

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLAYLI BASINÇ ÖLÇÜM YÖNTEMİ  
KULLANILARAK PERFORMANSA DAYALI  
EMİSYON SİSTEMİ TASARIMI VE  
GERÇEKLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Barış BORU**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK ve  
BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim  
ESKİKURT  
Prof. Dr. Adnan PARLAK**

**Ekim 2012**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOLAYLI BASINÇ ÖLÇÜM YÖNTEMİ KULLANILARAK  
PERFORMANSA DAYALI EMİSYON SİSTEMİ TASARIMI  
VE GERÇEKLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

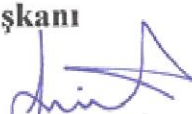
**Barış BORU**

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRONİK ve  
BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**


Bu tez 07/09/ 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Hüseyin EKİZ

Jüri Başkanı

  
Y. Doç. Dr. Halil İbrahim  
ESKİKURT

Üye

  
Doç. Dr. Halit YAŞAR

Üye

  
Y. Doç. Dr. Mehmet YAKUT

Üye

  
Doç. Dr. Ahmet Turan  
ÖZCERİT

Üye

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince çalıőmalarımı teővik eden, her tűrlű yardımlarını esirgemeyen danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim ESKİKURT ve eő danıőmanım Prof. Dr. Adnan PARLAK'a minnet borçluyum. Deneysel dűzeneėinin kurulması deneyler sırasında desteklerini esirgemeyen deėerli mesai arkadaşlarım Arő. Gűr. İdris CESUR, Yrd. Doç. Dr. Vezir AYHAN, Arő. Gűr. Tufan KOÇ'a; bilgisayar ortamında sinyal iőleme ve YSA model oluőturma aőamalarında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Devrim AKGŪN ve Arő. Gűr. Sezgin KAÇAR'a teőekkűrű bir borç bilirim. Tez alıőmam Sakarya Ūniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatűrlűėű tarafından "2012-05-04-012" ve "2009-50-02-025" numaralı projeler ile desteklenmiőtir. Mali desteklerinden dolayı SAŪ BAPK'a teőekkűr ederim. Ayrıca bu gűnlere gelmemi saėlayan anne ve babama, baőından sonuna kadar çalıőmalarımı sabırla destekleyen eőime sonsuz teőekkűr ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY .....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Literatürde Yer Alan Dolaylı Basınç Ölçüm Metotları .....	4
1.1.1. Motor titreşim ölçümleri.....	4
1.1.2. Krank mili hızlanma ölçümleri.....	5
BÖLÜM 2.	
DİZEL MOTORLARA GENEL BAKIŞ.....	11
2.1. Dizel Motorlarda Yanma ve Safhaları .....	12
2.2. Dizel Motorlarda Kirletici Emisyonlar .....	14
2.2.1. Hidrokarbonlar (HC) .....	14
2.2.2. Karbonmonoksit (CO) .....	15
2.2.3. İs (Duman) emisyonu .....	15
2.2.4. Azot oksitler (NO <sub>x</sub> ) .....	15
2.3. Dizel Motorlarda Bazı Parametrelerin NO <sub>x</sub> Emisyonları Üzerine Etkisi	16
2.4. Dizel Motorlarda NO <sub>x</sub> Kontrol Yöntemleri .....	17
2.5. Dizel Motorlarında Piston Yolu ve Hızının Hesaplanması .....	21

## BÖLÜM 3.

DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM METOTLARI .....	23
3.1. Araştırmada Kullanılan Ölçme Donanımları .....	23
3.1.1. Deney düzeneği .....	23
3.1.2. Deney motoru .....	24
3.1.3. Dinamometre .....	25
3.1.4. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi.....	26
3.1.5. Sıcaklık ölçümleri.....	28
3.1.6. Emisyon ölçümü .....	28
3.1.7. Silindir içi basınç sensörü.....	29
3.1.8. Basınç sensörünün motora yerleştirilmesi .....	30
3.1.9. Şarj amplifikatörü .....	30
3.1.10. Enkoderler.....	31
3.1.11. Üst ölü nokta sensörü.....	31
3.1.12. Enkoder ve üst ölü nokta sensörünün düzeneğe bağlanması....	32
3.1.13. Vuruntu sensörü.....	32
3.1.14. Veri toplama kartı .....	34
3.2. Kullanılan Yazılımlar .....	36
3.2.1. Labview programı.....	37
3.2.2. Matlab programı .....	38
3.3. NOx Emisyonlarının Elektronik Buhar Püskürtme Sistemi ile Kontrolü	39
3.3.1. Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi tasarımı .....	39
3.3.2. Enjektör parametrelerinin tespiti .....	42
3.4. Deney Motorunun EKBPS İçin Revizyonu .....	46
3.4.1. Gaz kolu potansiyometresinin motora bağlanması.....	46
3.4.2. Motor emme hattına buhar enjektörünün konumlandırılması ....	47
3.4.3. Atık ısı kazanı (eşanjör).....	47
3.5. Veri Toplama Sistemi .....	48
3.5.1. Veri toplama sisteminin kurulumu .....	49
3.5.2. Veri toplama yazılımı .....	50
3.5.3. Hız dalgalanması ölçümü ve hassasiyet .....	51
3.5.4. Üst ölü noktanın tespiti.....	53

3.6. Ölçüm Verilerinin Matlab'a Aktarılması ve Oluşturulan Arayüz .....	54
3.7. Deney Yöntemi .....	56
3.8. Matematiksel Hesaplamalar.....	57
3.8.1. Döndürme momenti ve efektif güç .....	58
3.8.2. İndike verim.....	59
3.8.3. Özgül yakıt sarfıyatı .....	59

## BÖLÜM 4.

SİLİNDİR İÇİ BASINCIN DOLAYLI ÖLÇÜMÜ .....	60
4.1. Basınç, Titreşim ve Hızlanma Bilgilerinin Analizi.....	61
4.1.1. Fourier dönüşümü .....	62
4.1.2. Eğri uydurma tekniği.....	63
4.2. Titreşim Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi .....	65
4.2.1. İstenmeyen bileşenlerin titreşim bilgisinden ayrıştırılması.....	66
4.2.2. En büyük titreşim genliğinin elde edilmesi.....	69
4.2.3. Toplam mutlak titreşim değeri .....	69
4.2.4. Titreşim bilgisinin fourier dönüşümü.....	70
4.3. Hızlanma Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi .....	72
4.3.1. Hızlanma bilgisi için eğri uydurma denklemleri.....	73
4.3.1.1. Oransal polinom .....	73
4.3.1.2. Gauss denklem serileri .....	74
4.3.1.3. Fourier serileri .....	78
4.4. Basınç Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi .....	81
4.4.1. Basınç bilgisi için eğri uydurma denklemleri .....	82
4.4.1.1. Gauss denklem serileri .....	82
4.4.1.2. Fourier serileri .....	85
4.4.2. Kullanılacak eğri uydurma denklemlerinin belirlenmesi .....	89
4.4.3. Eğitim setinin seçilmesi ve hazırlanması .....	90
4.5. Radyal Temelli Yapay Sinir Ağları .....	92
4.5.1. Kullanılan yapay sinir ağı modeli .....	94
4.5.2. Kullanılan RBF ağının eğitimi .....	96
4.5.3. RBF ağının testi ve oluşturulan test arayüzü.....	96

BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR .....	98
5.1. Geliştirilen Dolaylı Ölçüm Metodundan Elde Edilen Sonuçlar .....	98
5.2. Performansa Dayalı Emisyon Sisteminden Elde Edilen Sonuçlar .....	103
BÖLÜM 6.	
GENEL DEĞERLENDİRME.....	110
KAYNAKLAR .....	114
ÖZGEÇMİŞ .....	123

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$b_e$	: Efektif özgül yakıt sarfiyatı
$b_i$	: İndike özgül yakıt sarfiyatı
C	: Karbon
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
d/d	: Devir/dakika
F	: Fren terazi kuvveti
$F(\omega)$	: Frekans uzayındaki fonksiyon
$f(t)$	: Zaman uzayındaki fonksiyon
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
H <sub>2</sub> O	: Su buharı
H <sub>u</sub>	: Yakıtın alt ısı değeri
kW	: Kilowatt
kHz	: Kiloherz
l	: Strok (piston kursu)
M <sub>d</sub>	: Döndürme momenti
mg	: Miligram
mV	: Milivolt
$\dot{m}_y$	: Yakıtın kütleli debisi
n	: Motor devri, devir/dakika
N	: Tur başına pals(darbe) değeri
N <sub>2</sub>	: Azot
Nm	: Newton metre
NO	: Azot monoksit



$\text{NO}_2$	: Azot dioksit
$\text{NO}_x$	: Azot oksit
$\text{O}_2$	: Oksijen
ppm	: Milyonda bir partikül
pC	: Pikokulomb
$P_i$	: İndike güç
$P_e$	: Efektif güç
r	: Krank mili yarıçapı
rms	: Etkin değer
rpm	: Bir dakikada yapılan devir
s	: Piston yolu
$\text{SO}_2$	: Kükürt dioksit
$t_0$	: Enjektör açılma gecikmesi zamanı
$t_i$	: Enjektöre uygulanan sinyal süresi
$x[n]$	: Ayrık örneklenmiş işaret
$\hat{x}_{ji}$	: Giriş değeri için ara katmandaki RBF merkezi
$x_{ji}$	: Giriş setindeki j. değer
Vc	: Yanma odası hacmi
$W_G(\alpha)$	: Titreşim verisinde kullanılan pencere
$W_H(\alpha)$	: Hann pencere
$W_E(\alpha)$	: Exponansiyel pencere
$w_{im}$	: i. ara katman ve m. çıkış katmanı arasındaki ağırlık
$w_o$	: Çıkış katmanındaki bias terimi
$y_{net}$	: n. giriş için çıkış katmanındaki çıkış değeri
$\alpha$	: Krank açısı
$\rho_y$	: Yakıtın yoğunluğu
$\tau$	: Zaman sabiti
$\omega$	: Açısal hız, frekans
$\eta_e$	: İndike verim
$\lambda$	: Biyel kolu uzunluğunun krank yarıçapına oranı
$\Delta V$	: Tüketilen yakıt hacmi
$\Delta t$	: Yakıt tüketme süresi

$ \Delta_v $	: Toplam mutlak titreşim
$v_n$	: Her örnekte alınan titreşim genliği
$\sigma_i$	: i. RBF genişliği
$\rho_y$	: Yakıt yoğunluğu
ADC	: Analog-dijital çevirici
AÖN	: Alt Ölü Nokta
BAM	: Buji ateşlemeli motor
DAQ	: Veri toplama kartı
DFT	: Ayrık fourier dönüşümü
ECU	: Elektronik motor kontrol ünitesi
EGR	: Egzoz gazı resürkilasyonu
EKBPS	: Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi
FFT	: Hızlı fourier dönüşümü
H/Y	: Hava-yakıt oranı
IMEP	: İndike ortalama efektif basınç
KA, KMA	: Krank mili açısı
KSPS	: Saniyede alınan örnek miktarı
ÖYS	: Özgül Yakıt Sarfıyatı
PDES	: Performansa dayalı emisyon sistemi
RBF	: Radyal temelli fonksiyon
RBFN	: Radyal temelli yapay sinir ağı
SAM	: Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlar
ÜÖN,TDC	: Üst ölü nokta
YSA	: Yapay sinir ağı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dört zamanlı bir dizel motorunun şematik şekli ve temel parçalar....	11
Şekil 2.2.	Dört zamanlı bir dizel motorunda bir çevrimdeki zamanlar .....	12
Şekil 2.3.	Dizel motorunda yanma safhaları.....	13
Şekil 2.4.	Motor giriş havası konsantrasyonunun değişiminin NO miktarına etkisi .....	17
Şekil 2.5.	Bir dizel motoruna gönderilen su oranının NO üzerine etkisi .....	19
Şekil 2.6.	Silindir içerisine gönderilen su oranına bağlı olarak yanma sonu maksimum sıcaklık ve NO .....	20
Şekil 2.7.	Motor geometrisi .....	21
Şekil 3.1.	Deney düzeneği .....	23
Şekil 3.2.	Deney düzeneğinin şematik görünümü .....	24
Şekil 3.3.	Deney motoru .....	25
Şekil 3.4.	Deneylerde kullanılan dinamometre, dinamometre kontrol panosu ve loadcell.....	25
Şekil 3.5.	Yakıt ölçüm düzeneği ve blok diyagramı .....	26
Şekil 3.6.	Yakıt ölçüm düzeneğine ait akış diyagramı .....	27
Şekil 3.7.	Sıcaklık ölçüm için kullanılan gösterge .....	28
Şekil 3.8.	Emisyon ölçüm cihazı .....	29
Şekil 3.9.	Deneylerde kullanılan silindir içi basınç sensörü.....	29
Şekil 3.10.	Silindir içi basınç sensörünün motora konumlandırılması.....	30
Şekil 3.11.	Şarj amplifikatörü.....	31
Şekil 3.12.	Heidenhain Rod 426-3600(a) ve Peperl Fuchs TRD-AK360-GCS(b) enkoderleri. ....	31
Şekil 3.13.	Deney düzeneğinde kullanılan enkoderler ve üst ölü nokta sensörünün montajı.....	32
Şekil 3.14.	Kullanılan Vuruntu Sensörü.....	33

Şekil 3.15. Vuruntu sensörünün motor üzerine montajı.....	34
Şekil 3.16. DAQ kart, NI USB-6251 Mass Term .....	36
Şekil 3.17. EKBPS'ye ait blok diyagram .....	40
Şekil 3.18. EKBPS'yi kontrol etmek amacıyla tasarlanan arayüz .....	41
Şekil 3.19. EKBPS'de kullanılan mikrodenetleyici ve kontrol devresini içeren kutu.....	41
Şekil 3.20. Enjeksiyon sinyali ( $t_i$ ) ve püskürtülen yakıt miktarı ölçümü.....	43
Şekil 3.21. Enjektör parametre tespiti için hazırlanan arayüz .....	43
Şekil 3.22. İki farklı enjektör için elde edilen enjektör parametreleri .....	44
Şekil 3.23. Farklı yakıt hattı basınçları için enjektör parametre değişimi .....	45
Şekil 3.24. Standart ve 24v, 2R durumlarında enjektör parametre grafikleri.....	46
Şekil 3.25. Gaz kolu potansiyometresinin motor üzerine konumlandırılması .....	47
Şekil 3.26. Buhar enjektörünün motor emme hattı üzerine konumlandırılması...	47
Şekil 3.27. Atık ısı kazanı ve üzerindeki ekipmanlar .....	48
Şekil 3.28. Veri toplama sisteminin şematik gösterimi .....	50
Şekil 3.29. Veri toplama sistemi donanımlarının deney sırasında ki görünümü..	50
Şekil 3.30. Veri toplama programına ait kullanıcı arayüzü.....	51
Şekil 3.31. Devire göre hız ölçüm hassasiyeti.....	53
Şekil 3.32. ÜÖN'nin kompresyon ölçümü ile deneysel olarak tespiti .....	54
Şekil 3.33. Verilerin Matlab'a aktarılması için hazırlanan arayüz .....	55
Şekil 3.34. (a) 5 Çevrimlik bir tdms dosya içeriği (b) Arayüz ile 1 çevriminin ayrıştırılması .....	56
Şekil 4.1. Tam yük 1600 d/d alınan bir ölçüm ve istenmeyen titreşim bileşenleri .....	65
Şekil 4.2. Titreşim bilgisi için kullanılan pencere .....	67
Şekil 4.3. Bir çevrim için titreşim bilgisinin pencereden geçirilmesi .....	67
Şekil 4.4. Çeşitli çalışma koşulları için titreşim verilerinin pencerelemesi .....	68
Şekil 4.5. Bir çevrim için en yüksek titreşim genliğinin elde edilmesi.....	69
Şekil 4.6. Toplam mutlak titreşim değeri .....	70
Şekil 4.7. Tam yük 1000 d/d için elde edilen titreşim fourier dönüşüm katsayıları genlik değerleri .....	72

Şekil 4.8. Tam yük 1600,2200 d/d için elde edilen titreşim fourier dönüşüm katsayıları genlik değerleri .....	73
Şekil 4.9. Oransal polinom denkleminin tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması .....	74
Şekil 4.10. 8. dereceden Gauss denkleminin Tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması .....	75
Şekil 4.11. Farklı çalışma koşulları için hızlanma-bilgisinin 8. derece gauss denklemine uydurulması .....	76
Şekil 4.12. Bir hızlanma bilgisinin 8 adet gauss serisi toplamıyla elde edilmesi.	77
Şekil 4.13. 8. dereceden Fourier serisinin Tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması .....	78
Şekil 4.14. Bir hızlanma bilgisinin 8 adet fourier serisi toplamıyla elde edilmesi .....	79
Şekil 4.15. 8. dereceden Fourier serisinin çeşitli motor çalışma koşullarındaki hız bilgilerine uydurulması.....	81
Şekil 4.16. 8. dereceden gauss denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması .....	83
Şekil 4.17. Bir basınç bilgisinin 8 adet gauss serisi toplamıyla elde edilmesi .....	84
Şekil 4.18. Farklı çalışma koşulları için basınç bilgisinin 8. derece gauss denklemine uydurulması .....	85
Şekil 4.19. 8. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması .....	85
Şekil 4.20. Bir basınç bilgisinin 8 adet fourier serisi toplamıyla elde edilmesi ...	86
Şekil 4.21. 15. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması .....	87
Şekil 4.22. Farklı çalışma koşulları için basınç bilgisinin 15. derece fourier denklemine uydurulması .....	88
Şekil 4.23. Ölçüm yapılan çalışma koşulları .....	91
Şekil 4.24. Eğitim ve doğrulama seti oluşturma aşamaları .....	92
Şekil 4.25. RBFN'lerin genel yapısı.....	93
Şekil 4.26. Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için oluşturan RBF modeli .....	96
Şekil 4.27. YSA kontrolü için hazırlanan Matlab arayüzü.....	97

Şekil 5.1. Tam yük 1200, 1600, 2000, 2400 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.2. Tam yük doğrulama setinden elde edilen 60 farklı çevrim için dolaylı ölçüm metodunun hata değerleri .....	100
Şekil 5.3. % 80 yük 1400, 2000 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 5.4. %60 yük 1000, 2200 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 5.5. %40 yük 1200, 1800 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 5.6. %20 yük 1400, 2000 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması.....	102
Şekil 5.7. Kısmi yük doğrulama setinden elde edilen 50 farklı çevrim için dolaylı ölçüm metodunun hata değerleri .....	102
Şekil 5.8. %10-30 buhar oranının standart verilere göre NO <sub>x</sub> emisyonları üzerine etkisi.....	104
Şekil 5.9. %10-30 buhar oranının standart verilere göre özgül yakıt sarfiyatı üzerine etkisi.....	105
Şekil 5.10. %10-30 buhar oranının standart verilere göre indike verim üzerine etkisi .....	106
Şekil 5.11. %10-30 buhar oranının standart verilere göre indike güç üzerine etkisi .....	107
Şekil 5.12. PDES ile 900,1300,1700,1900 d/d için optimum buhar oranlarının tespit edilmesi.....	109

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. DeneY motorunun teknik özellikleri.....	24
Tablo 3.2. Basınç sensörü teknik özellikleri .....	29
Tablo 3.3. Şarf amplifikatörün teknik özellikleri .....	30
Tablo 3.4. Kullanılan vurutu sensörünün teknik özellikleri .....	33
Tablo 3.5. DAQ kart özellikleri .....	36
Tablo 3.6. Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları.....	57
Tablo 4.1. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen oransal polinom katsayıları.....	74
Tablo 4.2. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen gauss denklem katsayıları.....	75
Tablo 4.3. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen 8. derece fourier denklem katsayıları .....	80
Tablo 4.4. 8. dereceden gauss denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması ile ortaya çıkan katsayılar .....	83
Tablo 4.5. 15. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması ile ortaya çıkan katsayılar .....	87
Tablo 5.1. Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm yönteminin başarımlıyla ilgili istatıksel bilgiler .....	103
Tablo 5.2. Tüm deneY devirleri için elde edilen optimum buhar püskürtme aralıkları.....	108

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Silindir içi basınç, dolaylı ölçüm, performansa dayalı emisyon kontrolü, otomotiv elektroniği

İçten yanmalı motorlarda silindir içi basınç eğrisinin ölçümü; hata analizi, çalışma şartlarının gerçek zamanlı optimize edilmesi, performans ve emisyon kontrolü açısından çok önemli bir rol oynamaktadır. Buna karşın silindir içi basıncın bir sensör ile yanma odasından doğrudan ölçümü ekonomik ve pratik bir çözüm değildir. Bu sebeple basıncın dolaylı ölçümünü mümkün kılan bir metot geliştirilmesi üzerine bir çok araştırma bulunmaktadır.

Motor çalışması sırasında gerçek zamanlı olarak performans ve emisyonun beraber optimize edecek Performansa Dayalı Emisyon Sisteminin (PDES) gerçekleştirilmesindeki en büyük zorluk araç üzerinde güç ölçümüdür. Bu çalışmada yeni bir dolaylı silindir içi basınç ölçüm metodu geliştirilmiş ve bu metot güç ölçümü için kullanılarak bir PDES tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodu motor yüzeysel titreşim ve krank mili hız dalgalanma bilgilerine karşın basınç eğrisini üretmektedir. Tasarım sırasında düşük maliyetli, az işlem yüküne sahip, araçlara pratik uygulanabilir bir metot geliştirilmesi hedeflenmiştir. Dolaylı ölçüm metodunun geliştirilmesi tek silindirli bir dizel motor ile kurulan deney düzeneğinden elde edilen gerçek ölçümlere dayandırılmıştır. Bu metot, titreşim ve hızlanma bilgilerini FFT, Eğri Uydurma, Filtreleme gibi sinyal işleme teknikleri ile ön işlemden geçirmekte ve basıncı üretmek için bir Radyal Temelli Yapay Sinir Ağı (RBFN) barındırmaktadır. Metodun başarımlı ölçümü doğrudan ölçüm ile alınan gerçek basınç eğrileri karşılaştırılarak yapılmış ve yeterli seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Performansa dayalı emisyon sisteminde dizel motorlarda popüler bir NOX emisyon azaltma tekniği olan buhar enjeksiyonu uygulanmıştır. Motora buhar sevki için bir elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi (EKBPS) tasarlanmıştır. PDES sisteminde dolaylı ölçülen basınç değerleri ile elde edilen indike verim ve indike güç değerleri ve emisyonlar beraber dikkate alınarak optimum buhar oran aralığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, emisyon ve performansı beraber optimize ederek çalışan yeni bir emisyon kontrol sistemi gerçekleştirilmiştir.



# **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PERFORMANCE BASED EMISSION SYSTEM USING INDIRECT PRESSURE MEASUREMENT**

## **SUMMARY**

Keywords: In-cylinder pressure, indirect measurement, performance-based emission control, automotive electronics

In internal combustion engines, the measurement of in-cylinder pressure curve plays a very important role in terms of error analysis, real-time optimization of working conditions, performance and emission control. However, direct measurement of cylinder pressure inside the combustion chamber with a sensor is not an economical and practical solution. For this reason, a lot of study has been done for developing a method makes indirect measurement of pressure possible.

The biggest challenge is measurement of power on the vehicle for implementing the Performance-Based Emission System (PBES) which optimizes both performance and emissions during engine operation. In this study, a new indirect measurement method of in-cylinder pressure has been developed. A PBES has been designed and implemented by using this method for power measurement.

The method of indirect pressure measurement produces pressure curve against engine structural vibration and the crankshaft speed fluctuation. During the design period it was aimed to develop a method which has low cost and low processing load and can be practically applied for vehicle. The method of the indirect measurement has been based on real data obtained from the experiment set equipped with a single-cylinder diesel engine. This method has pre-processed the vibration and speed fluctuation data through signal processing techniques such as FFT, Curve Fitting and filtering. and it consists of a Radial Based Artificial Neural Network (RBFN) to produce pressure. Performance measurement of the method has been done by comparing pressure curves obtained by direct measurement and it has been determined that the level is adequate.

In performance based emission system the steam injection, a popular NO<sub>x</sub> reduction technique has been applied. An electronically controlled steam injection system (ECSIS) has been designed to send steam to engine. In PBES system, the optimum range of steam ratio has been calculated by taking emissions, indicated power and efficiency obtained from indirect pressure measurement into account As a result, a new emission control system which optimizes the emission and performance together has been implemented successfully.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Isı enerjisini mekanik enerjiye çeviren içten yanmalı motorlar insanlığın makinelere iş yaptırma gereksinimini karşılamaktadırlar. İçten yanmalı motorlar, 19. yy'dan bu yana özellikle otomotiv sanayiinde kullanılmaktadır. Son yıllarda, motorlu taşıtların sayısının hızla artmasına paralel olarak dünyadaki petrol rezervleri hızla tükenmekte ve petrolün fiyatı da buna paralel olarak yükselmektedir. Ayrıca şehirlerin kalabalıklaşması ve doğal yaşamın zarar görmesi çevreye duyarlılık bilincini arttırmaktadır. Bu nedenlerle içten yanmalı motorlar 19. yy'dan bu yana bir gelişim süreci içinde olmuşlar ve halen geliştirme süreci devam etmektedir. İçten yanmalı motor geliştirmesinde ekonomik olarak motor veriminin yükseltilmesi ve en düşük zararlı egzoz gazları salınımının mümkün kılınması hedeflenmektedir. Bu amaçların ancak, elektronik ve yazılım teknolojilerinin motorlarda kullanılması ile mümkün olacağı gözükmemektedir. Elektronik teknolojisinin gelişmesiyle günümüz motorları hali hazırda elektronik devreler, elektronik sensör ve aktüatörlerle donatılmışlardır. Bu motorlarla pratik olarak yüksek verimlere ulaşmasına rağmen, bu motorların gelişimi için tüm olanaklar henüz bitmiş değildir. Daha iyi bir karışım teşkili, daha mükemmel bir yanma ile çevrim parametrelerinin yükseltilmesi olasıdır. Bunun sonucunda daha az yakıt sarfiyatı ve yüksek güç elde edilecektir. Diğer taraftan, her geçen gün ağırlaştırılan egzoz emisyon normları motor üreticileri ve araştırmacıları sürekli daha iyi motor kontrol ve hata izleme teknikleri geliştirmeye zorlamaktadır.

İçten yanmalı motorlarda; silindir içi basıncın ölçülmesi, motor performansının geliştirilmesi, emisyon kontrolü, gürültü kontrolü ve motor çalışmasının izlenmesi ve optimizasyonu açısından çok önemli rol oynamaktadır [1]. Laboratuvar şartlarında silindir içi basınç ölçümü 1950'li yılların başından itibaren yanma analizi yapabilmek açısından araştırmacıların ilgi alanları arasına girmiştir. Fakat günümüzde gerçek zamanlı motor kontrolünü ve çalışma esnasında hata denetimini

mümkün kılmak adına araç üzerinde basınç ölçüm metotları geliştirilmeye çalışılmaktadır [2]. İçten yanmalı motorlarda silindir içi basınç ölçümünün bir geri besleme sinyali olarak çalışma ortamında gerçekleştirilebilmesi birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Kapalı çevrim ateşleme avansı ve yakıt hava karışımı kontrolü en önemli yararlarından bir tanesidir [2–4]. Yürürlükte bulunan veya gelecekte çıkarılacak egzoz emisyon normları, emisyon kontrolü açısından motor izleme ve kontrol yöntemleri üzerindeki ilgiyi arttırmaktadır. Her koşulda gerçek zamanlı olarak kontrol ile tam yanmanın sağlanması ile eksik yanma ürünü olan zararlı egzoz gazlarının azaltılabilmesi mümkün olmaktadır [2]. Zararlı egzoz gazlarının araç üzerinde ölçümü mümkün olmadığından silindir içi, basınç eğrisi ile gerçek zamanlı emisyon tahminini mümkün kılan yöntemler geliştirilmesi olasıdır [5,6]. Emisyon tahmini sayesinde geri beslemeli emisyon odaklı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi içten yanmalı motor gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır.

Bir basınç sensörü kullanılarak motor yanma odasından doğrudan basınç bilgisinin elde edilmesi çeşitli kısıtlamalar nedeniyle ancak laboratuvar şartlarında mümkün olabilmektedir. Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için, maliyeti yüksek ancak yüksek doğruluğa ve ölçüm hassasiyetine sahip basınç sensörlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu sensörler, motor üst kapağından her silindirin yanma odasına açılacak bir kanal ile silindir içi basınca doğrudan maruz kalacak şekilde motora monte edilmelidirler. Sensörlerin montajı için açılacak kanala uygun bir yer bulunması, mevcut motorların karışık yapısı göz önüne alındığında hayli güçtür. Ayrıca yanma odası ortamındaki yüksek basınç, sıcaklık ve titreşime maruz kalan silindir içi basınç sensörlerinin çalışma ömrü kısıtlı olmaktadır. Piyasada bulunan silindir içi basınç sensörlerinin çalışabileceği çevrim sayısı ile ifade edilen tanımlanmış çalışma ömürleri bulunmaktadır. Silindir içi basıncın doğrudan ölçümü ile ilgili diğer bir zorluk ise kalibrasyon ile ölçüm hatalarının en aza indirilmesidir. Silindir içi basınç sensörleri piezo-elektrik sensörlerdir ve doğru ölçüm için çok hassas bir şekilde belli zaman aralıklarıyla kalibre edilmelidirler.

Yukarıda bahsedilen kısıtlamalar nedeniyle silindir içi basıncın doğrudan ölçümü çok pahalı ve uygulama güçlüğü olan bir metot olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenlerle doğrudan ölçüm metodu akademik çalışmalarda ve ar-ge çalışmalarında laboratuvar ortamında uygulanabilmektedir. Silindir içi basınç bilgisinin ölçümünün bu denli önemli olması nedeniyle, araç üzerinde veya çalışma ortamında kullanılacak alternatif bir yöntem geliştirilmesi son yıllarda araştırmacıların önemli çalışma konularından bir tanesi haline gelmiştir. Bu çalışmalarda iki farklı yaklaşım ortaya çıkmıştır: yüzeysel titreşimler kullanılarak gerçekleştirilen dolaylı ölçüm metotları ve krank mili hız dalgalanması kullanılarak gerçekleştirilen dolaylı ölçüm metotları.

Farklı frekans bantlarında olmak üzere hem titreşim hem de krank açısı hız dalgalanma (hızlanma) değerleri silindir içi basınçla alakalı bilgiler içermektedir. Motor hızındaki dalgalanmalar, silindir içi basıncın alçak frekans bileşenlerinden dolayı ortaya çıkmaktadır [7]. Oysaki hızlanma, ani basınç değişimleri hakkında yüzeysel titreşimler kadar detaylı bilgi içermemektedir. Yüzeysel titreşim bilgileri ise alçak frekanslarda düşük sinyal aktarım oranları içermektedir. Bu nedenle tek başına kullanıldığında silindir içi basıncın tahmini güçleşmektedir.

Silindir içi basınç eğrisinin tahmini ve dolaylı ölçümü konusunda yapılan çalışmaların birçoğu açısal hızlanma ve/veya yüzeysel titreşim bilgilerinin farklı yapay zekâ teknikleri ile silindir içi basınç eğrisinin tekrar elde edilmesi, maksimum basıncın olduğu noktanın ve ateşleme hatalarının tespiti üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların çoğunda ölçüm verileri istenmeyen bileşenlerden ayrıştırılarak ve bir dizi ön işlemlerden geçirilerek kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların hemen hepsinde deneysel yolla elde edilen silindir içi basınç ve hızlanma bilgileri eğitim seti olarak kullanılmış ve geliştirilen tekniğin başarı oranı yine deneysel ölçümler ile karşılaştırılarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

## 1.1. Literatürde Yer Alan Dolaylı Basınç Ölçüm Metotları

### 1.1.1. Motor titreşim ölçümleri

Yanma sonucunda ortaya çıkan silindir içi basınçtaki ani değişimler, motor titreşiminde bir artışa sebep olmaktadır. Bu titreşimler yanma periyoduyla ilgili bilgiler içermektedir ve genellikle silindir kapağına veya motor bloğuna yerleştirilecek bir ivme ölçer ile kolaylıkla okunabilmektedir. Günümüzde elektronik kontrol birimine (ECU) sahip motorlarda vuruntu tespiti ve kontrolü, hata tespiti ve motor kontrolü amacıyla vuruntu sensörü bulunmaktadır [8]. Vuruntu sensörü, düzensiz çalışmayı algılamak amacıyla kullanılmaktadır ve ölçüm aralığı dar olan düşük maliyetli bir ivme ölçerdir. Ayrıca vuruntu sensörü literatürde yapılan çalışmalarda yanma başlangıcının tespiti ve kontrolü, optimum enjeksiyon ve ateşleme noktasının tespiti ve emisyon kontrolü gibi çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [9]. Fakat motor titreşimleri yanma periyodu ile ilişkili olmayan titreşim bileşenleri de içermektedir. Bu istenmeyen bileşenlere örnek olarak; piston çarpmaları (motor ÜÖN ve AÖN geçişleri sırasında ortaya çıkmaktadır), yakıt pompası tahriki, supap ve dişli sarsıntıları verilebilir [10]. Bu nedenle yüzeysel titreşim ölçümüne dayanan metotlarda, karşılaşılan en önemli güçlük bu istenmeyen bileşenlerin doğru olarak ayrıştırılmasıdır [11]. İstenmeyen bileşenlerin ayrıştırılması için filtreleme, zaman ekseninde pencereleme, örüntü tanıma ve k-ortalamarı kümeleme gibi yöntemler geliştirilmiştir [12–14]. Titreşim kullanılarak dolaylı silindir içi basınç ölçümü için titreşimin filtrelenmesi [15], ters filtreleme [7,12,16–21] ve yapay sinir ağları kullanımı [11,22] gibi farklı metotlar önerilmiştir.

M. Wagner ve ark., buji ateşlemeli bir motorda titreşim bilgisinin uygun bir filtre ile filtreleyerek silindir içi basıncı elde etmeye çalışmışlardır. Bu yöntem düşük motor hızları için uygun sonuçlar üretse de yüksek motor hızlarında silindir içi basınç eğrisini elde edememektedir [15].

Ters filtreleme tekniği motor gövdesinin lineer zaman bağımlı bir sistem olarak modellenebileceği yaklaşımına dayanmaktadır. Bu modelde titreşim bilgisinin

silindir içi basıncın etkisiyle ortaya çıktığı düşünülerek titreşim bilgisinden model yapısı çıkış-giriş şeklinde ters çalıştırılarak silindir basıncı elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu metot kullanımında en büyük zorluk elde edilen model frekans tepki fonksiyonu, doğrusal olmayan bir sistem olan motorlar için sistem hız ve yük durumlarına göre değişkenlik arz etmektedir. Bu nedenle daha kesin çözümler elde etmek için “cepstral analizi” kullanılmıştır [7,16–21,23]. Cepstral analizi; sistem için elde edilen frekans spektrumu üzerinde yapılan analizler neticesinde elde edilen bir ağırlıklama fonksiyonu ile istenmeyen frekans ve faz bileşenlerinin zayıflatılması olarak özetlenebilir. V.G. Zurita ise, cepstral analizi yerine her çalışma koşulu için farklı transfer fonksiyonu katsayıları içeren bir matris kullanarak bu problemi aşmaya çalışmıştır [20].

Yapay sinir ağları, doğrusal olmayan yapılarından dolayı titreşim ve silindir içi basınç arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi modellemek için uygundur. H. Du ve ark., titreşim sinyalinin güç spektrumundan silindir içi basıncı elde etmek için Radyal Temelli Yapay Sinir Ağı kullanmışlardır [22].

### **1.1.2. Krank mili hızlanma ölçümleri**

Pistonun hareketi sırasında krank mili hızı değişkenlik arz etmektedir. Piston hızı AÖN ve ÜÖN’ da sıfır olmakta, strok ortasında maksimuma ulaşmaktadır (Detaylı bilgi için Bkz: Bölüm 2.5). Motor çalışma esnasında hız sürekli dalgalanmaktadır. Aslında motor çıkışında devir göstergesinde okunan hız bir çevrim için ortalama hızdır. Bu dalgalanma sıkıştırma ve yanma periyotlarında daha da fazla olmaktadır. Sıkıştırma zamanında silindir içinde bulunan hava-yakıt karışımı sıkıştırılarak bir iş yapılmaktadır. Bu nedenle piston zorlanarak hız kaybetmekte, krank hızı normalden daha aşağıya inmektedir. Pistonun ÜÖN’yi geçmesinin hemen ardından yakıtın hızlı bir şekilde tutuşması ve gazların genişlemesiyle basınç artmakta, piston üzerine uygulanan tork çıkış torkunun üzerine çıkarak pistonu hızlandırmaktadır. Sonuçta krank açısına göre ortaya çıkan bu hız dalgalanması, onu oluşturan sıkıştırma ve yanma sürecindeki basınç değişimi hakkında bilgi içermektedir. Araştırmacılar, yukarıda bahsedilenlerin ışığında hız dalgalanmasından (hızlanma) silindir içi

basıncın elde edilmesi amacıyla farklı metotlar geliştirmişlerdir. Bu metotlar: matematiksel motor modelleri [24–30], örüntü tanıma [31], ters filtreleme [32] ve Yapay Sinir Ağlarıdır [33–36].

Matematiksel motor modelleri, tork balans denklemlerinin numerik olarak çözümlenmesine dayanmaktadır [24–28]. Bu metotların sakıncası ise, tork balans denkleminin çözümlenebilmesi için bazı ihmaller ve yaklaşımların yapılmasıdır. Çalışmaların hemen hepsinde değişken atalet momenti ihmal edilerek bir sabit atalet moment değeri kullanılmaktadır. Fakat Shiao ve ark. atalet momentinin açısız bağımlılığının yüksek olduğunu göstermişlerdir. Bu bağımlılık özellikle silindir sayısı az olan motorlarda daha da fazla artmaktadır [37]. E. Weißenborn ve ark., bu problemi aşmak için indike ortalama efektif basıncı (IMEP), hızlanma bilgisinden elde edecek ampirik formül temelli bir model oluşturmuşlardır [38]. Bu model içerisine adaptif kalman filtreleme ve durum uzay analizi katarak her çalışma durumunda farklı olarak ortaya çıkan gereksiz katsayıların ihmal edilmesini sağlamışlardır. Sonuçta farklı motorlar için çalışabilen hızlanma bilgisinden IMEP değerini elde edebilen bir model üretilmiştir. Ayrıca F. Cruz-Peragon, matematiksel motor modellerinde bilinmeyen parametrelerin en iyi şekilde tespit edilebilmesi için genetik algoritma kullanmıştır [29]. Deneysel ölçüm verileri ile modelde bulunan hızlanma değerleri üzerinde genetik algoritma kullanarak gerçeğe en uygun parametreleri tespit etmeye çalışmıştır. Elde ettiği sonuçlar ile 3 farklı motor için silindir içi basınç eğrisini hızlanma bilgisinden elde etmiştir.

Matematiksel modeller içerisinde değerlendirilebilecek farklı bir yaklaşım ise M.S. Shehata tarafından geliştirilmiştir [30]. Shehata, hızlanma bilgisinin ayrık fourier dönüşümünü alarak frekans içeriğini elde etmiştir. Frekans bileşenlerini kullanarak basınç ile hız arasındaki ilişkiyi yine frekans içeriği olarak oluşturacak bir ampirik formül oluşturmuştur. Bu ampirik formül neticesinde elde edilen katsayıları ters fourier dönüşümüne uygulayarak silindir içi basıncı elde etmiştir.

Örüntü tanıma, farklı motor çalışma koşullarında deneysel yolla elde edilen hızlanma ve buna karşılık basınç değerlerini barındıran bir veri tabanı kullanmaktadır. Çalışma

sırasında ölçülen hızlanma sinyali, veri tabanındaki sinyallerle karşılaştırılarak hızlanmaya karşılık gelen basınç bilgisi elde edilmeye çalışılmaktadır. Bütün çalışma koşullarının ölçülerek bir veri tabanında saklanması mümkün değildir. Bu nedenle veri tabanında bulunmayan çalışma koşullarında basıncı elde edebilmek için bir ara değerlendirme tekniği kullanılmalıdır. Brown ve Neill, doğrusal yapıda istenilen yük ve devir için en yüksek basıncı tahmin etmek için interpolasyonla beraber örüntü tanıma kullanmışlardır [31].

Titreşim bilgisinde olduğu gibi Yapay Sinir Ağları hızlanma ve silindir içi basınç arasındaki ilişkiyi öğrenmek için uygundur. P.J. Jacob ve arkadaşları basınç eğrisinin elde edilebilmesi için radyal temelli yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır [34]. P.J. Jacob ile aynı araştırma grubunda olan F. Gu ve arkadaşları bu model ile en yüksek basınç değerini %5 hata ile elde etmişlerdir [33]. R. Potenza ve ark. 3 silindirli bir dizel motorda enkoder (açısal konum algılayıcı) kullanarak ölçtükleri hızlanma bilgisi ve krank kinematik denklemini kullanarak silindir içi basınç eğrisini elde etmek için iki adet NARX Yapay Sinir Ağı modeli oluşturmuşlardır [36]. Bu modeller için iki farklı eğitim algoritması geliştirilerek ölçümle elde edilen veri setini eğitim için kullanmışlardır. İlk YSA modeli ile, enkoder pozisyonu ile krank kinematik denklemi arasındaki ilişkiyi, ikinci YSA ile de krank kinematik denklemi ile basınç arasındaki ilişkiyi kurarak farklı çalışma koşulları için hızlanmaya karşılık silindir içi basınç eğrisini elde etmişlerdir.

