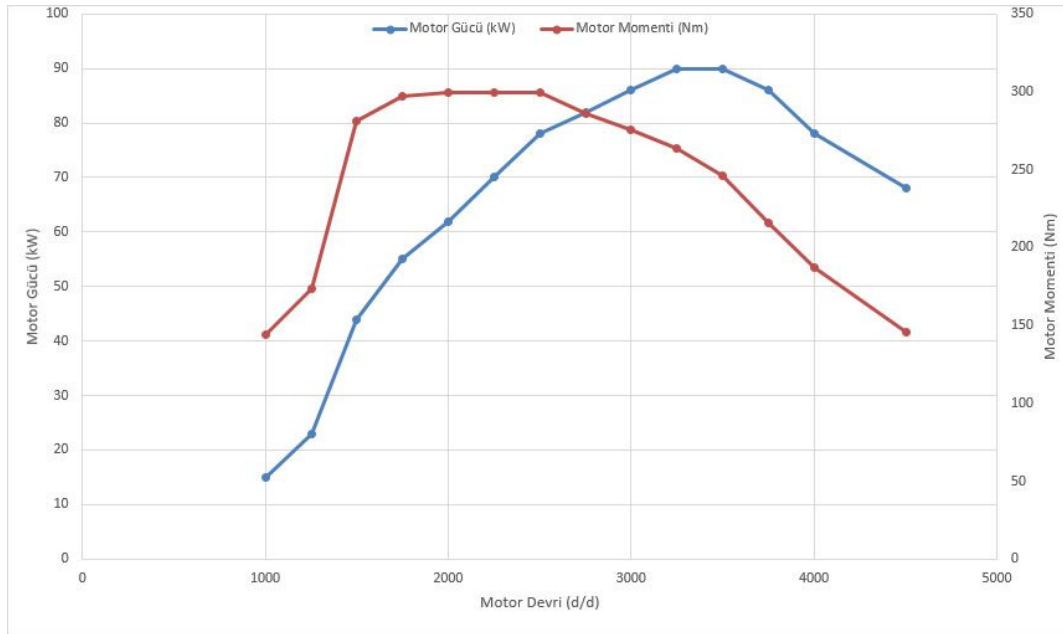
2.1.1 Deney Motoru

Çalışmalar esnasında 4 silindirli, 4 zamanlı, 2 litre silindir hacimli, soğutuculu EGR sistemli, yüksek basınç ortak ray yakıt püskürtme sistemli ve sabit geometrili wastegate turboşarja sahip orta boy ticari dizel motoru kullanılmıştır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Deney motorunun teknik özellikleri

Özellik	Değer
Yakıt tipi	Dizel
Emisyon sınıfı	Euro 6
Silindir hacmi (L)	2.0
Silindir sayısı	4
Silindir çapı (mm)	86
Strok (mm)	86
Sıkıştırma oranı	16:1
Motor gücü (kW)	90 @ 3500 d/d
Maksimum tork (Nm)	290 @ 1700...2500 d/d
Rölanti devri (d/d)	840
Maks. yüksüz devri (d/d)	4800

Yukarıda teknik özellikleri verilen motora ait tam yük eğrisi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Deney motorunun tam yükteki güç ve moment eğrileri

2.1.2 Dinamometre

Motor deneyleri sırasında kullanılan dinamometre AVL DynoExact APA 204/8’dir.

Dinamometrenin resmi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Motor deneylerinde kullanılmış olan AVL APA 204/8 model dinamometre

Dinamometrenin özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 AVL APA 204/8 dinamometresi teknik özellikleri

Özellik	Değer
Tipi	AVL DynoExactAPA
Moment	934 Nm @ 0...4000 d/d
Güç	220 kW @ 4000...9000 d/d
Frenleyici tipi	Asenkron

2.1.3 Yakıt Tüketimi Ölçümü

Motor deneyleri sırasında yakıt tüketimi, Coriolis prensibi ile ölçüm yapan AVL 735S yakıt tüketimi ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Cihazın özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 AVL 735S yakıt tüketimi ölçüm cihazı teknik özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm aralığı	0...125 kg/h
Ölçüm hassasiyeti	0.12 %
Ölçüm tipi	Coriolis / Kütlesel
Çalışma sıcaklığı	5...55 °C
Yakıt besleme basıncı	0,1...0,4 bar
Yakıt besleme sıcaklığı	-10...40 °C

2.1.4 Yakıt Şartlandırıcısı

Motor deneyleri sırasında AVL 753C tipi yakıt şartlandırıcı kullanılmıştır. Bu cihaz ile testler sırasında motora giren yakıt sıcaklığı 35 °C ayarlanmıştır. Yakıt şartlandırıcı cihazın özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir. AVL 735S yakıt tüketimi ölçümü cihazı ile AVL 753C yakıt şartlandırıcı cihazı birlikte kullanılmaktadır. Yakıt tankından gelen yakıt önce AVL 735S cihazında ölçülür, sonrasında AVL 753C cihazında şartlandırılarak motora gönderilir. Cihazların birlikte kullanıldığı örnek resim Şekil 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.4 AVL 753C yakıt şartlandırıcısı cihazı teknik özellikleri

Özellik	Değer
Soğutma kapasitesi	1,6 kW
Isıtma kapasitesi	1,6 kW
Sıcaklık kontrol aralığı	10...80 °C
Sıcaklık stabilizasyonu	0,02 °C
Standart sapma	Maksimum ± 1 °C
Motordan dönüş sıcaklığı	Maksimum 90 °C
Motor besleme sıcaklığı	10...30 °C
Çıkış besleme basıncı	0...6 bar



Şekil 2.3 Deneylerde kullanılmış olan AVL 735S ve AVL 753C kombinasyonu

2.1.5 Silindir İçi Basınç Sensörleri ve Analiz Programı

Silindir içi basınç değerleri, silindir içi basınç sensörleri ile okunmaktadır. Deney motorunda kullanılan AVL GU22C tipi silindir içi basınç sensörünün teknik özellikleri Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5 AVL GU22C silindir içi basınç sensörü teknik özellikleri

Özellik	Değer
Ölçüm aralığı	0...250 bar
Maksimum basınç dayanımı	300 bar
Minimum sensör ömrü	10 ⁸ yüklü çevrim
Sensör tipi	Piezo
Hassasiyet	34 pC/bar (nominal)
Doğal frekansı	100 kHz
Şok dayanımı	2000 g
Çalışma sıcaklığı aralığı	-40...400°C
Termal hassaslık değişimi	20...400°C arasında %1’den küçük 150...350°C arasında ±0,25%
Döngüsel sıcaklık kayması	± 0,4 bar
Montaj çapı	6,3 mm
Ağırlık	12,5 g (kablesiz)
Kablo bağlantısı	M4x0,35 negatif
Sensör boyu	46 mm

AVL GU22C silindir içi basınç sensörünün resmi Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4 AVL GU22C silindir içi basınç sensörü resmi

Bu sensörlerin uç kısımları silindir içinde meydana gelen yanmayla temas halindedir. Motor geliştirme testlerinde silindir içi basınç sensörleri genellikle kızdırma bujileri sökülerek kızdırma bujilerinin yuvasına takılır. Kızdırma bujileriyle benzer geometriye sahip özel adaptörler sayesinde sensörler kolayca yuvaya takılabilir (Şekil 2.5). Böylece silindir içi geometrisi en az bozulacak şekilde basınç değerleri okunabilmektedir. Hem kızdırma bujisi hem silindir içi basınç sensörlerine aynı anda ihtiyaç varsa, silindir içi basınç sensörleri için yanma odasına açılan kanallar, motor kafasına talaşlı işlem ile açılmaktadır.



Şekil 2.5 Kızdırma bujisi yuvası için silindir içi basınç sensörü adaptörü resmi

Silindir içi basınç sensörü tek başına kullanılamamaktadır. Deneyler esnasında piston konumu ile silindir içi basınç verisinin eş zamanlı olarak toplanabilmesi için INDICOM yazılımı ve AVL Indiset 620 Basınç Analiz ve veri toplama sistemi kullanılmıştır. AVL Indiset cihazının özellikleri Çizelge 2.6’de verilmiştir. Bu cihaza ait örnek bir resim de Şekil 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 AVL Indiset 620 sistem özellikleri

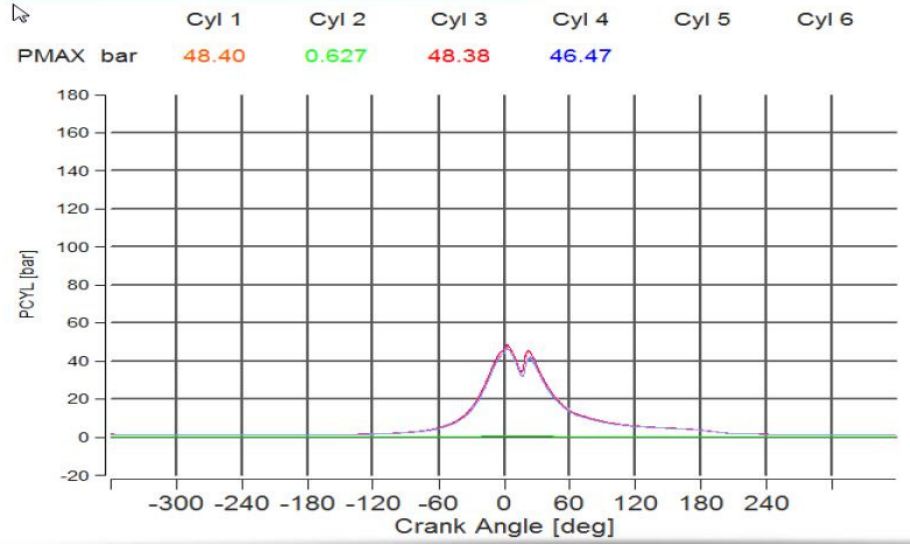
Özellik	Değer
Toplam analog kanal sayısı	8/16
Kanal başına örnekleme oranı	14bit/800kHz (kanal başına)
Çözünürlük	0,025/005/0,2/0,1/1 °KMA
Dahili hafıza	128Mb (8 Kanal için)
Analog giriş	-10...+7 V
Dijital giriş kanalları	2 giriş kanalı/modül
Dijital çıkış kanalları	8 çıkış kanalı/modül
Bekleme girişi	TTL uyumlu giriş soketi
Kontrol girişi	3 giriş Tetik ve CDM sinyali için
Çalışma sıcaklığı	0...50 °C



Şekil 2.6 AVL Indiset 620 cihazı

Indiset cihazından gelen verileri anlamlandıran yazılım AVL INDICOM üzerinden silindir içi basınç eğrisi P_{MAX} değerleri görülmektedir (Şekil 2.7).

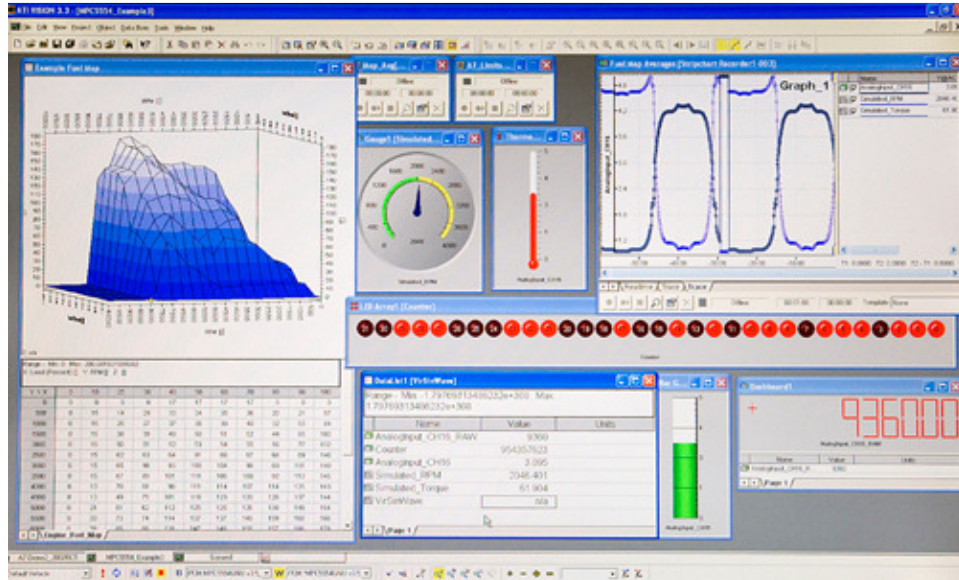
INDICATING MEASUREMENT



Şekil 2.7 AVL INDICOM programı kullanıcı arayüzü

2.1.6 Motor Kontrol Ünitesi Kontrolü

Motor deneyleri esnasında erişime açık motor kontrol ünitesi kullanılmış olup, kalibrasyon parametrelerinin değiştirilmesi ve verilerin okunabilmesi için ATI Vision [27] programı kullanılmıştır. Programa ait kullanıcı ara yüzü Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 ATI Vision programı kullanıcı arayüzü [27]

2.1.7 Hava Debisi Ölçümü

Motor deneyleri esnasında motorun kendi MAF sensörü haricinde hassas ölçüm yapabilen ABB SensyFlow tipi hava akış ölçer cihazı kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 2.7’da örnek resmi ise Şekil 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.7 ABB Sensy Flow teknik özellikleri

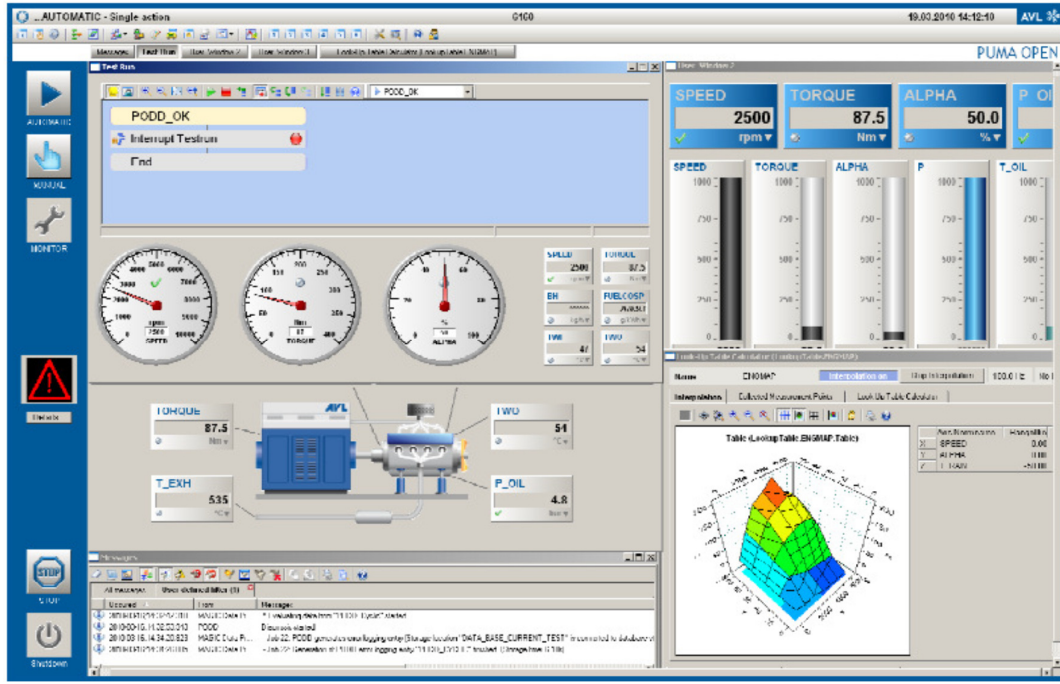
Özellik	Değer
Sensör	Seramik
Ölçüm hatası	$\leq \pm 0,9 \%$
Ortam sıcaklığı etkisi	$<0,05 \%$
Ortam basıncı etkisi	$<0.2 \%/100\text{kPa}$
Tepki zamanı	0,5 s
Çalışma sıcaklık aralığı	-25...150 °C
Ölçüm aralığı	0...2000 kg/saat



Şekil 2.9 ABB Sensy Flow cihazı

2.1.8 PUMA Otomasyon Sistemi

Motor deneyleri sırasında dinamometrenin kontrolü, ölçüm ekipmanları, ölçüm yazılımları ve ECU'dan gelen verileri kaydedilmesi, otomatik test stratejilerini uygulatmak için gerekli olan tüm kontrol ve çalıştırma işlemleri AVL Puma Open 1.5 test otomasyon sistemi ile sağlanmıştır (Şekil 2.10).



