

Kontrollü EGR Soğutma Sistem Tasarımının NO_x ve BSFC Üzerine Etkisinin Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) İle Modellenmesi ve Optimizasyonu

Halil İbrahim AKOLAŞ^{1*}, Alırıza KALELİ²

ÖZET: Bu çalışma kapsamında dizel motorların egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) sistemlerinde kullanılmak üzere egzoz gazlarını soğutan yenilikçi bir sistem tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan sistemde 12 V elektrikli pompa ve fan kullanılmıştır. Bu elemanlar için ayrı ayrı PID (Oransal Integral Türev) kontrolcüler tasarlanmış ve kontrolcü parametreleri için optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Emme manifolduna giren gazların miktarı ve sıcaklığı için farklı çalışma koşullarında motor NO_x ve fren özgül yakıt tüketimi (brake specific fuel consumption (BSFC)) üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Veriye dayalı yöntemler kullanılarak matematiksel model geliştirilmiştir. Elde edilen matematiksel model sayesinde tasarlanan kontrol sistemi için farklı motor çalışma koşullarında referans EGR akış miktarı ve sıcaklık değeri tanımlanmıştır. Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)) ile tanımlanan modellerin gerçek verilerle uyumluluğu istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, EGR sistemi, PID, ANFIS.

Modeling and Optimization of the Effect of Controlled EGR Cooling System Design on NO_x and BSFC with Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)

ABSTRACT: In this study, an innovative system was designed to cool exhaust gases to be used in exhaust gas recirculation (EGR) systems of diesel engines. The designed system uses a 12 V electric pump and fan. PID (Proportional Integral Derivative) controllers are designed for these elements and optimization method is used for the controller parameters. For the amount and temperature of the gases entering the intake manifold, their effects on engine NO_x and brake specific fuel consumption (BSFC) under different acclimation conditions were analyzed. A mathematical model was developed using data-based methods. The reference EGR flow rate and temperature value for different engine operating conditions have been defined for the control system designed thanks to the obtained mathematical model. The compatibility of models defined with Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) with real data was statistically analyzed.

Keywords: Diesel engine, EGR system, PID, ANFIS.

¹ Halil İbrahim AKOLAŞ (Orcid ID: ORCID:0000-0002-3153-8044), Bitlis Eren Üniversitesi Ahlat MYO, Ahlat, Bitlis, Türkiye

² Alırıza KALELİ (Orcid ID: 0000-0002-3234-5922), Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Halil İbrahim AKOLAŞ, e-mail: hakolas@beu.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 20-05-2020

Kabul tarihi / Accepted: 07-08-2020

GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda fosil kökenli yakıtların kullanımı, çevre ve hava kirliliği oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Giderek katılaştıran emisyon düzenlemeleri, sınırlı kullanılabilirlik, çevresel sorunlar ve artan ham madde maliyetleri nedeniyle otomotiv üreticileri ve araştırmacılar, motorlu taşıtlarda enerji kayıplarını, yakıt sarfiyatını ve atmosfere olan zararlı etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalara büyük önem vermişlerdir (Agarwal ve ark., 2011). Dizel motorlar, yüksek sıkıştırma oranlarında fakir karışımla çalışmaları nedeniyle yüksek ısı verime sahip motorlardır. Yanma odasındaki yüksek oksijen miktarı tam yanmayı ve yakıt dağılımındaki homojenliği sağlarken, silindir içi sıcaklığın ve nitrojen oksit (NOx) emisyonunun önemli oranda artmasına neden olur (Zheng ve ark., 2004).