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için yüzeysel titreşim ve hızlanma ölçümünün tek başına kullanımında çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Ayrıca silindir içi basıncın dolaylı ölçümünün laboratuvar şartları yerine pratik olarak araç üzerindeki motorlarda kullanımı gündeme geldiğinde yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır. Hız dalgalanması, aracın ataleti ile birleşeceğinden laboratuvar şartlarından farklı olarak ortaya çıkacaktır. Motor titreşimlerine ise diğer araç titreşimleri ve yol şartlarından kaynaklanan titreşimler ilave olacaktır. Bu nedenle titreşim ve hızlanma bilgisinin beraber kullanımı daha olumlu sonuçlar verecektir. R. Johnsson 6 silindirli bir dizel motorda titreşim ve hızlanma bilgileri farklı çalışma koşulları için, deneysel ölçülen verileri kullanmıştır [11]. Çalışmasında, istenmeyen titreşim bileşenlerini ayırmak



için V.G. Zurita tarafından önerilen pencereyi kendi problemine uyarlayarak kullanmıştır. Titreşim, hızlanma ve basınç bilgilerini fourier dönüşümünü alarak dolaylı basınç ölçümü için frekans ve faz katsayılarını kullanmıştır. Fourier bileşenlerindeki kompleks katsayıları da modeline dâhil edebilmek için Kompleks Radyal Fonksiyon YSA kullanmıştır. YSA titreşim ve hızlanma girişine karşın basıncın fourier katsayılarını üretmektedir. Elde edilen bu katsayılar ters fourier dönüşümü ile silindir içi basınç eğrisine dönüştürülmektedir. R. Johnsson, bu çalışmada YSA eğitime dâhil edilmeyen çalışma koşulları için 5 bar hata ile silindir içi basıncı elde edebilmiştir. R. Johnsson tarafından yapılan çalışma, diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında farklı çalışma koşulları için daha doğru sonuçlar elde edildiği görülmektedir. [11].

Bu çalışmada; titreşim ve hızlanma bilgilerini beraber kullanarak düşük maliyetli, az işlem yükü gereksinimi duyan, araçlar üzerinde pratik uygulamaya uygun yeni bir dolaylı silindir içi basınç ölçüm metodu geliştirilmesi hedeflenmiştir. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, titreşim ve hızlanma bilgilerinin basınç eğrisini elde edilebilmesine imkân tanıdığı görülmektedir. Geliştirilen yeni dolaylı ölçüm metodu deneysel olarak tek silindirli bir dizel motor üzerinden elde edilen titreşim, hızlanma ve basınç ölçüm veri seti kullanılarak tasarlanmıştır. Sistemin uygulanabilirliğini arttırmak amacıyla, titreşim ölçümleri için günümüz motorlarında hali hazırda vuruğu tespiti için kullanılan vuruğu sensörleri tercih edilmiştir. Hızlanma ölçümü için ise bir artımlı enkoder kullanılmıştır. Artımlı enkoder elektronik kontrol ünitesine sahip günümüz araçlarında krank pozisyonu ve hız ölçümü için bulunan devir sensörü ile aynı çalışma prensibine sahip olduğu için tercih edilmiştir.

Yapay sinir ağları doğrusal olmayan yapılarından dolayı çeşitli motor problemleri için olumlu sonuçlar vermektedir [39]. Bu çalışmada da basıncın dolaylı olarak elde edilebilmesi için Radyal Temelli Yapay Sinir Ağı kullanılmıştır. Ağ çıkışında elde edilen basınç eğrileri deney motoru üzerinden elde edilen gerçek verilerle karşılaştırılarak sistemin performansı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada dolaylı basınç ölçüm metodunun geliştirilmesinin ardından dizel motorlarda emisyon kontrolüne yeni bir yaklaşım olarak Performansa Dayalı Emisyon Sistemi (PDES) geliştirilmiştir. Emisyon kontrol yöntemlerinde genellikle emisyonları düşürmek amacıyla EGR, alkol karışımları, su enjeksiyonu vb. uygulamalar yapılmaktadır (detaylı bilgi için bkz: Bölüm 2.2.). Bu çalışmalarda emisyon kontrol yöntemi uygulanırken sadece motor emisyon çıkışı dikkate alınmaktadır. Oysa ki emisyon kontrol yöntemlerinin tamamında, motora uygulanan ek girdi oranı değiştirildikçe emisyon ile beraber motor performansı ve verimi de değişmektedir.

Dizel motorlarında zararlı emisyonların başında  $\text{NO}_x$  emisyonları gelmektedir. Mevcut  $\text{NO}_x$  kontrol yöntemlerinden popüler bir tanesi de buhar enjeksiyonudur [40]. Buhar püskürtme tekniğinde, buhar püskürtme oranı arttıkça  $\text{NO}_x$  emisyonlarında azalmalar görülmektedir. Oysa ki, belli bir buhar püskürtme oranına kadar motor performans parametrelerinde maksimum iyileşmeler oluşmakta, bu noktadan sonraki buhar püskürtme oranlarında iyileşme oranı azalmaktadır [41]. Bu nedenle  $\text{NO}_x$  emisyonları ve performansın beraber iyileştirilebilmesi için çalışma sırasında her koşulda en uygun buhar oranının tespit edilmesi gerekmektedir.

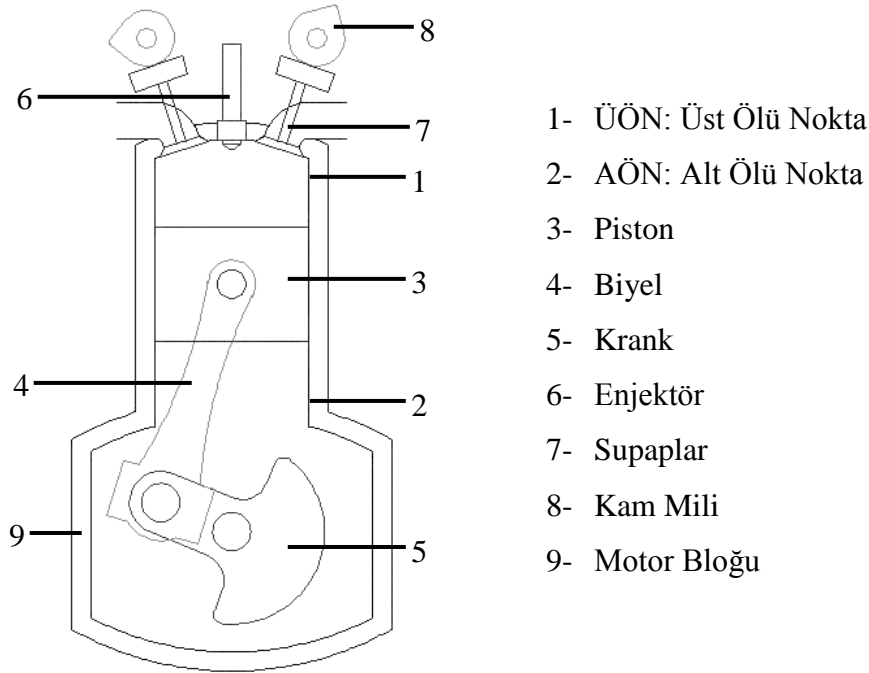
PDES'in gerçekleşmesinde en önemli zorluk olan araç üzerinde güç ölçümü için geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodu kullanılmıştır. PDES gerçekleştirilirken, dizel motorlarından salınan  $\text{NO}_x$  emisyonlarının kontrolü için su buharı enjeksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Su buharı, motor egzoz kayıp ısısından üretilen bir atık ısı kazanı ile elde edilmiştir. Deneysel çalışmada gerekli olan buhar miktarı, motorun bir çevrimde tüketmiş olduğu yakıtın farklı kütle oranlarında, geliştirilen EKBPS ile motor emme manifolduna, selenoid kontrollü enjektör vasıtasıyla gönderilmektedir.

PDES ile  $\text{NO}_x$  emisyonları ve motor performans parametreleri beraber izlenerek optimum buhar oranı tam yük şartlarında çalışan farklı motor devirleri için tespit edilmiştir. PDES'te motor performansı değerlendirme parametreleri olarak indike verim ve indike güç seçilmiştir. PDES'te indike verim ve indike gücün en yüksek

olduğu aralık tespit edilerek bu aralıktaki buhar oranları tercih edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları her buhar oranı için iyileştiğinden; buhar enjeksiyonunda PDES yaklaşımı ile, NO<sub>x</sub> emisyonları ve motor performansını optimum yapan buhar püskürtme oranları tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 2. DİZEL MOTORLARA GENEL BAKIŞ

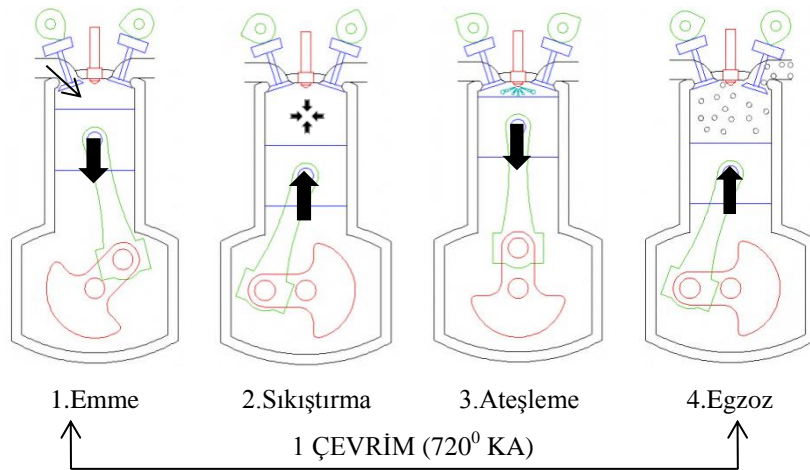
İçten yanmalı pistonlu motorlar, yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüşmesi sonucu sıcaklık ve basınçları yükselen yanma gazlarının genişmesini piston, biyel ve krank mili yardımıyla mekanik işe dönüştürmektedir. İçten yanmalı pistonlu motorlar çalışma prensiplerine göre, Buji Ateşlemeli Motorlar (BAM) ve Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlar (SAM, dizel motorları) olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Bu tez çalışmasında, deneylerin gerçekleştirilmesinde dizel motor kullanıldığı için, bu kısımda dizel motorları ele alınmıştır. Şekil 2.1’de tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorunun şematik şekli ve temel parçaları görülmektedir [42].



Şekil 2.1. Dört zamanlı bir dizel motorunun şematik şekli ve temel parçalar [42]

Dört zamanlı içten yanmalı bir dizel motorunda bir çevrim  $720^\circ$  krank mili açısında (KMA) yani iki krank mili turunda meydana gelmektedir. Çevrimi meydana getiren

zamanlar ise sırasıyla; emme, sıkıştırma, iş (ateşleme) ve egzoz zamanı olarak isimlendirilir. Bu zamanların oluşumu BAM ve Dizel motorlarında farklı şekillerde gerçekleşmektedir. Benzin motorlarında homojen benzin-hava karışımı silindir içerisinde sıkıştırılarak buji vasıtasıyla tutuşturulmakta ve yanma reaksiyonları başlamaktadır. Dizel motorlarda ise, emme zamanında sadece atmosfer havası silindire alınmaktadır. Sıkıştırma oranının çok yüksek olmasından dolayı strok sonunda silindire alınan havanın sıcaklığı oldukça yüksektir. Yakıt, sıkıştırılmak suretiyle sıcaklığı ve basıncı yükseltilecek hava içerisine üst ölü noktadan (ÜÖN) önce püskürtülmeye başlanır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle silindire püskürtülen yakıt tanecikleri, küçük moleküllere parçalanmakta, buharlaşmakta ve kimyasal reaksiyonlar başlamaktadır. Yanma sonucu oluşan gazlar silindir içinde sıcaklığın artmasına neden olurlar. Sıcaklık artarken basınç da artar ve pistonu harekete zorlar. Bu hareket piston-biyel mekanizması ile krank miline iletilir. Krank milinin dönme hareketinden iş elde edilir. Böylece ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmüş olur. Bu şekilde çalışan dizel motorlara “dört zamanlı dizel motorlar” denilmektedir. Şekil 2.2’de, dört zamanlı bir dizel motorda bir çevrimdeki zamanların oluşumu görülmektedir.



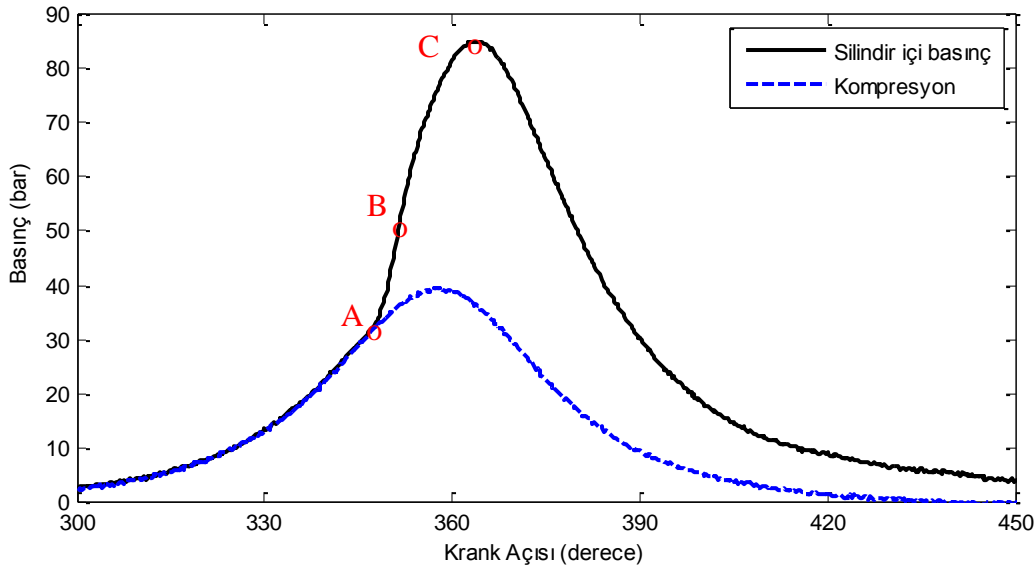
Şekil 2.2. Dört zamanlı bir dizel motorunda bir çevrimdeki zamanlar [42]

### 2.1. Dizel Motorlarda Yanma ve Safhaları

Ricardo; dizel motorlarında yanma olayının üç safha halinde gerçekleştiğini ileri sürmüştür [43]. Bunlar; tutuşma gecikmesi, kontrolsüz yanma ve kontrollü yanma

safhalarıdır [44]. Şekil 2.3'te dizel motoruna ait yanma safhaları silindir içinde yanma olayı olmaksızın elde edilen basınç (kompresyon) ve yanma anında elde edilen basınç grafikleri üzerinde görülmektedir.

- Tutuşma Gecikmesi (A): Yakıtın püskürtülmeye başlandığı an ile silindir içerisinde ilk alev çekirdeğinin oluşması arasında geçen süreçtir. Püskürtülen yakıt damlacıklarının buharlaşması belli bir süre almaktadır. Damlacıkların etrafında püskürtmenin hemen ardından bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu buhar tabakasında başlamaktadır [40].



Şekil 2.3. Dizel motorunda yanma safhaları.

- Kontrolsüz yanma (B): Bu safhada, tutuşma gecikmesi süresince silindirlere gönderilen yakıt yanma odasının sıcak olmasından dolayı, buharlaşarak küçük zerreciklere ayrılmaktadır. Yakıt zerrecikleri, yanma başladığında oksijenle temas etmekte ve çok büyük bir hızla yanmaktadır. Bu yanma hızı, silindir içerisindeki basınç artma hızını da belirler. Yanmanın bu safhası tutuşma gecikmesine oranla çok daha kısa olduğundan yakıtın büyük bir kısmı tutuşma gecikmesi süresince püskürtülmektedir. Dolayısıyla maksimum basıncı, tutuşma gecikmesi tayin etmektedir [40].

- Kontrollü yanma (C): Kontrolsüz yanma süresi sonundaki basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğundan, bu safhayı takiben püskürtülen yakıt, oksijen bulunca hemen yanar. Yanmaya hazır karışım miktarı ile yanma kontrol edilir. Bu safhadaki yanma hızı, yakıt buharı ile havanın karışmasına bağlıdır. Verimin yüksek olması için yanmanın ÜÖN'ya mümkün olduğunca yakın tamamlanması istenir [40,45] .

Kontrollü yanma ile egzoz supabının açılmasına kadar geçen süre, yakıtın küçük bir kısmı henüz yanmadığından, art yanma olarak kabul edilebilir. Yakıtça zengin yanma ürünleri ve is (duman) içindeki enerji hala açığa çıkabilir. Bu safhada yanma tamamlanmakta, silindir hacminin artması sebebiyle de basınç ve sıcaklık düşmektedir [40,46,47].

## **2.2. Dizel Motorlarda Kirletici Emisyonlar**

Dizel motorlarda fosil kökenli yakıtların kullanımı ve çalışma koşullarından dolayı egzoz emisyonlarında kirletici emisyonlar bulunmaktadır. Dizel motorlardan çevreye salınan zararlı bileşenler, karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrokarbon (HC), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve is emisyonlarıdır. Dizel motorlarının yapısal özellikleri ve çalışma prensiplerinden dolayı BAM'lara göre, kısmi eksik yanma ürünleri olan CO ve HC emisyonları çok yüksek değerlerde olamamakla birlikte, is ve NO<sub>x</sub> emisyonları oldukça yüksektir. Dizel motorlarda yanma sonucu egzozdan çevreye salınan emisyonlar ve oluşum mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.

### **2.2.1. Hidrokarbonlar (HC)**

Hidrokarbonlar, yakıtların eksik yanması veya tutuşamaması sonucu ortaya çıkar. Yanma odasını çevreleyen dar boşlukların sıkıştırma esnasında yakıt-hava karışımı ile dolması, yakıtın yağ tabakaları içinde emilimi, kalıntıların yağ filmi etkisi göstermesi, silindir içinde sıvı yakıt kalması ve supap yatak boşluklarında karışım sızması şeklindeki mekanizmalar en önemli HC kaynaklarıdır. HC'lerin oluşmasının ana nedeni sıcaklığın veya oksijenin yetersiz kalmasıdır. Dizel motorlarında yanma

sonucu açığa çıkan HC miktarı, silindire gönderilen karışım fakir olduğu için benzinli motorlara kıyasla oldukça azdır [45].

### **2.2.2. Karbonmonoksit (CO)**

Karbon monoksit, yakıt içindeki karbonun yanma esnasında yeterince oksijenle reaksiyona girememesinden dolayı meydana gelmektedir. Dizel motorlarda, karışım oranı motorun yük durumuna ve dönme sayısına göre değiştirilmekte ve motor genelde fakir karışımlarda çalışmaktadır. Düşük yüklerde motor oldukça fakir karışım ile çalıştığı ve sıcaklıklar düşük olduğu için CO oksidasyonu az olmaktadır. Motor yükü arttırıldıkça, sıcaklıklarda arttığından CO'nun dönüşümünü sağlayan reaksiyonlar hızlanmakta ve CO emisyonunda azalma olmaktadır.

### **2.2.3. İs (Duman) emisyonu**

İçten yanmalı motorlar tarafından üretilen katı taneciklerin büyük bir bölümünü is oluşturmaktadır. İs yanmamış karbon partikülleridir. Dizel motorlarda silindir içinde bulunan yakıt damlasının içindeki Hidrojen ( $H_2$ ) molekülleri, hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte ve geriye kalan karbon (C) yeterli oksijen ( $O_2$ ) bulamadığından yanamarak is partikülleri halinde dışarı atılmaktadır [48]. İs oluşumunun temel nedeni dizel yakıtının silindir içinde yeterli hava bulamaması veya zamanında hızla hava ile karışamaması ve buharlaşmamasıdır.

### **2.2.4. Azot oksitler ( $NO_x$ )**

Azot oksitler, motorlarda yanma sırasında ulaşılan yüksek sıcaklıklarda havanın içindeki azotun ( $N_2$ ), oksijen ( $O_2$ ) ile reaksiyona girmesi sonucu oluşurlar [46,49].

Dizel motorlarda  $NO_x$  emisyonlarının oluşumunun en önemli kaynağı yüksek sıcaklıklardır. Özellikle yanma sonu sıcaklık  $1800\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaştığında, karışım içindeki hava iyonize olmakta ve açığa çıkan azot tekrar oksijen ile birleşerek  $NO_x$  emisyonlarını oluşturmaktadır. NO oluşumunun kritik periyodu, yanmanın başladığı



anla maksimum basıncın görülmesinden hemen sonraki nokta arasında kalan zaman dilimidir. Yanma safhasında erken yanan karışım, özellikle önem arz etmektedir. Zira, yanma devam ettiği ve silindir basıncı arttığı için, yanmış gazların sıcaklığı daha yüksek bir değere çıkar ve NO oluşum hızının artmasına neden olur [46]. NO<sub>x</sub> oluşumu aynı zamanda, yakıt hava karışımına da bağlıdır.

NO<sub>x</sub> oluşumu üzerinde kimyasal reaksiyonların hızları da etkili olmaktadır. Ancak bu hızlar da sıcaklığa bağlıdır. Bu sebeple NO<sub>x</sub> gazlarını azaltmanın en etkili yolu yanma odası içindeki sıcaklığın 1800 °C'nin üzerine çıkmasını önlemek veya yüksek sıcaklıklarda kalınan süreyi mümkün olduğunca kısa tutmaktır [46,50,51].

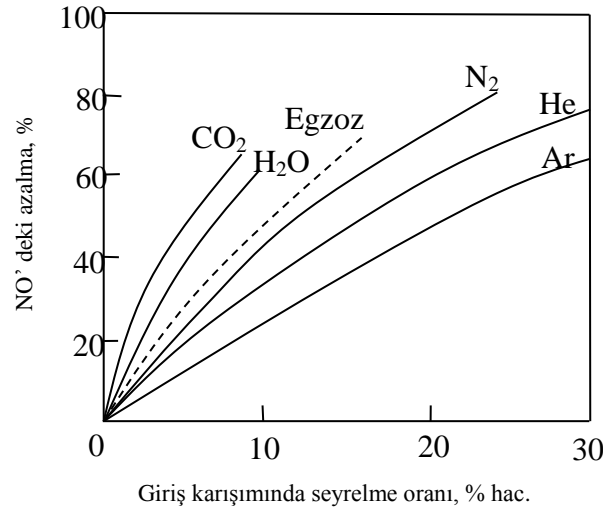
Dizel motorlarda motor çalışma karakteristiği ve yapısal özelliklerine ilişkin bazı parametrelerin değişimi egzoz gazı içerisindeki NO<sub>x</sub> miktarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametrelerden bazıları aşağıda verilmiştir.

### **2.3. Dizel Motorlarda Bazı Parametrelerin NO<sub>x</sub> Emisyonları Üzerine Etkisi**

- Hava fazlalık katsayısı: Dizel motorlarında silindir içerisindeki hava yakıt oranı ise %0 ile %100 arasında olur [47]. Hava yakıt oranının (H/Y) değişimi yanma esnasında ulaşılan sıcaklıkları etkilerken, aynı zamanda yanma odasında mevcut oksijen miktarını da belirlemektedir. NO<sub>x</sub>'lerin oluşumu hem sıcaklığın hem de mevcut oksijen miktarının fonksiyonu olduğu için, H/Y oranından önemli ölçüde etkilenir [52].

- Dolgu sıcaklığı ve basıncı: Dolgu sıcaklık ve basıncının NO<sub>x</sub> emisyonuna önemli ölçüde etkisi vardır. Düşük dolgu sıcaklığı ve basıncında NO<sub>x</sub> emisyonları düşüktür. Dolgu basınç ve sıcaklığının artırılması tutuşma gecikmesini kısaltır. Yakıtın püskürtülmesi sırasında silindir içi sıcaklığının daha fazla olmasına, dolayısıyla NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olur [53].

- Havadaki nem oranı: Havanın içerisindeki nem miktarı giriş havasının ısı yutma kapasitesini attırdığından yanma sonucu ulaşılan maksimum sıcaklığın düşmesine neden olmaktadır. Bu durum yanma sonunda açığa çıkan  $\text{NO}_x$  miktarını azaltır. Şekil 2.4'de motora giren hava içerisindeki su oranı değişiminin NO oluşumu üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.4. Motor giriş havası konsantrasyonunun değişiminin NO miktarına etkisi [46]

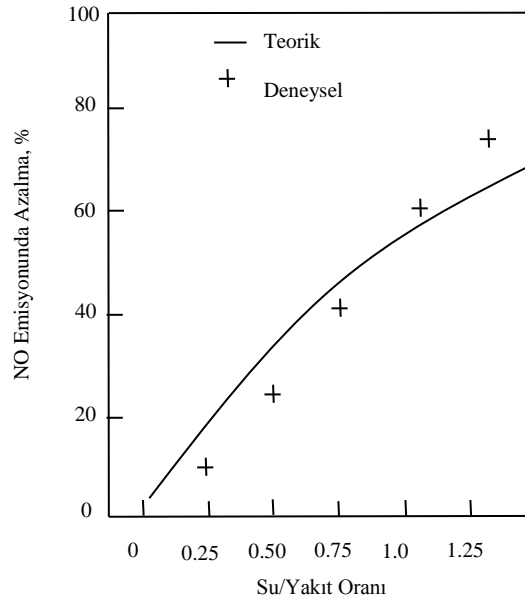
## 2.4. Dizel Motorlarda $\text{NO}_x$ Kontrol Yöntemleri

$\text{NO}_x$  emisyonlarını kontrol etmek amacıyla dizel motorlarında farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar, yanma öncesi alınan önlemler (yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi), yanma esnasında alınan önlemler (yanmanın ve yanma odasının modifikasyonu) ve yanma sonrası alınan (egzoz devresinde) önlemler olarak sınıflandırılabilir. Dizel motorlarından salınan  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaltılmasında araştırmacılar tarafından kullanılan en etkili önlemler, egzoz gazlarının geri sevki (EGR), motora su gönderme ve buhar püskürtme işlemleridir.

- Egzoz gazlarının silindire geri sevki (EGR): Egzoz gazının silindire geri sevk sistemi (EGR) yanma sonucu oluşan ürünlerden bir kısmının tekrar silindire gönderilerek yanmaya dahil edildiği bir işlemdir. EGR ile silindir içerisine giren oksijenin bir kısmının yerini atık gazlar aldığından bölgesel oksijen konsantrasyonu

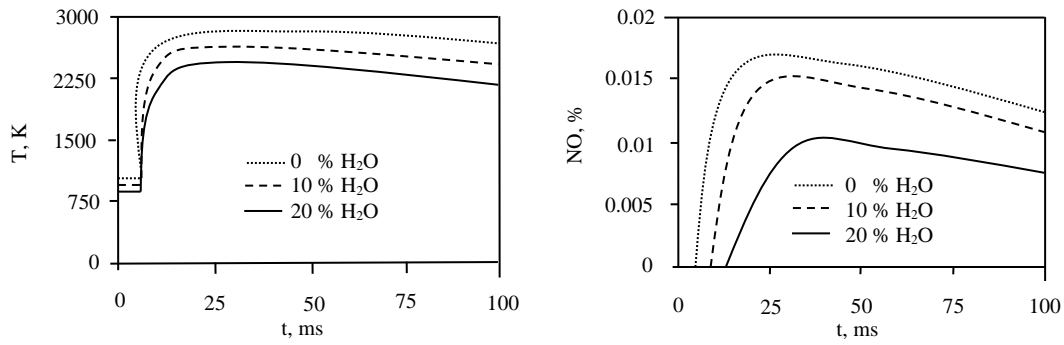
azalmaktadır. Bu durum yakıt ve oksijen moleküllerinin reaksiyona girme ihtimalini azaltır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek,  $\text{NO}_x$  oluşumu azaltmaktadır. EGR, motordan salınan  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaltılmasında etkili bir yöntemdir. Ancak,  $\text{NO}_x$  emisyonlarını azaltırken motor performansını ve dizel motorlar için önem arz eden partikül madde emisyonlarında kötüleşmelere sebebiyet vermektedir [54]. Bu sebeple EGR oranı çok yüksek tutulmamaktadır.

- Motora su gönderilmesi: İçten yanmalı motorlardan, özellikle de dizel motorlardan çevreye salınan zararlı  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaltılması için kullanılan yöntemlerden biri de motor silindirine suyun sevidir. Literatürde,  $\text{NO}_x$  emisyonlarını azaltmak ve içten yanmalı motorlarda yanma verimini arttırmak amacıyla yanma odasına suyun gönderilmesi ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [40,55–60] . Suyun yanma odasına sevki farklı şekillerde olabilmektedir. Bunlar; dizel yakıtına belirli oranlarda suyun katılması (emülsiyon halinde gönderilmesi), emme havası içerisine suyun püskürtülmesi ve doğrudan silindir içerisine enjeksiyon şeklinde gerçekleştirilmektedir [61,62]. Kaynaklarda dizel yakıtı ile birlikte su kullanımı durumunda maksimum alev sıcaklığının düştüğü ve  $\text{NO}_x$  emisyonlarında dikkate değer oranda azalmaların meydana geldiği ifade edilmektedir [63–67]. Şekil 2.5'te bir dizel motoruna gönderilen su oranına bağlı olarak  $\text{NO}_x$  emisyonlarındaki değişim görülmektedir.



Şekil 2.5. Bir dizel motoruna gönderilen su oranının NO üzerine etkisi [68]

Motor silindirine suyun sevk edilmesi silindir içerisindeki yanma ürünlerinin ısı kapasitesini arttırmaktadır. Standart şartlarda çalışan motorda silindir içerisine doldurulan ideal gaz kabul edilen atmosfer havasıdır. Su püskürtülmesi durumunda ise yanma ürünleri hava ve su karışımından oluşmaktadır. Greeves ve Ark. [69] teorik çalışmalarında, su damlacıklarının buharlaşması için yakıttan daha fazla ısı çektiğini ve bu sebepten dolayı yanma sonu maksimum sıcaklığın düştüğünü ve buna bağlı olarak da  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaldığını ifade etmişlerdir. Şekil 2.6'da silindire farklı oranlarda su gönderilmesi durumunda yanma sonu maksimum sıcaklık ve NO değerlerinin değişimi görülmektedir.



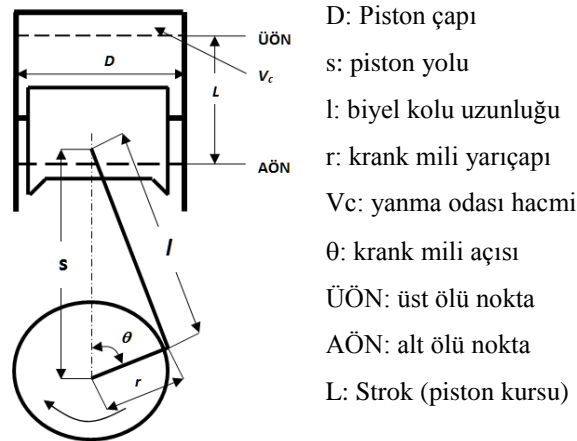
Şekil 2.6. Silindir içerisine gönderilen su oranına bağlı olarak yanma sonu maksimum sıcaklık ve NO miktarlarındaki değişim [70]

Motor silindirine suyun sevk edilmesi durumunda, su damlacıklarının yakıt damlacıklarından daha önce buharlaşmasından dolayı, yakıt hava karışımının daha iyi olması sağlanmaktadır. Yakıt hava karışımının standart motora göre iyileşmesinin motor performansında iyileşmelere neden olduğu belirtilmiştir [71].

- Motora Buhar Enjeksiyonu: Dizel motorlarda NO<sub>x</sub> kontrol yöntemi olarak buhar enjeksiyonun etkileri Ayhan ve Ark. tarafından incelenmiştir [40,41]. Bu çalışmada, buhar enjeksiyonun dizel motorlarda yoğun olarak görülen NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılması üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, emme havası içerisine su buharı püskürme yöntemi doğrudan enjeksiyonlu, su soğutmalı bir dizel motorunda denenmiştir. Çalışmada, egzoz gazının ısısından elde edilen su buharının, emme periyodunda (emme supabı açık iken) değişen yük ve devir durumlarına bağlı olarak elektronik kontrollü enjektör vasıtasıyla silindire gönderilmesi durumunda performans, NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarındaki değişimler standart motor verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, püskürtülen buharın çevrim boyunca yoğunlaşma sınırına ulaşmadan egzozdan atılması için termodinamik olarak püskürtülebilecek buhar yüzdesi (termodinamik sınır) teorik olarak hesaplanmıştır. Bu teorik modelde egzoz gazının atık ısı kullanılarak entalpisi yükseltilecek su buharının yanma odasına sevkinin performans ve ısıl verime etkisi de hesaplanmıştır.

## 2.5. Dizel Motorlarında Piston Yolu ve Hızının Hesaplanması

Bu çalışmada silindir içi basıncın dolaylı ölçümünde krank hızı dalgalanması kullanıldığından bu kısımda piston yolu ve hızının teorik hesabına yer verilmiştir. Pistonun silindir içerisinde ÜÖN ile AÖN arasında dört hareketinde bir iş yapan motorlara dört zamanlı (emme-sıkıştırma-iş-egzoz) motorlar denilmektedir. Teorik olarak tek silindirli bir dizel motorun çevrimi dikkate alındığında, güç üretimi ve zamanların oluşumu şu şekildedir; emme zamanı, piston hızının sıfır olduğu ÜÖN’den harekete başlayıp tekrar hızının sıfır olduğu AÖN’ya gelmesi ile bitmektedir. Sıkıştırma zamanı, pistonun tekrar ÜÖN’ya gelmesi ile biter. İş zamanı, yakıtın ısıya dönüşmesi sonucu açığa çıkan basınç kuvvetinin pistonu hızlı bir şekilde AÖN’ye itmesiyle oluşur. Egzoz zamanı ise, silindir içerisinde reaksiyonlar sonucu oluşan emisyonların dışarı süpürülmesi işlemi olup ÜÖN’da sona ermektedir. 720° KMA’nda meydana gelen bu evrelerde pistonun hızı her noktada ayrı değere sahip olmaktadır. Piston hızı, strok başlangıcında sıfır, strokun ortalarına doğru maksimum ve strok sonunda tekrar sıfıra düşer. Şekil 2.7’de silindir, piston ve krank-biyel mekanizması geometrisi görülmektedir.



Şekil 2.7. Motor geometrisi

İçten yanmalı motorlarda krank milinin açısına bağlı olarak piston yolu ve hızını veren bağıntılar aşağıda verilmiştir [72].

Piston Yolu;

$$s = r(1 - \cos \theta + \frac{\lambda^2}{2} \sin^2 \theta) \quad (2.1)$$

burada:

$\lambda$ : krank mili açısı ( $\lambda = \frac{l}{r}$ )

Piston Hızı;

$$V_p = \omega r (\sin \theta + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \theta) \quad (2.2)$$

Burada:  $\omega$ , krank milinin motor devrine bağlı açısal hız bağıntısı olup,  $\omega = \pi n / 30$  bağıntısıyla hesaplanmaktadır. (n=motor devir sayısı, dev/dak.)

Yukarıda Denklem 2.2'de piston hızının krank mili açısına bağlı değişimi görülmektedir. Denklemde açı değerinin sıfır olduğu durumda piston hızının 0 olduğu, 90 derecede ise maksimum olduğu görülmektedir ( $\sin 0^0 = 0$ ,  $\sin 90^0 = 1$ ).

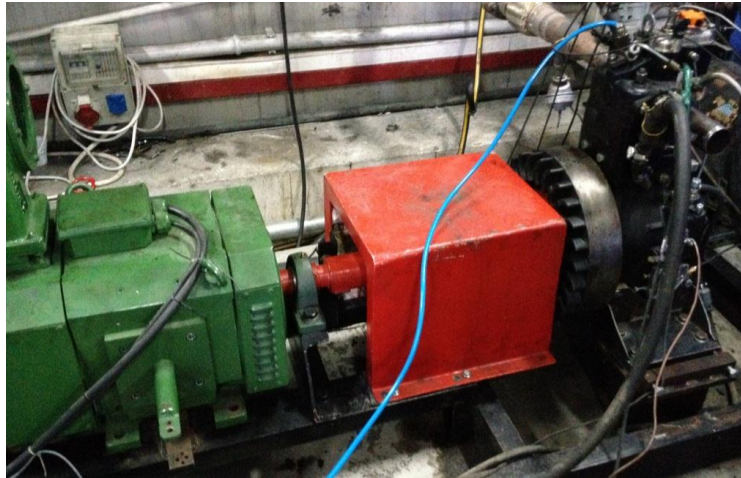
## BÖLÜM 3. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM METOTLARI

### 3.1. Araştırmada Kullanılan Ölçme Donanımları

Araştırma sırasında, deneylerin gerçekleştirilmesine yönelik olarak çeşitli ölçme donanımlarından faydalanılmıştır. Temel parçaları olarak motor, dinamometre, atık ısı kazanı ve elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi içeren bir deney düzeneği kurulmuştur. Kullanılan ölçme donanımları ve oluşturulan deney düzeneği aşağıda özetlenmektedir.

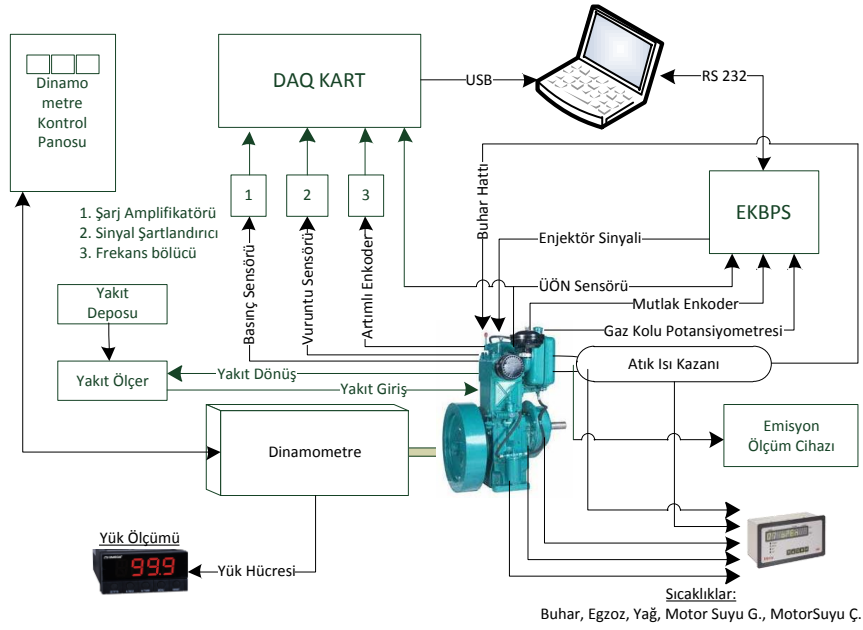
#### 3.1.1. Deney düzeneği

Bu çalışmadaki deneysel araştırmaların yapılabilmesi amacıyla bir deney düzeneği kurulmuştur. Deneyler Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı Deney Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.1'de ve deney düzeneğine ait blok diyagram şematik gösterimi Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği





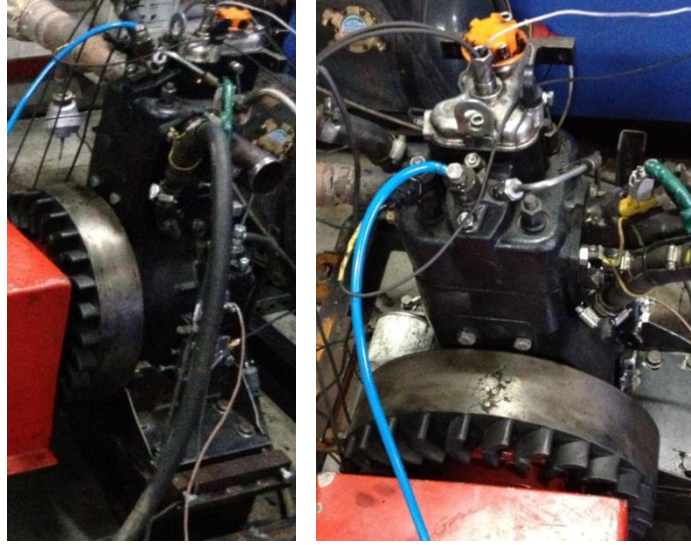
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

### 3.1.2. Deney motoru

Deneylerde tek silindirli, doğrudan püskürtmeli, doğal emişli, dört zamanlı ve su soğutmalı Lombardini marka 4 LD 820 model numaralı bir dizel motor kullanılmıştır. Tablo 3.1’de deney motorunun teknik özellikleri, Şekil 3.3’de ise deney motorunun görünümü verilmiştir.

