



**DİZEL MOTORLARDA  
ÇOKLU YAKIT PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN  
DENEYSEL BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ**

**Erdoğan GÜNER**

**Doktora Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalı  
Prof. Dr. Kadir BAKIRCI  
Prof. Dr. M. Akif CEVİZ  
2019  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU YAKIT PÜSKÜRTME  
STRATEJİSİNİN DENEYSEL BELİRLENMESİ VE  
MODELLENMESİ**

**Erdoğan GÜNER**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her hakkı saklıdır.**



TEZ ONAY FORMU

DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU YAKIT PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN DENEYSEL  
BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Prof. Dr. Kadir BAKIRCI'nın danışmanlığında ve Prof. Dr. M. Akif CEVİZ'in ortak danışmanlığında Erdoğan GÜNER tarafından hazırlanan bu çalışma, 05/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Kadir BİLEN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

İmza :

Üye : Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Alınza KALELİ

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 12.09/2019 tarih ve 36.../...78... nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Doktora Tezi

### DİZEL MOTORLARDA ÇOKLU YAKIT PÜSKÜRTME STRATEJİSİNİN DENEYSEL BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Erdoğan GÜNER

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI  
Ortak Danışman: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

Dünya nüfusunun ve endüstrileşmenin artması ihtiyaç duyulan enerji miktarını artırmış ve dolayısıyla mevcut kaynakları daha verimli kullanmayı ve enerji dönüşümü sırasında da çevreye daha az zararlı gazlar yaymayı zorunlu hale getirmiştir. İçten yanmalı motorlarda yanma olayını ve bağlantılı olarak performans ve emisyonların oluşumunu doğrudan etkileyen en önemli sistem püskürtme sistemidir. Bu çalışmada farklı motor çalışma koşullarında her çevrimde dört püskürtme gerçekleştirilen bir strateji benimsenmiş ve püskürtme açıları ile yakıt miktarlarının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Etkisi incelenen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri çok sayıda olduğundan deney tasarımı yöntemlerinden olan Taguchi metodundan yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlarla ekserji analizi yapılarak püskürtme stratejisinin değişmesinin ekserjistik verimi ve kayıpları nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Ayrıca püskürtme parametrelerinin (açı ve yakıt miktarlarının) giriş parametresi; fren özgül yakıt tüketimi ve  $NO_x$ , HC ve CO emisyonlarının çıkış parametresi olarak ele alındığı bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Yapılan deneylerin %80'i modeli eğitmek için kullanılırken %20'si de modeli test etmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar oluşturulan modelin belirtilen çıktıları tahmin etmede başarılı olduğunu göstermiştir. Fren özgül yakıt tüketimi,  $NO_x$ , HC ve CO emisyonları için ortalama mutlak hata değeri sırasıyla %3,1, %2,5, %2,7 ve %2,4 olarak elde edilmiştir. Doğrulanmış model kullanılarak bir kalibrasyon tablosu oluşturulmuş, bu sayede motor kalibrasyonu için çok sayıda deney yapılmasına gerek kalmadan fren özgül yakıt tüketimi ve  $NO_x$  emisyonunu minimum tutan giriş parametreleri belirlenmiştir.

**2019, 105 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Püskürtme stratejisi, Taguchi metodu, ekserji analizi, yapay sinir ağıları.

## ABSTRACT

Ph.D. Thesis

### EXPERIMENTAL DETERMINATION AND MODELLING OF THE MULTIPLE FUEL INJECTION STRATEGY IN DIESEL ENGINES

Erdoğan GÜNER

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

Co-advisor: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

The increase in the world population, industrialization and consequently the increase in energy demand made it necessary to use the existing resources more efficiently and to emit less harmful gases to the environment during energy conversion. The most important system that directly affects the combustion event and, thus, the performance and emissions in internal combustion engines is the injection system. In this study, a strategy with four injections per cycle has been used under different engine operating conditions and the effect of injection timing and fuel quantities on engine performance and exhaust emissions have been observed. Since there are large number of parameters and their levels being examined, Taguchi method which is one of the experimental design methods has been used. An exergy analysis as been carried out by using the experimental findings to see how the change of injection strategy changes exergetic efficiency and losses. In addition, an artificial neural network model has been developed in which the injection parameters (injection timing and fuel quantity) are taken as input parameters while brake specific fuel consumption and NO<sub>x</sub>, HC and CO emissions are output parameters. While 80% of the experiments have been used to train the model , 20% have been used to test the model. The results has showed that the model has succesful in predicting the outputs. Mean absolute errors for brake specific fuel consumption (BSFC), NO<sub>x</sub>, HC and CO emissions have been observed as 3.1%, 2.5%, 2.7% and 2.4%, respectively. A calibration table has been created by using the validated model, thus the input parameters minimizing the BSFC and NO<sub>x</sub> emissions have been determined without performing a large number of experiments for engine calibration.

**2019, 105 pages**

**Keywords:** Injection strategy, Taguchi method, analysis of exergy, artificial neural networks

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının hazırlanmasında bilgi ve tecrübelerinden sürekli faydalandığım ve her zaman desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Kadir BAKIRCI'ya ve ortak danışman hocam Prof. Dr. M. Akif CEVİZ'e teşekkür ederim.

Çalışmanın başından beri önerileriyle beni yönlendiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Alırıza KALELİ'ye teőekkürü bir borç bilirim.

Kendileriyle birlikte aynı ortamda çalıőmaktan mutluluk duyduğum ve ihtiyaç hissettiğim her an yanımda olan Arő. Gör. Galip KALTAKKIRAN'a, Arő. Gör. Hüseyin KÖKSAL'a ve Öğr. Gör. H. İbrahim AKOLAŐ'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalıőmalarım esnasında yaşadığım tüm zorluklara rağmen maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

**Erdoğan GÜNER**

**Eylül 2019**

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	x
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	20
2.1. Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Yanma.....	20
2.2. Zararlı Emisyonlar.....	23
2.2.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonu.....	23
2.2.2. Azot Oksit (NO <sub>x</sub> ) Emisyonu.....	23
2.2.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonu .....	24
2.2.4. Partikül Madde (PM) Emisyonu.....	27
2.3. Yakıt Püskürtme Sistemlerinin Gelişimi, Ön ve Art Püskürtme.....	27
2.4. Deneysel Tasarımı ve Taguchi Metodu .....	33
2.5. Ekserji.....	36
2.6. Yapay Sinir Ağları.....	36
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	42
3.1. Deneysel Düzenek ve Kullanılan Cihazlar .....	42
3.1.1. Hidrolik dinamometre .....	43
3.1.2. Egzoz emisyon cihazı .....	44
3.1.3. NO <sub>x</sub> sensörü .....	44
3.1.4. FPGA tabanlı şasi .....	45
3.1.5. Enjektör sürücü modülü .....	47
3.1.6. Analog giriş modülü .....	47
3.1.7. Termokupl modülü .....	48

3.1.8. Yakıt debisi ölçüm cihazı .....	49
3.1.9. Tasarlanan yazılım .....	49
3.2. Deneysel Yöntem .....	52
3.2.1. Taguchi metodu ile deney tasarımı .....	52
3.2.2. Ekserji analizi .....	55
3.2.3. Yapay sinir ağları ile modelleme.....	59
3.3. Deneysel Belirsizlikler .....	59
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>61</b>
4.1. Deneysel Sonuçlar .....	61
4.1.1. 1500 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar.....	61
4.1.2. 1750 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar.....	68
4.1.3. 2000 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar.....	73
4.1.4. 2250 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar.....	79
4.1.5. 2500 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar.....	84
4.2. Yapay Sinir Ağları Modeli .....	90
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>98</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>105</b>



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

NO <sub>x</sub>	: Azot oksit
PM	: Partikül madde
HC	: Hidrokarbon
CO	: Karbonmonoksit
KMA	: Krank mili açısı
ÜÖN	: Üst ölü nokta
AÖN	: Alt ölü nokta
EGR	: Egzoz gaz resirkülasyonu
DPF	: Dizel partikül filtresi
SCR	: Seçici katalitik indirgeme
PB <sub>Ana</sub>	: Ana püskürtme başlangıcı, ÜÖN'dan önce (°KMA)
PB <sub>1.Ön</sub>	: 1. Ön püskürtme başlangıcı (ana püskürtme ile arasındaki fark)
PB <sub>2.Ön</sub>	: 2. Ön püskürtme başlangıcı (ana püskürtme ile arasındaki fark)
PB <sub>Art</sub>	: Art püskürtme başlangıcı (ana püskürtme ile arasındaki fark)
PS <sub>1.Ön</sub>	: 1. Ön püskürtme süresi (% toplam püskürtme süresi)
PS <sub>2.Ön</sub>	: 2. Ön püskürtme süresi (% toplam püskürtme süresi)
PS <sub>1Art</sub>	: Art püskürtme süresi (% toplam püskürtme süresi)
OMH	: Ortalama mutlak hata
OKH	: Ortalama karesel hata
KOKH	: Kök ortalama karesel hata
BSFC	: Fren özgül yakıt tüketimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çoklu püskürtmenin uygulanması .....	4
Şekil 2.1. Sıkıştırma ateşlemeli bir motorun yakıt jeti ve sıralı buhar bölgeleri .....	21
Şekil 2.2. Tutuşma gecikmesi süresi boyunca püskürtülen yakıt için HC oluşum mekanizması.....	25
Şekil 2.3. Yanma süresi boyunca püskürtülen yakıt için HC oluşum mekanizması.....	26
Şekil 2.4. Eski nesil sıkıştırma ateşlemeli motorlardaki yakıt sistemi.....	28
Şekil 2.5. Ortak hat yakıt püskürtme sistemi .....	29
Şekil 2.6. Selenoid enjektör .....	30
Şekil 2.7. Piezo kristalinin çalışma prensibi .....	31
Şekil 2.8. Piezo enjektör .....	31
Şekil 2.9. Bir sistemin veya sürecin genel modeli .....	33
Şekil 2.10. Sinir hücresi .....	37
Şekil 2.11. Yapay sinir hücresi .....	37
Şekil 2.12. Yapay sinir ağı.....	38
Şekil 2.13. Sigmoid ve tanh aktivasyon fonksiyonları .....	40
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik resmi .....	43
Şekil 3.2. FPGA tümleşik devre yapısı .....	46
Şekil 3.3. Compact RIO şasi .....	46
Şekil 3.4. Enjektör sürücü modülü.....	47
Şekil 3.5. AD combo analog giriş modülü.....	48
Şekil 3.6. Temokupl modülü.....	48
Şekil 3.7. Yakıt debisi ölçüm cihazı .....	49
Şekil 3.8. Enjektörlerin kontrolü için tasarlanan yazılım .....	50
Şekil 3.9. Verilerin okunması ve kaydedilmesi için tasarlanan yazılım .....	51
Şekil 4.1. 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu sonuçları.....	65
Şekil 4.2. 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları.....	66

<b>Şekil 4.3.</b> 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları .....	67
<b>Şekil 4.4.</b> 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları .....	67
<b>Şekil 4.5.</b> 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu sonuçları.....	71
<b>Şekil 4.6.</b> 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları.....	72
<b>Şekil 4.7.</b> 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları .....	72
<b>Şekil 4.8.</b> 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları .....	73
<b>Şekil 4.9.</b> 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu sonuçları.....	75
<b>Şekil 4.10.</b> 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları.....	77
<b>Şekil 4.11.</b> 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları .....	78
<b>Şekil 4.12.</b> 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları .....	78
<b>Şekil 4.13.</b> 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu sonuçları.....	82
<b>Şekil 4.14.</b> 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları.....	82
<b>Şekil 4.15.</b> 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları .....	83
<b>Şekil 4.16.</b> 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları .....	84
<b>Şekil 4.17.</b> 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu sonuçları.....	87

<b>Şekil 4.18.</b> 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları.....	87
<b>Şekil 4.19.</b> 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjistik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları .....	88
<b>Şekil 4.20.</b> 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları .....	89
<b>Şekil 4.21.</b> Ağırlıkların güncellenmesi sırasındaki hata oranı değişimi .....	91
<b>Şekil 4.22.</b> Fren özgül yakıt tüketimi için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri .....	92
<b>Şekil 4.23.</b> NO <sub>x</sub> emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri .....	92
<b>Şekil 4.24.</b> HC emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri.....	93
<b>Şekil 4.25.</b> CO emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri.....	93
<b>Şekil 4.26.</b> Farklı devir sayılarına göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu tarama verileri.....	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan motorun özellikleri .....	42
Çizelge 3.2. Egzoz emisyon cihazı ile ölçülen gazlar, ölçüm aralığı ve hassasiyeti .....	44
Çizelge 3.3. NO <sub>x</sub> sensörünün özellikleri.....	45
Çizelge 3.4. Yakıt debisi ölçüm cihazının özellikleri .....	49
Çizelge 3.5. Faktörler ve seviyeleri .....	53
Çizelge 3.6. L32 ortogonal dizisi.....	54
Çizelge 3.7. L16 ortogonal dizisi.....	55
Çizelge 3.8. Ölçümlerin doğruluğu ve hesaplanan değişkenlerin belirsizlikleri .....	60
Çizelge 4.1. Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (1500 dev/dk) .....	62
Çizelge 4.2. 1500 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	62
Çizelge 4.3. 1500 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	62
Çizelge 4.4. 1500 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları .....	64
Çizelge 4.5. Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (1750 dev/dk) .....	68
Çizelge 4.6. 1750 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	69
Çizelge 4.7. 1750 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	69
Çizelge 4.8. 1750 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları .....	70
Çizelge 4.9. Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2000 dev/dk) .....	74
Çizelge 4.10. 2000 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	74
Çizelge 4.11. 2000 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	74
Çizelge 4.12. 2000 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları .....	76
Çizelge 4.13. Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2250 dev/dk) .....	79
Çizelge 4.14. 2250 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	79

<b>Çizelge 4.15.</b> 2250 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	80
<b>Çizelge 4.16.</b> 2250 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları .....	81
<b>Çizelge 4.17.</b> Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2500 dev/dk) .....	85
<b>Çizelge 4.18.</b> 2500 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO <sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	85
<b>Çizelge 4.19.</b> 2500 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları.....	86
<b>Çizelge 4.20.</b> 2500 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları .....	86
<b>Çizelge 4.21.</b> Seçilen model parametreleri .....	90
<b>Çizelge 4.22.</b> Model doğruluğu testi sonuçları .....	94
<b>Çizelge 4.23.</b> Model tarama bölgesi için parametrelerin değişim aralığı .....	95
<b>Çizelge 4.24.</b> Kalibrasyon tablosu .....	97

## 1. GİRİŞ

Tüm canlılar varlığını devam ettirebilmek için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bu enerji ihtiyacı, insanoğlunun biyolojik gelişiminin yanı sıra günlük hayatını devam ettirebilmesi için de söz konusudur. Nüfusun hızla artması ve değişen-gelişen teknoloji ile daha rahat bir hayat sürme isteği beraberinde enerji ihtiyacının da artmasına neden olmaktadır. Gelişen teknoloji ile ortaya çıkan ürünlerin yanı sıra ısıtma, aydınlatma ve taşımacılık gibi sektörler için de aynı durum söz konusudur.

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğu halen fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil kökenli kaynaklardan olan petrolden; benzin, motorin, fuel oil, LPG vb. yakıtlarla beraber günlük hayatta kullandığımız bir çok ürün de elde edilmektedir. Ancak artan enerji talebine karşın mevcut kaynakların günden güne azalması, bu kaynakları daha etkin kullanma yollarının araştırılmasını zorunlu hale getirmektedir. Ayrıca kimyasal bileşimleri sebebiyle fosil yakıtların kullanımı insan sağlığını olumsuz etkilemekle birlikte sebep olduğu asit yağmurları ve sera etkisi nedeniyle de çevreye zarar vermektedir. Bu zararları nedeniyle petrol kullanımında büyük bir paya sahip olan ve taşımacılık sektörünün temel taşı olan içten yanmalı motorlar alanında bazı sınırlamalara gidilmiştir. Bu sebeple Avrupa Birliği tarafından motorlardan çevreye salınan gazlara sınırlama getirilerek zararlı emisyonların çevreye olan etkilerinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. İlk olarak 1992 yılında Euro standartları ile uygulamaya konulan bu sınır değerler gün geçtikçe daha da azaltılarak yeni standartlar belirlenmektedir. Euro 6 emisyon standardının yürürlüğe girmesinden sonra 2014 yılı Eylül ayından 2019 yılı Nisan ayına kadar ülkemizde trafiğe kayıtlı araç sayısı %23,59 artarak 23 008 927 adet olmuştur (Tük 2014; Tük 2019). Sadece ülkemizde yaklaşık 4,5 yılda bu kadar artan araç sayısının dünya çapındaki artışı düşünüldüğünde emisyon standart değerlerinin azaltılmasının gerekliliği/zorunluluğu açıkça görülmektedir. Böylelikle araç üreticileri ve araştırmacılar, hem mevcut kaynakları daha etkin kullanma

hem de çevreye salınan emisyonları daha da azaltma yollarını aramaya mecbur hale gelmiştir.

Bir içten yanmalı motor çeşidi olan ve benzin motorlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek tork ve daha az yakıt tüketimine sahip olan sıkıştırma ateşlemeli motorlar günümüzde otomobillerin yanı sıra otobüs, kamyon ve iş makinelerinde, deniz araçlarında, lokomotiflerde ve elektrik-güç üretiminde etkin bir rol oynamaktadır. Ancak gün geçtikçe daha da katılan emisyon standartları, benzin motorlarından daha fazla azot oksit ( $\text{NO}_x$ ) ve partikül madde (PM) emisyonuna sahip olan sıkıştırma ateşlemeli motorlar üzerindeki çalışmaların daha da yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

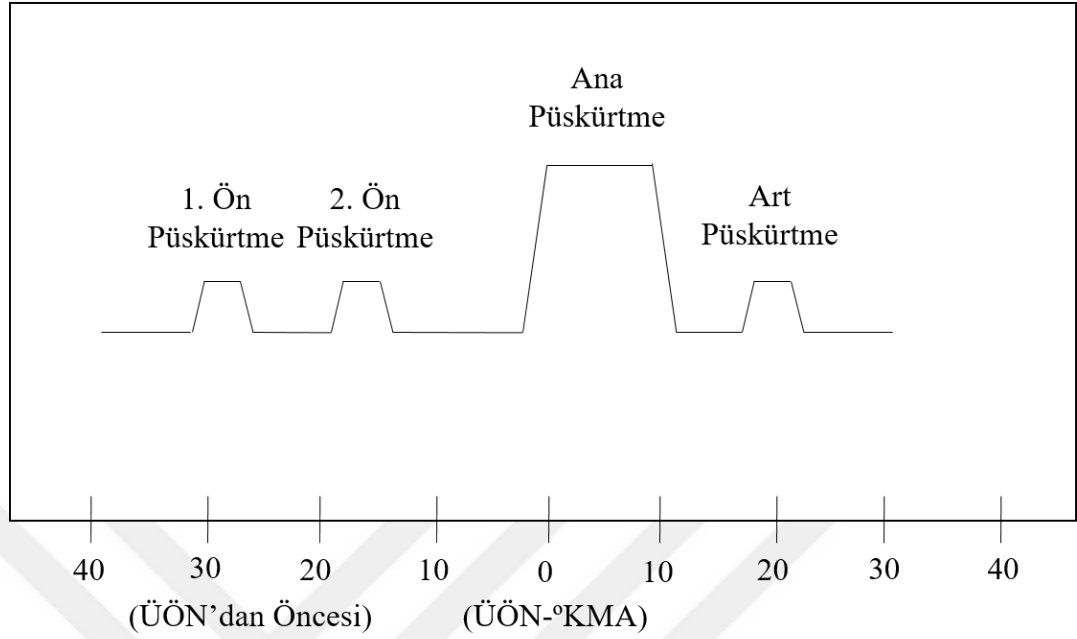
Havanın sıkıştırılarak, dolayısıyla basıncı ve sıcaklığı artırılarak üzerine yakıtın püskürtülmesi esası ile çalışan sıkıştırma ateşlemeli motorlarda emisyonların oluşumuna etki eden çok sayıda faktör vardır. Araştırmacılar bu faktörlerin belirlenmesi ve neden oldukları sonuçların üstesinden gelmek için çalışmalar yürütmüşlerdir. Aslında tek bir alana bağlı olmayan bu faktörler; makine, elektronik, bilgisayar, malzeme ve sensör teknolojisi gibi alanlardaki ilerlemelerle birlikte günümüzde kontrol edilebilir hale gelmiştir. Artık tüm bu teknolojik gelişmeler sayesinde emisyonlara gerek silindir içinde gerekse silindir dışında müdahale edilebilmekte ve bu sayede hali hazırdaki emisyon standartları karşılanabilmektedir. Emisyonlara oluştukları yerde yani silindir içinde müdahale etmenin, silindir dışı emisyon azaltma uygulamalarından (dizel partikül filtresi (DPF) ya da seçici katalitik indirgeme (SCR) gibi son işlem uygulamalarından) daha doğru olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Mohan *et al.* 2013).

Çalışma prensibi gereği harici bir ateşleme sistemine ihtiyaç duymayan sıkıştırma ateşlemeli motorlarda silindir içindeki yanmanın durumunu ve dolayısıyla emisyon oluşumunu doğrudan etkileyen sistem, yakıt püskürtme sistemidir. Eski nesil motorlarda kullanılan mekanik yakıt püskürtme sistemlerinin yakıtı her çevrimde yeniden basınçlandırarak doğru zamanda silindir içerisine gönderme işlevi, günümüzde artık elektronik yakıt püskürtme sistemleri ile daha iyi bir şekilde sağlanabilmektedir. Silindir



içerisine gönderilen yakıtın atomize olmasının, yani hava ile daha iyi karışmasının, ve dolayısıyla yanmanın başlaması için geçen sürenin püskürtme basıncı ile ilgili olduğu ve bu durumun emisyonlar üzerindeki etkisi yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Celikten 2003; Pan *et al.* 2013; Yin *et al.* 2016). Bu püskürtme basıncı değeri eski nesil sıkıştırma ateşlemeli motorlarda 100-300 bar seviyelerinde iken elektronik yakıt püskürtme sistemlerine sahip yeni nesil motorlarda 2750 bar basınca kadar çıkabilmektedir. Artık yeni nesil motorların en önemli parçası haline gelen ve içerisinde sürekli olarak yüksek basınçlı yakıtın bulunduğu ortak hattın (common rail) ve enjektörün kontrol edilmesi ile doğru zamanda ve yüksek basınçta yakıt silindir içerisine gönderilebilmektedir.

Enjektör teknolojisindeki ve elektronik kontrol sistemlerindeki gelişmeler sayesinde sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanılan mekanik enjektörler, günümüzde yerini sırasıyla selenoid ve piezo enjektörelere bırakmıştır ve bu sayede enjektörler elektronik kontrollü bir hale gelmiştir. Enjektörlerin bu şekilde kontrol edilebilir hale gelmesi, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanmayı/emisyonları etkileyen ve ilk yanma safhası olan tutuşma gecikmesini azaltma çalışmalarını hızlandırmıştır. Bu konuda püskürtme zamanının ya da birim zamanda püskürtülen yakıt miktarının değiştirilmesinin (yani püskürtme oranının şekillendirilmesinin) (Funai *et al.* 1996; Benajes *et al.* 2005; Koch *et al.* 2006) yanı sıra bir çevrimde püskürtülmesi gereken toplam yakıtın parçalara ayrılarak silindire gönderildiği (çevrim başına birden fazla püskürtmenin uygulandığı) çoklu püskürtme çalışmaları da mevcuttur. Yakıtın büyük bir kısmının püskürtüldüğü (torkun-gücün üretildiği) püskürtme ana püskürtmedir. Ana püskürtmeden önce püskürtülen yakıt ön püskürtme olarak adlandırılır. Ana püskürtmeden sonra yapılan püskürtmeye ise art püskürtme denir. Çoklu püskürtme uygulamalarında gerçekleştirilen tüm püskürtmeler Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** Çoklu püskürtmenin uygulanması

Uygulanan çoklu püskürtme uygulanan Çoklu püskürtme çalışmalarında önce her çevrimde püskürtülmesi gereken toplam yakıt ön ve ana ya da ana ve art püskürtme olarak 2 parçaya ayrılmış daha sonra ise ön, ana ve art püskürtme olarak 3 parçaya ayrılarak püskürtme açılarının ve miktarlarının değiştirilmesinin motor performans ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Ayrıca ön püskürtmenin kendi içinde daha küçük parçalara (2 ya da 3 tane ön püskürtme yapılması gibi) ayrıldığı çalışmalar da yapılmış ve bu şekilde her çevrimde 4 püskürtmenin gerçekleştirildiği (1. ön, 2. ön, ana ve art püskürtme olan) stratejinin 3 püskürtmeli (ön, ana ve art püskürtmeli) stratejiye göre performans ve emisyonlar açısından genel anlamda daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Biswas *et al.* 2016). Bu konuda yapılan çalışmaların genelinde, ön püskürtme ile püskürtülen yakıtın yanmasının silindir içi sıcaklığı artırdığına ve bu durumun da ana püskürtmenin tutuşma gecikmesini azalttığına vurgu yapılmıştır. Tüm bunların sonucu olarak, tutuşma gecikmesinin azalmasından dolayı silindir içerisinde biriken yanmamış yakıt miktarının az olduğu, dolayısıyla yanma başladığında ani basıç artışında bir miktar azalma olduğu belirtilmiştir. Bu durumun da  $\text{NO}_x$  emisyonunu azalttığı ifade edilmiştir. Art püskürtme ile de özellikle genişleme zamanında meydana gelen duman, is ya da

partikül maddenin oksidasyon hızının artırılarak bu emisyonların azaltıldığına vurgu yapılmıştır.

Hem püskürtme zamanının hem de her püskürtmedeki yakıt miktarının değiştirilebilmesiyle bir püskürtme stratejisinin belirlendiği çoklu püskürtme çalışmalarının püskürtme zamanı ve püskürtme hızının şekillendirilmesi çalışmalarını kapsadığı da söylenebilir. Bu nedenle sıkıştırma ateşlemeli motorların en büyük dezavantajları arasında sayılan yüksek  $\text{NO}_x$  ve PM emisyonlarının birlikte azaltılabilmesine yönelik yapılan bu tür çalışmalar arasında en iyi sonucu çoklu püskürtme stratejisinin verdiği literatürde belirtilmiştir (Mohan *et al.* 2013).

İçten yanmalı motorlar üzerinde yapılan çalışmalar sadece emisyon karakteristiklerinin değil aynı zamanda motor performans karakteristiklerinin de iyileştirilmesini hedef alır. Bu sebeple çoklu püskürtme stratejisinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda da tork ya da fren özgül yakıt tüketimi gibi motor performans karakteristikleri de dikkate alınmaktadır. Ancak katılaşan emisyon standartları sebebiyle emisyonların azaltılması daha önemli bir parametre olduğundan bu konudaki çalışmalar genel olarak motor performansından ödün verilmeden egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çoklu püskürtme stratejisinin motor performans ve egzoz emisyon karakteristiklerine olan etkisinin incelendiği çalışmaların özeti aşağıda sunulmuştur.

Ön ve ana püskürtmenin uygulandığı ve püskürtme açılarının değiştirildiği aşağıdaki çalışmalar, ön püskürtmenin özellikle  $\text{NO}_x$  emisyonlarını azaltmada çok etkili olduğunu göstermektedir. Ön karışımli yanma safhasının ve  $\text{NO}_x$  emisyonunun azaltılması için tutuşma gecikmesinin azaltılması gerektiğini belirten Shundoh *et al.* (1992) bu amaçla ısı yalıtımı, kızdırma bujisi desteği, değişen sıkıştırma oranı ve ön püskürtmenin  $\text{NO}_x$  emisyonu, tutuşma gecikmesi ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak yüksek püskürtme basıncı ve ön püskürtmenin birlikte gerçekleştirilmesiyle yakıt ekonomisinde bir kötüleşme meydana gelmeden  $\text{NO}_x$  emisyonunun %35 duman yoğunluğunun ise %60-80 oranında azaldığını söylemişlerdir.

Jeong *et al.* (2014) tek silindirli bir motorda ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki sürenin yanma karakteristikleri ve emisyonlara (NO<sub>x</sub>, CO, THC ve duman) olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca aynı püskürtme stratejilerinde dizel yakıt ile dimetil eter (DME) kullanımının sonuçlarını kıyaslayarak yakıt türünün yanma karakteristiklerine ve emisyonlara etkisini göstermişlerdir. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alındığında (yakıt karakteristiklerinin farklılığından dolayı) deneyler için 2 yakıt püskürtme sistemi uygulamışlardır. Deneylerini hem ana püskürtme hem de ön püskürtme zamanını değiştirerek gerçekleştiren araştırmacılar, elde ettikleri sonuçlara göre NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmada ön püskürtmenin rolünün düşük olduğunu fakat ana yanma fazının geciktirilmesinin bu emisyonu azaltmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Aynı püskürtme stratejisinde DME kullanımında (dizel yakıta kıyasla) daha fazla NO<sub>x</sub> emisyonu açığa çıktığını, ancak ana yanma fazını geciktirmesinden dolayı bu yakıtta ön püskürtme uygulamanın NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca CO ve THC emisyonlarının dizel yakıtta püskürtme stratejileri ile önemli ölçüde değiştiğini görmüşlerdir. Dizel yakıtta ön ve ana püskürtmede tek püskürtmeden daha fazla PM emisyonu görmelerine rağmen DME’de püskürtme stratejilerine bakılmaksızın daha az PM emisyonuna rastlamışlardır.

Fang and Chia-fon (2009) tek silindirli ve yanma odası görülebilir bir direkt püskürtmeli dizel motor üzerinde düşük sülfürlü dizel ile biyodizel yakıt kullanarak çoklu püskürtme stratejileri ile yanma olayını incelemişlerdir. Deneylerinde ön püskürtmedeki yakıt miktarını sabit tutarken ön ve ana püskürtme açılarını değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre biyodizel yakıt kullanımında ön ve ana püskürtme arasında geçen sürenin azalması NO<sub>x</sub> emisyonunu artırıcı bir etki oluşturmuştur. Ancak ana püskürtmenin geciktirildiği durumlarda ise dizel yakıtın sonuçları ile karşılaştırıldığında biyodizelin, yaklaşık %34 daha az NO<sub>x</sub> emisyonuna sahip olduğunu görmüşlerdir. İS ve NO<sub>x</sub> emisyonunu birlikte azaltmak için ön ve ana püskürtme arasındaki sürenin uzun olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca benzer yük koşullarında farklı yakıtlar için uygulanan bir çoklu püskürtme stratejisinin, emisyonların davranışını değiştirebildiğini belirtmişlerdir.

Özkan *et al.* (2013) 1.8 lt'lik Ford marka bir motor üzerinde 2000 dev/dk motor hızında ve %50 yük koşulunda yürüttükleri çalışmada 3 farklı püskürtme stratejisi uygulamışlardır. Birinci stratejide tek püskürtme gerçekleştirmişler ve bu durumu referans olarak kabul etmişlerdir. Diğer stratejilerde ise NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmak için bir ön püskürtme uygulamışlardır. Referans olarak kabul ettikleri tek püskürtmeyi ve diğer stratejilerdeki ana püskürtmeyi ÜÖN'dan 10° KMA önce gerçekleştirmişlerdir. Ön püskürtmeyi ise 2. stratejide ÜÖN'dan 20° KMA önce ve 3. stratejide de 25° KMA önce yapmışlardır. Yürüttükleri çalışmada ön püskürtme olarak çevrimdeki toplam yakıt miktarının kütlece %6'sını püskürtmüşlerdir. Sonuç olarak tek püskürtmeli referans durumla kıyaslandığında, NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma görmelerine karşın diğer emisyonlarda (CO, THC ve is) artış gözlemlenmiştir. Araştırmacılar bu durumun yanma sıcaklığındaki azalmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında termodinamiğin 2. kanun analizini de gerçekleştirmişlerdir. Bu analize göre termal ve ekserjitik verimin ön püskürtmenin erkene alınmasıyla küçük bir miktar azaldığını görmüşlerdir. Bu durumun ise fren gücündeki azalmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Park *et al.* (2016) tarafından çoklu püskürtme stratejisinin yanma ve emisyon karakteristiklerine etkisini incelemek için hem deneysel hem de sayısal bir çalışma yürütülmüştür. İki strateji uyguladıkları çalışmalarında, birinci stratejide püskürtmeler arası mesafeyi sabit tutarak püskürtme zamanlarını birlikte değiştirmişlerdir. İkinci strateji olarak da ikinci püskürtme zamanını ÜÖN'ya sabitleyerek ilk püskürtmenin zamanını değiştirmişlerdir. Bu stratejilerin sprej davranışları bir sprej görüntüleme sistemi ile analiz edilmiştir. Sayısal çalışmalarında kullandıkları kodları deneysel verilerle doğruladıktan sonra çoklu püskürtme stratejilerinin yanma ve emisyon karakteristiklerini hem hesaplamışlar hem de analiz etmişlerdir. Çoklu püskürtme için yanmanın, kısmen yanma odasında merkezlenmiş yüksek sıcaklık bölgeleri ve kısa püskürtme aralıklarının bir sonucu olarak tek seferde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Uyguladıkları ikinci stratejinin NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltmada daha etkili olduğunu görmelerine rağmen birinci stratejiye göre daha fazla is emisyonuna sahip olduğunu da ifade etmişlerdir.

Her çevrimde üç püskürtme gerçekleştirmenin (1. ön, 2. ön ve ana püskürtme ya da ön, ana ve art püskürtme) uygulandığı aşağıdaki çalışmalar, ön ve art püskürtmenin (püskürtme açılarının) ses, NO<sub>x</sub> ve is emisyonları üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Vanegas *et al.* (2008) sırayla önce tek püskürtme sonra ön ve ana püskürtme daha sonra ise ön, ana ve art püskürtme stratejilerini uyguladıkları çalışmalarında hem bir çevrimdeki püskürtme sayısının hem de bu püskürtmeler arasında geçen sürenin emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre tek püskürtme ile kıyaslandığında ön püskürtmenin NO<sub>x</sub> emisyonunu önemli ölçüde azalttığını ancak duman emisyonunu artırdığını ifade etmişlerdir. İki püskürtmenin gerçekleştirildiği strateji ile kıyaslandığında erken bir art püskürtmenin duman emisyonunu azalttığını, bununla beraber NO<sub>x</sub> emisyonunu bir miktar daha azalttığını belirtmişlerdir. Ancak bu stratejinin HC ve CO emisyonlarında neredeyse hiçbir değişikliğe neden olmadığını ifade etmişlerdir.