EGR sistemi, dizel motorlarda NOx emisyonlarını azaltmak için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde bir miktar egzoz gazı emme havası ile karıştırılarak yanma odasına gönderilir. Egzoz gazlarının emme havası ile karıştırılması, yanmanın fiziksel koşullarının (sıcaklık-yoğunluk) değişimine ve silindir içindeki oksijen miktarının azalmasına (seyreltme etkisi) sebep olur. Ayrıca, bu karışım emme dolgusunun özgül ısını artırırken, silindir içi sıcaklığını (termal etki) ve hava-yakıt oranını düşürür. Bu durum yanma sürecine etki ederek yanma odası sıcaklığının aşırı yükselmesini önler ve sonuç olarak NOx emisyon değerini önemli ölçüde azaltır. (Plee ve ark., 1981; Zhao ve ark., 2000).

Dizel motorlarda NOx oluşumunu etkileyen en önemli parametre silindir içi sıcaklığıdır. Yanma sıcaklığı 1300°C'nin üzerine çıktığında hem oksijen hem de azot atomları, moleküllere ayrılarak NOx emisyonlarını oluştururlar (John 1988). Egzoz gazlarının yoğunluğunu karbondioksit (CO₂) ve su buharı (H₂O) oluşturmaktadır. Bu gazların doğrudan emme dolgusuna yönlendirilmesi (sıcak EGR) emme dolgusundaki oksijen miktarının azalmasına (termal kısılma), volümetrik verimin düşmesine, tutuşma gecikmesine ve silindir içi sıcaklığın düşmesi neden olur. Sonuç olarak silindir içi sıcaklığın azalması NOx oluşumunda azalmaya neden olur. EGR gazlarının emme dolgusu ile karıştırılmadan önce soğutulması (soğutulmuş EGR) emme dolgusundaki O₂ miktarını artırır. Bu sayede soğutulmuş EGR gazları ile düşük emme dolgusu sıcaklığı ile yüksek oranda O₂ konsantrasyonu sağlanır. Bu durum sıcak EGR'ye göre silindir içi sıcaklık seviyesini daha da azaltarak NOx oluşumunda önemli bir azalmaya neden olur (Lee ve Ha, 2018).

Geleneksel EGR sistemi ile donatılmış dizel motorlarda emme manifolduna giren egzoz gazları motor ana soğutma sistemiyle soğutulmaktadır. Resirküle edilen egzoz gazlarının soğutma etkinliği, motor ana soğutma sisteminin performansına bağlıdır. Klasik motor soğutma sistemlerinin performansları, sistemde kullanılan bileşenlerin yapısı gereği kısıtlı ve pasiftir. Özellikle yüksek güç gerektiren koşullardaki yetersiz ısı atılımı soğutma sisteminde önemli kayıplara yol açmaktadır. Ayrıca EGR gazlarının soğutulması soğutma sistemine ek bir soğutma yükü getirmektedir. NOx salınımının azaltılmasında bütünleşik bu soğutma yapısı EGR soğutucudan çıkan egzoz gazlarının sıcaklığını optimum değerlerden uzaklaştırmaktadır.

Bu çalışmada EGR sisteminde emme manifolduna alınan egzoz gazlarının miktarı ve gazların sıcaklığının NOx emisyonuna ve motor yakıt tüketimine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla EGR sistemi için farklı bir soğutma devresi tasarlanmıştır. Pasif soğutma sistemi elemanlarına sahip olan klasik EGR sisteminin yerine kontrol edilebilen 12V elektrikli pompa ve fan kullanılmıştır. Bu bileşenler için PID (Proportional (oransal), Integral (integral) ve Derivative (türev)) kontrolcü tasarlanmıştır. Bileşenler için tasarlanan kapalı döngü kontrol sistemlerinin referans değerleri ise etkisi araştırılan EGR oranı ve sıcaklık değerleridir. Dolayısıyla bu değerlerin motor emisyon değerlerine ve yakıt tüketimine göre belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için farklı motor çalışma bölgeleri tanımlanarak her bir bölgede