Tablo 3.1. Deney motorunun teknik özellikleri

Motor Tipi	Lombardini
Piston Çapı [mm]	102
Strok [mm]	100
Silindir Sayısı	1
Strok Hacmi [cm <sup>3</sup> ]	817
Güç, [BG]	17
Sıkıştırma Oranı	17:1
Soğutma Tipi	Su
Yakıt Tipi	Dizel



Şekil 3.3. Deney motoru

### 3.1.3. Dinamometre

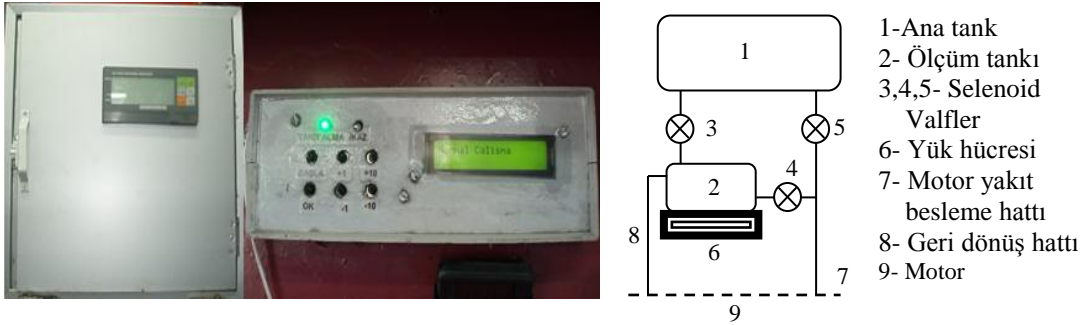
Deney motoru çalışmalar sırasında, Kemsan marka 20 kW güç yutma kapasitesine sahip elektrikli bir dinamometre ile yüklenmiştir. Motor tarafından üretilen gücün tespiti için dinamometre koluna 0,1 kg hassasiyetinde S tipi loadcell (yük hücresi) bağlanmıştır. Ölçme hatalarını minimize etmek için deneylere başlamadan önce loadcell göstergesinin ölçüm kalibrasyonu yapılmıştır. Şekil 3.4’de dinamometrenin ve dinamometre koluna bağlantısı yapılan loadcellin görünümü verilmiştir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan dinamometre, dinamometre kontrol panosu ve loadcell

### 3.1.4. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi

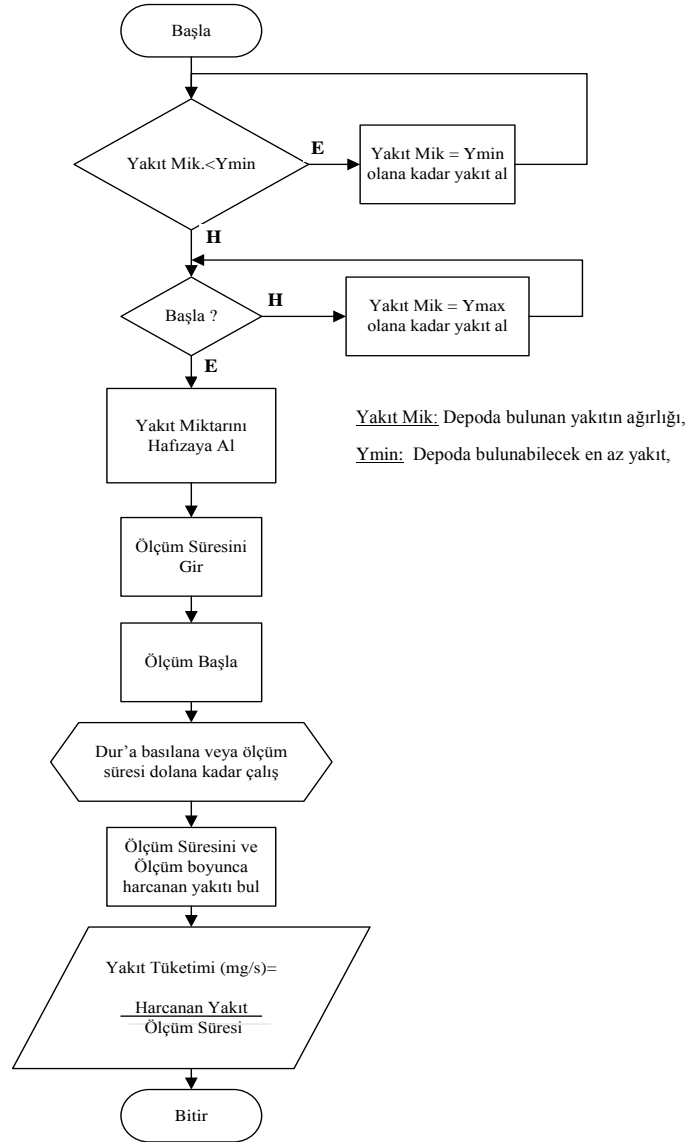
Motor yakıt sarfiyatının hassas olarak ölçülebilmesi için (daha önce 101M269 nolu TÜBİTAK projesinde geliştirilen yakıt ölçüm düzeneği) elektronik kontrollü yakıt ölçüm düzeneği yazılımsal ve elektronik olarak revize edilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Yakıt ölçme sistemi, deney şartlarında yakıt sarfiyatının kütleli ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır. Sistemde küçük bir yakıt deposu bulunmakta ve bu yakıt deposu kütlesi bir yük hücresi vasıtası ile mikro denetleyici tarafından takip edilmektedir. Bu sistem, ana yakıt deposu, ölçüm kabı, üç adet selenoid valf, programlanmış 8051 mikro denetleyici ünitesi (kontrol kutusu), yük hücresi ve göstergesinden oluşmaktadır. Sistemin şekli ve blok diyagramı Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5. Yakıt ölçüm düzeneği ve blok diyagramı

Tasarlanan kütleli yakıt sarfiyatı cihazı yazılımı, çalışma esnasında ölçüm kabındaki yakıt miktarı belirli bir değerin altına düştüğünde ikaz vermekte ve ölçüm yapılmasına izin vermeyerek yakıt kabına yakıt almaktadır. Yakıt kabında yeterli miktarda yakıt bulunmasının ardından ölçüme izin verilmektedir. Yakıt ölçüm kontrol düzeneğine test esnasında kaç saniyelik bir ölçüm yapılacağı girilmekte ve motor test şartları gerçekleştiğinde ölçüme başla butonuna basılmasıyla yakıt kütlesi kaydedilmektedir. Test süresi sonunda veya kullanıcının “bitir” düğmesine basılmasıyla yakıt kütlesi tekrar ölçülerek deney sırasındaki kütleli fark elde edilmektedir. Yakıt kabındaki kütleli azalma miktarı test süresine oranlanarak, ekranda toplam yakıt tüketimi ve ortalama yakıt tüketimi görüntülenmektedir.

Yazılım geliştirilirken, selenoidlerin açılma ve kapanma zamanındaki gecikmeler dikkate alınmıştır. Bu amaçla ölçüme selenoidlerin açılmasından sonra başlanmakta ve selenoidlerin kapanmasından önce son verilmektedir. Sistem yazılımının çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Yakıt ölçüm düzeneğine ait akış diyagramı

### 3.1.5. Sıcaklık ölçümleri

Deney şartlarının dengelenebilmesi amacıyla ortam sıcaklığı, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığının ölçülebilmesi için NiCr-Ni tip termokupullar kullanılmış ve bunlar Şekil 3.7’de görülen Elimko 680 marka 8 kanallı bir sıcaklık göstergesine bağlanmıştır.



Şekil 3.7. Sıcaklık ölçüm için kullanılan gösterge

### 3.1.6. Emisyon ölçümü

Çalışmada emisyon ölçümü için Bilsa marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve duman koyuluğu (is emisyonu) ölçmektedir. CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> gazlarının egzozdaki miktarlarını yüzde (%) ve ppm (milyonda bir partikül) olarak veya mg/kWh türünden verebilmektedir. Duman koyuluğunu ise yüzde veya K faktörü şeklinde ölçüm yapabilmektedir. Deneylere başlamadan önce, emisyon cihazının emisyon kalibrasyon gazları vasıtasıyla kalibrasyonu yapılarak ölçüm hatalarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan Bilsa marka emisyon cihazının görünümü Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Emisyon ölçüm cihazı

### 3.1.7. Silindir içi basınç sensörü

Silindir basıncı ölçümünde AVL marka QC34C model su soğutmalı piezzo-elektrik sensör kullanılmıştır. Sensörün görünümü Şekil 3.9’de, teknik özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmektedir.



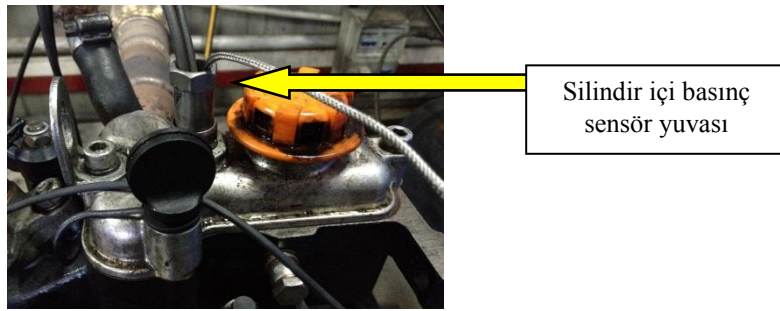
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan silindir içi basınç sensörü

Tablo 3.2. Basınç sensörü teknik özellikleri [73]

Silindir İçi Basınç Sensörü (QC34C su soğutmalı, piezzo-elektrik)	
Ölçüm Aralığı (bar)	0-250
Hassasiyeti	-19 pC/bar ve +/- %0.2
Doğal Frekans (kHz)	69
Aşırı Yükleme (bar)	300
Bağlantı Yuva Çapı	10 mm
Sıkma Torku	15 Nm

### 3.1.8. Basınç sensörünün motora yerleştirilmesi

Silindir içi basınç sensörünün deney motoru silindir kafasına konumlandırılması, AVL firmasının yayınlamış olduğu silindir içi basınç ölçüm kılavuzunda belirtilen teknik özelliklere göre gerçekleştirilmiştir. Deney motoruna açılmış olan basınç sensör yuvası yukarıda belirtilen kaynakta verilen bilgiler doğrultusunda Antor motor fabrikası ARGE mühendisleri tarafından tasarlanmış ve üretimi yapılmıştır. Sensörün ölçüm yüzeyinin yanma odasına tam dik olacak şekilde konumlandırılması sağlanmıştır. Silindir kafasına açılan basınç sensör deliğinin yuvası Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10. Silindir içi basınç sensörünün motora konumlandırılması

### 3.1.9. Şarj amplifikatörü

Silindir basıncı ölçümünde “Kistler 5011B model” şarj amplifikatör kullanılmıştır. Şarj amplifikatörü sensör çıkışında bulunan pC cinsinden elektrik şarjını doğrusal olarak voltaja çevirerek elektriksel olarak ölçümünü mümkün kılmaktadır. Şarj amplifikatörünün teknik özellikleri Tablo 3.3’te, görünümü ise Şekil 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Şarf amplifikatörün teknik özellikleri

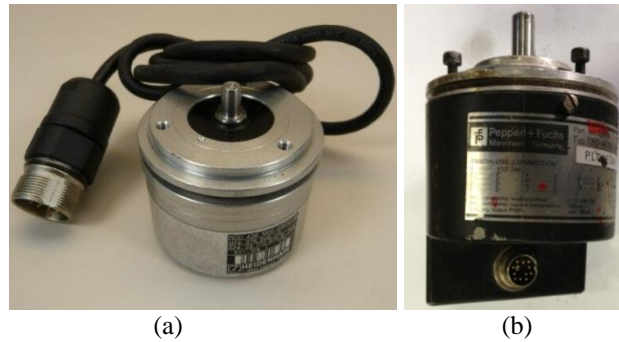
Şarj Amplifikatörü (5011B)	
Çıkış Gerilimi (V)	+/- 10
Maksimum Filtreleme (kHz)	30
Sapma (pC/s; mV/s)	-0.02
Ölçüm Adımı (mV)	0.5



Şekil 3.11. Şarj amplifikatörü

### 3.1.10. Enkoderler

Deney düzeneğinde elektronik kontrollü buhar püskürtme sisteminde krank açısının belirlenmesi amacıyla “Peperl Fuchs marka TRD-369AK-GCS” model mutlak (absolute) tip enkoder kullanılmıştır. Ayrıca silindir içi basınç ve yüzeysel titreşim ölçümünde örnekleme sinyali olarak kullanılacak krank açısına bağımlı palsleri üretmek ve hız dalgalanması ölçümünü gerçekleştirebilmek için “Heidenhain” marka “ROD426 model 3600” pals/tur özelliğine sahip artımlı (incremental) tip bir encoder kullanılmıştır. Şekil 3.12’de her iki enkoderin resimleri yer almaktadır.



Şekil 3.12. Heidenhain Rod 426-3600(a) ve Peperl Fuchs TRD-AK360-GCS(b) enkoderleri.

### 3.1.11. Üst ölü nokta sensörü

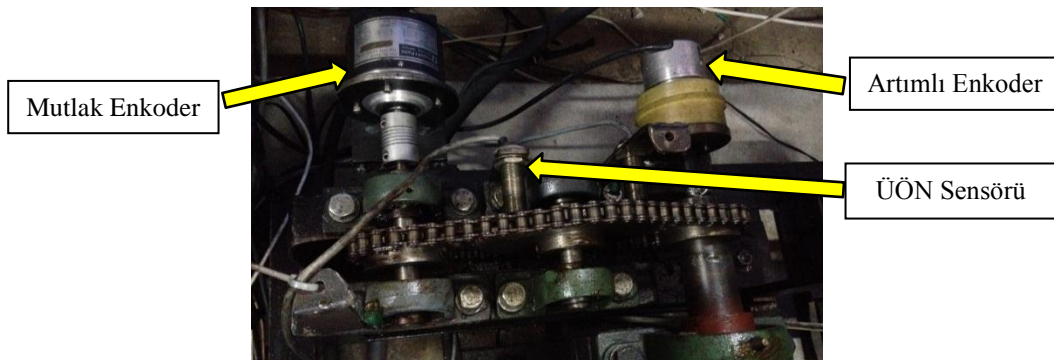
Çalışmada kullanılan deney motoru dört zamanlı bir motordur. Bilindiği üzere dört zamanlı motorlar  $720^\circ$  de (iki tur) bir iş yapmaktadır. Motorun hangi çalışma zamanında olduğunu tespit etmek için bir endüktif metal yaklaşım sensörü



kullanılmıştır. Bu sensör, krank miline göre 2/1 oranında dönen bir dişli üzerinde bir noktaya yerleştirilen metal çıkıntıyı algılayarak sinyal üretmektedir. Örneğin, motor montajı sırasında motor emme zamanı başlangıcında bulunan üst ölü noktaya ayarlanarak; düzenekte ise metal çıkıntı ve endüktif sensör karşılıklı konumuna ayarlanarak montaj edilecek olursa bu sensör çıkış ürettiğinde motorun emme zamanı başlangıcında olduğu tespit edilebilecektir. Bu sensör hem EKBPS hem de silindir içi basınç ve yüzeysel titreşim ölçümlerinin alınmasında motor konumunun tespit edilebilmesi için kullanılmaktadır.

### 3.1.12. Enkoder ve üst ölü nokta sensörünün düzeneğe bağlanması

Deney düzeneğinde kullanılacak enkoderler ve üst ölü nokta sensörünün montajı dinamometre milinin çıkış mili tarafına yapılmıştır. Dinamometre çıkış miline bağlanacak bir zincir-dişli mekanizması tasarlanarak üretimi ve montajı gerçekleştirilmiştir. Motor sarsıntılarının enkoderleri etkilemesini önlemek amacıyla dişli sistemi yerine zincir – dişli mekanizması tercih edilmiş ve esnek bir bağlantı türü olan kaplin kullanılmıştır. Şekil 3.13’de enkoderler ve üst ölü nokta sensörünün deney düzeneğine montajı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Deney düzeneğinde kullanılan enkoderler ve üst ölü nokta sensörünün montajı

### 3.1.13. Vuruntu sensörü

Vuruntu sensörü güncel motorlarda ateşleme ve enjeksiyon sürelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Son yıllarda piyasaya sürülen birçok araç motorunda yer

almaktadır. Yakıtın ÜÖN öncesinde gereken zamandan önce tutuşmasıyla oluşan sarsıntıya vuruntu (knock) denmektedir. Vuruntu, motor performansını kötü yönde etkilediği gibi motor parçalarına zarar verdiği için istenmeyen bir olaydır. Vuruntu sensörü ise motor titreşimlerini sürekli ölçüm altında tutarak vuruntunun tespit edilmesi ve motor kontrol ünitesi (ECU) tarafından ateşleme ve enjeksiyon noktasının/sürelerinin en uygun noktaya getirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Vuruntu sensöründen elde edilen ölçümde tepeden tepeye maksimum değere veya ölçümün rms değerine bakılarak vuruntu oluştuğuna karar verilmektedir [74].

Araçlarda kullanılan ve hali hazırda yer alan vuruntu sensörleri aslında piezo-elektrik ivme ölçerlerdir. Motorlarda vuruntu olayı etkisiyle silindir bloğunda oluşan titreşimler 4-8 KHz aralığındadır. Bu sebeple vuruntu sensörleri, maliyeti de düşük tutmak amacıyla en yüksek doğruluğu 4-8 KHz aralığında sağlamak üzere tasarlanmıştır [75]. Bu çalışmada da yukarıda da bahsedildiği üzere yüzeysel titreşimleri algılamak için daha yüksek doğruluk oranlarına sahip özel ivme ölçer yerine hali hazırda motorlar üzerinde bulunan ve düşük maliyetli vuruntu sensörü tercih edilmiştir. Şekil 3.14'de bu çalışmada kullanılan vuruntu sensörü görünümü, Tablo 3.4. Kullanılan vuruntu sensörünün teknik özellikleri [76] verilmiştir.



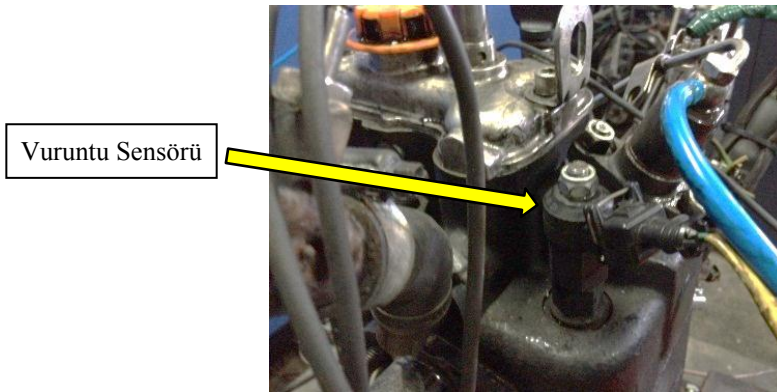
Şekil 3.14. Kullanılan Vuruntu Sensörü

Tablo 3.4. Kullanılan vuruntu sensörünün teknik özellikleri [76]

<b>Algılama prensibi</b>	<b>Piezzo-elektrikli</b>
5 kHz'de hassasiyet	$30 \pm 6$ mV/g
5-kHz değerinin doğrusalılığı	$\pm 10$ %
Frekans aralığı	3 kHz ...22 kHz
Isı derecesi aralığı	-40°...+150°C

### 3.1.13.1. Vuruntu sensörünün konumlanması ve montajı

A. Zoubir, yüzeysel titreşimlerin en doğru şekilde okunabilmesi amacıyla motor üzerinde vuruntu sensörü konumu seçimi için deneysel bir çalışma yapmıştır [77]. Çalışmasında farklı vuruntu sensör konumları ve çalışma koşulları için titreşim verilerini kaydederek teorik ve yazılımsal olarak incelemiştir. Yanma odasında oluşan etkilerden kaynaklanan titreşimleri en iyi şekilde elde etmek için vuruntu sensörünün motor üst kapağına konumlandırılması gerektiği sonucuna varmıştır. Bu çalışmada ise A. Zoubir tarafından belirlenen konum referans alınarak, silindir bloğu üst kapağına bağlanacak bir parça ürettirilmiş ve vuruntu sensör montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te vuruntu sensörünün deney motoru üzerine konumlandırılması görülmektedir. Vuruntu sensörü, montaj sırasında tavsiye edilen sıkma torku olan 20 Nm tork ile motor üzerine sıkılmıştır [78].



Şekil 3.15. Vuruntu sensörünün motor üzerine montajı

### 3.1.14. Veri toplama kartı

Veri toplama, gerçek dünyadaki fiziksel büyüklüklerin ölçülerek, sayısal bir biçime dönüştürülmesi ve bilgisayara aktarılmasıdır. Bu aktarılan bilgiler bilgisayar tarafından işleme, analiz edilme için kullanılabilir veya saklanabilirler. Uygulamaların büyük bir çoğunluğunda, veri toplama sistemi (DAQ), sadece veri elde etmek için değil ayrıca veriler üzerinde çalışmak ve dış dünyaya veri aktarmak için kullanılmaktadır.

DAQ donanımları, bilgisayar ile deney sırasında oluşan fiziksel olayların birbiri ile bağlantısını sağlayan yardımcı ekipmanlardır. Ölçülen analog sinyalleri bilgisayarın işleyebileceği sayısal sinyallere çevirirler ve sayısal sinyalleri zamana bağlı olarak ölçüp aktarabilirler. Günümüzde gelişen bilgisayar ve DAQ sistemleri USB, PCI gibi yollarla haberleşebilmektedirler. Genel olarak veri toplama işlemi, test ve ölçümün ilk aşamasıdır. Ölçüm ortamında elde edilen analog işaretlerin sayısallaştırılması (analog to digital conversion - ADC) veya bilgisayar ortamındaki sayısal büyüklüklerin dış dünyaya analog değer olarak aktarılması gerekebilir. Bunun yanı sıra bir bilgisayarın sayısal giriş veya çıkışlara sahip diğer elektronik ekipmanlarla haberleşmesi gerekebilir. Günümüzde bu işlemler DAQ kartları ve bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Uygulama türüne bağlı olarak, birçok PC tabanlı DAQ kart çeşidi bulunmaktadır. DAQ kartlar farklı giriş çıkış birimlerini içermeleri, örnekleme türleri ve frekansları, bilgisayara bağlantı ara birimleri ve içerdikleri yazılım destekleriyle birbirinden ayrılmaktadırlar.

Bu çalışmada deneysel veri toplama için “National Instruments” firması tarafından üretilen “Ni-USB-6251” modeli DAQ kart kullanılmıştır. 6251 DAQ kartı, çok sayıda analog giriş çıkış kanalı, yüksek çözünürlüklü sayıcılar, farklı tetikleme imkânlarını ve yüksek örnekleme hızını içerdiği için tercih edilmiştir. Ayrıca USB arabirimi içermesi sebebiyle laboratuvar şartlarına uygundur. Şekil 3.16’te kullanılan DAQ kart görülmekte, Tablo 3.5’de ise kullanılan DAQ kartın teknik özellikleri özetlenmektedir.



Şekil 3.16. DAQ kart, NI USB-6251 Mass Term [79]

Tablo 3.5. DAQ kart özellikleri [79]

Özellikler	Değerler
Kanal sayısı (Ai, Ao)	16,2
Çözünürlük (bit)	16
Örnekleme oranı (MS/s)	1,25
Maksimum Ai, Ao voltaj (V)	$\pm 10$
Sayıcı	2 Adet (32 bit, 80mhz)
Tetikleme	Analog, Sayısal
Bağlantı ara birimi	USB

Son yıllarda hızlı bir gelişim içinde bulunan bilgisayarlar ile veri toplama ve işleme uygulamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok uygulamada, özellikle veri toplama ve işleme için, bilgisayarların gücü ve esnekliği göz ardı edilemez. Bilgisayarların bu uygulamalarda tercih edilmesinin sebebi, özel bir veri toplama işleminin belirli şartlarının mevcut yazılım ve donanımla uyum sağlamasıdır. Bu çalışmada kullanılan NI 6251 DAQ kart yine National Instruments firmasına ait Labview yazılımı ile çok uyumlu ve esnek bir şekilde çalışabilmektedir.

### 3.2. Kullanılan Yazılımlar

Yukarıda araştırmada kullanılan donanımlar ve deney düzeneği özetlenmiştir. Ayrıca araştırma da verilerin bilgisayara aktarılması ve işlenmesi için programlar hazırlanmıştır. Bu programlar Labview ve Matlab yazılım geliştirme ortamlarında hazırlanmıştır. Aşağıda bu yazılım ortamlarının genel özellikleri verilmiştir.

### 3.2.1. Labview programı

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) National Instruments firması tarafından geliştirilen bir geliştirme ve görsel programlama ortamıdır. Labview görsel programlama ortamında blok diyagramlar ile hazırlanan programlar makine koduna çevrilerek işlenmektedir. Labview programlama ortamı donanım kontrolü ve veri işlemlerini paralel programlama ve gerçek zamanlı işleme kabiliyetleri ile yapabilmektedir. Kolay programlama ortamı ve zengin donanım desteği ile elektrik-elektronik mühendisliği başta olma üzere mühendislik alanlarında uygulama geliştirme ve akademik araştırmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [80]. Labview programları iki kısımdan oluşmaktadır: ön panel ve blok diyagram. Ön panel kullanıcı tarafından görülen grafikler, gösterge alanları, butonlar vb. ile çalışma sırasında etkileşime imkân tanıyan kısımdır. Blok diyagram ise görsel programlama ile programların hazırlandığı işlemlerin yapıldığı bölümdür. Labview programlama ortamı; bu yapısı, geniş donanım desteği ve özellikle bilgisayara bağlanan harici donanımlar ile ölçme ve enstrümantasyon işlem kabiliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Labview programının en önemli kullanım yerleri şu şekilde özetlenebilir [81]:

- Veri toplama ve sinyal işleme,
- Test ve doğrulama sistemlerinin otomatikleştirilmesi,
- Bilgisayar ile donanım kontrolü,
- Gömülü izleme ve kontrol sistemleri,
- Akademik öğretim.

Bu çalışmada ise Labview programlama ortamı, veri toplama işlemlerindeki esnekliği ve yüksek kabiliyeti nedeniyle deneysel veri toplama işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Ayrıca yine bu çalışmada kullanılan USB-6251 DAQ kartı Labview'i de geliştiren National Instruments Firması tarafından üretilmiştir. Bu nedenle Labview programlama ortamı, DAQ kartının sahip olduğu tüm özellikleri tam uyumla kullanabilmektedir.

### 3.2.2. Matlab programı

MATLAB; (MATrix LABoratory); ilk defa 1985'de C.B Moler tarafından matematik ve özellikle de matris esaslı matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş etkileşimli bir paket programlama dilidir. Matlab adından da anlaşılacağı üzere ilk olarak matris işlemlerini kolay bir şekilde yapmak üzere geliştirilse de yıllar içindeki gelişimiyle geldiği noktada tüm mühendislik alanlarında kullanılan bir araç haline gelmiştir. Matlab mühendislik problemlerine matematiksel, sistematik ve algoritmik bir çözüm getirmeye yeteneğine sahip bir programlama ve geliştirme ortamı haline gelmiştir [82]. FORTRAN ve C dili gibi yüksek seviyeden programlama dilleri ile yapılabilen hesaplamaların pek çoğunu MATLAB ile yapmak mümkündür. Buna karşılık MATLAB'ın içerdiği çok sayıda toolboxlarda yer alan fonksiyon kütüphanesi sayesinde, FORTRAN ve diğer programlama dillerine göre daha az sayıda komutla çözüm üretmek mümkündür. Hazır fonksiyonların kullanıcı tarafından müdahale edilebilir ve değiştirilebilir yapıda olması MATLAB'ın esnekliğini arttırmaktadır. Matlab programına ait temel özellikler şu şekilde özetlenebilir [83]:

- Teknik hesaplama için yüksek seviyeli bir dil,
- Kodları, dosyaları ve verileri yönetmek için bir geliştirme ortamı,
- İteratif çözümler, tasarım ve dizayn için interaktif araçlar,
- Lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon ve sayısal integrasyon için matematik fonksiyonlar,
- Verileri görselleştirmek için 2-B ve 3-B grafik fonksiyonları,
- Özel grafik kullanıcı arabirimleri oluşturmak için araçlar.
- MATLAB tabanlı algoritmaları C, C++, Fortran, Java, COM ve Microsoft Excel ® gibi harici uygulamalar ve diller ile entegre etmek için fonksiyonlar.

Yukarıda bahsedilen özellikleri ve üstünlüklerinden dolayı bu çalışmada veri analiz ve veri işleme adımlarında Matlab programı tercih edilmiştir.

### 3.3. NO<sub>x</sub> Emisyonlarının Elektronik Buhar Püskürtme Sistemi ile Kontrolü

Bu çalışmada dolaylı ölçüm metoduyla elde edilen silindir içi basınç eğrisinin motor performans değeri ölçümünde kullanılması ve beraberinde performansa dayalı olarak emisyon kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla deney motoruna buhar püskürtme işlemi yapılmıştır. Buhar püskürtme işleminin doğru oranlarda ve doğru zamanlarda yapılmasının NO<sub>x</sub> emisyonları üzerinde azaltıcı etkisi vardır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının buhar püskürtme sistemi ile kontrolünde dizel motora püskürtülecek buhar miktarı motor emme zamanı sırasında ve motor yakıt sarfiyatının %10 ila %30'u arasında olması gerektiği tespit edilmiştir [40]. Buhar püskürtme oranının ve zamanının hassas olarak ayarlanabilmesi için buhar püskürtme işleminin elektronik kontrollü olarak yapılması gerekmektedir [84,85].

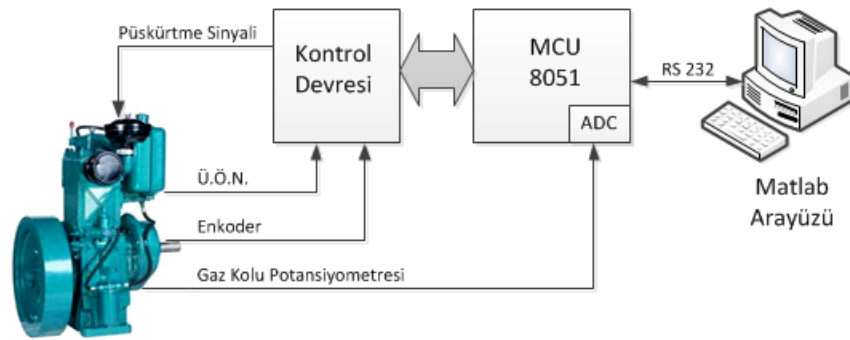
Bu çalışmada daha önce 101M269 nolu TÜBİTAK projesinde geliştirilen Elektronik Kontrollü Buhar Püskürtme Sistemi (EKBPS) geliştirilerek ve deney motoru için uyarlanarak kullanılmıştır.

#### 3.3.1. Elektronik kontrollü buhar püskürtme sistemi tasarımı

Genellikle alternatif yakıtların ve diğer maddelerin içten yanmalı motora uygulanması alternatif yakıt-yakıt karışımı şeklinde veya emme manifolduna nozulla vakum etkisiyle püskürtülmek yöntemiyle yapılmaktadır. EKBPS ile buharın bir enjektör vasıtasıyla ve tam emme supabı arkasına, emme zamanı içerisinde yakıt tüketiminin belli oranlarında, püskürtme işlemi hassas olarak gerçekleştirilebilmektedir. Alternatif maddelerin motorda kullanımı tek bir parametreye lineer olarak bağımlı olmaması nedeniyle püskürtme sinyalinin mekaniksel olarak tespiti mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, EKBPS'de motor üzerinden gaz kolu konumu, motor devri ve ÜÖN konumunu algılamak ve buhar püskürtme için kullanılan enjektörü kontrol etmek için mikro denetleyici içeren bir elektronik devre tasarlanmıştır. Ayrıca buhar miktarını tespit etmek ve enjeksiyon sinyal süresini hesaplamak için bilgisayar ortamında bir yazılım hazırlanarak mikro denetleyici ile RS232 protokolü üzerinden haberleşmeleri sağlanmıştır.



EKBPS’de, püskürtme sinyali değerinin anlık olarak kontrolü gerçekleştirilmesinde elektriksel işaretleri okumak ve kontrol işaretini üretmek için 8051 çekirdeğine sahip 80C51F120 mikro denetleyicisi kullanılmıştır. Mikro denetleyiciden gelen motor çalışma durum verilerine göre buhar miktarını ve püskürtme sinyali süresini hesaplayacak yazılım Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ile mikro denetleyici RS232 seri haberleşme protokolü kullanılarak haberleştirilmiş ve senkronize çalışmaları sağlanmıştır. Kullanıcıya pratik kullanım imkânı sağlamak, çalışma sırasında verileri izleyebilmek ve verileri kayıt altına alabilmek amacı ile bir arayüz oluşturularak sistemin kumandası bu arayüz vasıtası ile yapılmıştır. EKBPS’ne ait blok diyagram Şekil 3.17’de, kontrol arayüzü Şekil 3.18’de ve görülmektedir.



Şekil 3.17. EKBPS’ye ait blok diyagram

Motor çalışma koşulunu ve anlık yakıt sarfiyatını belirlemek amacıyla motor devir ve gaz kolu konum bilgisi mikro denetleyici tarafından çalışma sırasında izlenmektedir. Gaz kolu konumu ve motor yük değeri motor devrini belirlemektedir. Devir ve gaz kolu konumunu kolaylıkla ölçülebilmektedir. Ayrıca gaz kolu konumuna göre devir çıkışı değerlendirildiğinde motor yükü hakkında bilgi vermektedir. Bu nedenle devir ve gaz kolu konumu, çalışma koşullarını ve anlık yakıt sarfiyatını tespit etmek için yeterli olmaktadır. Gaz kolu konumunu okumak için araçlarda kullanılan bir gaz kolu potansiyometresi kullanılmıştır. Devir bilgisi ve krank konumunu açısız olarak tespit etmek için mutlak enkoder kullanılmıştır. Mikro denetleyici yazılımı ile her motor turunda devir ve gaz kolu konumu güncellenerek her biri için 2 bayt olmak üzere RS232 üzerinden bilgisayara gönderilmektedir.

Şekil 3.18. EKBPS’yi kontrol etmek amacıyla tasarlanan arayüz



Şekil 3.19. EKBPS’de kullanılan mikrodenetleyici ve kontrol devresini içeren kutu

Bilgisayar, daha önceden deneysel yolla elde edilerek yüklenmiş olan motor yakıt sarfiyat haritasından enterpolasyon ile o anki gaz kolu ve devir bilgisine karşı gelen yakıt tüketim miktarını tespit etmektedir. Tespit edilen yakıt miktarı, kullanıcı tarafından arayüze girilen buhar yüzdesi ile çarpılarak buhar miktarı hesaplanır. Bu buhar miktarı için gerekli enjeksiyon sinyal süresi daha önceden deneysel olarak elde edilen enjektör parametre eğrisi üzerinden tespit edilmektedir. Mili saniye cinsinden bu süre mikro denetleyiciye gönderilmektedir. ÜÖN sensörü yardımıyla tespit edilen emme zamanında enjeksiyon sinyali enjektöre uygulanmaktadır. EKBPS’nin bir motor çevrimi için çalışması şu şekilde özetlenebilir:

- Gaz kolu ve devir değerlerinin mikro denetleyici ile okunması ardından RS232 ile bilgisayara gönderilmesi,
- Bilgisayar tarafından buhar miktarının ve püskürtme süresinin hesaplanarak mikro denetleyiciye gönderilmesi,
- Mikro denetleyici tarafından encoder ve ÜÖN sensörü ile belirlenen emme zamanı konumuna uygun olarak püskürtme sinyalinin oluşturulması.

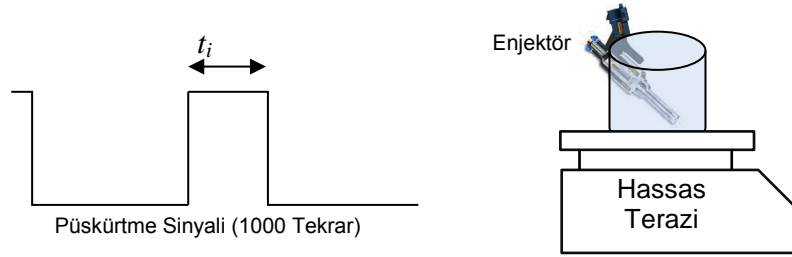
### 3.3.2. Enjektör parametrelerinin tespiti

EKBPS, bobin sargılı tip enjektörleri kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır. Bilindiği üzere bobin sargılı enjektörlerde bobin kontrollü selenoidlerden kaynaklanan bir açılma gecikme zamanı ( $t_0$ ) mevcuttur. Bu gecikme ve bobin  $\tau$  zaman sabiti sebebiyle bobin sargılı enjektöre uygulanan sinyal süresi ile püskürtülen yakıt miktarı arasında lineer bir ilişki yoktur [30,31]. Bu nedenle istenilen miktarda buhar enjeksiyonunun yapılabilmesi için enjektör sinyal-miktar ilişkisinin doğru tespit edilmesi önemlidir. Yakıt oranının %10-%30'u oranında buhar enjeksiyonu gerekli olduğu ve tek silindirli deney motorunun yakıt sarfiyatının düşük olduğu düşünüldüğünde az miktarlarda enjeksiyona imkân tanıyan bir enjektörün tercih edilmesi gerekliliği açıktır. Bu amaçla piyasadan temin edilen çok farklı tip enjektör parametreleri tespit edilerek EKBPS ve deney motoruna en uygun enjektör tercih edilmiştir.

Enjektör parametrelerinin tespiti deneysel olarak yapılmıştır. Enjektör yakıt girişi sabit basınç altında tutularak değişik sürelerde sinyal uygulamak suretiyle her sinyal süresine karşılık püskürtülen yakıt miktarı tespit edilmiştir. Yakıt miktarının ölçümü 10 mg hassasiyete sahip bir hassas terazi vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil 3.20'de enjeksiyon sinyali ve enjektör parametreleri ölçümü verilmiştir.

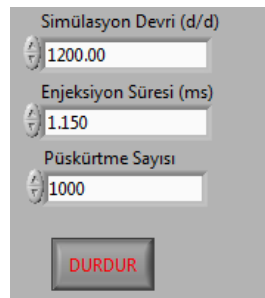
Ölçümden kaynaklanan hataları minimize etmek amacıyla her sinyal süresi ( $t_i$ ) 1000 kez enjektöre uygulanmış ve sonuçta toplam yakıt miktarı 1000'e bölünerek ortalama değer tespit edilmiştir. Enjeksiyon süreleri küçük adım aralıklarıyla arttırılarak

enjektöre uygulanmış, bu sayede enjeksiyon sinyal süresi – püskürtülen yakıt miktarı ilişkisi hassas bir şekilde deneysel olarak ölçülmüştür.



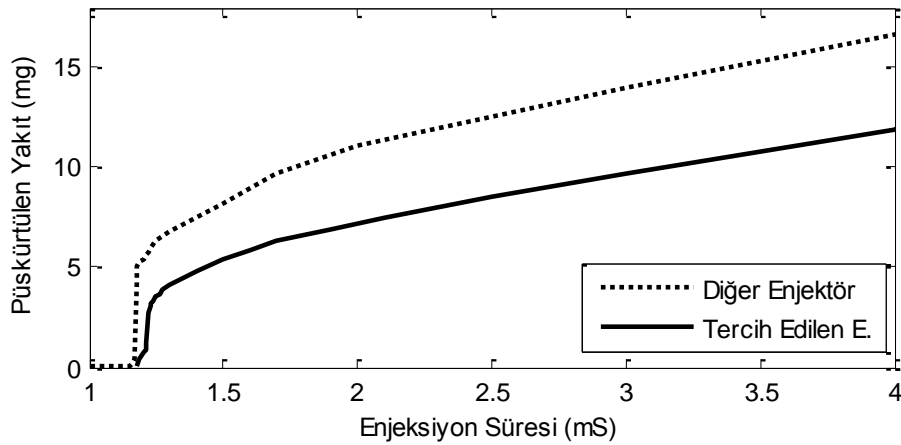
Şekil 3.20. Enjeksiyon sinyali ( $t_i$ ) ve püskürtülen yakıt miktarı ölçümü

Enjektör parametrelerinin tespiti sırasında enjeksiyon sinyali süresini ve adedini mümkün olan en yüksek doğrulukla üretmek amacıyla DAQ kartı ve Labview programlama ortamından faydalanılmıştır. Labview'de oluşturulan bir program ve arayüz vasıtasıyla istenilen püskürtme sinyali süresi ve adedi hassas bir şekilde ayarlanabilmiştir. Hazırlanan programda enjeksiyon sinyal süresi ve adedinin yanı sıra çalışma koşullarına en yakın şartları oluşturabilmek amacıyla püskürtme sinyali frekansını belirleyecek devir girişi yer almaktadır. Örneğin 1200 d/d çalışma devri düşünüldüğünde motor bir çevrimini 40 msn'de tamamlamaktadır. 1200 d/d girişi yapıldığında, DAQ kartı tarafından 40 msn periyoda sahip enjeksiyon sinyali belirtilen adet kadar üretilerek program sonlanmaktadır. Şekil 3.21'da enjektör parametre tespiti için hazırlanan arayüz görülmektedir.



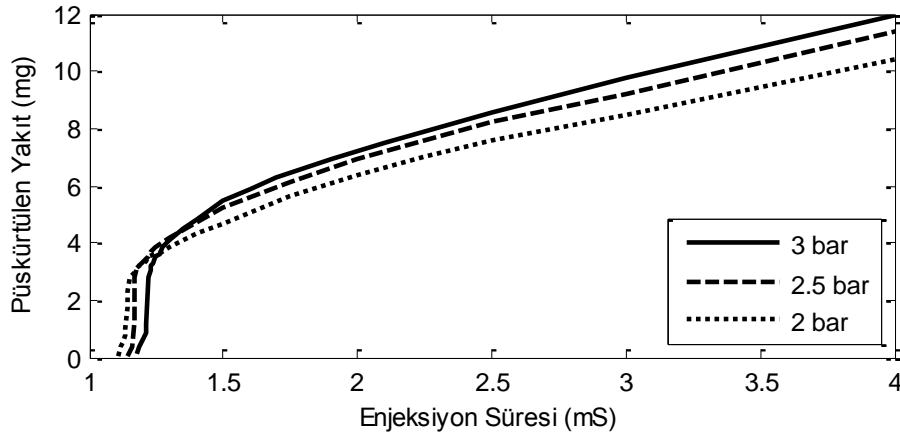
Şekil 3.21. Enjektör parametre tespiti için hazırlanan arayüz

Piyasada bulunan enjektörler motorlara yakıtın tamamını püskürtmek üzere tasarlanmışlardır. Oysaki bu çalışma ile yakıt tüketiminin %10'u ile %30'u arasında bir değer uygulanmak istenmektedir. Bu nedenle enjektör seçiminde karşılaşılan en büyük sorun; az miktarda yakıt püskürtülmesine imkân tanıyacak bir enjektör bulunmasıdır. Bu amaçla birçok enjektör denenerek düşük yakıt kütlesi bandında çalışabilen bir enjektör tespit edilmiştir. Şekil 3.22'de uygun olarak tercih edilen enjektör ile farklı bir enjektör için enjeksiyon süresi-yakıt miktarı grafiği verilmiştir. Tercih edilen enjektör daha yüksek bir açma gecikmesine sahip olsa da düşük yakıt miktarlarının uygulanmasına imkân tanımaktadır.



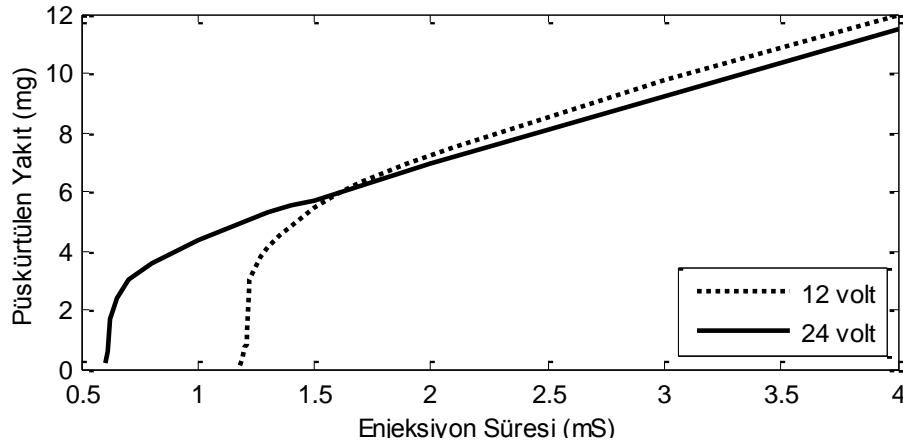
Şekil 3.22. İki farklı enjektör için elde edilen enjektör parametreleri (3 bar yakıt)

Şekil 3.22'de verilen grafikte ölçümler yakıt hattı 3 bar basınca sabitlenerek elde edilmiştir. Yakıt hattı basınç değeri enjektör parametre eğrisi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bu nedenle enjektör parametre tespiti sırasında kullanılan basınç değeri ile çalışma sırasında kullanılan buhar basınç değeri aynı olmalıdır. Şekil 3.23'de tercih edilen enjektör için farklı yakıt basınçlarında elde edilen enjektör parametreleri yer almaktadır. Motor buhar enjeksiyonu sırasında 133°C, 3 bar buhar kullanıldığı için 3 bar altındaki enjektör parametre eğrisi dikkate alınmıştır.