Tow *et al.* (1994) tek silindirli bir dizel motor üzerinde 1600 dev/dk motor hızında ve iki farklı yük koşulunda (%25 ve %75) her çevrimde bir, iki ve üç püskürtme uyguladıkları ve püskürtme oranını şekillendirdikleri farklı stratejiler ile NO<sub>x</sub> ve partikül emisyonlarının eş zamanlı olarak azaltılmasına yönelik bir çalışma yürütmüşlerdir. NO<sub>x</sub> emisyonunun püskürtme zamanı, ön püskürtmedeki yakıt miktarı ve ön püskürtme hızı ile ilişkili olduğunu görmüşlerdir. İkili ve üçlü püskürtme stratejilerinde, püskürtme zamanının geciktirilmesiyle (partikül emisyonu artırılmadan) NO<sub>x</sub> emisyonun azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, özellikle düşük yüklerde, 3 püskürtme uygulamanın emisyonları azaltmada daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Badami *et al.* (2002) tarafından yapılan çalışmada ise 2 tane ön püskürtmeden sonra gerçekleştirilen ana püskürtme (ön1, ön2 ve ana püskürtme) stratejisi ile ve ön, ana ve art püskürtme stratejisinin fren özgül yakıt tüketimi, egzoz ve ses emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha öncesinde yürüttükleri bir çalışmadaki 2 püskürtmeli stratejiye kıyasla, bu çalışmalarındaki 2 tane ön ve ana püskürtme stratejisinin yanma sesini ve yakıt tüketimini azalttığını fakat daha yüksek bir emisyon seviyesiyle

karşılaştıklarını belirtmişlerdir. Ön, ana ve art püskürtme stratejisinin ise zamanlamanın doğru seçilmesiyle is emisyonunu azaltmada çok etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Her çevrimde dört püskürtme (1. ön (erken), 2. ön, ana ve art püskürtme stratejisinin) gerçekleştirmenin şuan ki en çok tercih edilen strateji olduğunu ifade eden Biswas *et al.* (2016), 6 silindirli sıra tipi bir CRDI dizel motor üzerinde sabit EGR oranında emisyon seviyelerinden ödün vermeden motor performansının (özellikle fren özgül yakıt tüketiminin) iyileştirilmesi amacıyla yaptıkları çalışmalarında, motorun orijinal çalışma stratejisi olan ön, ana ve art püskürtme stratejisi ile bu stratejiye bir ön püskürtme daha ekledikleri 1. ön (erken), 2. ön, ana ve art püskürtme stratejisini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında eklenen yeni ön püskürtme (yani erken-1. ön püskürtme) ile motorun orijinal 3 püskürtmeli stratejisindeki ön püskürtme (yani yeni stratejideki 2. ön püskürtme) arasındaki açığı yaklaşık olarak 7,99° KMA olacak şekilde sabit tutmuşlardır. Araştırmacılar çalışmalarını deney tasarımı yaklaşımı kullanarak farklı yük ve devir sayılarında gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak; çevrim başına 4 püskürtme yapılan stratejinin (bazı çalışma koşulları hariç) emisyon ve fren özgül yakıt tüketimi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Ayrıca hemen hemen tüm deneylerde elde edilen tork değerlerinin daha yüksek olduğunu, doğal olarak elde edilen gücün de daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Aşağıdaki çalışmalar ön ve art püskürtme açılarının yanı sıra bu püskürtmelerde gerçekleştirilen yakıt miktarlarının da performans ve emisyonlar üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Günden güne daha katı hale gelen yakıt tüketimi ve emisyon mevzuatlarının geleneksel mekanik yakıt sistemleri ile karşılanamadığını belirten He *et al.* (2013), dizel motorların emisyon ve yanma performansını iyileştirmek için yakıt püskürtme stratejisinin optimize edilmesinin son yıllarda önemli bir konu olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar deneylerle doğruladıkları bir model kullanarak ön püskürtme zamanı ve miktarı ile ana püskürtme zamanının yanma sesi ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarını 3 aşamada yürütmüşler ve ilk aşamada ön püskürtmedeki yakıt miktarı ile ana püskürtme zamanını sabit tutup ön

püskürtme zamanını değiştirmişlerdir. Çalışmalarının 2. aşamasında ön ve ana püskürtme zamanını sabit tutup ön püskürtmedeki yakıt miktarını artırmışlardır. Son aşamada ise ön püskürtme miktarı ve zamanını sabit tutup ana püskürtme zamanını geciktirmişlerdir. Elde ettikleri sonuç ve yaptıkları analizlere göre ön püskürtmenin açık bir şekilde silindir içi sesi azalttığını ve emisyon performansını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Ön püskürtme ile ana püskürtme arasında geçen sürenin en az olduğu durumda (tek püskürtme yapılan durumuna göre) is emisyonunun azaldığını ifade etmişlerdir. Ancak  $\text{NO}_x$  ve yanma sesinin en düşük değerinin bu durumda olmadığını görmüşlerdir. Ön püskürtme miktarının küçük değerlerinin ses ve  $\text{NO}_x$  emisyonuna çok etki etmediğini ifade etmişler, ancak yakıt miktarını %10'a çıkardıklarında  $\text{NO}_x$  emisyonunun büyük ölçüde arttığını görmüşlerdir. Artan ön püskürtme miktarıyla duman emisyonunun artış eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Ana püskürtmenin geciktirildiği durumda da silindir içi sıcaklığın 1800 K altında kaldığını ve buna bağlı olarak da  $\text{NO}_x$  emisyonunun azaldığını ifade etmişlerdir.

Zhuang *et al.* (2014) kömürü direkt sıvılaştırarak elde ettikleri dizel yakıtı kullanarak tek, ön ve ana, ana ve art püskürtme stratejilerini performans ve egzoz emisyonları açısından incelemişlerdir. 2 püskürtme uyguladıkları deneylerde ön ve art püskürtme zamanıyla birlikte yakıt miktarını da değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ana püskürtmenin geciktirilmesiyle  $\text{NO}_x$  emisyonunun azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca ön ve art püskürtmenin  $\text{NO}_x$  ve is emisyonunu daha da azalttığını belirtmişlerdir. Bu emisyonların minimum olduğu belirli bir art püskürtme zamanı ve miktarı olduğunu, fakat bu durumun da HC ve CO emisyonlarında hafif bir artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Thurnheer *et al.* (2011) ön ve art püskürtmenin zamanını ve yakıt miktarını değiştirdikleri ağır hizmet dizel motor üzerinde tek, ön ve ana, ana ve art püskürtme stratejilerini emisyon ve kayıp analizi yaparak incelemişlerdir. Çalışmalarının neticesinde ön püskürtmenin miktarının az olduğu durumlarda  $\text{NO}_x$  emisyonunun arttığını buna karşın hem is kütlesinin hem de partikül sayısının azaldığını görmüşlerdir. Art püskürtme



uyguladıklarında ise ön püskürtmede gördükleri bu etkinin tam tersi bir durumla karşılaşmışlardır.

Chen (2000) 1.2 lt'lik bir Ford motoru üzerindeki çalışmasını ön ve ana, ana ve art ile ön, ana ve art olacak şekilde 3 farklı püskürtme stratejisinde gerçekleştirmiştir. Deneylerinde ön ve art püskürtmelerin ana püskürtme ile arasında (KMA cinsinden) geçen süreyi değiştirmiş ve deneylerini farklı EGR oranlarında yapmıştır. EGR oranının, ana ve ön püskürtme zamanlarının, ön püskürtme miktarının ve ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki sürenin optimize edilmediğinde NO<sub>x</sub> ile partikül emisyonlarının eş zamanlı olarak azaltılamayacağını belirtmiştir. Sonuç olarak ön püskürtme ile ana püskürtme arasındaki sürenin artmasıyla NO<sub>x</sub> emisyonunun azaldığını ancak bu farkın 30° KMA olduğunda ise en yüksek duman miktarının ortaya çıktığını söylemiştir. Ayrıca ön püskürtmedeki yakıt miktarını azaltmanın NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmada önemli bir etkisi olduğunu belirtmiş, küçük dizel motorlar için bu miktarın mümkün olduğunca az (1.0 mg/strok'tan az) olması gerektiğini ifade etmiştir. Art püskürtmenin partikül madde miktarını azaltmada çok etkili bir yöntem olduğunu belirtmiş ve çoklu püskürtme stratejisinin düşük yüklerden çok orta yüklerde daha etkili olduğunu gözlemlemiştir.

Çoklu yakıt püskürtme stratejisinin etkilerinin incelendiği aşağıdaki çalışmalarda, nümerik-simülasyon uygulamalarından ve deney tasarımı metodlarından yararlanılmıştır. Bazı çalışmalarda ise çoklu yakıt püskürtme stratejisinin hava-yakıt karışımına olan etkisi ve EGR ile birlikte çoklu püskürtme uygulanmasının etkisi incelenmiştir. Jeon and Park (2015) çalışmalarında yanma odası gözlemlenebilir bir dizel motorda ön püskürtme stratejisinin alev sıcaklığı ve is dağılımı üzerindeki etkisini incelemek için hem deneysel hem de nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Yanma odasından çektikleri görüntüleri, (ThermoVision programı yardımıyla) is dağılımını ve alev sıcaklığını tahmin etmede kullanmışlardır. Bu nümerik sonuçlarla fiziksel deneylerden elde edilemeyen bilgileri almışlardır. Deneylerinde diğer parametreleri sabit tutarken ön püskürtme zamanı ve miktarını değiştirmişlerdir. Deney sonuçları ön püskürtmedeki artan yakıt miktarıyla alev sıcaklığının düştüğünü göstermiştir. Ön püskürtmenin ana püskürtmeye

yaklaştırılmasıyla yanma performansının ve yakıt ekonomisinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca ön yanmanın biyodizel için ana spreyin gelişmesine katkıda bulunduğunu ve silindir içindeki homojenliği artırdığını ifade etmişlerdir. İyileşen hava-yakıt karışımı sayesinde lokal olarak yakıtça zengin bölgelerin azaldığını ve toplam alev sıcaklığının düştüğünü ifade etmişlerdir. Ön püskürtmenin sebep olduğu homojen yanmanın is oluşumunu da önlediğini belirtmişler ve ön püskürtmenin ÜÖN'dan 40° KMA önce püskürtülmesi durumunda artan homojen yanma sayesinde daha düşük NO<sub>x</sub> emisyonuna sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca dizel yakıt ile karşılaştırıldığında biyodizelin daha yüksek alev sıcaklığına ve daha düşük is konsantrasyonuna sahip olduğunu görmüşlerdir.

Dimitriou *et al.* (2015) direkt püskürtmeli dizel motorların yanma kalitesi ve tutuşmanın kontrolü için hava-yakıt karışımı kalitesinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yürüttükleri çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla emisyonların oluşumunda bu karışımın kalitesinin etkisini araştırmışlar ve karışımın davranışını anlamak için yeni bir nicel faktör olan homojenlik faktörünü (HF) kullanmışlardır. Homojenlik faktörünün püskürtme sayısından, zamanından ve iki püskürtme arasında geçen süreden büyük ölçüde etkilendiğini görmüşlerdir. Ayrıca homojenlik faktörünün tek başına emisyon oluşumunu yansıtmak için yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Fakat homojenlik faktörü büyüdükçe NO<sub>x</sub> emisyonun arttığını ve is oluşumunun daha da azaldığını görmüşlerdir. Püskürtmenin parçalara ayrılmasıyla lokal olarak hava-yakıt karışımı iyileştirebilse de ikinci püskürtmenin homojenlik seviyesini azalttığını ifade etmişlerdir. Bu durumun da NO<sub>x</sub> emisyonunda azalmaya, is oluşumunda ise hızlı bir artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca iki püskürtme arasındaki sürenin az olmasının homojenlik faktörünü azalttığını ve bunun da NO<sub>x</sub> emisyonunu artırıp is oluşumunu azalttığını görmüşlerdir.

Zheng and Kumar (2009) hem NO<sub>x</sub> hem de is emisyonunun birlikte azaltılması için homojen fakir karışımın oluşmasının önemli olduğunu ve bu karışımın düşük yüklerde çoklu püskürtme stratejisi ile, yüksek yüklerde ise çoklu püskürtme stratejisine EGR

oranının eklenmesi ile elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla çalışmalarında 8 püskürtme sinyaline kadar varan çoklu püskürtme stratejilerini düşük ve orta yük koşullarında incelemişlerdir. İS ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının eş zamanlı azaltılması amacıyla düşük yüklerde çoklu püskürtme stratejisinin homojenliğe yakın bir karışım oluşturduğunu ve bu sebeple bir EGR miktarına gerek kalmadığını, ancak daha yüksek yüklerde ise EGR'ye ihtiyaç olduğunu görmüşlerdir. Deneylerinde uyguladıkları ilk stratejilerde HC ve CO emisyonlarının yüksek olduğunu görmüşler ve bu sebeple püskürtme zamanlarını ÜÖN'ya yaklaştırarak stratejilerini değiştirmişlerdir. Bu sayede İS, NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarının eş zamanlı olarak düşük seviyelerde tutulabileceğini göstermişlerdir.

Xu *et al.* (2019) Jatrofa biyodizel-dizel karışımı kullandıkları dizel bir motorda performans ve emisyonları dikkate alarak optimum motor yükü, yakıt püskürtme basıncı, püskürtme başlangıç zamanı ile ön ve ana püskürtme arasındaki mesafeyi belirlemek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Deney tasarımında ve test sonuçlarının analizinde 4 faktörlü 3 seviyeli tam kesirli tasarım ve yanıt yüzeyi metodu kullanmışlardır. Yanıt yüzeyi metodu kullanılarak geliştirilen tüm modellerin; fren özgül yakıt tüketimi, fren termal verimi, NO<sub>x</sub>, İS, HC ve CO emisyonu gibi ölçülen değerler için istatistiksel olarak anlamlı olduğunu varyans analizi ile belirlemişlerdir. Faktörlerin etkileşimlerini, çoklu regresyon modelleriyle uyarlanan 3 boyutlu yanıt yüzeyi grafikleri yardımıyla incelemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında maksimum fren termal verimi, minimum emisyon ve fren özgül yakıt tüketimi için çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri optimum çözümü bir doğrulama testi ile teyit etmişler ve sonuçlara göre geliştirdikleri modellerin %6 hata ile kabul edilebilir olduğunu ifade etmişlerdir.

d'Ambrosio and Ferrari (2015) 2 tane ön ve ardından ana püskürtme uyguladıkları stratejinin emisyon, fren özgül yakıt tüketimi ve yanma sesi üzerindeki etkisini farklı çalışma koşullarında incelemişlerdir. Ayrıca uygulanan strateji ile deney sonuçları arasındaki sebep-sonuç ilişkisi hakkında daha detaylı bilgi edinebilmek amacıyla silindir içi basınç değerini, ısı salınım hızını, sıcaklık ve emisyon sonuçlarını kullanmışlardır.

Uyguladıkları stratejiyi bir deney tasarımı yöntemiyle optimize etmişlerdir. Elde ettikleri motor performans ve emisyon verilerini (ana püskürtmesi geciktirilmiş orijinal durumdaki) ön ve ana püskürtme stratejisi ile karşılaştırmışlardır. Yeni uygulanan bu 3 püskürtmeli stratejide (ön1-ön2 ve ana püskürtme stratejisinde), hafif yük ve düşük motor hızlarında ortalama yanma basıncında artış, ısı salınım hızı, tutuşma gecikmesi ve fren özgül yakıt tüketiminde ise azalma görmüşlerdir. Özellikle bu stratejide CO ve HC emisyonları ile birlikte yanma olayında önemli bir iyileşme olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yürüttükleri çalışmada yüksek EGR oranıyla da NO<sub>x</sub> emisyonunu sınırlanmışlardır. Orta motor yükleri ve hızlarında ise uygulanan çift ön püskürtme stratejisi, orijinal stratejiye kıyasla NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmıştır. Ancak bu durumda yanma gürültüsünde bir iyileşme olmadığı gibi is emisyonunun da kötüleştiğini görmüşlerdir.

Wang *et al.* (2007) çoklu püskürtme stratejilerinin NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmadaki potansiyelini incelemek için yürüttükleri nümerik çalışmada klasik tek yakıt püskürtme stratejisi ile 3 ve 5 parçaya bölünmüş püskürtme stratejilerini kıyaslamışlardır. Ayrıca farklı EGR oranlarını da bu stratejilere ekleyerek çalışmalarını genişletmişlerdir. Çoklu püskürtme stratejisinin diğer NO<sub>x</sub> azaltıcı tekniklerle birlikte kullanılması durumunda katı emisyon standartlarının karşılanmasında umut verici bir yöntem olduğunu söylemişlerdir. EGR kullanılmadığı durumda en düşük NO<sub>x</sub> seviyesini 5 parçaya bölünmüş püskürtme stratejisinde elde etmişlerdir. EGR kullanıldığında ise 3 ve 5 parçaya bölünmüş püskürtme stratejisinin NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmadaki etkisinin aynı olduğunu görmüşlerdir. Ancak hem EGR hem de çoklu püskürtme stratejisinin birlikte kullanılmasının daha düşük güce ve daha yüksek artık yakıtı sebep olduğunu belirtmişlerdir. Fakat EGR oranının, her püskürtmedeki yakıt miktarının ve püskürtme zamanının (püskürtme başlangıç zamanı ve süresinin) dikkatli bir şekilde seçilmesiyle bu olumsuz durumların giderilebileceğini ve düşük emisyon, yüksek performans ve iyi bir yakıt ekonomisi arasında mükemmel bir denge kurulabileceğini ifade etmişlerdir.

Xiao *et al.* (2014) EGR oranının, ön püskürtme miktarının ve ana püskürtme zamanının emisyonlar ve yakıt tüketimi ile yakından ilişkili olduğunu belirtmişler ve bu parametrelerin NO<sub>x</sub>, ve is emisyonları ile indike özgül yakıt tüketimi üzerine etkilerini Taguchi metodu kullanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla simülasyon yaparak incelemişlerdir. Ayrıca elde ettikleri sonuçların varyans analizini de gerçekleştirerek parametrelerin çıktıları etkileyip etkilemediğini gözlemlemişlerdir. Oluşturdukları modeli, faktörlerin ve seviyelerinin en iyi kombinasyonunda deney yaparak doğrulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre NO<sub>x</sub> emisyonunu en çok etkileyen faktörün EGR, indike özgül yakıt tüketimi ve is emisyonunu etkileyen en büyük faktörün ise ana püskürtme zamanı olduğunu görmüşlerdir. Ön püskürtme miktarının tüm sonuçlar üzerinde önemsiz bir faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmada sinyal gürültü (S/N) oranına göre bir optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Optimum seviyelerden elde edilen sonuçlarla orijinal motorun sonuçlarını karşılaştırdıklarında NO<sub>x</sub> emisyonunda en az %70, is emisyonunda %20 ve indike özgül yakıt tüketiminde ise %1 azalma olduğunu belirlemişlerdir.

Hadadpour *et al.* (2019) 2 parçaya bölünmüş püskürtme stratejisinin emisyon oluşumu ve dizel spreyin yanması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Emisyonları azaltan ve karışım kalitesini iyileştiren temel kontrol mekanizmaları belirlemek için büyük girdap simülasyonu kullanmışlardır. Ayrıca püskürtmelerin arasındaki etkileşimi de incelemek istemişler ve birinci püskürtmenin ikinci püskürtmeyi (karışımını ve yanmasını) nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bölünmüş püskürtmenin, is oluşumuna neden olan yakıtça zengin bölgelerin miktarını azalmada etkili olduğunu görmüşlerdir. İkinci püskürtmenin yayılmasının ilkinden daha hızlı olduğunu ve tutuşma gecikmesinin de çok daha kısa olduğunu görmüşlerdir. Bu durumun birinci püskürtmenin yanmasının (yerel sıcaklıkları artırması gibi) artı kalan etkilerinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Meloni and Naso (2013) Caterpillar ağır hizmet dizel motorunda çoklu püskürtme stratejisinin emisyonlar üzerinde etkisini araştırmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve büyük girdap simülasyonu yardımı ile ileri bir nümerik çalışma yürütmüşlerdir.

Yapılan tüm simülasyonlarda, açılarını ve miktarlarını sabit tuttıkları 2 tane ön püskürtme ile ana ve art püskürtme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının birinci kısmında ana püskürtmeyi 2 eş parçaya bölmüşler, ikinci kısmında ise ana püskürtmeyi 3 parçaya bölmüşlerdir. Çalışmalarının devamında parçalara bölünen ana püskürtme ile art püskürtmenin yakıt oranını ve ana püskürtme ile art püskürtme arasında geçen süreyi değiştirmişlerdir. Simülasyonunu gerçekleştirdikleri tüm bu stratejileri EGR oranı %10 ve %20 olacak şekilde uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre ana püskürtmenin iki ya da üçe bölünmesi farketmeksizin ana püskürtmede toplam %65-70 oranında yakıt püskürtülmesi durumunda kirletici emisyonların en düşük seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirilen tek püskürtme durumu ile karşılaştırıldığında ana püskürtmenin 3 parçaya ayrıldığındaki en iyi durumun, emisyonları eş zamanlı olarak azalttığını ve sırasıyla NO<sub>x</sub> emisyonunda %30 is emisyonunda ise %71 azalma gördüklerini ifade etmişlerdir.

Mobasheri *et al.* (2012) ağır hizmet sınıfı direkt püskürtmeli bir dizel motorda çoklu püskürtme stratejisinin ve EGR oranının performans ve emisyon oluşumuna etkisini ileri bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonu yaparak incelemişlerdir. Oluşturdukları yanma modelini deneysel verilerle doğrulamışlar ve çalışmalarında önce ön püskürtmesiz bölünmüş püskürtme durumları için daha sonra da çoklu püskürtme stratejisi için bir püskürtme optimizasyonu yürütmüşlerdir. Sonuç olarak optimize edilmiş ana püskürtme ile birlikte ön püskürtme uygulamanın NO<sub>x</sub> emisyonunu azalttığını, yeterli miktarda art püskürtme ve uygun EGR oranı ile de NO<sub>x</sub> emisyonu düşük seviyelerde kalırken is emisyonunun önemli ölçüde azaldığını görmüşlerdir.

Ayrıca literatürde, yapay sinir ağları modelinin oluşturulduğu ve böylelikle farklı püskürtme parametreleri kullanılarak bazı çıktıların tahmin edildiği çalışmalar da mevcuttur. Carlucci *et al.* (2001) bazı püskürtme parametrelerinin (ön püskürtme süresi ile ön ve ana püskürtme zamanı) ses emisyonu ve titreşim seviyesine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını değerlendirirken varyans analizi tekniğini kullanmışlardır. Ayrıca bu parametreleri kullanarak, ses emisyonu ve titreşim seviyesini

tahmin etmek için çok katmanlı yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanmışlardır. YSA modelini hem bir mikrofon hem de bir ivmeölçer yardımıyla kaydettikleri ses emisyonu için ayrı ayrı oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, ön püskürtme süresi ve zamanının ses emisyonu üzerinde farklı yakıt miktarlarında farklı davranışlar sergilediğini görmelerine rağmen ana püskürtme zamanının ses emisyonu üzerinde anlamlı etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Shailaja and Raju (2017) yürüttükleri çalışmada tek silindri değişken sıkıştırma oranlı bir dizel motorda püskürtme basıncı ve zamanı, sıkıştırma oranı ve yük şartını kullanarak CO, NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarının tahmini için bir yapay sinir ağı modeli kullanmışlardır. Toplamda 320 adet deney yapmışlar ve deneylerin rastgele seçilen %85'ini ağı eğitmek için, %15'ini de ağı test etmek için kullanmışlardır. Oluşturulan modelde gizli katmandaki nöron sayısını 3 ile 20 arasında değiştirmişler ve nöron sayısı arttıkça ortalama karesel hata değerinin düştüğünü görmüşlerdir. Sonuçta YSA'nın emisyon parametrelerini tahmin için mükemmel bir araç olduğunu ifade etmişlerdir.

Ozener *et al.* (2017) çalışmalarında referans hal olarak kabul ettikleri tek püskürtme deneyleri ile emisyon kontrolünde kullanıldığı bilinen ön püskürtme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bir boyutlu termodinamik model oluşturarak yaptıkları deneylerin sonuçları ile model parametrelerini kalibre etmişlerdir. Daha sonra test edilmemiş çalışma noktalarındaki model parametrelerinin tahmini için kalibre edilmiş bu bir boyutlu model parametrelerini kullanarak bir yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Tahminini gerçekleştirdikleri bu test edilmemiş noktadaki model parametreleri ile tekrar bir boyutlu modeli çalıştırmışlar ve bu modelleme sayesinde motor geliştirme sürecindeki test maliyetlerinin azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca uygun bir ön püskürtme miktarı ve zamanının NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmada etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Püskürtme basıncı ve EGR oranı gibi parametrelerin yanı sıra çevrim başına gerçekleştirilen püskürtme sayısının, her püskürtmedeki yakıt miktarının ve püskürtmelerin zamanlamasının (püskürtme başlangıcı ve püskürtmeler arası mesafenin)

motor performansını, egzoz ve ses emisyonlarını doğrudan etkilediği verilen literatür özetinden açıkça görülmektedir. Ancak bu şekilde incelenecek parametrelerin sayısı ve bu parametrelerin incelenme aralıkları arttıkça yapılacak olan deney sayısının üstel olarak arttığı bir gerçektir. Bu durum, püskürtme parametrelerinin tümünün birden deneysel olarak incelenmesini neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Bu nedenle literatürde de tüm parametrelerin etkileri genellikle simülasyon çalışmaları ile birlikte incelenebilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, belirtilen tüm püskürtme parametrelerinin performans ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmek istenmiştir. Artan deney sayısı nedeniyle deney tasarımı yöntemlerinden yararlanılmıştır. Deney tasarımı yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılmış ve bu metod sayesinde az sayıda deney yapılarak farklı motor çalışma koşulları için performans ve emisyon karakteristiklerinin, geniş bir aralıkta değerlendirilme imkanı elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlarla enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilerek uygulanan püskürtme stratejilerinin bu analiz sonuçlarına olan etkileri belirlenmiştir.

Ayrıca deney şartları ve sonuçları (girdiler ve çıktılar) kullanılarak bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen hata analizleri ile modelin doğruluğu ispatlanmıştır. Bu doğrulanmış model sayesinde motorun belli bir çalışma bölgesi için fren özgül yakıt tüketimi,  $NO_x$ , HC ve CO emisyonları püskürtme parametrelerine bağlı olarak tahmin edilir hale getirilmiştir. Ayrıca bu çalışma bölgesi için belli bir yük değerinde, farklı devir sayılarında, tüm açı ve yakıt miktarlarında bir tarama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tarama sonuçlarından, fren özgül yakıt tüketimi ve  $NO_x$  emisyonunun minimum olduğu noktalar seçilerek bir kalibrasyon tablosu oluşturulmuştur. Bu sayede motor kalibrasyon testleri için yapılması gereken deney sayısının azaltılabileceği, minimum fren özgül yakıt tüketimi ve  $NO_x$  emisyonunu ortaya çıkaracak püskürtme parametrelerinin seçilebileceği ve dolayısıyla kalibrasyon deneyleri için gerekli zaman ve maliyet iyileştirmelerinin yapılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca oluşturulan kalibrasyon tablosu ile motorun devir sayısı ve yük koşullarına bağlı olarak



gerçekleştirilmesi gereken püskürtme açısı ve yakıt miktarları ortaya konmuş, bu sayede motor kalibrasyonu için yoğun bir şekilde gerçekleştirilen deneyler esnasında çevreye atılan zararlı emisyonlar da önemli ölçüde azaltılmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Sıkıştırma Ateşlemeli Motorlarda Yanma

İçten yanmalı motorlar yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler. Bir içten yanmalı motor çeşidi olan sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma, silindir içerisine alınan havanın sıkıştırılarak dolayısıyla basıncı ve sıcaklığı artırılarak üzerine yakıtın püskürtülmesi ile gerçekleşir. Bu durum esnasında gaz akışının kontrolü için supaplar kullanılır. Dört zamanlı bir sıkıştırma ateşlemeli motor; emme, sıkıştırma, güç (yanma ve genişleme) ve egzoz zamanlarından oluşur ve bu zamanlar aşağıda özetlenmiştir.

**Emme Zamanı:** Emme supabının açılması ve pistonun Üst Ölü Nokta'dan (ÜÖN) Alt Ölü Nokta'ya (AÖN) doğru hareketi esnasında silindir içerisine hava alınır.

**Sıkıştırma Zamanı:** Emme supabı kapandıktan sonra silindir içerisine alınan hava pistonun ÜÖN'ya doğru hareketi ile sıkıştırılır. Böylelikle silindir içerisindeki havanın hem basıncı hem de sıcaklığı artırılmış olur.

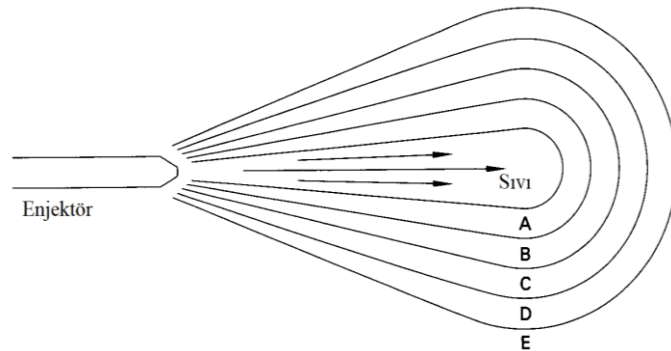
**Güç (Yanma/Genişleme) Zamanı:** Piston ÜÖN'ya gelmeden önce silindir içerisindeki sıkıştırılmış hava üzerine enjektörden yakıt püskürtülür. Piston ÜÖN'ya varmadan gerçekleştirilen erken püskürtme durumuna "püskürtme avansı" denir ve püskürtülen bu yakıt sıkıştırma sonunda kendi kendine, ancak gecikmeli olarak yanar (Safgönül vd 2013).

**Egzoz Zamanı:** Genişleme işlemi sonunda AÖN'ya doğru gelmiş olan pistonun, egzoz supabının açılmasıyla birlikte ÜÖN'ya doğru hareketi ile silindir içerisindeki egzoz gazlarını dışarıya attığı zamandır.

Silindir içi basıncın ve egzoz emisyonlarının oluşmasına direkt etki eden faktör yanma olayıdır. Dizel yakıtın uçuculuğu düşük olduğundan yanmanın başlaması için önce sıvı haldeki yakıt ince atomize bir hale getirilmeli, buharlaşarak hava ile karışması sağlanmalı ve kendiliğinden tutuşma sıcaklığına erişmelidir. Bu şekilde gerçekleşen dizel yanma işlemi heterojen bir süreç olup yakıt-hava karışımı sayesinde kontrol edilmektedir (Ferguson and Kirkpatrick 2015). Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma genel olarak aşağıda belirtilen safhalardan meydana gelir.

**Tutuşma Gecikmesi:** Yakıtın püskürtülmeye başladığı an ile yanmanın başlangıcı arasında geçen süredir. Silindire püskürtülen sıvı jetin (yakıt demetinin) etrafında oluşan buhar-hava karışımı bölgeleri kendiliğinden tutuşma sıcaklığına (veya bu sıcaklığın üzerine) ulaştığında kendiliğinden yanma başlar. Bu duruma kadar olan süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır (Ferguson and Kirkpatrick 2015).

**Ön Karışımli Yanma:** Yakıt buharı-hava karışımının kendiliğinden yanmaya başlaması ön karışımli yanma safhası olarak adlandırılır. Bu aşamada tutuşma ve yanma, yakıt jeti etrafında karışmanın tam gerçekleştiği bölgelerde meydana gelir (Ferguson and Kirkpatrick 2015). Şekil 2.1’de enjektörden püskürtülmüş olan sıvı yakıt jetinin silindir içerisinde hava ile karışması ve buharlaşması sonucu çevrelendiği buhar bölgeleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.1.** Sıkıştırma ateşlemeli bir motorun yakıt jeti ve sıralı buhar bölgeleri (Pulkrabek 2004)

Burada;

A) Yanamayacak kadar çok zengin,

B) Zengin yanabilir,

C) Stokiyometrik,

D) Fakir yanabilir ve

E) Yanamayacak kadar çok fakir olan bölgeleri temsil etmektedir. Kendiliğinden tutuşma ise esas olarak B bölgesinde başlar (Pulkrabek 2004).

Kendiliğinden yanma başlayınca tutuşma gecikmesi süresinde yanma odasına alınan yakıtın yanması, ani bir şekilde basıncın artmasına sebep olur. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda genellikle basınç artış hızı 0.2-0.3 MPa/°KMA seviyelerindedir. Basınç artış hızı bu değerleri aştığında motor sert çalışmaya başlar. Kabul edilen maksimum basınç artış hızını (1 MPa/°KMA) geçmemesi (ya da bu sınıra hiç gelmemesi) için tutuşma gecikmesi süresinin kısaltılması gerekir (Safgönül vd 2013).

Difüzyon/Karışım Kontrollü Yanma: Silindir içerisine giren yakıt yanmadan önce havayla tamamen karışmış olmaz. Bu durumda yanma, difüzyon alevi ile gerçekleşir. Difüzyon alevinde yakıt jetinin merkezindeki yakıt, etrafındaki hava ile karışır ve sınırlı bir ekivalans oranında tutuşur. Bu safhadaki yanma hızı, sürüklenen havayla karışan yakıtın hızıyla belirlenir (Ferguson and Kirkpatrick 2015). Yani yanma hızı karışımın oluşum hızıyla kontrol edilmektedir. ÜÖN'ya yakın yerlerde sıcaklıklar yüksek olduğundan yanmanın buralarda tamamlanması için çalışılır. Yakıtın hava ile karışması ve buharlaşması yeterince hızlı gerçekleşmezse yanma, genişlemenin ileri aşamalarında tamamlanır. Fakat genişleme süresince sıcaklıklar azalacağından yakıtın hepsinin yanma ihtimali de azalacaktır. Sıcaklığın azalması sebebiyle tam yanmamış karbon partikülleri (is) oluşur ve bu da motor veriminin azalmasına neden olur. Termal verimin fazla olması için yanmanın ÜÖN'ya yakın olması fakat dizel vuruntusunun meydana gelmemesi için de aniden yanan yakıt miktarının az olması istenmektedir. Ayrıca yanmanın uzun sürmesi de istenmeyen bir durumdur. Bu durumlar birbirleriyle ters ilişkili olduğundan, yumuşak

çalışma ve yüksek verim (ekonomiklik) arasında bir optimizasyon gereklidir (Safgönül vd 2013).

Art Yanma: Yanma işleminde en yüksek hıza ulaşıldıktan sonra art yanma safhasına geçilir. Yanma hızı yine difüzyon hızı ve karışımın oluşma hızı ile belirlenir. Ayrıca çok zengin karışım nedeniyle yanmamış yanma ürünleri de bu safhada yanarlar (Safgönül vd 2013).

## **2.2. Zararlı Emisyonlar**

### **2.2.1. Karbonmonoksit (CO) Emisyonu**

Karbonmonoksit gazı, hidrokarbon bir yakıtın eksik yanması sonucu ara bir ürün olarak açığa çıkan ve zehirli olan bir gazdır. Bu nedenle hava-yakıt oranı ile doğrudan ilişkilidir. Zengin karışimli yanma her zaman CO emisyonu üretir ve bu üretim stokiometrik orandan sapmayla neredeyse doğru orantılı artar. Fakir bir karışımla çalışan sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yerel zengin karışımın yanması ile oluşan CO emisyonu seviyesi emisyon sınırlarının altındadır ve egzoz hattına yerleştirilen bir katalizör ile daha da azaltılabilir (Challen and Baranescu 1999).

### **2.2.2. Azot Oksit (NO<sub>x</sub>) Emisyonu**

Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu %70-90 oranında NO ve NO<sub>2</sub>'den oluşur. NO<sub>x</sub> emisyonu diğer emisyonların aksine tamamlanmayan bir süreç değildir ve yanmanın bir yan etkisidir (Challen and Baranescu 1999). Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda NO<sub>2</sub> konsantrasyonu, toplam NO<sub>x</sub>'in %10-30 oranına kadar çıkabilir. NO emisyonu 3 temel kimyasal mekanizma ile üretilir. Bunlar termal ya da Zeldovich mekanizması, hızlı oluşum ya da Fenimore mekanizması ve yakıtla bağlı azotun yanma mekanizmasıdır. İçten yanmalı motorlar için bu mekanizmalardan en önemlisi,

alev cephesinin arkasında ve yüksek sıcaklıkta yanmış olan gazlarda NO oluşumu meydana getiren Zeldovich mekanizmasıdır. Hızlı oluşum mekanizması nispeten zayıf alev cephesi içinde meydana gelir. Yüksek sıcaklıkta yanmış gazların hacmi çok daha büyük olduğundan hızlı oluşum mekanizmasından oluşan NO miktarı Zeldovich mekanizmasından oluşturulan NO miktarından daha küçüktür. Yakıta bağlı oluşan NO, yakıttaki azottan kaynaklanır. Fosil yakıtlar genellikle ağırlıkça %0,2-0,5 azot içerirler ve azotun O ve OH ile tepkimesinde NO oluştururlar (Ferguson and Kirkpatrick 2015). Genişletilmiş Zeldovich mekanizması Eş. (1), (2) ve (3)'te verilmiştir (Challen and Baranescu 1999).