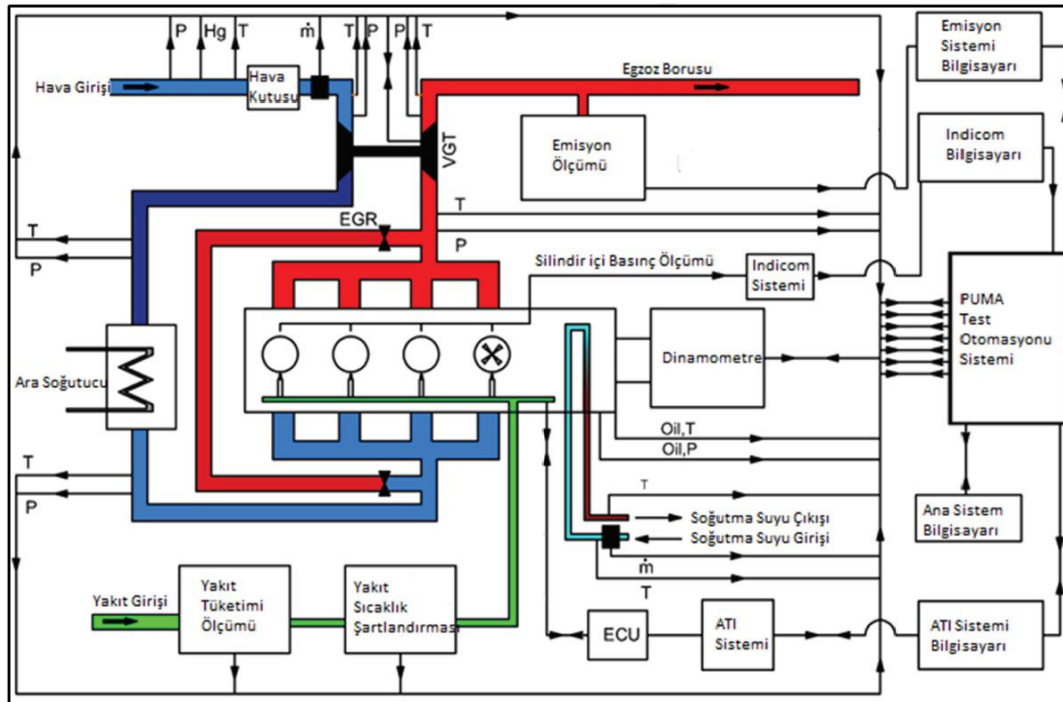
Şekil 2.10 AVL Puma Open programı kullanıcı arayüzü

Bütün yakıt yolu ve enjeksiyon parametreleri değerleri ATI Vision programı vasıtasıyla ECU'dan elde edilmiştir. Hava yoluna ait parametrelerin değerleri ve silindir içi basınç değerleri ise PUMA otomasyon sistemine bağlı olan AVL INDICOM yazılımından ve enstrüman sensörlerden elde edilmiştir.

ECU'ya bağlı ATI Vision programı ile AVL Puma Open programı bilgi alışverişi olmaktadır. Bu veri alışveriş ECU kontrol protokollerinden ASAM ASAP3 ile ASAP3 serveri üzerinden olmaktadır.

2.1.9 Test Odası Yerleşimi

Motor deneylerinin yapıldığı ve verilerin toplandığı test odasına ait yerleşim şeması Şekil 2.11'de verilmiştir.



Deney ekipmanı ve motoruyla koşan EDOE testinden 2533 farklı motor çalışma noktasında ölçüm değerleri toplanmıştır.

Çizelge 2.8 EDOE testi motor parametreleri aralığı

Özellik	Minimum Değer	Maksimum Değer
1. öncü püskürtme miktarı	0 mg/ev	3 mg/ev
1. öncü püskürtme açısı	5* °KMA	67* °KMA
2. öncü püskürtme miktarı	0 mg/ev	2,5 mg/ev
2. öncü püskürtme açısı	5* °KMA	35* °KMA
Ana püskürtme miktarı	0 mg/ev	68 mg/ev
Ana püskürtme açısı	10 °KMA ÜÖNÖ	20 °KMA ÜÖNS
Motor hızı	800 d/d	4800 d/d
Ray basıncı	200 bar	1800 bar
Aşırı doldurma basıncı	-15** mbar	1610** mbar
Aşırı doldurma sıcaklığı	20 °C	60 °C
Temiz hava debisi	29 kg/saat	486 kg/saat
EGR debisi	0 kg/saat	150 kg/saat
Motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı	25 °C	95 °C
PMAX	40 bar	157 bar
*Bu değerler ana püskürtme zamanından ne kadar önce olacağını belirtmektedir.		
**Bu değerler rölatif basınç değerleridir.		

2.1.11 Haritalama Testinin Sonuçlarından Test Veri Setinin Toplanması

Eğitilen YSA modelleri, daha önce hiç görmedikleri veri setiyle test edilmiştir. Test seti olarak kullanılacak bu veri setinin aralığı Çizelge 2.9’da verilmiştir.

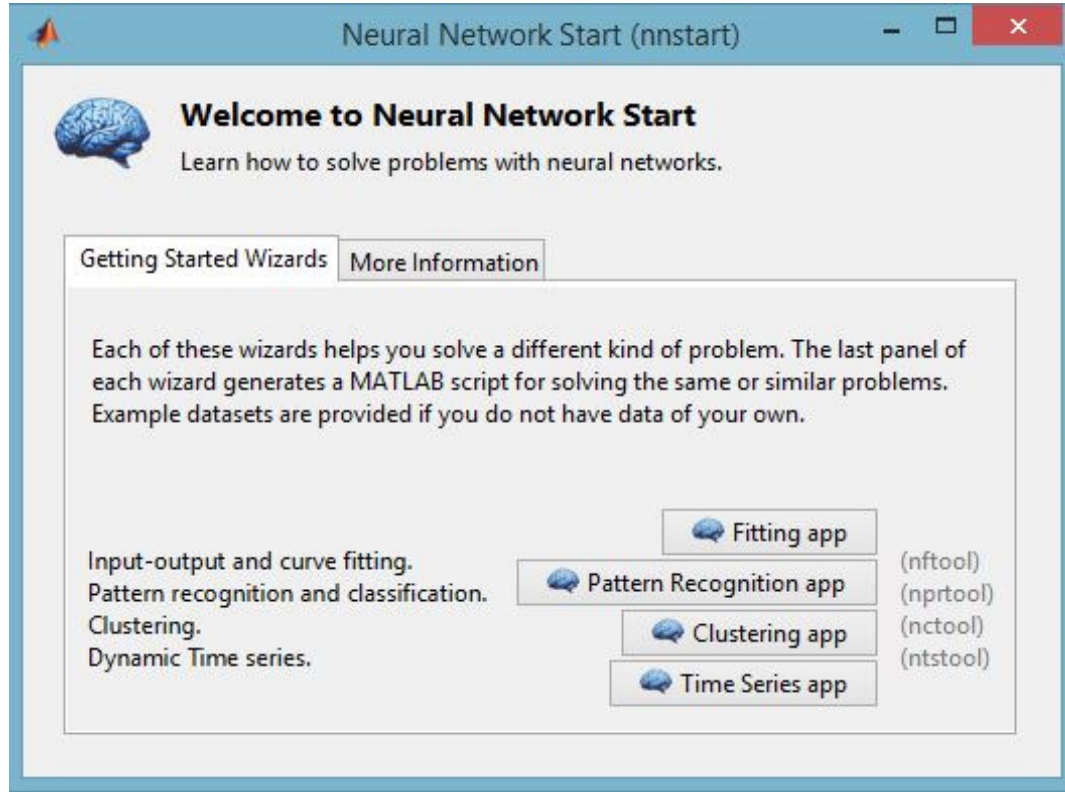
Çizelge 2.9 Motor haritalama testi motor parametreleri aralığı

Özellik	Minimum Değer	Maksimum Değer
1. öncü püskürtme miktarı	1,3 mg/çev	2,1 mg/çev
1. öncü püskürtme açısı	30* °KMA	35* °KMA
2. öncü püskürtme miktarı	0 mg/çev	1,9 mg/çev
2. öncü püskürtme açısı	10* °KMA	30* °KMA
Ana püskürtme miktarı	0 mg/çev	55 mg/çev
Ana püskürtme açısı	2,5 °KMA ÜÖNÖ	6,5 °KMA ÜÖNS
Motor hızı	1000 d/d	4500 d/d
Ray basıncı	450 bar	1700 bar
Aşırı doldurma basıncı	22** mbar	1360** mbar
Aşırı doldurma sıcaklığı	25 °C	42 °C
Temiz hava debisi	41 kg/saat	437 kg/saat
EGR debisi	0 kg/saat	115 kg/saat
Motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı	75 °C	93 °C
PMAX	45 bar	152 bar
*Bu değerler ana püskürtme zamanından ne kadar önce olacağını belirtmektedir.		
**Bu değerler rölatif basınç değerleridir.		

Deney ekipmanı ve motoruyla koşan haritalama testinden 196 farklı motor çalışma noktasında ölçüm değerleri toplanmıştır. Her bir noktadaki veriler EDOE testinde olduğu gibi elde edilmiş ve kontrollerden geirilmıştir. Çizelge 2.8 ve izelge 2.9'den açıkça görüldüğü üzere EDOE testi, haritalama testini kapsamaktadır.

2.2 YSA Yöntemi ile Silindir İçi Maksimum Basınç Modellemesi

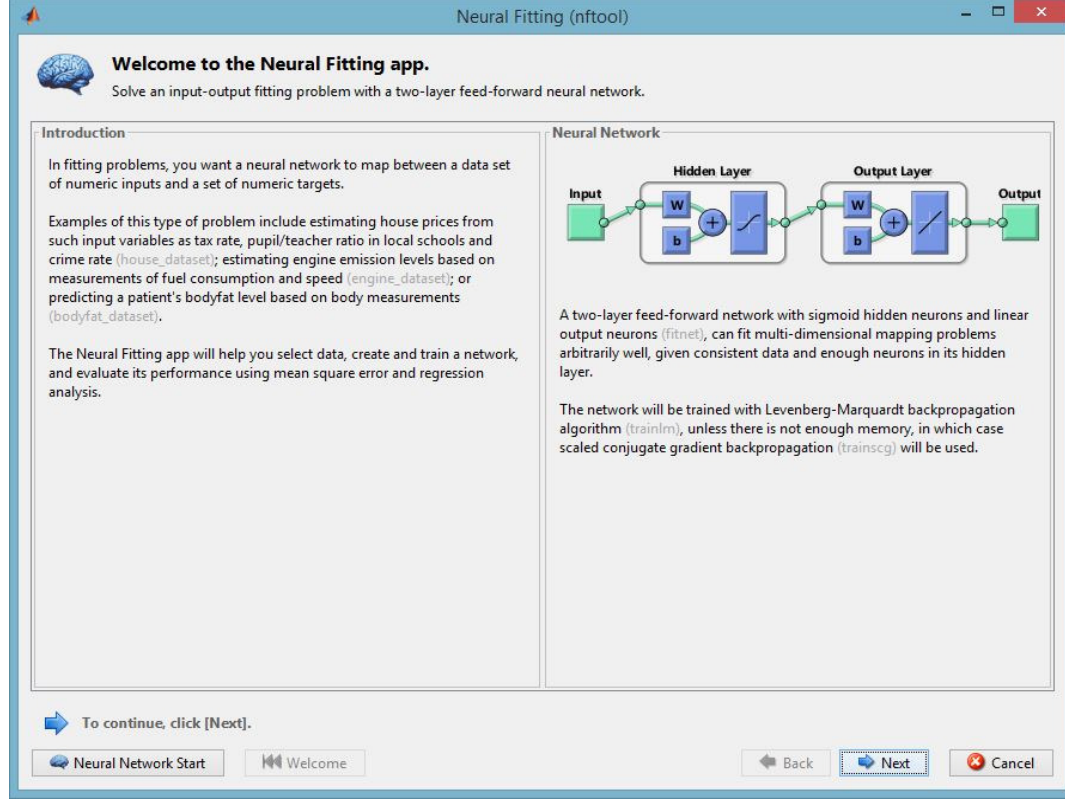
Mühendislik alanlarında en çok kullanılan programlardan birisi olan MATLAB programı, bünyesinde bulundurduğu "Neural Network Toolbox" ile YSA çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. MATLAB R2016b programında "nnstart" komutu ile uygulamaya erişilebilir (şekil 2.12).



şekil 2.12 MATLAB YSA başlatma menüsü

Tez çalışmamda girdi-çıktı ilişkisi olduğu için "Fitting app" (nftool) kullanacağım. "nftool" ile eğitilen YSA çok katmanlı yapıdadır. Nftool içten yanmalı motorlarla ilgili çalışmalar için de oldukça uygun bir uygulamadır [28]. Nftool YSA uygulaması (şekil 2.13) ile yapılabilecekler; girdi ve çıktı veri setlerini seçmek; girdiler veri setinin eğitim, validasyon ve test yüzde oranlarını belirlemek; gizli nöron sayılarını belirlemek; eğitim

algoritmasını belirlemek; eğitilen modelin R ve Mean Squared Error (MSE) vb. değerlerini çizdirmek; aynı veri seti veya farklı bir veri seti ile tekrar eğitmek; farklı bir veri seti ile test etmek; model çıktısını kod satırı veya Simulink modeli olarak dışarı aktarmak; ağı kaydetmek ve daha sonra ağda yukarıdaki işlemleri tekrar yapabilmek.



Şekil 2.13 “nftool” kullanıcı arayüzü

YSA eğitim algoritmaları nftool uygulamasında hazır olarak gelmektedir. ÇKA ileri beslemeli YSA modelleri için eğitim algoritmaları; Levenberg-Marquardt geri beslemeli, Bayesian regularizasyon (BR) geri beslemeli ve ölçekli eşlenik gradyan geri beslemeli.

Levenberg-Marquardt (LM) geri beslemeli eğitim algoritması genellikle daha fazla bellek gerektirirken daha az işlem zamanına ihtiyaç duyar. Validasyon verileriyle hesaplanan MSE değeri arttığında otomatik olarak eğitimi durdurulur [29].

Bayesian regularizasyon geri beslemeli eğitim algoritması ise LM eğitim algoritması ile aynı şekilde çalışır fakat öncesinde girdilere Bayesian Regülerizasyonu uygular. Bu eğitim algoritması iterasyonlar sırasında fazladan işlem yaptığı için LM eğitim algoritmasına göre daha fazla işlem zamanına ihtiyaç duyar. Küçük, gürültülü veya genellemesi zor verilerle çalışılması gerekiyorsa iyi sonuçlar verebilir [30].

Ölçekli eşlenik gradyan geri beslemeli eğitim algoritması [31] da LM eğitim algoritmasına göre daha az bellek ihtiyacı duyar. Validasyon verileriyle hesaplanan MSE değeri arttığında otomatik olarak eğitim durdurulur.

Bayesian regularizasyon geri beslemeli eğitim algoritması diğer eğitim algoritmalarına göre daha iyi sonuç vermektedir [32]. Öte yandan motordan elde edilen verilerin gürültülü olmasından dolayı LM eğitim algoritmasına ek olarak Bayesian regülasyonunun daha iyi tahminleme yapacağı düşünülmektedir. Eğitim ve iterasyonlar sırasındaki fazladan zaman kaybı önemsenmemektedir.

Eğitim veri setinin %60'ı eğitimde, %35'i validasyonda ve %5'i test için kullanılacaktır. Test miktarının düşük oranda seçilme sebebi ise modellerin daha sonradan başka bir veri seti ile test edilecek olmasıdır. Validasyon miktarının yüksek oranda seçilmesinin nedeni ise eğitilen modellerin genelleme kabiliyetini arttırmaktır.

YSA modellerinin girdileri 4 sete ayrılmıştır (Çizelge 2.10). Her bir girdi seti için gizli nöron sayıları sırasıyla 2, 3, 4, 5, 10 ve 20 olmak üzere altışar adet model eğitilmiştir.