aday test noktaları seçilmiştir. Seçilen bu bölgelerde tanımlanan deney noktaları kullanılarak, veriye dayalı sistem tanımlama teknikleri kullanılmıştır. Böylece seçilen motor çalışma bölgesinin tümünde geçerli bir global model elde edilerek tasarlanan soğutma sistemi için referans çizelgesi oluşturulmuştur. İçten yanmalı motorlarda silindir içinde meydana gelen yanma stokastik bir süreçtir. Motor çalışma koşullarının tümü için deney yapılması ve sonuçlarının toplanması hem çok zahmetli hem de zaman alan karmaşık bir süreçtir. Bu sürecin uygulanması için profesyonel bir laboratuvara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yerine ilgilenilen parametrelerle ilgili matematiksel olarak ifade edilebilen analitik modeller kullanılabilir. Fakat bu modeller ise gerçek verilerle uyumsuzluk gösterebilmektedir. Bundan dolayı, son yıllarda veriye dayalı modelleme teknikleri gelişen yapay zekâ uygulamalarıyla karmaşık sistemlerin çıkışlarını tahmin etmeye kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin farklı alanlarda kullanılabilir olmaları nedeniyle termodinamik sistemlerde de kullanılması, modele dayalı kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve motor çıkış parametrelerinin optimizasyonu için imkân sunmaktadır. Bununla birlikte motorlarda parametrelerin ve çıkış karakteristiklerinin çokluğu, değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olmaması nedeniyle yapay zekâ araçları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sinirsel bulanık sistemler, yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık (BM) modellerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir yapay zekâ yöntemidir. Bu yöntem sayesinde, içten yanmalı motor uygulamalarında doğrusal olmayan model ve adaptasyon ihtiyacı ortadan kaldırılabilmektedir. Bu öğrenme tekniğinin altında yatan temel fikir YSA ile gerçekleştirilen eş zamanlı paralel hesaplamalar ve bulanık mantığın çıkarım özelliğinin eldeki data kümesine dayanarak birlikte uygulanmasıdır. İçten yanmalı motorlarda yanma ve kontrol problemi için bulanık mantık ile YSA geleneksel yöntemlerden daha iyi, hızlı ve hassas tahminler yapma potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir.

Literatürde içten yanmalı motorların performans ve emisyonunun tahmininde ANFIS kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda alternatif yakıtlarla ilgili olarak performans tahmini (Sayin ve ark., 2007), yine bir dizel motorda enjektör sprey kalitesinin artırılması amacıyla püskürtme yüzeyinin modellenmesi (Lee ve ark., 2007), dizel motorun değişen boost basınç artışıyla performansının tahmini (Al-Hinti ve ark., 2009) gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, EGR gazlarının oran ve sıcaklığını ayarlamak için bir kontrol sistemi tasarlayarak, farklı motor çalışma koşullarında yakıt tüketimi ve NOx emisyonunun bu parametrelerle olan ilişkisini belirlemektir. Bu amaçla bir ANFIS modeli tasarlanmıştır. Bu modelle sözü geçen parametrelerin belirlenmesinde yüksek doğruluk oranına sahip 1D modellerin karmaşıklıklarının aksine çok amaçlı optimizasyon araştırmalarında kullanıldığında hesaplama açısından daha avantajlı olduğu görülebilmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