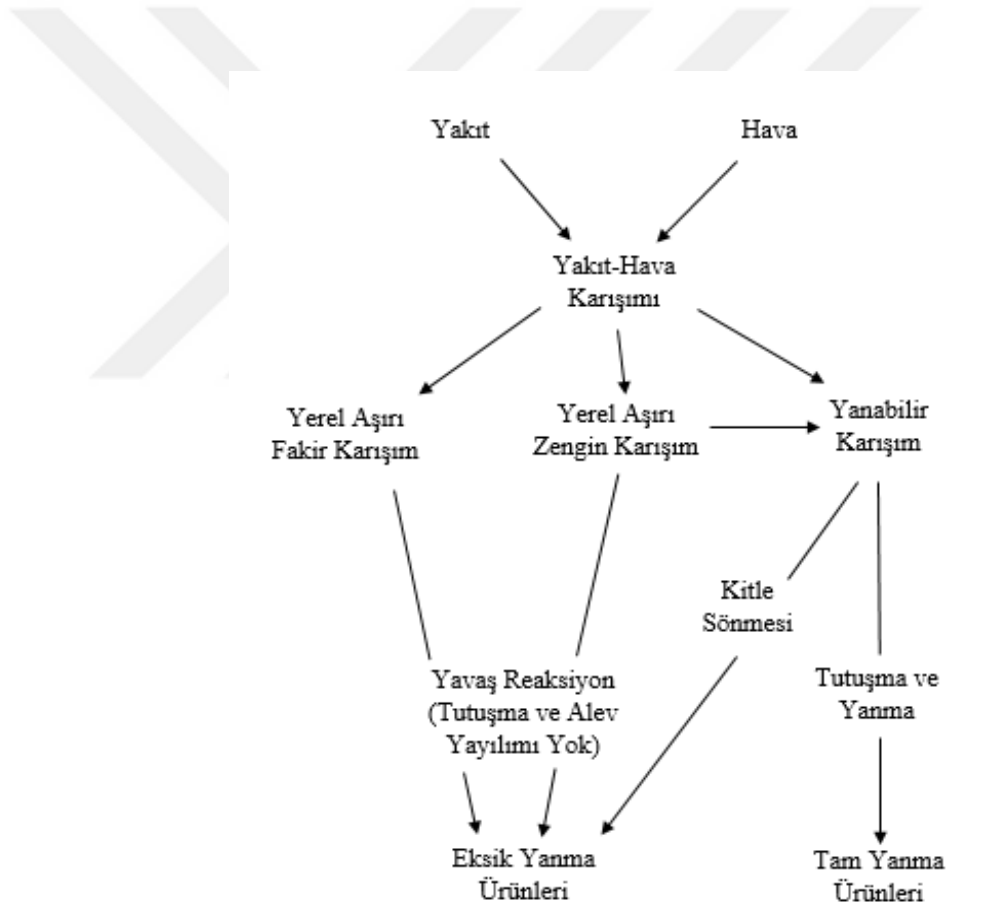


NO oksijenin fazlalığına ve yüksek sıcaklığa bağlıdır. Özellikle (yandıktan sonra daha yüksek sıcaklığa ve basınca sıkıştırılacağı için) silindirdeki maksimum basınca ulaşılmadan önce yanan gaz miktarı önem arz eder. Bu sebeple NO<sub>x</sub> oluşumu için yanmanın ilk kısmı önemlidir. NO<sub>x</sub> emisyonunun kontrolü için daha çok yanmanın bu bölümü ile ilgilenilir. Dolayısıyla ön karışımli yanma safhasındaki yanmış yakıt miktarı, püskürtme oranı şekillendirme ya da ön püskürtme ile azaltılmış olur. Ancak yanma sıcaklığını azaltan tekniklerden çoğu hidrokarbon veya partikül emisyonunu ya da yakıt tüketimini artırmış olur. Bu durum da NO<sub>x</sub> ve partikül madde veya yakıt tüketimi dengesine (trade-off) dikkat edilmesini gerekli kılar (Challen and Baranescu 1999).

### 2.2.3. Hidrokarbon (HC) Emisyonu

HC emisyonu, hidrokarbon yakıtların yanma sürecinin tamamlanmamasından kaynaklanır. HC emisyonunun oluşumunun 3 temel nedeni vardır. Bunlar; aşırı fakirleşme, yetersiz karışım ile sönme ve yanmamadır. Aşırı fakirleşme durumunda

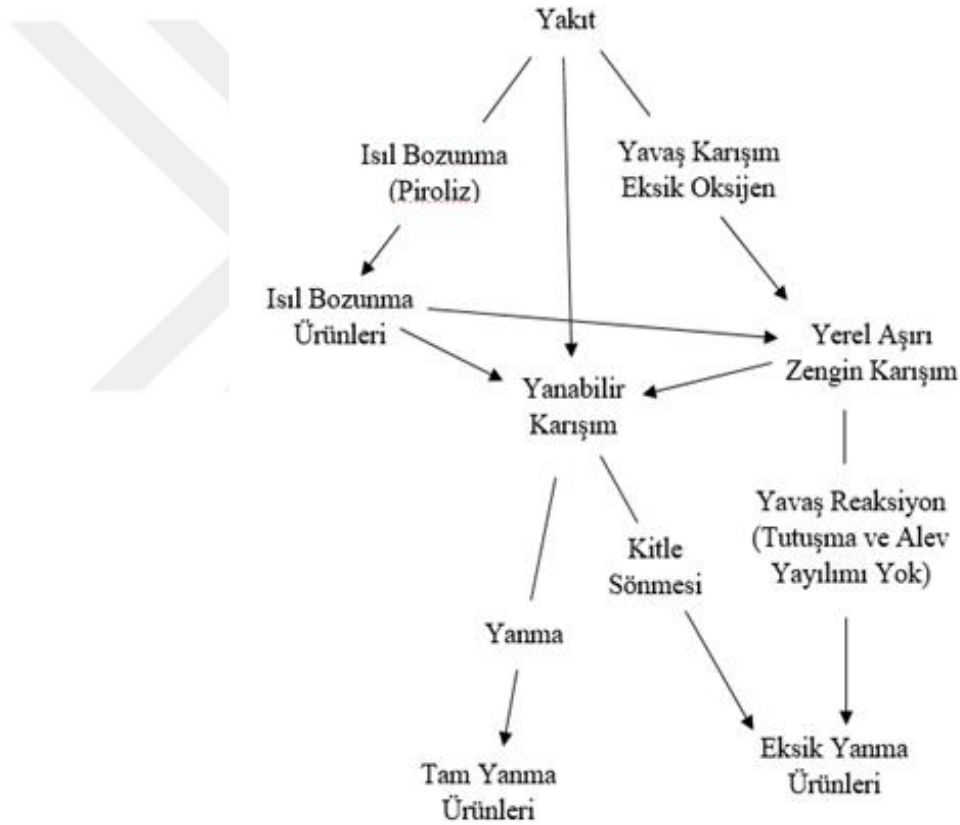
silindir içerisinde yakıt püskürtülmeye başlar başlamaz yakıt spreyi boyunca ekivalans oranında bir dağılım gelişir. Fakir yanma limitinden daha fakir karışan yakıt miktarı zamanla hızlıca artar. Bir girdap akışında yanma limiti içerisinde en çok bulunan sprey çekirdeğinin hafifçe fakir sitokiyometrik bölgesinde tutuşma gerçekleşir. Ancak yanma limitinin altında karışan ve sprey sınırına yakın olan yakıt kendiliğinden tutuşamayacak veya reaksiyon cephesini sürdüremeyecektir. Bu karışım, tamamlanmayan yavaş termal oksidasyon reaksiyonu ile sadece oksitlenebilir. Bu bölgede, silindirden yanmadan çıkacak olan yakıt, yakıtın ayrışma ürünleri ve aldehitler gibi kısmi oksidasyon ürünleri oluşacaktır (Heywood 1988).



**Şekil 2.2.** Tutuşma gecikmesi süresi boyunca püskürtülen yakıt için HC oluşum mekanizması (Yu *et al.* 1980)

Yetersiz karışımın oluşma sebeplerinden biri yakıtın, enjektör deliğinden düşük hızda ve yanma işleminin sonunda çıkmasıdır. Yetersiz karışımın meydana gelmesinde en önemli

kaynak enjektör memesi hacmidir ve ikincil püskürtmeler büyük olursa HC emisyonu artabilir. Yetersiz karışımın oluşmasında ikinci kaynak ise aşırı doldurma şartlarında silindire giren fazla yakıttır. Silindir içindeki alevin, yanma odası duvarına çarpıp sönmesi ve alev cephesinin önündeki HC yakıtın yanmaması bir diğer HC emisyonu oluşumu sebebidir (Heywood 1988). Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te tutuşma gecikmesi ve yanma süresi boyunca silindir içerisine püskürtülen yakıt sebebiyle oluşan HC emisyonlarının oluşum mekanizmaları gösterilmiştir (Yu *et al.* 1980).



**Şekil 2.3.** Yanma süresi boyunca püskürtülen yakıt için HC oluşum mekanizması (Yu *et al.* 1980)



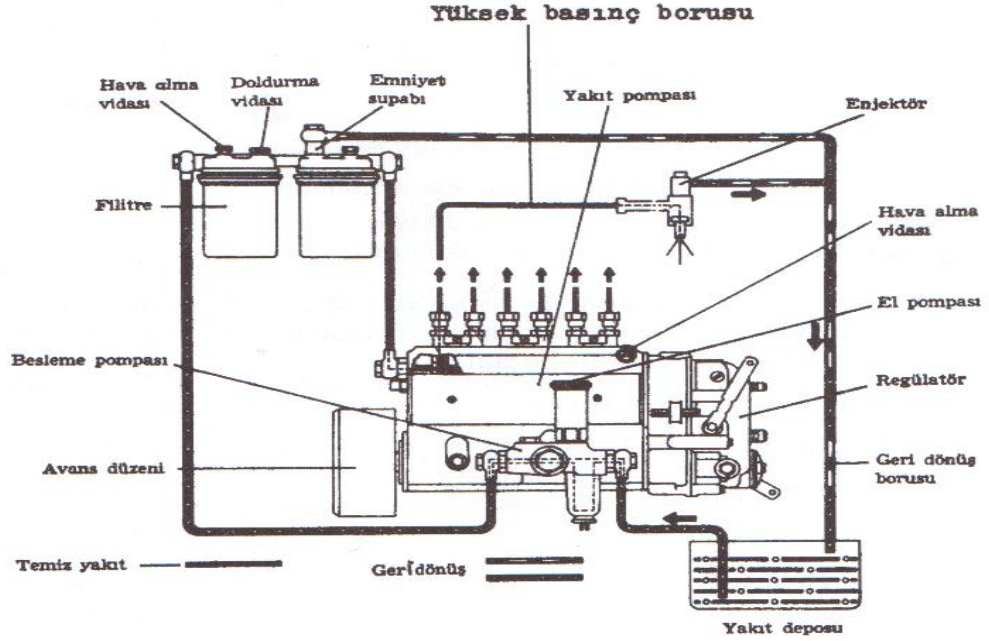
#### **2.2.4. Partikül Madde (PM) Emisyonu**

İs, zengin karışım neticesinde oluşan ve karbondioksite dönüşemeyen küresel katı karbon kümeleridir ve bir is partikülü 4000'e kadar küresel karbon kümelerin birleşmesinden oluşur. Bu kümelerin bir çoğunun çapı genellikle 15-30 nm arasında değişir. Motor güç zamanında genişlerken sıcaklık nispeten azalınca kaynama noktası yüksek bileşenler is partiküllerin yüzeyinde yoğunlaşır ve birikir. Üzerinde birikim gerçekleşen bu is partikülleri sağlığa ve çevreye zararlı olan çözülebilir organik bileşenler içerir. Motor yük altında tam gazda çalışırken, maksimum gücü elde etmek için silindire maksimum seviyede yakıt gönderilmesi gerektiğinden zengin karışım meydana gelir ve partikül emisyonu da bu durumda maksimum olur (Heywood 1988; Pulkrabek 2004).

#### **2.3. Yakıt Püskürtme Sistemlerinin Gelişimi, Ön ve Art Püskürtme**

Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanmanın meydana gelmesi için ayrıca bir ateşleme sistemi gerekli olmadığından yanmayı gerçekleştiren yakıt püskürtme sisteminin çok hassas olması gerekir. Egzoz emisyonlarının oluşumu silindir içerisindeki yanmayla doğrudan ilişkili olduğundan yakıt püskürtme sistemi ile de doğrudan ilişkilidir. Çünkü yakıt püskürtme sistemi yanmayı doğrudan etkiler. Emisyonları azaltma çabaları, sorunun temelinde yatan yakıt püskürtme sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır ve bu konuda sürekli olarak iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Eski nesil sıkıştırma ateşlemeli motorlara ait yakıt sistemi Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu motorlarda yakıt sistemi; depo, besleme pompası, filtre, yakıt enjeksiyon pompası, yüksek basınç boruları, enjektörler ve geri dönüş borularından oluşur (Yardı 2008) ve bu sistemin en önemli parçası yakıt pompasıdır.

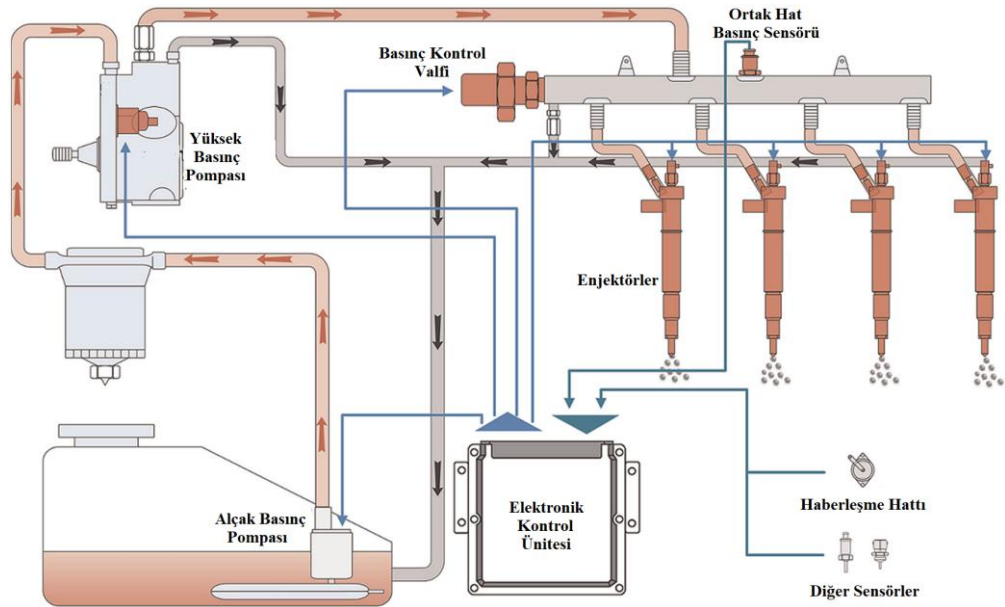


**Şekil 2.4.** Eski nesil sıkıştırma ateşlemeli motorlardaki yakıt sistemi (Yardım 2008)

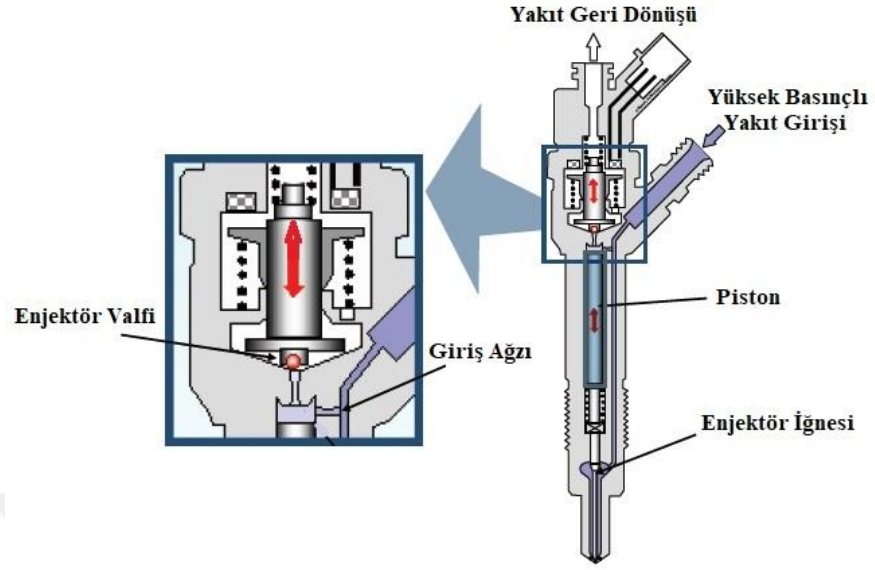
Yakıt pompası; yakıtın basıncını (yanma odasındaki hava basıncına rağmen) enjektörden rahatça püskürtülecek bir seviyeye çıkartır, yol ve yük durumuna göre motorun ihtiyacı olan miktarı ölçer, her çevrimde istenilen zamanda silindirlere yakıt gönderir. Motorun kararlı bir şekilde çalışabilmesi için her çevrimde ve her silindire gönderilen yakıt miktarında ve basıncında bir değişiklik olmamalıdır. Bu sistemlerde yakıt her çevrimde yeniden basınçlandırılarak silindirlere gönderilir (Yardım 2008). Bu sebeple bu sistemlerde püskürtme sırasında gecikmeler meydana gelir ve düşük basınç sebebiyle yakıtın iyice atomize olamaması durumu söz konusudur. Bu da yakıt sarfiyatının ve emisyonların fazla olmasını netice verir. Yakıt sistemi üzerinde yapılan çalışmalarla yakıt pompasının (yakıt miktarını ölçme ve püskürtme zamanlamasını ayarlama gibi) üstlendiği önemli görevleri, elektronik kontrollü sistemlere bırakmasıyla bu sistemlerin dezavantajları giderilmiştir.

Yakıt basıncının yüksek olması püskürtülen yakıtın daha iyi atomize olmasını sağlar. Bu da tutuşma gecikmesi süresini azaltır ve yanmayı iyileştirir (Celikten 2003; Pan *et al.*

2013; Yin *et al.* 2016). Bu nedenle yeni nesil yakıt sistemlerinde yüksek yakıt basıncı sağlayacak ortak hat (common rail) sistemi ve (içerisinde sürekli yüksek basınçlı yakıt bulunduran) elektronik kontrollü enjektörler geliştirilerek düşük yakıt tüketimine, daha yüksek çıkış gücüne, daha az ses ve kirletici emisyonlara sahip sıkıştırma ateşlemeli motorlar üretilmiştir. Ortak hat, basınç akümülatörü görevi görür ve içerisinde sürekli olarak yüksek basınçlı yakıt barındırır. Elektronik kontrol ünitesi ile bu yüksek basınç motorun çalışma şartlarına bağlı olarak ayarlanır. Enjeksiyon basıncının ve zamanının geniş bir ölçekte değiştirilebilmesi, bu sistemin temel avantajıdır. Ortak hat sistemiyle birlikte elektronik kontrollü selenoid enjektörler kullanılmaya başlanarak hem sistemin cevap süresi kısaltılmış hem de enjeksiyon zamanının değiştirilmesinde büyük bir esneklik sağlanmıştır (Reif 2014). Ayrıca bu sistem sayesinde enjektörlerin açılıp kapanmalarının sebep olduğu basınç farklılıklarını da sönmülenir. Sistem; alçak basınç pompası, yüksek basınç pompası, basınç regülatörü, ortak hat, yüksek basınç boruları ve enjektörlerden oluşur. Ortak hat yakıt püskürtme sistemi elemanları Şekil 2.5'te selenoid enjektörün yapısı ise Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



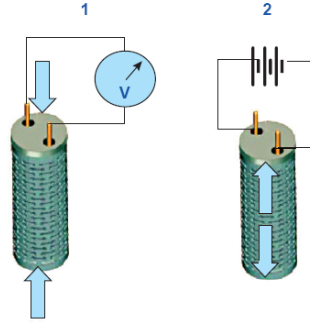
Şekil 2.5. Ortak hat yakıt püskürtme sistemi (Hong *et al.* 2015)



**Şekil 2.6.** Selenoid enjektör (Kitchen 2012)

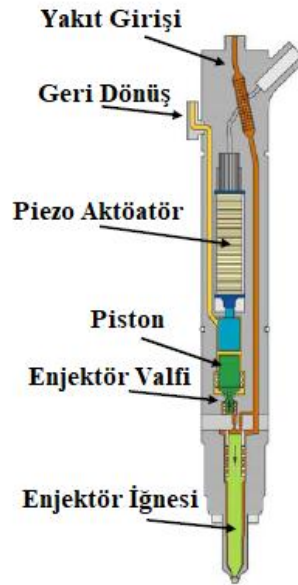
Enjektörün uyarıcı sinyale hızlı cevap vermesi püskürtme zamanının kontrolü (dolayısıyla emisyonların oluşumu) açısından çok önemli olduğundan enjektörler üzerinde sürekli olarak araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Piezo kristalinin üzerine gelen etkiye çok daha kısa sürede cevap verebilmesi avantajından yararlanılarak günümüz motorlarında artık piezo enjektörler kullanılmaktadır. Piezo enjektörler, selenoid enjektörlerden yaklaşık 4 kat daha hızlıdır (Kitchen 2012). Bu durum yakıt püskürtme stratejilerinin gelişmesine büyük katkı sağlamıştır.

Piezo kristaline basınç uygulandığında bir elektrik sinyali üretir ya da bir sinyal verilince bu elemanların boyu uzar. Bu sayede enjektör iğnesinin hareketi sağlanmış olur. Piezo kristalin çalışma prensibi Şekil 2.7’de piezo enjektörün yapısı da Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2.7.** Piezo kristalinin çalışma prensibi (Anonim)

Selenoid ve piezo enjektörlerde kapalı durumda enjektör iğnesinin altında ve üstünde basınç aynıdır. Daha sonra aktüatörün tetiklenmesiyle enjektör valfi yukarı çekilir ve iğnenin üstündeki basınç düşmüş olur. İğnenin altındaki basınç hala yüksek olduğundan iğne yukarı kalkar ve enjektör açılarak silindire yakıt püskürtülmüş olur. Aktüatörü tetikleyen sinyalin ortadan kalkmasıyla valf eski konumuna geri döner ve enjektör kapanmış olur.



**Şekil 2.8.** Piezo enjektör (Kitchen 2012)

Piezo kristali çalışma prensibi sayesinde hem püskürtme zamanı kontrolü daha hassas yapılabilmiş hem de püskürtmenin parçalara ayrılarak silindire gönderilmesinde (özellikle püskürtmeler arasındaki mesafenin ayarlanabilmesinde) büyük bir esneklik sağlanmıştır. Yakıtın parçalara ayrılarak silindire gönderilmesinin hem motor performansı hem de ses ve egzoz emisyonları üzerinde çok etkili olduğu bir önceki bölümde (giriş bölümünde) bahsedilen çalışmalarda belirtilmiştir. Her çevrimde silindirlere gönderilmesi gereken yakıt temelde ön, ana ve art püskürtme olmak üzere 3 bölüme ayrılır. Piezo enjektörlerin hızlı tepkisi sayesinde ön veya ana püskürtme de kendi içinde birkaç parçaya ayrılabilir.

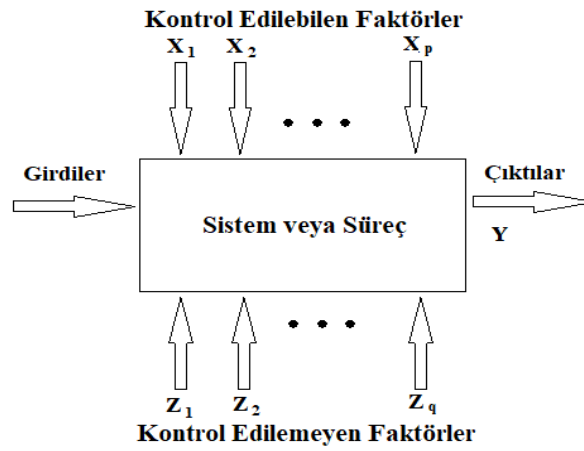
Ön püskürtmenin temel amacı bir miktar yakıtın püskürtülerek yanması ve yanma sonucu açığa çıkan ısı ile de silindir içi sıcaklığın yükseltilmesidir. Artan silindir içi sıcaklıkla asıl gücün elde edildiği ana püskürtmenin tutuşma gecikmesi azaltılır. Çünkü sıcaklık artınca püskürtülen ana yakıt daha çabuk buharlaşır ve moleküllerin yanması için gerekli aktivasyon enerjisine daha erken ulaşılır. Dolayısıyla silindir içerisinde biriken yanmamış yakıt miktarı da azalmış olur. Bu nedenle silindir içerisindeki basınç artış hızı azalır, maksimum basınç ve sıcaklık bir miktar düşer, dolayısıyla  $NO_x$  ve ses emisyonları bir miktar azalmış olur. Ancak ön püskürtmenin sayısı, zamanlaması ve püskürtülecek yakıt miktarı performans ve emisyon oluşumu açısından çok önemlidir.

Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanmayı ve emisyonların oluşumunu etkileyen önemli faktörlerden biri de silindir içerisindeki yerel koşullardır. Yerel olarak aşırı zengin heterojen karışımdan ve sıcaklığın yine yerel olarak düşük seviyelerde olmasından kaçınılmalıdır. Çünkü bu durumlar is emisyonlarını artıran faktörlerdir. Art püskürtme, ana püskürtmeden sonra genişleme zamanındaki bu olayları kontrol altında tutmak için gerçekleştirilir. Erken art püskürtme ile (yakıtın bir kısmı ana püskürtmeden hemen sonra püskürtüleceğinden) hem yakıt oksidasyonu iyileşir hem de silindir içi sıcaklık artırılarak is oluşumuna neden olan yakıt yakılmış olur. Geç yapılan art püskürtme ise son işlem uygulamalarına destek olur. Ön püskürtmede olduğu gibi art püskürtmedeki yakıt miktarı ve püskürtme zamanlaması çok önemlidir.

## 2.4. Deney Tasarımı ve Taguchi Metodu

Deney yapma, bilimsel yöntemde çok büyük bir öneme sahiptir. Genel olarak deneyler bir sürecin veya sistemin performansını incelemek için yapılır. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi bir sürecin veya sistemin modelinde, süreç değişkenlerinin bazıları kontrol edilebilirken çevresel faktörler gibi bazı değişkenler de kontrol edilemezler. Deneyler genel olarak;

- Hangi değişkenlerin çıktıyı en fazla etkilediğini belirlemek için veya
- Çıktıyı her zaman istenilen nominal bir değere yakın tutabilmek, çıktıdaki değişikliğin küçük olmasını sağlamak ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini en aza indirmek amacıyla etkili girdilerin hangi değerlerde olması gerektiğini belirlemek için yapılır. Deneyler neticesinde varılacak sonuçlar büyük oranda verinin toplanma şekline bağlı olduğundan deneylerin iyi tasarlanmış olması önemlidir (Montgomery 2017).



**Şekil 2.9.** Bir sistemin veya sürecin genel modeli (Montgomery 2017)

Deney tasarımı sayesinde bir çok girdi parametresinin çıktı üzerindeki etkisini ekonomik olarak belirlemek ve varyasyon oluşturan faktörlere karşı tasarım aşamasında önlem almak mümkün olur (Şirvancı 1997).

Deney tasarımı; klasik ve istatistiksel olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Klasik metodolojide tüm bağımsız parametreler sabit tutulurken sadece bir parametre değiştirilir. Böylelikle sadece o an değiştirilen parametrenin sistem üzerindeki etkisi gözlemlenmiş olur. Yani parametrelerin birbirlerini etkileme durumları dikkate alınmamış olur (Lazic 2006). Kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerinin birlikte incelenebilmesi için en etkili yöntem istatistiksel deney tasarımıdır (Şirvancı 1997). Aslında istatistiksel deney tasarımı, istatistiksel metodlarla analiz edilebilen uygun verilerin toplanması için bir süreç planlamadır.

Deneysel tasarımın 3 temel prensibi vardır. Bunlar; tekrarlama, rassallaştırma ve bloklama. Tekrarlama; temel deneyin tekrarlanması anlamına gelir ve tekrarlamanın 2 önemli özelliği vardır. Birincisi; araştırmacının deneysel hatayı tahmin etmesine olanak tanınmasıdır. Bu hata tahmini, verilerdeki gözlenen farklılıkların gerçekten istatistiksel olarak farklı olup olmadığını belirlemek için temel bir ölçü birimi haline gelir. İkincisi; örnek ortalaması, bir faktörün deneydeki etkisini tahmin etmede kullanılıyorsa tekrarlama, araştırmacının bu etkinin daha kesin bir tahminini elde etmesine izin verir (Montgomery 2017).

Rassallaştırma; deney tasarımında istatistiksel metodların kullanımını sağlayan temel faktördür. Deneylerin gerçekleştirilme sırasının rastgele belirlendiği anlamına gelir. İstatistiksel metodlarda gözlemlerin/hataların değişkenlere tesadüfi dağıtılması gerektiğinden rassallaştırma bu gereği yerine getirmiş olur. Deneyin gereği gibi rassallaştırılması, mevcut olabilecek yabancı faktörlerin etkilerini ortalama tutmaya yardımcı olur (Montgomery 2017).

Bloklama; ilgilenilen faktörler arasında karşılaştırma yapmanın hassasiyetini geliştirmek için kullanılan bir tasarım tekniğidir. Bloklama sorun teşkil eden (doğrudan ilgilenilmeyen) faktörlerden meydana gelen değişkenliği azaltmak veya ortadan kaldırmak için sık sık kullanılan bir tekniktir (Montgomery 2017). İstatistiksel deney tasarım yöntemleri;



- Tam faktöriyel
- Kesirli faktöriyel ve
- Taguchi metodudur.

Tam faktöriyel deney tasarımında parametrelerin bütün seviyeleri ile oluşturulabilecek tüm kombinasyonlar denenir. Bu sebeple deney için gerekli süre ve maliyet çok artmaktadır. Kesirli faktöriyel tasarımı ise tam faktöriyel tasarımın sahip olduğu bu dezavantajlı ortadan kaldırmak için deneylerin orantılı olarak azaltılması işlemine dayanır. Deneylerin 1/2, 1/4 veya 1/8 gibi oranlarda azaltılması tamamen araştırmacının elindedir.

Taguchi metodunda çevrim içi ve çevrim dışı olmak üzere 2 üretim/kalite kontrol yöntemi mevcuttur. Deney tasarımı, Taguchi metodunun çevrim dışı kontrol yöntemi içerisinde yer almaktadır. Çevrim dışı kontrol yöntemiyle ürün ve süreç tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu tasarımların her ikisinin de en önemli aşaması parametre tasarımıdır. Sürecin parametre tasarımı, varyasyona neden olan ve kontrol edilemeyen parametrelere karşı kontrol edilebilen parametrelerin en iyi değerlerini seçmektir. Bu amaçla Taguchi metodu, istatistiksel olarak analiz edilen ve sonuçların kapsamlı bir şekilde araştırılmasına imkan tanıyan ortogonal dizilere dayanır. Kullanılan ortogonal dizilimler sayesinde kesirli faktöriyel tasarımdaki gibi deney sayısı azaltılmaktadır. Ancak kesirli faktöriyelden farklı olarak (ortogonal dizilere dayanması sebebiyle) Taguchi metodunda parametrelerin (faktörlerin) seviyeleri eş zamanlı olarak değiştirilmektedir (Şirvancı 1997; Khidir and Atrooshi 2016).

Ortogonal dizilimler, önceden beri kullanılıyor olmasına rağmen Taguchi ile daha da popüler hale gelmiştir. Ayrıca Taguchi, faktör seviyelerinin karışık kullanılmasına da imkan tanımıştır. Seçilen uygun bir dizilim ile gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak yapılan varyans analizi sayesinde hangi faktörün sonuçtaki varyansa ne kadar etki ettiği belirlenir. Böylelikle faktörlerin çıktıyı hangi seviyede etkilediği istatistiksel olarak gözlemlenmiş olur.

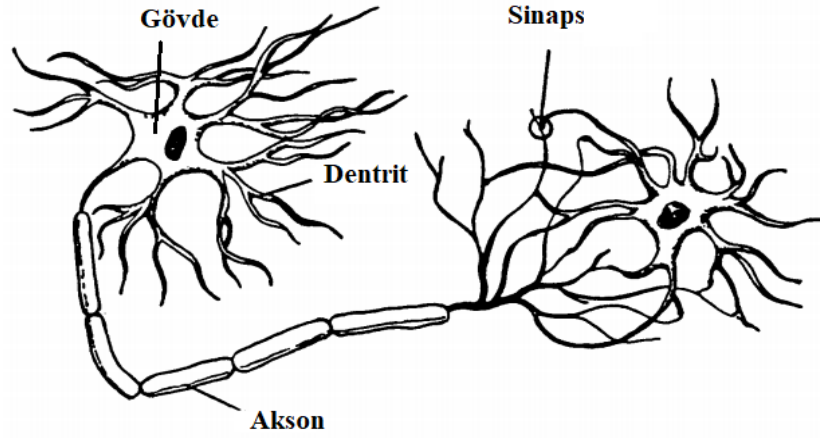
## 2.5. Ekserji

Enerji ihtiyacının günden güne arttığı dünyamızda mevcut kaynakların verimli kullanılması çok büyük bir önem arz etmektedir. Termodinamiğin 1. ve 2. kanunu ile ısı sistemlerinde kaynakların verimli kullanılmasının sınırları belirlenebilmektedir. Termodinamiğin 1. kanunu sisteme giren enerjinin miktarından bahsetmektedir ve toplam enerjinin korunacağını yani yok edilemeyeceğini/tüketilemeyeceğini ifade etmektedir. Aslında ısı sistemlerinde tüketilen enerji değil enerjinin iş yapabilme potansiyelini gösteren kalitesidir. Enerjinin iş yapabilme yeteğinin ölçüsü de ekserji olarak adlandırılmaktadır. Ancak birinci kanun enerjinin ne kadarının kullanılabilirdiğinden/faydalı işe dönüştürebileceğinden bahsetmemektedir. Ekserji analizi ısı sistemlerden meydana gelen kaybın niteliği, yeri ve miktarının tespitinde yardımcı olur (Yüncü 2010).

## 2.6. Yapay Sinir Ağları

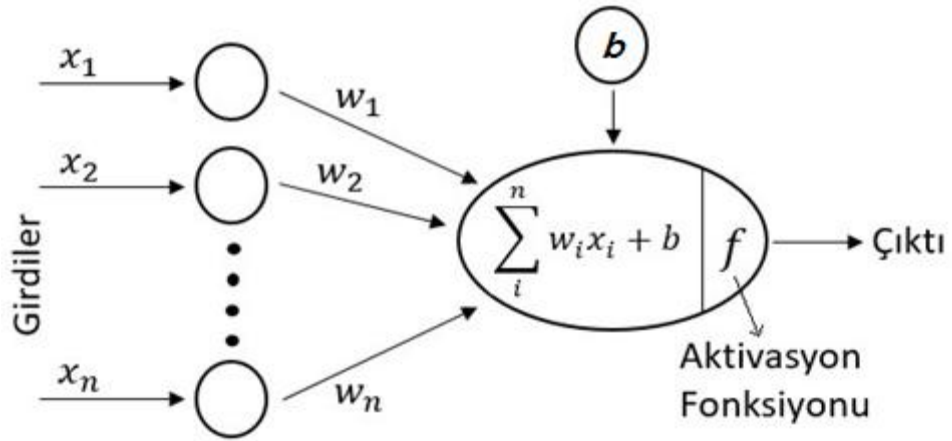
Bu bölümde yapay sinir ağları hakkında genel bilgiler verilecek ve sadece çalışma kapsamında oluşturulan ağda kullanılmış olan kısımlar detaylandırılacaktır.

Yapay sinir ağları biyolojik sistemler gibi çalışan bir bilgi işleme sistemleridir. İnsan beyni ve yapay sinir ağlarının temel yapı birimi sinir hücreleridir. Şekil 2.10'da bir sinir hücresinin yapısı ve elemanları gösterilmiştir. Hücreye gelen giriş bilgileri dentritler vasıtasıyla alınır ve gövdeye iletilir. Gövdede işlenen ve çıktı haline getirilen veriler akson aracılığıyla taşınır. Akson ucu ile bir sonraki sinir hücresinin dentritinin birleştiği ve verinin aktarıldığı yere de sinaps denir (Hamzaçebi 2011).