Şekil 3.23. Farklı yakıt hattı basınçları için enjektör parametre değişimi

En uygun olarak tespit edilen enjektör parametre eğrisine dikkat edilecek olursa; %10 (2-3mg) oranında buhar püskürtmeye uygun olmadığı gözlemlenmektedir. Bobin sargılı enjektör içeriği bir RL devresi gibi düşünülebilir [88]. Enjektör mekaniğinden kaynaklanan gecikmeye müdahale edilemeyecektir. Oysaki enjektör içerisindeki RL devresinin de bir elektriksel gecikmesi vardır. Enjektör içerisindeki bobinin doyum akımına ulaşmasına kadar geçen süre  $\tau$  zaman sabitidir. Bilindiği üzere RL devrelerinde zaman sabiti  $\tau=L/R$  bağıntısıyla verilmektedir. Bu bağıntıdan yola çıkarak enjektöre seri olarak bir direnç ilave edilecek olursa paydada bulunan R değeri büyüyeceği için zaman sabiti düşecektir. Bu mantık ile tercih edilen enjektörün r direnci ölçülmüş ve aynı değerinde bir direnç seri olarak enjektöre bağlanmıştır ( $\tau=L/2 \cdot R$ ). Enjektör üzerine düşen gerilim değerini ve bobin akımını sabit tutmak amacıyla 12 v gerilim değeri de iki katına çıkarılarak enjektör parametre tespiti yapılmış ve öngörüldüğü gibi enjektör açma gecikmesinin küçüldüğü görülmüştür. Şekil 3.24'de standart enjektör ve gerilim 24V'a yükseltilerek ve R direnci bağlanarak elde edilen enjektör parametre grafiği yer almaktadır. Bu grafikte de görüldüğü üzere 24V besleme ve seri direnç bağlanan enjektör parametresi EKBPS ile çalışmak için daha uygundur. Bu çalışmada standart enjektör yerine 24V besleme kullanılarak ve enjektöre seri direnç bağlanarak kullanılmıştır.



Şekil 3.24. Standart ve 24v, 2R durumlarında enjektör parametre grafikleri

### 3.4. Deneysel Motorun EKBPS İçin Revizyonu

Geliştirilen EKBPS'yi deney motoruna uyarlayabilmek için deney motoru üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerin, deney motorunun çalışmasını etkilemeyecek şekilde yapılmasına özen gösterilmiştir. Bu değişikliklerin temel gayesi, EKBPS'de ihtiyaç duyulan enjektör, gaz kolu potansiyometresi ve eşanjörün motora montajını mümkün kılmaktır.

#### 3.4.1. Gaz kolu potansiyometresinin motora bağlanması

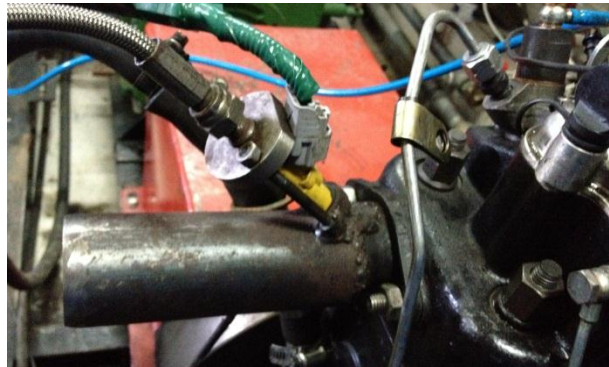
Motor gaz kolu konumunun ölçülmesi için gaz kolu potansiyometresi kullanılmıştır. Gaz kolu potansiyometresi, günümüzde elektronik motor kontrol ünitesine (ECU) sahip araçlarda bulunmaktadır. Çıkışında bulunan analog gerilim değeri, gaz kolu konumuna göre doğrusal olarak değişmektedir. Kontrol düzeneği tasarım aşamasından önce motor üzerinden gaz kolu çubuğu alt ve üst sınırları tespit edilmiştir. Potansiyometre ve gaz kolu çubuğu sınırları göz önüne alınarak motor gaz kolu çubuğu üzerine üretilen bir aparatla potansiyometre sabitlenmiştir. Şekil 3.25' da motor gaz koluna bağlanmış durumdaki gaz kolu potansiyometresinin resmi görülmektedir.



Şekil 3.25. Gaz kolu potansiyometresinin motor üzerine konumlandırılması

### 3.4.2. Motor emme hattına buhar enjektörünün konumlandırılması

Çalışmada, motorun zararlı emisyonlarının kontrolünde buhar enjeksiyon tekniği kullanılmıştır. EKBPS sistemi tasarımıyla motora buhar enjeksiyonu, emme zamanında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla motor emme manifolduna EKBPS için enjektör parametre tespiti ile seçilen enjektör konumlandırılmıştır. Motor emme hattı sökülerek enjektör bağlantısı için bir parça imal ettirilerek, enjektörün konumu emme supabının tam arkasına püskürtme yapacak şekilde belirlenmiştir. Buhar enjektörünün emme sistemine konumlandırılmış hali Şekil 3.26’ de görülmektedir.



Şekil 3.26. Buhar enjektörünün motor emme hattı üzerine konumlandırılması

### 3.4.3. Atık ısı kazanı (eşanjör)

Egzoz kayıp ısısından buhar elde etmek amacı ile motorun egzoz devresine Şekil 3.27’te görülen karşıt akışlı ısı değiştiricisi bağlanmıştır. Daha önce 101M269 nolu



Tübitak projesinde geliştirilen atık ısı kazanı bu çalışmada da kullanılmıştır. Isı değiştiricinin boyutları motor egzoz enerjisi ve egzoz debisi hesaplanarak belirlenmiştir. Hesaplar neticesinde imal edilen ısı eşanjörü 15 mm iç çapında üçgen dizili 24 adet bakır borudan oluşmakta olup 1 m boyunda ve 16 litre su tutma kapasitesinde imal edilmiştir.



Şekil 3.27. Atık ısı kazanı ve üzerindeki ekipmanlar

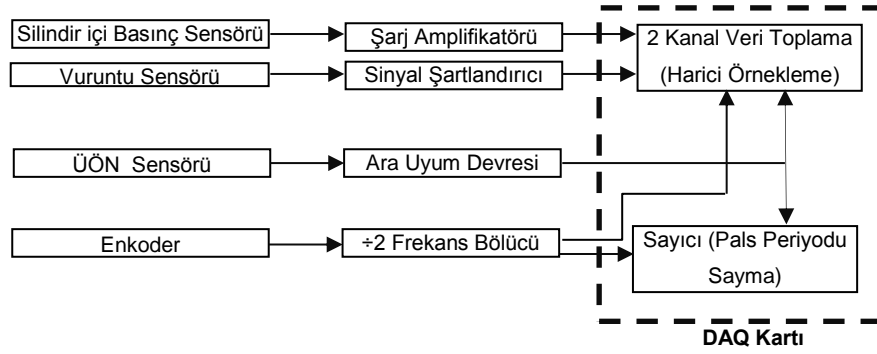
### 3.5. Veri Toplama Sistemi

Deney motoru üzerinden basınç, yüzeysel titreşim ve anlık hızlanma verilerinin bilgisayar ortamına aktarılması için “National Instruments Labview” görsel programlama ortamında bir program hazırlanmıştır. Veri toplama işlemlerindeki yüksek kabiliyeti nedeniyle “Labview” programı tercih edilmiştir. Örneğin Matlab programı veri toplama kabiliyetine sahip olsa da DAQ kartında bulunan sayıcı (counter), bir tetiklemeye bağlı olarak sayısal değerlerin belli zaman aralıklarında okunabilmesi vb. özellikleri kullanamamaktadır [89]. Bu nedenle silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için gerekli deneysel veri toplama ve analiz işlem aşamalarında veri toplama işlemleri “Labview” ortamında, veri analiz ve işleme adımları Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında “Labview” programı ile elde edilen ölçümler dosyalara kaydedilmiştir. “Labview” programı ölçümleri tdms dosyalarına kaydedecek şekilde hazırlanmıştır. “Tdms” dosya formatı, National Instruments tarafından geliştirilmiştir. Tdms dosya formatının en önemli avantajı, yüksek veri

yazma hızını sağlamasıdır. İçerdiği hiyerarşik yapı sayesinde açıklamaları desteklemesi ve diske sıralı yazım imkânı tanınması sayesinde bu yüksek hızı sunabilmektedir. Tdms dosya formatı, özel bir sıkıştırma ve şifreleme kullanmadığından Matlab ve Excel gibi birçok programa aktarılması mümkündür [90].

### 3.5.1. Veri toplama sisteminin kurulumu

Veri toplama sisteminde, hız ölçüm hassasiyetini yükseltmek amacıyla artımlı enkoderdan gelen tur başına 3600 pals (darbe) ikiye bölücü elektronik devre vasıtasıyla tur başına 1800 pulse indirgenmiştir. Frekans bölücü devre yüksek hızlı lojik entegreler kullanılarak hazırlanmıştır. Elde edilen tur başına 1800 pals hem motor hız dalgalanması ölçümü, hem de yüzeysel titreşim ve silindir içi basınç bilgisinin bağlı olduğu analog kanalların örnekleme frekansı olarak kullanılmıştır. Analog kanallar, her bir palsın yükselen kenarında bir örnek alacak şekilde ayarlanmıştır. Enkoderdan gelen tur başına pals değeri frekans bölme devresi ile çok azaltılacak olursa hızlanma ölçüm hassasiyeti artacak fakat analog kanalların örnekleme frekansı düşecektir. Düşük örnekleme frekansı seçilmesi özellikle çok hızlı değişimler içeren titreşim bilgisinin elde edilmesinde problem olacaktır. Tur başına 1800 pals seçildiğinde ve motor çalışma aralığı 800d/d ile 3000d/d olduğu düşünüldüğünde, basınç ve titreşim bilgilerinden 24ksps-90ksps aralığında örnekleme frekansı elde edilmektedir. Ayrıca sabit örnekleme frekansı yerine tur/1800 kullanılması ile bütün devirler için çevrim başına aynı sayıda örnek alınması sağlanmıştır. Silindir içi basınç, yüzeysel titreşim ve hız dalgalanması ölçümü için hazırlanan veri toplama sistemine ait donanımsal yapı şematik olarak Şekil 3.28'da verilmiştir.



Şekil 3.28. Veri toplama sisteminin şematik gösterimi

Veri toplama sisteminde bütün ölçümlerin aynı motor çalışma aralığında olması için üst ölü nokta bilgisinden gelen tetikleme palsy ile veri toplama işleminin başlaması sağlanmıştır. Endüstriyel şartlar için üretilmiş olan üst ölü nokta sensörü 24V çıkışa sahiptir. Sensör çıkışını 0-5 v arasında çalışan DAQ kartına uyarlamak için işlemsel kuvvetlendiriciler içeren bir ara uyum devresi hazırlanmıştır. Şekil 3.29’de motor deneylerinde kullanılan veri toplama sistemi donanımlarının deney sırasında görünümü verilmiştir.

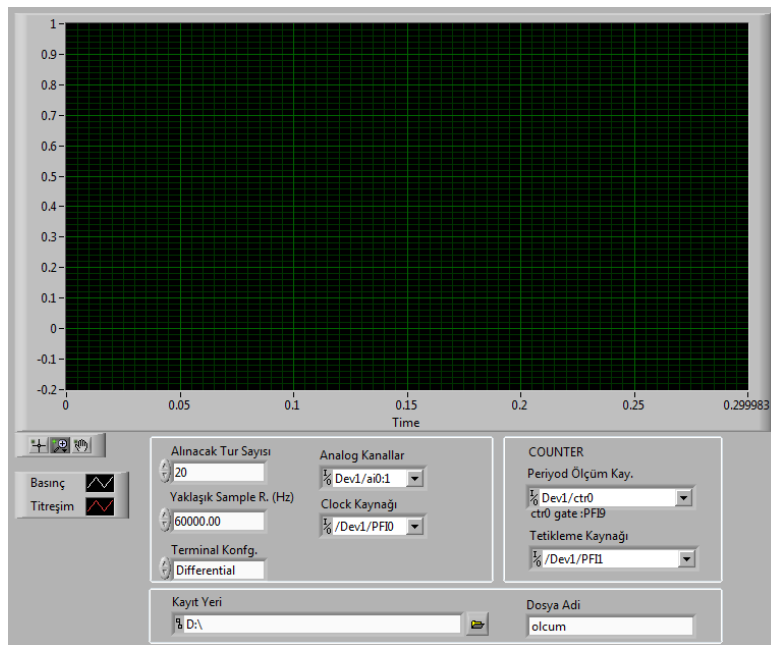


Şekil 3.29. Veri toplama sistemi donanımlarının deney sırasında ki görünümü

### 3.5.2. Veri toplama yazılımı

Labview programında hazırlanan veri toplama programı yukarıda verilen şematik çalışma mantığına uygun ve “NI-USB 6251” Veri toplama kartına uyumlu olacak

şekilde hazırlanmıştır. Veri toplama kartının analog ve sayısal giriş, harici tetikleme, 80 Mhz dahili sayıcı gibi özellikleri kullanılarak istenilen veri toplama programı elde edilmiştir. Hazırlanan veri toplama programı sahip olduğu kullanıcı arayüzü sayesinde kolay ve esnek bir kullanıma sahiptir. Veri toplama arayüzü istenilen çevrim kadar silindir içi basınç, yüzeysel titreşim ve hızlanma bilgisi ölçümü yaparak bunları “tdms” dosyasına kaydetmektedir. Motor deneyleri sırasında istenilen motor çalışma koşulu elde edildiğinde, kaç çevrimlik veri toplanacağı ve tdms dosya adı kullanıcı tarafından girilmektedir. İstenilen motor hızına ulaşılmasının ardından kullanıcının “Veri Al” butonuna tıklaması ile veri toplama işlemi başlamakta ve kullanıcı tarafından belirtilen klasör ve dosya adı ile kaydedilmektedir. Veri alma işlemi tamamlandığında alınan veriler arayüz üzerinde grafik alanında gösterilmektedir. Hazırlanan veri toplama programına ait kullanıcı arayüzü Şekil 3.30’de görülmektedir.



Şekil 3.30. Veri toplama programına ait kullanıcı arayüzü

### 3.5.3. Hız dalgalanması ölçümü ve hassasiyet

Anlık hızlanma bilgisinin okunabilmesi için enkoderden elde edilen palslerin (darbeler) periyodunun hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla “NI-

USB 6251 DAQ” kartında bulunan 80 MHz sayıcı kullanılmıştır. Bu sayıcı ard arda gelen pulsler arasındaki süreyi 80 MHz çalışma frekansına sahip bir sayıcı ile saymaktadır. Saniye cinsinden elde edilen bu değerler devir/dakika formatına dönüştürülmektedir. Devir ölçümünün daha hassas bir şekilde yapılarak hata oranının düşürülmesi için 3600 palslik enkoder sinyali frekans bölücü elektronik devre yardımıyla devir başına 1800 pulse indirgenmiştir. Bu sayede krank açısının bir derecelik değişiminde 5 kere anlık hızlanma değeri ölçülebilmektedir. Motor hızı arttıkça elde edilen pulslerin periyodu kısalmaktadır. Sayıcı artım adımı  $1,25 \cdot 10^{-8}$  Sn. ve sabit olduğu düşünülürse motor hızı arttıkça hızlanma ölçümündeki hassasiyet düşmektedir. Motor hızlanma ölçüm hassasiyeti Denklem 3.1 ile elde edilmektedir.

$$s = \frac{60 \cdot f \cdot n}{60 \cdot f - N \cdot n} - n \quad (3.1)$$

Burada;

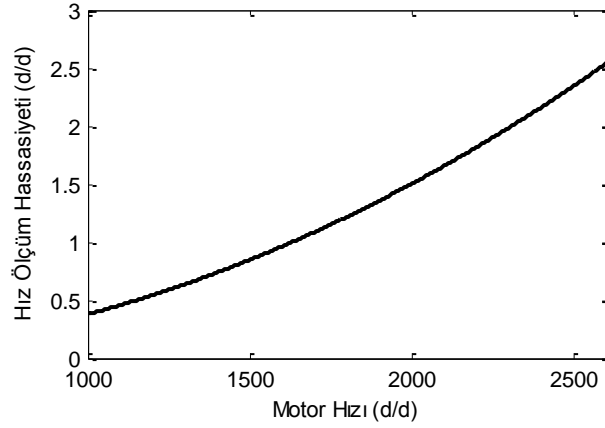
s: Hız Ölçüm Hassasiyeti

f: Sayıcı Frekansı

n: Motor devri

N: Tur başına pals değerlerini ifade etmektedir.

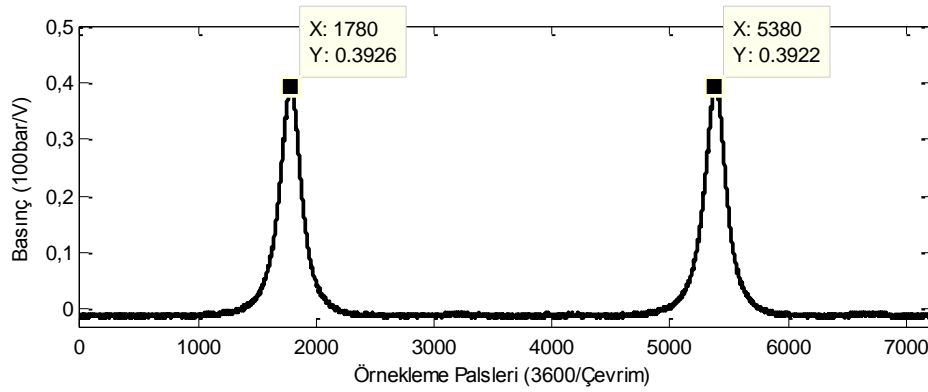
Denklem 3.1’de verilen formül ile hassasiyet değerleri 1000 d/d için 0.35 d/d, 2600 d/d için yaklaşık 2.5 d/d olarak hesaplanmaktadır. 1000-2600 d/d aralığında motor devrine göre ölçüm hassasiyeti Şekil 3.31’da verilmiştir. Sıkıştırma ve iş zamanlarında hız dalgalanması 100-150 devir olduğu düşünülürse hız ölçüm hassasiyeti yeterli olduğu görülmektedir.



Şekil 3.31. Devire göre hız ölçüm hassasiyeti

### 3.5.4. Üst ölü noktanın tespiti

Ölçüm verilerinin aynı noktalarda ayrıştırılarak değerlendirilebilmesi açısından üst ölü nokta konumunun net olarak tespit edilmesi zorunludur. Ölçüm verilerinde iki örnek arası  $0.2^\circ$  krank açısı vardır. Üst ölü nokta sensörünün mekanik olarak konumlandırılmasında bu hassasiyetin sağlanması mümkün değildir. Ölçüm veri aralığında üst ölü noktanın yerinin hassas olarak tespit edilmesi amacıyla, farklı devirlerde motor kompresyon eğrileri deneysel olarak ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalama kompresyon eğrisinde en yüksek basınç değerinin konumunu üst ölü nokta konumunu ifade etmektedir. Kompresyon eğrileri elde edilirken motor yakıtı kesilerek, elektrikli dinamometre ile istenilen devirde motor döndürülerek ölçümler alınmıştır. Şekil 3.32’de ardışık iki çevrim için kompresyon ölçümü verilmiştir. Grafikte en yüksek basınç değerleri ve konumları görülmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere iki kompresyon ölçümü için en yüksek değer 1780 ölçüm palsinde elde edilmiştir. Derece başına beş pals olduğu düşünüldüğünde ölçümlerde 358. derece ÜÖN konumu olarak tespit edilmektedir.

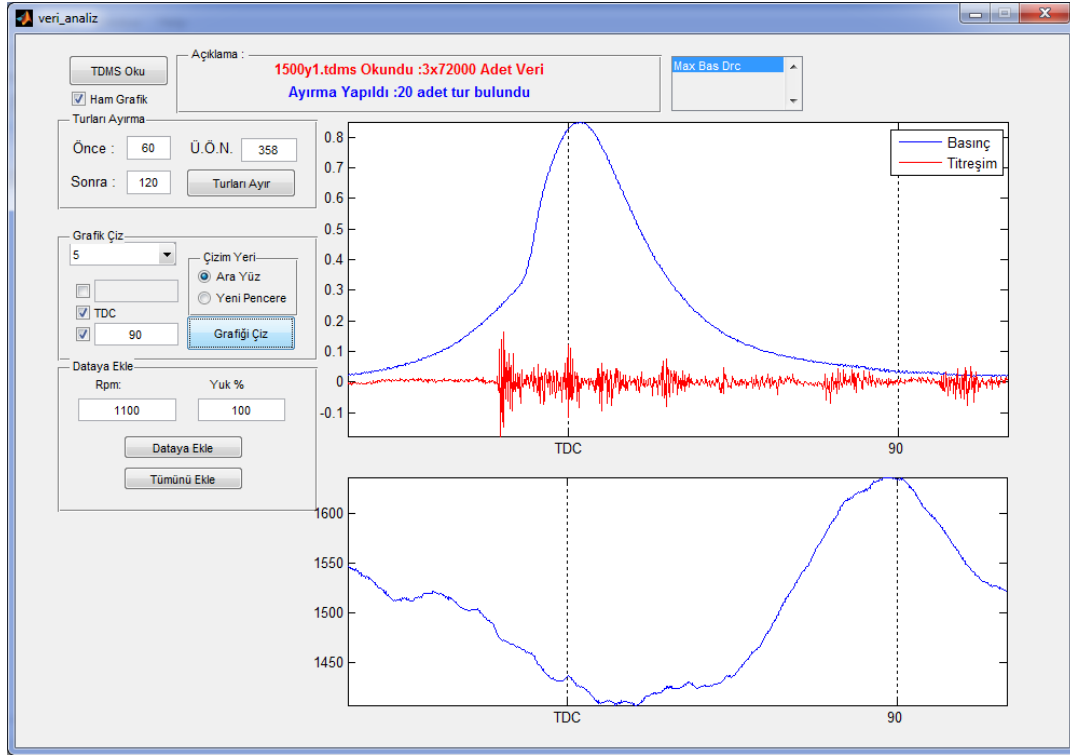


Şekil 3.32. ÜÖN'nin kompresyon ölçümü ile deneysel olarak tespiti

### 3.6. Ölçüm Verilerinin Matlab'a Aktarılması ve Oluşturulan Arayüz

Yukarıda da bahsedildiği gibi deneysel veri toplama adımları için Labview ortamında bir program hazırlanmıştır. Veri ölçüm programı ile motor deneyleri sırasında yapılan ölçümler ayrı ayrı “tdms” dosyalarına kaydedilmiştir. tdms dosyaları işlenmemiş ham ölçüm verilerini içermektedir ve bu ölçüm verileri Matlab ortamına aktarılarak, silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için izlenen yöntemler Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Matlab ortamında ardışık çevrimleri içeren ölçüm dosyalarından her bir çevrim için veriler ayrıştırılmalı, silindir içi basınç değişimini ifade eden kısımları değerlendirilmeye alınmalıdır. Deneyler sonrasında birçok ölçüm dosyası ortaya çıkmış, her ölçüm dosyası içerisinde de 20 ve üzeri çevrim yer almaktadır.

Matlab ortamında “tdms” ölçüm dosyalarının okunması ve ihtiyaç duyulan kısımlarının ayrıştırılarak dosyalara kaydedilmesini hızlandırmak ve kolaylaştırmak amacıyla bir Matlab arayüzü hazırlanmıştır. Hazırlanan Matlab arayüzünden çalışma sırasında elde edilen bir görüntü Şekil 3.33'de verilmiştir.

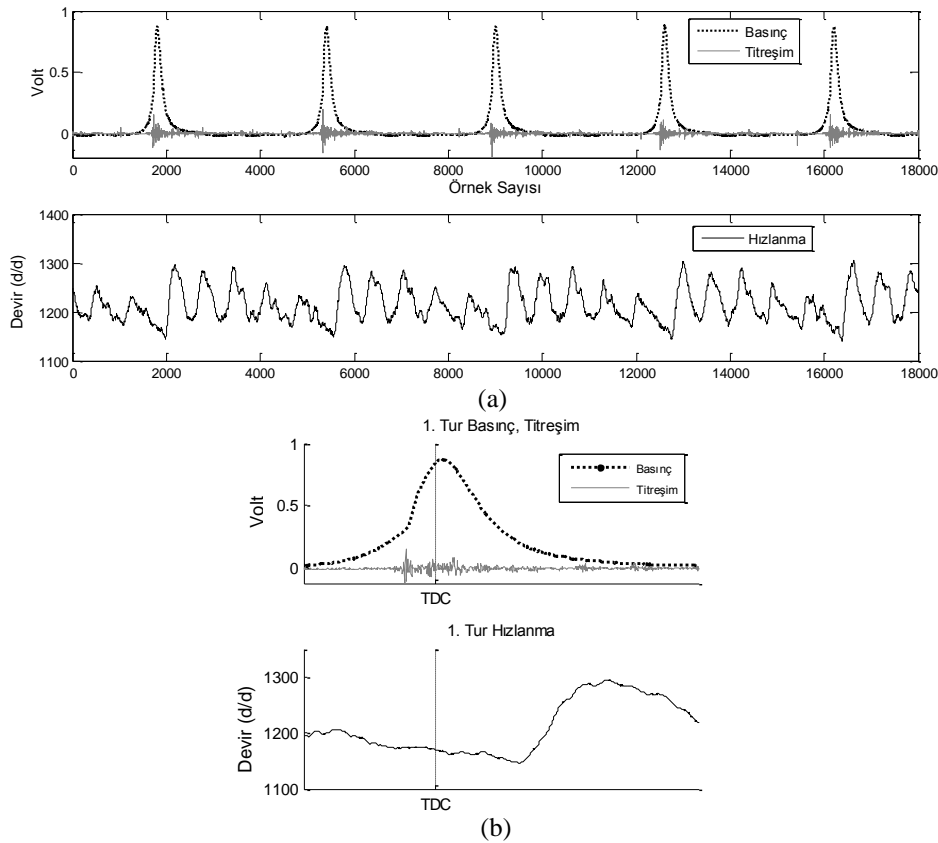


Şekil 3.33. Verilerin Matlab'a aktarılması için hazırlanan arayüz

Hazırlanan veri analiz programı kullanımı sırasında öncelikle “TDMS Oku” butonuna tıklanması ile Windows gezgini açılarak kullanıcı okumak istediği dosyayı seçmektedir. “Tdms” dosyasının seçiminden önce “Ham Grafik” onay kutusu işaretlenmiş ise dosya içeriği ayrı bir pencerede gösterilmektedir. Dosyanın okunması ardından kompresyon ölçümleri ile tespit edilen üst ölü nokta konumu girilir ve ÜÖN’den önce ve sonra verinin ne kadarının ayrıştırılması istendiği girilerek “Turları Ayır” butonuna tıklanır. Arayüz, dosya içerisinde bulunan çevrim miktarını otomatik olarak tespit eder ve her çevrim için istenilen veri aralığını ayrıştırır. Turların ayrıştırılmasının ardından grafik çiz bölümünde bulunan açılır menü içerisine tur bilgileri sıralanır. Kullanıcı incelemek istediği veya dosyaya kaydetmek istediği tur numarasını seçerek yeni bir pencerede veya arayüz üzerinde grafik çizdirebilir. Eğer veriler dosyaya eklenmek isteniyorsa kullanıcı bu ölçümün hangi devir ve hangi yükte alındığı bilgisini “Rpm” ve “Yük%” alanlarına girmelidir. Bu işlemin ardından “Dataya Ekle” butonuna tıklanırsa sadece seçili olan tur, “Tümünü Ekle” butonuna tıklanırsa tüm turlar dosyaya eklenmektedir.



Oluşturulan Matlab arayüzü vasıtası ile ham ölçümleri içeren “tdms” dosyaları okunarak, ayrıştırılarak her çevrim incelenebilmekte ve bu çevrim bilgileri bir Matlab veri dosyasına kaydedilmektedir. Silindir içi basıncın dolaylı ölçümünün Matlab ortamında gerçekleştirilmesinde bu veri dosyaları kullanılmaktadır. Şekil 3.34’de 5 çevrim içeren bir tdms dosyası içeriği ve içerisinden bir çevrimin ayrıştırılmış hali verilmiştir.



Şekil 3.34. (a) 5 Çevrimlik bir tdms dosya içeriği (b) Arayüz ile 1 çevriminin ayrıştırılması

### 3.7. Deney Yöntemi

Deneylere başlamadan önce, motor yakıt, yağ ve soğutma suyu seviyeleri kontrol edilmiştir. Motor çalıştırılıp rejim sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Tam yük deneyleri için motor boşta 3000 d/d devrine getirilip gaz kolu sabitlenmiştir. Motorun test edileceği minimum ve maksimum yük değerleri belirlendikten sonra deneylere başlanmıştır. Tam yük ölçümleri 1000 – 2600 d/d aralığında 100 devirde bir ölçüm almak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Kısmi yük ölçümleri ise %80, %60,

%40, %20 yük şartlarında 200 devir aralıklarla yapılmıştır. Ölçüm dosyalarının kaydedilmesi, döndürme kuvveti, motor devri, yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarının ölçümüne geçilmeden önce motorun kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Motor kararlı hale geldikten sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir. Soğutma suyu çıkış sıcaklığı 80 °C' de sabit tutulmuştur.

EKBPS sistemi ile motora buhar sevki deneylerinde karşılaştırma açısından deneyler ilk önce dizel yakıtı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra su buharı emme zamanında, emme manifolduna ve emme supabı açık iken motor yakıt sarfiyatının kütleli olarak % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30 oranlarında motora enjekte edilmiştir. Her bir buhar püskürtme oranı için deneyler tekrarlanarak ölçüm verileri alınmış ve diğer değerler ölçülmüştür.

Tablo 3.6. Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları

Ölçülen parametreler	Birim	Ölçüm aralığı	Ölçme aleti	Ölçüm hassasiyeti
Motor Devri	dev/dak	0-9999	Sayısal takometre	1 dev/dak
Egzoz sıcaklığı	°C	0-1000	Ni-Cr-Ni	1 °C
Soğutma suyu giriş-çıkış ve ortam sıcaklığı	°C	0-999	Fe-Konst.	1 °C
Buhar sıcaklığı	°C	0-999	Fe-Konst.	1 °C
Yakıt tüketim zamanı	s	-	Mikrodenetleyici	0,001s
Fren terazi kuvveti	Kg	0-100	Elektromanyetik fren	0,1 Kg
Azot oksit (NO), ppm	ppm	0-2000	Bilsa	± 5 ppm
Duman Koyuluğu	%	0-99	Bilsa	% 1

### 3.8. Matematiksel Hesaplamalar

Dizel motorlarda, krank mili devrine bağlı olarak ölçülen güç, moment ve yakıt sarfiyat değerlerine motor karakteristikleri denilmektedir. Değişik yük ve devirlerde bu değerlerde meydana gelen değişimler eğrilerle gösterilir. Bu değişimleri gösteren

eğriye karakteristik eğri adı verilir. Bu eğriler motorun gerçek çalışma şartlarındaki performansı hakkında önemli bilgiler verir. Motor performansının tespiti amacı ile yapılan deneysel çalışmalarda doğrudan bulunamayan değerler, performans karakteristiklerini veren denklemlerle hesaplanır. Motor deneylerinde ölçülen büyüklükler genellikle döndürme momenti, devir sayısı, yakıt debisi, emme havası debisi, ortam sıcaklığıdır. Bu büyüklükler vasıtasıyla hesaplanan en önemli performans karakteristikleri ise efektif güç, döndürme momenti, ortalama efektif basınç ve özgül yakıt sarfiyatıdır [91].

### 3.8.1. Döndürme momenti ve efektif güç

Motor döndürme momenti ve güç hesaplamalarında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Motor tarafından oluşturulan döndürme momenti;

$$M_d = F \cdot L \quad (3.2)$$

Motor tarafından üretilen güç aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır [92].

$$P_e = \frac{2\pi \cdot F \cdot L \cdot n}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (3.3)$$

Burada;

$M_d$  = Döndürme momenti (Nm),

$F$  = Fren terazi kuvveti (N),

$L$  = Moment kolu uzunluğu (m),

$P_e$  = Efektif güç(kW),

$n$  = Motor devri (devir/s).

### 3.8.2. İndike verim

İndike verim, motor milinden alınan işin silindire verilen yakıt enerjisine oranı şeklinde tanımlanır;

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_y \cdot H_u} \quad (3.4)$$

Burada;

$\eta_e$  = İndike Verim,

$P_e$  = Efektif güç,

$\dot{m}_y$  = Yakıtın kütleli debisi,

$H_u$  = Yakıtın alt ısı değeri.

### 3.8.3. Özgül yakıt sarfiyatı

Birim zamanda birim güç başına harcanan yakıt miktarına özgül yakıt sarfiyatı denir. Laboratuvar şartlarında bir motorun yakıt sarfiyatını deney tesisatında hacimsel olarak ölçmek mümkündür. Belli çalışma şartlarında motorun  $\Delta t$  (s) zaman aralığında tükettiği yakıtın hacmi  $\Delta V(\text{cm}^3)$  olsun. Yakıtın yoğunluğu  $\rho_y$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ise, özgül yakıt sarfiyatı,  $b_e$ ; [92].

$$b_e = \frac{3600 \cdot \Delta V \cdot \rho_y}{P_e \cdot \Delta t} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_y}{P_e} \quad (3.5)$$

olarak bulunur.

## **BÖLÜM 4. SİLİNDİR İÇİ BASINCIN DOLAYLI ÖLÇÜMÜ**

Silindir içi basınç eğrisinin hızlanma ve yüzeysel titreşim bilgileri kullanılarak dolaylı olarak ölçülmesi için bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli kullanılmıştır. YSA modelinin girişlerinde titreşim ve hızlanma, çıkışlarında ise silindir içi basınç eğrisi bulunmaktadır. Hem giriş hem de çıkış için krank açısına bağlı alınan ham ölçümlerin kullanılması yerine eğitim ve doğrulama işlemlerinden önce titreşim, hızlanma ve basınç bilgileri bir dizi ön işlemlerden geçirilerek YSA eğitim ve doğrulama setleri hazırlanmıştır. Bu bölümde titreşim, hızlanma ve basınç bilgilerinin ön işlemlerden geçirilmesinde kullanılan teknikler detaylandırılacaktır. Ardından silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için kullanılan YSA modeli, eğitimi ve doğrulanması üzerinde durulacaktır.

Bilindiği üzere iş zamanı sırasında, hız dalgalanmasında yer alan azalma ve artımlar ayrıca titreşim bilgisindeki değişimler silindir içi basınç değişiminin etkilerini taşımaktadır. Silindir içi basınç eğrisinin titreşim ve hızlanma üzerine etkisi zamana yayıldığına dikkat edilmelidir. Bu yüzden hız dalgalanmasının ve titreşim bilgisinin krank açısına bağımlı olarak anlık değerleri ele alınarak o anki basınç değerinin elde edilmesi söz konusu olmamaktadır. Mevcut literatürde silindir içi basıncın dolaylı ölçümü üzerine yapılan çalışmaların birçoğunda dolaylı ölçüm için kullanılan bilgiler her yanma periyodu için tümüyle ele alınarak kullanılmıştır [11,12,15,23,35,36]. Yukarıda da bahsedildiği üzere bütün deneysel veri toplama işlemleri devir başına 1800 örnek olacak şekilde enkoder (açısal konum algılayıcı) vasıtasıyla yapılmıştır. Tüm veriler 0.2 derecede bir örnek olacak şekilde alınmış ve motor devrine bağlı kalımsızın her ölçümde devir başına 1800 örnek bulunmaktadır. Örneğin, sıkıştırma ve yanma zamanlarını içeren -60...TDC...+120 KMA aralığında her ölçüm için 900 örnek ortaya çıkmaktadır. Hızlanma ve titreşim bilgilerinin zaman domeninde kullanılması düşünüldüğünde 1800 girişli (900 hızlanma için, 900

titreşim için) 900 çıkışlı bir YSA oluşturulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Böyle bir YSA modelinin kullanılması pratik olarak hayli güçtür. Ayrıca bu şekilde bir YSA modeli kullanıldığı takdirde, eğitim ve eğitim sonrası çalıştırılması büyük bir işlemsel yük getirecektir.

Yüzeysel titreşim, hız dalgalanması ve basınç bilgilerinin sinyal işleme teknikleri ile ön işlemden geçirilerek zaman domeninde bulunan çok sayıda örnek yerine daha az parametreyle ifade edilmesi sağlanabilirse daha basit bir YSA modelinin oluşturulması mümkün olacaktır. Bilindiği üzere Yapay Sinir Ağları çıkışları matematiksel bir ifadedir. Yapay Sinir Ağları eğitiminde özetle yapılan işlem, bu matematiksel ifadede yer alan katsayıların probleme en uygun hale getirilmeye çalışılmasıdır. Bu bilgiler göz önüne alındığında, ön işleme için kullanılacak tekniklerin doğru tespiti, mevcut problem için bir YSA oluşturup başarılı sonuçlar elde etmek için hayli önem kazanmaktadır. Kullanılacak ön işleme teknikleri tercihinde girişte yer alan titreşim ve hızlanma bilgilerini her yanma periyodu için tümüyle ifade edecek ve her farklı motor çalışma durumu için matematiksel olarak birbiriyle ilişkili parametreler elde edecek bir yöntem tercih edilmesi gerekmektedir. Yapay Sinir Ağı çıkışında yer alan basınç bilgisi için kullanılacak tekniğin tercihinde en önemli nokta; elde edilen parametrelerden kayıpsız olarak basınç bilgisine dönüşmeye mümkün kılacak bir teknik olmasıdır. YSA, eğitim işleminden sonra çalıştırıldığında, uygulanan her giriş grubu için basınç bilgisini ifade eden parametreleri üretecektir. Bu elde edilen parametreler ile işleme tekniği tersine çevrilerek basınç bilgisi elde edilmesi hedeflenmektedir.

#### **4.1. Basınç, Titreşim ve Hızlanma Bilgilerinin Analizi**

Ölçüm verileri, YSA modelinde eğitim veya doğrulama işlemlerinde kullanılmadan önce literatürde yer alan metotlar vasıtasıyla ön işlemlere tabi tutulmuştur. Aşağıda bu amaçla kullanılan metotlar hakkında genel bilgiler verilmiştir.

#### 4.1.1. Fourier dönüşümü

Fourier dönüşümü, fizik ve mühendislik dallarında birçok uygulama alanı olan bir matematiksel dönüşümdür. Fourier dönüşümü genel tanımı olarak; bir zamana bağımlı matematiksel fonksiyonu, frekans spektrumu olarak bilinen frekansa bağımlı olarak ifade edebilen bir dönüşümdür [93]. Fourier dönüşümü J. Fourier tarafından ortaya atılan zamana bağımlı sinyallerin sinüs ve kosinüs serileri toplamı olarak ifade edilebileceği temeline dayanır. Bu dönüşümün en önemli özelliklerinden bir tanesi; frekans spektrumundan zamana bağımlı sinyalin geri elde edilebilmesine olanak tanınmasıdır. Sürekli sinyaller için fourier dönüşümü ve ters fourier dönüşüm işlemleri Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

Burada;

$F(\omega)$  : Frekans uzayındaki fonksiyon,

$f(t)$  : Zaman uzayındaki fonksiyon,

$\omega$  : Frekans değişkenidir.

Fourier dönüşümünün bilgisayarlar üzerinde yazılımlarla ayrık sinyaller üzerinde uygulanabilmesi sayısal sinyal işlemenin temellerini oluşturmaktadır. Ayrık sinyallerin bilgisayar ortamında fourier dönüşümünü elde edebilmek için integral işlemi bir toplam sembolü ile değiştirilmelidir. Ayrıca bilgisayar ortamında sonsuz hesaplama yapılamayacağından, toplam sembolünün limitlerinin sonsuzlar yerine sayılara dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrık sinyaller ile sayısal hesaplama ortamlarında (bilgisayarlar, mikrodenetleyiciler vb.) gerçekleştirilen bu fourier dönüşümüne, Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) denilmektedir. Bunun yanında, fourier dönüşümünün bilgisayarlar üzerinde az işlem yükü gereksinimi ile hızlı bir şekilde

gerçekleştirilebilmesi için birçok algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların tamamı literatürde Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) olarak bilinmektedir [94]. DFT işleminin ifadesinde, kullanılan algoritmalara göre değişen bir çok formülasyonu ve notasyonları bulunsa da en genel hali Denklem 4.2’de verilmiştir.

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j(2\pi k \frac{n}{N})} \quad (4.2)$$

Burada;

$k$  : frekans değerlerini,

$N$  : örnek sayısını,

$n$  : sırasıyla işlenen örneği,

$x[n]$ : örneklenmiş sinyali ifade etmektedir.

FFT dönüşümü sonrasında kompleks sayılar ortaya çıkmaktadır. Kompleks sayıların içindeki reel değerler o frekanstaki genliği, imajiner değerler ise fazı ifade etmektedir.

#### 4.1.2. Eğri uydurma tekniği

Eğri uydurma, bir veri setindeki noktaların tümüne mümkün olan en iyi yakınsama oranına sahip bir matematiksel fonksiyon eğrisi inşa etme sürecidir. Burada kullanılan veri seti, deneysel yollarla veya sayısal yollarla elde edilebilmektedir. Eğri uydurma işlemi, genellikle mantıksal benzerliği olan enterpolasyon (ara değer bulma) işlemi ile karıştırılmaktadır. Enterpolasyon ile veri noktalarının tam üzerinden geçen bir eğri oluşturulmaya çalışılır. Ayrıca bu eğrinin bir matematiksel fonksiyona ait grafik olma şartı bulunmamaktadır. Eğri uydurma tekniği ise matematiksel fonksiyonları kullanarak veri seti için bir pürüzsüz eğri oluşturmaya çalışmaktadır ve eğrinin bütün veri noktalarına temas etme şartı bulunmamaktadır. Bu nedenle eğri uydurma genellikle ölçüm hatalarından kaynaklanan gürültüye sahip sinyallere sıklıkla uygulanmaktadır [95].