Çizelge 2.10 YSA modellerinin girdi setleri

Set No	Modellerde Girdi Olarak Kullanılan Motor Parametreleri
Girdi Seti 1	Motor devri, aşırı doldurma basıncı ve sıcaklığı, temiz hava debisi, ray basıncı ve toplam tüketilen yakıt miktarı
Girdi Seti 2	Set 1'e ek olarak; 1. öncü püskürtme miktarı ve açısı, 2. öncü püskürtme miktarı ve açısı, ana enjeksiyon miktarı ve açısı
Girdi Seti 3	Set 2'ye ek olarak; EGR hava debisi ve motor soğutma suyu sıcaklığı
Girdi Seti 4	Set 3'e ek olarak; egzoz manifoldu egzoz basıncı ve sıcaklığı

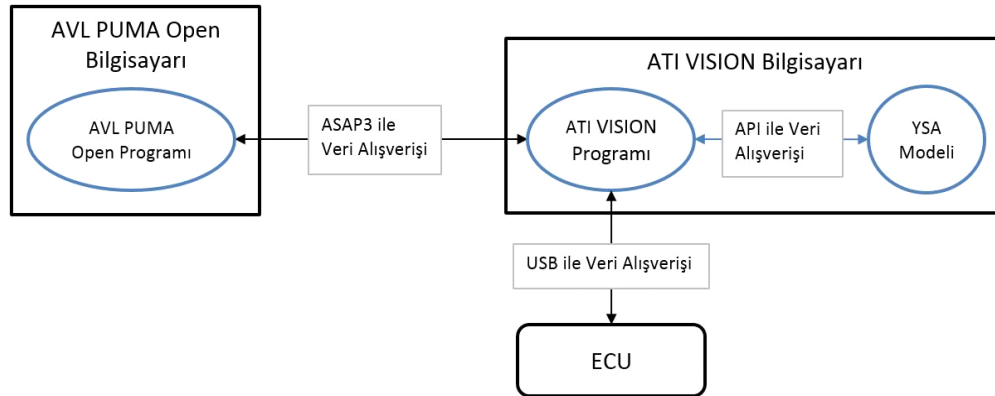
Eğitilen YSA modellerinin eğitim ve çevrimdışı test sonuçlarında kıyaslama ölçeği olarak RMSE seçilmiştir. RMSE, YSA modellerinin de dahil olduğu makine öğrenmesi modellerinin, tahmin edilen değerler ve gerçek değerler arasındaki farkın bulunmasında çok sık kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçen kuadratik bir ölçektir.

2.3 Oluşturulan Modellerin Çevrimdışı Test Edilmesi

EDOE testinin sonuçlarından elde edilen veri setiyle eğitilen YSA modelleri motor haritalama testinden elde edilen veri seti ile çevrimdışı ortamda test edilmiştir. Toplamda 24 adet model eğitilmiş olup her bir model titizlikle MATLAB R2016b programında haritalama testi sonuçlarıyla test edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılmış ve her modelin çıktısı ve sensörlerden elde edilen değerler arasında RMSE değerleri hesaplanmıştır. Modellerin çevrimdışı tahminleme yetenekleri sonuçlar bölümünde verilmiştir.

2.4 Oluşturulan Modellerden Çevrimdışı En İyi Sonucu Veren Modelin Çevrimiçi Gerçek Zamanlı Test Edilmesi

Çevrimdışı ortamda test edilen modellerin tahminleme sonuçlarına göre en iyi sonucu veren model seçilmiştir. Bu model daha sonra çevrimiçi gerçek zamanlı şekilde ECU'dan verilerin okunmasını sağlayan ATI VISION programının kurulu olduğu bilgisayara taşınmıştır. ATI VISION Application Programming Interface (API) uzantısı kullanılarak MATLAB üzerinde çalışacak olan modelin girdileri ECU'dan modele iletilmiş ve modelin çıktısı aynı şekilde API yoluyla ATI VISION programına iletilmiştir. ATI VISION ve PUMA bilgisayarları arasındaki ASAP3 protokolüyle model çıktısı PUMA ortamına taşınmış ve kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda ATI VISION programının kaydedicisi de çalıştırılarak çevrimiçi şekilde yüksek çözünürlükte model çıktısı ve sensör çıktıları kaydedilmiştir. Bütün bu süreçler basite indirgenerek Şekil 2.14'de verilmiştir.

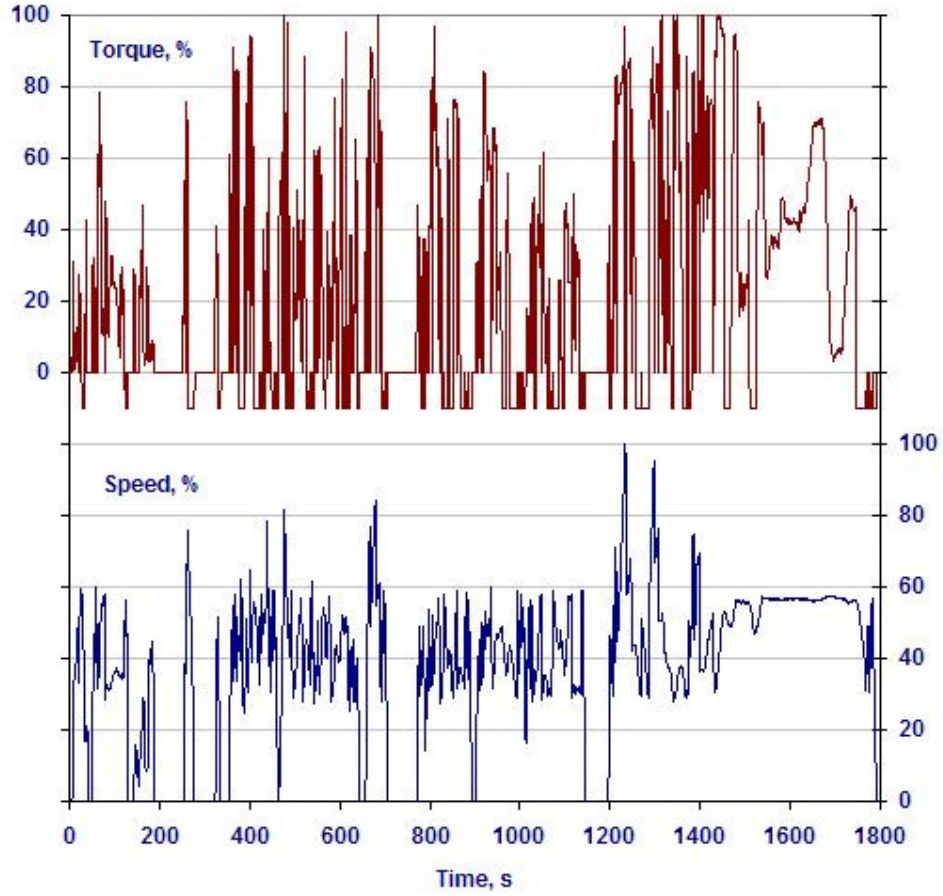


Şekil 2.14 Modelin çevrimiçi çalışma şematiği

YSA modeli, ATI VISION bilgisayarı üzerinde çalıştığı ve ECU'dan alınan verileri işlediği için herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır.

Çevrimiçi gerçek zamanlı olarak çalışan YSA modeli, ilk önce motor haritalama testi koşularak test edilmiştir. Bu testin ölçüm prensipleri daha önce bahsedilen EDOE testi ve çevrimdışı test veri seti olarak kullanılan motor haritalama testi ile aynıdır.

Çevrimiçi gerçek zamanlı olarak çalışan YSA modeli, daha sonra WHTC [33] testi koşularak test edilmiştir (Şekil 2.15) .



Şekil 2.15 WHTC test çevrimi [33]

Motorun hızlı manevralar yaptığı WHTC testinde sensör çıktıları ve model çıktısı 1 Hz çözünürlükte çalışan PUMA kaydedicisine ilave olarak 100 Hz çözünürlükte ATI VISION kaydedicisi ile de kayıt edilmiştir.

BÖLÜM 3

SONUÇLAR

YSA tekniği ile gizli nöron sayıları 2, 3, 4, 5, 10 ve 20 olacak şekilde 4+2 farklı girdi seti oluşturularak toplamda 24+2 adet YSA modeli eğitilmiştir. Modellerin eğitimi sırasında 2533 noktadan oluşan EDOE testi kullanılmıştır. Eğitilen modeller daha önce hiç görmedikleri ve motor haritalama testinin sonuçlarından elde edilen 196 noktadan oluşan veri setiyle çevrimdışı ortamda test edilmiştir. Çevrimdışı ortamda en iyi sonucu veren model çevrimiçi gerçek zamanlı olacak şekilde test odasında çalıştırılmıştır.

3.1 YSA Modellerinin Eğitim Veri Seti Sonuçları

Bu bölümde modellerin eğitim veri seti olarak kullanılan EDOE testi sonuçlarından elde edilen veri seti ile RMSE değerlerine değinilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Eğitim veri seti RMSE (bar) değerleri

YSA modeli	Girdi seti 1	Girdi seti 2	Girdi seti 3	Girdi seti 4
2 gizli nöronlu	16,4	6,42	6,26	5,41
3 gizli nöronlu	16,07	4,97	4,61	4,41
4 gizli nöronlu	15,96	4,65	4,25	3,98
5 gizli nöronlu	15,69	4,34	3,99	3,81
10 gizli nöronlu	15,5	3,66	3,42	3,22
20 gizli nöronlu	15,01	3,08	2,92	2,75

Çizelge 3.1’de görülen RMSE değerleri incelendiğinde en düşük hata ile tahminleyen modelin 20 gizli nöronlu ve girdi seti 4 kullanılmış model olduğu düşünülebilir. Öncelikle bu RMSE değerleri ağız eğitimi için kullanılan veri seti ile ölçülmüş değerlerdir. YSA tekniğinde gizli nöron sayısı ve/veya girdi sayısı arttıkça ağız ezberlemeye başlaması riski vardır. Yani YSA modeli eğitildiği bölgenin içerisinde, ancak hiç görmediği bir girdiyle karşılaştığında daha kötü sonuç verebilir. Bu sebeplerden ötürü YSA modelinin en uygun gizli nöron sayısı ve girdi sayısı ile oluşturulması gerekir.

Bir sonraki bölümde YSA modellerinin daha önce hiç görmedikleri ancak eğitim bölgesi içerisinde olan girdilerle testlerinin sonuçları verilecektir. Modellerin gerçek performans değerlerinin ölçülmesi bu aşamada olacaktır.

3.2 YSA Modellerinin Çevrimdışı Test Veri Seti Sonuçları

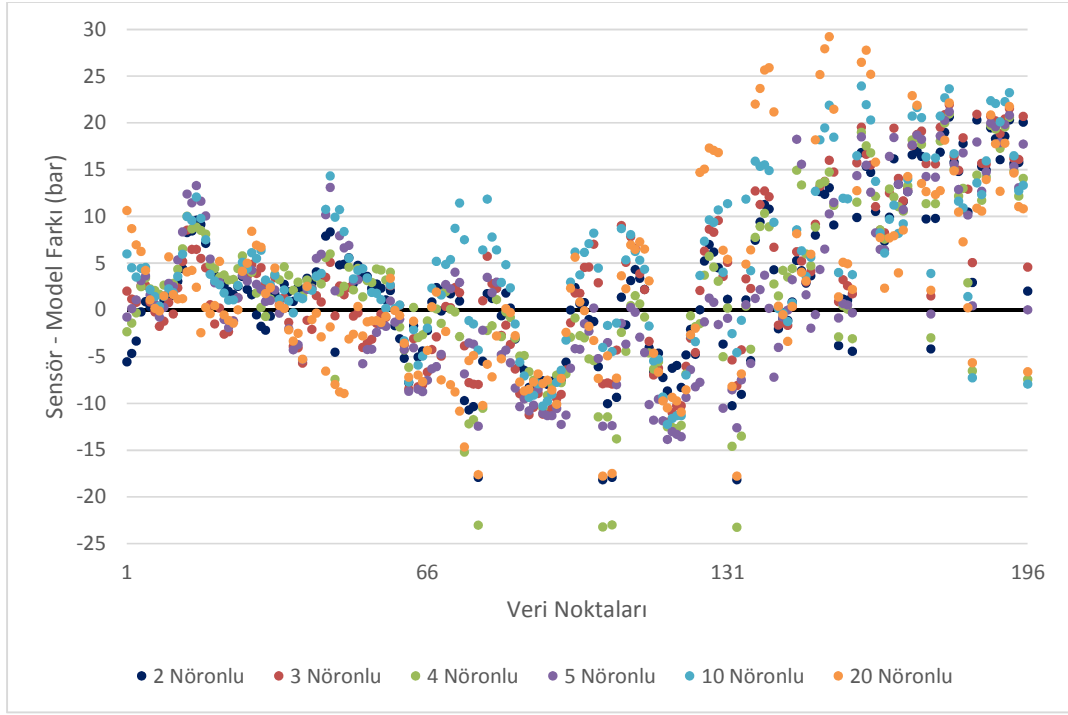
EDOE testinin sonuçlarından elde edilen eğitim veri setiyle eğitilen YSA modelleri, daha önce hiç görmedikleri motor haritalama testi sonuçlarından elde edilen test veri seti ile çevrimdışı ortamda MATLAB programı kullanılarak test edilmiştir. Modellerin verdikleri sonuçlar ve sensörlerden elde edilen RMSE değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Test veri seti RMSE (bar) değerleri

YSA modeli	Girdi seti 1	Girdi seti 2	Girdi seti 3	Girdi seti 4
2 gizli nöronlu	8,45	4,55	3,47	4,43
3 gizli nöronlu	9,02	3,28	2,2	3,6
4 gizli nöronlu	9,12	5,14	4,15	5,18
5 gizli nöronlu	9,05	4,2	2,92	4,58
10 gizli nöronlu	9,75	4,31	4	4,76
20 gizli nöronlu	10,39	5,75	5,76	6,49

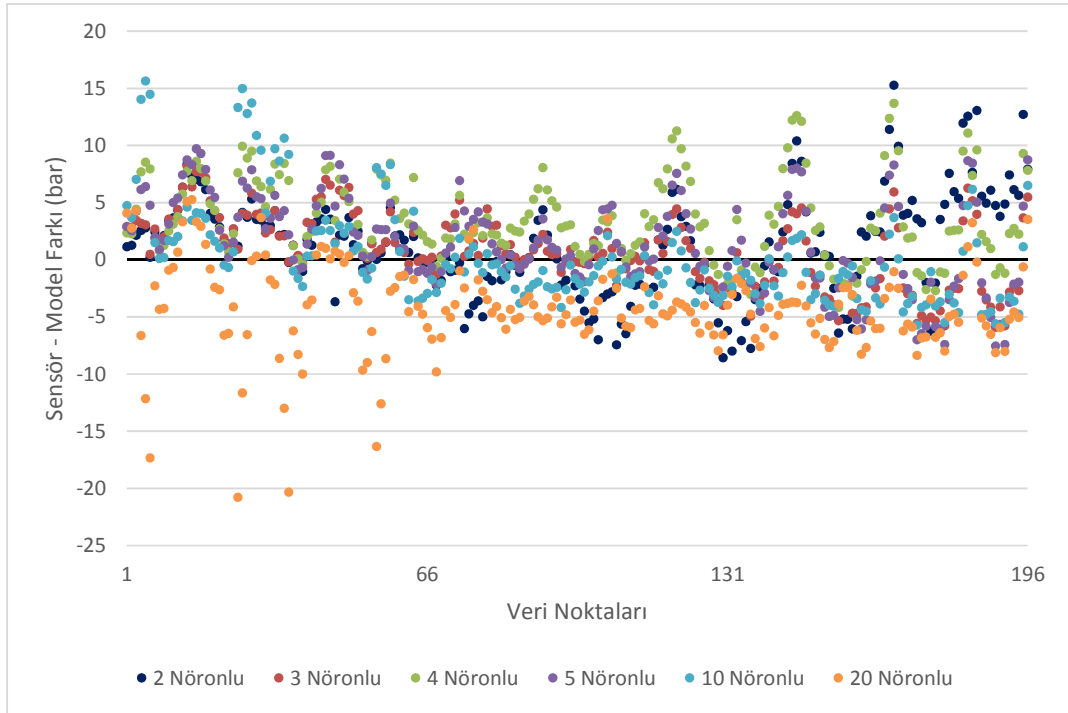
Çevrimdışı test edilen modellerin sonuçlarının sensörden elde edilen veriyle olan farkı girdi setlerine göre ayrı ayrı grafiklerde verilmiştir.

Girdi seti 1'e ait sensör ve model çıktısı farkı Şekil 3.1'de verilmiştir.