Şekil 2.10. Sinir hücresi (Corpor 2014)

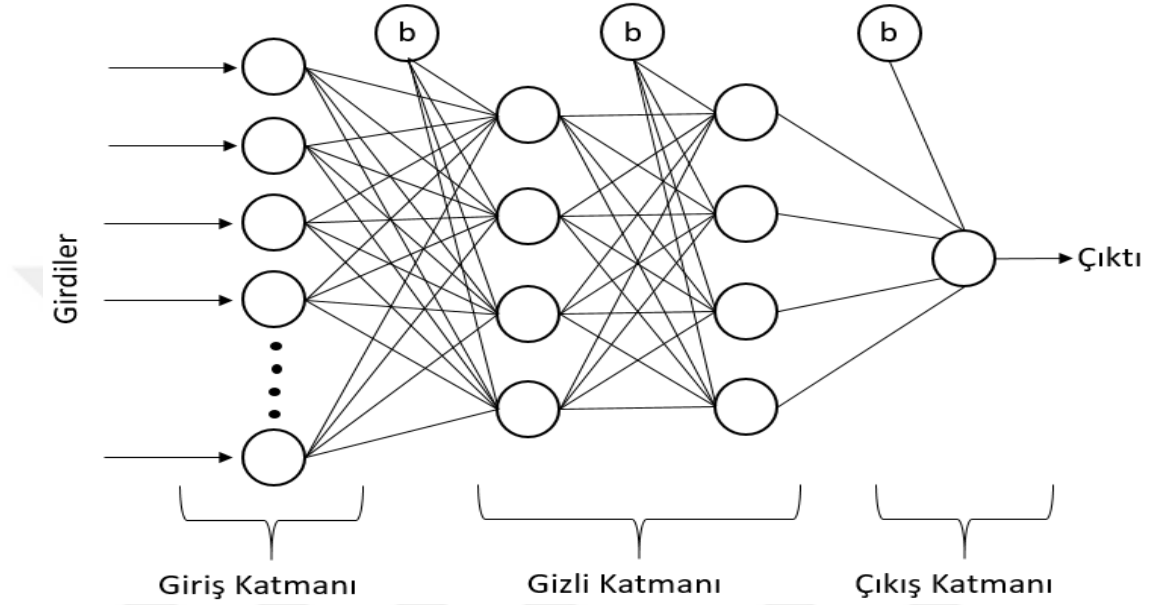
Yapay sinir hücresinde ağı net girdisi, girdi verilerinin ilgili bağlantı ağırlıkları ile çarpılmasıyla ve birleştirme işleminden geçirilmesiyle elde edilir. Bu birleştirme işlemi genellikle toplama fonksiyonudur. Bahsedilen yapay sinir hücresi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Yapay sinir hücresi

Şekil 2.11’de gösterilen bu sinir hücrelerinin gruplandırılması ile katmanlar, katmanların birbirine bağlanmasıyla da yapay sinir ağları oluşur. Şekil 2.12’de bir yapay sinir ağı yapısı gösterilmektedir. Yapay sinir ağı gerçek dünyadan verilerin alındığı giriş

katmanından, sonuçları dışarıya veren çıkış katmanından ve bu ikisi arasında bulunan gizli katmandan/katmanlardan oluşur. Yapay sinir ağları; sınıflandırma, tahmin ve optimizasyon gibi alanlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar (Hamzaçebi 2011).



**Şekil 2.12.** Yapay sinir ağı

Tiplerine göre, ileri beslemeli ve geri beslemeli yapay sinir ağları mevcuttur. İleri beslemeli ağlarda giriş katmanı gizli katman varsa gizli katmana yoksa doğrudan çıkış katmanına bağlıdır. Var olan gizli katmanlar da birbirlerine ya da doğrudan çıkış katmanına bağlanırlar. Yani bu ağlarda geriye doğru bir bağlantı söz konusu değildir (Heaton 2008).

Yapay sinir ağları katman sayısına göre tek katmanlı algılayıcılar ve çok katmanlı algılayıcılar olarak ikiye ayrılırlar. Öğrenilmesi istenen olayda girişler ile çıkışlar arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusu ise ilgili problemin çözümü ancak çok katmanlı algılayıcılar ile gerçekleştirilebilmektedir (Öztemel 2012).

Ağın eğitimi için bir çok yöntem olmasına rağmen bu eğitim temelde gözetimli öğrenme, gözetimsiz öğrenme ve kendinden gözetimli öğrenme yöntemleri ile gerçekleşir (Corpor 2014). Çok katmanlı algılayıcılar, gözetimli öğrenme prensibi ile çalışırlar. Ağın öğrenme kuralı, en küçük kareler yöntemine dayalı delta öğrenme kuralının genelleştirilmiş halidir. Bu nedenle çok katmanlı algılayıcılarda öğrenme kuralına “genelleştirilmiş delta kuralı” da denir. Bu öğrenme kuralında bir eğitim setine ihtiyaç vardır ve bu eğitim seti ağa sunulan girdi ve çıktı verilerinden oluşur. Girdi verileri sayesinde ağın ürettiği çıktılar beklenen (gerçek) çıktı değeri ile karşılaştırılır. Bunların arasındaki fark hata olarak kabul edilir. Amaç bu hatanın en aza indirilmesidir. Genelleştirilmiş delta kuralı iki aşamadan meydana gelir. Bunlar; ileri doğru hesaplama ve geri doğru hesaplamadır. İleri doğru hesaplamada ağın çıktısı hesaplanır, geri doğru hesaplamada ise ağırlıklar değiştirilir. Başlangıçta (genellikle) rastgele ayarlanan ağırlıklar bu kez ağ tarafından ayarlanmış olur ve böylelikle bir sonraki iterasyon beklenen ve üretilen çıktının birbirine daha da yaklaşmasını sağlar. Bu öğrenme yöntemi tüm işlem elemanlarının mevcut hatalarını en aza indirmeye çalışır. Böylelikle kabul edilebilir bir ağ doğruluğuna ulaşıncaya kadar giriş ağırlıkları sürekli olarak değiştirilir (Anderson and McNeill 1992; Öztemel 2012).

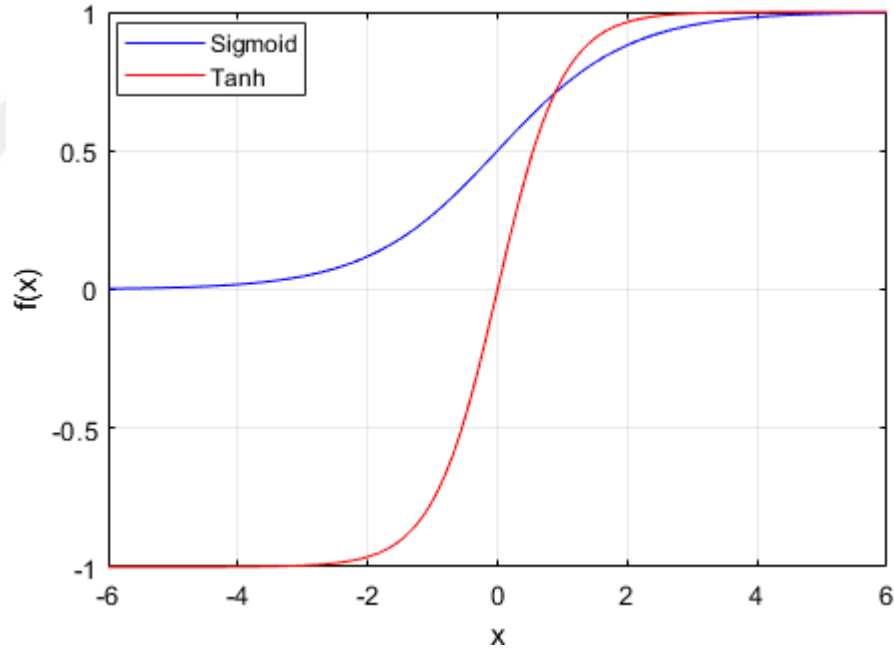
Hatanın azaltılması aslında bir optimizasyon problemidir. Bu sebeple kullanılan bir çok optimizasyon algoritması mevcuttur. stokastik eğimli iniş, momentum, adagrad, adadelta, adam vb. algoritmalar en yaygın kullanılan algoritmalarıdır. Dış bükey olmayan optimizasyon problemlerinde Adam (adaptif moment) algoritmasını kullanmanın temel avantajları şunlardır:

- Uygulaması basit,
- Sayısal olarak daha kabul edilebilir seviye,
- Düşük bellek gereksinimi,
- Gradyanların köşegen ölçüsüne göre değişmez,
- Verinin ya da parametrenin fazla olduğu problemler için çok uygundur,
- Durağan olmayan nesnelere için uygundur,
- Çok gürültülü ya da seyrek gradyanlı problemler için uygundur ve

- Hiper-parametrelerin sezgisel yorumları vardır ve genellikle çok az ayar gerektirir (Kingma and Ba 2015).

Her bir nörona gelen girdi değeri aktivasyon fonksiyonu ile çıktıya dönüştürülür. Farklı aktivasyon fonksiyonları mevcut olmasına rağmen çok katmanlı algılayıcılar türevi alınabilen bir aktivasyon fonksiyonunun kullanımını zorunlu kılar (Öztemel 2012). Çok katmanlı algılayıcılarda en çok kullanılan doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu sigmoid aktivasyon fonksiyonudur. Bunun yanı sıra tanh, sinüs vb. fonksiyonlar da kullanılır. Tanh fonksiyonu ile Eş. (4)'te verilen sigmoid fonksiyonu Şekil 2.13'te gösterildiği gibi "S" şekline benzeyen eğrilerdir.

$$f(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad (4)$$



**Şekil 2.13.** Sigmoid ve tanh aktivasyon fonksiyonları

Girdi ve çıktı verileri ağı sunulmadan önce ölçeklendirilir ve ölçeklendirme ağı performansını yakından etkilemektedir. Bu ölçeklendirmenin sebebi farklı ortamlardan gelen tüm girdi veya çıktı değerlerinin aynı aralıkta olmasını ve düzenli bir dağılım

sergilemesini sağlamaktır. Bu şekilde bazı girdi veya çıktıların aşırı büyük veya küçük değerlerde olmasından kaçınılmış olur (Öztemel 2012).

Oluşturulan ağın tahmin performansının değerlendirilmesinde genellikle iki durum dikkate alınır. Bunlardan biri modelin ne kadar hızlı çalıştığıdır. Modelin hızlı sonuç üretmesi önemli bir performans göstergesidir. Ancak bundan daha önemlisi ağın sonuçları ne kadar doğru ürettiğidir. Modelin tahmininin doğruluğu, hatanın analizi ile belirlenir (Hamzaçebi 2011). Bir çok hata analizi ölçütü olsa da genelde kullanılan ölçütler; ortalama mutlak hata (OMH), ortalama karesel hata (OKH), kök ortalama karesel hata (KOKH) ve belirleme faktörüdür ( $R^2$ ). Bu fonksiyonlar Eş. (5), (6), (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k - \hat{y}_k| \quad (5)$$

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (6)$$

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \right) \quad (8)$$

Burada n örnek sayısını,  $y_k$  hedef (gerçek) değeri,  $\hat{y}_k$  tahmin değerini ve  $\bar{y}$  ortalama değeri göstermektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Düzenegi ve Kullanılan Cihazlar

Bu tez çalışması kapsamındaki deneyler hidrolik dinamometre tezgahı üzerine yerleştirilen Ford 2.2 TDCI Duratorq motor kullanılarak yapılmıştır. Deneyde kullanılan motorun özellikleri Çizelge 3.1’de ve deney düzeneginin şematik resmi de Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan Petrol Ofisinden alınan yakıtın özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

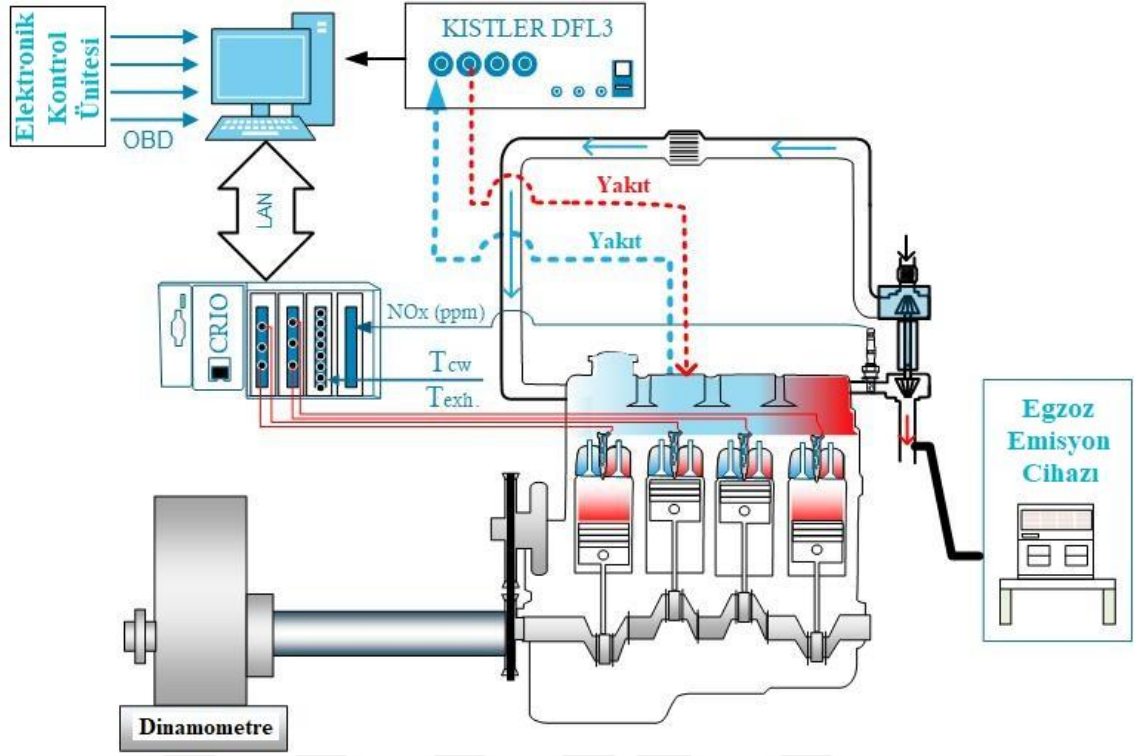
**Çizelge 3.1.** Deneylerde kullanılan motorun özellikleri

Silindirler	4 silindirli-Sıra tipi
Maksimum Güç (@3500 d/dk)	125 PS (92kW)
Maksimum Tork (@1330-2400 d/dk)	330 Nm
Strok	94,6 mm
Çap	86 mm
Deplasman	2,198 l
Sıkıştırma Oranı	15,5:1
Yakıt Püskürtme Sistemi	Ortak hatlı direkt yakıt püskürtmeli
Enjektör tipi	Piezoenjektör

**Çizelge 3.2.** Deneylerde kullanılan yakıtın özellikleri

Özellik	Birim	Referans Sınır Değerleri		Ölçüm Belirsizliği	Ölçüm Değeri	
		En Az	En Çok			
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	820,0	845,0	±0,034	829,0	
Viskozite	mm <sup>2</sup> /s	2,00	4,50			
Parlama Noktası	°C	55	-	±0,650	65,0	
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	°C	-	+5 (Yaz) -15 (Kış)	±0,040	1	
Damıtma	250 °C	%(V/V)	-	65	±0,952	34,0
	350°C	%(V/V)	85	-	±0,230	92,0
	%95’te Sıcaklık	°C	-	360	±0,203	357,0
Su	mg/kg	-	200	±10,453	153,95	
Kül	%(m/m)	-	0,01			
Setan Sayısı	-	51,0	-			
Setan İndisi	-	46,0	-	±0,259	56,2	





Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik resmi

### 3.1.1. Hidrolik dinamometre

Bu tez çalışmasında motorun ürettiği gücün ölçümü için hidrolik fren sistemi kullanılmıştır. 25 ton su kapasiteli tanktan su, bir pompa ile basınçlandırılarak hidrolik frene gönderilmiştir. Sistemde motor miline bağlı kanatlı bir rotor ve rotorun etrafındaki yataklara oturtulan bir stator mevcuttur. Motor miliyle birlikte dönen rotorun kanatları vasıtasıyla tanktan sisteme basınçlandırılan su da dönmeye başlar ve dışa doğru bir akış olur. Böylece su rotoru çevreleyen statorun içerisinde akmış olur. Yani motor torku rotordaki santrifüj etki sayesinde statora aktarılır. Motor torku da statora bağlanan bir yük hücresi ile ölçülür. Yapılan deneylerde yük hücresi tarafından oluşturulan sinyalin FPGA tabanlı şasiye takılan analog giriş modülüne bağlanmasıyla tork ölçümü gerçekleştirilmiştir.

### 3.1.2. Egzoz emisyon cihazı

Yapılan deneylerde egzoz gazlarının ölçümü için Bosch BEA 250 egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır. Egzoz emisyon cihazı ile ölçülen gazların bileşenleri, ölçüm aralığı ve hassasiyeti Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Egzoz emisyon cihazı ile ölçülen gazlar, ölçüm aralığı ve hassasiyeti

Bileşenler	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0,000 – 10,00 % Hacim	0,001 % Hacim
CO <sub>2</sub>	0,00 – 18,00 % Hacim	0,01 % Hacim
HC	0 – 9,999 ppm Hacim	1 ppm Hacim
O <sub>2</sub>	0,00 – 22,00 % Hacim	0,01 % Hacim
Lambda	0,500 – 9,999	0,001
NO	0 – 5000 ppm Hacim	≤ 1 ppm Hacim

Yapılan bu çalışmada NO<sub>x</sub> emisyonu ölçümünün hem hassas olması hem de anlık değişen motor çalışma koşullarına hızlı cevap vermesi gerektiğinden kullanılan bu egzoz emisyon cihazından ayrı olarak egzoz hattına bir NO<sub>x</sub> sensörü yerleştirilmiştir.

### 3.1.3. NO<sub>x</sub> sensörü

Deneylerde NO<sub>x</sub> emisyonunun daha doğru ve hızlı bir şekilde ölçümünün gerçekleştirilmesi için Continental ve NGK Insulators firmaları tarafından geliştirilen ve hem NO<sub>x</sub> hem de O<sub>2</sub> konsantrasyonu ölçebilen sensör egzoz hattına yerleştirilmiştir. Sensör içerisindeki Zirkonyum dioksit (ZrO<sub>2</sub>) elektrotunda tepkimeye giren NO<sub>x</sub> gazları N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>’ye dönüşür ve bu arada oluşan elektriksel sinyal ile NO<sub>x</sub> miktarı tespit edilir. Sensörün özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

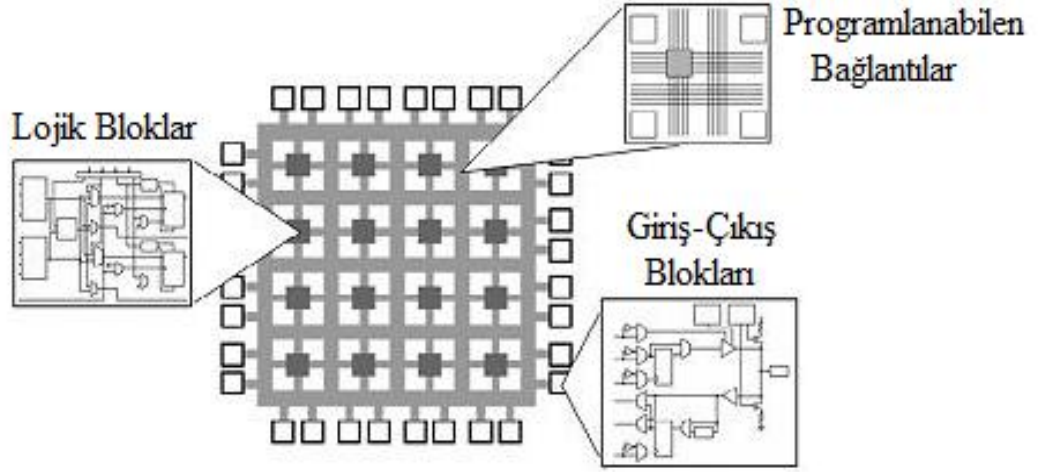
**Çizelge 3.4.** NO<sub>x</sub> sensörünün özellikleri

NO <sub>x</sub> ölçüm aralığı	0-3000 ppm
NO <sub>x</sub> ölçüm doğruluğu (0-1500 ppm aralığında)	± 20 ppm (0-100 ppm için) ± % 20 (100-1500 ppm için)
NO <sub>x</sub> cevap süresi	1650 ms
O <sub>2</sub> ölçüm aralığı	% 0-21
O <sub>2</sub> cevap süresi	1300 ms
Maksimum örnekleme frekansı	1 Hz
Sensör çalışma sıcaklığı	200-800 °C

Sensöre güç kaynağı sağlandığında sıcaklık 200 °C olana kadar bir ön ısıtma işlemi başlatılır. Bu sıcaklığın üzerine çıkınca sensörden veri akışı başlar. Sensörden gelen bilgi NI-9853 yüksek hızlı CAN modülü ile şasiye aktarılmıştır (National Instruments 2019).

#### 3.1.4. FPGA tabanlı şasi

Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) bir sayısal fonksiyonu gerçekleştirmek üzere kullanıcı tarafından programlanan ve paralel işlem yapabilen tümleşik devrelerdir. Bu sayede kontrol uygulamalarının çok hızlı gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca kapı sayıları ve giriş-çıkış birimlerinin fazla olması FPGA'ların gerçek zamanlı karmaşık uygulamalarda kullanılmasını elverişli kılmıştır. FPGA tümleşik devreler; lojik bloklar, programlanabilen bağlantılar ve giriş-çıkış bağlantılardan oluşur. FPGA tümleşik devre yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2.** FPGA tümleşik devre yapısı (National Instruments 2019)

Kompleks uygulamalarda kullanılan ve Mathworks firmasının geliştirdiği Simulink ile National Instruments firmasının geliştirdiği LabView programlama dilleri, FPGA'nın yapısında bulunan veri akış yapısıyla paralellik göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada, içinde FPGA tümleşik devrelerin bulunduğu ve LabView ile programlanan Compact RIO (cRIO) şasi kullanılmıştır. Şasi ile birlikte kullanılan her modül, doğrudan FPGA ile veri yolları aracılığıyla bağlantılıdır. Dizayn edilen programlar FPGA sayesinde gerçek zamanlı işletim sistemiyle çalıştığından yüksek hız gerektiren uygulamalar için oldukça elverişlidir. Deneylerde kullanılan NI-9039 model FPGA şasi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** Compact RIO şasi

### 3.1.5. Enjektör sürücü modülü

Bu tez çalışması kapsamında enjektörlerin kontrolü için Şekil 3.4'te gösterilen NI firmasına ait enjektör sürücü modülü kullanılmıştır. Bu modülün 3 adet enjektör sürücü kanalı mevcuttur. Fakat modül 3 adet selenoid enjektörü kontrol edebilmesine rağmen 2 adet piezo enjektörün kontrolüne izin vermektedir. Deneylerde kullanılan motor 4 silindirli ve piezo enjektörlere sahip olduğundan bu çalışmada 2 adet enjektör sürücü modülü kullanılmıştır. Modüllerin cRIO şasiye bağlanmasıyla enjektörlerin kontrolü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Enjektör sürücü modülü

### 3.1.6. Analog giriş modülü

Direkt enjeksiyonlu motorlarda püskürtmenin doğru zamanda yapılabilmesi için pistonların konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple pistonların konumunu belirlemek için motor üzerindeki bazı sensörlerden (krank ve kam mili sensörlerinden) veri alınmalıdır. Bu veriler Şekil 3.5'te gösterilen NI firmasına ait AD combo analog giriş modülü sayesinde alınmıştır (National Instruments 2019). Bu sayede istenilen açılarda püskürtme gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 3.5. AD combo analog giriş modülü

### 3.1.7. Termokupl modülü

K tipi termokupllar ile soğutma suyu ve egzoz gazı sıcaklıkları, National Instruments firmasına ait NI-9214 termokupl modülü kullanılarak ölçülmüştür. Şasiye bağlanan bu modül 16 kanallı, 68 örnek/s örnekleme hızına ve 0,02 °C ölçüm hassasiyetine sahiptir (National Instruments 2019).



Şekil 3.6. Temokupl modülü

### 3.1.8. Yakıt debisi ölçüm cihazı

Yapılandırılan deneylerde harcanan yakıt miktarını ölçmek için Kistler firmasına ait DFL3 modeli yakıt debisi ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan yakıt debisi ölçüm cihazı Şekil 3.7’de, cihaza ait özellikler ise Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.7. Yakıt debisi ölçüm cihazı

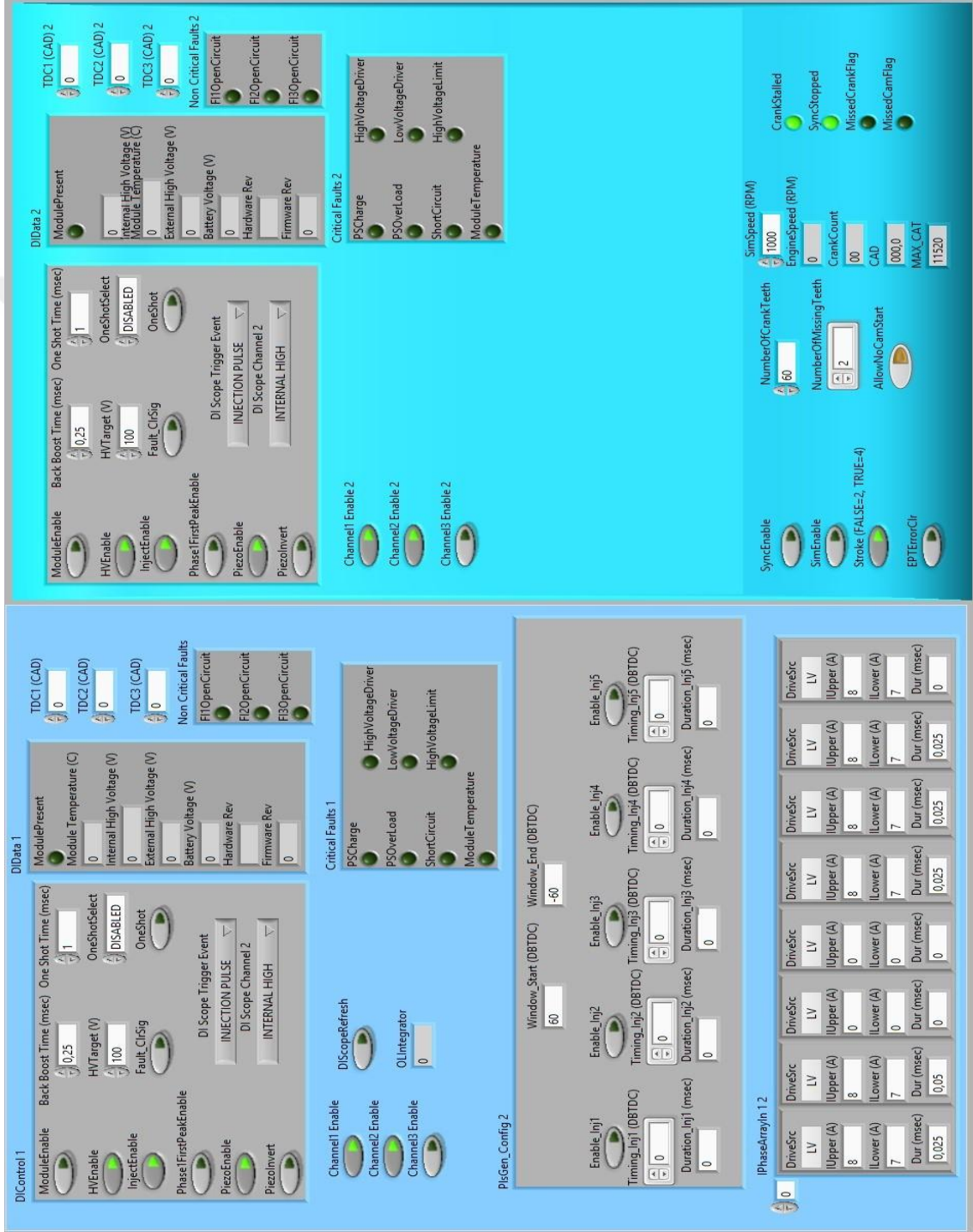
Çizelge 3.5. Yakıt debisi ölçüm cihazının özellikleri

Sensörün ölçüm aralığı	0,5-250 l/h
Maksimum pompa debisi (1 bar basınçta)	190 l/h
Maksimum pompa debisi (5 bar basınçta)	120 l/h
Ölçüm doğruluğu (1-50 L/h aralığında)	$\pm \%0,5$
Maksimum çalışma basıncı	5 bar
Bağlantı arayüzü	CAN/USB/RS-232C

### 3.1.9. Tasarlanan yazılım

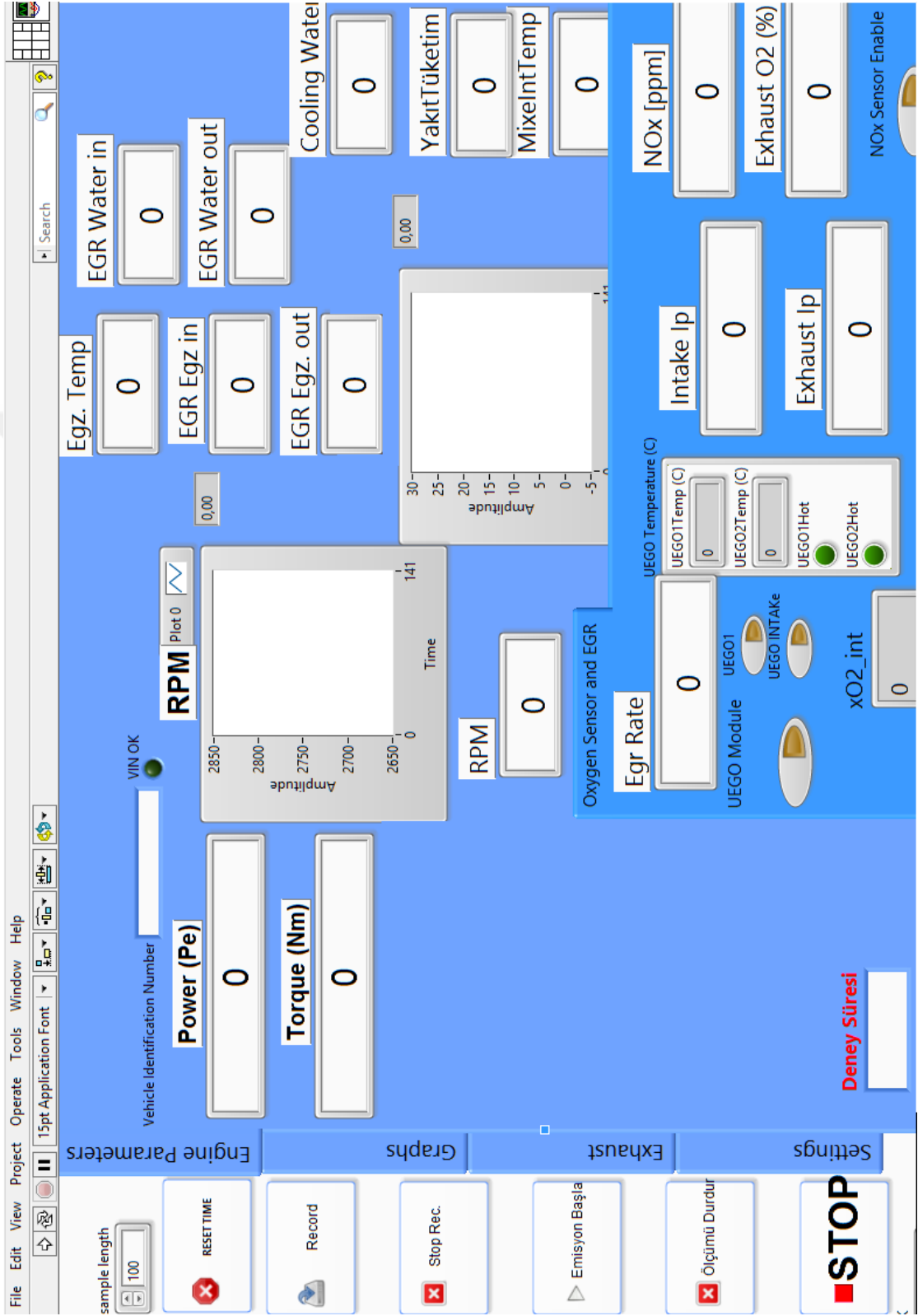
Deneysel enjektör püskürtme açılarının ve sürelerinin ayarlanması için cRIO şasiye bağlanan enjektör sürücü modülleri kullanılmıştır. Enjektör sürücü modüllerinin kontrolü LabView programında tasarlanan ve cRIO şasiye gömülen yazılım sayesinde gerçekleştirilmiştir. Enjektör açılarının ve sürelerinin ayarlandığı programın görüntüsü

Şekil 3.8’de, deneylerden elde edilen sonuçların gözlemlenmesi ve kaydedilmesi için hazırlanan programın görüntüsü ise Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8. Enjektörlerin kontrolü için tasarlanan yazılım





Şekil 3.9. Verilerin okunması ve kaydedilmesi için tasarlanan yazılım

## 3.2. Deneysel Yöntem

### 3.2.1. Taguchi metodu ile deney tasarımı

Bu tez çalışmasında 5 farklı motor çalışma koşulunda (1500-1750-2000-2250 ve 2500 dev/dk motor hızlarında ve kısmi yük şartlarında) deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm deneylerde 1. ön, 2. ön, ana ve art püskürtme olmak üzere her çevrimde 4 püskürtme stratejisi uygulanmıştır. Motor performans ve egzoz emisyon karakteristikleri üzerinde doğrudan etkili olan tüm bu püskürtmelerin açılarının ve sürelerinin etkileri geniş bir aralıkta incelenmek istenmiştir. Bu sebeple uygulanan stratejide her bir püskürtmenin 4 farklı açı ve 4 farklı sürede (yakıt miktarında) gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Püskürtme açıları ana püskürtme açısı esas alınarak değiştirilmiştir. Yani öncelikle ana püskürtmenin gerçekleştirileceği açılar belirlenmiş daha sonra diğer püskürtmelerin ana püskürtme ile arasındaki mesafeler belirlenmiştir. Bu şekilde püskürtme açıları her püskürtme için 4 seviye olarak belirlenmiştir. Püskürtme miktarları açısından ise bir çevrimdeki toplam püskürtme süresi dikkate alınmıştır. Ön püskürtmeler ile art püskürtmenin süreleri belli oranlarda (%5-10-15 ve 20) değiştirilmiştir. Çevrimdeki toplam püskürtme süresi ve bu 3 püskürtmenin (1. ön, 2. ön ve art püskürtme) süresi de belli olduğu için ana püskürtme süresi ayrıca bir faktör olarak ele alınmamıştır. Fakat bu durumda yapılması gereken deney sayısı  $4^7=16\ 384$  olmaktadır. Tek bir motor çalışma koşulunda bile gerçekleştirilemeyecek kadar çok olan deneyler, deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu kullanılarak azaltılmak istenmiştir. Ancak Taguchi metodunu kullanarak deney sayısını azaltabilmek için belirlenen faktörlerin ve seviyelerinin ortogonal dizilimlere uygun olması gerekmektedir. Bu sebeple art püskürtme açısının 2 seviyeli olarak ele alınmasıyla deneyler L32 dizilimi uygun hale getirilmiştir. Böylece gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı 32'ye indirgenmiştir.

Deneyler 4 seviyeli 6 faktör ve 2 seviyeli 1 faktör olarak Taguchi'nin L32 dizilimine göre dizayn edilmiş ve 2 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak 2500 dev/dk motor hızındaki deneyler gerçekleştirilirken L32 dizilimindeki bazı stratejilerde motorun

kararsız çalıştığı, bazılarında ise vuruşta meydana geldiği görülmüştür. Bu sebeple 2500 dev/dk deneyleri için faktörlerin seviyeleri gözden geçirilmiş ve bu deneyler 4 seviyeli 3 faktör ve 2 seviyeli 4 faktör olarak L16 dizilimine göre yeniden dizayn edilmiştir. Bu devir sayısı için gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı da 1024'ten 16'ya indirgenmiştir. Tüm çalışma koşulları için faktörlerin seviyeleri, gerçekleştirilen ön çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu ön çalışmalar esnasında, püskürtmeler arasındaki mesafenin 6 °KMA'dan az olduğu durumlarda püskürtme sinyallerinin birbirlerini etkilediği (üst üste bindiği) görülmüş ve bu nedenle püskürtmeler arası mesafe en az 6 °KMA olacak şekilde seçilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen faktörler ve seviyeleri Çizelge 3.6'te, Taguchi L32 ve L16 ortogonal dizileri de Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir (PB: Püskürtme Başlangıcı, PS:Püskürtme Süresi).