Eğri uydurma teknikleri bir çalışma verisinin değişiminin görselleştirilmesi, gerçekte veri bulunmayan ara değerlerdeki verilerin tespit edilmesi ve ayrıca iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi amacıyla kullanılmaktadırlar. Eğri uydurma tekniği ile bir fonksiyonun veri setine uydurulmasının en büyük avantajlarından bir tanesi de veri setinde bulunan onlarca noktanın saklanması, işlenmesi yerine fonksiyon üzerindeki az sayıda katsayı kullanılarak verilerin ve ara değerlerinin kolaylıkla elde edilebilmesidir.

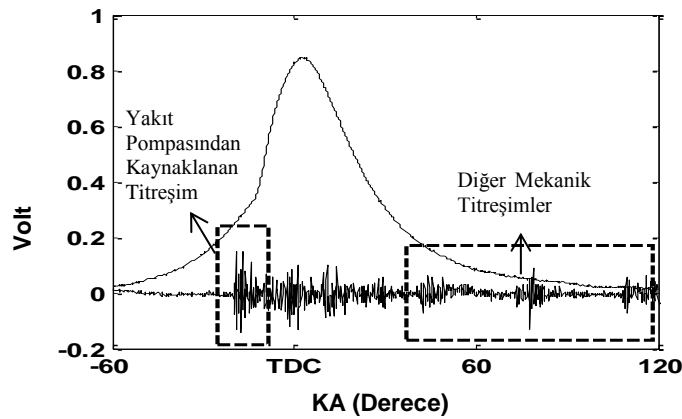
Eğri uydurma tekniğinde sıklıkla bazı genel denklem formları kullanılmaktadır. Bu denklem formları; polinomlar, exponansiyel seriler, sinüsler toplamı, gauss serileri ve fourier serileri olarak özetlenebilir. Eğri uydurma algoritmaları veri setindeki değerler ve eğri arasındaki hatayı minimize etmek amacıyla seçilen denklem içinde bulunan katsayıları, iteratif olarak küçük adımlarla değiştirirler. Bu algoritmalarda genellikle bir iterasyon sayısı ve minimum hata değeri girişi yapılmaktadır. Algoritma iterasyon sayısını veya minimum hata değerinden birini yakalayana kadar çalışmaya devam etmektedir. Eğri uydurma algoritmaları, iterasyonlar sırasındaki hata ölçüm ve katsayı değiştirme stratejilerine göre değişkenlik arz etmektedir. Eğri uydurma algoritmalarının en çok kullanılanları: Gauss-Newton, Levenberg-Marquart ve Trust Region algoritmalarıdır [96].

Bu çalışmada ise, eğri uydurma algoritmaları tekniği daha alçak frekans bileşenleri ihtiva eden basınç ve hızlanma bilgilerinin krank açısına göre değişimini matematiksel olarak ifade edebilmek ve çok sayıda ölçüm değerini daha az sayıda katsayı ile ifade edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Öncelikle basınç ve hızlanma bilgileri için kullanılacak algoritmalar ve ardından bu algoritmalarından en uygunu belirlenmiştir. Kullanılacak algoritmanın basınç ve hızlanma verilerinin tamamını en hızlı ve en az hata ile tespit etmesinin gerekliliği açıktır. Eğri uydurma algoritmaları, farklı motor çalışma koşullarında elde edilen gerçek veriler üzerinde denenmiş, hata ve hesaplama hızları karşılaştırılarak kullanılacak algoritma tespit edilmiştir.

## 4.2. Titreşim Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi

Vuruntu sensör verisi ile elde edilen yüzeysel titreşim silindir içi basınç değişimi ve motor üzerindeki mekanik parçaların hareketlerinin etkileri ile oluşmaktadır. Bir çevrim boyunca ölçülen titreşim verisi içerisinde, motor supaplarının, kam milinin hareketleri ve yakıt pompasının harekete geçirilmesi gibi etkilerden oluşan bileşenler bulunmaktadır. Bu bahsedilen titreşim bileşenlerinin silindir içi basınç eğrisi ile doğrudan bir ilişkisi bulunmamaktadır. Silindir içi basınç bilgisini dolaylı ölçmek için öncelikle titreşim bilgisinin istenmeyen bu bileşenlerden arındırılması gerekmektedir.

Şekil 4.1’de tam yük 1600 d/d koşulunda alınan bir ölçüm yer almaktadır. Grafik incelendiğinde pistonun üst ölü nokta öncesi, sonrası hareketi ve yakıt tutuşmasından kaynaklanan titreşim haricinde titreşimler olduğu gözlemlenmektedir. Titreşim verileri incelendiğinde yakıt pompasının çalışması esnasında ortaya çıkan titreşimin hayli yüksek olduğu tespit edilmiştir. Motor çalışması esnasında yakıt pompası tarafından yakıtın püskürtülmesinin ardından kısa bir gecikmeyle (tutuşma gecikmesi) yakıtın yanması gerçekleşmektedir. Bu nedenle yakıt pompasından kaynaklanan titreşim, en yüksek basınç değerinin olduğu andaki titreşimden hemen önce meydana gelmektedir ve dikkatli bir şekilde ayrıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle titreşim bilgisinin ön işlem aşamalarından birincisi, istenmeyen bileşenlerin ayrıştırılması olmalıdır.



Şekil 4.1. Tam yük 1600 d/d alınan bir ölçüm ve istenmeyen titreşim bileşenleri

#### 4.2.1. İstenmeyen bileşenlerin titreşim bilgisinden ayrıştırılması

V.G. Zurita tarafından titreşim bilgisinden silindir içi basınç harici bileşenleri ayırmak için zaman domeninde bir pencere (ağırlıklama fonksiyonu) önerilmiştir [97]. Bu önerilen pencere üç bölümden oluşmaktadır: sıfır dolgusu, Hann pencere ve exponansiyel pencere. Bu pencereye ait denklem, Denklem 4.3'te yer almaktadır. Denklem 4.3'te ÜÖN 0 derece olarak kabul edilmektedir.

$$W_G(\alpha) = [Sıfırlar, W_H(\alpha), W_E(\alpha)]$$

$$W_H(\alpha) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi a}{2A_h + 1} \right) \right] \quad -A_h \leq \alpha < 0 \quad (4.3)$$

$$W_E(\alpha) = e^{-(\alpha - \alpha_0)/\tau} \quad \alpha_0 = 0, \quad 0 \leq \alpha < A_e$$

Burada;

$W_G(\alpha)$  : pencerenin tamamını,

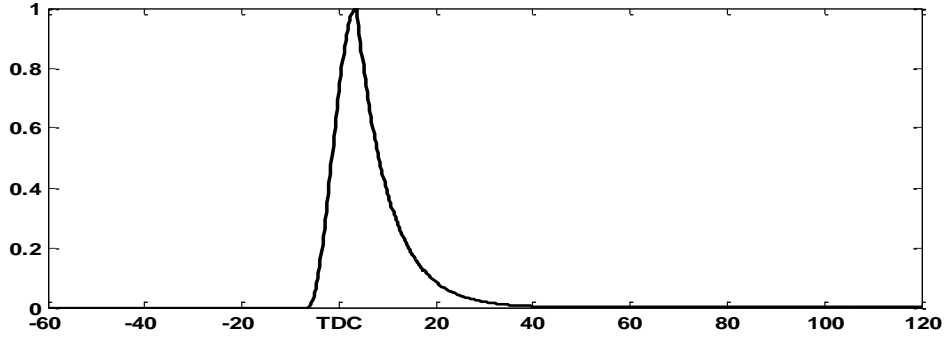
$W_H(\alpha)$  : hann pencere bileşenini,

$W_E(\alpha)$  : exponansiyel pencere bileşenini,

$\alpha$  : krank açısını,

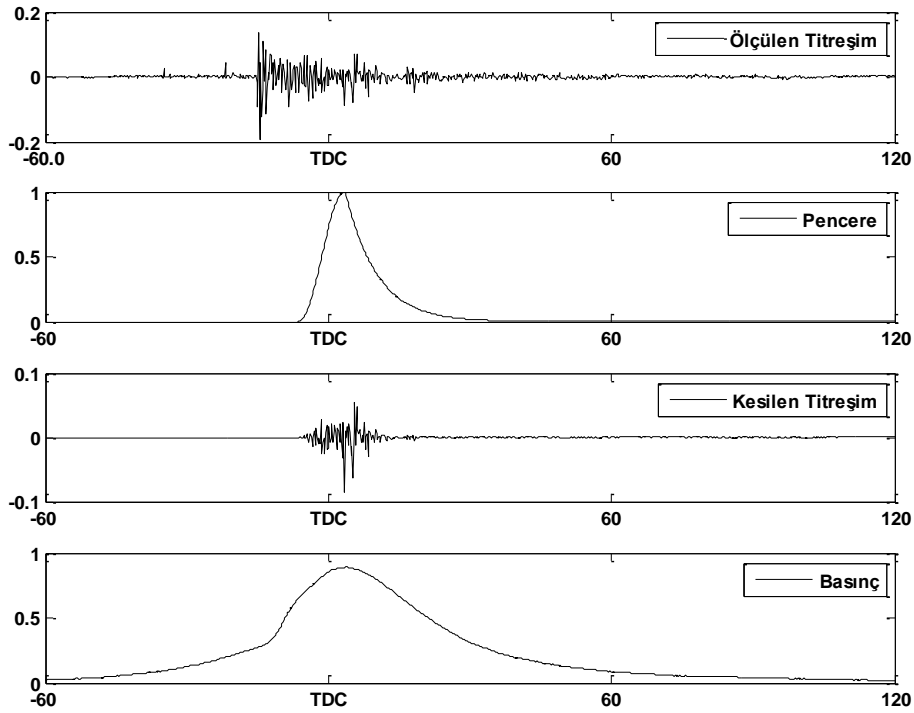
$A_h, A_e$  : alt ve üst sınırları ifade etmektedir.

V.G. Zurita tarafından önerilen pencere R. Johnsson tarafından da kullanılmıştır. R. Johnsson pencerede bulunan Hann ve Exponansiyel bileşenlerin 0 derece (ÜÖN) olan birleşim noktasını kullandığı ölçüm verilerine uyması açısından +6 derece olarak değiştirmiştir [11]. Bu çalışmada ise deneysel ölçüm verilerinde bulunan tüm basınç ölçümlerinin ortalaması alındığında en yüksek basınç değerinin +4 derecede olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple pencere birleşim noktası 0 derece yerine +4 derece olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.2'de kullanılan pencerenin Krank Açısına göre grafiği verilmiştir.

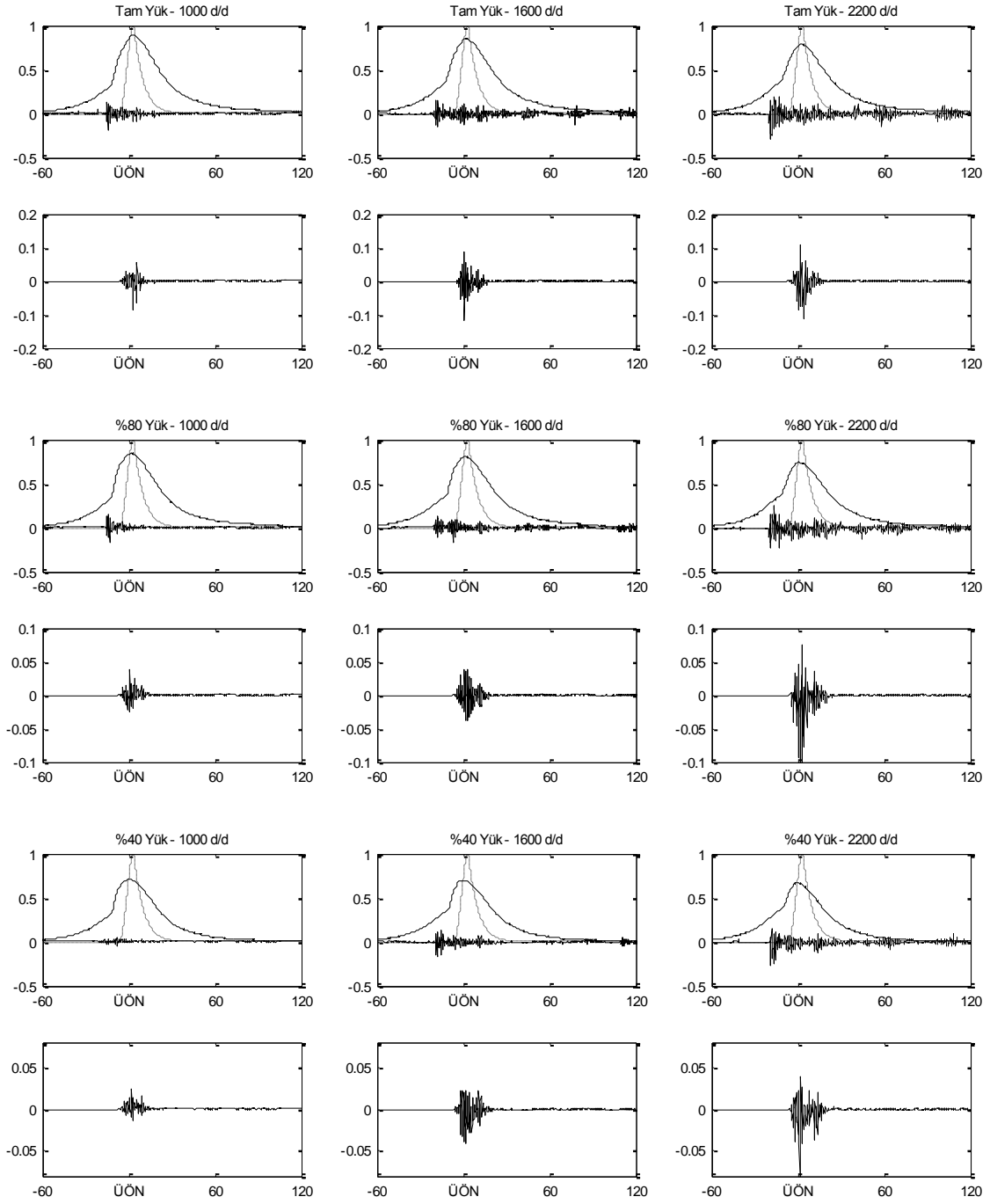


Şekil 4.2. Titreşim bilgisi için kullanılan pencere

Titreşim bilgileri, her ölçüm için Denklem 4.1’de verilen pencere ile konvolüsyon işlemine tabi tutularak silindir içi basınç değişimi ile ilgili olmayan bileşenlerinden ayrıştırılmıştır. Pencere yapısında bulunan hann bileşen hızlı bir değişim göstermesi sayesinde yakıt pompasından kaynaklanan titreşimlerin ayrıştırılması mümkün olmaktadır. Şekil 4.3’de bir ölçüm için ölçülen titreşim, pencere, pencerelenmiş titreşim ve bu ölçüm için basınç eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.3. Bir çevrim için titreşim bilgisinin pencereden geçirilmesi



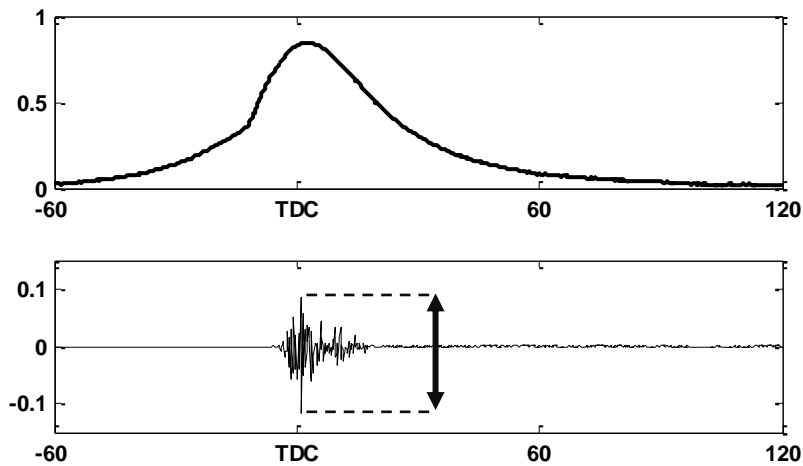
Şekil 4.4. Çeşitli çalışma koşulları için titreşim verilerinin pencerenilmesi

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi pencereden geçirilen titreşim, yakıt pompası etkisinden, yanma sonrası ortaya çıkan diğer titreşimlerden ve istenmeyen etkilerden ayrıştırılmıştır. Silindir içi basınç verisi ile beraber değerlendirildiğinde piston hareketinin üst ölü noktadan dönüşü ve yakıt tutuşması sonucu oluşan titreşimin

korunduğu gözlemlenmektedir. Deneysel ölçümlerden toplanan bütün titreşim verileri pencereden geçirilerek değerlendirmeye alınmış ve YSA için kullanılacak bütün parametreler üretilmiştir. Şekil 4.4'te çeşitli çalışma koşulları ve çeşitli devir değerleri için basınç eğrisi ile birlikte titreşim verisinin pencerelemesi gösterilmiştir. Üst grafiklerde basınç, pencere ve ölçülen titreşim; alt grafiklerde ise pencerelemiş titreşim verilmiştir.

#### 4.2.2. En büyük titreşim genliğinin elde edilmesi

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için titreşimden elde edilen parametrelerden biri de en yüksek titreşim genliğidir. Bu parametre pencereden geçirilmiş titreşim verisindeki en büyük değer en küçük değerden çıkarılması ile elde edilmektedir. En yüksek titreşim genliği, yakıt tutuşması ile ani hacim genişlemesi neticesinde piston üzerine uygulanan kuvvetin değeri hakkında bilgi vermektedir. Şekil 4.5'de bir çevrim için en yüksek titreşim değeri grafiksel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.5. Bir çevrim için en yüksek titreşim genliğinin elde edilmesi

#### 4.2.3. Toplam mutlak titreşim değeri

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümünde kullanılacak YSA modeli için titreşim bilgisinden elde edilen diğer bir parametre ise toplam mutlak titreşim değeridir. Bu parametre, her çevrim için pencerelemiş titreşim verisi örneklerinin mutlak

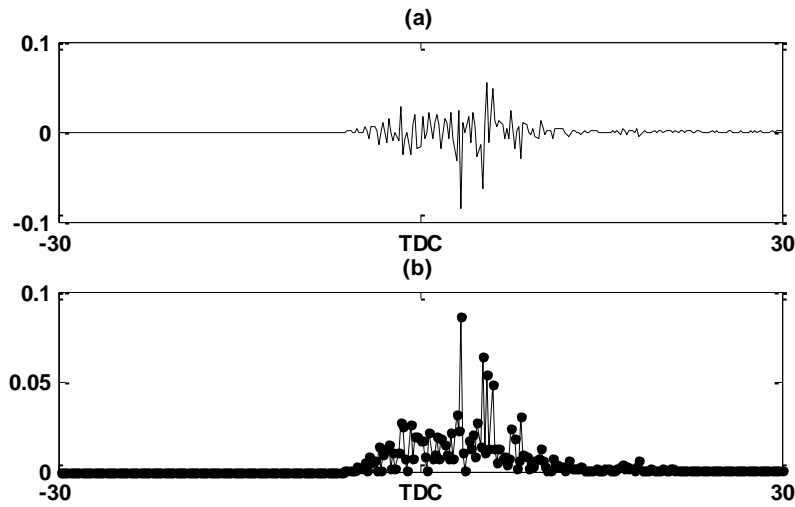
değerinin toplamıdır. Ölçüm verilerinin doğrultularak (mutlak değer alma) kullanılması literatürdeki tıp elektroniği çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu teknik, özellikle EMG sinyallerinin ön işlemden geçirilmesi sırasında sinyal gücünü algılamak için tercih edilmektedir [98]. Denklem 4.4'te bu parametrenin elde edilmesi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Şekil 4.6'da ise bir ölçüm verisi için pencerelemiş titreşim ve ona ait mutlak değerleri grafik üzerinde ifade edilmiştir.

$$|\Delta_v| = \sum |v_n| \quad (4.4)$$

Burada;

$|\Delta_v|$  : toplam mutlak titreşim,

$v_n$  : her örnekte alınan titreşim genliği,



Şekil 4.6. Toplam mutlak titreşim değeri (a) Pencerelemiş titreşim (b) Titreşim mutlak değerleri

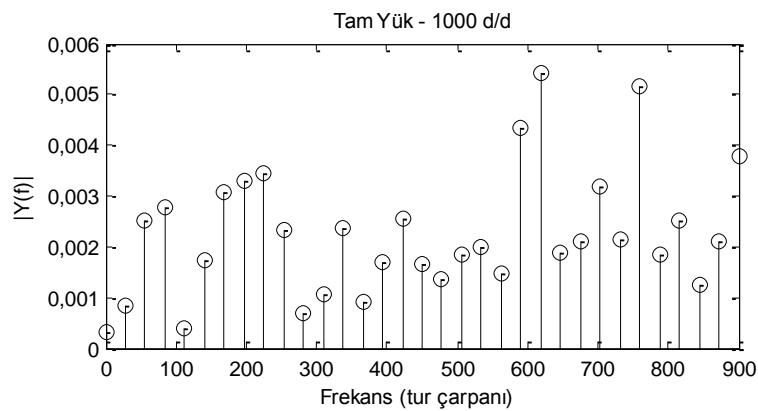
#### 4.2.4. Titreşim bilgisinin fourier dönüşümü

Silindir içi basınç eğrisinin dolaylı ölçümü için kullanılan YSA girişlerinin bir bölümüne, titreşim bilgisinin fourier dönüşümü alınarak uygulanmıştır. Fourier dönüşümü, daha önce de bahsedildiği gibi, işlenen sinyali frekans bileşenlerine ayırmaktadır. Ölçümler sonucu elde edilen titreşim bilgisi ayırık formda olduğundan

ayrık fourier dönüşümü uygulanmıştır. Uygulamada kullanılan algoritma, "hızlı fourier dönüşümü (FFT)" olarak bilinen algoritmadır.

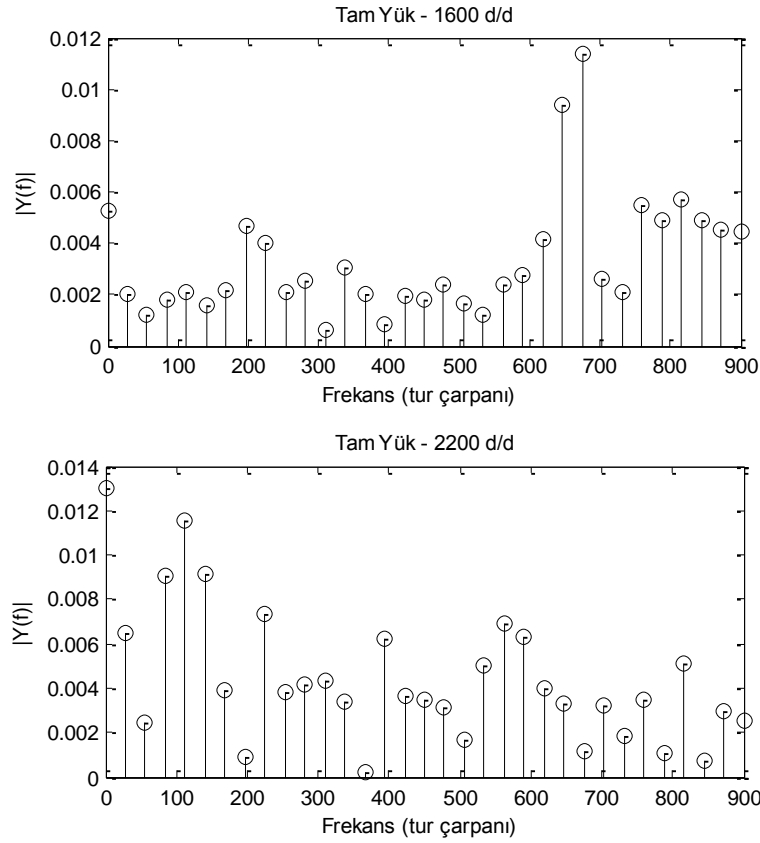
Johnsson R. tarafından yapılan çalışmada da silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için titreşim bilgisinin fourier dönüşümü alınarak YSA girişlerinde kullanılmıştır [11]. Johnsson R. Kompleks RBF ağı kullandığı için fourier katsayılarının kompleks ve reel bileşenlerini RBF girişine uygulamıştır. Bu çalışmada ise uygulama güçlüğü ve ileride tasarlanan sistemin donanım olarak gerçeklemeye uygun olması hedeflendiğinden genel (reel) RBF yapısı tercih edilmiştir. Reel RBF yapısı kullanıldığından fourier katsayılarının sadece reel bileşenleri kullanılmıştır.

Her çevrim için titreşim bilgilerinin ayrık fourier dönüşümleri alınırken 64 nokta için fourier dönüşümü alınmıştır. YSA girişlerinde reel bileşenlerin elde edilmesiyle tek taraflı genlik spektrumunda ortaya çıkan 33 harmonik için katsayı (0 dahil olmak üzere) kullanılmıştır. Harmonikler zamana bağımlı frekans olarak algılanmamalıdır. Çünkü verilerin toplanması sırasında örnekleme zamanı motor devrine bağlıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi her tur için 1800 örnek alınmış ve örnekleme aralığı  $0.2^\circ$  KMA'dır. Bahsi geçen harmonik, motor devir çarpanı olarak düşünülmelidir. Örneğin 16 değerli harmoniğin periyodu motorun o anki devrinin 16 katıdır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8.'de tam yük farklı devir koşullarında ölçülen çevrimler için ortaya çıkan tek taraflı genlik katsayıları grafiksel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.7. Tam yük 1000, d/d için elde edilen titreşim fourier dönüşüm katsayıları genlik değerleri





Şekil 4.8. Tam yük 1600,2200 d/d için elde edilen titreşim fourier dönüşüm katsayıları genlik değerleri

### 4.3. Hızlanma Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi

Hız dalgalanma bilgisini, zaman uzayındaki birçok örnek yerine daha az parametreyle ifade edecek ön işlem için eğri uydurma tekniği tercih edilmiştir. Hız dalgalanması genel olarak alçak frekanslı bir bilgidir. Hız dalgalanma bilgisinde silindirik içi basınç değişimini ifade eden en önemli bilgi, hızın ne kadar düştüğü ve ne kadar arttığıdır. Pistonun üst ölü noktaya hareketiyle hacim azalır ve basınç artışı meydana gelir. Bu zorlanma sebebi ile sıkıştırma periyodunda krank hızı düşer. Üst ölü noktadan hemen sonra yakıtın ateşlenmesiyle piston üzerine kuvvet etki eder ve piston alt ölü noktaya ivmelenerek hareket eder, hızı en yüksek noktaya ulaşır. Bu hız dalgalanma bilgisi genel bir forma sahiptir. Bu sebeplerle hız dalgalanma bilgisi için eğri uydurma teknikleri ile bir denklem uydurularak matematiksel olarak ifade edilmesi mümkündür.

Özellikle motorun yüksek devirlere çıkmasıyla motor bloğunda bir salınım meydana gelmektedir. Deney motorunun tek pistonlu dizel motor olduğu göz önüne alındığında bu salınımlar hayli fazladır. Bu salınımların etkisiyle hız dalgalanma bilgisinde küçük artış ve azalmalar meydana gelmektedir. Bu değişimler hızlanma bilgisine göre daha yüksek frekanslıdır, bozucu etkiye sahiptir ve silindir içi basınç değişimiyle bir bağlantısı yoktur. Bu sebeple hızlanma bilgisinin fourier dönüşümü alınarak frekans bileşenlerinin incelenmesi yerine daha az seri içeren denklem takımlarıyla incelenmesi bu bozucuları ortadan kaldıracak gibi daha az katsayıyla silindir içi basınç değişiminden kaynaklanan asıl hızlanma bilgisini ifade edecektir.

### 4.3.1. Hızlanma bilgisi için eğri uydurma denklemleri

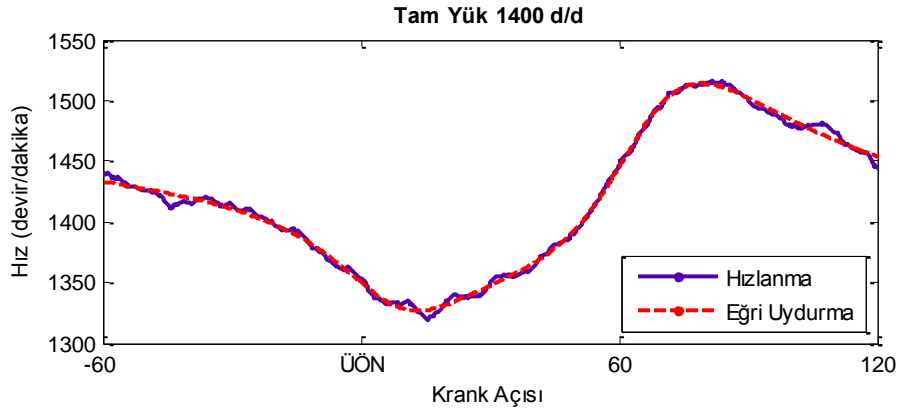
Çeşitli genel denklem serileri incelendiğinde hızlanma bilgisi için kullanılabilir üç adet denklem serisi tespit edilmiştir. Bunlar: oransal polinom, gauss fonksiyonları ve fourier serileridir.

#### 4.3.1.1.Oransal polinom

Hız dalgalanması bilgisine eğri uydurma uygulanabilecek denklemlerden birisi, payında 5. derece paydasında 4. derece polinom bulunan oransal polinom fonksiyonudur (Denklem 4.5).

$$f(x) = \frac{p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + p_4x^4 + p_5x^5}{q_0 + q_1x + q_2x^2 + q_3x^3 + q_4x^4} \quad (4.5)$$

Şekil 4.9'da tam yük 1400 d/d da alınan bir çevrime ait hızlanma bilgisinin eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon grafiği verilmiştir. Tablo 4.1'de ise bu veri için tespit edilen katsayılar verilmiştir.



Şekil 4.9. Oransal polinom denkleminin tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması

Tablo 4.1. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen oransal polinom katsayıları

$p_1$	-19.54	$q_1$	-2.489
$p_2$	1486	$q_2$	2.176
$p_3$	-3571	$q_3$	-0.7426
$p_4$	3084	$q_4$	0.2055
$p_5$	-1040		
$p_6$	277.6		

Tam yük 1400 d/d için elde edilen eğri ile ölçüm arasındaki hatanın “RMSE” değeri 3,46 olarak tespit edilmiştir. Oransal polinom denklemini 10 adet katsayı içermektedir. Hızlanma bilgisine az sayıda katsayı ile ifade etme imkânı sunsa da bazı hızlanma bilgilerine yakınsayabildiği bazılarına ise yeterli seviyede yakınsayamadığı gözlemlenmiştir.

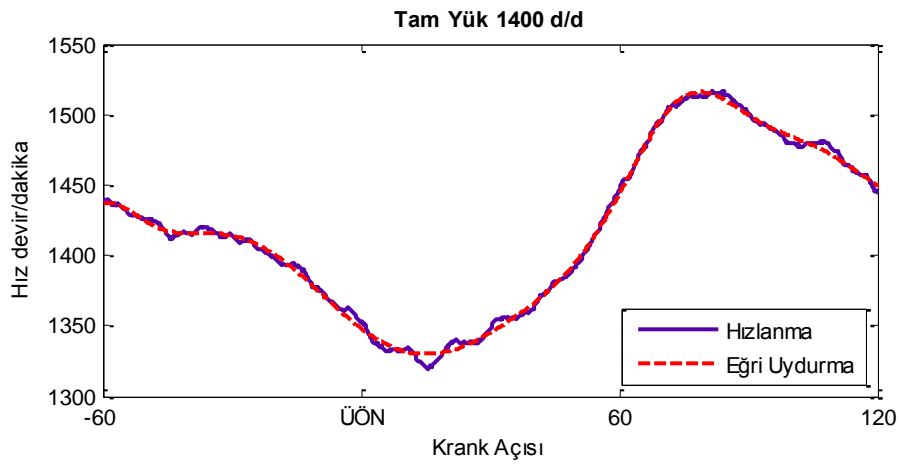
#### 4.3.1.2. Gauss denklem serileri

Hızlanma bilgisi için kullanılabilecek diğer bir denklem ise Gauss denklem serileridir. Gauss denklem serileri içerisinde exponansiyel bileşenleri ve bunlara ait katsayıları barındıran serilerdir. Denklem 4.6’da 8.dereceden Gauss serisi denklemini açık olarak ve toplam sembolü içerisinde ifade edilmiştir

$$f(x) = a_1 \cdot e^{-((x-b_1)/c_1)^2} + a_2 \cdot e^{-((x-b_2)/c_2)^2} + \dots + a_8 \cdot e^{-((x-b_8)/c_8)^2}$$

$$f(x) = \sum_{n=1}^8 a_n \cdot e^{-((x-b_n)/c_n)^2}$$
(4.6)

Şekil 4.10'da tam yük 1400 d/d da alınan bir çevrime ait hızlanma bilgisinin Gauss denkleminde eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon grafiği verilmiştir. Tablo 4.2'de ise bu hızlanma için tespit edilen katsayıları verilmiştir.



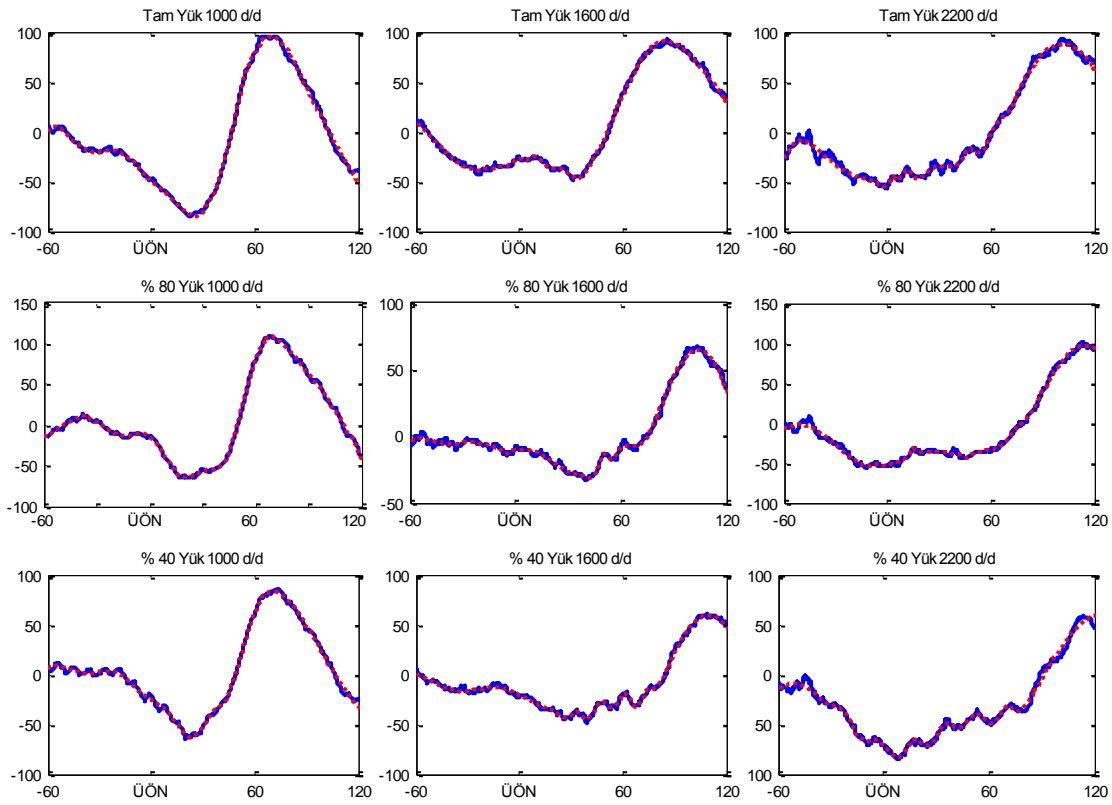
Şekil 4.10. 8. dereceden Gauss denkleminin Tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması

Tablo 4.2. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen gauss denklem katsayıları

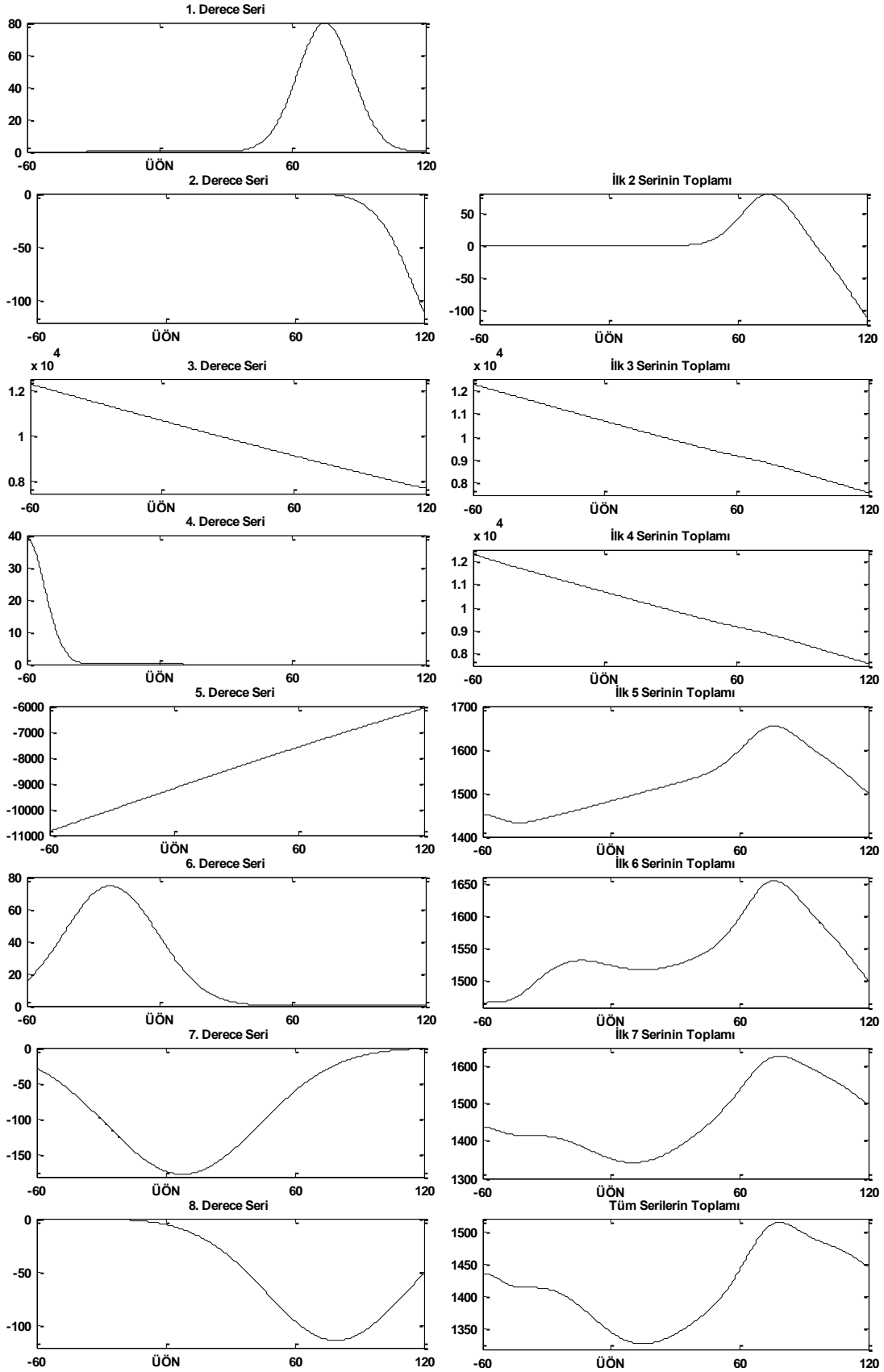
a <sub>1</sub>	79.68	b <sub>1</sub>	1.244	c <sub>1</sub>	0.2937
a <sub>2</sub>	-146.9	b <sub>2</sub>	2.231	c <sub>2</sub>	0.4268
a <sub>3</sub>	21020	b <sub>3</sub>	-9.224	c <sub>3</sub>	11.21
a <sub>4</sub>	39.21	b <sub>4</sub>	-1.003	c <sub>4</sub>	0.1941
a <sub>5</sub>	17050	b <sub>5</sub>	-6.889	c <sub>5</sub>	8.77
a <sub>6</sub>	74.25	b <sub>6</sub>	-0.3684	c <sub>6</sub>	0.5002
a <sub>7</sub>	-176.8	b <sub>7</sub>	0.1378	c <sub>7</sub>	0.8393
a <sub>8</sub>	-113.5	b <sub>8</sub>	1.324	c <sub>8</sub>	0.7648

Tam yük 1400 d/d için elde edilen eğri ile ölçüm arasında hatanın RMSE değeri 3,09 olarak tespit edilmiştir. Gauss denklem serisi her bileşende üç adet katsayı

içermektedir. 8. dereceden Gauss denkleminde 24 adet katsayı bulunmaktadır. 8. dereceden Gauss denkleminin çok çeşitli çalışma koşullarında için hızlanma verilerine uydurulabildiği tespit edilmiştir. Şekil 4.11’de çeşitli çalışma koşulları için 8. derece Gauss denklemi için eğri uydurma sonuçları verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde genel hızlanma formunun yakalanabildiği görülmektedir. Eğer Gauss denklem derecesi arttırılırsa hata düşecek ve elde edilen eğri hız bilgisinde bulunan bozucu etkilere de yakınsayacaktır. 8. derece Gauss denklemi ile 24 katsayı kullanılarak hız bilgisinin ifade edilmesi sağlanmaktadır ayrıca hız bilgisinde bulunan bozucu etkiler de filtrelenerek YSA’ya aktarılması engellenmiş olmaktadır.