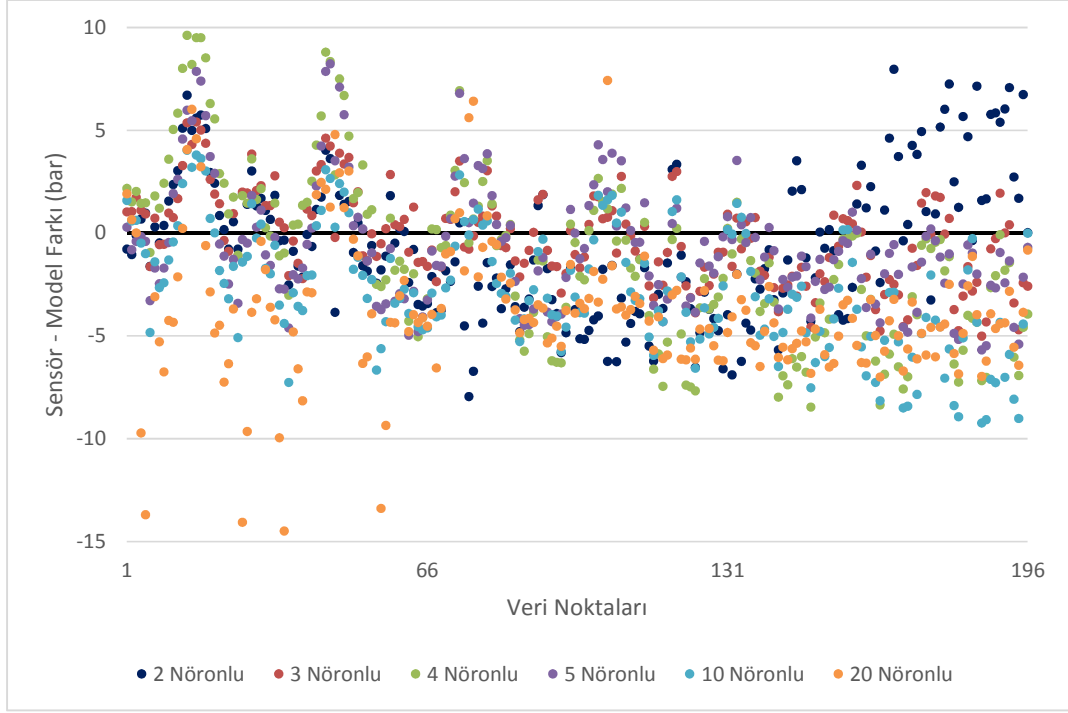
Şekil 3.1 Girdi seti 1 sensör-model çıktı farkı

Girdi seti 2'ye ait sensör ve model çıktısı farkı Şekil 3.2'de verilmiştir.



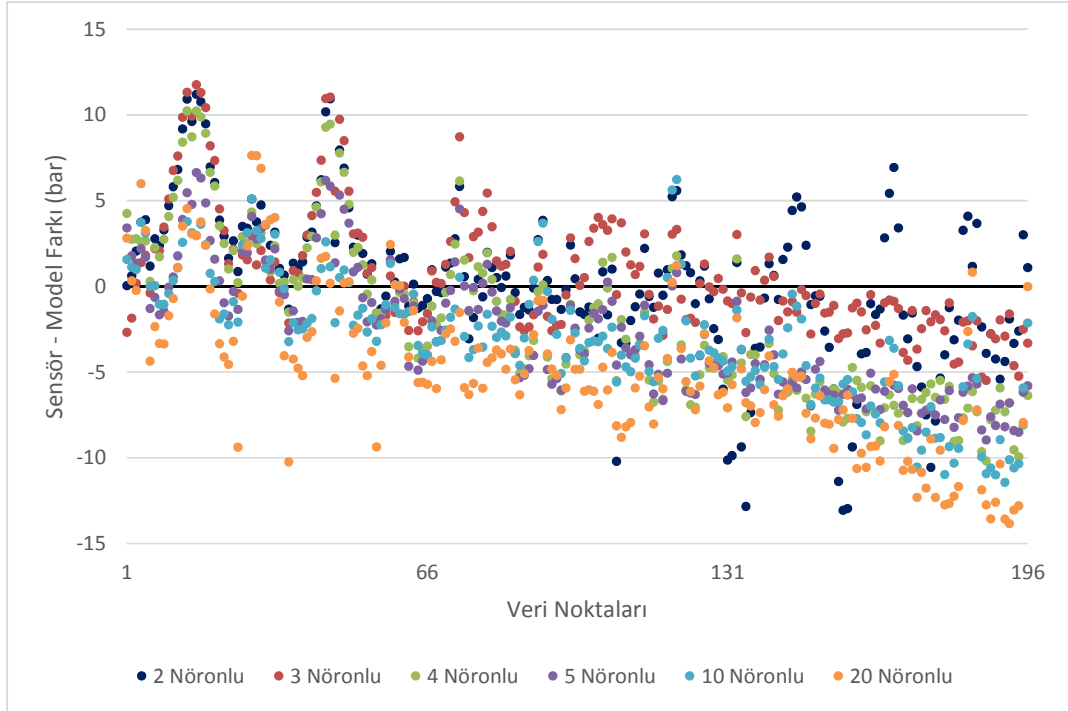
Şekil 3.2 Girdi seti 2 sensör-model çıktı farkı

Girdi seti 3'e ait sensör ve model çıktısı farkı Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Girdi seti 3 sensör-model çıktı farkı

Girdi seti 4'e ait sensör ve model çıktısı farkı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Girdi seti 4 sensör-model çıktı farkı

Çalışmadaki tüm sensör-model farkları “*sensör_değeri – model_değeri*” olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 incelendiğinde egzoz manifoldundaki egzoz gazının basıncı ve sıcaklığı motorun bir girdisi değil çıktısı olduğu için YSA modelinin tahminleme yeteneğini olumsuz yönde etkilemiştir. YSA modellerinde girdi olarak kullanılacak parametrelerin sistemin girdisi olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.2, Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görüldüğü üzere çevrimdışı test ortamında en iyi sonucu veren 3 gizli nöronlu 3. girdi setine sahip model olmuştur. Fakat 3. girdi seti ve 2. girdi seti arasında girdiler incelendiğinde EGR debisi ve motor soğutma suyu sıcaklığı bulunmaktadır. Hangi girdinin YSA modelleri sonuçlarında iyileştirme sağladığını görmek için 3. girdi setinden önce motor soğutma suyu çıkartılmış ve bir model daha yapılmıştır. Daha sonra yine 3. girdi setinden EGR debisi çıkartılmış ve bir model daha yapılmıştır. Her girdi setinde en iyi sonucu 3 gizli nöronlu modeller verdiği için bu iki model yalnızca 3 gizli nöron ile eğitilmiştir. Yeni eğitilen modellerin girdileri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Yeni eğitilen modellerin girdileri

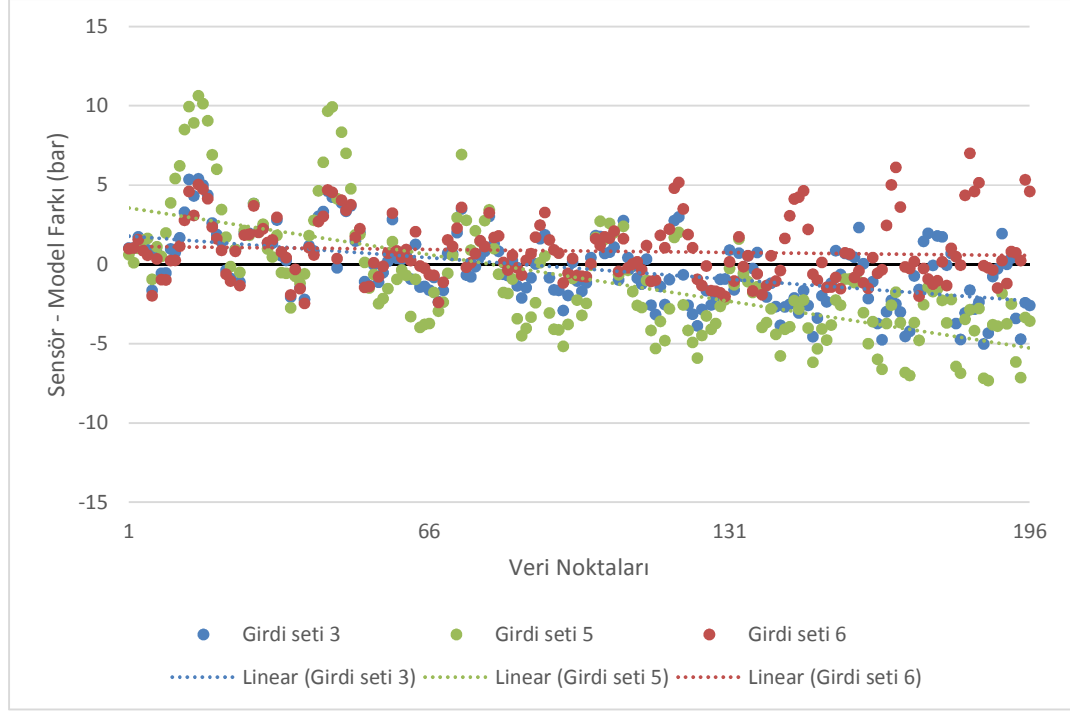
Set No	Modellerde Girdi Olarak Kullanılan Motor Parametreleri
Girdi seti 5	Set 2’ye ek olarak; EGR hava debisi
Girdi seti 6	Set 2’ye ek olarak; motor soğutma suyu sıcaklığı

3. girdi seti ve eğitilen yeni modellerin (5. ve 6. girdi setleri) RMSE değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Girdi setleri 3, 5 ve 6 RMSE değerleri

YSA modeli	RMSE değerleri
Girdi seti 3	2,2
Girdi seti 5	3,87
Girdi seti 6	2,11

Çizelge 3.4’de açıkça görüldüğü üzere EGR debisi YSA modelinin tahminleme yeteneğini kötüye götürmektedir. Şekil 3.5’de girdi setleri 3, 5 ve 6 kullanılmış 3 nöronlu YSA modellerinin sensör çıktısıyla farkları verilmiştir.



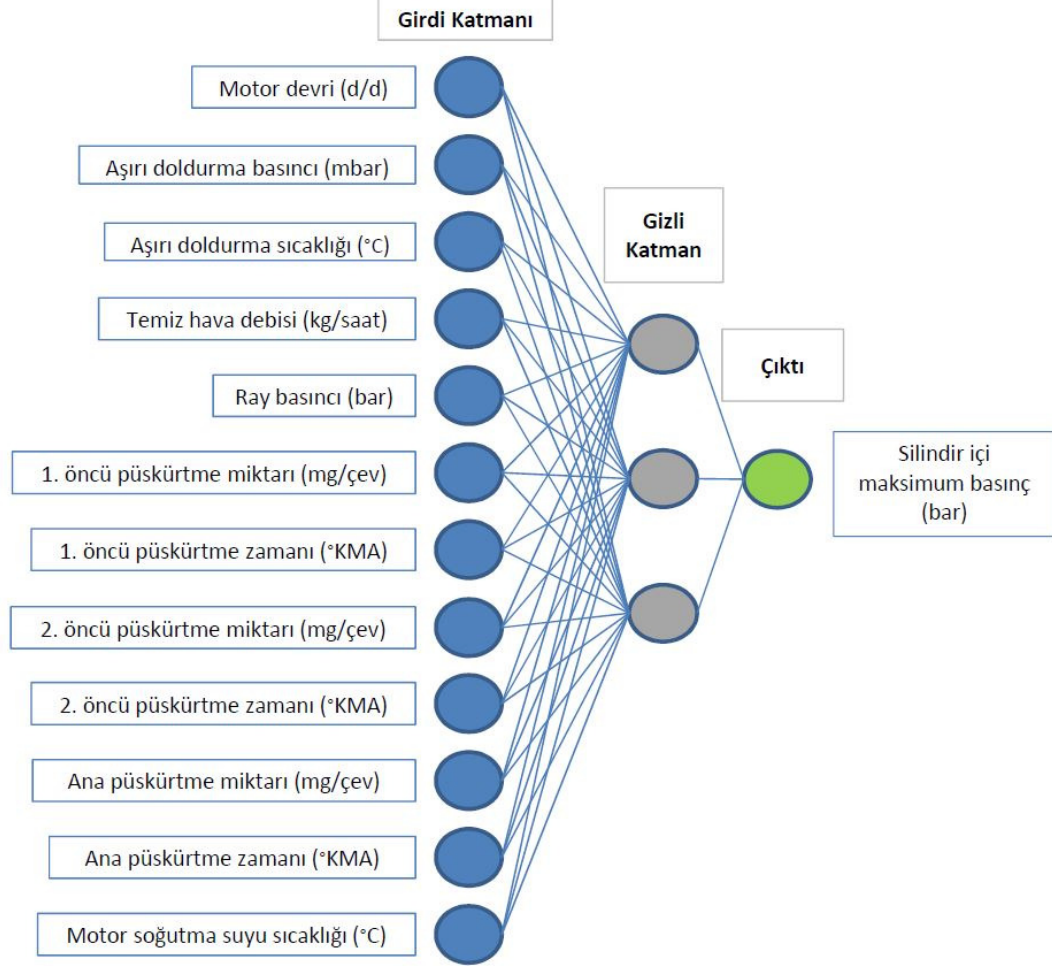
Şekil 3.5 Girdi setleri 3, 5 ve 6 sensör-model çıktı farkı

Temiz hava debisinin YSA modeline girdi olarak kullanılması EGR debisinin girdi olarak kullanılma ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Öte yandan EGR debisi girdi olarak kullanıldığında birbiriyle bağlantılı ve YSA modeli için benzer anlamlar taşıyan iki girdi (temiz hava debisi ve EGR debisi), modelin karar vermesini zorlaştırabilir.

Motor soğutma suyu sıcaklığı da motorun bir çıktısı olarak düşünülebilir. Fakat burada göz önünde bulundurulması gereken motor soğutma suyu sıcaklığının, motor bloğunun ne kadar sıcak olduğuyla ilgili bir bilgi vermesidir. Motor bloğunun sıcaklığı içerideki yanmayı etkileyeceğinden silindirin içi maksimum basıncı etkiler. Bütün bunlar göz önüne alındığında motor soğutma suyu sıcaklığı, motor bloğunun sıcaklığı hakkında fikir verdiği için YSA modelinde girdi olarak kullanılabilir.

Şekil 3.5’de verilen lineer eğilim çizgileri incelendiğinde her noktada en istikrarlı sonucun 6. girdi seti ile alındığı gözlenmektedir. Diğer girdi setleri incelendiğinde model çıktılarının karakteristiğinde değişim görülmektedir.

Tüm veriler göz önüne alındığında en iyi sonucu veren girdi seti olarak 6. girdi seti seçilmiştir. En iyi tahminleme yeteneğine sahip model yapısı ise 3 gizli nöronlu model yapısı seçilmiştir. YSA modelinin yapısı, girdileri ve çıktısı Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 En iyi sonucu veren YSA modeli şeması

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere 3 gizli nöron sayılı ve girdileri; motor devri, aşırı doldurma basıncı, aşırı doldurma sıcaklığı, temiz hava debisi, ray basıncı, 1. öncü püskürtme miktarı, 1. öncü püskürtme açısı, 2. öncü püskürtme miktarı, 2. öncü püskürtme açısı, ana püskürtme miktarı, ana püskürtme açısı ve motor soğutma suyu sıcaklığı olan modelin en iyi tahminlemeyi yaptığına karar verilmiştir.