**Çizelge 3.6.** Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Seviyeler				
	1500 dev/dk	1750 dev/dk	2000 dev/dk	2250 dev/dk	2500 dev/dk
PB <sub>1.Ön</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	18-20-22-24	18-20-22-24	30-32-34-36	30-32-34-36	30-32-34-36
PB <sub>2.Ön</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	6-8-10-12	6-8-10-12	16-18-20-22	16-18-20-22	16-18-20-22
PB <sub>Ana</sub> (°KMA-ÜÖN'dan önce)	3-4-5-6	3-4-5-6	5-6-7-8	7-8-9-10	9-10-11-12
PB <sub>Art</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	12-14	12-14	16-18	16-18	18-20
PS <sub>1.Ön</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20				5-10
PS <sub>2.Ön</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20				5-10
PS <sub>Art</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20				5-10

**Çizelge 3.7.** L32 ortogonal dizisi

Deney No	PB <sub>Art</sub>	PS <sub>1.Ön</sub>	PS <sub>2.Ön</sub>	PS <sub>Art</sub>	PB <sub>1.Ön</sub>	PB <sub>2.Ön</sub>	PB <sub>Ana</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3
4	1	1	4	4	4	4	4
5	1	2	1	1	2	2	3
6	1	2	2	2	1	1	4
7	1	2	3	3	4	4	1
8	1	2	4	4	3	3	2
9	1	3	1	2	3	4	1
10	1	3	2	1	4	3	2
11	1	3	3	4	1	2	3
12	1	3	4	3	2	1	4
13	1	4	1	2	4	3	3
14	1	4	2	1	3	4	4
15	1	4	3	4	2	1	1
16	1	4	4	3	1	2	2
17	2	1	1	4	1	4	2
18	2	1	2	3	2	3	1
19	2	1	3	2	3	2	4
20	2	1	4	1	4	1	3
21	2	2	1	4	2	3	4
22	2	2	2	3	1	4	3
23	2	2	3	2	4	1	2
24	2	2	4	1	3	2	1
25	2	3	1	3	3	1	2
26	2	3	2	4	4	2	1
27	2	3	3	1	1	3	4
28	2	3	4	2	2	4	3
29	2	4	1	3	4	2	4
30	2	4	2	4	3	1	3
31	2	4	3	1	2	4	2
32	2	4	4	2	1	3	1

**Çizelge 3.8.** L16 ortogonal dizisi

Deney No	PB <sub>Art</sub>	PS <sub>1.Ön</sub>	PS <sub>2.Ön</sub>	PS <sub>Art</sub>	PB <sub>1.Ön</sub>	PB <sub>2.Ön</sub>	PB <sub>Ana</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	1	2	2
3	2	2	1	1	1	3	3
4	2	2	2	2	1	4	4
5	2	2	1	2	2	1	2
6	2	2	2	1	2	2	1
7	1	1	1	2	2	3	4
8	1	1	2	1	2	4	3
9	1	2	2	2	3	1	3
10	1	2	1	1	3	2	4
11	2	1	2	2	3	3	1
12	2	1	1	1	3	4	2
13	2	1	2	1	4	1	4
14	2	1	1	2	4	2	3
15	1	2	2	1	4	3	2
16	1	2	1	2	4	4	1

Deneylet neticesinde elde edilen verilerle varyans analizi gereyletirilerek faktörlerin sonuçlar üzerindeki etki seviyeleri incelenmiştir. Varyans analizi için F-testi kullanılmıştır. F testi ile varyansların eşitliği karşılaştırılır. Tek yönlü varyans analizinde F istatistiği; örnek ortalamaları arasındaki varyasyonun, örnekler içindeki varyasyona oranıdır. Yapılan deneylerde %95 güven aralığı seçilmiştir. Bu sebeple oluşturulan varyans tablosunda yer alan faktörlerin p değerinin 0,05'ten küçük olduğu faktörler istatistiksel olarak anlamlı olarak kabul edilmiştir.

### 3.2.2. Ekserji analizi

Yürütölen bu çalışmada bahsedilen dizel motor üzerinde belirlenen kontrol hacmi sınırlarında enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Yakıt enerjisi, yakıt ekserjisi, egzoz ekserjisi, ısıl kayıplar, üretilen net iş, ekserjitik ve termal verimler tüm devir sayılarında yapılan farklı enjeksiyon stratejileri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Sürekli akışlı açık bir sistemde kontrol hacmi için kütle ve enerji korunumu denklemleri Eş. (4) ve Eş. (5)'te verilmiştir.

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç = 0 \quad (4)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g \quad (5)$$

Elde edilen net güç Eş. (6)'da gösterilmiştir.

$$\dot{W} = \omega \cdot T = 2 \pi \cdot N \cdot T / 60 \quad (6)$$

Burada  $\omega$  açısal hız, T tork ve N devir sayısını ifade etmektedir.

Kontrol hacmine giren yakıt enerjisi Eş. (7)'de verilmiştir.

$$\dot{E}_y = \dot{m}_y \cdot H_u \quad (7)$$

Burada  $\dot{m}_y$  yakıtın kütleli debisi ve  $H_u$  da yakıtın alt ısıl değeridir.

Böylelikle sistemin termal verimi Eş. (8) ile hesaplanabilir (Cengel and Boles 2002).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_y} \quad (8)$$

Kontrol hacmindeki ekserji dengesi ise Eş. (9) ile gösterilmiştir (Moran 1989).

$$\dot{E}x_{\text{ısıt kayıp}} + \dot{E}x_W = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_ç - \dot{E}x_{\text{yıkım}} \quad (9)$$

Buradaki ifadeler sırasıyla ısı geçişi ile olan ekserji geçişi, iş ile ekserji geçişi, kontrol hacmine giren ve çıkan toplam ekserjiler ile tersiznmezlik/ekserji yıkımıdır.

İş ile ekserji geçişi Eş. (6) ile verilen fren gücüne eşittir ( $\dot{E}x_W = \dot{W}$ ).

Kontrol hacmine giren toplam ekserji, Eş. (10)'da gösterildiği gibi yakıtın ve havanın ekserjileri toplamına eşittir.

$$\sum \dot{E}x_g = \dot{E}x_y + \dot{E}x_h \quad (10)$$

Havanın termomekanik ve kimyasal ekserjileri referans duruma çok yakın olduğundan 0 kabul edilebilir ve böylece kontrol hacmine giren toplam ekserji yakıtın ekserjisine eşit olur ( $\sum \dot{E}x_g = \dot{E}x_y$ ). Ayrıca yakıtın termomekanik ekserjisi de referans duruma çok yakın olduğundan 0 olarak kabul edilebilir ve yakıtın sahip olduğu ekserji sadece kimyasal ekserjisi dikkate alınarak belirlenebilir. Bu durumda yakıtın ekserjisi Eş. (11) ile hesaplanır.

$$\dot{E}x_y = \dot{m}_y \cdot e_y \quad (11)$$

Burada  $\dot{m}_y$  yakıtın kütlesel debisidir.  $e_y$  ise sıvı yakıtın birim kütlesi başına özgül kimyasal ekserjisidir ve Eş. (12)'de gösterilmiştir.

$$e_f = H_u \cdot \varphi \quad (12)$$

$H_u$  yakıtın alt ısıl değerini, Eş. (13)'te gösterilen  $\varphi$  ise kimyasal ekserji faktörünü göstermektedir (Kotas 2013).

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728h/c + 0,0432o/c + 0,2169\alpha/c(1 - 2,0628h/c) \quad (13)$$

Kontrol hacminden çıkan toplam ekserji egzoz gazlarının ekserjilerine eşittir ve Eş. (14) ve Eş. (15)'te gösterilmiştir.  $\dot{E}x_{eg}$  egzoz gazlarının termomekanik ve kimyasal ekserjileri toplamıdır.

$$\sum \dot{E}x_{\zeta} = \dot{E}x_{eg} \quad (14)$$

$$\dot{E}x_{eg} = \sum \dot{m}_i (e_t + e_k)_i \quad (15)$$

$i$  indisi her bir egzoz gazı bileşenini ifade etmekte ve  $e_t$  ve  $e_k$  sırasıyla her  $i$  bileşeni için hesaplanan termomekanik ve kimyasal ekserjilerdir. Termomekanik ve kimyasal ekserji hesabı Eş. (16) ve Eş. (17)'de verilmiştir (Cengel and Boles 2002).

$$e_t = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (16)$$

$$e_k = \bar{R}T_0 \ln \frac{y_i}{y_e} \quad (17)$$

Isıl kayıplar; soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları ve Eş. (5)'in kontrol hacmine uygulanmasıyla Eş. (18), Eş. (19) ve Eş. (20) yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{E}x_{\text{Isıl kayıp}} = \sum (1 - T_0/T_{ss,ort}) \dot{Q} \quad (18)$$

$$T_{\text{wave}} = (T_{ss,g} + T_{ss,\zeta})/2 \quad (19)$$

$$\dot{Q} = \dot{E}_y - (\dot{E}x_W + \sum \dot{m}_{\zeta} h_{\zeta}) \quad (20)$$

Burada  $\dot{m}_{\zeta}$  hava ve yakıtın kütleli debileri toplamıdır ve Eş. (21)'de gösterilmiştir.

$$\dot{m}_{\zeta} = \dot{m}_y + \dot{m}_h \quad (21)$$

Ekserjitik verimi Eş. (22) ile ekserji yıkımı da Eş. (23) ile verilen ifade yardımıyla hesaplanır (Dincer and Rosen 2012).



$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_W}{\dot{E}x_y} \quad (22)$$

$$\dot{E}x_{y_{ikim}} = \dot{E}x_y - \dot{E}x_W - \dot{E}x_{eg} - \dot{E}x_{ısıllı kayıp} \quad (23)$$

### 3.2.3. Yapay sinir ağları ile modelleme

Bu tez çalışması kapsamında farklı motor çalışma koşullarında yapılan deney verileri kullanılarak yapay sinir ağları modeli oluşturulmuştur. Model, tümleşik bir python dağıtımı olan Anaconda'nın Spyder geliştirme ortamında Python dilinde ve farklı kütüphaneler kullanılarak yazılan programla oluşturulmuştur.

Yapay sinir ağları modeli oluşturulurken karmaşık problemlerin çözümü için sıklıkla kullanılan çok katmanlı algılayıcılardan yararlanılmıştır. Ağırlıkların güncellenmesi için kullanılan optimizasyon algoritması olarak Adam (adaptif moment) algoritması seçilmiştir. Gizli katman sayısı, katmanlardaki nöronların sayıları, kullanılan aktivasyon fonksiyonları ve öğrenme katsayısının değiştirilmesiyle oluşturulan modeller arasından uygun bir model seçimi gerçekleştirilmiştir.

Modeller oluşturulurken 9 adet giriş, 4 adet çıkış parametresi kullanılmıştır. Giriş parametresi olarak Taguchi tasarımında kullanılan püskürtme parametrelerinin yanı sıra devir sayısı ve tork değerleri kullanılmıştır. Çıkış parametreleri olarak da fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları dikkate alınmıştır.

### 3.3. Deneysel Belirsizlikler

Deney sonuçlarının kesinliği, ölçüm yapılan cihazların olası hatasına bağlıdır. Bu sebeple deneysel sonuçlardaki belirsizliğin tahmini için, temelini Kline ve McClintock'un oluşturduğu belirsizlik analizi yapılır. Yapılan bir deneyde, bağımsız değişkenlerin (x) ölçülmesiyle hesaplanan bağımlı değişken (R) aşağıda verilmiştir.

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sonuç değişkeninin belirsizliği  $\delta R$ ; Eş. (24)'te gösterildiği gibi hesaplanır (Moffat 1988).

$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

Deneyleerde hesaplanan ve bu hesaplamalarda kullanılan ölçümlerin doğruluğu ve değişkenlerin belirsizlikleri Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.9.** Ölçümlerin doğruluğu ve hesaplanan değişkenlerin belirsizlikleri

<b>Ölçülen Değişkenler</b>	<b>Doğruluk</b>
Yük	±0,1 kg
Motor hızı	±1 dev/dk
Yakıt tüketimi	±%0,5
Kimyasal ekserji faktörü	±%2,45
<b>Hesaplanan Değişkenler</b>	<b>Belirsizlik</b>
Güç	±%0,13
Özgül Yakıt Tüketimi	±%0,5
Termal Verim	±%1,12
Ekserjitik Verim	±%1,14

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Deneysel Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamındaki deneyler Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi farklı çalışma koşullarında ve stratejilerde Taguchi metodu ile elde edilen L32 ve (2500 dev/dk motor hızı için) L16 ortogonal dizilimlerine göre gerçekleştirilmiştir. Kısmi yük şartlarında 2 tekrarlı olarak toplamda 288 adet deney yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlarla ekserji analizi gerçekleştirilerek püskürtme stratejilerinin ısı ve egzoz kayıpları, ekserji yıkımı ve ekserjitik verim üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlarla Minitab 18 programı kullanılarak performans ve egzoz emisyonları için regresyon modelleri oluşturulmuş ve varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede faktörlerin (giriş parametrelerinin) çıkış parametreleri üzerindeki etki seviyeleri incelenmiştir. Ayrıca elde edilen verilerle bir yapay sinir ağı modeli oluşturularak deneyleri gerçekleştirilmeyen motor çalışma şartları için de performans ve emisyon sonuçları gözlemlenebilmiştir.

#### 4.1.1. 1500 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar

1500 dev/dk motor hızında ve kısmi yük şartında ( $\sim$ %12,5 - 40 Nm) gerçekleştirilen tekrarlı deneylerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan regresyon modelleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. 2 tekrarlı deneylerin varyans analizi sonuçları, fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için Çizelge 4.2'de, HC ve CO emisyonları için ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (1500 dev/dk)

Regresyon denklemleri	R <sup>2</sup> (%)
BSFC=320,27-1,122(PS <sub>1.ön</sub> )-3,329(PS <sub>2.ön</sub> )+1,576(PS <sub>art</sub> )-0,138(PB <sub>1.ön</sub> )-0,513(PB <sub>2.ön</sub> )-3,176(PB <sub>ana</sub> )+4,432(PB <sub>art</sub> )	79,81
NO <sub>x</sub> =262,7-3,70(PS <sub>1.ön</sub> )+7,89(PS <sub>2.ön</sub> )-13,14(PS <sub>art</sub> )-11,58(PB <sub>1.ön</sub> )-0,74(PB <sub>2.ön</sub> )+12,10(PB <sub>ana</sub> )+13,52(PB <sub>art</sub> )	58,05
HC=25,67-2,182(PS <sub>1.ön</sub> )-0,369(PS <sub>2.ön</sub> )-0,518(PS <sub>art</sub> )-0,235(PB <sub>1.ön</sub> )-0,819(PB <sub>2.ön</sub> )-0,433(PB <sub>ana</sub> )+4,05(PB <sub>art</sub> )	32,75
CO=0,0497+0,01191(PS <sub>1.ön</sub> )-0,01219(PS <sub>2.ön</sub> )-0,00016(PS <sub>art</sub> )+0,00410(PB <sub>1.ön</sub> )+0,00157(PB <sub>2.ön</sub> )-0,00077(PB <sub>ana</sub> )-0,00034(PB <sub>art</sub> )	71,30

**Çizelge 4.2.** 1500 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları

		Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC)				NO <sub>x</sub> Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	2329,95	332,850	31,63	0,000	45294,0	6470,6	11,07	0,000
PS <sub>1.ön</sub>	1	100,66	100,661	9,57	0,003	1095,3	1095,3	1,87	0,177
PS <sub>2.ön</sub>	1	886,55	886,554	84,24	0,000	4985,2	4985,2	8,53	0,005
PS <sub>Art</sub>	1	198,71	198,710	18,88	0,000	13811,9	13811,9	23,63	0,000
PB <sub>1.ön</sub>	1	1,53	1,533	0,15	0,704	10726,8	10726,8	18,35	0,000
PB <sub>2.ön</sub>	1	21,03	21,032	2,00	0,163	43,5	43,5	0,07	0,786
PB <sub>Ana</sub>	1	807,16	807,157	76,70	0,000	11707,8	11707,8	20,03	0,000
PB <sub>Art</sub>	1	314,30	314,303	29,87	0,000	2923,5	2923,5	5,00	0,029

**Çizelge 4.3.** 1500 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları

		HC Emisyonu				CO Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	749,07	107,009	3,90	0,002	0,024834	0,003548	19,87	0,000
PS <sub>1.ön</sub>	1	380,99	380,990	13,87	0,000	0,011343	0,011343	63,54	0,000
PS <sub>2.ön</sub>	1	10,91	10,912	0,40	0,531	0,011897	0,011897	66,64	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	21,43	21,428	0,78	0,381	0,000002	0,000002	0,01	0,917
PB <sub>1.ön</sub>	1	4,42	4,420	0,16	0,690	0,001345	0,001345	7,53	0,008
PB <sub>2.ön</sub>	1	53,64	53,638	1,95	0,168	0,000198	0,000198	1,11	0,296
PB <sub>Ana</sub>	1	14,98	14,981	0,55	0,463	0,000047	0,000047	0,26	0,610
PB <sub>Art</sub>	1	262,70	262,696	9,56	0,003	0,000002	0,000002	0,01	0,920

Faktörlerin çıkış parametreleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olup olmadığı varyans analizi neticesinde elde edilen p değerlerine bakılarak belirlenir. P değerinin 0,05'ten küçük olduğu faktörler çıkış parametreleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptirler. Tüm çalışma koşullarında yapılan deneylerde faktörlerin çıkış parametreleri üzerinde etkili olup olmadığının tespitinde bu değer ( $p < 0,05$ ) göz önüne alınmıştır. Bu nedenle 1. ve 2. ön püskürtme açıları ( $PB_{1.Ön}$  ve  $PB_{2.Ön}$ ) hariç diğer bütün faktörlerin fren özgül yakıt tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu Çizelge 4.2'de açıkça görülmektedir. Yine Çizelge 4.2'den 1. ön püskürtme süresi ve 2. ön püskürtme açısının ( $PS_{1.Ön}$  ve  $PB_{2.Ön}$ )  $NO_x$  emisyonu üzerinde anlamlı bir değişikliğe sebep olmadığı görülmektedir.

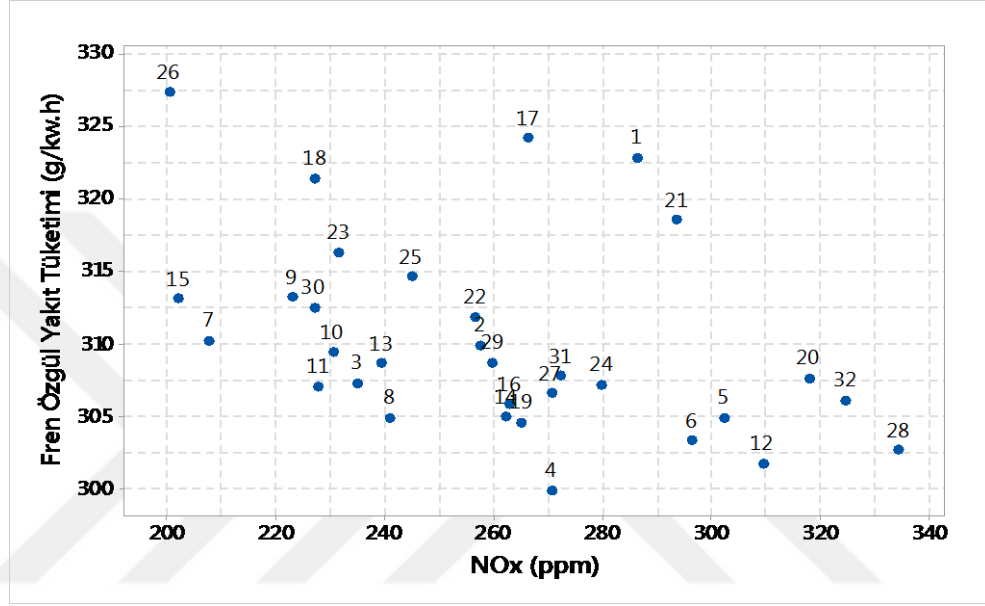
Çizelge 4.3'ten HC emisyonu üzerinde sadece 1. ön püskürtme süresinin ve art püskürtme açısının ( $PS_{1.Ön}$  ve  $PB_{Art}$ ), CO emisyonu üzerinde ise sadece 1. ve 2. ön püskürtme süreleri ile 1. ön püskürtme açısının ( $PS_{1.Ön}$ ,  $PS_{2.Ön}$  ve  $PB_{1.Ön}$ ) anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışma koşulunda yapılan deneylerden elde edilen ve yapay sinir ağları modelinde çıkış parametresi olarak kullanılan fren özgül yakıt tüketimi,  $NO_x$ , HC ve CO emisyonları değerleri ile ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar (aynı püskürtme stratejisine sahip tekrarlı deneylerin ortalamaları alınarak) Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** 1500 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları

Deney No	Fren Özgül Yakıt Tük. (g/kW.h)	NOx (ppm)	HC (ppm)	CO (% Hacim)	Yakıt Eks. (kW)	İş Eks. (kW)	Eks. Verim (%)	Termal Verim (%)	Isı Kaybı Eks. (kW)	Egzoz Eks. (kW)	Ekserji Yıkımı (kW)
1	322,793	286,242	27,144	0,071	25,881	6,302	24,35	25,96	1,594	4,763	13,223
2	309,875	257,351	29,383	0,060	25,441	6,446	25,34	27,01	1,518	4,694	12,784
3	307,254	234,974	29,888	0,040	25,233	6,455	25,58	27,27	1,499	4,623	12,656
4	299,874	270,695	15,255	0,040	24,794	6,494	26,19	27,92	1,454	4,520	12,326
5	304,874	302,29	16,000	0,050	25,018	6,440	25,74	27,44	1,504	4,553	12,521
6	303,314	296,403	15,152	0,040	25,001	6,475	25,90	27,61	1,498	4,522	12,507
7	310,208	207,611	16,159	0,050	25,532	6,464	25,32	26,99	1,524	4,690	12,854
8	304,894	240,733	15,000	0,040	25,199	6,490	25,75	27,45	1,471	4,653	12,586
9	313,202	222,867	15,000	0,070	25,565	6,411	25,08	26,73	1,529	4,733	12,892
10	309,362	230,305	15,000	0,070	25,364	6,444	25,41	27,08	1,518	4,670	12,732
11	307,057	227,762	16,683	0,049	25,296	6,473	25,59	27,28	1,486	4,663	12,674
12	301,744	309,343	15,725	0,040	24,795	6,455	26,03	27,75	1,458	4,524	12,359
13	308,616	239,378	16,000	0,120	25,279	6,422	25,40	27,08	1,534	4,581	12,743
14	304,916	262,246	15,993	0,102	24,826	6,397	25,77	27,47	1,502	4,493	12,436
15	313,077	202,044	16,487	0,070	25,448	6,370	25,03	26,68	1,527	4,683	12,869
16	305,797	262,861	18,637	0,060	24,843	6,375	25,66	27,36	1,469	4,554	12,445
17	324,153	266,195	19,144	0,065	26,237	6,356	24,23	25,83	1,632	4,782	13,468
18	321,369	227,118	22,000	0,074	26,040	6,367	24,45	26,06	1,587	4,799	13,288
19	304,54	265,007	21,113	0,033	24,670	6,355	25,76	27,46	1,455	4,556	12,305
20	307,567	317,834	21,721	0,030	24,644	6,296	25,55	27,23	1,474	4,503	12,370
21	318,457	293,515	26,505	0,050	25,338	6,258	24,70	26,33	1,553	4,622	12,906
22	311,794	256,622	24,496	0,050	25,206	6,350	25,19	26,85	1,528	4,587	12,741
23	316,257	231,495	27,000	0,040	24,833	6,172	24,85	26,49	1,500	4,571	12,591
24	307,136	279,791	27,491	0,040	24,782	6,331	25,55	27,23	1,474	4,557	12,420
25	314,567	244,814	28,661	0,070	25,150	6,287	25,00	26,65	1,522	4,613	12,729
26	327,244	200,236	30,000	0,070	25,959	6,237	24,03	25,61	1,597	4,783	13,343
27	306,587	270,446	29,000	0,050	24,823	6,364	25,64	27,33	1,485	4,542	12,433
28	302,634	334,209	29,000	0,050	24,479	6,355	25,96	27,68	1,451	4,475	12,199
29	308,654	259,643	15,204	0,120	24,893	6,325	25,41	27,08	1,516	4,523	12,529
30	312,492	226,85	15,000	0,100	25,205	6,340	25,15	26,81	1,529	4,602	12,735
31	307,776	272,183	11,719	0,070	24,788	6,321	25,50	27,19	1,492	4,516	12,458
32	306,052	324,62	11,423	0,050	24,567	6,313	25,70	27,39	1,454	4,510	12,290

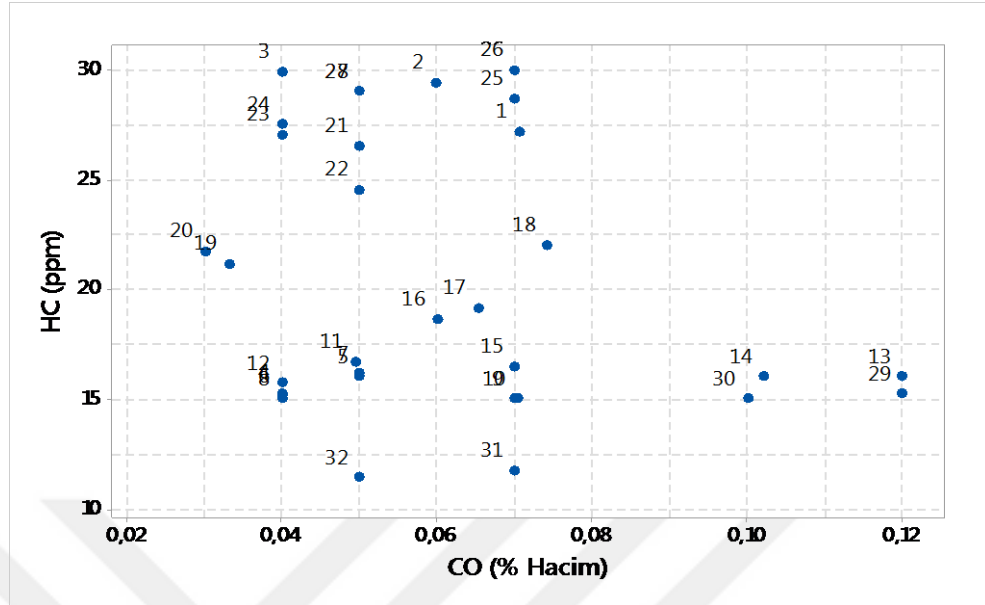
Çizelge 4.4'te verilen deney sonuçlarından fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub> emisyonuna ait sonuçlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Performans ve emisyon karakteristikleri açısından önemli olan bu iki parametrenin püskürtme stratejisinin değişmesi ile büyük oranda değiştiği ilgili şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.1. 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu sonuçları

Deneylerde en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri 4 numaralı püskürtme stratejisinde elde edilmiştir. Fren özgül yakıt tüketimi değerinin en yüksek olduğu 26 numaralı stratejinin aynı zamanda en düşük NO<sub>x</sub> emisyonuna sahip olduğu açıkça görülür. NO<sub>x</sub> emisyonunun en yüksek olduğu strateji ise 28 numaralı stratejidir ve bu stratejide de fren özgül yakıt tüketimi değerinin çok düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu durum aynı çalışma koşulunda düşük fren özgül yakıt tüketimi değerine sahip olan stratejide yanmanın daha iyi gerçekleştiğini ve dolayısıyla NO<sub>x</sub> emisyonunun arttığını göstermektedir.

Deneylerden elde edilen HC ve CO emisyonlarına ait sonuçlar ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

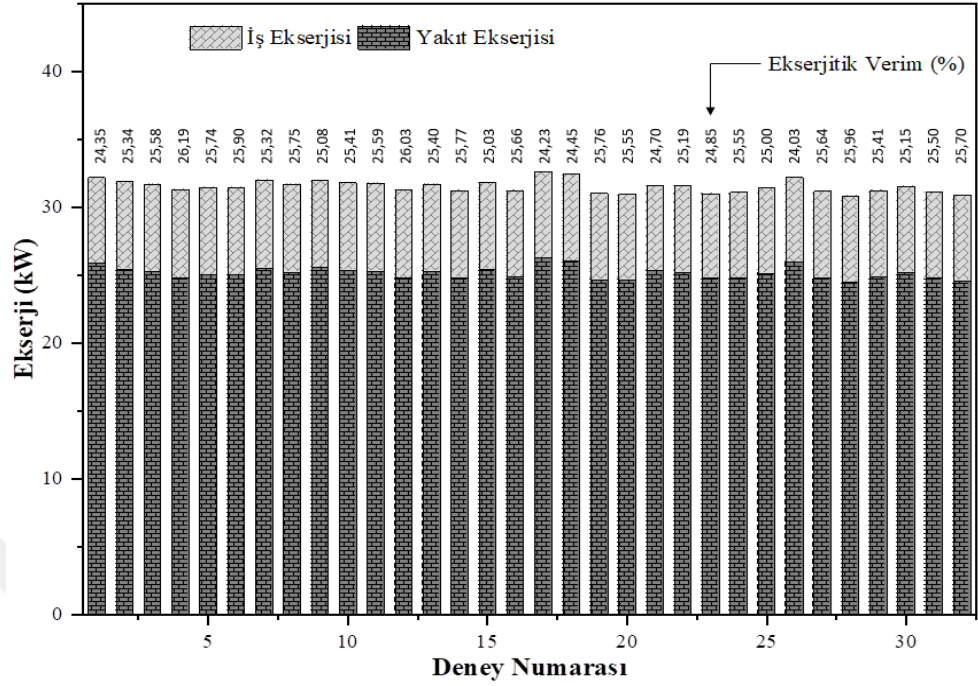


**Şekil 4.2.** 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları

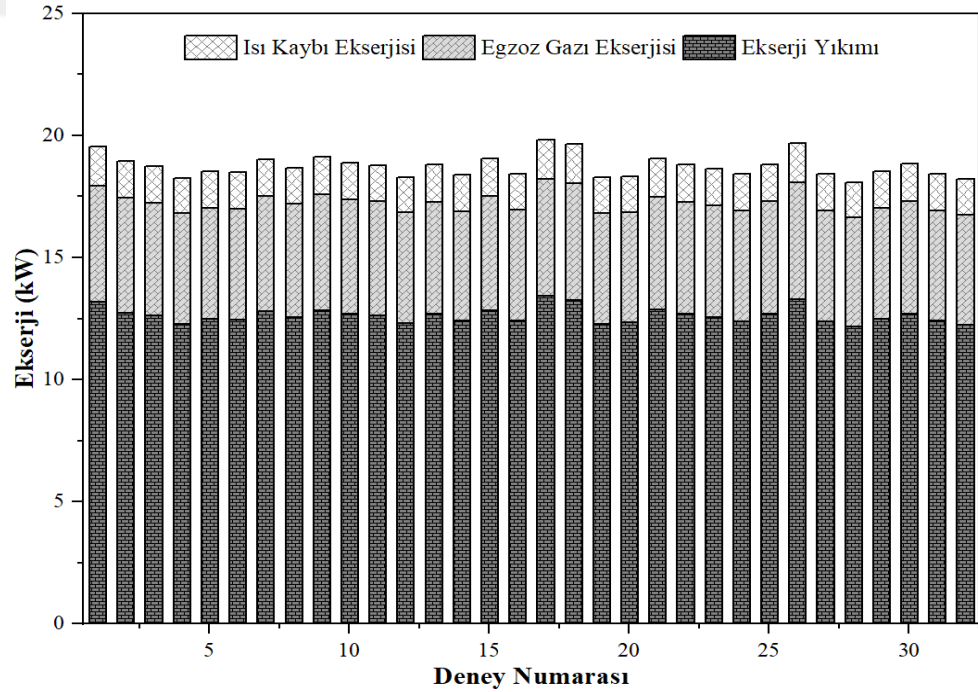
Elde edilen sonuçlara göre en düşük HC emisyonu 11,423 ppm ile 32 numaralı stratejide elde edilirken en düşük CO emisyonu ise 0,03 (% hacim) ile 20 numaralı stratejide elde edilmiştir. En yüksek değerler ise HC emisyonu için 26, CO emisyonu için ise 13 ve 29 numaralı stratejilerde oluşmuştur. Fakat sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma fakir karışım olarak gerçekleştiğinden HC ve CO emisyonları zaten düşük seviyededir (Heywood 1988).

Yapılan ekserji analizinde, harcanan yakıt miktarından elde edilen yakıt eksejisi ve üretilen güç hesaplanmış bunlara bağlı olarak da ekserjitik verim değeri her bir strateji için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yakıt ekserjisi, işe dönüşen ekserji ve ekserjitik verimler Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca motordan meydana gelen ısı transferi ve egzoz gazları ile kaybedilen ekserjiler ile ekserji yıkımı değerleri de Şekil 4.4'te verilmiştir.





Şekil 4.3. 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları



Şekil 4.4. 1500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları

Şekil 4.3'ten yakıt ekserjisinin en yüksek değerinin 17 numaralı strateji ile elde edilmesine karşın bu stratejiden elde edilen verimin en düşük seviyeye yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi motordan egzoz gazları ve ısı kaybı nedeniyle atılan ekserji ile ekserji yıkımı değerlerine bakılarak açıklanabilir. Şekil 4.4'ten görüleceği üzere 17 numaralı stratejide belirten kayıplar ve yıkım en yüksek değerdedir. Ekserjitik verimin, en düşük fren özgül yakıt tüketimi değerini veren 4 numaralı stratejide %26,19 ile en yüksek değerini aldığı ve kayıpların (ısı, egzoz ve yıkım) bu stratejide düşük seviyede olduğu ilgili şekillerden açıkça görülmektedir.