Şekil 4.11. Farklı çalışma koşulları için hızlanma-bilgisinin 8. derece gauss denkleminde uydurulması



Şekil 4.12. Bir hızlanma bilgisinin 8 adet gauss serisi toplamıyla elde edilmesi

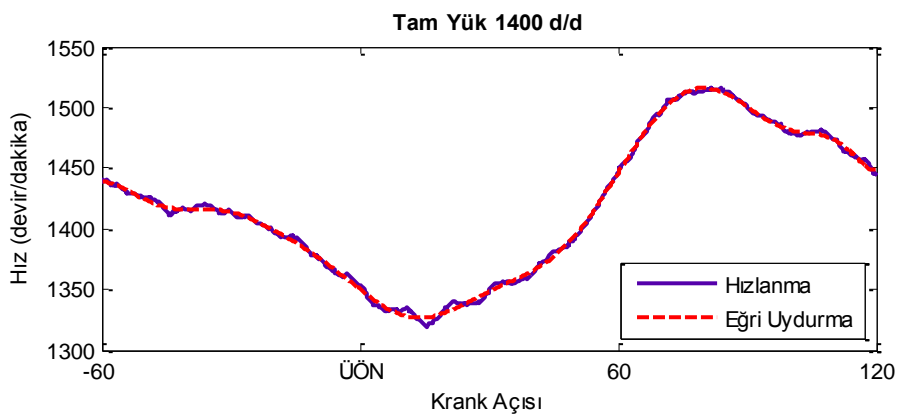
### 4.3.1.3. Fourier serileri

Hızlanma bilgisi için kullanılabilir bir yöntem ise Fourier serileridir. Fourier serileri Fourier dönüşümünün temelini oluşturan serilerdir. İçerisinde bir temel harmoniğe bağlı sinüs ve cosinüsler toplamı bulunmaktadır. Fourier serisi derecesi arttırıldıkça temel harmoniğe göre serinin frekans çarpanları arttırılarak seriye eklenir. Fourier serisi derecesi arttırıldıkça eğri uydurma sonucunda daha detaylı ve yüksek frekans bileşeni bulunan eğrilere daha iyi yakınsama sağlanabilir. Denklem 4.7 de 8.dereceden Fourier serisi denklemi açık olarak ve toplam sembolü içerisinde ifade edilmiştir.

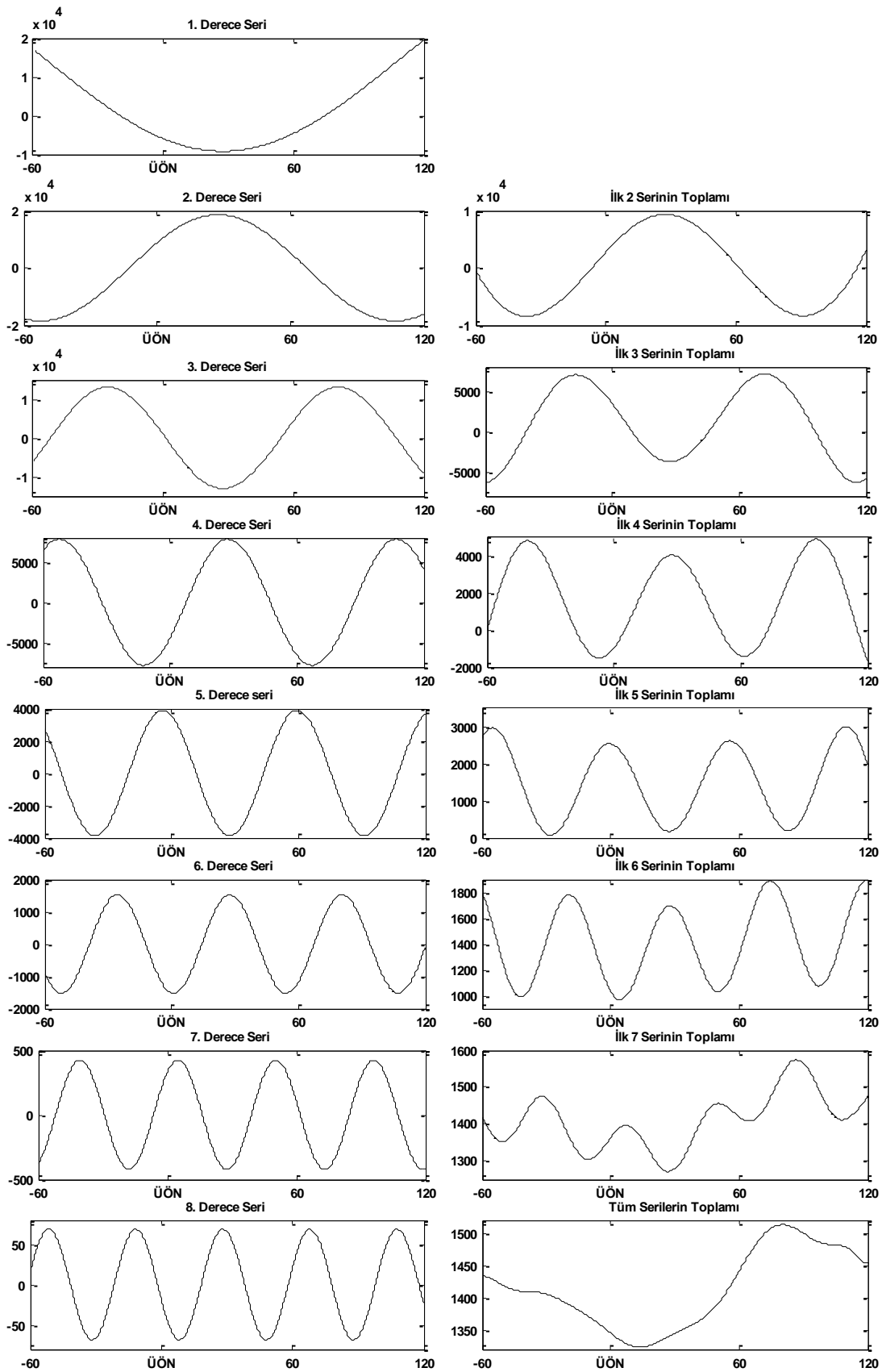
$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + \dots + a_8 \cdot \cos(8 \cdot x \cdot w) + b_8 \cdot \sin(8 \cdot x \cdot w)$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^8 a_n \cdot \cos(n \cdot x \cdot w) + b_n \sin(n \cdot x \cdot w) \quad (4.7)$$

Şekil 4.13'te tam yük 1400 d/d da alınan bir çevrime ait hızlanma bilgisinin 8. dereceden fourier serisine eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon grafiği verilmiştir. Tablo 4.3'te ise bu hızlanma için tespit edilen katsayılar verilmiştir.



Şekil 4.13. 8. dereceden Fourier serisinin Tam yük 1400 d/d ölçümüne uydurulması



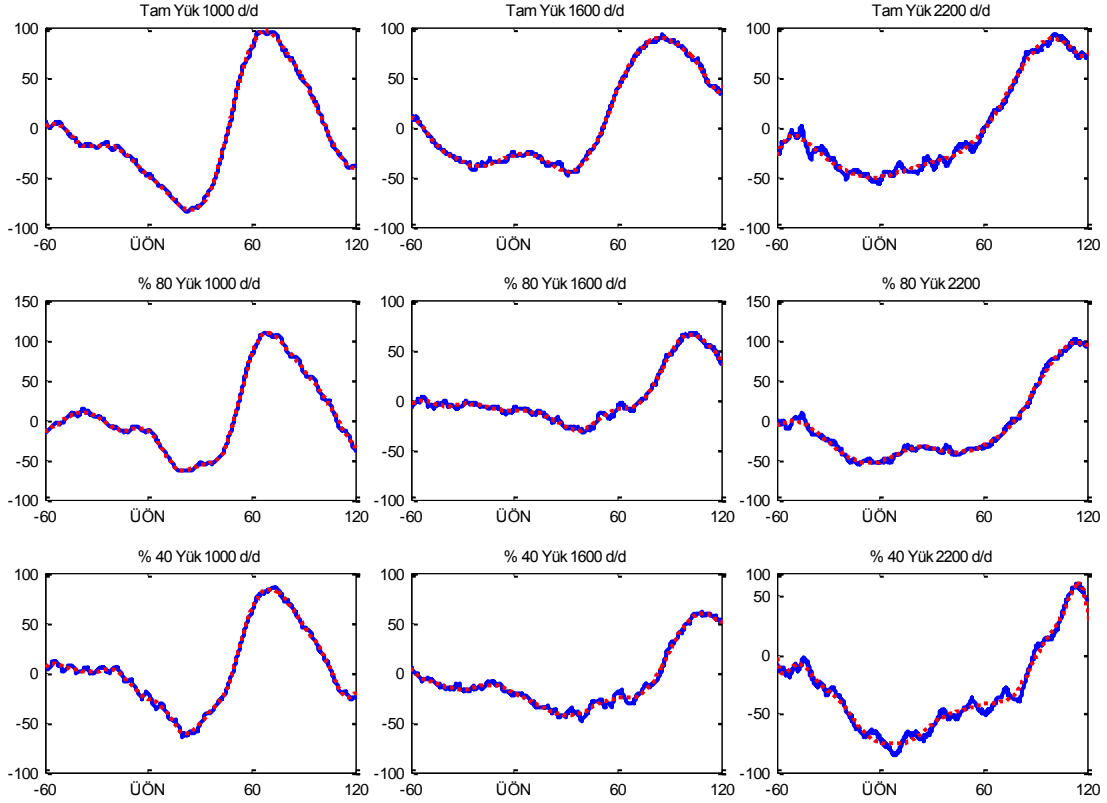
Şekil 4.14. Bir hızlanma bilgisinin 8 adet fourier serisi toplamıyla elde edilmesi



Tablo 4.3. Tam Yük 1400 d/d için elde edilen 8. derece fourier denklem katsayıları

$a_1$	-19560	$b_1$	-11800	$a_0$	13630
$a_2$	8579	$b_2$	16430	w	1.183
$a_3$	796.1	$b_3$	-13060		
$a_4$	-4439	$b_4$	6432		
$a_5$	3543	$b_5$	-1589		
$a_6$	-1515	$b_6$	-189.5		
$a_7$	329.7	$b_7$	267.2		
$a_8$	-18.2	$b_8$	-66.24		

Tam yük 1400 d/d için elde edilen eğri ile ölçüm arasında hatanın RMSE değeri 2,45 olarak tespit edilmiştir. Fourier serisi temel harmoniği belirleyen  $\omega$  ve genel dc seviyeyi belirleyen  $a_0$  katsayıları ve her bileşende yer alan  $a_n$  ve  $b_n$  katsayılarını barındırmaktadır. 8. dereceden fourier serisi 18 katsayı içermektedir ve 18 katsayı ile hızlanma bilgisinin ifade edilebildiği gözlemlenmiştir. 8. Fourier serilerinin gauss denklemlerinde olduğu gibi çok çeşitli çalışma koşulları için hızlanma verilerine uydurulabildiği tespit edilmiştir. Şekil 4.15'te çeşitli çalışma koşulları için 8. dereceden Fourier serileri için eğri uydurma sonuçları verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde genel hızlanma formunun yakalanabildiği görülmektedir. Eğer fourier serilerinin derecesi arttırılacak olursa hata düşecektir fakat elde edilen eğri hız bilgisinde bulunan bozucu etkilere de yakınsayacaktır. 8. dereceden fourier serileri seçilmesi ile 18 adet katsayıyla hızlanma değişimi yeterli seviyede ifade edilebilmiş ve hız bilgisinde bulunan bozucu etkiler de filtrelenerek YSA'ya aktarılması engellenmiş olmaktadır.



Şekil 4.15. 8. dereceden Fourier serisinin çeşitli motor çalışma koşullarındaki hız bilgilerine uydurulması

#### 4.4. Basınç Bilgisinin Ön İşlemden Geçirilmesi

Basınç bilgisi zaman domeninde çok fazla örnek içermektedir. YSA çıkışından alınacak silindir içi basınç bilgisi için hızlanma ve titreşim bilgisinde olduğu gibi bir ön işleme ile daha az katsayı veya parametreyle ifade edilmesi gerekmektedir. Silindir içi basınç bilgisinin ön işlemden geçirilmesinde kullanılacak tekniğin seçimindeki en önemli nokta basınç bilgisinin kayıpsız olarak geri elde edilmesine imkan tanıyan bir teknik tercih edilmesidir. Örneğin fourier dönüşümü kullanıldığında YSA yapısından dolayı imajiner bileşenler elde edilemeyecek ve ters fourier dönüşümü sonucunda gerçek basınç bilgisi oluşmayacaktır.

Silindir içi basınç bilgisinin ön işleme tekniği için hızlanma bilgisinde kullanıldığı gibi uygun bir eğri uydurma denklemi tespit edilebilirse; hem az sayıda denklem katsayısıyla silindir içi basınç bilgisi ifade edilebilecek hem de kayıpsız olarak silindir içi basınç bilgisi geri elde edilebilecektir. Ayrıca sistemin donanım üzerinde

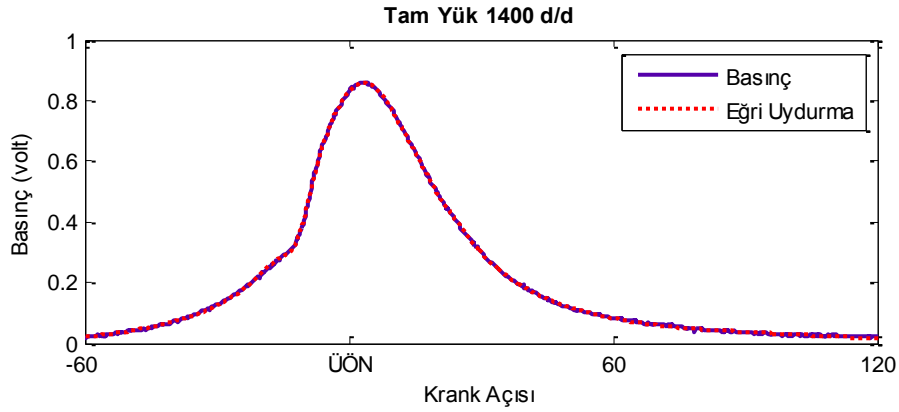
gerçeklenmesi düşünülüğünde katsayıların denkleme yerleştirilmesiyle basınç bilgisinin elde edilmesi çok az işlem yükü gerektirecektir. Hız bilgisi için kullanılacak eğri uydurma denkleminin beklenen mümkün olan en az katsayıyla genel formu yakalamasıdır. Oysaki silindir içi basınç için kullanılacak eğri uydurma denkleminin, her motor koşulundaki basınç değişim eğrisini hatasız olarak yakalaması beklenmektedir. Aksi takdirde YSA yanlış bir öğrenme gerçekleştirecek ve doğru sonuçlar üretemeyecektir.

#### **4.4.1. Basınç bilgisi için eğri uydurma denklemleri**

Silindir içi basınç değişimi için kullanılacak eğri uydurma denklemi seçiminde tercihen hızlanma bilgisine uygun olan denklemlerden birinin seçilmesi avantajlı olacaktır. Aynı türden denklem kullanılırsa YSA katsayılar arasındaki ilişkiyi daha iyi kavrayabilecektir. Çeşitli denklem serileri incelendiğinde, farklı basınç değişim eğrilerine uyum sağlayabilen sinüsler toplamı, gauss serileri, fourier serileri gibi az sayıda denklem türü tespit edilmiştir. Hızlanma bilgisinde de kullanılabildiği göz önünde bulundurularak, özellikle gauss ve fourier serileri üzerinde durulmuştur.

##### **4.4.1.1. Gauss denklem serileri**

Denklem 4.6'da verilen ve hızlanma bilgisi için bahsedilen 8. dereceden Gauss denklemi, silindir içi basınç eğrisine yakınsayabildiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.16'da tam yük 1400 d/d da alınan bir çevrime ait basınç bilgisinin Gauss denklemine eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon grafiği verilmiştir. Tablo 4.4'te ise bu basınç bilgisi için tespit edilen katsayılar verilmiştir.

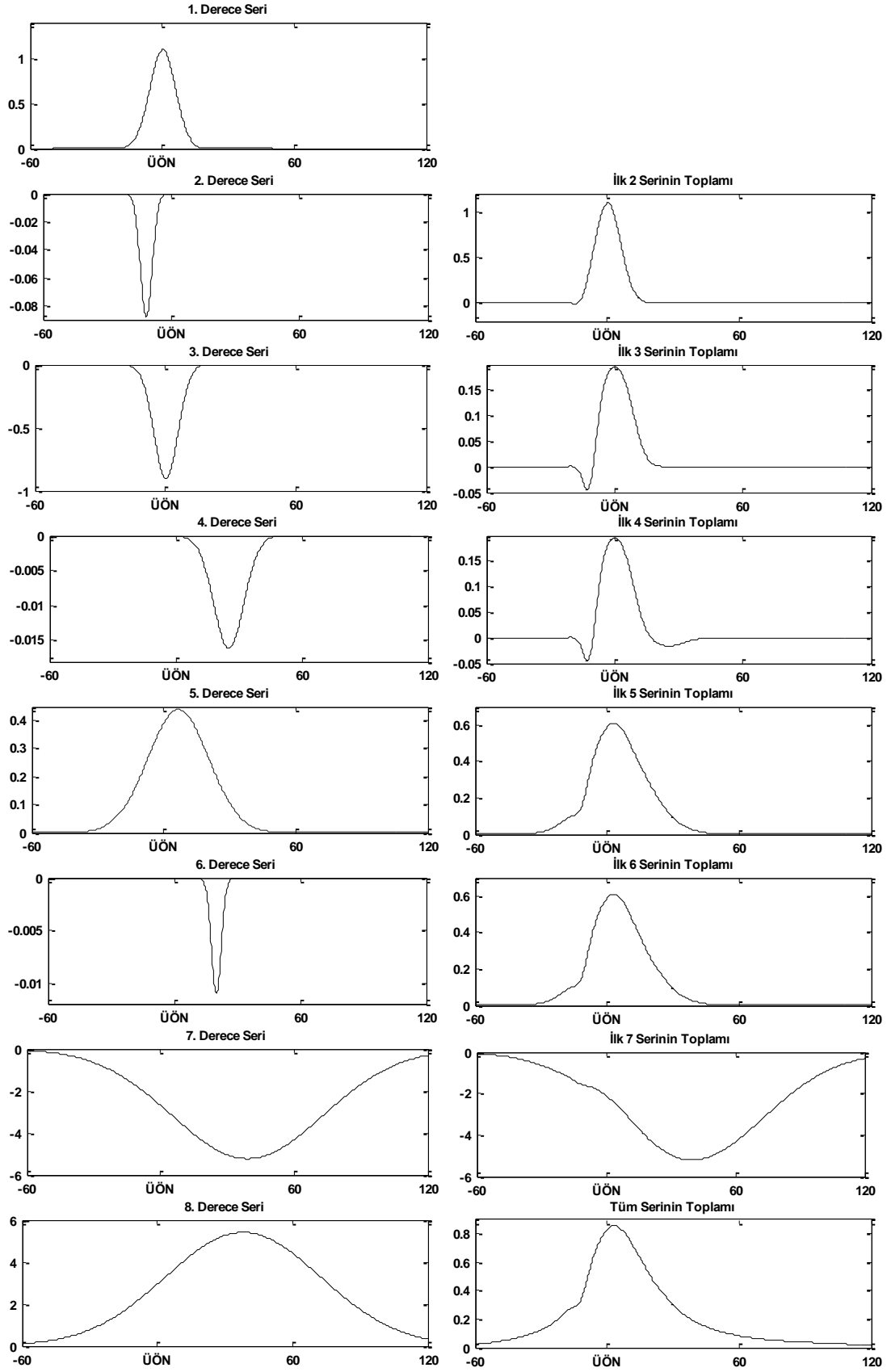


Şekil 4.16. 8. dereceden gauss denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması

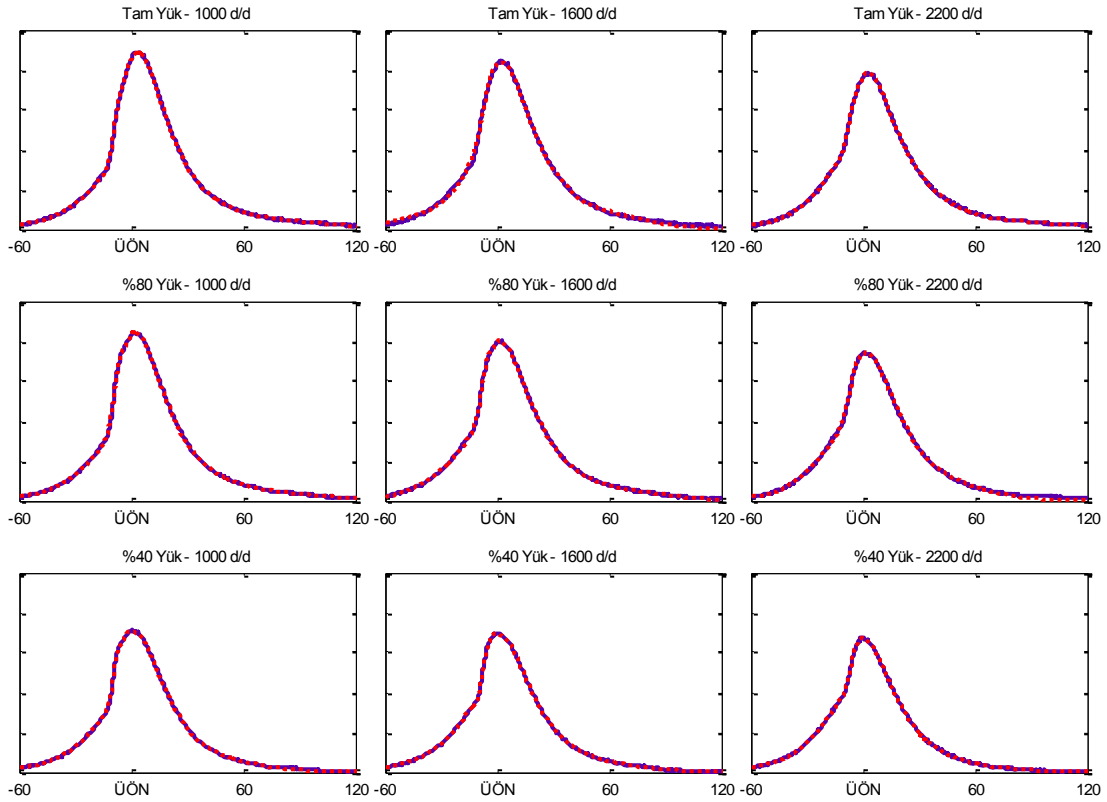
Tablo 4.4. 8. dereceden gauss denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması ile ortaya çıkan katsayılar

a <sub>1</sub>	1.1	b <sub>1</sub>	0.004414	c <sub>1</sub>	0.1374
a <sub>2</sub>	-0.08798	b <sub>2</sub>	-0.1948	c <sub>2</sub>	0.06524
a <sub>3</sub>	-0.9045	b <sub>3</sub>	0.004701	c <sub>3</sub>	0.1295
a <sub>4</sub>	-0.01606	b <sub>4</sub>	0.4218	c <sub>4</sub>	0.1686
a <sub>5</sub>	0.4394	b <sub>5</sub>	0.1107	c <sub>5</sub>	0.3258
a <sub>6</sub>	-0.01105	b <sub>6</sub>	0.3362	c <sub>6</sub>	0.05492
a <sub>7</sub>	-5.235	b <sub>7</sub>	0.656	c <sub>7</sub>	0.7995
a <sub>8</sub>	5.403	b <sub>8</sub>	0.6387	c <sub>8</sub>	0.8122

Tam yük 1400 d/d için elde edilen eğri ile ölçüm arasındaki hatanın RMSE değeri RMSE: 0.0029 olarak tespit edilmiştir. 8. dereceden gauss serisinin farklı çalışma koşulları için silindir içi basınç değişimlerine başarıyla uydurulabildiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.18’de farklı çalışma koşullarında silindir içi basınç eğrisine ait eğri uydurma sonuçları verilmiştir.



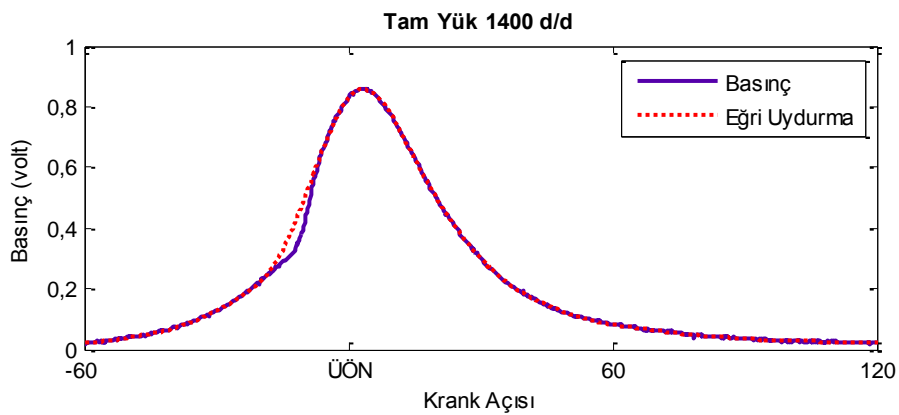
Şekil 4.17. Bir basınç bilgisinin 8 adet gauss serisi toplamıyla elde edilmesi



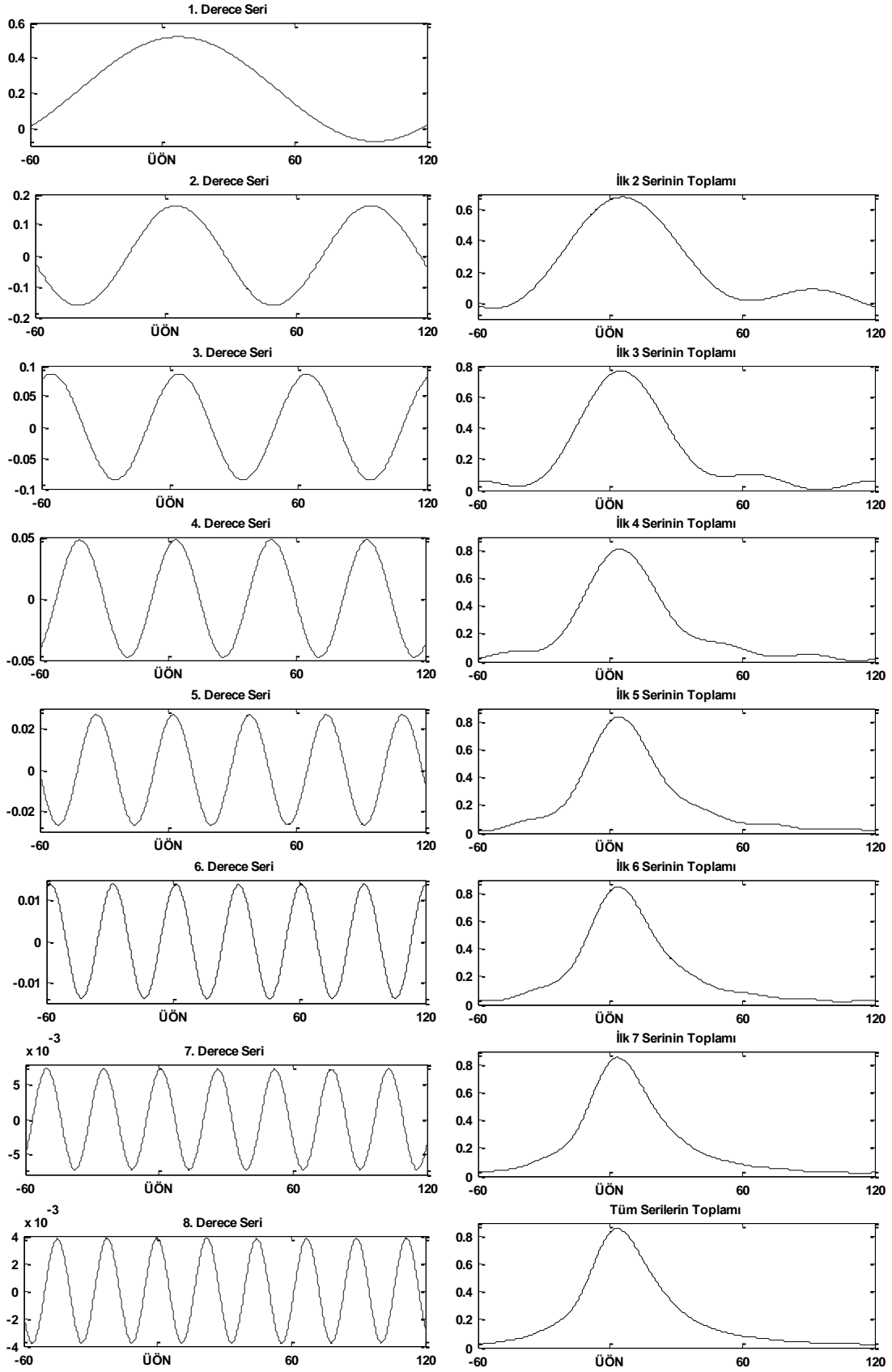
Şekil 4.18. Farklı çalışma koşulları için basınç bilgisinin 8. derece gauss denklemine uydurulması

#### 4.4.1.2. Fourier serileri

Denklem 4.7’de verilen ve hızlanma bilgisi için bahsedilen 8. dereceden fourier denkleminin silindir içi basınç eğrisine uydurulması sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.19’da görülmektedir.



Şekil 4.19. 8. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması

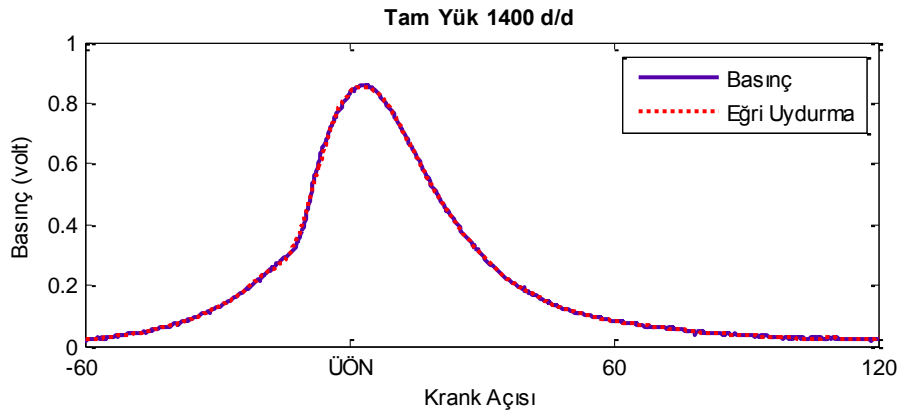


Şekil 4.20. Bir basınç bilgisinin 8 adet fourier serisi toplamıyla elde edilmesi

Grafiğe dikkat edilecek olursa 8. dereceden fourier denkleminin özellikle yakıt püskürtme anı ve tutuşma gecikmesi sırasında eğride oluşan değişikliği takip edemediği gözlemlenmektedir. Bu sebeple silindir içi basınç eğrisini mümkün olan en az hata ile yakınsayabilmek için 15. derece fourier serisi tercih edilmiştir. Denklem 4.8'de 15. dereceden fourier serisinin formülü verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{15} a_n \cdot \cos(n \cdot x \cdot w) + b_n \sin(n \cdot x \cdot w) \quad (4.8)$$

Şekil 4.21'de tam yük 1400 d/d' de alınan bir çevrim ait basınç bilgisinin 15. dereceden fourier denklemine eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon grafiği verilmiştir. Tablo 4.5'te ise bu basınç bilgisi için tespit edilen katsayılar verilmiştir.



Şekil 4.21. 15. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması

Tablo 4.5. 15. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması ile ortaya çıkan katsayılar

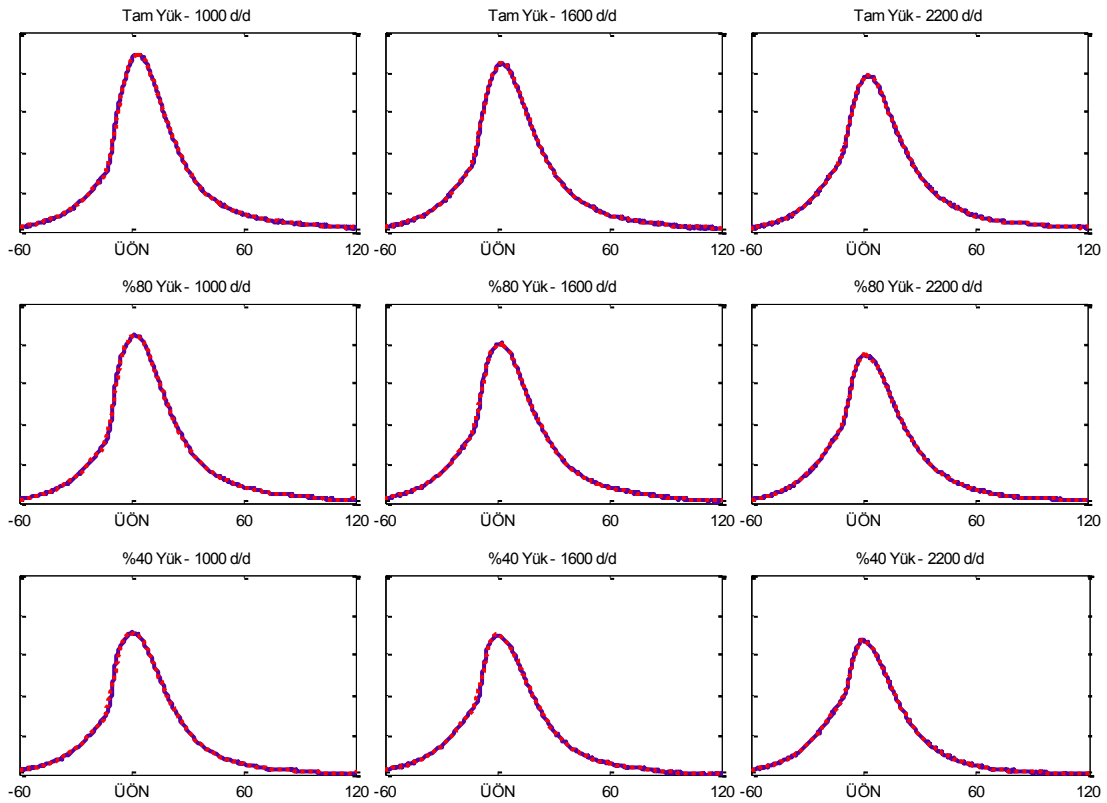
a <sub>1</sub>	0.2829	b <sub>1</sub>	0.0823	a <sub>0</sub>	0.2214
a <sub>2</sub>	0.1473	b <sub>2</sub>	0.0612	w	2.1476
a <sub>3</sub>	0.0735	b <sub>3</sub>	0.0447		
a <sub>4</sub>	0.0418	b <sub>4</sub>	0.0282		
a <sub>5</sub>	0.0270	b <sub>5</sub>	0.0153		
a <sub>6</sub>	0.0173	b <sub>6</sub>	0.0074		



Tablo 4.5. (Devam) 15. dereceden fourier denkleminin tam yük 1400 d/d basınç ölçümüne uydurulması ile ortaya çıkan katsayılar

$a_7$	0.0121	$b_7$	0.0020
$a_8$	0.0083	$b_8$	-0.0014
$a_9$	0.0043	$b_9$	-0.0033
$a_{10}$	0.0021	$b_{10}$	-0.0032
$a_{11}$	0.0004	$b_{11}$	-0.0041
$a_{12}$	-0.0009	$b_{12}$	-0.0029
$a_{13}$	-0.0015	$b_{13}$	-0.0015
$a_{14}$	-0.0017	$b_{14}$	-0.0007
$a_{15}$	-0.0017	$b_{15}$	0.0001

15. dereceden fourier serisinin farklı çalışma koşulları için silindir içi basınç değişimlerine başarıyla uydurulabildiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.22’de farklı çalışma koşullarında silindir içi basınç eğrisine ait eğri uydurma sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı çalışma koşulları için basınç bilgisinin 15. derece fourier denkleminde uydurulması

#### 4.4.2. Kullanılacak eğri uydurma denklemlerinin belirlenmesi

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümünü en küçük hata değeri ile gerçekleştirmek için kullanılan eğri uydurma denkleminin tespiti oldukça önemlidir. Eğri uydurma denklemini kullanılacak YSA'ya uygun seçilmelidir. YSA giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi eğitimle öğrenebilmelidir ayrıca eğitim sonrası test verisi için YSA çıkışında katsayılar için ortaya çıkacak hata seri toplamı elde edildiğinde, silindir içi basınç verisinde daha büyük hat değerine dönüşme riski bulunmaktadır.

Hızlanma bilgisi için oransal polinom denklemi çok az sayıda da olsa bazı ölçüm değerlerine uygulanamamaktadır. Ayrıca oransal polinom denklemi katsayı değerleri çok hassastır. Katsayıdaki küçük bir değişiklik elde edilen eğride çok büyük bir hataya sebep olmaktadır. Gauss ve fourier denklemlerinin tüm ölçümlerde elde edilen basınç ve hızlanma başarıyla uydurulabildiği gözlemlenmiştir.

Gauss serileri ile toplamların elde edildiği grafiklere (hızlanma ve basınç) dikkat edilecek olursa seri bileşenlerinin her birinin diğerinden farklı olduğu, aralarında mantıksal bir ilişki olmadığı net görülmektedir. Farklı motor çalışma koşulları için hızlanma bilgilerine, gauss serileri ile eğri uydurma uygulandığında, her bir hızlanma verisi için çok farklı katsayıların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Hızlanma bilgisi için gauss serileri tercih edilecek olursa YSA girişine uygulanacak değerler birbirinden çok farklılık arz edecektir ve YSA'nın giriş – çıkış ilişkisini eğitimle kavraması güç olacaktır. Ayrıca gauss denkleminde bulunan exponensiyel katsayıların küçük bir değişimi bile eğri formunu çok değiştirmektedir.  $e^x$  grafiği düşünüldüğünde çok hızlı değişim gösteren bir grafik olduğu bilinmektedir. Gauss denklemi özellikle basınç değişimi için tercih edildiğinde, YSA çıkışında gauss katsayıları için elde edilecek küçük bir hata bile silindir içi basınç eğrisinde büyük bir hata olarak ortaya çıkacaktır.

Fourier serileri ile toplamların elde edildiği grafiklere dikkat edilecek olursa seri bileşenlerinin çok büyük farklılık arz etmediği, frekans ve genlik değerlerinin değişime uğradığı görülmektedir. Fourier serisi denkleminde bilindiği üzere seri

derecesi arttırıldıkça frekansı artmakta, katsayılar ile sadece genlikler belirlenmektedir. Fourier serilerinde  $\omega$  katsayısı frekansa diğer katsayılar ise genliğe doğrudan (exponensiyel vb. çarpanlar bulunmadığından) etki ettiğinden gauss serilerinde olduğu gibi katsayıların küçük değişimi sonuca büyük etkiler yapmamaktadır. Farklı motor çalışma koşulları için katsayılarda büyük farklılıklar ortaya çıkmamaktadır. Bu sebeplerle, YSA'nın fourier denklemi kullanıldığında giriş çıkış ilişkisini eğitimle daha iyi kavrayabilmesi ve daha düşük hata ile silindir içi basınç eğrisini üretmesi beklenmektedir.

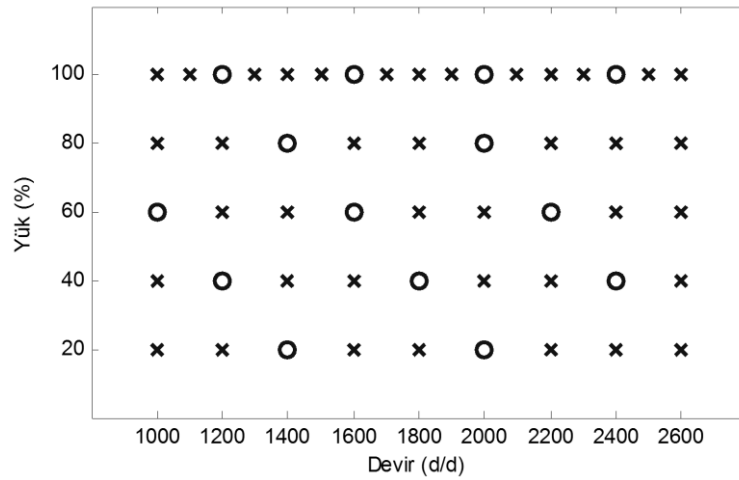
Yukarıda bahsedilen önermeler ışığında gauss ve fourier serileri kullanılarak eğitim veri setleri hazırlanmış ve YSA üzerinde denenmiştir. Beklendiği gibi YSA, hızlanma ve basınç bilgisi için fourier serileri kullanıldığında en iyi sonucu ürettiği gözlemlenmiştir. Gauss denklemleri kullanıldığında ise YSA'nın eğitim veri setini ezberlemeye gittiği ve test verilerinde ise hiç başarılı olamadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeplerden dolayı fourier serileri tercih edilmiştir. Hızlanma için 8. dereceden, basınç için ise 15. dereceden fourier serileri tercih edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta; hızlanma verileri için öncelikle ortalama hız kaldırılmış, ardından eğri uydurma uygulanarak katsayılar tespit edilmiştir. Basınç için de ham ölçüm verisi kullanılmıştır, yukarıda da bahsedildiği gibi şarj amplifikatörü çıkış ölçeklendirmesi 100bar/V tur. YSA çıkışında elde edilen silindir içi basınç verisinin bar değerine çevrilmesi için 100 ile çarpılması gerekmektedir.

#### **4.4.3. Eğitim setinin seçilmesi ve hazırlanması**

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için yukarıda bahsedilen veri ön işlem metotlarının tespiti ve bu işlemleri gerçekleştirecek programların Matlab ortamında hazırlanmasının ardından eğitim ve doğrulama setleri hazırlama aşamasına geçilmiştir. Yapılan veri toplama deneyleri Bölüm 2'de bahsedildiği üzere tam yük ve kısmi yük şartlarında 1000-2600 devir/dak aralıklarında alınmıştır. Tam yük ölçümleri 100 devir/dak aralıklarla yapılmış ve her koşul için 80 çevrimlik veri toplanarak "tdms" dosyalarına kaydedilmiştir. Kısmi yük ölçümlerinde ise %80,

%60, %40, %20 yük şartlarında 200 devir aralıklarla yapılmış her koşul için 100 çevrimlik veri toplanarak tdms dosyalarına kaydedilmiştir.