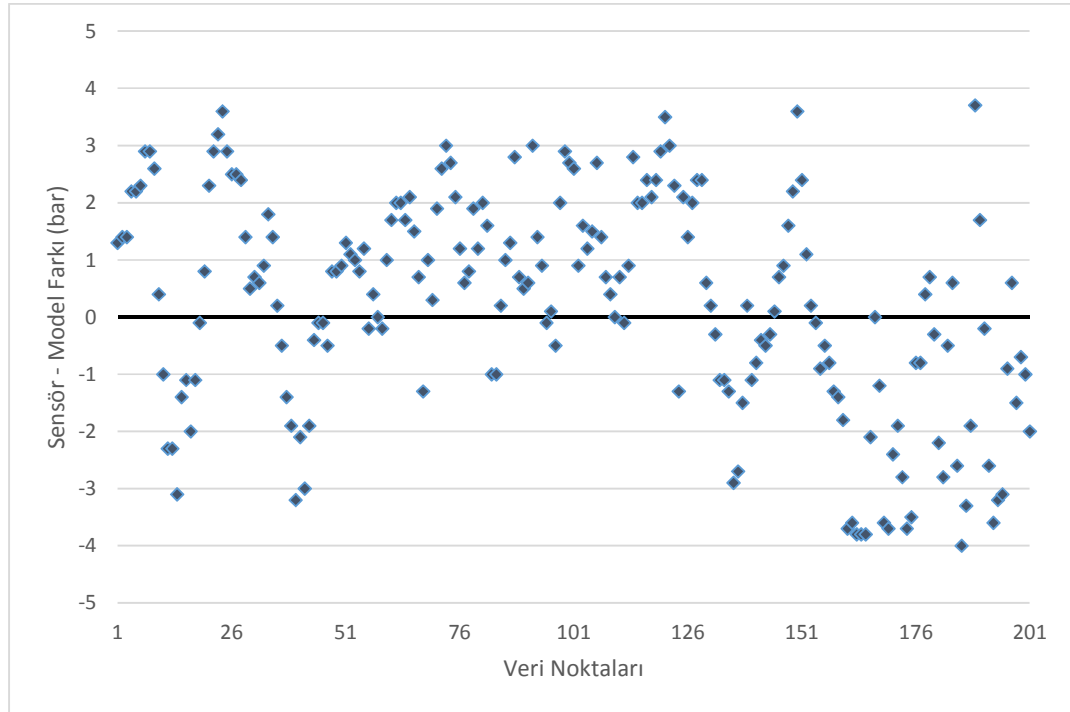
En iyi sonucu veren YSA modeli MATLAB programında derlenip “.exe” haline getirilmiştir. ATI VISION API yoluyla girdileri alarak çıktıya dönüştürme aşaması test edilerek bir sorun görülmemesiyle test odasında çalıştırılmıştır.

3.3 En İyi Sonucu Veren YSA Modelinin Çevrimiçi Gerçek Zamanlı Sonuçları

Çevrimdışı test sonucunda en iyi sonucu veren model test odasında çevrimiçi gerçek zamanlı çalıştırılarak test edilmiştir. İlk önce motorun çalışma aralıklarını kapsayan motor haritalama testi koşulmuş, daha sonra motorun hızlı manevralar yaptığı WHTC testi koşulmuştur. Motor haritalama testi ve WHTC testi süresince modelin ve sensörün çıktısı kayıt altına alınmıştır.

3.3.1 Haritalama Testi Sonuçları

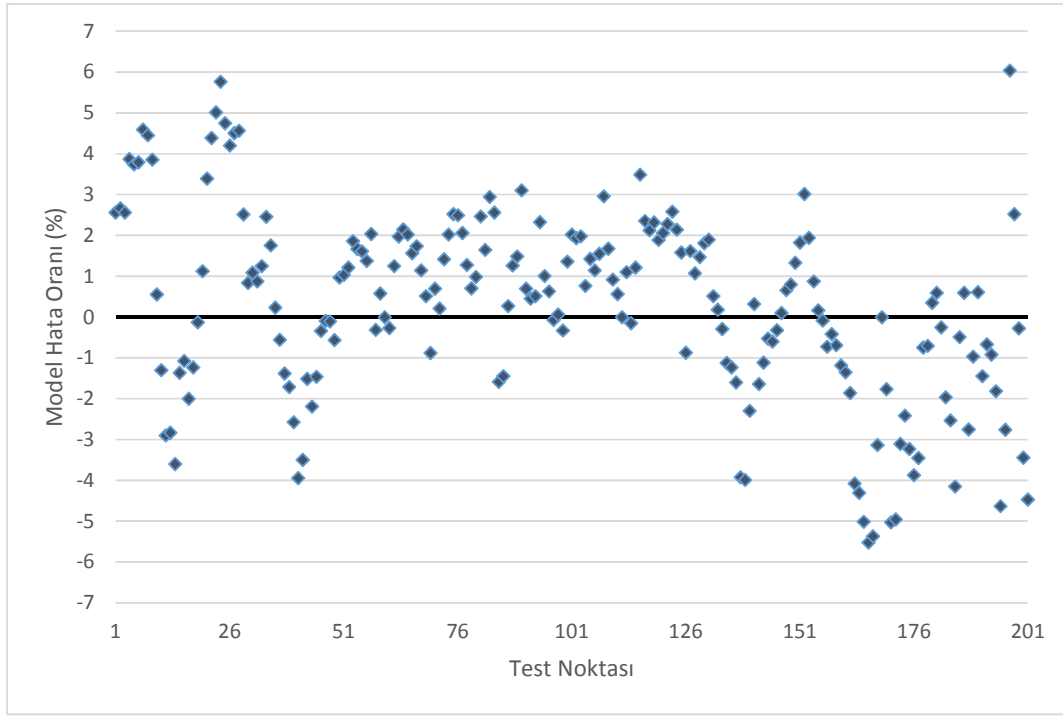
YSA modeli çevrimiçi gerçek zamanlı şekilde bir motor haritalama testi sırasında çalışmıştır. Test sonucundaki sensör-motor farkı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı

Şekil 3.7’de açıkça görüldüğü üzere YSA modeli test odasında çevrimiçi çalıştığında da gerçeğe çok yakın tahminleme yapabilmektedir. YSA modeli PMAX tahminlemesinin gerçek sensör ölçümlerine kıyasla hata payı olarak ± 4 bar olduğu görülmektedir.

Daha önceki çalışmalarda modeller birbirleriyle kıyaslandıkları için hata oranı grafiklerine ihtiyaç duyulmamıştır. Fakat tek bir modelin çevrimiçi sonuçlarını daha tutarlı incelemek adına Şekil 3.8’de sensör ve model arasındaki hata oranı verilmiştir.



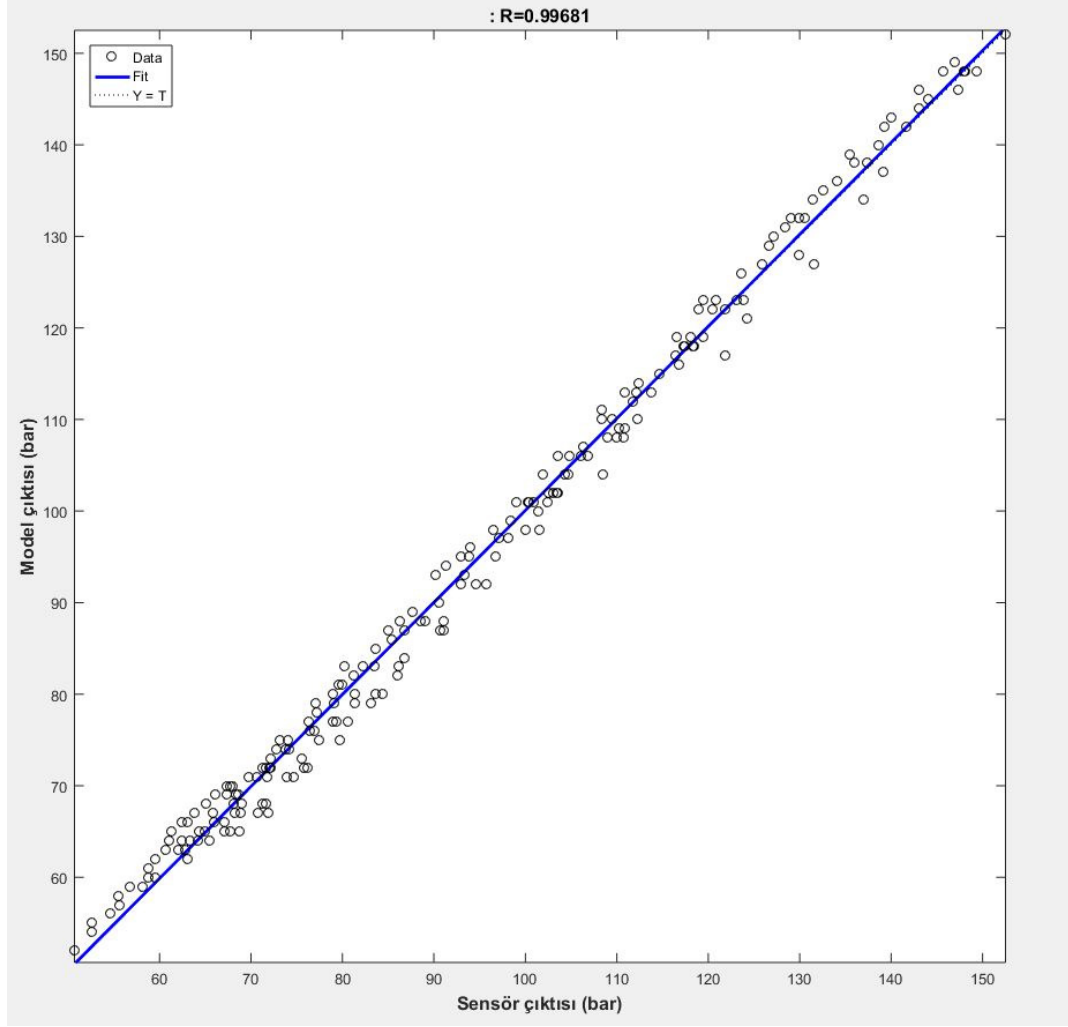
Şekil 3.8 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör hata oranı

Şekil 3.8 incelendiğinde sensör ve YSA modeli arasındaki hata oranı $\pm 6\%$ mertebesinde kalmaktadır. Silindir içi basınç sensörlerinin düşük değerler okuduğunda da, yüksek değerler okuduğunda da bu farkın kabul edilebilir aralıkta olduğu açıkça görülmektedir.

Motor haritalama testi süresince gerçek zamanlı çalışan YSA modelinin çıktıları ve silindir içi basınç sensörlerinin çıktıları arasındaki farkın standart sapması hesaplandığında 1,91 (bar) değeri elde edilmektedir.

Çevrimiçi çalışan YSA modelinin motor haritalama testi sonucundaki model çıktısı ve sensör çıktısı MATLAB programında “plotregression” komutuyla regresyon grafiğinde çizdirilmiş ve sonuçlar Şekil 3.9’de verilmiştir.

Çevrimiçi çalışan YSA modeli hata oranı ve R değeri motor haritalama testi için incelenerek kabul edilebilir değerler arasında olduğu kanaatine varıldıktan sonraki testlerde hata oranı ve R değerleri değil, direkt olarak sensör ve model arasındaki mertebelere göre basınç farkları incelenecektir. Yüzdesel hatalar, standart sapma değeri ve R değerleri genel geçerliliği kanıtlayacak nitelikte olsa dahi böylesine detaylı bir çalışmanın sonuçlarına ulaşmak için “bar” birimindeki basınç çıktılarına ve farklarına odaklanılacaktır.



Şekil 3.9 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör regresyon grafiği

Şekil 3.9 incelendiğinde, model çıktısı ve sensör çıktısı arasındaki R değeri 0,99681 olarak görülmektedir. Bu R değeri ile YSA modelinin çevrimiçi gerçek zamanlı bir sensör gibi davranmasının da başarılı tahminler yapmasının da kanıtı olarak görülebilir. Öte yandan bütün haritalama testi göz önüne alındığında YSA modeli ile sensör çıktıları arasında herhangi aykırı bir nokta görülmemektedir.

YSA modeli test süresince bir sensör gibi çalışmış, EDOE ve haritalama testinde olduğu gibi ölçümlerde 30 saniyelik ortalama değerler ölçüm değeri olarak alınmıştır.

Motorun çalışabileceği noktaların kapsandığı motor haritalama testinin motor parametreleri aralıkları Çizelge 3.5’de verilmiştir. Çizelge 3.5’den anlaşılacağı üzere YSA modelinin çevrimiçi gerçek zamanlı çalıştığı bu motor geliştirme testi de eğitim bölgesi içerisinde.

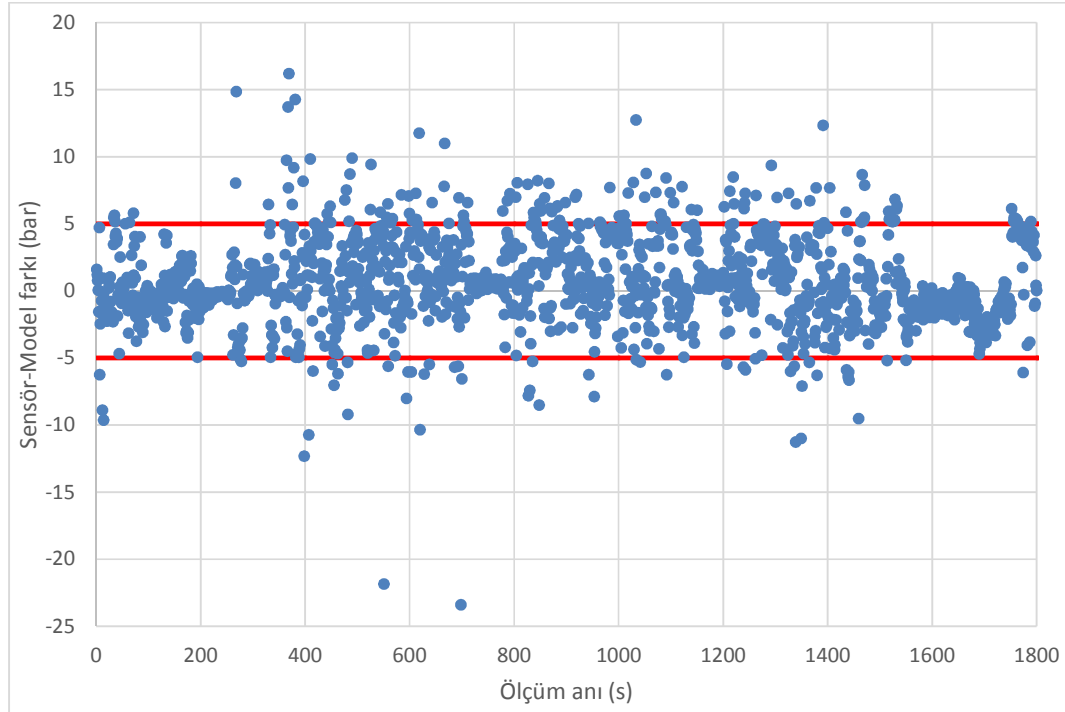
Çizelge 3.5 Çevrimiçi çalışan YSA modeli ile motor haritalama testi aralığı

Özellik	Minimum Değer	Maksimum Değer
1. öncü püskürtme miktarı	0 mg/çev	1,8 mg/çev
1. öncü püskürtme açısı	28* °KMA	36* °KMA
2. öncü püskürtme miktarı	1,3 mg/çev	2,2 mg/çev
2. öncü püskürtme açısı	9* °KMA	30* °KMA
Ana püskürtme miktarı	1,7 mg/çev	61 mg/çev
Ana püskürtme açısı	3,2 °KMA ÜÖNÖ	6,7 °KMA ÜÖNS
Motor hızı	1000 d/d	4500 d/d
Ray basıncı	450 bar	1750 bar
Aşırı doldurma basıncı	22** mbar	1500** mbar
Aşırı doldurma sıcaklığı	35 °C	41 °C
Temiz hava debisi	42 kg/saat	471 kg/saat
EGR debisi	0 kg/saat	110 kg/saat
Motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı	74 °C	89 °C
PMAX	54 bar	152 bar
*Bu değerler ana püskürtme zamanından ne kadar önce olacağını belirtmektedir. **Bu değerler rölatif basınç değerleridir.		

Motorun ölçüm değerlerinin stabil olduğu şartlarda iyi sonuç veren YSA modeli, haritalama testlerinde kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. Bu aşamadan sonra motorun hızlı manevralar yaptığı ve ölçümlerin 1 Hz ve 100 Hz çözünürlüklerde kayıt alındığı WHTC testine geçilmiştir.