#### 4.1.2. 1750 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar

1750 dev/dk motor hızında ve kısmi yük şartında (~%16,5 – 54 Nm) gerçekleştirilen tekrarlı deneylerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan regresyon modelleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (1750 dev/dk)

Regresyon denklemleri	R <sup>2</sup> (%)
BSFC=294,94-1,703(PS_1.ön)-2,398(PS_2.ön)+3,483(PS_art)+0,478(PB_1.ön)+0,132(PB_2.ön)-2,143(PB_ana)+0,448(PB_art)	85,48
NO <sub>x</sub> =214,1+10,56(PS_1.ön)+25,07(PS_2.ön)-20,84(PS_art)-12,87(PB_1.ön)+3,08(PB_2.ön)+15,60(PB_ana)+17,75(PB_art)	76,43
HC=9,41+2,945(PS_1.ön)+0,550(PS_2.ön)-0,065(PS_art)+0,300(PB_1.ön)+0,256(PB_2.ön)+0,158(PB_ana)+8,983(PB_art)	95,69
CO=0,00446+0,01740(PS_1.ön)-0,00375(PS_2.ön)-0,00123(PS_art)+0,00333(PB_1.ön)+0,00081(PB_2.ön)+0,00040(PB_ana)+0,00805(PB_art)	79,43

2 tekrarlı deneylerin varyans analizi sonuçları, fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için Çizelge 4.6'da, HC ve CO emisyonları için ise Çizelge 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** 1750 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları

		Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC)				NO <sub>x</sub> Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	2052,74	293,249	47,10	0,000	132467	18923,9	25,94	0,000
PS <sub>1.Ön</sub>	1	232,03	232,031	37,26	0,000	8914	8914,1	12,22	0,001
PS <sub>2.Ön</sub>	1	460,09	460,090	73,89	0,000	50283	50283,3	68,93	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	970,46	970,457	155,85	0,000	34740	34740,0	47,62	0,000
PB <sub>1.Ön</sub>	1	18,27	18,271	2,93	0,092	13249	13249,2	18,16	0,000
PB <sub>2.Ön</sub>	1	1,40	1,400	0,22	0,637	761	760,7	1,04	0,312
PB <sub>Ana</sub>	1	367,28	367,283	58,99	0,000	19481	19480,5	26,70	0,000
PB <sub>Art</sub>	1	3,21	3,211	0,52	0,476	5039	5039,3	6,91	0,011

**Çizelge 4.7.** 1750 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları

		HC Emisyonu				CO Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	2023,94	289,13	177,81	0,000	0,027451	0,003922	30,89	0,000
PS <sub>1.Ön</sub>	1	693,92	693,92	426,73	0,000	0,024213	0,024213	190,75	0,000
PS <sub>2.Ön</sub>	1	24,22	24,22	14,89	0,000	0,001126	0,001126	8,87	0,004
PS <sub>Art</sub>	1	0,34	0,34	0,21	0,649	0,000120	0,000120	0,95	0,334
PB <sub>1.Ön</sub>	1	7,20	7,20	4,43	0,040	0,000889	0,000889	7,01	0,011
PB <sub>2.Ön</sub>	1	5,26	5,26	3,24	0,077	0,000052	0,000052	0,41	0,523
PB <sub>Ana</sub>	1	2,00	2,00	1,23	0,272	0,000013	0,000013	0,10	0,753
PB <sub>Art</sub>	1	1291,01	1291,01	793,92	0,000	0,001037	0,001037	8,17	0,006

Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi fren özgül yakıt tüketimi için 1. ön, 2. ön ve art püskürtme açıları (PB<sub>1.Ön</sub>, PB<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) hariç diğer bütün faktörler anlamlı bir etkiye sahiptir. NO<sub>x</sub> emisyonu için ise sadece 2. ön püskürtme açısının (PB<sub>2.Ön</sub>) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Çizelge 4.7’den hem HC hem de CO emisyonları için art püskürtme süresi, 2. ön ve ana püskürtme açılarının (PS<sub>Art</sub>, PB<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>Ana</sub>) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

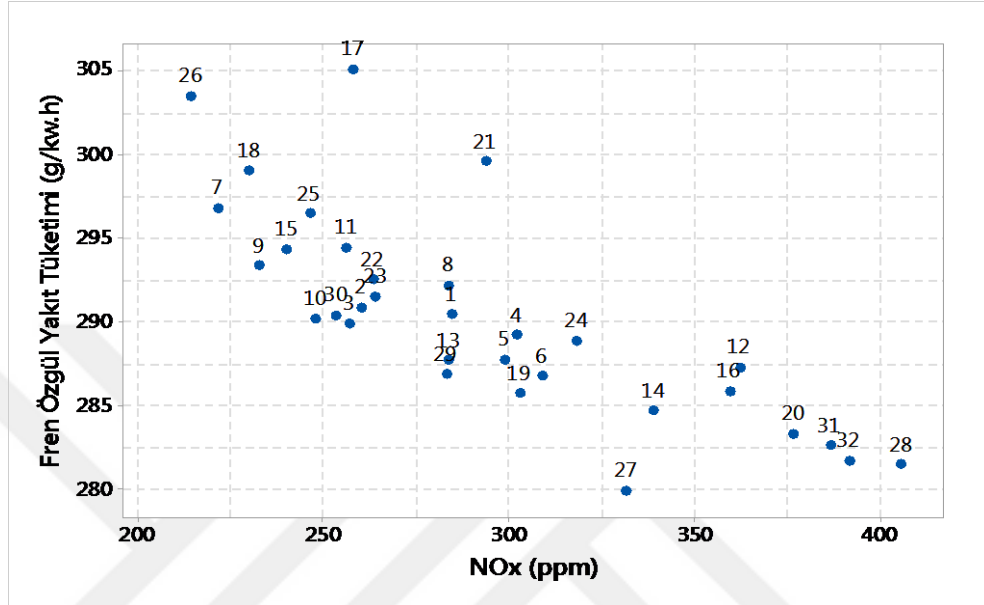
Bu çalışma koşulunda yapılan deneylerden elde edilen ve yapay sinir ağları modelinde çıkış parametresi olarak kullanılan fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları

değerleri ile ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar (aynı püskürtme stratejisine sahip tekrarlı deneylerin ortalamaları alınarak) Çizelge 4.8’te verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** 1750 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları

Deney No	Fren Özgül Yakıt Tük. (g/kW.h)	NO <sub>x</sub> (ppm)	HC (ppm)	CO (% Hac.)	Yakıt Eks. (kW)	İş Eks. (kW)	Eks. Verim (%)	Termal Verim (%)	Isı Kaybı Eks. (kW)	Egzoz Eks. (kW)	Ekserji Yıkımı (kW)
1	290,415	284,399	21,485	0,050	35,945	9,720	27,04	28,83	2,084	6,636	17,504
2	290,843	259,988	23,000	0,040	36,246	9,784	26,99	28,77	2,088	6,757	17,616
3	289,904	256,887	23,000	0,038	36,520	9,904	27,12	28,91	2,093	6,829	17,695
4	289,194	301,858	25,000	0,040	36,457	9,903	27,16	28,96	2,078	6,873	17,603
5	287,726	298,776	27,000	0,040	35,626	9,727	27,30	29,11	2,007	6,714	17,177
6	286,731	308,711	26,000	0,040	35,940	9,860	27,43	29,25	2,023	6,782	17,276
7	296,811	221,528	28,000	0,040	37,464	9,916	26,47	28,21	2,152	7,111	18,285
8	292,196	283,739	28,000	0,040	36,860	9,902	26,86	28,64	2,067	7,115	17,776
9	293,354	232,622	31,050	0,060	36,813	9,854	26,77	28,53	2,075	7,059	17,825
10	290,212	247,828	33,000	0,070	36,094	9,778	27,09	28,88	2,027	6,872	17,417
11	294,453	256,155	30,238	0,050	37,157	9,907	26,66	28,42	2,114	7,137	18,000
12	287,236	362,024	32,000	0,050	36,257	9,898	27,30	29,10	2,029	6,914	17,417
13	287,676	283,637	32,681	0,100	36,283	9,909	27,31	29,11	2,041	6,900	17,433
14	284,664	338,775	35,000	0,090	35,882	9,908	27,61	29,43	2,035	6,708	17,232
15	294,324	240,095	33,000	0,070	37,057	9,897	26,71	28,47	2,117	7,065	17,978
16	285,823	359,252	33,000	0,070	36,113	9,913	27,45	29,26	2,007	6,921	17,273
17	305,081	257,996	33,416	0,050	38,486	9,917	25,77	27,47	2,242	7,399	18,929
18	299,008	229,841	34,069	0,040	37,626	9,884	26,27	28,00	2,130	7,313	18,300
19	285,698	302,802	35,356	0,040	35,855	9,861	27,50	29,32	1,970	6,887	17,137
20	283,292	376,441	36,634	0,040	35,828	9,931	27,72	29,55	1,965	6,868	17,065
21	299,560	293,596	35,000	0,040	37,760	9,898	26,21	27,94	2,187	7,180	18,495
22	292,487	263,247	37,000	0,040	36,990	9,934	26,86	28,63	2,084	7,091	17,881
23	291,491	263,981	36,000	0,040	36,799	9,929	26,98	28,76	2,059	7,071	17,741
24	288,885	318,181	36,000	0,050	36,557	9,940	27,19	28,98	2,026	7,063	17,529
25	296,462	246,184	37,000	0,060	37,393	9,919	26,53	28,28	2,127	7,168	18,179
26	303,462	214,245	38,000	0,070	38,481	9,965	25,90	27,61	2,227	7,448	18,840
27	279,879	331,549	39,000	0,060	35,636	10,012	28,10	29,95	1,951	6,763	16,910
28	281,467	405,462	39,000	0,070	35,879	10,039	27,98	29,83	1,974	6,819	17,047
29	286,822	282,898	41,000	0,120	36,663	10,052	27,42	29,23	2,055	6,975	17,580
30	290,389	253,311	43,000	0,110	37,313	10,109	27,09	28,88	2,102	7,172	17,930
31	282,593	386,471	40,020	0,095	36,202	10,068	27,81	29,65	2,018	6,864	17,253
32	281,685	391,558	43,000	0,090	36,034	10,053	27,90	29,74	1,986	6,886	17,109

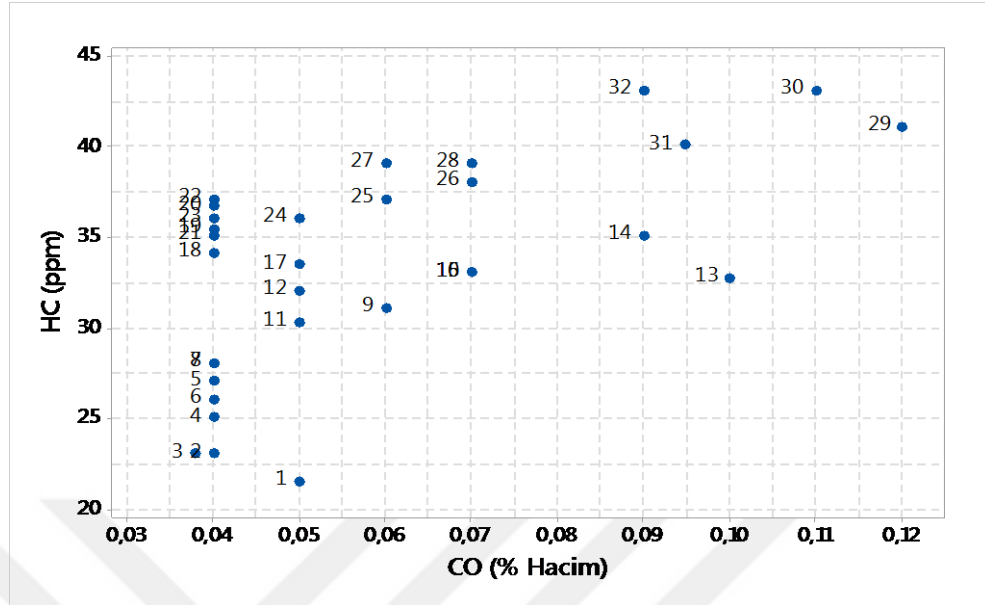
Çizelge 4.8’de verilen deney sonuçlarından fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub> emisyonuna ait sonuçlar Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



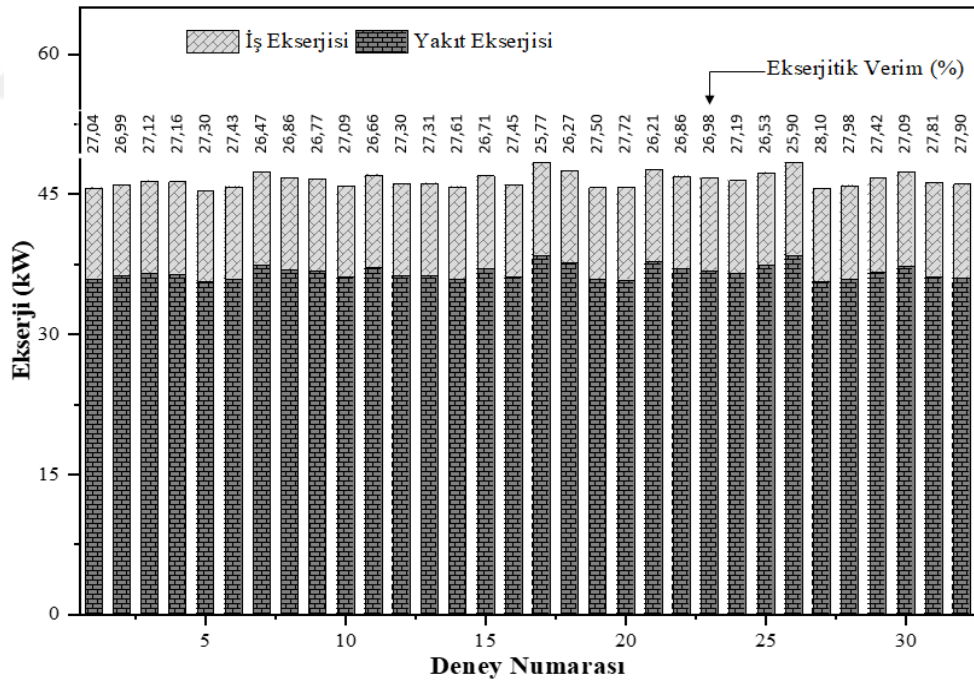
**Şekil 4.5.** 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu sonuçları

Deneyleerde en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri 27 numaralı stratejide elde edilirken en yüksek 17 numaralı stratejide elde edilmiştir. En düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 26 numaralı stratejide iken en yüksek 28 numaralı stratejide gerçekleşmiştir. Şekil 4.5’teki sonuçlardan fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub> emisyonunun genel olarak ters ilişkili olduğu görülmektedir. Yani NO<sub>x</sub> emisyonunu artıran stratejilerin fren özgül yakıt tüketimini azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir.

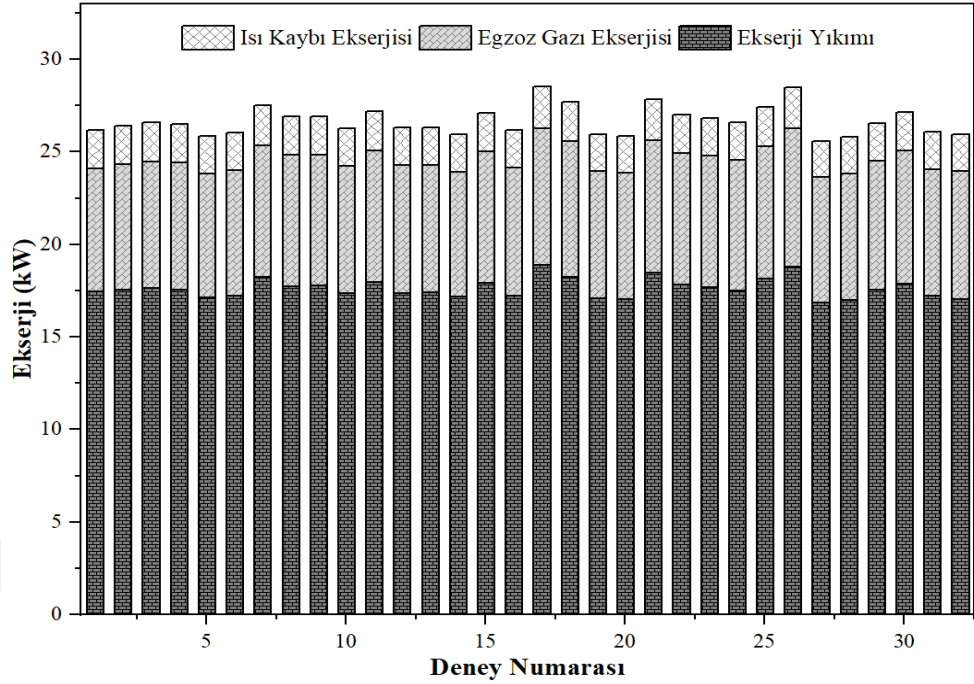
Deneyleerden elde edilen HC ve CO emisyonlarına ait sonuçlar Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en düşük HC emisyonu 1 numaralı stratejide elde edilirken en yüksek 30 ve 32 numaralı stratejilerde elde edilmiştir. CO emisyonu için ise bazı stratejiler arasında farklılık olsa da bir çok strateji arasında farklılık gözlemlenememiştir. Ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.6. 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları



Şekil 4.7. 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları



**Şekil 4.8.** 1750 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları

Şekil 4.7'den yakıt ekserjisinin en yüksek değerinin (1500 dev/dk çalışma koşulunda olduğu gibi) 17 numaralı strateji ile elde edilmesine karşın bu stratejiden elde edilen ekserjitik verimin en düşük seviye olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi Şekil 4.8'den görüleceği üzere motordan egzoz gazları ve ısı kaybı nedeniyle atılan ekserji ile ekserji yıkımının 17 numaralı stratejide en yüksek değerde olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.1.3. 2000 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar

2000 dev/dk motor hızında ve kısmi yük şartında (~%21,5 - 70 Nm) 2 tekrarlı olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan regresyon modelleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Yapılan varyans analizi sonuçları, fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için Çizelge 4.10'da, HC ve CO emisyonları için ise Çizelge 4.11'de verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2000 dev/dk)

Regresyon denklemleri	R <sup>2</sup> (%)
BSFC=288,34-0,187(PS <sub>1.ön</sub> )-3,128(PS <sub>2.ön</sub> )+4,63(PS <sub>art</sub> )-0,203(PB <sub>1.ön</sub> )+0,568(PB <sub>2.ön</sub> )-3,047(PB <sub>ana</sub> )+2,560(PB <sub>art</sub> )	87,81
NO <sub>x</sub> =121,0+27,86(PS <sub>1.ön</sub> )+61,03(PS <sub>2.ön</sub> )-32,63(PS <sub>art</sub> )-15,89(PB <sub>1.ön</sub> )+5,14(PB <sub>2.ön</sub> )+10,77(PB <sub>ana</sub> )+44,3(PB <sub>art</sub> )	78,04
HC=36,405+1,064(PS <sub>1.ön</sub> )+0,176(PS <sub>2.ön</sub> )+0,023(PS <sub>art</sub> )-0,033(PB <sub>1.ön</sub> )+0,252(PB <sub>2.ön</sub> )-0,090(PB <sub>ana</sub> )+1,182(PB <sub>art</sub> )	59,70
CO=-0,0530+0,03799(PS <sub>1.ön</sub> )+0,00612(PS <sub>2.ön</sub> )-0,00053(PS <sub>art</sub> )+0,00149(PB <sub>1.ön</sub> )+0,00648(PB <sub>2.ön</sub> )+0,00074(PB <sub>ana</sub> )+0,01595(PB <sub>art</sub> )	74,93

**Çizelge 4.10.** 2000 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları

		Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC)				NO <sub>x</sub> Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	3376,24	482,32	57,60	0,000	508190	72599	28,43	0,000
PS <sub>1.ön</sub>	1	2,79	2,79	0,33	0,566	62103	62103	24,32	0,000
PS <sub>2.ön</sub>	1	782,80	782,80	93,49	0,000	297974	297974	116,67	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	1713,91	1713,91	204,68	0,000	85171	85171	33,35	0,000
PB <sub>1.ön</sub>	1	3,31	3,31	0,39	0,532	20198	20198	7,91	0,007
PB <sub>2.ön</sub>	1	25,78	25,78	3,08	0,085	2113	2113	0,83	0,367
PB <sub>Ana</sub>	1	742,75	742,75	88,70	0,000	9280	9280	3,63	0,062
PB <sub>Art</sub>	1	104,90	104,90	12,53	0,001	31351	31351	12,28	0,001

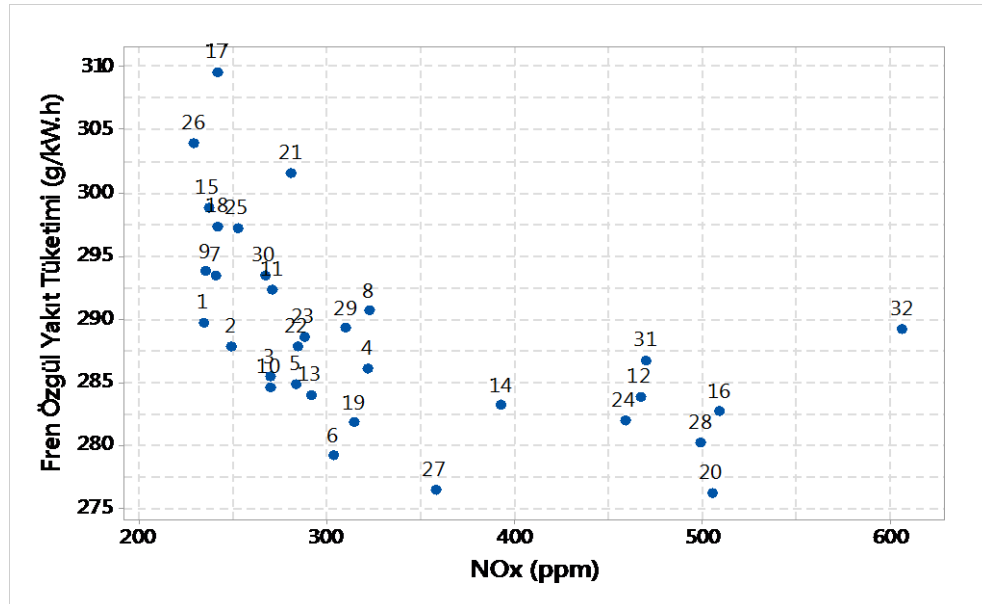
**Çizelge 4.11.** 2000 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları

		HC Emisyonu				CO Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	121,220	17,3171	11,85	0,000	0,126158	0,018023	23,91	0,000
PS <sub>1.ön</sub>	1	90,542	90,5416	61,97	0,000	0,115489	0,115489	153,25	0,000
PS <sub>2.ön</sub>	1	2,474	2,4737	1,69	0,199	0,003000	0,003000	3,98	0,051
PS <sub>Art</sub>	1	0,043	0,0434	0,03	0,864	0,000022	0,000022	0,03	0,864
PB <sub>1.ön</sub>	1	0,086	0,0858	0,06	0,809	0,000177	0,000177	0,23	0,630
PB <sub>2.ön</sub>	1	5,095	5,0947	3,49	0,067	0,003356	0,003356	4,45	0,039
PB <sub>Ana</sub>	1	0,644	0,6436	0,44	0,510	0,000043	0,000043	0,06	0,812
PB <sub>Art</sub>	1	22,337	22,3372	15,29	0,000	0,004070	0,004070	5,40	0,024



Çizelge 4.10'dan fren özgül yakıt tüketimi için 1. ön püskürtme süresi, 1. ön ve art püskürtme açılarının ( $PS_{1.Ön}$ ,  $PB_{1.Ön}$  ve  $PB_{2.Ön}$ ) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülürken,  $NO_x$  emisyonu için ise sadece 2. ön ve ana püskürtme açısının ( $PB_{2.Ön}$  ve  $PB_{Ana}$ ) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Çizelge 4.11'den HC emisyonu için sadece 1. ön püskürtme süresinin ve art püskürtme açısının ( $PS_{1.Ön}$  ve  $PB_{Art}$ ) anlamlı etkisi olduğu görülürken, CO emisyonu için ise art püskürtme süresi, 1. ön ve ana püskürtme açıları ( $PS_{Art}$ ,  $PB_{1.Ön}$  ve  $PB_{Ana}$ ) hariç diğer faktörlerin anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (0,051 p değeri olan 2. ön püskürtme süresi etkili kabul edilebilir).

Yapılan deneylerden elde edilen fren özgül yakıt tüketimi ile  $NO_x$  emisyonuna ait sonuçlar Şekil 4.9'da, HC ve CO emisyonları için de Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Deneylerde en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri 20 numaralı stratejide elde edilirken, önceki deneylerde olduğu gibi en yüksek 17 numaralı stratejide elde edilmiştir. En düşük  $NO_x$  emisyonu 26 numaralı stratejide iken en yüksek 32 numaralı stratejide gerçekleşmiştir.

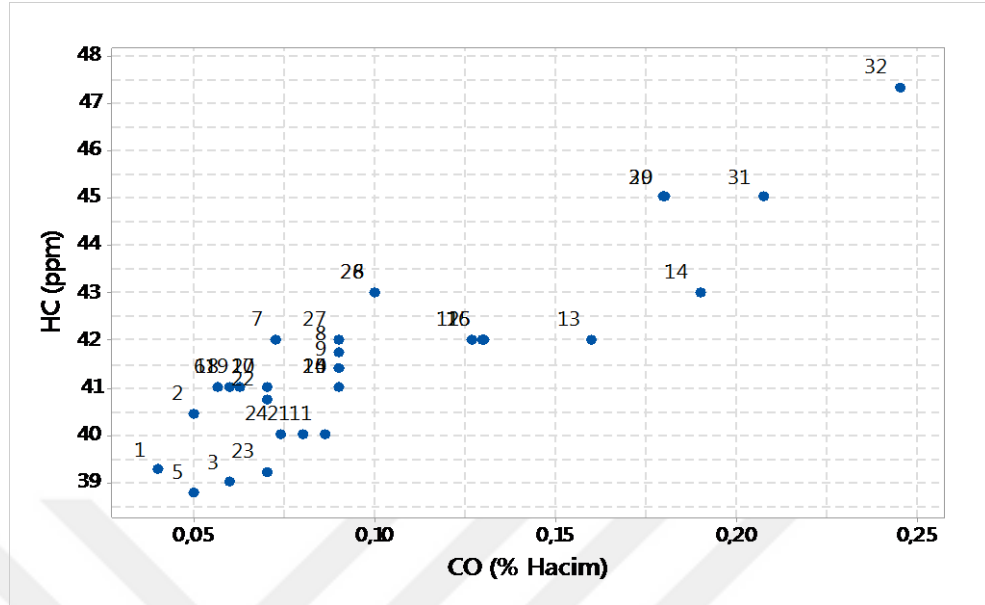


Şekil 4.9. 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve  $NO_x$  emisyonu sonuçları

Bu çalışma koşulunda yapılan deneylerden elde edilen ve yapay sinir ağıları modelinde çıkış parametresi olarak kullanılan fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları ile ekserji analizinden elde edilen sonuçlar (aynı püskürtme stratejisine sahip tekrarlı deneylerin ortalamaları alınarak) Çizelge 4.12’de verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** 2000 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları

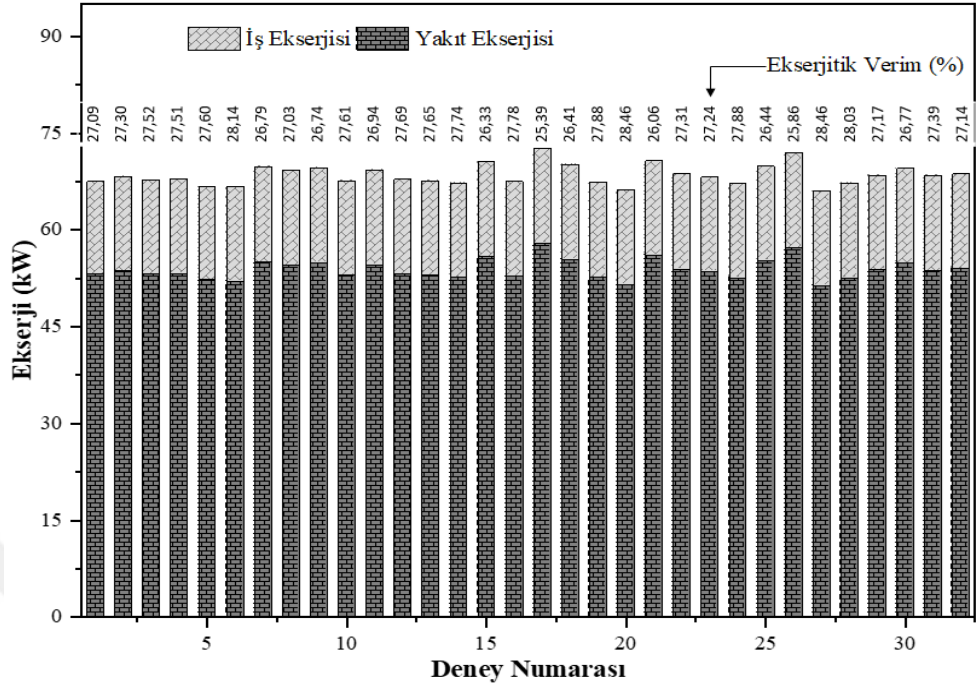
Deney No	Fren Özgül Yakıt Tük. (g/kW.h)	NO <sub>x</sub> (ppm)	HC (ppm)	CO (% Hac.)	Yakıt Eks. (kW)	İş Eks. (kW)	Eks. Verim (%)	Termal Verim (%)	Isı Kaybı Eks. (kW)	Egzoz Eks. (kW)	Ekserji Yıkımı (kW)
1	289,636	234,242	39,259	0,040	53,136	14,396	27,09	28,88	3,158	9,779	25,803
2	287,787	249,145	40,444	0,050	53,666	14,651	27,30	29,10	3,158	9,964	25,893
3	285,359	269,904	39,000	0,060	53,147	14,624	27,52	29,33	3,079	10,030	25,414
4	286,030	321,719	41,000	0,090	53,282	14,658	27,51	29,33	3,100	10,092	25,433
5	284,812	282,970	38,781	0,050	52,294	14,432	27,60	29,42	2,989	9,907	24,966
6	279,151	303,069	41,000	0,056	52,105	14,664	28,14	30,00	2,938	9,875	24,629
7	293,368	240,338	42,000	0,072	55,072	14,754	26,79	28,56	3,270	10,387	26,661
8	290,612	321,973	41,713	0,090	54,521	14,736	27,03	28,81	3,186	10,454	26,145
9	293,741	235,405	41,376	0,090	54,970	14,697	26,74	28,50	3,232	10,460	26,580
10	284,519	269,498	41,000	0,090	53,035	14,641	27,61	29,43	3,020	10,140	25,234
11	292,305	270,830	40,000	0,086	54,608	14,712	26,94	28,72	3,204	10,439	26,253
12	283,824	466,435	42,000	0,127	53,180	14,725	27,69	29,52	3,060	10,177	25,218
13	283,912	291,301	42,000	0,160	53,014	14,661	27,66	29,48	3,084	9,975	25,294
14	283,128	392,332	43,000	0,190	52,708	14,622	27,74	29,57	3,105	9,806	25,175
15	298,745	236,735	42,000	0,130	55,884	14,713	26,33	28,07	3,404	10,506	27,260
16	282,613	508,935	42,000	0,130	52,857	14,686	27,78	29,62	3,040	10,028	25,103
17	309,502	241,870	41,000	0,070	57,971	14,719	25,39	27,07	3,590	10,910	28,753
18	297,296	241,801	41,000	0,060	55,506	14,658	26,41	28,15	3,256	10,714	26,877
19	281,768	314,591	41,000	0,063	52,674	14,688	27,88	29,72	2,941	10,130	24,916
20	276,159	504,706	41,000	0,070	51,561	14,674	28,46	30,34	2,855	9,829	24,203
21	301,498	281,000	40,000	0,080	56,123	14,627	26,06	27,78	3,420	10,560	27,517
22	287,824	284,188	40,739	0,070	53,959	14,735	27,31	29,11	3,101	10,357	25,765
23	288,512	287,548	39,202	0,070	53,628	14,610	27,24	29,04	3,098	10,255	25,664
24	281,909	458,320	40,000	0,074	52,589	14,659	27,88	29,71	2,961	10,032	24,936
25	297,198	252,370	41,000	0,090	55,324	14,629	26,44	28,19	3,307	10,480	26,908
26	303,865	229,171	43,000	0,100	57,198	14,791	25,86	27,57	3,462	10,919	28,027
27	276,411	357,330	42,000	0,090	51,439	14,639	28,46	30,34	2,816	9,855	24,129
28	280,176	498,483	43,000	0,100	52,556	14,734	28,03	29,89	3,021	9,923	24,879
29	289,245	309,873	45,000	0,180	53,875	14,639	27,17	28,97	3,201	10,128	25,908
30	293,399	266,590	45,000	0,180	54,855	14,686	26,77	28,54	3,271	10,424	26,474
31	286,669	469,607	45,000	0,207	53,737	14,719	27,39	29,20	3,209	10,016	25,794
32	289,164	605,788	47,307	0,245	54,052	14,671	27,14	28,93	3,255	10,090	26,036



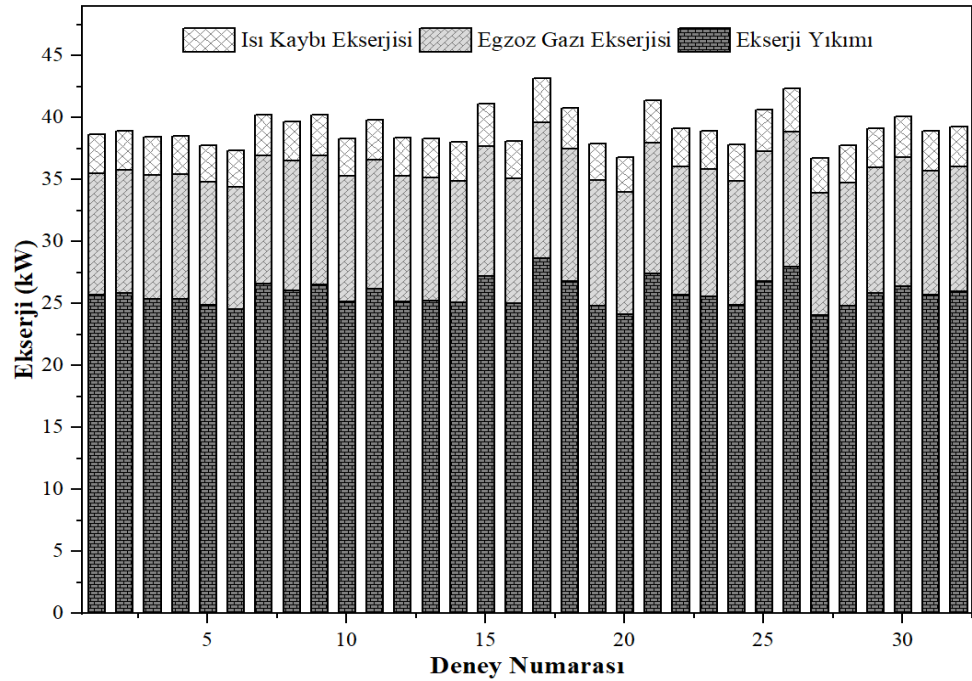
**Şekil 4.10.** 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre en düşük HC emisyonu 5 numaralı stratejide elde edilirken en yüksek 32 numaralı stratejilerde elde edilmiştir. CO emisyonu için ise en düşük 1 numaralı strateji CO emisyonuna sahip iken en yüksek HC emisyonunda olduğu gibi 32 numaralı stratejide elde edilmiştir.

Ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.11’den yakıt ekserjisinin en yüksek ve ekserjitik verimin en düşük değerinin önceki deneylerde olduğu gibi 17 numaralı strateji ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca hemen hemen aynı değerlere sahip 20 ve 27 numaralı stratejiler en düşük yakıt ekserjilerine sahip iken en yüksek ekserjitik verimlere sahiptirler. Şekil 4.12’den egzoz gazları ve ısı kaybı nedeniyle atılan ekserji ile ekserji yıkımının en yüksek 17 numaralı stratejide, en düşük ise en yüksek verime sahip 20 ve 27 numaralı stratejilerde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.11. 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjistik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları



Şekil 4.12. 2000 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları

#### 4.1.4. 2250 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar

2250 dev/dk motor hızında ve kısmi yük şartında (~%26,5 - 87 Nm) gerçekleştirilen tekrarlı deneylerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan regresyon modelleri Çizelge 4.13'de verilmiştir.

**Çizelge 4.13.** Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2250 dev/dk)

Regresyon denklemleri	R <sup>2</sup> (%)
BSFC=294,65+0,116(PS_1.ön)-2,658(PS_2.ön)+4,984(PS_art)-0,583(PB_1.ön)+0,744(PB_2.ön)-3,951(PB_ana)-0,010(PB_art)	90,45
NO <sub>x</sub> =54,3+37,57(PS_1.ön)+87,01(PS_2.ön)-42,42(PS_art)-17,91(PB_1.ön)+24,56(PB_2.ön)+19,02(PB_ana)+30,2(PB_art)	81,82
HC=25,58+4,913(PS_1.ön)+1,029(PS_2.ön)+0,473(PS_art)-0,021(PB_1.ön)-0,262(PB_2.ön)+0,144(PB_ana)+16,705(PB_art)	90,43
CO=-0,0279+0,04281(PS_1.ön)+0,00361(PS_2.ön)-0,00238(PS_art)+0,00341(PB_1.ön)+0,00323(PB_2.ön)+0,00061(PB_ana)+0,01268(PB_art)	81,51

2 tekrarlı deneylerin varyans analizi sonuçları, fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için Çizelge 4.14'te, HC ve CO emisyonları için ise Çizelge 4.15'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.14.** 2250 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları

		Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC)				NO <sub>x</sub> Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	3874,07	553,44	75,76	0,000	979884	139983	36,00	0,000
PS <sub>1.ön</sub>	1	1,07	1,07	0,15	0,703	112914	112914	29,04	0,000
PS <sub>2.ön</sub>	1	565,36	565,36	77,39	0,000	605597	605597	155,76	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	1987,23	1987,23	272,03	0,000	143954	143954	37,02	0,000
PB <sub>1.ön</sub>	1	27,14	27,14	3,72	0,059	25661	25661	6,60	0,013
PB <sub>2.ön</sub>	1	44,28	44,28	6,06	0,017	48257	48257	12,41	0,001
PB <sub>Ana</sub>	1	1248,98	1248,98	170,97	0,000	28931	28931	7,44	0,008
PB <sub>Art</sub>	1	0,00	0,00	0,00	0,988	14570	14570	3,75	0,058

**Çizelge 4.15.** 2250 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	SD	HC Emisyonu				CO Emisyonu			
		Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	6505,62	929,37	75,57	0,000	0,152467	0,021781	35,27	0,000
PS <sub>1.Ön</sub>	1	1930,85	1930,85	156,99	0,000	0,146601	0,146601	237,38	0,000
PS <sub>2.Ön</sub>	1	84,65	84,65	6,88	0,011	0,001042	0,001042	1,69	0,199
PS <sub>Art</sub>	1	17,93	17,93	1,46	0,232	0,000455	0,000455	0,74	0,394
PB <sub>1.Ön</sub>	1	0,03	0,03	0,00	0,958	0,000931	0,000931	1,51	0,225
PB <sub>2.Ön</sub>	1	5,51	5,51	0,45	0,506	0,000833	0,000833	1,35	0,250
PB <sub>Ana</sub>	1	1,67	1,67	0,14	0,714	0,000030	0,000030	0,05	0,826
PB <sub>Art</sub>	1	4464,98	4464,98	363,04	0,000	0,002574	0,002574	4,17	0,046

Çizelge 4.14’de görüldüğü gibi 1. ön püskürtme süresi ve açısı ile art püskürtme açısının (PS<sub>1.Ön</sub>, PB<sub>1.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) fren özgül yakıt tüketimi üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur. NO<sub>x</sub> emisyonu için ise sadece art püskürtme açısının (PB<sub>Art</sub>) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.15’ten HC emisyonu için 1. ve 2. ön püskürtme süresi ile art püskürtme açısının (PS<sub>1.Ön</sub>, PB<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir. CO emisyonu için ise sadece 1. ön püskürtme süresi ile art püskürtme açısı (PS<sub>1.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) anlamlı bir etkiye sahiptir.