Eğitilen YSA'nın titreşim, hızlanma ve basınç arasındaki ilişkiyi kavrayabildiğini test etmek ve performansını eğitim setine dahil edilmeyen koşullarda tespit edebilmek amacıyla, bazı deney koşullarına ait ölçümler eğitim setine dahil edilmeyerek doğrulama seti için ayrılmıştır. Şekil 4.23'te ölçüm yapılan deney koşulları ve ölçümlerin eğitim ve doğrulama seti olarak ayrıştırılması verilmiştir. Eğitim seti için seçilen koşullarda ise her koşul için 20 adet ölçüm yine doğrulama setine ayrılmıştır. Bilindiği üzere içten yanmalı motorlar çalışması sırasında aynı koşullarda ard arda gelen çevrimlerde ortaya çıkan basınç eğrileri birbirinden farklı olmaktadır. Bu yüzden eğitim setinde bulunan koşullar için de, farklı ölçümlerle YSA performansının test edilmesi gerekmektedir.

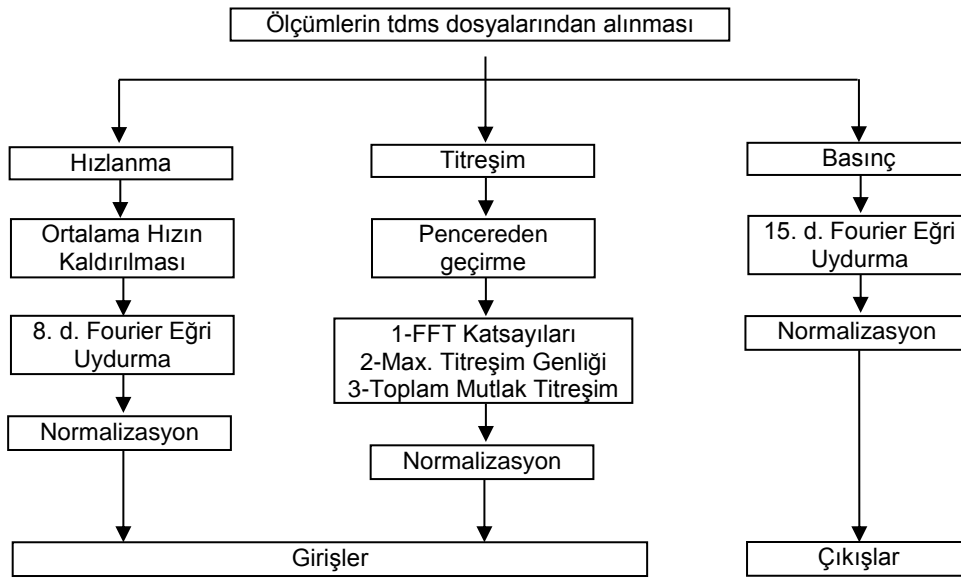


Şekil 4.23. Ölçüm yapılan çalışma koşulları ( x Eğitim seti için, o Doğrulama seti için)

Eğitim ve doğrulama setleri Şekil 4.23'de verilen noktalar için tdms dosyalarından hazırlanan Matlab arayüzü ile Matlab ortamına ayrı ayrı aktarılarak kaydedilmiştir. Kaydedilen veri setleri seçilen ön işleme metotlarını uygulayan Matlab programı ile ön işlemden geçirilmiştir. Bilindiği üzere, en iyi sonuçların elde edilmesi için YSA giriş çıkış değerlerinin en büyük 1 en küçük -1 olacak şekilde normalize edilmesi gerekmektedir. Verilerin ön işlemden geçirilmesinin ardından YSA giriş çıkış setinin

oluşturulmasında son aşama olarak normalizasyon yapılmıştır. Eğitim ve doğrulama seti oluşturma aşamaları Şekil 4.24'te blok diyagram olarak verilmiştir.

İşlemler neticesinde tam yük deneyleri için her koşulda 60 ölçüm, kısmi yük koşullarında 80 ölçüm kullanılarak eğitim seti oluşturulmuştur. Oluşturulan eğitim seti 2600 adet ölçüm verisi içermektedir.

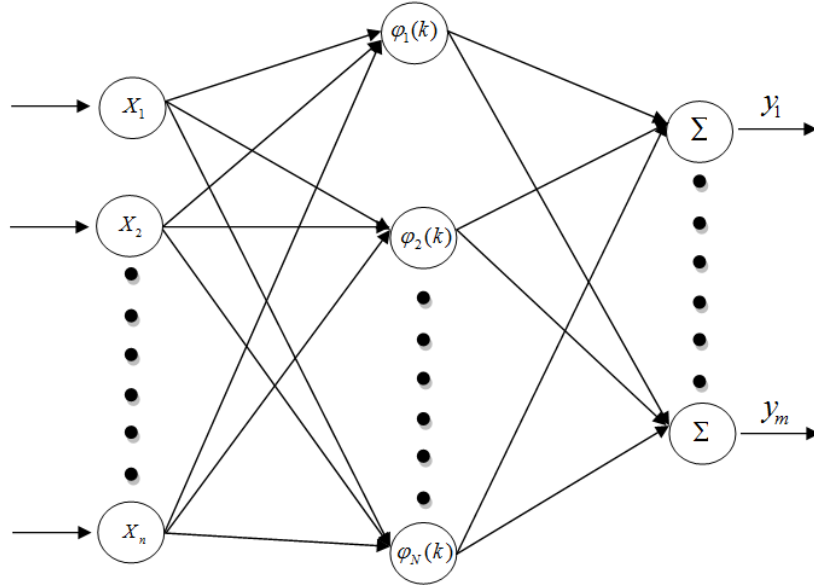


Şekil 4.24. Eğitim ve doğrulama seti oluşturma aşamaları

#### 4.5. Radyal Temelli Yapay Sinir Ağları

Radyal temelli yapay sinir ağları (RBFN'ler) günümüzde çok çeşitlenen YSA yapılarından bir tanesidir. Radyal temelli yapay sinir ağları ismini ara katmanında aktivasyon fonksiyonu olarak kullanılan Radyal Temel Fonksiyonu olarak bilinen ( $f(x)=e^{-x^2}$ ) fonksiyonundan almaktadır. RBFN'ler diğer YSA türlerinden farklı olarak sadece bir ara katman içerebilirler ve bu değer ağ yapısından kaynaklanan nedenlerden dolayı değiştirilemez. Yani RBFN'ler üç katmandan oluşmaktadır. Bunlar: giriş katmanı, ara katman ve çıkış katmanıdır. Çıkış katmanında ara katmanın aksine lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır. Diğer YSA modellerinde olduğu gibi katmanlar arası bilgi akışı ağırlık değerleri ile

yapılmaktadır. Birçok YSA modelinde olduğu gibi ara katmanda bias değerleri mevcuttur [99]. Şekil 4.25'te RBFN ağlarına ait genel yapı görülmektedir.



Şekil 4.25. RBFN'lerin genel yapısı

RBFN'ler için ara katmanda bulunan bir nöron için çıkış denklemi şu şekilde verilebilir:

$$v_i(x_i) = e \left( - \sum_{j=1}^r [x_{ji} - \hat{x}_{ji}]^2 / \sigma_i^2 \right) \quad (4.9)$$

Burada;

$\hat{x}_{ji}$  = Giriş değeri için ara katmandaki RBF merkezi

$\sigma_i$  = i. RBF genişliği

$x_{ji}$  = Giriş setindeki j. Değer

RBFN'nin genel çıkış denklemi ise :

$$y_{net} = \sum_{i=1}^H w_{im} v_i(x_i) + w_o \quad (4.10)$$

Burada;

H = Ara katmandaki nöron sayısı

$w_{im}$  = i. ara katman ve m. çıkış katmanı arasındaki ağırlık

$w_o$  = Çıkış katmanındaki bias terimi

$y_{net}$  = n. giriş için çıkış katmanındaki çıkış değeri

RBFN eğitim algoritması ağırlık değerlerine küçük rastgele değerler atayarak eğitime başlar ve her iterasyonda girişler için RBF merkezlerini belirleyerek ara katman çıkışlarını hesaplar (Denklem 4.9). Ardından ağ çıkışını hesaplayarak (Denklem 4.10) ve hedef vektörü ile karşılaştırarak ağ hatasını hesaplar. Eğitim algoritması ağ hatası istenilen değere ulaşana kadar ağa nöron ekleyerek ve ağırlıkları değiştirerek eğitime devam etmektedir.

RBFN ağlarının en önemli kullanım yeri fonksiyon yaklaşımı olmakla beraber, sistem tanımlama, zaman serilerine yakınsama, örüntü tanıma gibi problemlerde kullanılmaktadır. RBFN ağlarını diğer YSA modellerinden ayıran iki önemli farkı bulunmaktadır: Eğitim ve simülasyon süreçleri çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir ve büyük eğitim ve doğrulama setleri için daha başarılı sonuçlar elde edebilirler [100].

#### 4.5.1. Kullanılan yapay sinir ağı modeli

Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için yukarıda bahsedilen ön işlem aşamalarının tespiti ve eğitim, doğrulama setlerinin seçilerek hazırlanmasının ardından kullanılacak YSA modelinin oluşturulmasına geçilmiştir. Doğru YSA modelinin tespit edilmesi aşamasını hızlandırmak amacıyla 200 veriden oluşan bir eğitim seti, 20 veriden oluşan bir doğrulama seti hazırlanmış ve çok çeşitli yapay sinir ağı modelleri üzerinde denemeler yapılmıştır. İleri beslemeli geri yayımlı ağ, Elman

geri yayılım, NARX, Hopfield vb. ağ modelleri oluşturularak eğitime tabi tutulmuş ve doğrulama seti ile performansları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde birçok ağ modelinin sadece eğitim setini ezberlediği, doğrulama seti için çok büyük hata değerleri ile çalıştığı tespit edilmiştir.

Bilindiği üzere Radyal Temelli Yapay Sinir Ağları fonksiyon öğrenme problemleri için diğer YSA türlerine göre daha yüksek başarımlar elde etmektedir [99]. Ayrıca silindirik içi basıncın dolaylı ölçümü için mevcut literatürde yapılan çalışmalarda RBF modelinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [11,22]. RBF ağının bu çalışmadaki probleme uygunluğunu doğrulamak amacıyla 200 veri içeren eğitim seti ile eğitildiğinde, doğrulama seti için küçük hata oranları ile çalıştığı tespit edilmiştir. Ayrıca tasarlanan silindirik içi dolaylı ölçüm yönteminin uygulamaya yatkın olması göz önüne alındığında RBF ağının eğitim ve simülasyon işlemlerinin kısa zamanda gerçekleştirebilmesi diğer bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan RBF ağı modeli giriş ve çıkışları ile birlikte Şekil 4.26'da verilmiştir. RBF ağının girişlerini ön işlemde geçirilen titreşim ve hızlanma değerleri, çıkışlarını ise yine ön işlemde geçirilen basınç değerleri oluşturmaktadır.

Ağ girişinde:

- 18 adet hızlanma 8. derece Fourier Seri Katsayıları,
- 33 adet titreşim FFT Harmonikleri için genlik değerleri,
- 1 adet en yüksek titreşim genliği,
- 1 adet toplam mutlak titreşim değeri

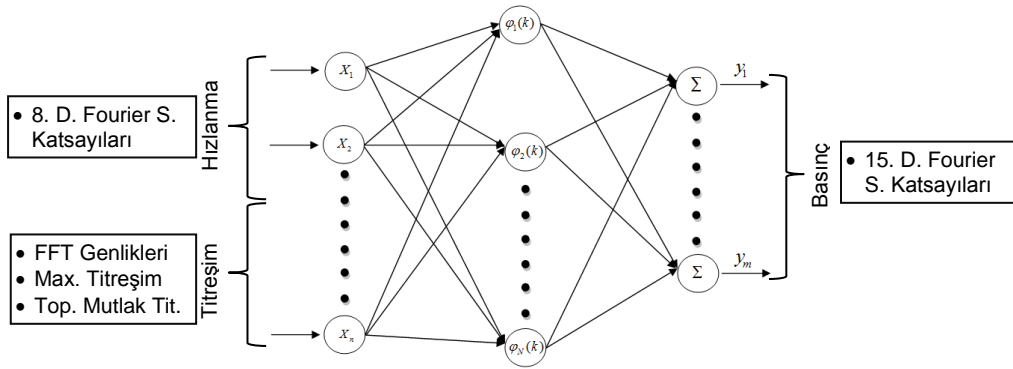
yer almaktadır.

Ağ çıkışında:

- 32 adet basınç 15. derece Fourier Seri Katsayıları

yer almaktadır. Bu yapı ile elde edilen RBF Ağı; tek ara katmanlı, 53 girişli, 32 çıkışlıdır.





Şekil 4.26. Silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için oluşturulan RBF modeli

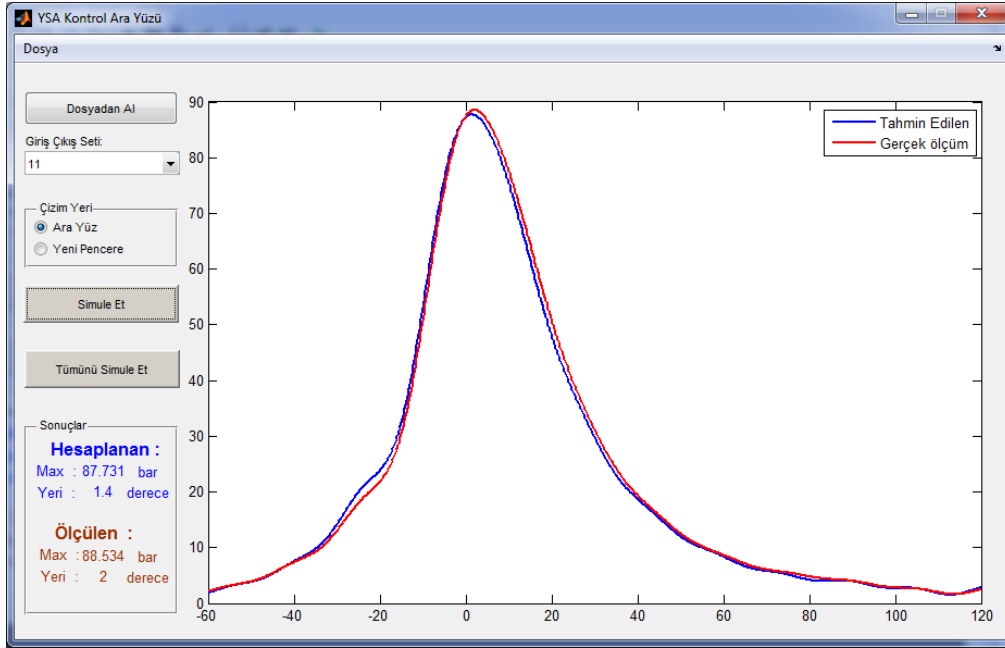
#### 4.5.2. Kullanılan RBF ağının eğitimi

Oluşturulan RBF ağı modeli, eğitim seti verisi ile eğitime tabi tutulmuştur. RBF ağı eğitiminden en iyi sonucu elde etmek için yayılım değerinin doğru seçilmesi önemlidir. RBF ağının eğitimi sırasında yayılım değerinin tespiti için bir yöntem bulunmamakla beraber probleme göre farklı değerler seçilmesi gerekmektedir [100]. Bu nedenle kullanılan ağı için yayılım değeri değiştirilerek eğitim işlemi birçok kez tekrarlanmıştır. Yapılan eğitim işlemleri sonucunda en düşük hata değeri  $1,8 \cdot 10^{-5}$  olarak bulunmuştur.

#### 4.5.3. RBF ağının testi ve oluşturulan test arayüzü

Eğitilen RBF ağının kullanılabilirliğini tespit etmek amacıyla eğitime dahil edilmeyen doğrulama verileri ile testinin gerçekleştirilmesi ve performansının tespit edilmesi gerekmektedir. Ağı test işlemlerini hızlandırmak, kolaylaştırmak ve tahmin edilen ve gerçek silindir içi basınç eğrilerini grafik üzerinde beraber inceleyebilmek için Matlab ortamında bir arayüz hazırlanmıştır. Hazırlanan arayüz eğitilen yapay sinir ağını ve doğrulama setini dosyadan okuyarak doğrulama seti için ağı test ederek tahmin edilen ve ölçülen gerçek silindir içi basıncı aynı grafik üzerine çizdirmektedir. Silindir içi basıncın tahmininde ortalama hatadan ziyade en yüksek basınç değeri ve en yüksek basınç değerinin konumu dikkate alınmalıdır. Bu amaçla hazırlanan arayüz tahmin edilen ve ölçülen basınç değerleri için en yüksek basınç

değerlerini ve en yüksek basınç konumunu belirtmektedir. Şekil 4.27’de hazırlanan arayüz görülmektedir.



Şekil 4.27. YSA kontrolü için hazırlanan Matlab arayüzü

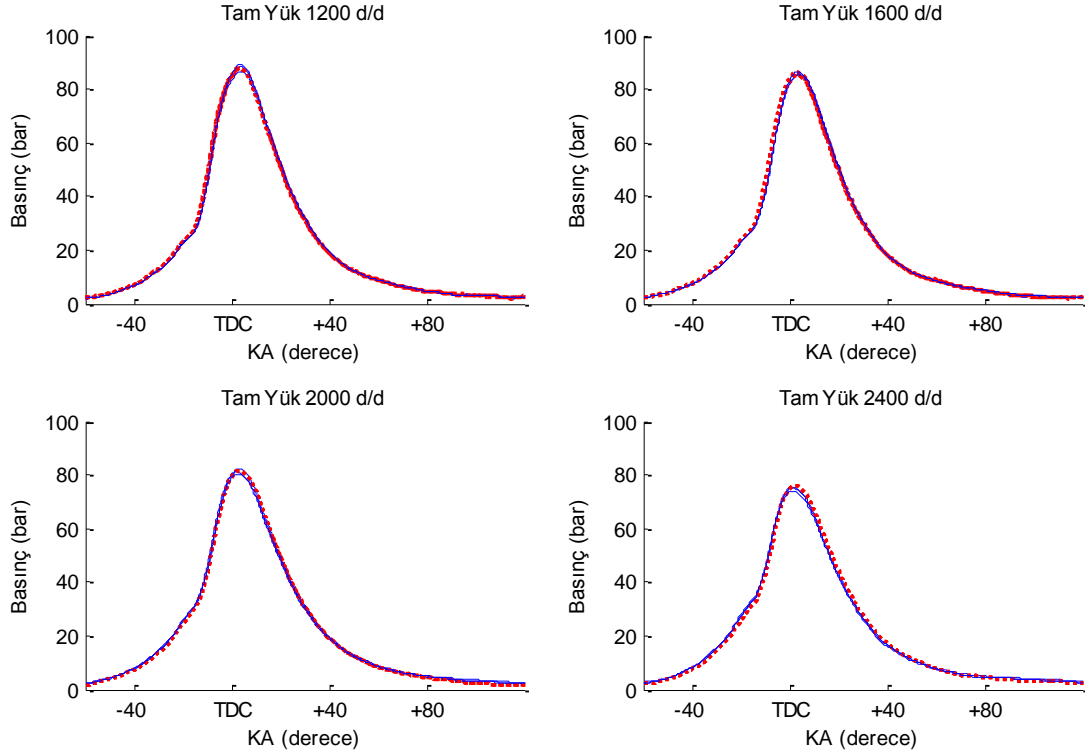
Oluşturulan arayüzde, “Dosyadan Al” butonuna tıklayarak eğitilen YSA’yı ve doğrulama veri setini Windows gezgini ile seçerek programa aktarmaktadır. Dosyadan YSA ve doğrulama veri setinin okunmasının ardından arayüz üzerindeki alanlar aktif olarak Giriş Çıkış Seti kısmında bulunan açılır menüde doğrulama setinde bulunan giriş-çıkış verileri sırasıyla listelenmektedir. Kullanıcının simülasyon için giriş-çıkış verisini seçmesi ve “Simüle Et” butonuna tıklamasının ardından arayüz, bu verideki hızlanma ve titreşim bilgilerini ön işlemde geçirerek YSA’ya uygulamaktadır. Ağ çıkışında elde edilen normalize katsayılar gerçek değerlerine döndürülmekte ve 15. dereceden fourier serisi denkleminde yerine konarak tahmin edilen basınç eğrisi oluşturulmaktadır. Arayüz üzerindeki grafik alanında tahmin edilen ve ölçülen basınç eğrileri beraber çizdirilmektedir. Ayrıca sonuçlar kısmında tahmin edilen ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin en yüksek basınç değerleri ve konumları verilerle karşılaştırma imkanı tanınmaktadır. Eğer doğrulama setinin tamamı simüle edilmek isteniyorsa; “Tümünü Simüle Et” butonuna tıklanmasıyla arayüz, tüm doğrulama seti için simülasyon yaparak en yüksek basınç değeri ve konumu için hataları grafik olarak üretmektedir.

## **BÖLÜM 5. SONUÇLAR**

### **5.1. Geliştirilen Dolaylı Ölçüm Metodundan Elde Edilen Sonuçlar**

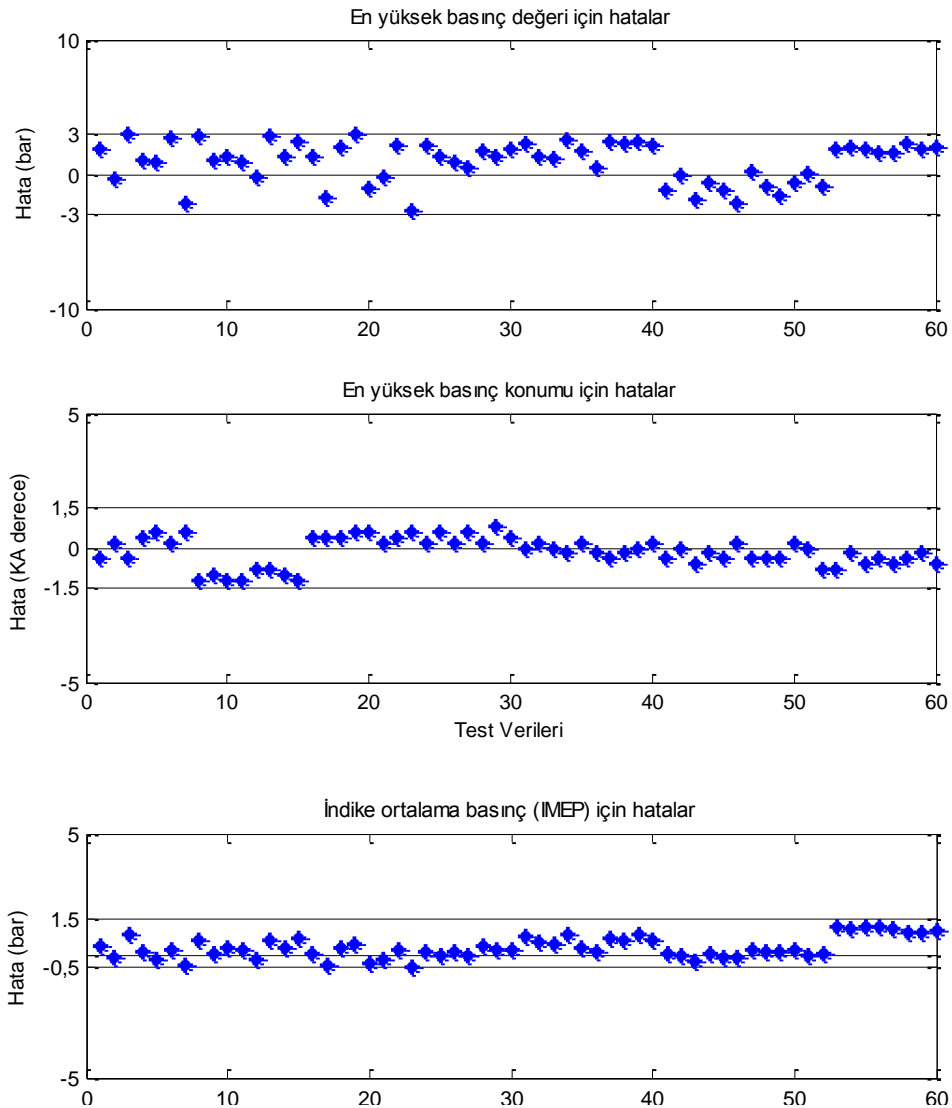
Tasarlanan dolaylı silindir içi basınç yönteminin çalışma başarısının tespit edilebilmesi amacıyla bir dizi simülasyon yapılmıştır. Eğitilen RBFN ağının titreşim ve hızlanma ile silindir içi basınç arasındaki ilişkiyi öğrenerek, mümkün olan en az hatayla basınç eğrisinin elde edebilmesi en iyi başarımlar olarak değerlendirilmiştir. YSA'nın başarımını ölçmek için Şekil 4.23'te verilen doğrulama setindeki veriler YSA tarafından simüle edilerek basınç eğrileri elde edilmiştir. YSA çıkışında elde edilen basınç eğrileri, silindir içi basınç sensöründen okunan gerçek basınç eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Doğrulama setindeki veriler YSA tarafından daha önce görülmeyen veriler olduklarından, bu noktalarda sistemin kabul edilebilir bir hata ile çalıştığı görülmüş ve sistemin başarımının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Sonuçları elde etmek için Şekil 4.27'de verilen YSA kontrol arayüzü kullanılmıştır. YSA kontrol arayüzü, sonuçları gerçek ölçümler ile aynı grafik üzerinde çizdirerek görsel olarak hata tespitini mümkün kılmaktadır. Bunun yanında en yüksek basınç değeri, en yüksek basıncın olduğu krank açısı ve IMEP değerlerini hesaplayarak, sonuçların sayısal olarak da karşılaştırılmasına imkan tanımaktadır.

Sonuçları elde ederken sistemin her koşulda doğruluğunu tanımlamak amacıyla motor çalışma koşulları tam yük ve kısmi yük olmak üzere iki aşamada ele alınmıştır. Doğrulama veri setinden, farklı çalışma koşullarında ard arda gelen çevrimler için basınç eğrileri üretilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları bu bölümde grafiksel olarak verilmiştir. Aşağıda verilen tüm grafiklerde, ard arda gelen üç çevrimde gerçek ve dolaylı ölçüm metoduyla elde edilen basınçlar üst üste verilmiştir.



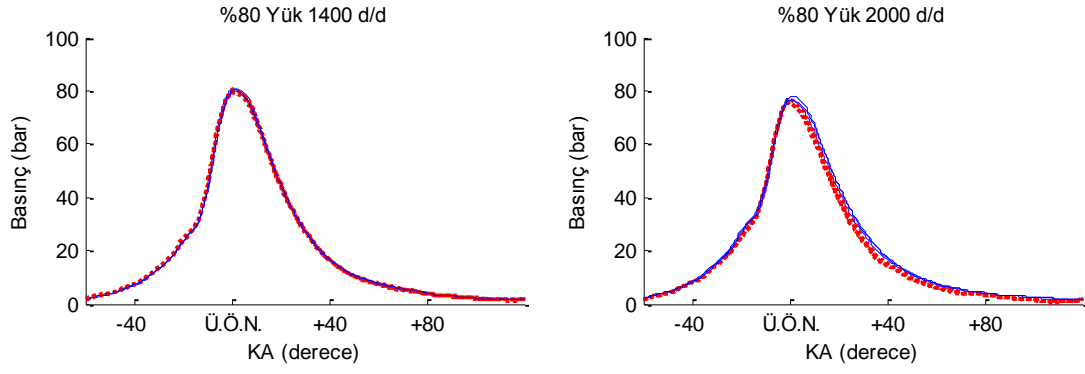
Şekil 5.1. Tam y¼k 1200, 1600, 2000, 2400 d/d i¼in, dolaylı ve ger¼ek ölç¼len basınca eğrilerinin karşılaştırılması (..... Dolaylı Öl¼m, — Ger¼ek Öl¼m)

Tam y¼k koşullarında doğrulama seti i¼in ayrılan 1200, 1600, 2000, 2400 d/d hızlarında üçer çevrimlik ger¼ek ve önerilen yöntem ile elde edilen basınca eğrileri Şekil 5.1’de verilmiştir. Geliştirilen dolaylı ölç¼m yönteminin tam y¼k koşullarındaki başarımını sayısal olarak tespit etmek amacıyla tam y¼k doğrulama setindeki motor hızlarının her birinden 15 adet ardışık çevrimler alınarak toplam 60 çevrimlik bir sim¼lasyon verisi elde edilmiştir. Bu 60 adetlik sim¼lasyon verisi YSA kontrol aray¼zü ile sim¼le edilerek bütün çevrimlerde en yüksek basınca değeri, en yüksek basıncın krank açısı konumu ve IMEP hataları grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.2’de verilmiştir

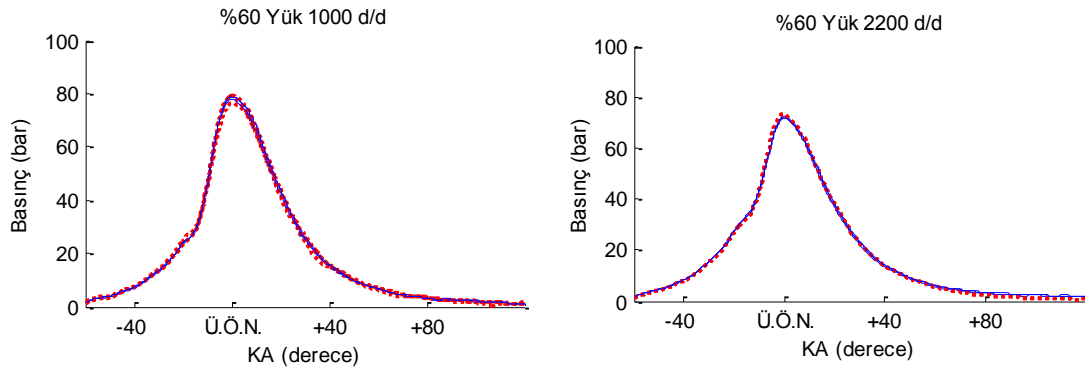


Şekil 5.2. Tam yük doğrulama setinden elde edilen 60 farklı çevrim için dolaylı ölçüm metodunun hata değerleri

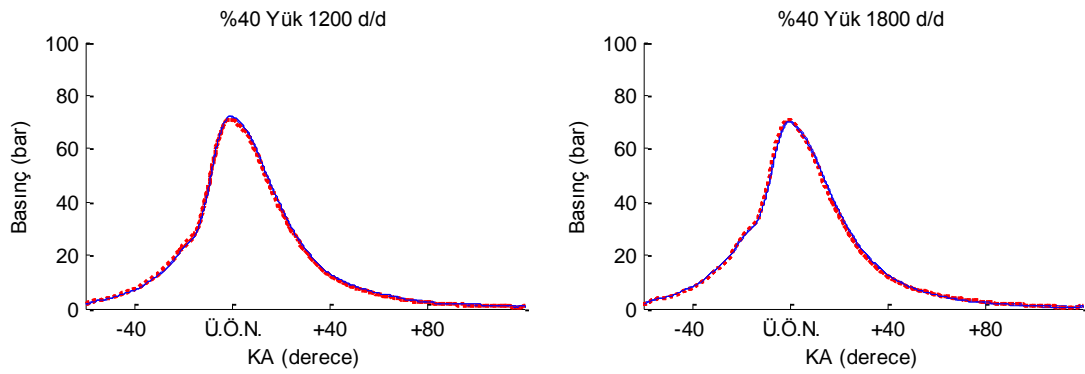
Kısmi yük koşullarında doğrulama seti için ayrılan farklı motor hızlarından üçer çevrimlik gerçek ve geliştirilen yöntem ile elde edilen basınç eğrileri Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Geliştirilen yöntemin kısmi yük koşullarındaki başarımını sayısal olarak tespit edebilmek amacıyla doğrulama setindeki hızların her birinden 5 adet ardışık çevrimler alınarak toplam 50 çevrimlik bir simülasyon verisi elde edilmiştir. Bu 50 adetlik simülasyon verisi YSA kontrol arayüzü ile simüle edilerek bütün çevrimlerde en yüksek basınç değeri, en yüksek basıncın krank açısı konumu ve IMEP hataları grafiksel olarak Şekil 5.7' de verilmiştir



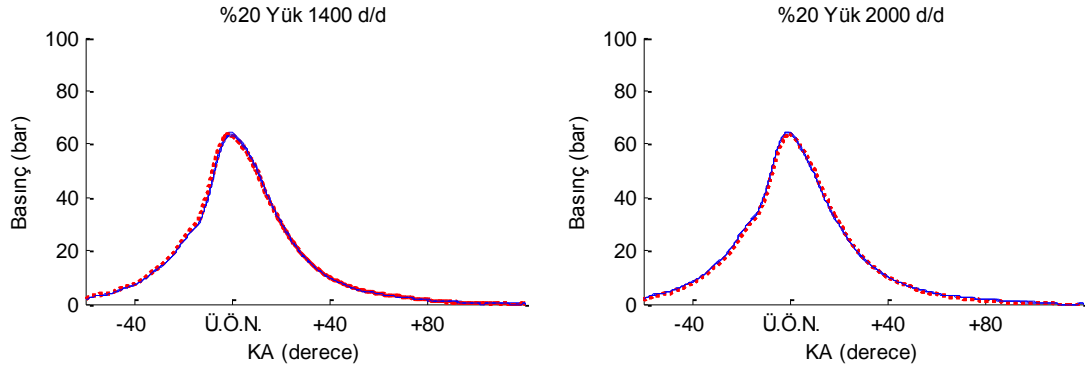
Şekil 5.3. % 80 yük 1400, 2000 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması (..... Dolaylı Ölçüm, — Gerçek Ölçüm)



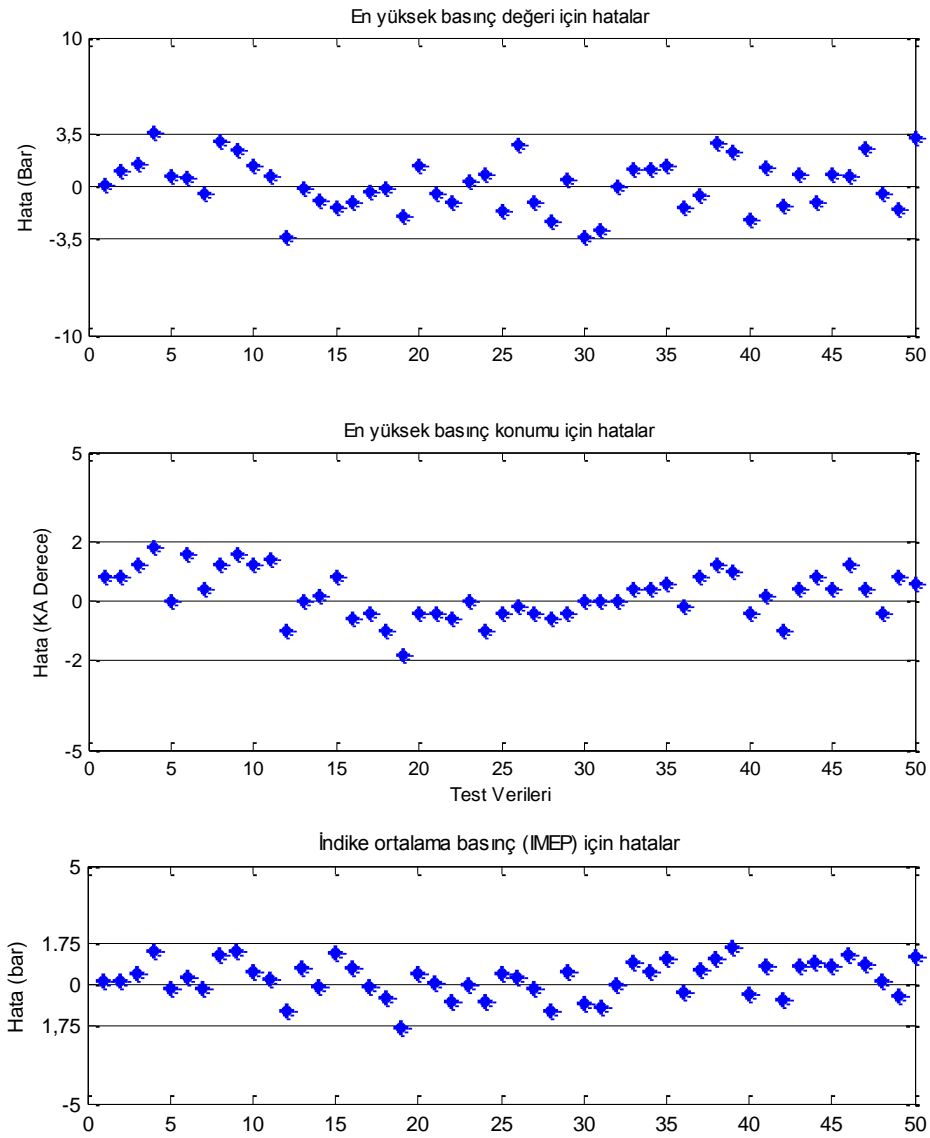
Şekil 5.4. %60 yük 1000, 2200 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması (..... Dolaylı Ölçüm, — Gerçek Ölçüm)



Şekil 5.5. %40 yük 1200, 1800 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması (..... Dolaylı Ölçüm, — Gerçek Ölçüm)



Şekil 5.6. %20 yük 1400, 2000 d/d için, dolaylı ve gerçek ölçülen basınç eğrilerinin karşılaştırılması  
(..... Dolaylı Ölçüm, — Gerçek Ölçüm)



Şekil 5.7. Kısmi yük doğrulama setinden elde edilen 50 farklı çevrim için dolaylı ölçüm metodunun hata değerleri

Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm yöntemini, kısmi yük ve tam yük koşullarındaki gerçek ölçümler ile karşılaştırılarak elde edilen ve yukarıda grafiksel olarak ifade edilen hata değerleri için istatistiksel bilgiler Tablo 5.1’de verilmiştir. Bu tabloda elde edilen hataların pozitif ve negatif sınırları en küçük ve en büyük olarak, bu iki değer arası ise hata aralığı olarak ifade edilmiştir. Ayrıca bu ölçümler için tabloda ortalama hata ve standart sapma değerleri de yer almaktadır.

Tablo 5.1. Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm yönteminin başarımla ilgili istatistiksel bilgiler

		En Küçük	En Büyük	Hata Aralığı	Standart Sapma	Ortalama Hata
Tam Yük	Max. Basınç	-2.666	3.039	5.705	1.483	0.9169
	Max. Basınç Konumu	-1.2	0.8	2	0.5269	-0.1077
	IMEP	-0.4865	1.217	1.704	0.4359	0.3424
Kısmi Yük	Max. Basınç	-3.407	3.598	7.005	1.73	0.1654
	Max. Basınç Konumu	-1.8	1.8	3.6	0.8003	0.22
	IMEP	-1.788	1.582	3.371	0.7617	0.2618

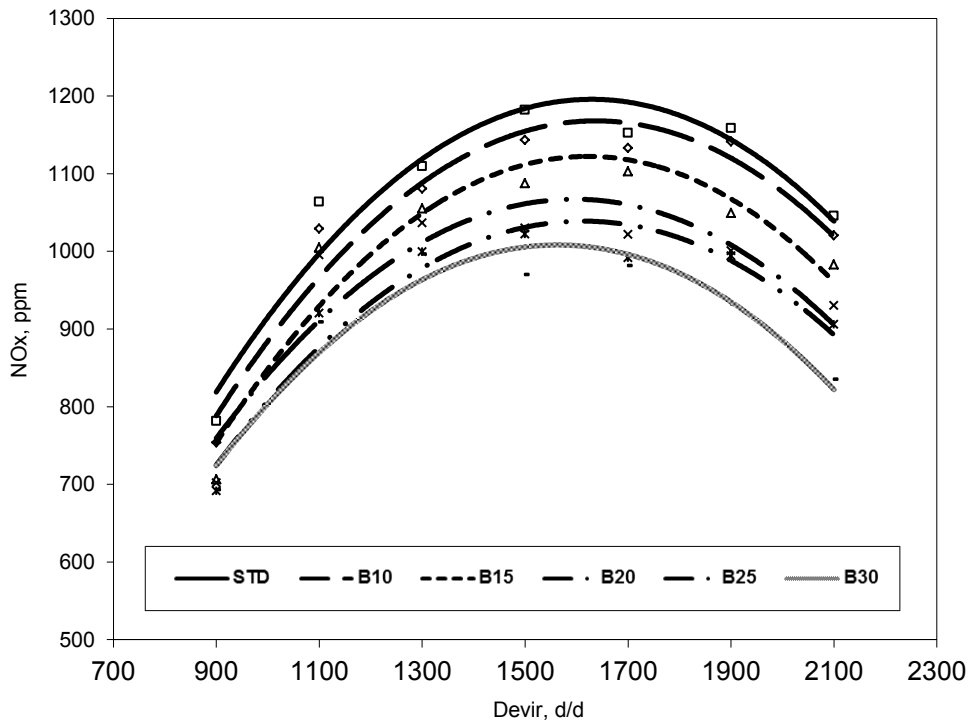
## 5.2. Performansa Dayalı Emisyon Sisteminden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada dolaylı ölçüm metodunun geliştirilmesinin ardından dizel motorlarda emisyon kontrolüne yeni bir yaklaşım olarak Performansa Dayalı Emisyon Sistemi (PDES) geliştirilmiştir. Bu sistemin gerçekleştirilmesinde en önemli zorluk olan araç üzerinde güç ölçümü için geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodu kullanılmıştır. PDES gerçekleştirilirken, dizel motorlarından salınan NOx emisyonlarının kontrolü için su buharı enjeksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Su buharı, motor egzoz kayıp ısısından elde edilmiştir. Bu amaçla motor egzoz sistemine bir ısı eşanjörü monte edilmiştir. Su buharı eşanjör ve buhar hattında 3 bar basınç altında tutulmuştur. Deneysel çalışmada gerekli olan buhar miktarı, motorun bir çevrimde tüketmiş olduğu yakıtın %10, %15, %20, %25 ve %30 kütleli oranlarında, geliştirilen EKBPS ile motor emme manifolduna, selonoid kontrollü enjektör vasıtasıyla gönderilmektedir. Enjektör emme manifolduna enjekte edilen buharı, emme



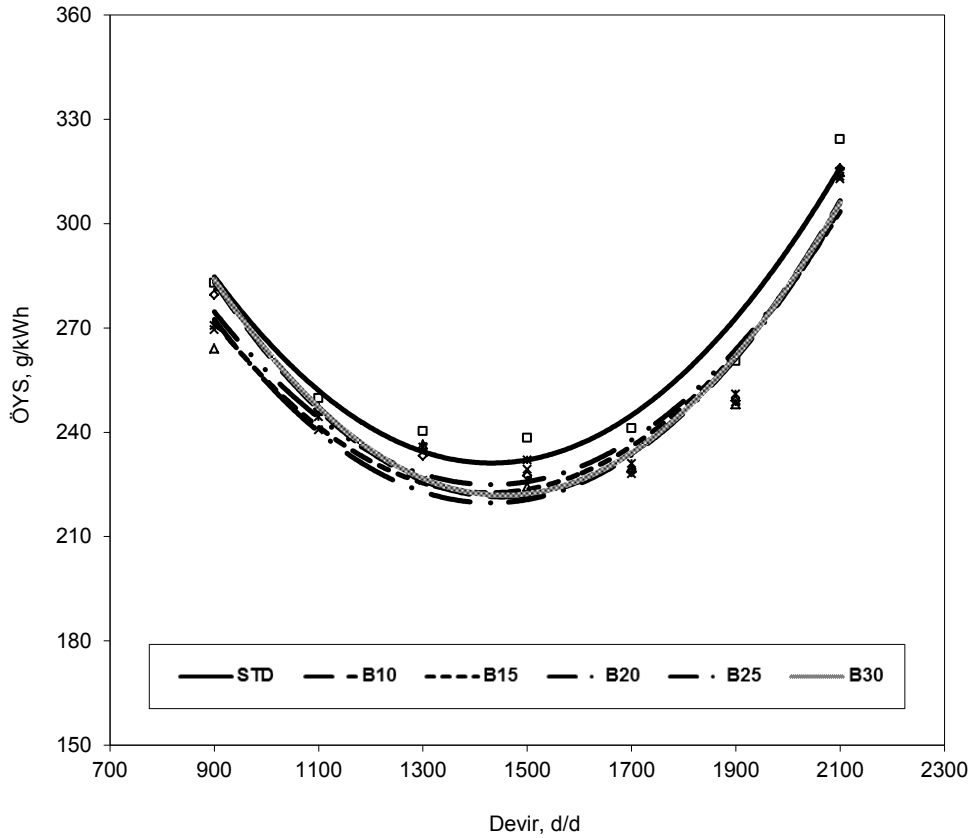
sübabının tam arkasına yapabilecek şekilde konumlandırılmıştır. Deneylede hızlanma, özgül yakıt sarfiyatları ve NO<sub>x</sub> emisyonları ölçülmüştür. Yakıt sarfiyatı ölçümleri, geliştirilen elektronik kontrollü yakıt ölçüm düzeneği ile yapılarak, Bölüm 3.8’de verilen formül ile özgül yakıt sarfiyatına çevrilmiştir. Emisyon ölçümleri ise Bilsa marka emisyon cihazı ile yapılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlara göre, EKBPS nin NO<sub>x</sub> emisyonlarında dikkate değer oranda azalmalara neden olduğu görülmüştür. Motor performans parametrelerinde ise standart duruma göre iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Tam yük şartlarında gerçekleştirilen deneylerde motor 900-2100 d/d arasında altı farklı devirde test edilmiştir. Her devir için optimum yakıt sarfiyatı, motor gücü ve NO<sub>x</sub> emisyonları açısından motora gönderilmesi gereken buhar yüzdesi farklılık arz etmektedir.