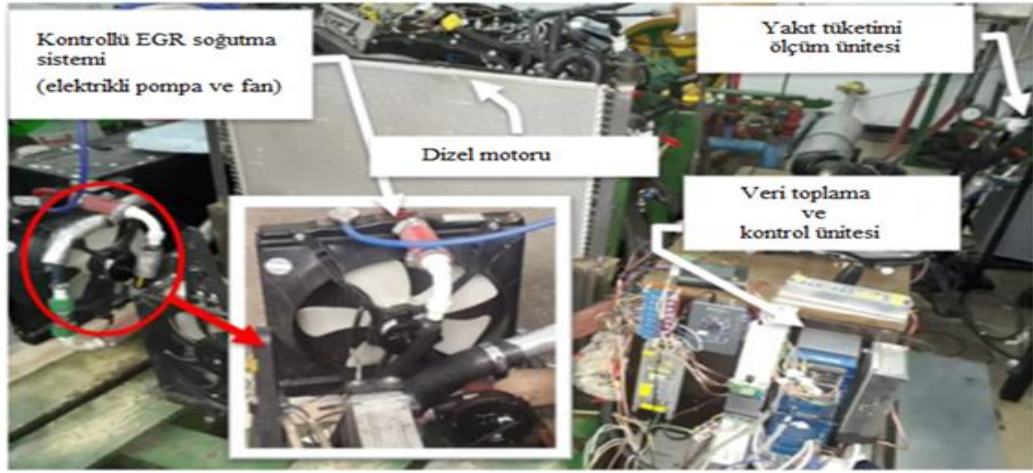
Motor Test Düzenegi

Deneyler dört zamanlı Ford marka 92 kW, 2.2 L toplam silindir hacimli bir dizel motoru üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney motorunun teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Motor deney düzenegi Şekil 1’de ve düzenegin şematik gösterimi ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

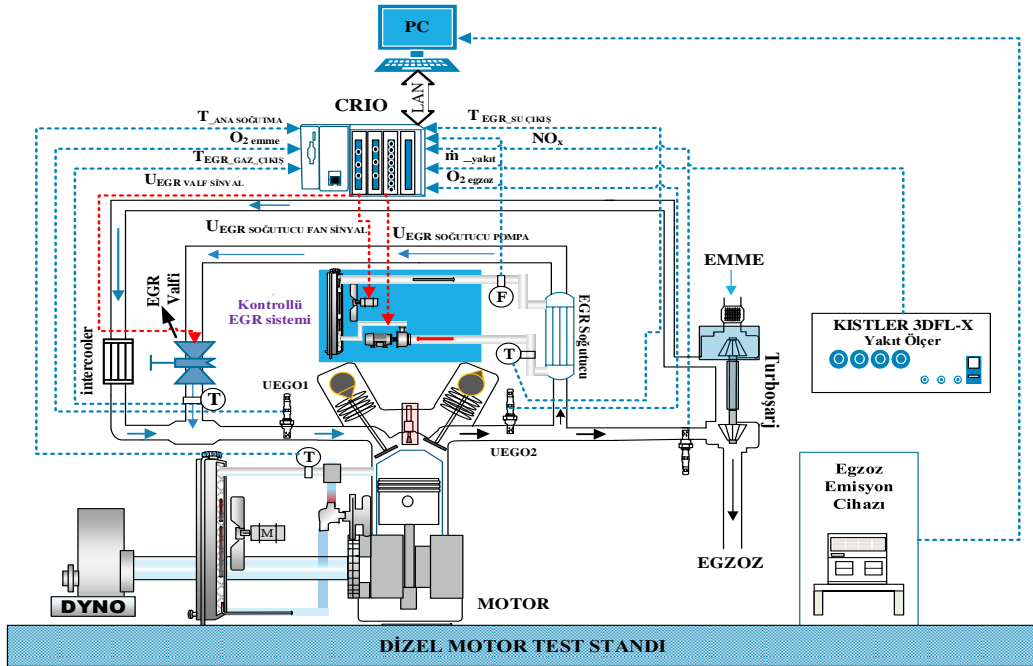
NOx emisyon ölçümleri için National Instruments NI 9755 NOx sensör modülü kullanılmıştır. Yakıt tüketimini ölçmek için Kistler DFL3X-5 bar yakıt akış ölçer kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termo çiftler kullanılmıştır. Motor soğutma suyu sıcaklığı, motor devri, yakıt basıncı, emme manifold basıncı, emme havası sıcaklığı ve hava akış miktarı on-board diagnostics (OBD) üzerinden veri toplama ve kontrol ünitesine iletilmiştir. Tüm veriler bilgisayarda LabVIEW ortamında hazırlanan kodlarla yazılmış ve gerçek zamanlı alan programlanabilir kapı dizisi (GZAPKD) şasisi üzerinden oluşturulmuştur.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri

Motor	FORD PUMA
Silindir sayısı	4
Turboşarjlı	EGR (High pressure)
Maksimum güç/devir (kW/(d/d))	92/3500
Maksimum tork/devir (Nm/(d/d))	350/(1450-2000)
Toplam silindir hacmi	2198.1 cc
Kurs boyu	94.6 mm
Piston çapı	86 mm
Sıkıştırma oranı	15.5:1



Şekil 1. Motor test düzeneği.