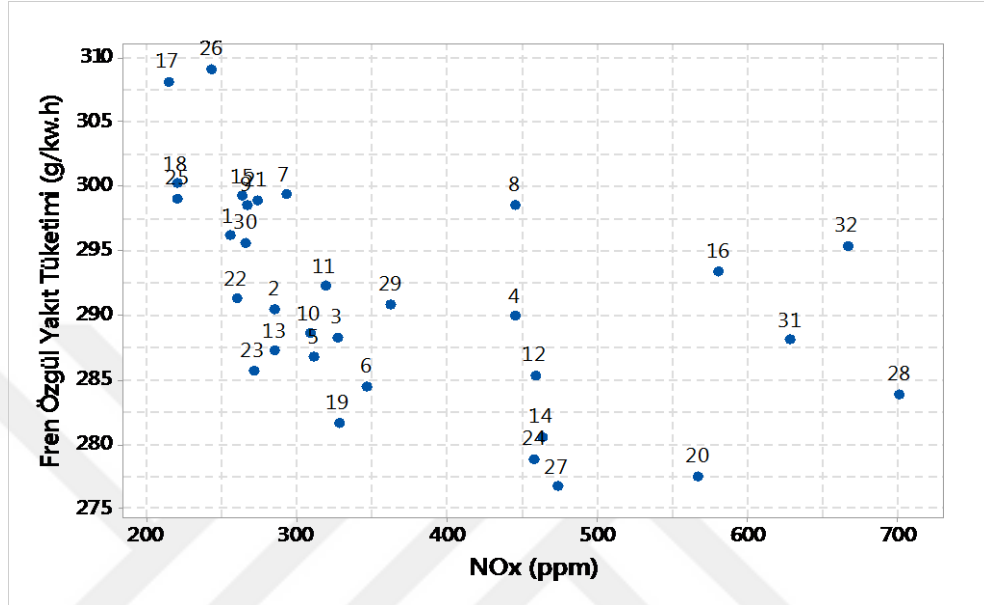
Bu çalışma koşulunda yapılan deneylerden elde edilen ve yapay sinir ağları modelinde çıkış parametresi olarak kullanılan fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları değerleri ile ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar (aynı püskürtme stratejisine sahip tekrarlı deneylerin ortalamaları alınarak) Çizelge 4.16’da verilmiştir.

**Çizelge 4.16.** 2250 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları

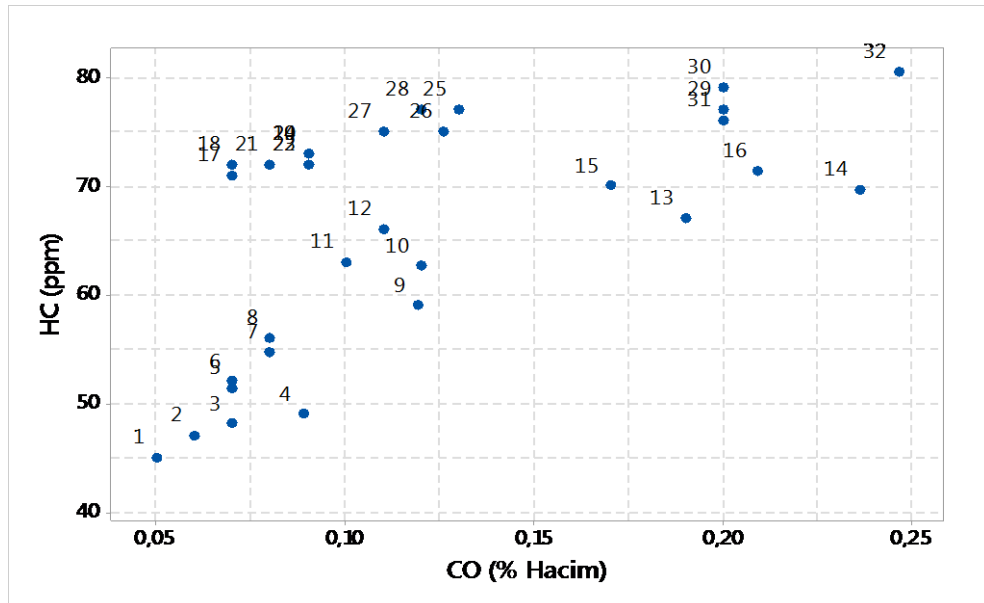
Deney No	Fren Özgül Yakıt Tük. (g/kW.h)	NOx (ppm)	HC (ppm)	CO (% Hac.)	Yakıt Eks. (kW)	İş Eks. (kW)	Eks. Verim (%)	Termal Verim (%)	Isı Kaybı Eks. (kW)	Egzoz Eks. (kW)	Ekserji Yıkımı (kW)
1	296,137	254,547	45,000	0,050	75,135	19,927	26,52	28,27	4,804	13,279	37,126
2	290,435	284,324	47,000	0,060	75,936	20,544	27,05	28,84	4,742	13,518	37,133
3	288,207	326,996	48,118	0,070	75,424	20,577	27,28	29,08	4,689	13,387	36,772
4	289,889	445,110	49,000	0,089	75,750	20,516	27,08	28,87	4,753	13,400	37,081
5	286,697	310,568	51,395	0,070	75,695	20,765	27,43	29,24	4,642	13,435	36,852
6	284,457	346,089	52,000	0,070	74,455	20,570	27,63	29,45	4,473	13,486	35,926
7	299,300	292,086	54,728	0,080	78,121	20,517	26,26	28,00	4,997	13,914	38,693
8	298,509	444,494	56,000	0,080	77,717	20,451	26,31	28,05	4,933	13,891	38,442
9	298,548	266,678	59,000	0,119	77,701	20,457	26,33	28,07	4,925	13,977	38,342
10	288,521	308,351	62,605	0,120	74,889	20,362	27,19	28,98	4,567	13,528	36,432
11	292,208	318,771	63,000	0,100	75,839	20,405	26,91	28,68	4,784	13,313	37,337
12	285,276	458,138	66,000	0,110	73,975	20,381	27,55	29,37	4,681	12,388	36,525
13	287,195	284,989	67,000	0,190	74,467	20,372	27,36	29,16	4,789	12,379	36,927
14	280,527	462,479	69,600	0,236	72,825	20,389	28,00	29,85	4,663	12,035	35,738
15	299,182	263,184	70,000	0,170	77,780	20,427	26,26	28,00	5,231	12,664	39,459
16	293,362	580,548	71,383	0,209	76,054	20,369	26,78	28,55	5,070	12,290	38,327
17	308,103	213,869	71,000	0,070	80,003	20,406	25,51	27,19	5,546	12,911	41,141
18	300,164	219,665	72,000	0,070	78,035	20,419	26,17	27,89	5,166	12,886	39,564
19	281,642	327,466	73,000	0,090	73,456	20,529	27,95	29,79	4,517	12,879	35,531
20	277,435	566,727	73,000	0,090	72,405	20,495	28,31	30,17	4,402	12,508	35,001
21	298,892	273,056	72,000	0,080	77,814	20,459	26,29	28,03	5,124	13,188	39,044
22	291,242	259,513	72,000	0,090	75,924	20,515	27,02	28,80	4,887	12,650	37,872
23	285,615	270,943	72,000	0,090	74,647	20,545	27,52	29,34	4,770	12,324	37,008
24	278,774	457,670	73,000	0,090	72,772	20,498	28,17	30,03	4,555	12,010	35,709
25	298,981	220,081	77,000	0,130	77,806	20,458	26,29	28,03	5,219	12,542	39,586
26	309,057	242,734	75,000	0,126	80,565	20,496	25,44	27,12	5,406	13,759	40,904
27	276,623	472,776	75,000	0,110	72,295	20,545	28,42	30,29	4,220	13,155	34,374
28	283,833	700,752	77,000	0,120	74,015	20,488	27,68	29,51	4,515	13,155	35,857
29	290,803	362,060	77,000	0,200	76,052	20,556	27,03	28,81	4,823	13,405	37,269
30	295,563	265,574	79,000	0,200	77,201	20,550	26,62	28,38	5,103	12,611	38,936
31	288,047	627,777	76,000	0,200	75,379	20,523	27,23	29,02	4,996	12,095	37,765
32	295,367	666,012	80,551	0,247	76,994	20,489	26,61	28,37	5,232	12,210	39,063

Yapılan deneylerden elde edilen fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub> emisyonuna ait sonuçlar Şekil 4.13'te, HC ve CO emisyonları için de Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Deneylerde en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri 27 numaralı stratejide elde edilirken

en yüksek 26 numaralı stratejide elde edilmiştir. En düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 17 numaralı stratejide iken en yüksek 28 numaralı stratejide gerçekleşmiştir.



Şekil 4.13. 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu sonuçları

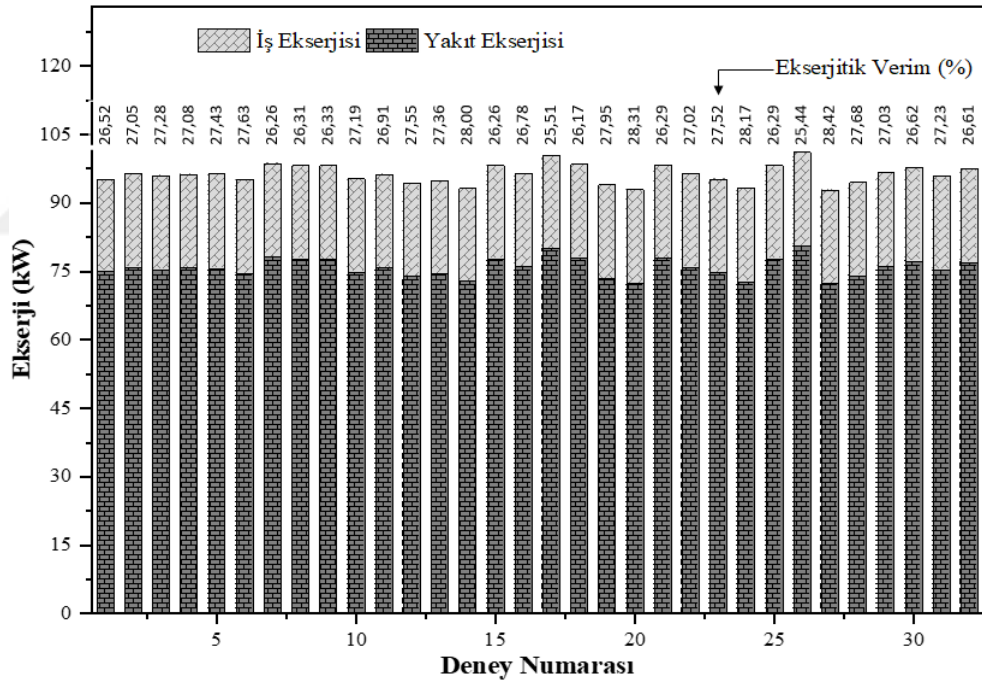


Şekil 4.14. 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları

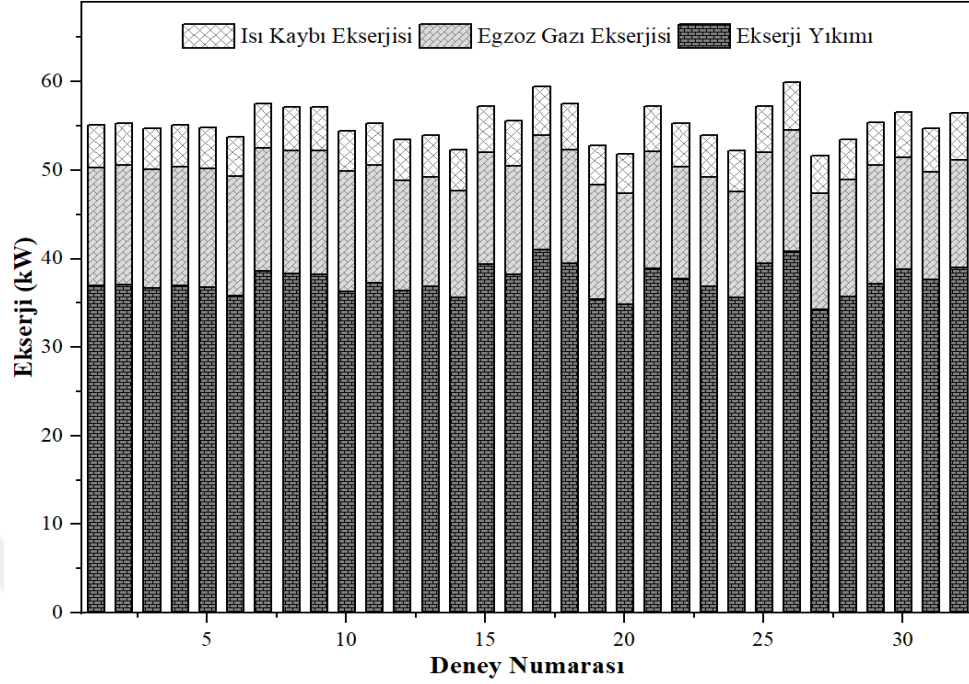


Elde edilen sonuçlara göre en düşük ve en yüksek HC ve CO emisyonları sırasıyla 1 ve 32 numaralı stratejilerin uygulandığı deneylerde görülmüştür.

Ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.15’ten yakıt ekserjisinin en yüksek olduğu buna karşın en düşük ekserjitik verim değerini veren stratejinin 26 numaralı strateji olduğu görülmektedir. Ayrıca en düşük yakıt ekserjisine sahip 27 numaralı stratejinin de en yüksek ekserjitik verime sahip olduğu ilgili şekilden anlaşılmaktadır. Buna paralel olarak Şekil 4.16’dan egzoz gazları ve ısı kaybı nedeniyle atılan ekserji ile ekserji yıkımının en yüksek 26 numaralı stratejide, en düşük ise 27 numaralı stratejilerde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.15. 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjitik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları



**Şekil 4.16.** 2250 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları

#### 4.1.5. 2500 dev/dk motor hızında elde edilen sonuçlar

Bu çalışma koşulunda diğer çalışma koşullarından farklı olarak deney tasarımında L16 ortogonal dizilimi kullanıldığından 2 tekrarlı olmak üzere toplamda 32 adet yapılmıştır. 2500 dev/dk motor hızında ve kısmi yük şartında ( $\sim$ %33,5 - 108 Nm) gerçekleştirilen tekrarlı deneylerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan regresyon modelleri Çizelge 4.17’de verilmiştir. Tekrarlı deneylerin varyans analizi sonuçları, fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için Çizelge 4.18’de, HC ve CO emisyonları için ise Çizelge 4.19’da verilmiştir.

**Çizelge 4.17.** Varyans analizinde kullanılan regresyon denklemleri (2500 dev/dk)

Regresyon denklemleri	R <sup>2</sup> (%)
BSFC=279,11-0,899(PS_1.ön)-0,945(PS_2.ön)+5,520(PS_art)+2,485(PB_1.ön)+0,115(PB_2.ön)-2,003(PB_ana)+2,463(PB_art)	84,25
NO <sub>x</sub> =213,7+20,47(PS_1.ön)+74,76(PS_2.ön)-38,52(PS_art)-12,78(PB_1.ön)+1,16(PB_2.ön)+13,49(PB_ana)+6,82(PB_art)	89,82
HC=12,69-0,54(PS_1.ön)+2,56(PS_2.ön)-0,42(PS_art)+23,677(PB_1.ön)+5,163(PB_2.ön)+2,332(PB_ana)+1,63(PB_art)	96,17
CO=0,01687+0,03855(PS_1.ön)-0,00976(PS_2.ön)+0,00068(PS_art)+0,009827(PB_1.ön)+0,004256(PB_2.ön)+0,004474(PB_ana)+0,00150(PB_art)	96,59

**Çizelge 4.18.** 2500 dev/dk motor hızında fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu için varyans analizi sonuçları

		Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC)				NO <sub>x</sub> Emisyonu			
Varyans Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	713,852	101,979	18,34	0,000	74169,2	10595,6	30,26	0,000
PS <sub>1.Ön</sub>	1	6,466	6,466	1,16	0,292	3350,6	3350,6	9,57	0,005
PS <sub>2.Ön</sub>	1	7,147	7,147	1,29	0,268	44717,6	44717,6	127,71	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	243,720	243,720	43,83	0,000	11870,1	11870,1	33,90	0,000
PB <sub>1.Ön</sub>	1	247,030	247,030	44,42	0,000	6529,5	6529,5	18,65	0,000
PB <sub>2.Ön</sub>	1	0,527	0,527	0,09	0,761	54,0	54,0	0,15	0,698
PB <sub>Ana</sub>	1	160,432	160,432	28,85	0,000	7275,6	7275,6	20,78	0,000
PB <sub>Art</sub>	1	48,529	48,529	8,73	0,007	371,8	371,8	1,06	0,313

Çizelge 4.18'de görüldüğü gibi 1. ve 2. ön püskürtme süresi ile 2. ön püskürtme açısının (PS<sub>1.Ön</sub>, PS<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>2.Ön</sub>) fren özgül yakıt tüketimi üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur. NO<sub>x</sub> emisyonu için ise sadece 2. ön ve art püskürtme açısının (PB<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.19'dan HC emisyonu için 1. ön, 2. ön ve art püskürtme açılarının (PB<sub>1.Ön</sub>, PB<sub>2.Ön</sub> ve PB<sub>Art</sub>) anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir. CO emisyonu için iki faktör (PS<sub>Art</sub> ve PB<sub>Art</sub>) dışında diğer tüm faktörlerin çok etkili olduğu açıktır.

**Çizelge 4.19.** 2500 dev/dk motor hızında HC ve CO emisyonu için varyans analizi sonuçları

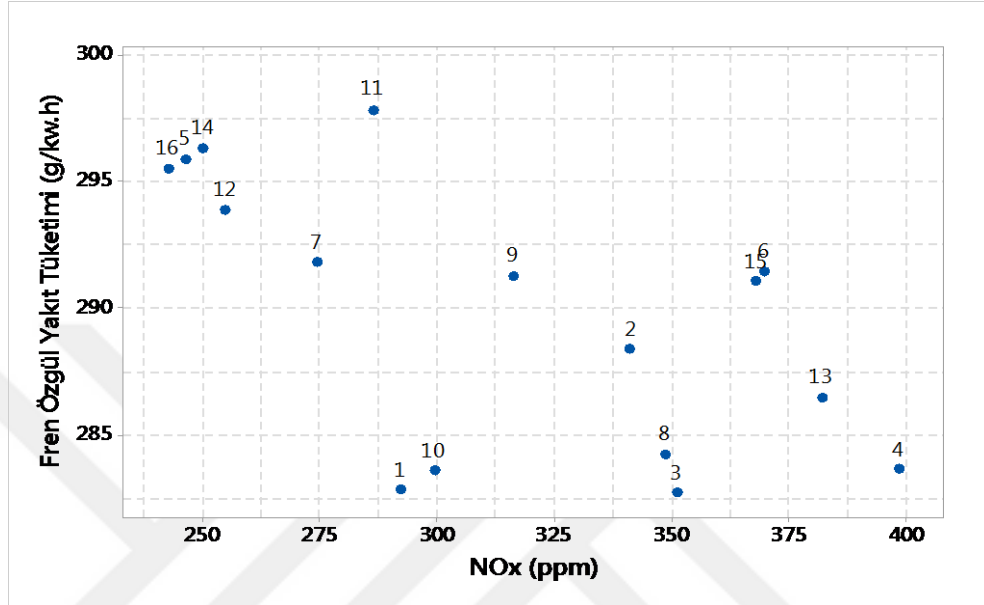
Varyans Kaynağı	SD	HC Emisyonu				CO Emisyonu			
		Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	F	P
Regresyon	7	23785,8	3398,0	86,19	0,000	0,018061	0,002580	97,10	0,000
PS <sub>1.Ön</sub>	1	2,3	2,3	0,06	0,811	0,011890	0,011890	447,48	0,000
PS <sub>2.Ön</sub>	1	52,5	52,5	1,33	0,260	0,000761	0,000761	28,66	0,000
PS <sub>Art</sub>	1	1,4	1,4	0,04	0,850	0,000004	0,000004	0,14	0,710
PB <sub>1.Ön</sub>	1	22424,5	22424,5	568,81	0,000	0,003863	0,003863	145,37	0,000
PB <sub>2.Ön</sub>	1	1066,2	1066,2	27,05	0,000	0,000724	0,000724	27,26	0,000
PB <sub>Ana</sub>	1	217,5	217,5	5,52	0,027	0,000801	0,000801	30,14	0,000
PB <sub>Art</sub>	1	21,4	21,4	0,54	0,469	0,000018	0,000018	0,68	0,419

Bu çalışma koşulunda yapılan deneylerden elde edilen ve yapay sınır ağırları modelinde çıkış parametresi olarak kullanılan fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları değerleri ile ekserji analizi neticesinde elde edilen sonuçlar (aynı püskürtme stratejisine sahip tekrarlı deneylerin ortalamaları alınarak) Çizelge 4.20’de verilmiştir.

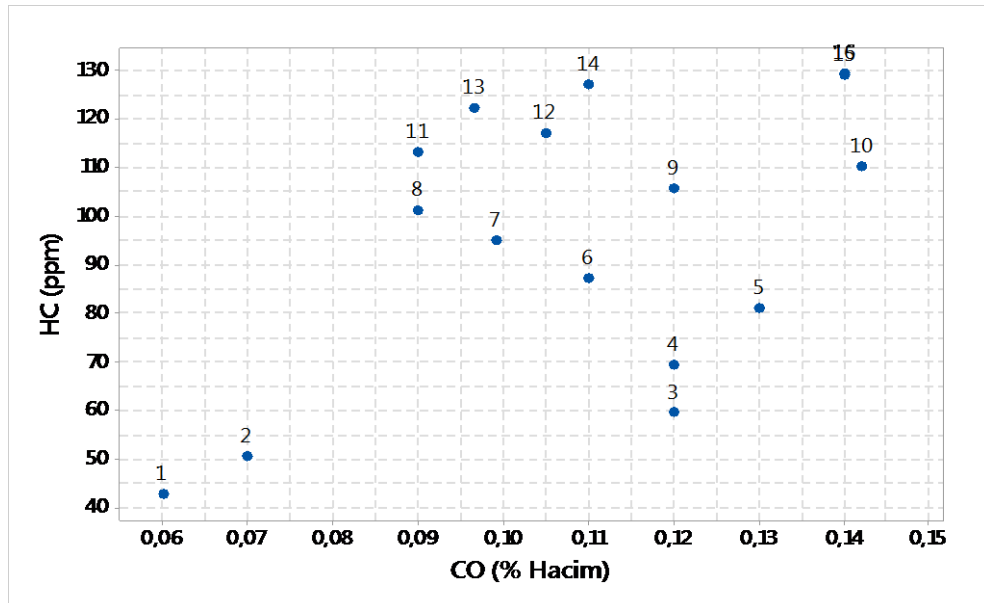
**Çizelge 4.20.** 2500 dev/dk motor hızında elde edilen deney sonuçları

Deney No	Fren Özgül Yakıt Tük. (g/kW.h)	NO <sub>x</sub> (ppm)	HC (ppm)	CO (% Hac.)	Yakıt Eks. (kW)	İş Eks. (kW)	Eks. Verim (%)	Termal Verim (%)	Isı Kaybı Eks. (kW)	Egzoz Eks. (kW)	Ekserji Yıkımı (kW)
1	282,811	292,307	42,629	0,060	101,584	28,229	27,79	29,62	7,091	14,730	51,534
2	288,349	341,065	50,459	0,070	104,471	28,469	27,25	29,05	7,393	15,565	53,044
3	282,668	351,106	59,382	0,120	102,091	28,405	27,82	29,66	7,109	15,212	51,365
4	283,615	398,479	69,418	0,120	101,983	28,243	27,69	29,52	7,124	15,181	51,435
5	295,850	246,441	81,000	0,130	105,844	28,116	26,56	28,32	7,605	15,808	54,316
6	291,435	369,785	87,088	0,110	104,276	28,123	26,97	28,75	7,383	15,721	53,048
7	291,787	274,321	95,000	0,099	104,414	28,134	26,94	28,72	7,381	15,781	53,118
8	284,203	348,527	101,000	0,090	101,401	28,047	27,66	29,48	7,032	15,373	50,949
9	291,277	316,148	105,714	0,120	103,958	28,036	26,97	28,75	7,370	15,659	52,892
10	283,538	299,238	110,180	0,142	101,255	28,045	27,70	29,53	7,012	15,378	50,820
11	297,831	286,195	113,000	0,090	106,513	28,063	26,35	28,09	7,662	16,313	54,475
12	293,862	254,767	117,000	0,105	105,287	28,140	26,73	28,49	7,465	16,032	53,650
13	286,471	381,939	122,300	0,097	103,102	28,279	27,43	29,24	7,174	15,680	51,969
14	296,297	249,985	127,000	0,110	106,411	28,198	26,50	28,25	7,607	16,294	54,313
15	291,038	367,825	129,000	0,140	104,628	28,274	27,02	28,81	7,443	15,863	53,048
16	295,482	242,551	129,337	0,140	106,071	28,211	26,60	28,35	7,624	16,204	54,032

Yapılan deneylerden elde edilen fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub> emisyonuna ait sonuçlar Şekil 4.17’de, HC ve CO emisyonları için de Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu sonuçları

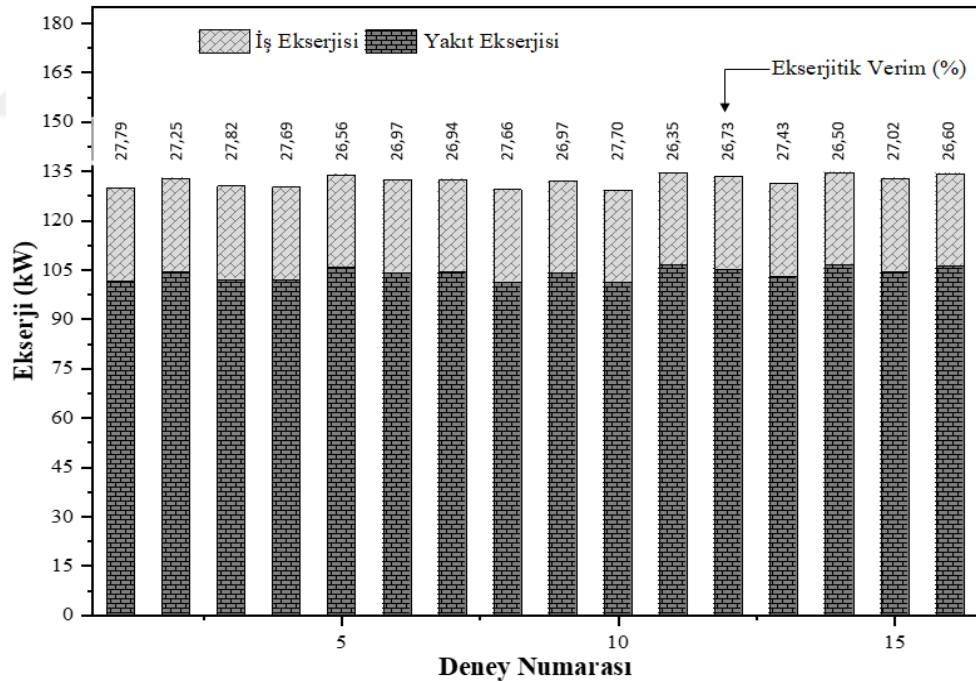


Şekil 4.18. 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre HC ve CO emisyonları sonuçları

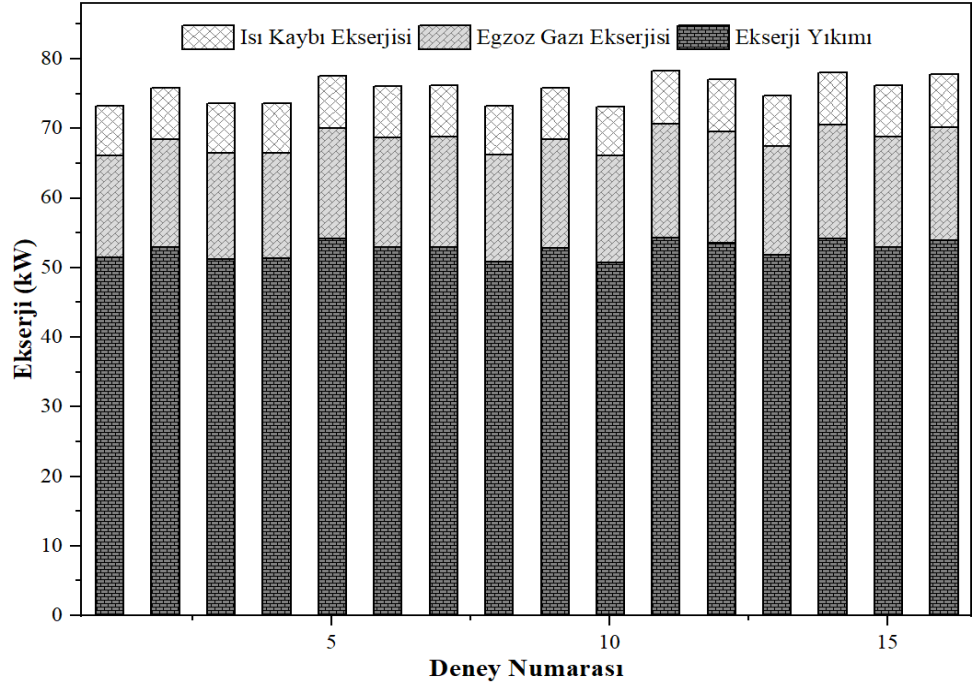
Deneyleerde en düşük fren özgül yakıt tüketimi değeri 3 numaralı stratejide elde edilirken, en yüksek 11 numaralı stratejide elde edilmiştir. En düşük NO<sub>x</sub> emisyonu 16 numaralı stratejide oluşken en yüksek 4 numaralı strateji ile meydana gelmiştir..

Elde edilen sonuçlara göre en düşük HC emisyonu 1 numaralı stratejide elde edilirken en yüksek 16 numaralı stratejilerde elde edilmiştir. CO emisyonu için ise HC emisyonunda olduğu gibi en düşük 1 numaralı stratejide en yüksek ise 10 numaralı stratejide oluşmuştur.

Ekserji analizi neticesinde elde edilen yakıt ekserjisi, işe dönüşen ekserji ve ekserjistik verim sonuçları Şekil 4.19'da, ekserji yıkımının yanı sıra egzoz gazları ile ve ısı ile kaybolan ekserjiler Şekil 4.20'de verilmiştir.



**Şekil 4.19.** 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserjistik verim, yakıt ve iş ekserjisi sonuçları



**Şekil 4.20.** 2500 dev/dk motor hızında farklı püskürtme stratejilerine göre ekserji dağılımı sonuçları

Şekil 4.19'dan yakıt ekserjisinin en yüksek ve ekserjitik verimin en düşük değerinin 11 numaralı strateji ile elde edildiği görülmektedir. En yüksek ekserjitik verim ise 3 numaralı stratejide elde edilmiştir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 birlikte incelendiğinde en düşük yakıt ekserjisinin ve en düşük ekserji kaybının (egzoz gazlarının ekserjisi ve ısı kaybı ekserjisi ile ekserji yıkımı) 10 numaralı stratejide meydana geldiği görülmektedir. 11 numaralı strateji ile en yüksek yakıt ekserjisi elde edilmesine rağmen ekserji kaybının da en yüksek değeri yine bu stratejide meydana gelmiştir.

Çalışmanın diğer aşamasında, yukarıda bahsedilen ve 5 farklı motor çalışma koşulunda toplamda 288 adet olarak gerçekleştirilen deneylerin; devir sayısı, tork ve püskürtme parametrelerinin giriş parametresi, elde edilen sonuçların (fren özgül yakıt tüketimi,  $\text{NO}_x$ , HC ve CO emisyonları değerleri) ise çıkış parametresi olarak kullanıldığı bir yapay sinir ağları modeli oluşturulmuştur.

## 4.2. Yapay Sinir Ağları Modeli

Yürütülen çalışmanın modelleme bölümünde devir, tork ve püskürtme parametrelerinin giriş parametreleri, fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonlarının çıkış parametreleri olarak ele alındığı bir çok model oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller arasında öncelikle tek gizli katmana sahip modellerde, giriş katmanı ve gizli katmandaki nöron sayıları ile aktivasyon fonksiyonları değiştirilerek belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ve hata değerleri gözlemlenmiştir. Daha sonra iki gizli katmana sahip modeller denenmiştir. Aynı denemeler öğrenme katsayısı değiştirilerek de tekrarlanmış ve aralarından uygun bir model seçimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen modelin model parametreleri Çizelge 4.21’de verilmiştir.