Şekil 5.8. %10-30 buhar oranının standart verilere göre NO<sub>x</sub> emisyonları üzerine etkisi

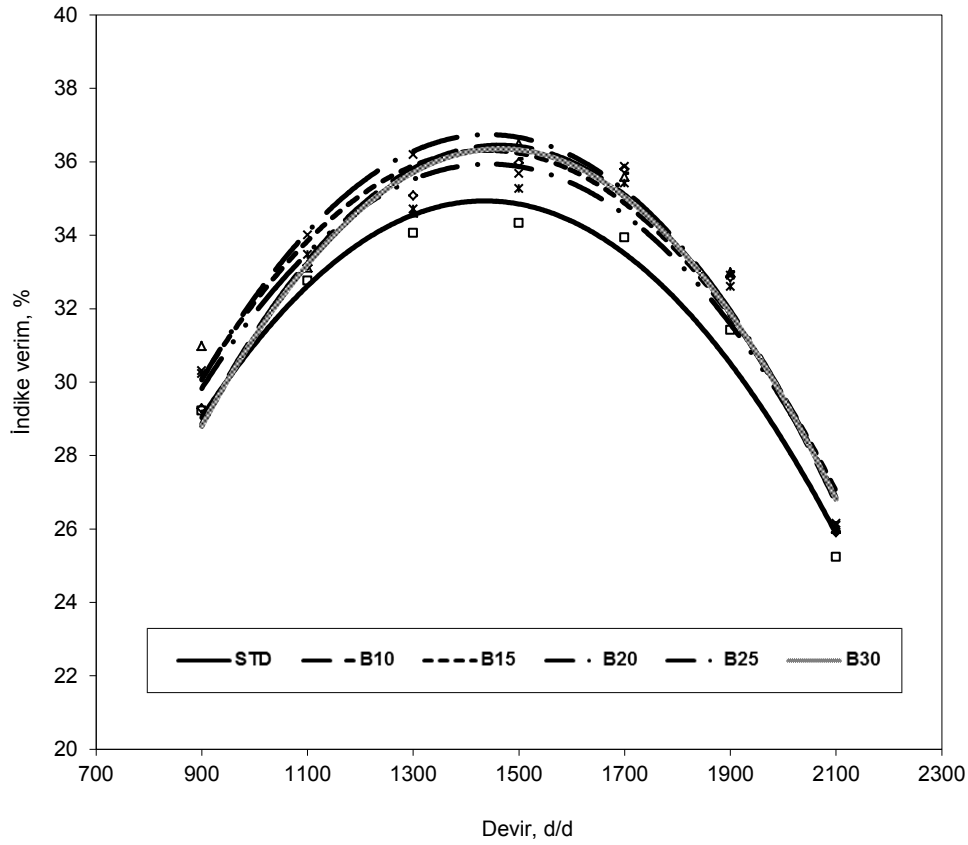
Şekil 5.8’de deneysel olarak elde edilen buhar püskürtmenin NO<sub>x</sub> emisyonları üzerine etkisi verilmiştir. Grafik incelenecek olursa buhar oranı arttırıldıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarının buna bağımlı olarak azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.9. %10-30 buhar oranının standart verilere göre özgül yakıt sarfiyatı üzerine etkisi

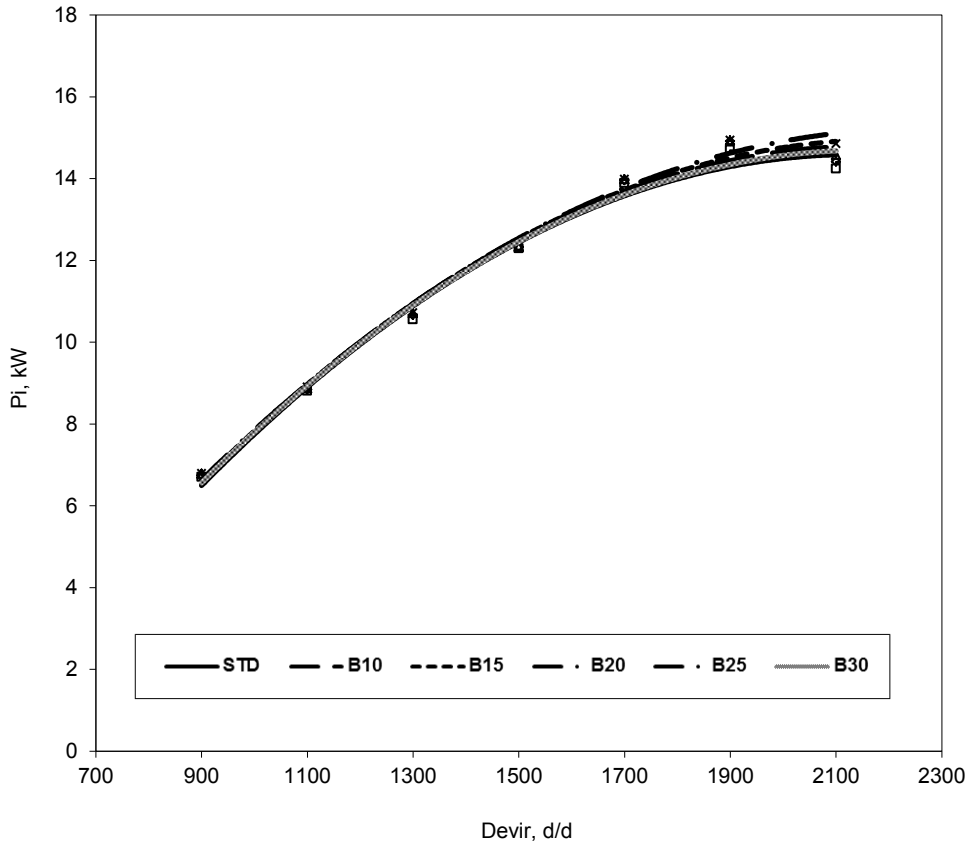
Şekil 5.9’da deneysel olarak elde edilen buhar püskürtmenin özgül yakıt sarfiyatı ( $b_i$ ) üzerine etkisi verilmiştir. Grafik standarda göre incelenecek olursa; tüm buhar oranlarına karşın iyileşme olmasına rağmen en iyi değere genellikle %20 buhar püskürtme oranında ulaşıldığı görülmektedir.

Ölçülen titreşim ve hızlanma bilgileri vasıtasıyla önerilen dolaylı basınç ölçüm metodu kullanılarak silindir içi basınç eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu basınç eğrileri ve Bölüm 3.8’de verilen formüller ile indike verim ( $\eta_e$ ), indike güç ( $P_i$ ) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen indike verim ve indike güç PDES’te performans parametreleri olarak kullanılmıştır. Buhar oranının indike verim ve indike güç üzerine etkisi Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 5.10. %10-30 buhar oranının standart verilere göre indike verim üzerine etkisi

Şekil 5.10'da deneysel olarak elde edilen buhar püskürtmenin indike verim üzerine etkisi verilmiştir. Burada indike verim dolaylı ölçülen basınç eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır. Grafik standart duruma göre incelenecek olursa; tüm buhar oranlarına karşın artma olmasına rağmen en yüksek değere genellikle %20 buhar püskürtme oranında ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.11. %10-30 buhar oranının standart verilere göre indike güç üzerine etkisi

Şekil 5.11’de deneysel olarak elde edilen buhar püskürtmenin indike güç üzerine etkisi verilmiştir. Burada indike güç dolaylı ölçülen basınç eğrileri ile elde edilmiştir. Özgül yakıt sarfiyatı ve indike verimde olduğu gibi indike güç tüm buhar oranlarında artmasına rağmen her devirde en yüksek gücü veren buhar oranı değişkenlik arz etmektedir.

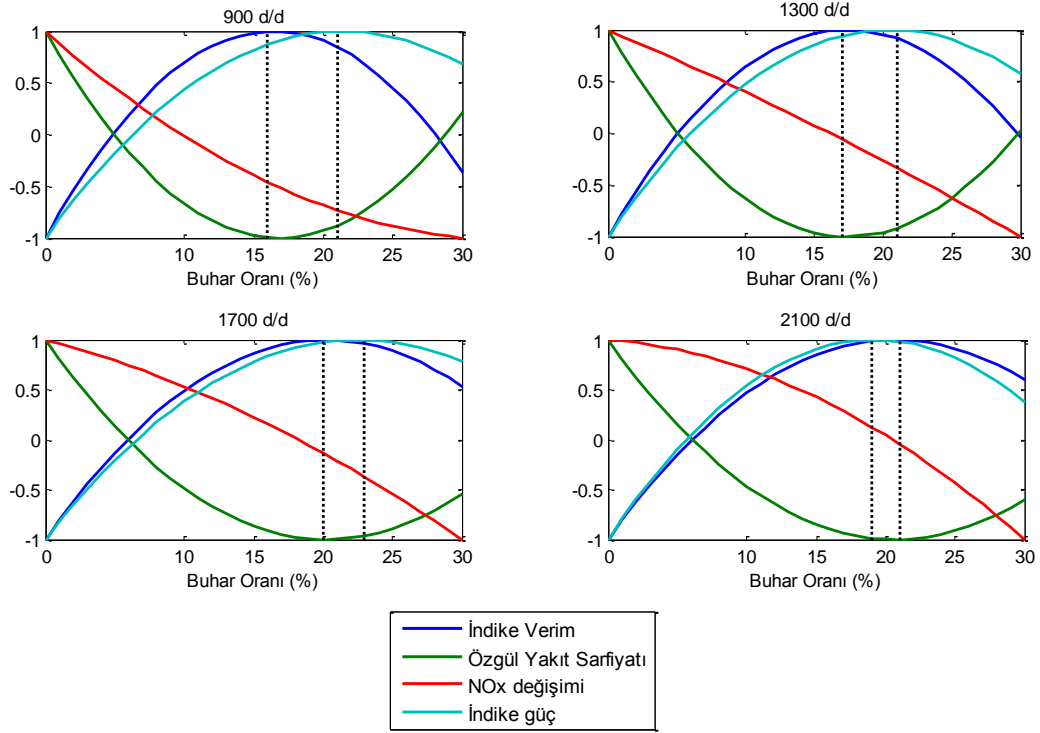
Buhar püskürtme deney sonuçlarına göre, buhar püskürtme oranı arttıkça  $NO_x$  emisyonlarında azalmalar görülmektedir. Oysa ki yukarıda verilen deneysel ölçüm grafiklerinde de görüldüğü gibi, belli bir buhar püskürtme oranına kadar motor performans parametrelerinde maksimum iyileşmeler elde edilmiştir. Bu noktadan sonraki buhar püskürtme oranlarında iyileşme oranı azalmaktadır. PDES’te ise  $NO_x$  emisyonları ve motor performans parametreleri beraber izlenerek optimum buhar oranı tam yük şartlarında çalışan farklı motor devirleri için tespit edilmiştir. PDES’te motor performansı değerlendirme parametreleri olarak indike verim ve indike güç

seçilmiştir. PDES'te indike verim ve indike gücün en yüksek olduğu aralık tespit edilerek bu aralıktaki buhar oranları tercih edilmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonları her buhar oranı için iyileştiğinden buhar enjeksiyonunda PDES yaklaşımı ile NO<sub>x</sub> emisyonları ve motor performansını optimum yapan buhar püskürtme oranı tespit edilmiştir.

Geliştirilen PDES'te indike verim, indike güç, özgül yakıt sarfiyatı ve NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin buhar miktarına göre değişim formlarını gözlemleyebilmek için 2. derece polinom eğrisine uydurulmuştur. Genel olarak kısmi ve tam yük şartlarında devire bağlı olarak elde edilen parametreler 2. Dereceden polinom eğrileri ile sunulmaktadır. PDES'te bu değer değişimleri için elde edilen 2. derece polinom eğrileri standarda göre değişimlerini inceleyebilmek ve ortak değerlendirebilmek amacıyla normalize edilerek kullanılmıştır. Ayrıca bu sayede ölçüm alınmayan ara değerlerdeki buhar püskürtme oranları da değerlendirmeye alınmış olmaktadır. En yüksek verim ve en yüksek gücü sağlayan buhar oranları arası optimum buhar püskürtme aralığı olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.12'de 900,1300,1700,1900 d/d için optimum buhar püskürtme aralığının tespitine yer verilmiştir. Grafiklerde dikey çizgilerle belirtilen buhar oranlarından biri indike verimi en yüksek, özgül yakıt sarfiyatını en düşük yapan orandır. Diğeri ise indike gücü en yüksek yapan orandır. Tüm deney devirleri için elde edilen optimum buhar püskürtme aralıkları detaylı olarak Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Tüm deney devirleri için elde edilen optimum buhar püskürtme aralıkları

<b>Devir</b>	<b>Buhar Oranı</b>
900	% 16-21
1100	% 16-21
1300	% 17-21
1500	% 19-20
1700	% 20-23
1900	% 16-21
2100	% 20-23



Şekil 5.12. PDES ile 900,1300,1700,1900 d/d için optimum buhar oranlarının tespit edilmesi

## BÖLÜM 6. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada performansa dayalı emisyon sistemi ve yeni bir dolaylı silindir içi basınç ölçüm metodu geliştirilmiştir. Bu metot bir motor test düzeneğinden basınç sensörü ile elde edilen gerçek basınç değerlerine dayandırılmış ve geliştirilen sistemin başarımı yine gerçek verilerle karşılaştırmak suretiyle ölçülmüştür. Geliştirilen yöntemin en büyük avantajı; uygulaması güç ve ekonomik olmayan doğrudan silindir içi basınç ölçüm metoduna karşın ekonomik ve günümüz motorlarına kolaylıkla uygulanabilir bir çözüm olmasıdır.

Geliştirilen yöntem silindir içi basınç eğrisini motordan alınan yüzeysel titreşim ve krank açısı hız dalgalanması ölçümlerini kullanarak elde etmektedir. Yüzeysel titreşim ölçümünde uygulanabilirlik ve maliyet açısından, özel ivme ölçerler yerine günümüz motorlarında hali hazırda bulunan vuruntu sensörleri tercih edilmiştir. Geliştirilen yöntemde kullanılan hızlanma ölçüm tekniği, günümüz motorlarında var olan krank hızı ölçüm ekipmanlarıyla uyumludur.

Çalışmada silindir içi basıncın dolaylı ölçümü için bir RBFN YSA modelinden yararlanılmıştır. Yararlanılan YSA girişlerinde titreşim ve hızlanma verileri ön işlemlerden geçirilmiştir. En iyi YSA yapısı ve ön işlem tekniklerini tespit etmek amacıyla birçok deneme ve doğrulama testleri yapılmıştır. Tercih edilen ön işlemlerin en önemlisi, FFT ve Fourier serilerine eğri uydurmadır. Basınç eğrisinin ifade edilmesi amacıyla da yine Fourier serilerine eğri uydurma tercih edilmiştir. Bu ön işleme teknikleri ile daha az sayıda nöron içeren ve daha yüksek başarıma sahip bir YSA oluşturulmuştur. Hem YSA modeli hem de tercih edilen işleme tekniklerinin düşük işlem gücü gereksinimi ayrı bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodunun başarımı, silindir içi basınç sensöründen okunan gerçek basınç değerleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistem için hata aralıkları:

- En yüksek basınç değeri: tam yük şartlarında  $\pm 3$  bar, kısmi yük şartlarında  $\pm 3.5$  bar
- En yüksek basıncın olduğu krank açısı: tam yük şartlarında  $\pm 1.5^\circ$ , kısmi yük şartlarında  $\pm 2^\circ$
- Ortalama indike basınç (IMEP): tam yük şartlarında  $+1,5$  ila  $-0,5$  bar, kısmi yük şartlarında  $\pm 1.75$  bar

olarak tespit edilmiştir. Bu hata oranları ile mevcut literatürde titreşim ve hızlanma bilgilerinin beraber kullanıldığı çalışmalarda geliştirilen sistemlere nazaran daha yüksek başarıma sahip bir yöntem geliştirilmiştir.

Geliştirilen dolaylı ölçüm yöntemi özellikle günümüz modern dizel motorları için arıza tespiti açısından rahatlıkla kullanabilecek bir yapıya sahiptir. Ayrıca, geliştiren sistem elektronik motor kontrol ünitelerinde (EKU) uygulanabilir algoritmalarla oluşturulmuştur. Sistemin uygulanması için gerekli sensörler günümüz motorlarında hali hazırda bulunmaktadır. Sistemin EKU'ya dahil edilmesiyle silindir içi basınç gerçek zamanlı olarak ölçülebilecektir. Bu sayede enjeksiyon zamanı ve süresi gibi kontroller daha net tespit edilerek motor performans ve verim kontrolü açısından yararlı olacaktır.

Dizel motorlarından salınan  $\text{NO}_x$  emisyonlarının azaltılması için pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler genel olarak  $\text{NO}_x$  emisyonlarını azaltırken motor performans parametrelerinde kötüleşmeye sebep olmaktadır. Ayrıca buhar enjeksiyonu ile silindir içerisine suyun gönderilmesi yöntemlerinde karşılaşılan en büyük problem olan korozyon olayı ortadan kaldırılmıştır. Bu çalışmada  $\text{NO}_x$  kontrolü için yeni bir yöntem olan EKBPS kullanılmıştır. Bu sistemle motor performans parametrelerinde kötüleşme olmaksızın  $\text{NO}_x$  emisyonlarında dikkate



değer oranda azalmalar tespit edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki azalma oranı her devirde farklı olmakla birlikte %5-%25 aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Üretici firmalar yeni çıkan katı emisyon kurallarına uyabilmek için bir taraftan emisyon önleyici yöntemler geliştirirken diğer taraftan rekabet edebilirlik açısından motor performansını göz ardı etmemeleri gerekmektedir. Dolayısıyla seçilen emisyon önleme yöntemi motor performansı ve emisyonlar açısından optimum olacak şekilde ayarlanmalıdır. Tam yük şartlarında buhar enjeksiyonlu motor deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, test edilen her devirde NO<sub>x</sub>, yakıt sarfiyatı, verim ve gücü optimum yapan buhar püskürtme oranı farklılık arz etmektedir. Bu sebeple NO<sub>x</sub>, yakıt sarfiyatı, verim ve gücü ortak değerlendirerek her devir için buhar oranını tespit eden bir yöntemle bir ihtiyaç duyulmuştur.

Araç üzerinde çalışan motorların gücünün ölçülmesi kullanım şartlarında mümkün değildir. Bu çalışmada geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodu ile motor performansı her koşulda ekonomik ve pratik bir şekilde ölçülebilecektir. Bu sayede performansa dayalı emisyon sisteminin gerçekleşmesindeki en büyük zorluk olan güç ölçümü aşılarak, deniz ve kara araçlarında kullanılabilir bir PDES geliştirilmiştir.

Geliştirilen dolaylı basınç ölçüm metodunun başarımının iyileştirilmesi için deneysel veri toplama işleminde daha sık devir ve yük aralıklarında ölçüm alınarak eğitim setinin artırılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Özellikle kısmi yük şartlarında hata oranının düşmesi beklenmektedir.

Geliştirilen basınç ölçüm metodu ve PDES'in tam gerçek zamanlı olarak çalıştırılabilmesi için bu çalışmada elde edilen çıktuların bir DSP donanımı üzerinde gerçekleştirilmesi piyasaya hitap edecektir. Bu sayede geliştirilen PDES'in diğer emisyon kontrol yöntemleri ile kullanılması veya karma bir yapı kurulması mümkün kılınacaktır. Ayrıca geliştirilen PDES'in son yıllarda katı emisyon sınırlamaları getirilen gemilerde kullanılması büyük bir fayda sağlayacaktır. PDES'e ilave

edilecek parametrelerle ile gemilerin buldukları kara sularında bulunan emisyon kısıtlamalarına uymaları veya performans odaklı çalıştırılabilmeleri sağlanabilecektir.

**KAYNAKLAR**

- [1] J. D. POWELL, “Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future,” *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 115, no. 2B, pp. 343–350, 1993.
- [2] S. LEONHARDT, M. NORBERT, R. ISERMANN, “Methods for Engine Supervision and Control Based on Cylinder Pressure Information,” vol. 4, no. 3, pp. 235–245, 1999.
- [3] R. KUMAR MAURYA, D. D. PAL, A. KUMAR AGARWAL, “Digital signal processing of cylinder pressure data for combustion diagnostics of HCCI engine,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 1–15, Aug. 2011.
- [4] D. T. HOUNTALAS, G. C. MAVROPOULOS, G. KOURBETIS, “Experimental investigation to develop a methodology for estimating the compression condition of DI Diesel engines,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2006.
- [5] C. GUARDIOLA, J. J. LÓPEZ, J. MARTÍN, D. GARCÍA-SARMIENTO, “Semiempirical in-cylinder pressure based model for NOX prediction oriented to control applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3275–3286, Jun. 2011.
- [6] K. KORNBLUTH, Z. MCCAFFREY, P. a. ERICKSON, “Incorporating in-cylinder pressure data to predict NOx emissions from spark-ignition engines fueled with landfill gas/hydrogen mixtures,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 22, pp. 9248–9257, Nov. 2009.
- [7] Y. REN, “Detection of Knocking Combustion in Diesel Engines by Inverse Filtering of Structural Vibration Signals,” University of New South Wales, 1999.
- [8] M. JARGENSTEDT, “Detecting Start of Combustion using Knock Sensor Signals,” Linköpings University, 2000.
- [9] X. ZHEN, Y. WANG, S. XU, Y. ZHU, C. TAO, T. XU, M. SONG, “The engine knock analysis – An overview,” *Applied Energy*, vol. 92, pp. 628–636, Apr. 2012.

- [10] J. CHEN, R. RANDALL, "Vibration Signal Processing of Piston Slap and Bearing Knock in IC Engines."
- [11] R. JOHNSON, "Cylinder pressure reconstruction based on complex radial basis function networks from vibration and speed signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 8, pp. 1923–1940, Nov. 2006.
- [12] V. G. ZURITA, A. AGREN, R. B. RANDALL, Y. GAO, "Reconstruction of cylinder pressure time trace on a six-cylinder engine from acceleration measurements," in *Proceedings of ISMA23, International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 1998.
- [13] X. LIU, R. RANDALL, "Blind source separation of internal combustion engine piston slap from other measured vibration signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, no. 6, pp. 1196–1208, Nov. 2005.
- [14] X. LIU, R. B. RANDALL, J. ANTONI, "Blind separation of internal combustion engine vibration signals by a deflation method," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 5, pp. 1082–1091, Jul. 2008.
- [15] M. WAGNER, S. C. BEHRENS, J. F. BÖHME, "In – Cylinder Pressure Estimation Using Structural Vibration Measurements of Spark Ignition Engines," in *Higher-Order Statistics*, 1999. *Proceedings of the IEEE Signal Processing Workshop on*, 1999, no. 1, pp. 174–177.
- [16] P. M. AZZONI, G. CANTONI, G. MINELLI, D. MORO, "Indirect pressure measurement in a small diesel engine," in *Small Engine Technology Conference*, 1993.
- [17] G. D. CASSINI, W. D'AMBROGIO, A. SESTIERI, "Frequency domain vs. cepstrum technique for machinery diagnostic and input waveform reconstruction," in *ISMA21*, 1996.
- [18] R. B. RANDALL, Y. REN, H. NGU, "Diesel engine cylinder pressure reconstruction," in *ISMA21*, 1996.
- [19] P. AZZONI, A. PANIERO, "Cylinder pressure reconstruction by cepstrum analysis," in *22nd International Symposium on Automotive Technology and Automation*, p. 1990.
- [20] V.G. ZURITA, "Vibration based diagnostics for analysis of combustion properties and noise emissions of IC engines," *Lulea University of Technology*, Sweden, 2001.
- [21] Y. GAO, R. B. RANDALL, "Reconstruction of Diesel Engine Cylinder Pressure Using a Time Domain Smoothing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13, pp. 709–722, 1999.

- [22] H. DU, L. ZHANG, X. SHI, "Reconstructing cylinder pressure from vibration signals based on radial basis function networks," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 215, no. 6, pp. 761–767, Jun. 2001.
- [23] M. EL-GHAMRY, J. a. STEEL, R. L. REUBEN, T. L. FOG, "Indirect measurement of cylinder pressure from diesel engines using acoustic emission," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 19, no. 4, pp. 751–765, Jul. 2005.
- [24] S. CITRON, J. O'HIGGINS, L. CHEN, "Cylinder by Cylinder Engine Pressure and Pressure Torque Waveform Determination Utilizing Speed Fluctuations," SAE Technical Paper 890486, 1989.
- [25] K. IIDA, K. AKISHINO, K. KIDO, "IMEP estimation from instantaneous crankshaft torque variation," SAE Transactions 99 (SAE 900617), 1990.
- [26] G. RIZZONI, F.T. CONNOLLY, "Estimate of IC engine torque from measurement of crankshaft angular position," SAE Transactions, Section 3, SAE 932410, 1993.
- [27] S. K. CHEN, S. CHEN, "Engine diagnostics by dynamic shaft measurement—A progress report," AE Transactions, Section 3, SAE 932412, 1993.
- [28] F. T. CONNOLLY, A. E. YAGLE, "Modeling and identification of the combustion pressure process in internal combustion engines," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 8, no. 1, pp. 1–19, Jan. 1994.
- [29] F. CRUZ-PERAGO, F. J. JIME, P. LAS, "A Genetic Algorithm for Determining Cylinder Pressure in Internal Combustion Engines," Energy, vol. 2, pp. 2600–2607, 2007.
- [30] M. S. SHEHATA, "Cylinder pressure, performance parameters, heat release, specific heats ratio and duration of combustion for spark ignition engine," Energy, vol. 35, no. 12, pp. 4710–4725, Dec. 2010.
- [31] D. MORO, N. CAVINA, F. PONTI, "In-cylinder pressure reconstruction based on instantaneous engine speed signal," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, no. 124, 2002.
- [32] R. JOHANSSON, A. AGREN, M. KLOPOTEK, "Prediction of points and tendencies of the pressure waveform from crankshaft speed measurements," in ISMA 25, 2000.

- [33] F. GU, P. J. JACOB, A. D. BALL, “Non-parametric models in the monitoring of engine performance and condition: Part 2: Non-intrusive estimation of diesel engine cylinder pressure and its use in fault detection ,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering , vol. 213 , no. 2 , pp. 135–143, Feb. 1999.
- [34] P. J. JACOB, F. GU, A. D. BALL, “Non-parametric models in the monitoring of engine performance and condition: Part 1: Modelling of non-linear engine processes ,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering , vol. 213 , no. 1 , pp. 73–81, Jan. 1999.
- [35] T. S. BROWN, W.S. NEILL, “Determination of engine cylinder pressure from crankshaft speed fluctuation,” SAE Paper 920463, 1992.
- [36] R. POTENZA, J. F. DUNNE, S. VULLI, D. RICHARDSON, P. KING, “Multicylinder engine pressure reconstruction using NARX neural networks and crank kinematics ,” International Journal of Engine Research , vol. 8 , no. 6 , pp. 499–518, Dec. 2007.
- [37] Y. SHIAO, C.-H. PAN, J. J. MOSKWA, “Advanced Dynamic Spark Ignition Engine Modelling for Diagnostics and Control,” International Journal of Vehicle Design, vol. 15, no. 6, 1994.
- [38] E. WEISSENBOR, T. BOSSMEYER, T. BERTRAM, “Adaptation of a zero-dimensional cylinder pressure model for diesel engines using the crankshaft rotational speed,” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 25, no. 6, pp. 1887–1910, Aug. 2011.
- [39] J. DENG, R. STOBART, B. MAASS, “The Applications of Artificial Neural Networks to Engines,” in Artificial Neural Networks - Industrial and Control Engineering Applications, InTech, 2011, pp. 309–332.
- [40] V. AYHAN, “Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun Nox ve İş Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması,” Sakarya Üniversitesi, 2009.
- [41] A. PARLAK, V. AYHAN, Y. ÜST, B. ŞAHİN, İ. CESUR, B. BORU, G. KÖKKÜLÜNK, “New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system,” Journal of the Energy Institute, vol. 85, no. 3, pp. 135–139, Aug. 2012.
- [42] “Animated Engines - Diesel.” [Web]. URL : <http://www.animatedengines.com/diesel.html>. [Erişim: 21-07-12].
- [43] R. STONE, Introduction to Internal Combustion Engine Fundamentals, 3rd ed. Warrendale, PA,: , 2003.
- [44] K. OWEN, T. COLEY, Automotive Fuels Reference Book, 2nd ed. Warrendale, PA: SAE International, 1999.

- [45] C. HAŞİMOĞLU, “Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkisi,” Sakarya Üniversitesi, 2005.
- [46] J. B. HEYWOOD, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [47] O. BORAT, M. BALCI, A. SÜRMEŒEN, *İçten Yanmalı Motorlar*, Cilt 1. Ankara: DAYM Matbaası, 1992.
- [48] H. YAMIK, “Dizel Motorlarında Alternative Yakıt Olarak Yağ Esterlerinin Kullanılma İmkanlarının Araştırılması,” Gazi Üniversitesi, 2002.
- [49] R. STONE, *Motor Vehicle Fuel Economy*. Houndsmills: Macmillan Educational Ltd., 1989.
- [50] W. MARSHALL, L. G. SCHUMACHER, S. HOWELL, “Engine Exhaust Emissions Evaluation of a Cummins L10E When Fueled with a Biodiesel Blend,” *Methods*, no. 412, 1995.
- [51] I. M. KHAN, C. H. T. WANG, “Factors Affecting Emissions of Smoke and Gaseous Pollutants From Direct Injection Diesel Engines,” 1973.
- [52] G. P. MERKER, B. HOHLBAUM, M. RASCHER, “Two-Zone Model for Calculation of Nitrogen-Oxide Formation in Direct-Injection Diesel Engines,” SAE Paper No: 932454, 1993.
- [53] P. L. HERZOG, L. BÜRGLER, E. WINKLHOFER, P. ZELENKA, W. CARTELLIERI, “NO<sub>x</sub> Reduction Strategies for DI Diesel Engines,” *Papers Papers 19902002*, no. x, 1992.
- [54] C. HAŞİMOĞLU, “Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi,” Selçuk Üniversitesi, 2000.
- [55] J. E. NICHOLLS, I. A. EL-MESSIRI, H. K. NEWHALL, “Inlet Manifold Water Injection for Control of Nitrogen Oxides- Theory and Experiment,” SAE Paper No. 690018.
- [56] D. . LANGER, D. T. DALY, “Low Emission Water Blend Diesel Fuel, Presentation at Future Fuels and Fuel Additives for Vehicles Emissions Control,” in 219th American Chemical Society National Meeting, 2000.
- [57] R. UDAYAKUMAR, S. SUNDARAM, S. C. JOHNSON, “Reduction of NO<sub>x</sub> Emissions by Water Injection in to the Inlet Manifold of a DI Diesel Engine,” *Engineering*, vol. 2003, no. 724, 2003.

- [58] R. J. CROOKES, M. A. A. NAZHA, M. S. JANOTA, T. STOREY, "INVESTIGATION INTO THE COMBUSTION OF WATER/DIESEL FUEL EMULSIONS," Proceedings Society of Automotive Engineers, pp. 111–117, 1980.
- [59] J. W. PARK, K. Y. HUH, K. H. PARK, "Experimental Study on the Combustion Characteristics of Emulsified Diesel in a RCEM," in Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 2000, no. 6, pp. 1–6.
- [60] F. L. DRYER, "Water addition to practical combustion systems Concepts and applications," in Symposium International On Combustion, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 279–295.
- [61] E. VALDMANIS, D. E. WULFHORST, "The Effects of Emulsified Fuels and Water Induction on Diesel Combustion," SAE Paper No. 700736.
- [62] M. A. A. NAZHA, H. RAJAKARUNA, S. A. WAGSTAFF, "The use of emulsion, water induction and EGR for controlling diesel engine emissions.," Water, no. 724, 2002.
- [63] S. KOHKETSU, K. MORI, K. SAKAI, "Reduction of Exhaust Emission with New Water Injection System in a Diesel Engine," SAE paper 960033, 1996.
- [64] M. A. PSOTA, W. L. EASLEY, T. H. FORT, A. M. MELLOR, "Water Injection Effects on NOX Emissions for Engines Utilizing Diffusion Flame Combustion," SAE Trans. J. Engines 106, pp. 1835–1843, 1997.
- [65] N. SAMEC, B. KEGL, R. W. DIBBLE, "Numerical and Experimental Study of Water/Oil Emulsified Fuel Combustion in a Diesel Engine," Fuel 81, pp. 2035–2044, 2002.
- [66] F. BEDFORD, C. RUTLAND, P. DITTRICH, A. RAAB, F. WIRELEIT, "Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion," SAE paper 01-2938, 2000.
- [67] J. P. MELO, A. M. MELLOR, "NOX Emissions from Direct Injection Diesel Engines with Water/Steam Dilution," SAE paper 1999-01-0836, 1999.
- [68] C. SORUŞBAY, İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonu, Ders Notları. İ.T.Ü., 1999.
- [69] G. GREEVES, O. KHAN, I.M., "Effects of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emissions," in Proceedings of the 16th Symposium (International) on Combustion, 1977, pp. 321–36.
- [70] N. SAMEC, B. KEGL, R. W. DIBBLE, "Numerical and Experimental Study of Water/Oil Emulsified Fuel Combustion in a Diesel Engine," Fuel, vol. 81, pp. 2035–2044, 2002.



- [71] A. LIF, K. HOLMBERG, "Water-in-diesel emulsions and related systems.," in *Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 123–126, no. 2, pp. 231–239.
- [72] S. ÇETINKAYA, *Motor Dinamiği*. İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım, 2007.
- [73] "PRESSURE SENSOR QC34C Data Sheet," 2011. [Web]. URL : [https://www.avl.com/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2bf1b729-3f6e-4ce6-a623-ddc2510320f2&groupId=10138](https://www.avl.com/c/document_library/get_file?uuid=2bf1b729-3f6e-4ce6-a623-ddc2510320f2&groupId=10138).
- [74] J. TURNER, *Automotive Sensors*. Momentum Press, 2009, pp. 115–123.
- [75] W. J. FLEMING, "Overview of Automotive Sensors," vol. 1, no. 4, pp. 296–308, 2001.
- [76] "Robert Bosch Gmbh - Vuruntu Sensörü." [Web]. URL : [http://rb-kwin.bosch.com/tr/tr/powerconsumptionemissions/electric\\_controls/sensors/enginemanagement/knocksensor.html](http://rb-kwin.bosch.com/tr/tr/powerconsumptionemissions/electric_controls/sensors/enginemanagement/knocksensor.html). [Erişim: 21-07-12].
- [77] A. M. ZOUBIR, A comparative study of multiple tests based techniques for optimal sensor location for knock detection, vol. 5. 1995.
- [78] "Piezoelectric vibration sensors." [Web]. URL : [http://www.bosch.com.au/content/language1/downloads/sensors\\_knock.pdf](http://www.bosch.com.au/content/language1/downloads/sensors_knock.pdf). [Erişim: 21-07-12].
- [79] "High-Speed M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, up to 1.25 MS/s, up to 80 Analog Inputs." [Web]. URL : <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-20/lang/en>. [Erişim: 23-07-12].
- [80] J. JEROME, *Virtual Instrumentation Using Labview*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
- [81] "How Can I Use LabVIEW." [Web]. URL : <http://www.ni.com/labview/applications/>. [Erişim: 26-07-12].
- [82] K. SAYOOD, *Learning Programming Using MATLAB*, vol. 1, no. 1. Morgan & Claypool Publishers, 2006, pp. 1–88.
- [83] "Product Description - Quick Start Matlab." [Web]. URL : [http://www.mathworks.com/help/techdoc/learn\\_matlab/bs98aqv.html](http://www.mathworks.com/help/techdoc/learn_matlab/bs98aqv.html). [Erişim: 26-07-12].
- [84] B. BORU, H. İ. ESKİKURT, A. PARLAK, "A Computer Based Flexible Real Time Fuel Controller System Implementation For Four-Cylinder Internal Combustion Engines," in *International Sustainable Development (ISSD 2010)*, 2010.

- [85] B. BORU, V. AYHAN, A. PARLAK, "Pistonlu Motorlarda Yakıt Püskürtme Oranının Bulanık Mantık İle Gerçek Zamanlı Olarak Kontrolü," in 10. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 2009.
- [86] F. ZHAO, M. C. LAI, D. L. HARRINGTON, "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 25, no. 5, pp. 437–562, 1999.
- [87] N. MITROGLOU, J. M. NOURI, M. GAVAISES, C. ARCOUMANIS, "Spray Characteristics of a Multi-hole Injector for Direct-Injection Gasoline Engines," *International Journal of Engine Research*, vol. 7, no. 3, pp. 255–270, 2006.
- [88] C. S. C. GONÇALVES, B. A. F. NEVES, A. E. V. E. SANTO, F. M. P. BRÓJO, R. A. CALADO, "Electronic Control of a Four Stroke Internal Combustion Engine," in *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems*, 2006, pp. 267–272.
- [89] "Matlab - Data Acquisition Toolbox™ 2 User 's Guide."
- [90] "TDMS File Format Internal Structure." [Web]. URL : <http://www.ni.com/white-paper/5696/en>. [Erişim: 12-08-12].
- [91] A. PARLAK, "Aşırı Doldurmalı Seramik Kaplı Bir Dizel Motorunda Optimum Püskürtme Avansı ve Sıkıştırma Oranının Deneysel Olarak İncelenmesi," Sakarya Üniversitesi, 2000.
- [92] V. AYHAN, "Metanol-Benzin Karışımlarının MgO-ZrO<sub>2</sub> Termal Bariyer Çemberli Bir Motorda Performans ve Emisyonlara Etkisi," Sakarya Üniversitesi, 2006.
- [93] B. BOASHASH, *Time Frequency Analysis: A Comprehensive Reference*. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2003.
- [94] H. BAHER, *Analog & Digital Signal Processing*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- [95] J. KIUSALAAS, *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*, vol. 40, no. 1. Cambridge University Press, 2005, p. 434.
- [96] C. M. SHAKARJI, "Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 103, no. 6, p. 633, Nov. 1998.
- [97] V. G. ZURITA, "Vibration based diagnostics for analysis of combustion properties and noise emissions of IC engines," Lulea University of Technology, 2001.

- [98] L. J. MYERS, M. O. MALLEYL, “The relationship between human cortico-muscular coherence and rectified EMG,” in Proceedings of the 1st International IEEE EMBS, 2003, pp. 289–292.
- [99] S. N. SIVANANDAM, S. SUMATHI, S. N. DEEPA, Introduction to Neural Networks Using Matlab 6.0. Tata McGraw-Hill Education, 2006.
- [100] N. SUNDARARAJAN, P. SARATCHANDRAN, Y. W. LU, Radial Basis Function Neural Networks With Sequential Learning: Mran and Its Applications. World Scientific, 1999.

## ÖZGEÇMİŞ

Barış BORU, 1983 yılında Afyonkarahisar'da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Edirne'de, lise öğrenimini İstanbul Bağcılar Abdurrahman Nermin Bilimli Anadolu Meslek Lisesi Uçak Elektroniği bölümünde 2001 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü Elektronik Öğretmenliği programına başlayarak lisans öğrenimini 2005 yılında mezun olmuştur. 2005-2007 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi ana bilim dalında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi ana bilim dalında doktora eğitimine başlamıştır. Halen Aralık 2005'te göreve başladığı Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Barış BORU, evli ve bir çocuk babasıdır.