Şekil 2. Motor test düzeneğinin şematik gösterimi.

Geleneksel olarak evrensel egzoz gazı oksijen sensörleri genellikle hava-yakıt oranı (HYO) ve hava fazlalık katsayısı (λ) ölçümleri için test cihazlarında kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada EGR oranının hesaplanmasında emme ve egzoz manifoldlarında iki adet Bosch marka LSU 4.9 geniş band egzoz gazı oksijen sensörleri kullanıldı. Eşitlik 1. de ki matematiksel tanımdan faydalanılmıştır.

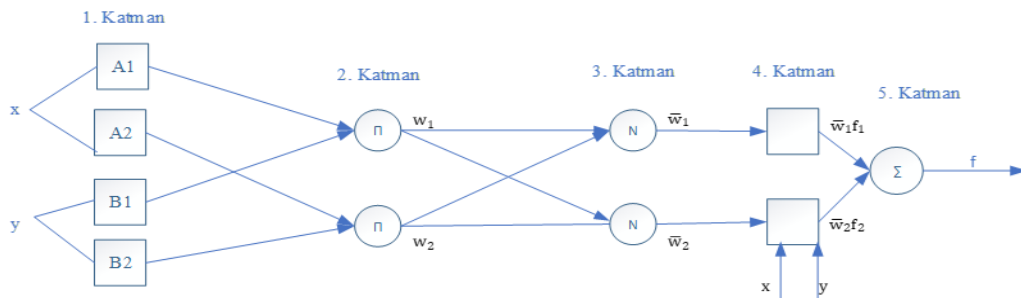
$$\%EGR = \frac{O_{2atm} - O_{2emme}}{O_{2atm} - O_{2egzoz}} \quad (1)$$

Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Uyarlanabilir sinirsel sistem (ANFIS), Takagi-Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemiyle birlikte yapay sinir ağının kombinasyonuyla oluşturulmuş bir sistemdir. Bu sistem yapısında bulunan nöronlar vasıtasıyla girişteki sinyalleri alarak öğrenme işlemini gerçekleştirir ve karar mekanizmasını kullanarak çıktı üretir (Mariani ve ark., 2014). Sinirsel bulanık sistem, bulanık sistemde yer alan kuralların manuel üretilmeleri zorunluluğunu ortadan kaldırır. Yapısındaki sinir ağı sayesinde, sistem parametreleri üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri otomatik olarak tanımlanır. Bu nedenle sistemin çıkış tahmin kapasitesi artırılır. İki giriş sinyali x ve y 'ye karşılık gelen çıkış sinyali f olan bir bulanık çıkarım sistemi ele alındığında, uygulanan if-then (Eğer-ise) kural tabanı Takagi ve Sugeno tipi olmak üzere Eşitlik 2. ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \text{Kural 1: EĞER } x, A_1 \text{ VE } y, B_1, \text{ İSE } f_1 &= p_1x + q_1y + r_1 \\ \text{Kural 2: EĞER } x, A_2 \text{ VE } y, B_2, \text{ İSE } f_2 &= p_2x + q_2y + r_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Burada p, q, r bulanık mantık tasarım parametreleridir. Beş katmanlı ileri beslemeli bir sinir ağı içeren ANFIS mimarisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Her bir katman farklı işlem gerçekleştirir ve bu şekilde karakterize edilir. Birinci katmanda bulanıklaştırma işlemi yürütülür. Bu katmandaki her bir düğüm için üyelik fonksiyonları hazırlanarak dilsel bir değerle gösterilir. Bu katmanda bulanık mantıkta olduğu gibi girişlerin dönüştürülmesinde farklı matematiksel fonksiyonlar kullanılmaktadır. Matematiksel fonksiyon Eşitlik 3. de ifade edilmektedir.