3.3.2 WHTC Testi Sonuçları

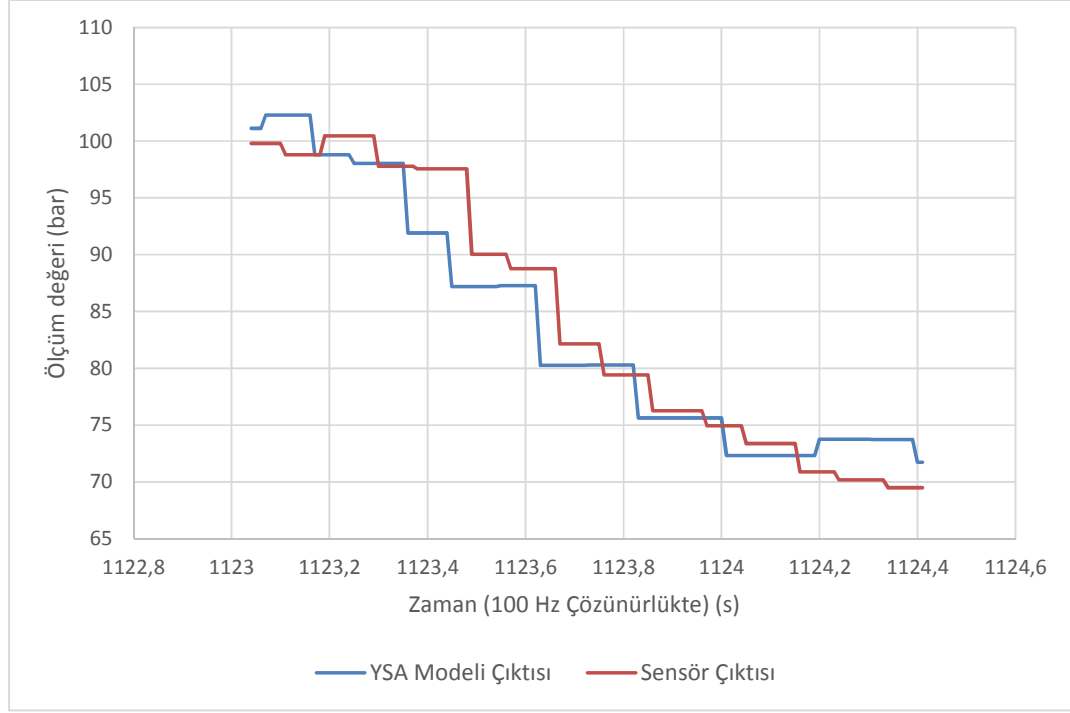
Dizel motorlarının emisyon standartları sağlama testleri için koştukları WHTC testi ile YSA modeli çevrimiçi gerçek zamanlı şekilde test edilmiştir. Buradaki amaç modelin stabil durumlar dışında hızlı manevralardaki tepkisini ve doğruluğunu ölçmektir. WHTC testi süresince PUMA kaydedicisi tarafından 1 Hz çözünürlükte kaydedilmiş çevrimiçi gerçek zamanlı çalışan YSA modelinin çıktısı ve sensörden elde edilen değerler arasındaki fark Şekil 3.10'da verilmiştir.



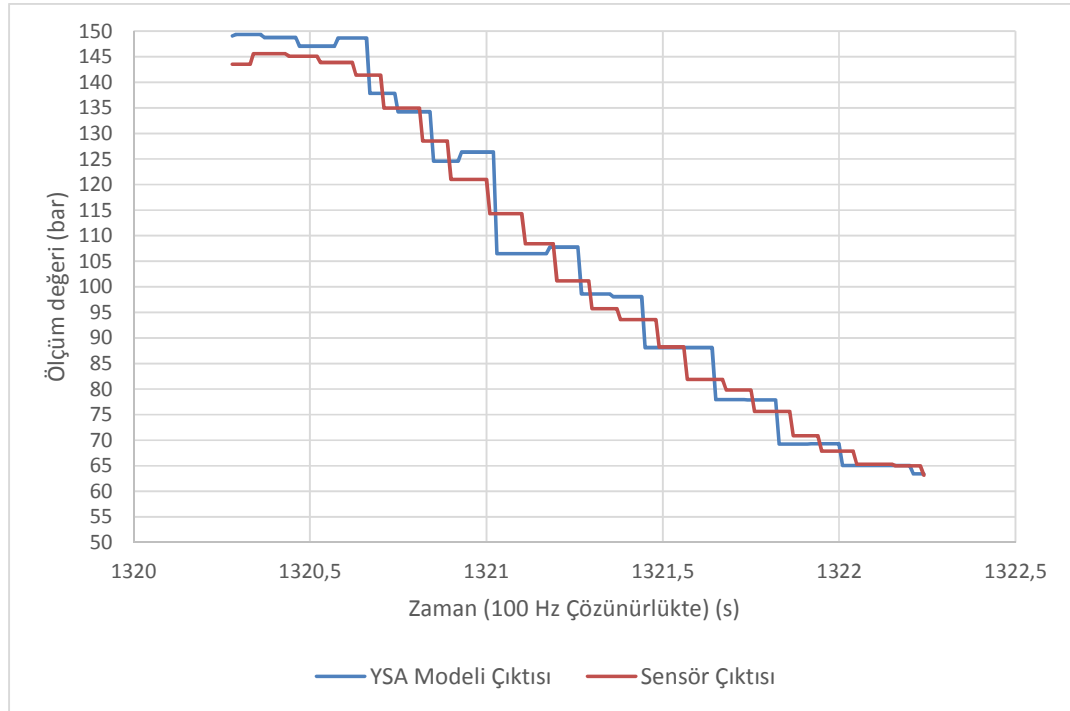
Şekil 3.10 WHTC testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı (düzeltilmemiş)

Şekil 3.10'da açıkça görülebileceği üzere model çıktısı ile sensör çıktısı arasındaki fark çoğunlukla ± 5 bar bölgesinde toplanmıştır. Sensör ve model çıktısının farkının 10, 15 bar civarı olduğu noktalar, PUMA kaydedicisine ek olarak çalıştırılan ve 100 Hz veri kaydeden ATI VISION kaydedicisi verileriyle incelenmiştir. ATI VISION kaydedicisi ile kaydedilen veriler incelendiğinde, YSA modelinin motor hızlı manevra yaptığı anda silindir içi basınç sensörlerinden daha çabuk tepki verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.10'da verilen YSA modeli ve silindir içi basınç sensörü farkının 5 bar üzerine çıktığı yerlerde 1 Hz ile kayıt almış olan PUMA kaydedicisi biraz önce bahsedilen hızlı tepki verme durumunu yakalayamamış olabilir.

ATI VISION kaydedicisi ile 100 Hz çözünürlükte alınan silindir içi basıncın düştüğü örnek motor manevraları Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.

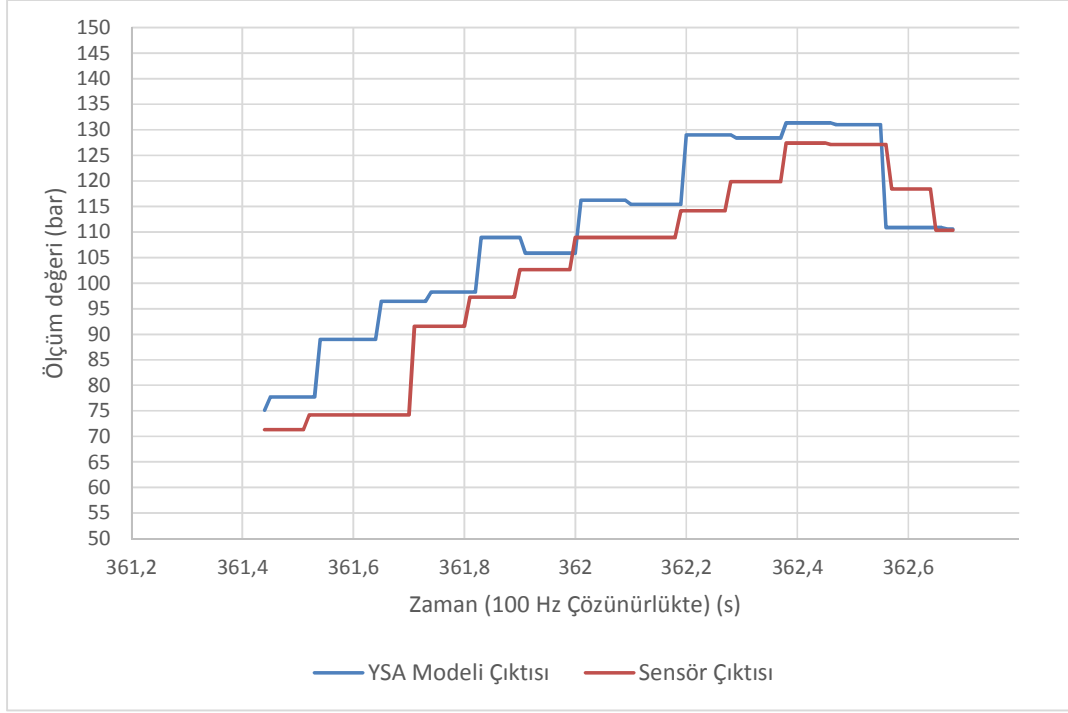


Şekil 3.11 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 1. grafik

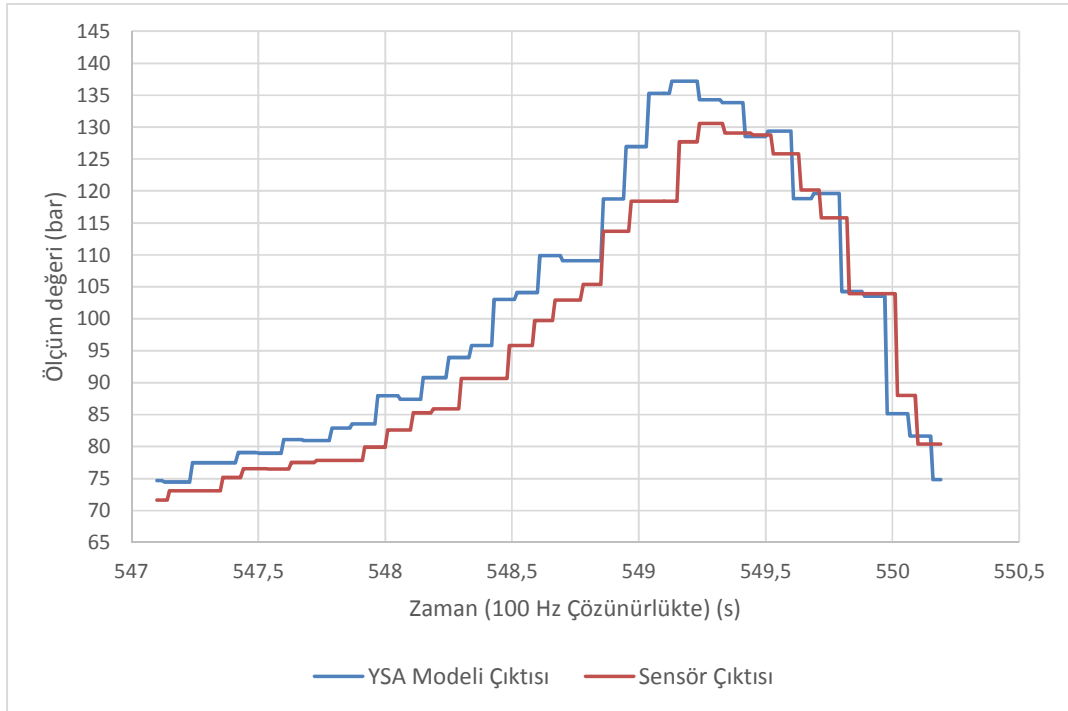


Şekil 3.12 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 2. Grafik

ATI VISION kaydedicisi ile 100 Hz çözünürlükte alınan silindir içi basıncın yükseldiği örnek motor manevraları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de verilmiştir.

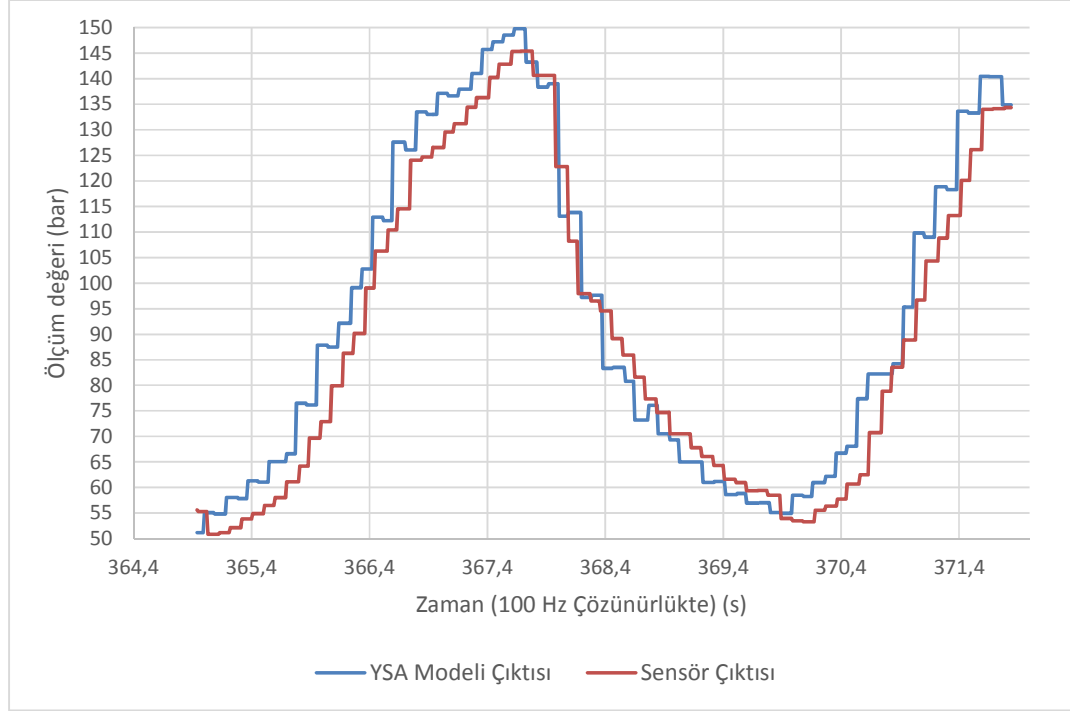


Şekil 3.13 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 3. grafik



Şekil 3.14 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 4. Grafik

ATI VISION kaydedicisi ile 100 Hz çözünürlükte alınan silindir içi basıncın hem yükseldiği hem de düştüğü örnek motor manevraları Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15 100 Hz çözünürlüklü sensör ve model tepki süresi farkı 5. grafik

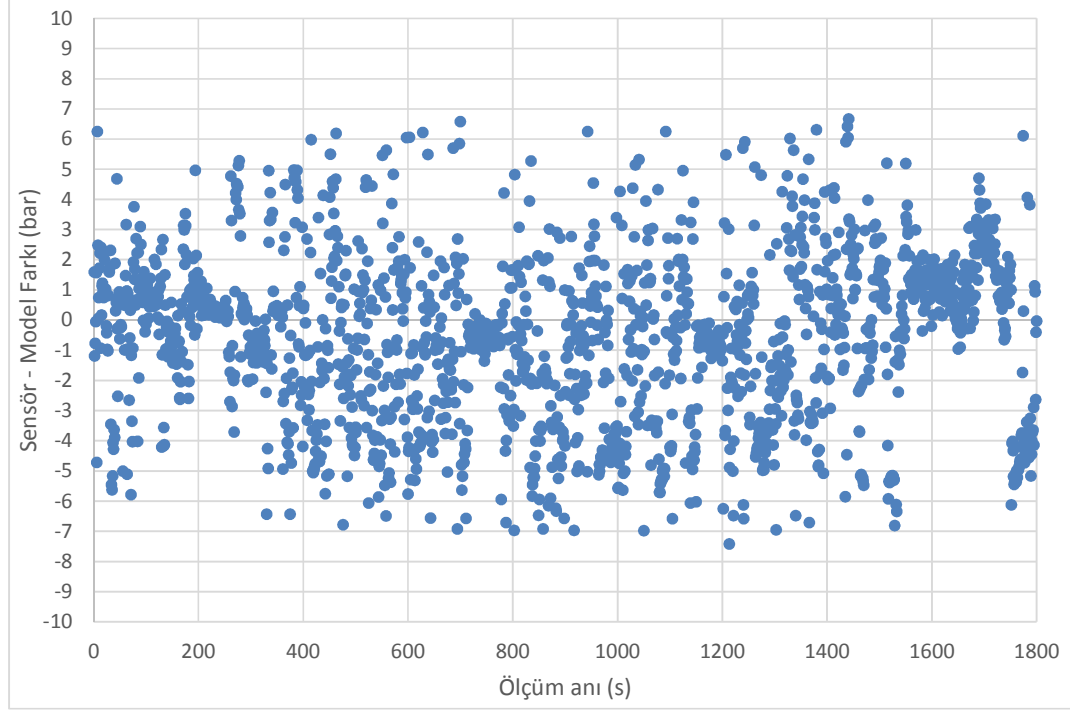
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de örnek olarak verilmiş WHTC testi süresince püskürtülen yakıt miktarına bağlı olarak düşen silindir içi basıncında YSA modeli ve silindir içi basınç sensörü arasındaki tepki süresi farkından dolayı 1 Hz kayıt alan PUMA kaydedicisinde 15 bar civarı farklar görülebilir.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de örnek olarak verilmiş WHTC testi süresince püskürtülen yakıt miktarına bağlı olarak artan silindir içi basıncında YSA modeli ve silindir içi basınç sensörü arasındaki tepki süresi farkından dolayı 1 Hz kayıt alan PUMA kaydedicisinde 15 bar civarı farklar görülebilir.