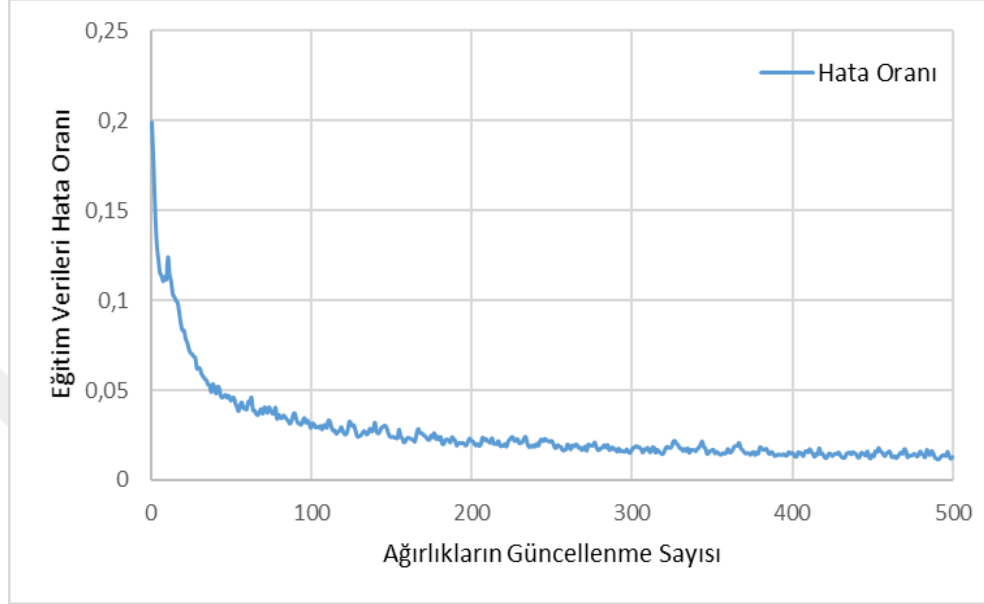
**Çizelge 4.21.** Seçilen model parametreleri

Gizli Katman Sayısı		1
Nöron Sayısı	Giriş Katmanı	10
	Gizli Katman	30
	Çıkış Katmanı	4
Aktivasyon Fonksiyonu	Giriş Katmanı	Tanh
	Gizli Katman	Sigmoid
	Çıkış Katmanı	Tanh
Öğrenme Katsayısı		0,01
Ağırlıkların Güncellenme Sayısı		500

Model oluşturulurken toplam deney sayısı olan 288 adet deney setinin rastgele seçilen %80’i eğitim verisi, %20’si test verisi olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.21’de belirtildiği gibi tek gizli katmana sahip ağda giriş ve çıkış katmanlarında tanh, gizli katmanda ise sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Verilerin öğrenilmesi esnasında ise optimizasyon algoritması olarak ADAM (Adaptif Momentum) algoritması kullanılmıştır. Kullanılan modelde ağ, eğitim verileri ile öğrenirken her bir eğitim verisine karşılık gelen (ağın belirlediği ağırlık katsayıları ile üretilen) sonuç karşılaştırılır ve bir hata değeri bulunur. Eğitim esnasında bu hata değeri en aza indirgenmeye çalışılır ve bu sayede



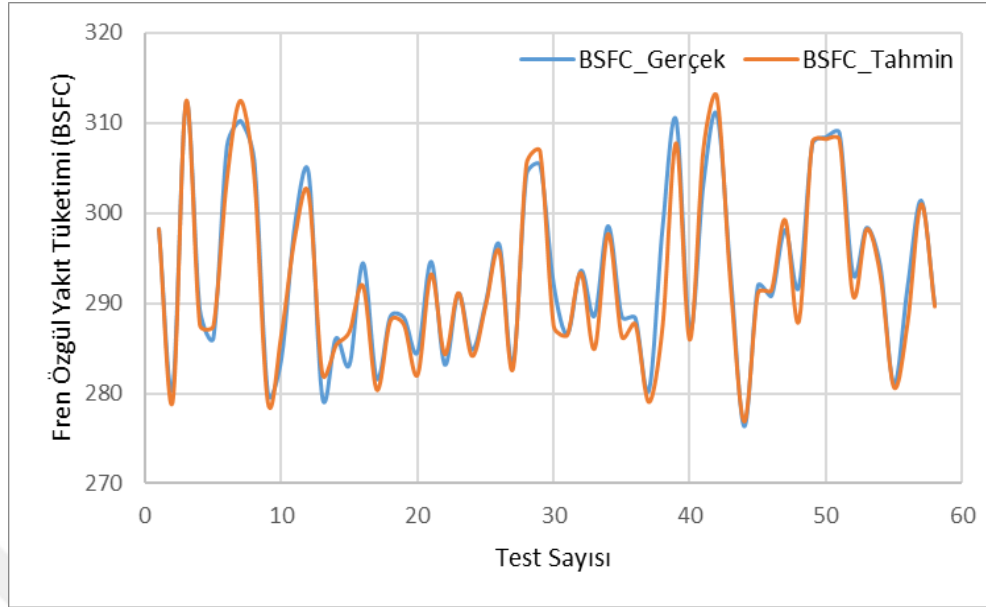
belirlenen ağırlıklar güncellenir. Oluşturulan modelde ağırlıkların güncellenmesi esnasında oluşan ortalama mutlak hata değerlerinin değişimi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



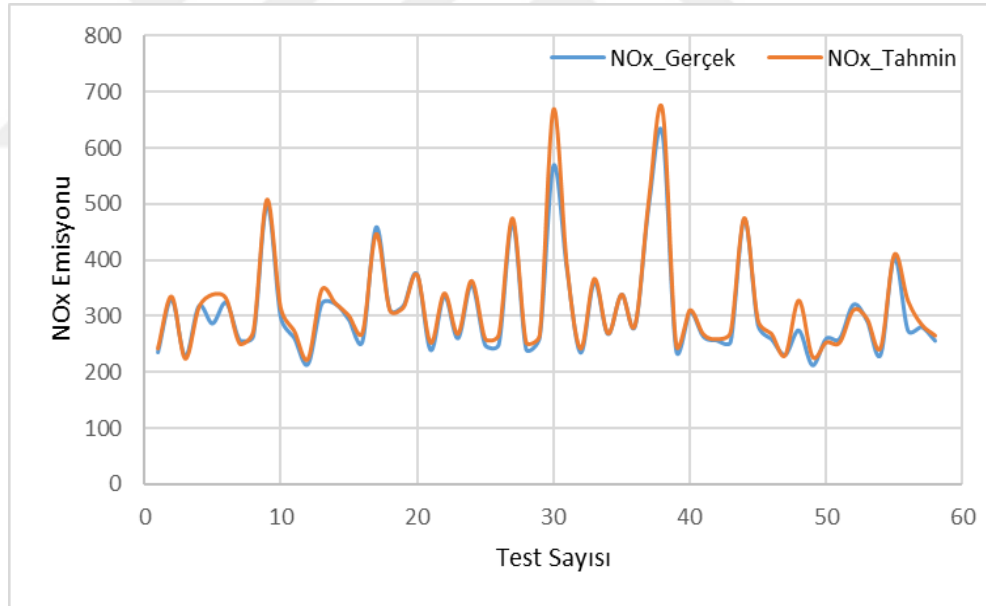
**Şekil 4.21.** Ağırlıkların güncellenmesi sırasındaki hata oranı değişimi

Ağın eğitime başladığı ilk anda eğitim verilerinin gerçek değerleri ile tahmin değerleri arasındaki hatanın büyük olduğu Şekil 4.21’den görülmektedir. Güncellenen ağırlıklarla başlangıçta, hata oranındaki azalma büyüktür. Güncelleme sayısı arttıkça hata oranı da gittikçe azalmış ve kabul edilebilir bir seviyeye ulaşmıştır.

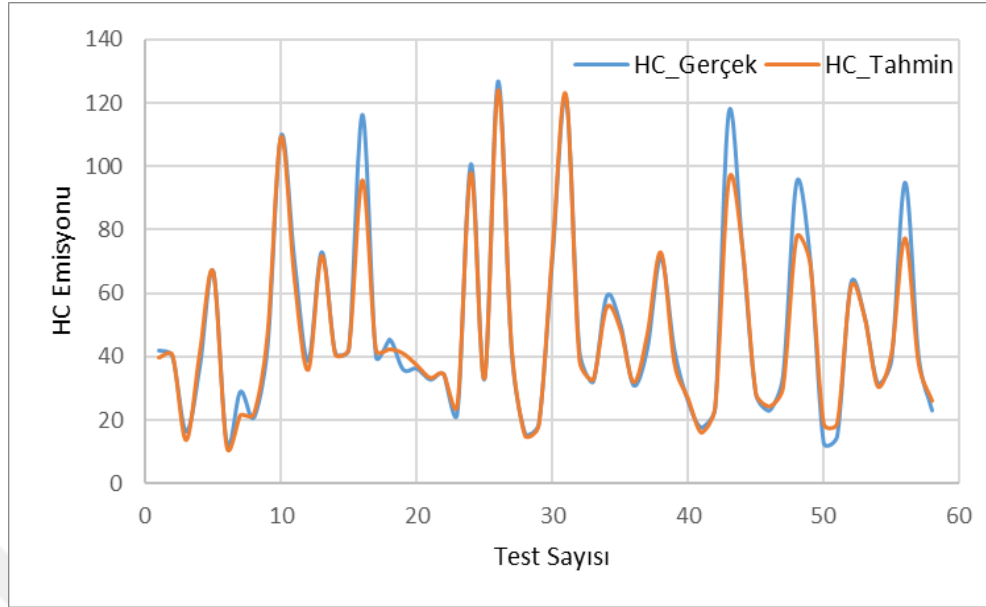
Ağın öğrenmesi bu şekilde (ağırlıkların güncellenmesiyle) gerçekleştikten sonra, ağa hiç tanıtılmamış veriler (deney setinin %20’lik kısmı) ile ağ test edilmiştir. Test edilen ağdan tüm çıktı parametreleri için üretilen tahmin değerleri ile gerçek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri, fren özgül yakıt tüketimi için Şekil 4.22’de, NO<sub>x</sub> emisyonu için Şekil 4.23’te, HC emisyonu için Şekil 4.24’te ve CO emisyonu için de Şekil 4.25’te gösterilmiştir.



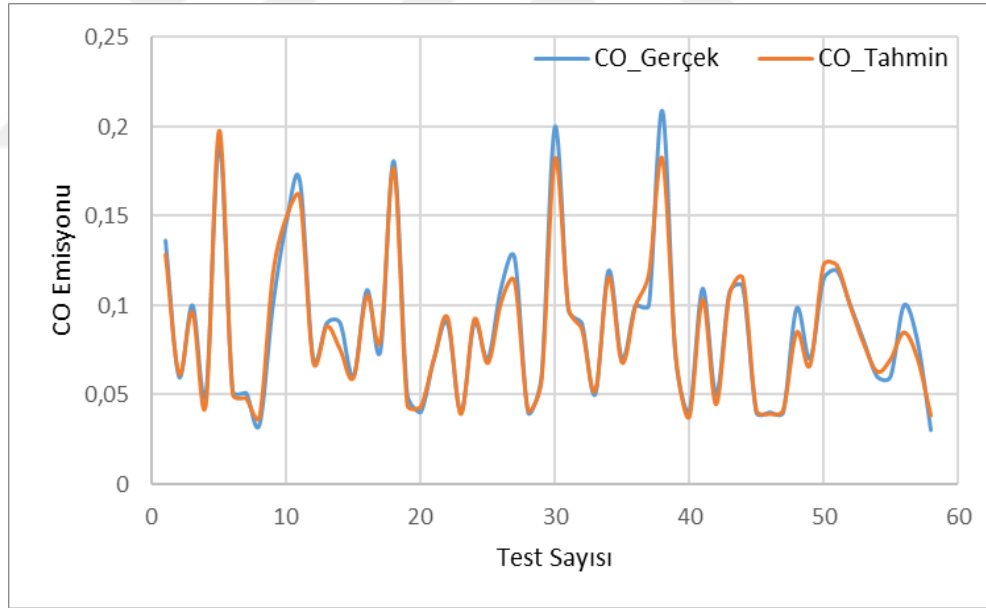
Şekil 4.22. Fren özgül yakıt tüketimi için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri



Şekil 4.23. NO<sub>x</sub> emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri



**Şekil 4.24.** HC emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri



**Şekil 4.25.** CO emisyonu için gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri

Tüm çıktı parametreleri için modelden elde edilen tahmin değerleri ile gerçek değerlerin büyük oranda uyuştuğu ilgili şekillerden açıkça görülmektedir. Ayrıca gerçek sonuçlar ile tahmin değerleri arasındaki hatanın tespiti için hata fonksiyonları ve belirleme katsayısı kullanılmıştır. Kullanılan hata fonksiyonları ortalama karesel hata, kök ortalama

karesel hata, ortalama mutlak hata ve belirleme katsayısı ( $R^2$ ) kullanılmıştır. Tüm çıktı parametreleri için bu değerler Çizelge 4.22’de verilmiştir.

**Çizelge 4.22.** Model doğruluğu testi sonuçları

Ortalama Kareler Hatası	Fren Özgül Yakıt Tüketimi	0,002
	NO <sub>x</sub> Emisyonu	0,002
	HC Emisyonu	0,002
	CO Emisyonu	0,001
Kök Ortalama Karesel Hata	Fren Özgül Yakıt Tüketimi	0,045
	NO <sub>x</sub> Emisyonu	0,042
	HC Emisyonu	0,048
	CO Emisyonu	0,034
Ortalama Mutlak Hata	Fren Özgül Yakıt Tüketimi	0,031
	NO <sub>x</sub> Emisyonu	0,025
	HC Emisyonu	0,027
	CO Emisyonu	0,024
Belirleme Katsayısı ( $R^2$ )	Fren Özgül Yakıt Tüketimi	0,939
	NO <sub>x</sub> Emisyonu	0,943
	HC Emisyonu	0,963
	CO Emisyonu	0,966

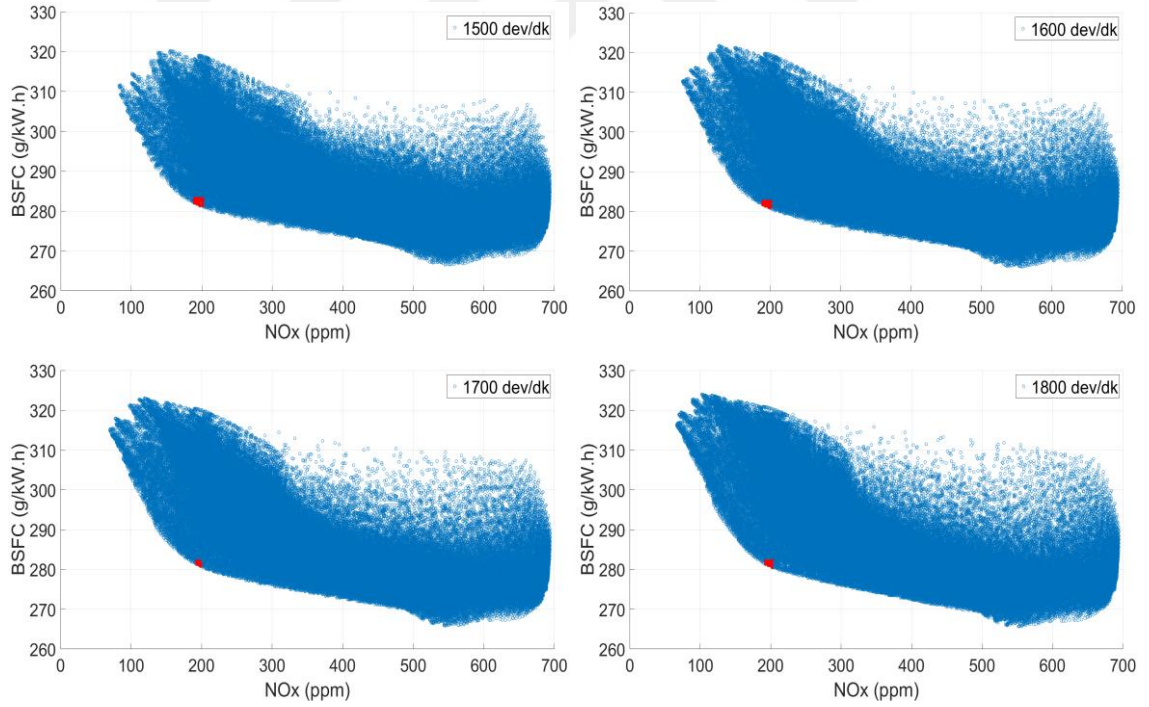
Çizelge 4.22’de verilen hata değerleri ile belirleme katsayısı değerleri incelendiğinde test verileri ile tahmin verileri arasındaki hatanın düşük olduğu görülmektedir. Bu değerler püskürtme parametrelerine bağlı olarak oluşturulan modelin, fren özgül yakıt tüketimi ile NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonlarının tahmininde başarılı olduğunu göstermektedir. Böylelikle belirli bir çalışma bölgesi için değişen devir sayısı, motor yükü ve püskürtme parametrelerine göre performans ve emisyon karakteristikleri belirlenebilmektedir.

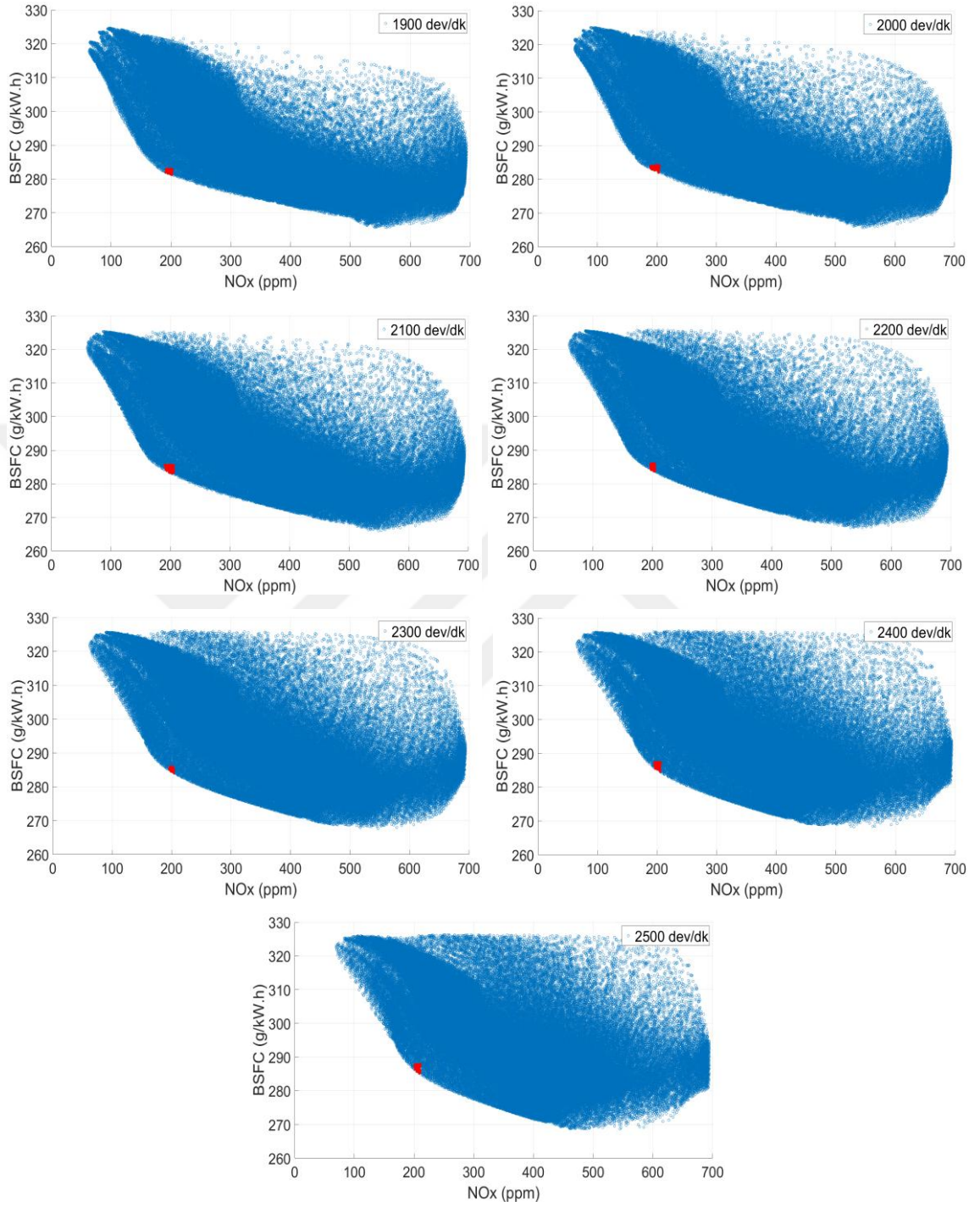
Oluşturulan model ile sabit motor yükünde (90 Nm) ve farklı devir sayılarında tüm püskürtme parametrelerinin etkileri incelenecek şekilde bir tarama gerçekleştirilmiştir. Belirtilen tarama bölgesi için parametrelerin değişim aralığı Çizelge 4.23’te verilmiştir.

**Çizelge 4.23.** Model tarama bölgesi için parametrelerin değişim aralığı

Devir sayısı	1500-2500 dev/dk (100 dev/dk artışıla)
Tork	90 Nm
PB <sub>1.Ön</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	18-36 (2 °KMA artışıla)
PB <sub>2.Ön</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	6-22 (2 °KMA artışıla)
PB <sub>Ana</sub> (°KMA-ÜÖN'dan önce)	3-12 (1 °KMA artışıla)
PB <sub>Art</sub> (°KMA-ana püskürtme ile arasındaki fark)	12-20 (2 °KMA artışıla)
PS <sub>1.Ön</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20
PS <sub>2.Ön</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20
PS <sub>Art</sub> (% toplam süre)	5-10-15-20

Tarama neticesinde elde edilen fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu grafiği Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

**Şekil 4.26.** Farklı devir sayılarına göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu tarama verileri



**Şekil 4.26.** Farklı devir sayılarına göre fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu tarama verileri (devamı)

Her bir devir sayısı için elde edilen grafikler kullanılarak fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonunun minimum olduğu, Şekil 4.26'da gösterilen kırmızı bölgelerden bir

nokta seçilmiş ve bu çalışma bölgesi için bir kalibrasyon tablosu oluşturulmuştur. Oluşturulan kalibrasyon tablosu Çizelge 4.24'te verilmiştir (PB: Püskürtme Başlangıcı, PS: Püskürtme Süresi).

**Çizelge 4.24.** Kalibrasyon tablosu

Devir Sayısı (dev/dk)	Tork (Nm)	PB <sub>1.Ön</sub> (KMA-PB <sub>Ana</sub> ile mesafe)	PB <sub>2.Ön</sub> (KMA-PB <sub>Ana</sub> ile mesafe)	PB <sub>Ana</sub> (KMA-ÜÖN' dan önce)	PB <sub>Art</sub> (KMA-PB <sub>Ana</sub> ile mesafe)	PS <sub>1.Ön</sub> (% toplam süre)	PS <sub>2.Ön</sub> (% toplam süre)	PS <sub>Art</sub> (% toplam süre)
1500	90	32	12	4	-14	20	5	5
1600	90	32	10	4	-16	20	5	5
1700	90	33	19	5	-13	20	5	5
1800	90	33	17	5	-15	20	5	5
1900	90	35	13	7	-13	20	5	5
2000	90	33	13	7	-13	20	5	5
2100	90	33	17	7	-11	20	5	5
2200	90	34	16	8	-12	20	5	5
2300	90	32	16	8	-12	20	5	10
2400	90	35	19	9	-11	20	5	10
2500	90	39	17	11	-9	20	5	10

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasında motor performans ve egzoz emisyon karakteristiklerine doğrudan etki eden püskürtme stratejisi konusunda hem deneysel hem de modelleme üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel 5 farklı motor çalışma koşulunda gerçekleştirilmiş olup uygulanan stratejide her çevrimde 4 püskürtme (1. ön, 2. ön, ana ve art püskürtme) yapılmıştır. Her püskürtmenin açısı ve püskürtülen yakıt miktarı değiştirilmiştir. Püskürtme parametrelerinin çokluğu deney sayısını gerçekleştirilemeyecek kadar çok artırdığından deney tasarımı tekniklerinden olan Taguchi metodundan yararlanılmıştır. Parametre sayısının fazla olması ve bir çok seviyede deneysel olarak incelenmesi bu sayede mümkün hale gelmiştir. Yapılan varyans analizi ile hangi parametrenin hangi sonucu ne ölçüde etkilediği de görülebilmektedir.

Yürütülen çalışmada deneylerden elde edilen verilerle ekserji analizi gerçekleştirilmiş ve yakıttan elde edilen ekserjinin kullanılabilen (faydalı işe dönüşen) ve kullanılmayan kısımları incelenmiştir. Ayrıca püskürtme stratejisinin ekserjistik verim üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Püskürtme stratejisinin değişimine bağlı olarak en yüksek ekserjistik verimler 1500-1750-2000-2250 ve 2500 dev/dk deneyleri için sırasıyla; %26,19, %28,09, %28,45, %28,41 ve %27,82 olarak elde edilmiştir. Motordan gerçekleşen en yüksek toplam ısı kaybı ise sırasıyla; 1,6319, 2,2418, 3,5896, 5,5460 ve 7,6621 kW olarak elde edilmiştir. Egzoz kayıplarının da en yüksek değerlerinin sırasıyla; 4,7988, 7,4481, 10,9185, 13,9772 ve 16,3132 kW olduğu görülmüştür. En yüksek ekserjistik yıkım (tersinmezlik) ise sırasıyla; 13,4677, 18,9287, 28,7525, 41,1407 ve 54,4747 kW olarak elde edilmiştir.

Çalışmanın modelleme aşamasında matematiksel ilişkilerin kurulamadığı ve karmaşık sistemlerin modellenmesinde başarılı sonuçlar veren bir yapay sinir ağları modeli oluşturulmuştur. Model oluşturulurken püskürtme parametrelerinin yanı sıra farklı çalışma koşullarını temsil eden motor hızı ve yükü de girdi parametresi olarak ele



alınmıştır. Bu sayede modelin geçerliliğinin daha geniş bir aralıkta olması sağlanmıştır. Toplamda 9 adet giriş parametresi ve 4 adet çıkış parametresi olan bir yapay sinir ağı modeli tasarlanmıştır. Ağ tasarlanırken ağın doğruluğunu ve performansını etkileyen katman sayısı, nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve öğrenme katsayısı gibi parametreler de değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Böylelikle uygun bir ağ seçimi gerçekleştirilmiştir. Ağın eğitimi için deneylerden elde edilen sonuçların rastgele seçilen %80'lik kısmı kullanılmış, ağın testi için ise geriye kalan %20'lik kısım kullanılmıştır. Ağın testi farklı hata fonksiyonları kullanılarak gözlemlenmiş ve fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonlarının başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür. Deneylerden elde edilen gerçek değerler ile modelin tahmin değerleri arasındaki ortalama hata %5'ten küçüktür. KOKH'ya göre fren özgül yakıt tüketimi, NO<sub>x</sub>, HC ve CO emisyonları için sırasıyla; %4,5, %4,2, %4,8 ve %3,4 olarak elde edilmiştir. OMH'ya göre ise sırasıyla; %3,1, %2,5, %2,7 ve %2,4 olarak elde edilmiştir.

Oluşturulan model kullanılarak sabit yükte ve farklı devir sayılarında püskürtme parametrelerinin etkileri geniş bir aralıkta taranmıştır. Elde edilen sonuçlardan fren özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonunu minimum tutan giriş parametreleri tespit edilmiştir. Böylelikle bu model sayesinde farklı motor çalışma koşulları için kalibrasyon tablosunun oluşturulabileceği gösterilmiştir.

Farklı motor çalışma koşullarında gerçekleştirilen ve deneysel verilerin kullanılmasıyla oluşturulan tek bir model sayesinde, bu çalışma aralığında, daha fazla deney yapılmasına gerek kalmadan tüm püskürtme parametrelerinin değiştirilmesinin çıktıları nasıl değiştirdiği gözlemlenebilir hale gelmiştir. Yürütülen çalışma ile az sayıda gerçekleştirilen deneyler ve uygun bir model seçimi ile motor testleri için harcanan yakıt miktarından ve zamandan tasarruf edilebileceği gösterilmiş ve motor kalibrasyon testleri için bir yaklaşım sunulmuştur.

Motorun tüm çalışma koşullarını temsil edebilecek bir model için, farklı motor çalışma bölgelerinde (farklı motor hızları, yük koşulları, püskürtme basınçları ve EGR oranlarında) deneyler gerçekleştirilerek çalışma genişletilebilir.



**KAYNAKLAR**

- Anderson, D., McNeill, G., 1992. Artificial neural networks technology. Kaman Sciences Corporation, 258 (6), 1-83.
- Badami, M., Mallamo, F., Millo, F., Rossi, E., 2002. Influence of multiple injection strategies on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common rail diesel engine. SAE Transactions, 1118-1129.
- Benajes, J., Payri, R., Molina, S., Soare, V., 2005. Investigation of the influence of injection rate shaping on the spray characteristics in a diesel common rail system equipped with a piston amplifier. Journal of fluids engineering, 127 (6), 1102-1110.
- Biswas, S., Bakshi, M., Shankar, G., Mukhopadhyay, A. (2016). Optimization of Multiple Injection Strategies to Improve BSFC Performance of a Common Rail Direct Injection Diesel Engine, SAE Technical Paper.
- Carlucci, P., Ficarella, A., Laforgia, D. (2001). Study of the influence of the injection parameters on combustion noise in a common rail diesel engine using ANOVA and neural networks, SAE Technical Paper.
- Celikten, I., 2003. An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines. Applied Thermal Engineering, 23 (16), 2051-2060.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., 2002. Thermodynamics: an engineering approach. McGraw Hill, USA.
- Challen, B., Baranescu, R., 1999. Diesel engine reference book. Butterworth-Heinemann, MFarland, USA.
- Chen, S. K., 2000. Simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and particulate emissions by using multiple injections in a small diesel engine. SAE Transactions, 2127-2136.
- Corpor, A. T., 2014. Introduction to Neural Networks. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands.
- d'Ambrosio, S., Ferrari, A., 2015. Potential of double pilot injection strategies optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance. Applied energy, 155, 918-932.
- Dimitriou, P., Peng, Z., Wang, W., Gao, B., Wellers, M., 2015. Effects of advanced injection strategies on the in-cylinder air-fuel homogeneity of diesel engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 229 (3), 330-341.
- Dincer, I., Rosen, M. A., 2012. Exergy: energy, environment and sustainable development. Elsevier, USA.
- Fang, T., Chia-fon, F. L., 2009. Bio-diesel effects on combustion processes in an HSDI diesel engine using advanced injection strategies. Proceedings of the Combustion Institute, 32 (2), 2785-2792.
- Ferguson, C. R., Kirkpatrick, A. T., 2015. Internal combustion engines: applied thermosciences. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Funai, K., Yamaguchi, T., Itoh, S. (1996). Injection rate shaping technology with common rail fuel system (ECD-U2), SAE Technical Paper.

- Hadadpour, A., Jangi, M., Pang, K. M., Bai, X. S., 2019. The role of a split injection strategy in the mixture formation and combustion of diesel spray: A large-eddy simulation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (4), 4709-4716.
- Hamzaçebi, C., 2011. Yapay sinir ağları: Tahmin amaçlı kullanımı MATLAB ve Neurosolutions uygulamalı. Ekin Basım Yayın Dağıtım, Bursa.
- He, Z., Xuan, T., Jiang, Z., Yan, Y., 2013. Study on effect of fuel injection strategy on combustion noise and exhaust emission of diesel engine. *Thermal Science*, 17 (1), 81-90.
- Heaton, J., 2008. *Introduction to Neural Networks with C#*. Heaton Research Incorporated, USA.
- Heywood, J., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Education, USA
- Hong, S., Shin, J., Sohn, J., Park, I., Sunwoo, M., 2015. Coordinated control strategy for the common-rail pressure using a metering unit and a pressure control valve in diesel engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229 (7), 898-911.
- Jeon, J., Park, S., 2015. Effects of pilot injection strategies on the flame temperature and soot distributions in an optical CI engine fueled with biodiesel and conventional diesel. *Applied energy*, 160, 581-591.
- Jeong, J., Jung, D., Lim, O. T., Pyo, Y. D., Lee, Y. J., 2014. Influence of pilot injection on combustion characteristics and emissions in a DI diesel engine fueled with diesel and DME. *International Journal of Automotive Technology*, 15 (6), 861-869.
- Khidir, D. K., Atrooshi, S. A., 2016. Taguchi Method for Investigating the Performance Parameters and Exergy of a Diesel Engine Using Four Types of Diesel Fuels. *ARO-The Scientific Journal of Koya University*, 4 (1), 27-34.
- Kingma, D. P., Ba, J., 2015. Adam: A method for stochastic optimization. *ICLR 2015 Conference*.
- Kitchen, T., 2012. *Common rail diesel fuel systems*. AK Training, UK.
- Koch, T., Gartner, U., Konig, G., 2006. Influence and potential of flexible injection rate shaping for medium and heavy duty diesel engine combustion processes. *International journal of vehicle design*, 41 (1-4), 127-142.
- Kotas, T. J., 2013. *The exergy method of thermal plant analysis*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands
- Lazic, Z. R., 2006. *Design of experiments in chemical engineering: a practical guide*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Meloni, R., Naso, V., 2013. An insight into the effect of advanced injection strategies on pollutant emissions of a heavy-duty diesel engine. *Energies*, 6 (9), 4331-4351.
- Mobasheri, R., Peng, Z., Mirsalim, S. M., 2012. Analysis the effect of advanced injection strategies on engine performance and pollutant emissions in a heavy duty DI-diesel engine by CFD modeling. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 33 (1), 59-69.
- Moffat, R. J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental thermal and fluid science*, 1 (1), 3-17.

- Mohan, B., Yang, W., Kiang Chou, S., 2013. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 664-676.
- Montgomery, D. C., 2017. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Moran, M. J., 1989. *Availability analysis: a guide to efficient energy use corrected edition*. ASME press, New York, USA.
- Ozener, O., Ozkan, M., Yuksek, L., 2017. Modelling Analysis of Multiple Diesel Injection Strategies with One-Dimensional Simulation Coupled with Artificial Neural Networks. *THERMAL SCIENCE*, 21 (1B), 413-425.
- Özkan, M., Özkan, D. B., Özener, O., Yılmaz, H., 2013. Experimental study on energy and exergy analyses of a diesel engine performed with multiple injection strategies: Effect of pre-injection timing. *Applied Thermal Engineering*, 53 (1), 21-30.
- Öztemel, E., 2012. *Yapay sinir ağları*. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pan, J., Yang, W., Chou, S., Li, D., Xue, H., Zhao, J., Tang, A., 2013. Spray and combustion visualization of biodiesel in a direct injection diesel engine. *THERMAL SCIENCE*, 17 (1), 279-289.
- Park, S. H., Kim, H. J., Lee, C. S., 2016. Effect of multiple injection strategies on combustion and emission characteristics in a diesel engine. *Energy & Fuels*, 30 (2), 810-818.
- Pulkrabek, W. W., 2004. *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Reif, K., 2014. *Diesel engine management*. Springer, New York, USA.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E., Soruşbay, C., 2013. *İçten Yanmalı Motorlar*. Birsen Yayınevi. İstanbul.
- Shailaja, M., Raju, A. S. R., (2017). Neural Network—Based Diesel Engine Emissions Prediction for Variable Injection Timing, Injection Pressure, Compression Ratio and Load Conditions. *Emerging Trends in Electrical, Communications and Information Technologies*, Springer: 109-122.
- Shundoh, S., Komori, M., Tsujimura, K., Kobayashi, S., 1992. NO<sub>x</sub> reduction from diesel combustion using pilot injection with high pressure fuel injection, SAE Technical Paper.
- Şirvancı, M., 1997. *Kalite için deney tasarımı" Taguçi yaklaşımı"*. Literatür, İstanbul.
- Thurnheer, T., Edenhauser, D., Soltic, P., Schreiber, D., Kirchen, P., Sankowski, A., 2011. Experimental investigation on different injection strategies in a heavy-duty diesel engine: emissions and loss analysis. *Energy Conversion and Management*, 52 (1), 457-467.
- Tow, T., Pierpont, D., Reitz, R. D., 1994. Reducing particulate and NO<sub>x</sub> emissions by using multiple injections in a heavy duty DI diesel engine. *SAE Transactions*, 1403-1417.
- Tüik, 2014. *Motorlu Kara Taşıtları*. Türkiye İstatistik Kurumu, Eylül.
- Tüik, 2019. *Motorlu Kara Taşıtları*. Türkiye İstatistik Kurumu, Nisan.

- Vanegas, A., Won, H., Felsch, C., Gauding, M., Peters, N. (2008). Experimental investigation of the effect of multiple injections on pollutant formation in a common-rail DI diesel engine, SAE Technical Paper.
- Wang, D., Zhang, C., Wang, Y., 2007. A numerical study of multiple fuel injection strategies for NO<sub>x</sub> reduction from DI diesel engines. *International Journal of Green Energy*, 4 (4), 453-470.
- Xiao, S., Sun, W., Du, J., Li, G., 2014. Application of CFD, Taguchi method, and ANOVA technique to optimize combustion and emissions in a light duty diesel engine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014,
- Xu, H., Yin, B., Liu, S., Jia, H., Su, S., 2019. Effect of injection strategy and load on the performance of a common-rail diesel engine fueled with *Jatropha curcas* biodiesel–diesel blend. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41 (4), 167.
- Yardımcı, M. H., 2008. Motor teknolojisi. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Yin, B., Yu, S., Jia, H., Yu, J., 2016. Numerical research of diesel spray and atomization coupled cavitation by Large Eddy Simulation (LES) under high injection pressure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 59, 1-9.
- Yu, R., Wong, V., Shahed, S., 1980. Sources of hydrocarbon emissions from direct injection diesel engines. *SAE Transactions*, 324-335.
- Yüncü, H., 2010. Ekserji Analizi. ODTÜ Basım İşliği, 31-99, Ankara.
- Zheng, M., Kumar, R., 2009. Implementation of multiple-pulse injection strategies to enhance the homogeneity for simultaneous low-NO<sub>x</sub> and-soot diesel combustion. *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (9), 1829-1841.
- Zhuang, J., Qiao, X., Bai, J., Hu, Z., 2014. Effect of injection-strategy on combustion, performance and emission characteristics in a DI-diesel engine fueled with diesel from direct coal liquefaction. *Fuel*, 121, 141-148.

## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Erzurum'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Yüksek lisans yaptığı Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'ndan 2013 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl aynı anabilim dalında doktora öğrenimine başladı. Halen Bayburt Üniversitesi'nde görevine devam etmektedir.