Şekil 3. ANFIS model mimarisi.

$$O_{1i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

$$O_{1i} = \mu_{B_i}(x) \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

Burada A_i bulanık mantık kümesini ve O_{1i} ise üyelik fonksiyonunu göstermektedir. Bu katmandan sonraki kural katmanıdır. μ_{A_i} bulanık üyelik fonksiyonları olup Bell biçimli üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - C}{a_i} \right)^b}, \quad i = 1, 2..$$

İkinci katmanda ise bulanıklaştırma için kuralların oluşturulduğu katmandır. Bu katmanın bulanık operatör girişleri için VE operatörü kullanılır. Ayrıca yuvarlak katmanlar girdi katmanlarıyla çarpılır.

Çıktıları elde etmek için aşağıdaki denklem hesaplanır. Her düğümün çıktısı, bu düğümle ilişkili kuralla uygulanacak ağırlığa karşılık gelmektedir.

$$O_{2i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), i = 1, 2.. \quad (5)$$

Üçüncü katman düğümüne gelen her bir veri burada normalleştirilmesi gerekir. Normalleştirme işlemi Eşitlik 6. da ifade edilmektedir.

$$O_{3i} = \bar{w}_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x) / w_1 + w_2, i = 1, 2.. \quad (6)$$

Dördüncü katman ise berraklaştırma katmanıdır. Bu katmanda her düğüm, x ve y girişiyle doğrusal olarak fonksiyon hesaplanır. Her denklemin ardışık olarak üç parametresi vardır. Fonksiyonun sonucu, ağırlık girişi ile çarpılır, çıkış düğümü ile sonuçlanır.

$$O_{4i} = \bar{w}_i f_i = p_i x + q_i y + r, \quad (7)$$

Eşitlik 7. üçüncü katmandan elde edilen çıktıdır. p_i, q_i, r ise ardışık parametrelerdir.

Son katman ise genellikle tek bir düğümün tüm giriş sinyallerinin toplamını topladığı çıkış katmanıdır. Bu katmanda, Şekil 3'te gösterilen mimarideki gibi tek bir sabit düğüm bulunmaktadır. ANFIS sisteminin çıkış değeri elde edilir ve berraklaştırılan çıkış değeri Eşitlik 8. ile elde edilir.

$$O_{5i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (8)$$

ANFIS mimarisinde yaygın olarak kullanılan hibrit öğrenme algoritması, geri yayılma ve en küçük kareler yönteminin birleşmesiyle oluşmaktadır. ANFIS yapısının geriye doğru geçişli öğrenme algoritması sırasında gradyan iniş şeması kullanılır. Öğrenme süreci; girdi ve eğitim veri seti olarak adlandırılan bir veri seti elde edilerek başlar. Eğitim veri seti, girdi ve çıktı vektörleri şeklinde ayrılmaktadır. Daha sonra ANFIS, önceden beslenen giriş ve çıkış vektörleri kullanılarak eğitilir. Bundan sonra üyelik fonksiyonlarının belirlenmesine yardımcı olacak öncül parametrelere ihtiyaç vardır, bu öncül parametreler önceki beslenen eğitim veri kümesinden bulunur. Ardından üyelik işlemleri düzenlenir. Daha sonra, gerçek ve tahmin edilen değerler arasında istenen hata yüzdesi değerinin çok doğru bir şekilde yapılması için son aşamaya geçilir. Bunu, en küçük kareler yöntemi uygulayarak ortaya çıkan parametreler belirler. Elde edilen hata değeri, önceki aşamada belirlenen referanstan daha büyük olursa, parametreler gradyan iniş yöntemiyle geri yayılım algoritması kullanılarak güncellenir. Bu işlem, hata değeri ayarlanan değerden düşük olana kadar devam etmektedir. Hata değeri ilk ayarlanan hata değerinden daha düşük olduğunda, eğitim işlemi durdurulur. Daha sonra kontrol edilen veri seti, oluşturulan veriyi karşılaştırmak için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada motor devri, yük, EGR oranı ve emme manifolduna giren egzoz gaz sıcaklığı ANFIS yapısına girdi olarak verilmiş ve BSFC ve NOx ise tahmin edilen çıktı parametreleri olarak ele alınmıştır. Mevcut deneysel veriler eğitim ve validasyon setleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmış ve buna göre deneysel verilerin %70'i eğitim için rastgele seçilmiştir. Kalan verilerin %30'u ise ANFIS tahminlerinin performansının analizi için kullanılmıştır.