YSA tekniğinin hızlı işlem yeteneği sayesinde YSA tekniğiyle oluşturulmuş bir modelin, sensörlerden daha hızlı sonuç verebildiği Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’den açıkça görülebilmektedir. Bu sayede motorun maksimum silindir içi basınç limiti aşılmadan önlem alınmasına olanak sağlayabilir.

Şekil 3.10’daki grafikteki aykırı noktaların, motorun ani manevralarındaki sensör ve model tepki süresi arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. ATI VISION

kaydedicisi ile kaydedilen 100 Hz çözünürlükteki veriler rehberliğinde ani manevralar sırasındaki sensör ve model arasındaki tepki süresinden kaynaklı fark en aza indirilmeye çalışılmıştır. Sensörün ve modelin tepki süreleri arasındaki fark en aza indirildiğinde Şekil 3.16’de verilmiş grafik elde edilmektedir.

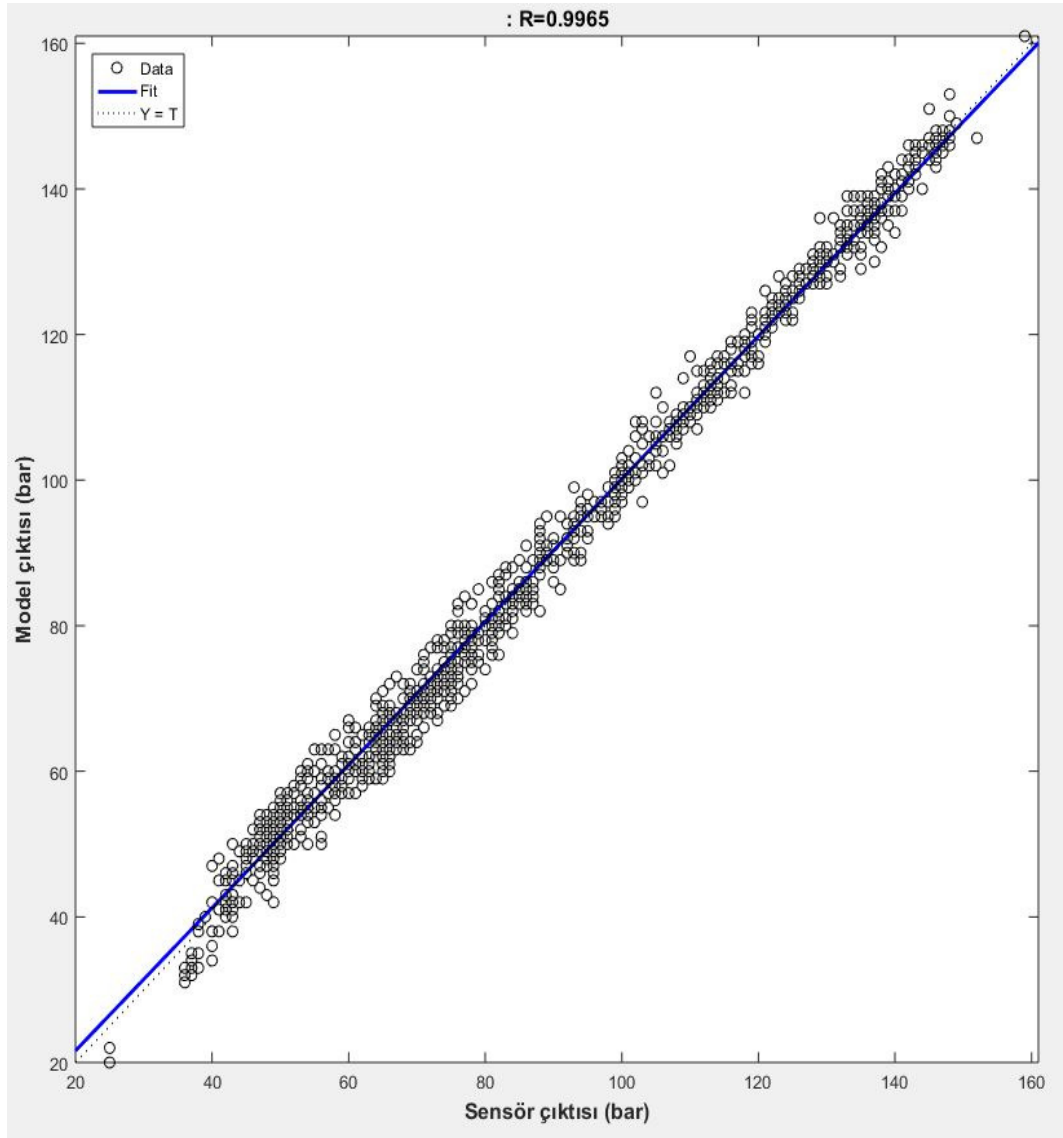


Şekil 3.16 WHTC testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör farkı (düzeltilmiş)

Şekil 3.16 incelendiğinde sensör ölçümleri ve YSA modeli çıktıları arasındaki fark ± 7 bar civarındadır. WHTC testi gibi motorun hızlı manevralar yaptığı test tiplerinde ve sensör ile model arasındaki tepki süresi farkları da göz önünde tutulduğunda bu fark kabul edilebilir miktardadır.

YSA modeli ve sensör arasındaki tepki süresi farkının en aza indirilmiş olduğu veriler kullanılarak MATLAB programında “plotregression” komutu ile model çıktısı ve sensör çıktısı arasındaki regresyon grafiği çizdirilmiş ve sonuçlar Şekil 3.17’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde R değeri 0,9965 olarak görülmektedir. Bir önce koşan motor haritalama testi R değeri ise 0,99681 olarak hesaplanmıştır.

Bütün bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda YSA tekniğiyle oluşturulan modellerin çevrimiçi gerçek zamanlı çalışmasında bir problem olmadığı kanısına varılmıştır.



Şekil 3.17 Haritalama testi çevrimiçi çalışan YSA modeli ve sensör regresyon grafiği

WHTC testi veri aralıkları incelendiğinde P_{MAX} değerinin 25 bar ile 155 bar arasında olduğu görülmüştür. Motorun gerçek sürüş karakteristiklerinde minimum yakıt tüketimi sağlaması için çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejilerden silindir içi maksimum basınca büyük etkisi olan, motor serbest yavaşlamaya geçtiğinde silindir pompalama kayıplarını azaltmak için kelebek vasıtasıyla hava girişini azaltmaktır. Kelebek bir miktar kapanarak silindir içine dolacak olan hava miktarını düşürür, bu sayede motor yakıt püskürtmediği halde içeriye dolan havayı dışarıya süpürürken daha az kuvvet sarfeder, daha geç yavaşlar. Bu ve bunun gibi verimlilik stratejilerinden dolayı P_{MAX} değeri 25-50 bar arasında olabilmektedir.

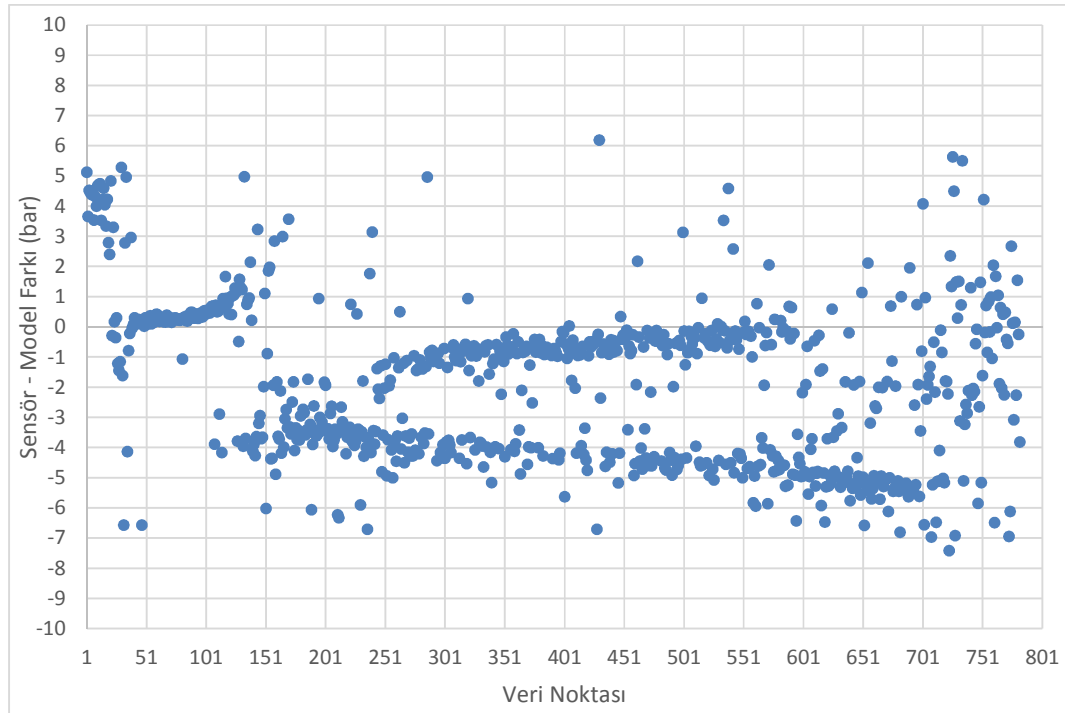
Şekil 3.16’de verilmiş sensör ve model ölçümleri arasındaki farklar, P_{MAX} değerlerine göre 5 farklı bölgeye ayrılarak tekrar incelenmiştir. Bu bölgelerin aralıkları Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 WHTC testi P_{MAX} bölgeleri

Bölge No.	Silindir İçi Maksimum Basınç Aralığı
Bölge 1	25...60 bar
Bölge 2	61...95 bar
Bölge 3	96...120 bar
Bölge 4	121...140 bar
Bölge 5	141...155 bar

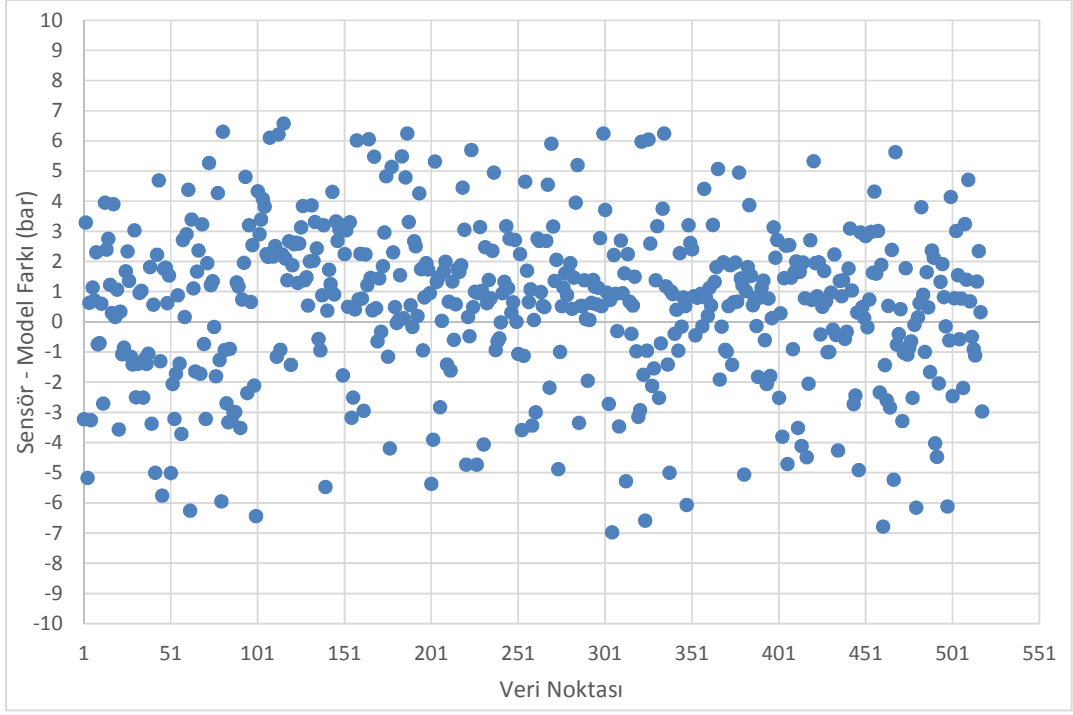
Her bir P_{MAX} bölgesine ait grafikler aşağıda verilmiştir.

25...60 bar arası P_{MAX} ölçümleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.18)



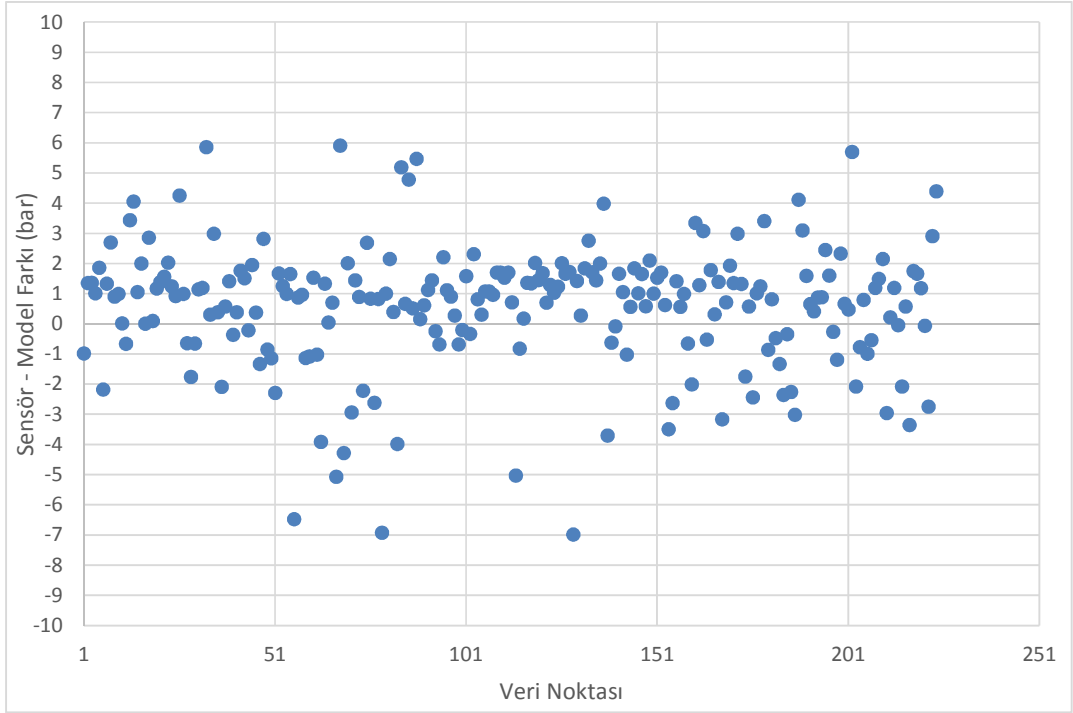
Şekil 3.18 WHTC testi “Bölge 1” (25...60 bar) sensör-model çıktı farkı

61...95 bar arası PMAX ölçümleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.19).