EGR Sıcaklığı İçin Kapalı Döngü Kontrol Sistemi Tasarımı

Literatürde EGR sisteminin dizel motorların NOx bileşenleri üzerindeki etkisi birçok çalışmada incelenmiştir. Fakat bu çalışmalarda EGR oranını ile manifolda giren egzoz gaz sıcaklığı ile beraber motor yakıt tüketimi ve NOx emisyonlarına olan etkileri birlikte ele alınmamıştır. Dolayısıyla sıcak egzoz gazları manifolda girmeden önce ısı eşanjöründen geçirilerek soğutulmaktadır. Klasik sistemlerde EGR soğutma devresinde soğutucu akışkan olarak motorun ana soğutma sıvısı dolaştırılmaktadır. Bu sayede EGR soğutucu gazın sıcaklığını ana soğutucunun sıcaklığına bağlı olarak 100°C etrafında

KOKH, benzer şekilde gerçek ve tahmin edilen değer arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. KOKH değerinin küçük olması hatanın azaldığını göstermektedir.

$$KOKH(y_{NOx,BSFC}, \hat{y}_{NOx,BSFC}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_{kNOx,BSFC} - \hat{y}_{kNOx,BSFC})^2}{N}} \quad (11)$$

R^2 determinasyon katsayısı olup, parametresi oluşturulan modelin gelecekteki çıktılarının tahmininin tutarlılık ölçüsünü göstermekte ve Eşitlik 12. ile tanımlanır.

$$R^2(y_{NOx,BSFC}, \hat{y}_{NOx,BSFC}) = 1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^N (y_{kNOx,BSFC} - \hat{y}_{kNOx,BSFC})^2}{\sum_{k=1}^N (y_{kNOx,BSFC} - \bar{y}_{NOx,BSFC})^2} \right) \quad (12)$$

Burada \bar{y} ortalama değerini göstermektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler motorun kararlı çalışma koşullarında 1200, 1700, 2000 ve 2500 d/dak'da yüklü ve yüksüz koşullarda yapılmıştır. Motorun tüm bu çalışma koşullarında EGR oranları %5-10-15 olarak ayarlanmıştır. Her devir için Çizelge 2 ile verilen yük, % EGR oranları ve EGR gaz çıkış sıcaklıkları dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Elektronik kontrollü EGR soğutma sisteminde soğutucu akışkan çıkış sıcaklıkları minimum 40°C ile maksimum 100°C arasındaki değişime göre EGR gaz çıkış sıcaklık değerleri ayarlanmıştır.

Çizelge 1. Kontrollü EGR soğutma sistemi deney test koşulları.