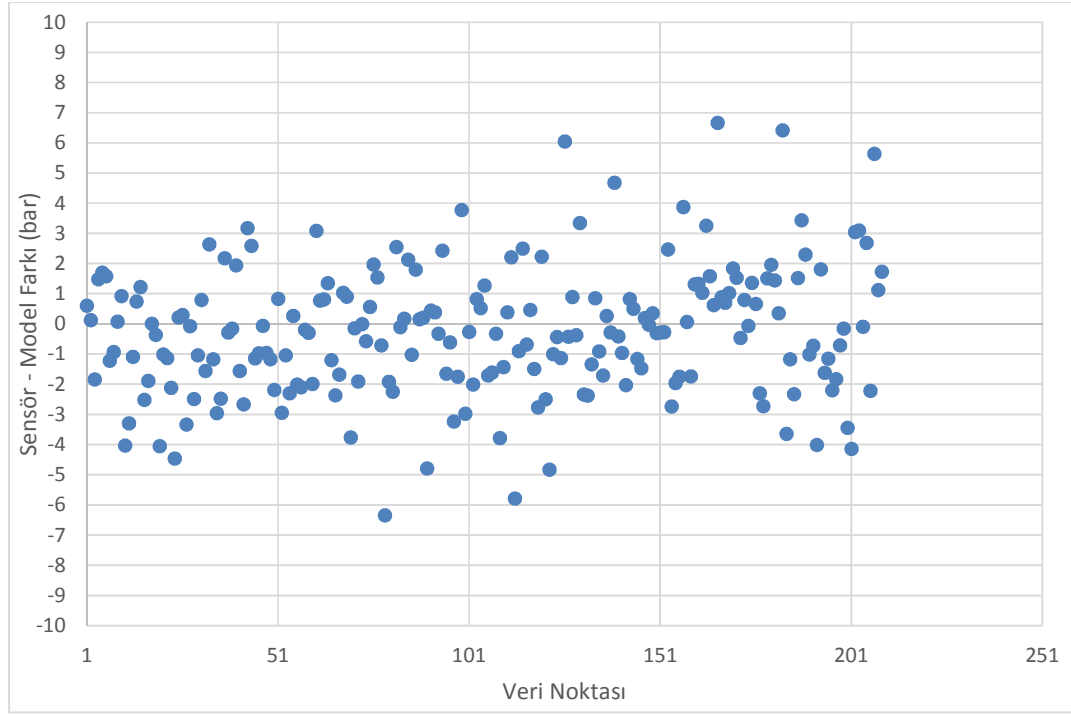
Şekil 3.19 WHTC testi “Bölge 2” (61...95 bar) sensör-model çıktı farkı

96...120 bar arası PMAX ölçümleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.20).



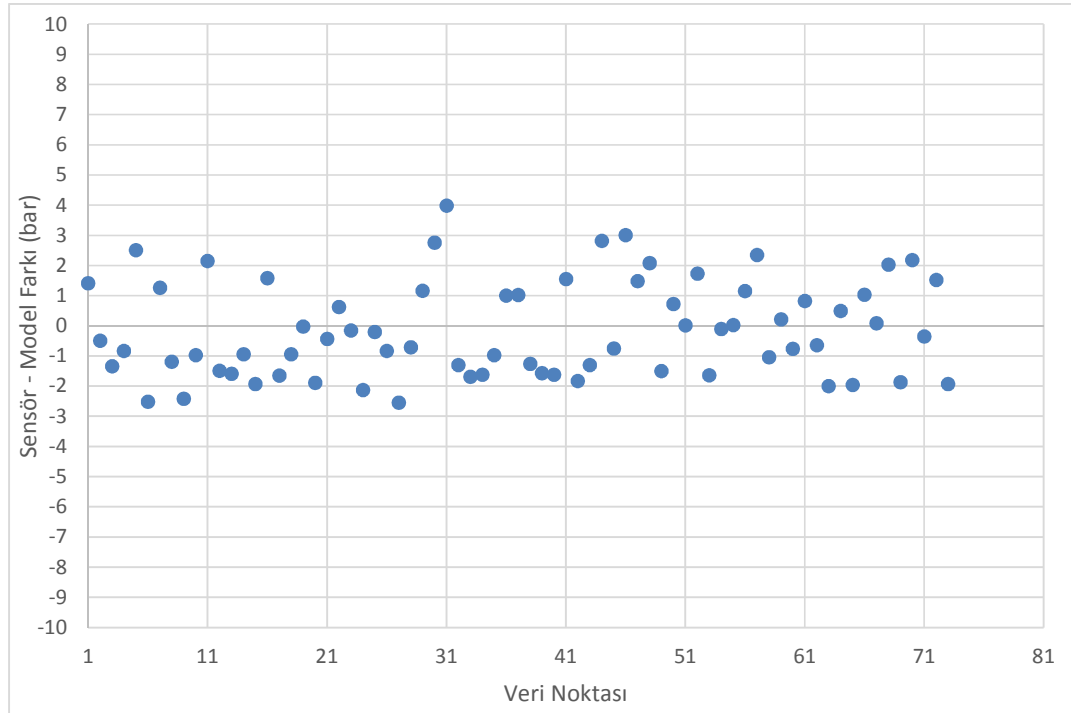
Şekil 3.20 WHTC testi “Bölge 3” (96...120 bar) sensör-model çıktı farkı

121...140 bar arası PMAX ölçümleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.21).

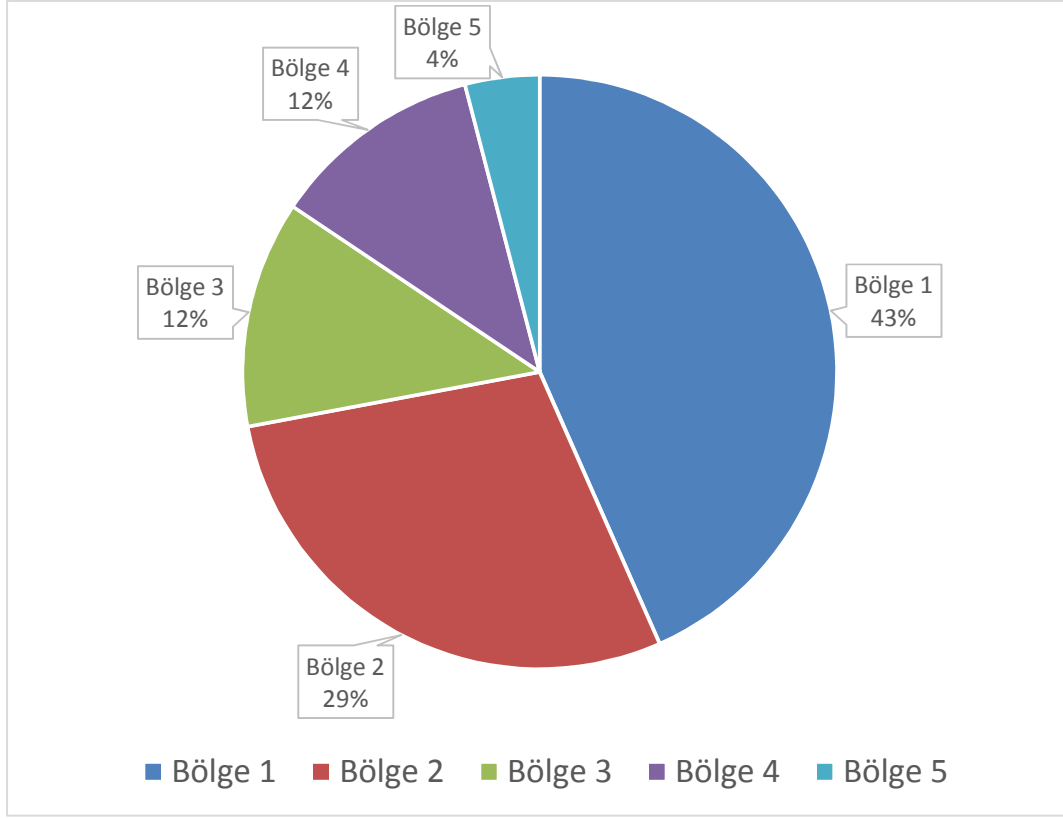


Şekil 3.21 WHTC testi “Bölge 4” (121...140 bar) sensör-model çıktı farkı

141...155 bar arası PMAX ölçümleri grafiği verilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 WHTC testi “Bölge 5” (141...155 bar) sensör-model çıktı farkı



Şekil 3.23 WHTC testi PMAX değerlerinin bölgelere göre dağılımı

Şekil 3.22’de açıkça görüldüğü üzere PMAX değerinin en yüksek olduğu mertebeler olan 141...155 bar aralığında YSA modeli ile silindir içi basınç sensöründen gelen çıktılar arasındaki fark ± 4 bar arasındadır. Motorun en önemli mekanik sınırlamalarından birisi olan PMAX dayanımı göz önünde bulundurulduğunda yüksek PMAX mertebelerinde çevrimiçi çalışan YSA modelinin oldukça başarılı tahminleme yaptığı kaçınılmaz bir gerçektir.

140 bar ve daha düşük PMAX bölgelerinde ise YSA modelinin aykırı bir çıktısının olmadığı Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’den açıkça görülmektedir.

Şekil 3.23’de WHTC testindeki PMAX değerleri bölgelerine göre pasta grafiğinde gösterilmiştir. Yüksek silindir içi basınç bölgesi olan “Bölge 5”e WHTC testinin yalnızca 5%’i oranında girilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, 2533 ölçüm noktasından oluşan EDOE testi sonuçlarından elde edilen eğitim veri seti ve BR eğitim algoritmasıyla eğitilen toplamda 26 adet YSA modeli oluşturulmuştur. Bu 26 farklı YSA modeli çevrimdışı çalıştırılarak 196 ölçüm noktasından oluşan motor haritalama testinin sonuçlarından elde edilen test veri seti ile test edilmiştir. 26 farklı modelden en iyi sonucu veren modelin, 3 gizli nörona sahip 6 numaralı girdi setini kullanan YSA modeli olduğu görülmüştür. En iyi sonucu veren YSA modeli çevrimiçi çalışacak şekilde test odasına adapte edilmiştir. Deney motoru ve deney ekipmanlarıyla motor haritalama testi ve WHTC testi yapılmış ve bu süreçte YSA modeli çevrimiçi gerçekli zamanlı çalıştırılarak çıktıları kayıt altına alınmıştır.

Tez çalışmasında paylaşılmış tüm veriler göz önünde bulundurulduğunda;

- i) YSA tekniğiyle oluşturulan modeller P_{MAX} değerlerini tahminlemede başarılı sonuçlar vermiştir.
- ii) YSA tekniğiyle oluşturulan modeller daha önce koşmuş bir testin sonuçlarıyla çalıştırılabilir ve çıktılar gözlemlenebilir.
- iii) YSA tekniğiyle oluşturulan modeller test odası düzeneğine gömülerek çevrimiçi gerçek zamanlı şekilde çalıştırılabilir.
- iv) YSA modelleri yapıları gereği çok hızlı işlem yapabildikleri için mekanik silindir içi basınç sensörlerinden daha çabuk tepki verebilir. Bu sayede motor sağlığını kötüye götürecek bir durum daha oluşmadan önlenir.
- v) YSA modellerinin doğru tahminlemeler yapması girdilere ve gizli katmandaki nöron sayılarına bağlıdır.

- vi) YSA modellerinin eğitildikleri bölgeler dışında da gerçeğe yakın sonuçlar verebildiği gözlemlenmiştir.
- vii) YSA tekniğiyle oluşturulmuş PMAX tahminleme modellerinin eğitim veri seti çalışma süresince motor kalibrasyon süreçleri için koşulmuş EDOE testinden elde edilmiştir. PMAX girdileri için özel olarak EDOE tasarlanıp bu test sonuçlarından toplanacak olan eğitim veri seti ile eğitilmiş modeller gerçeğe daha yakın tahminlemeler yapabilir.
- viii) YSA modelleri ve sensörler paralel olarak kullanıldığında, sensörlerden alınan ölçüm değerlerindeki kaymalar tespit edilebilir.
- ix) YSA modelleri silindir içi basınç sensörleri kullanılmadığı zamanlarda PMAX değerleri hakkında motor geliştiricilerine fikir verebilir.
- x) Sadece ECU parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı bir YSA modeli gelişen teknolojiler sayesinde ECU'lara gömülebilir ve motorun PMAX dayanımları içerisinde kalması sağlanarak motorun zarar görmesi önlenabilir.

Nihayetinde doğru veri seti ile eğitilmiş, doğru girdiler ile beslenmiş ve doğru nöron sayısı seçilmiş bir YSA modelinin çevrimiçi çalıştığı şartlarda dahi gerçeğe çok yakın tahminlemeler yapabileceği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] OPEC, (2017), World Oil Outlook, Vienna.
- [2] EUP, (2007), (EC) No 715/2007 Official Journal of the European Union.
- [3] Ozener, O., (2013), Dizel Motorlarında Pilot Püskürtmenin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Heywood, J. B., (1988), Internal Combustion Engine Fundamentals, Singapore.
- [5] Merker, G.P., Schwarz, C., Stiesch, G. ve Frank, O., (2004), Simulating Combustion, Wiesbaden.
- [6] Hamm, T., Rebbert, M., Ecker, H.J. ve Graffen, M., (2008), Cylinder Head Design for High Peak Firing Pressures, SAE Paper No: 2008-01-1196.
- [7] Grondin, O., Letellier, C., Maquet, J., Aguirre, L. A. ve Dionnet, F., (2005), Direct Injection Diesel Engine Cylinder Pressure Modelling via NARMA Identification Technique, SAE Paper No: 2005-01-0029.
- [8] Jander, B. S. ve Baar, R., (2017), Modeling Thermal Engine Behavior Using Artificial Neural Network, SAE Paper No: 2017-01-0534.
- [9] Ozener, O., Yuksek, L. ve Ozkan, M., (2013), Artificial Neural Network Approach to Predicting Engine-Out Emissions and Performance Parameters of a Turbo Charged Diesel Engine, Thermal Science, 17 (1): 153-166.
- [10] Karonis, D., Lois, E., Zannikos, F. 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.
- [11] Haykin, S., (1998), Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall, New York, USA.
- [12] Öztemel, E., (2003), Artificial Neural Networks, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- [13] Sediako, A. D., Andric, J., Sjoblom J. ve Faghani E., (2018), Heavy Duty Diesel Engine Modeling with Layered Artificial Neural Network Structures, SAE Paper No:2018-01-0870.
- [14] He, Y. ve Rutland, C. J., (2004), Application of Artificial Neural Networks in Engine Modeling, International Journal of Engine Research, 281-296.

- [15] Zhou, H., Cen, K. ve Fan, J., (2004), Modeling and Optimization of the NO_x Emission Characteristics of a Tangentially Fired Boiler with Artificial Neural Networks, *Energy*, 29 (1): 167-183.
- [16] Bertram, A. M. ve Kong, S.C., (2017), Augmentation of an Artificial Neural Network (ANN) Model with Expert Knowledge of Critical Combustion Features for Optimizing a Compression Ignition Engine Using Multiple Injections, SAE Paper No: 2017-01-0701.
- [17] Uzun, A., (2012), A Parametric Study for Specific Fuel Consumption of an Intercooled Diesel Engine Using a Neural Network, *Fuel*, 93: 189-199.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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: 824-828
- [21] Ganapathy T., Gakkhar, P. Ve Murugesan, K., (2009), Artificial Neural Network Modeling of Jatropha Oil Fueled Diesel Engine for Emission Predictions, *Thermal Science*, 13 (1): 91-102.
- [22] Oguz, 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.
- [23] Lucas, A., Durán, A., Carmona, M. ve Lapuerta, M. (2001), Modeling Diesel Particulate Emissions with Neural Networks, *Fuel*, 80 (4): 539-548.
- [24] Boruah, D., Thakur, P. K. ve Baruah, D., (2016) Artificial neural network based modelling of internal combustion engine performance. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5 (3): 568-576.
- [25] Bizon, K., Continillo, G., Mancaruso, E. Ve Vaglieco, B. M., (2015), Application of RBF neural networks for real-time pressure prediction in a Diesel engine, *International Journal of Engineering & Technology*, 4 (4): 497-508
- [26] Kosif, E., (2018), Dizel Motorlarda Hava Kütle Ölçüm Sensörü Adaptasyonunun Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] Accurate Technologies, <https://www accuratetechnologies.com/ECUCalibration>, 20 Mart 2019.
- [28] MATLAB, Yapay Sinir Ağları nftool, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/gs/fit-data-with-a-neural-network.html>, 1 Nisan 2019.
- [29] MATLAB, Levenberg-Marquardt Geri Beslemeli Eğitim Algoritması, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainlm.html>, 2 Nisan 2019.

- [30] MATLAB, Bayesian Regularizasyon Geri Beslemeli Eğitim Algoritması, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainbr.html>, 3 Nisan 2019.
- [31] MATLAB, Ölçekli Eşlenik Gradyen Geri Beslemeli Eğitim Algoritması, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainscg.html>, 4 Nisan 2019.
- [32] Harwinder, K. ve Dalwinder, S. S., (2013), Bayesian Regularization Based Neural Network Tool for Software Effort Estimation, Global Journal of Computer Science and Technology, 13 (2).
- [33] DieselNet, WHTC, <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whtc.php>, 10 Nisan 2019.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ozan Doğukan BOZDAĞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.11.1991, Balıkesir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozandogukanbozdog@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Kocaeli Anadolu Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017- ...	Ford Otosan Otomotiv Sanayii A.Ş.	Ürün Geliştirme Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Bozdog, O., D. ve Ozener, O., (2019), "Modeling of Peak value in Cylinder Firing Pressure in Diesel Engines using Artificial Neural Network Methodology", International Journal of Engineering Research and Advanced Technology, Vol. 5 Issue 4, 19-24.