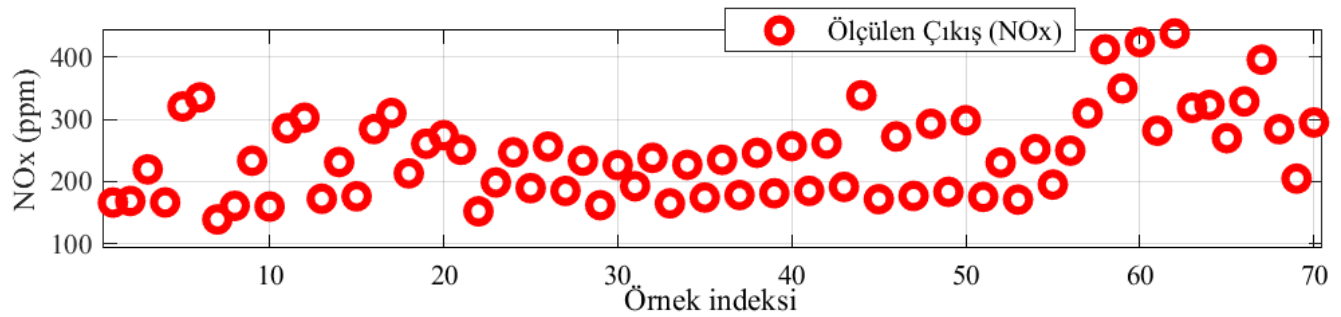
Motor Hızı	Motor Yüğü (Nm)	EGR		EGR gazı eşanjör çıkış sıcaklığı		
		Oranı				
1200±50 d/dak.	10±2 Nm	5±1 %	60±5 °C	75±5 °C	90±5 °C	
		10±1 %	60±5 °C	75±5 °C	90±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C		90±5 °C	
	30±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
1700±50 d/dak.	20±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
	60±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
2000±50 d/dak.	30±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
	70±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
2500±50 d/dak.	40±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		15±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
	80±2 Nm	5±1 %	75±5 °C	90±5 °C	110±5 °C	
		10±1 %	90±5 °C		110±5 °C	
		15±1 %	90±5 °C		110±5 °C	

Bu çalışmada, motor devri, yükü, EGR oranı, emme manifolduna giren egzoz gazı sıcaklığı ile NOx, BSFC çıkış parametreleri arasındaki matematiksel ilişki tanımlanmıştır.

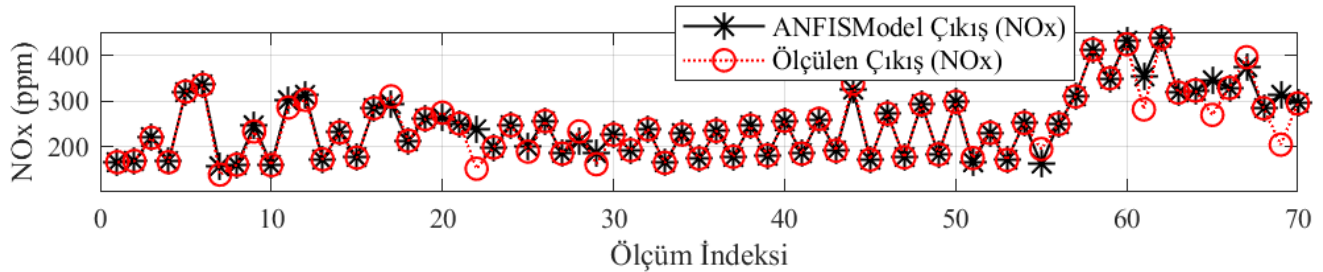
Dizel motorlarda en önemli çıkış parametreleri, yakıt verimliliği ve egzoz emisyonlarıdır. Bu nedenle bu parametrelerin gelecekte alacağı değerlerin seçilen giriş değişkenlerine karşılık tahminleri

çok önemlidir. Bu sayede tasarlanan kontrol sistemleri istenen referans değerlere ulaşılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada ANFIS modelinin kurulması için belirlenen motor çalışma koşulları için toplanan verilerin %70'i eğitim için kullanılırken geriye kalan veri ise test için kullanılmıştır.

Şekil 5'te, Çizelge 2 ile belirlenen motor çalışma koşulları test sistemine uygulandığında elde edilen NOx değişimi gösterilmiştir. Değişim grafiği incelendiğinde farklı çalışma koşulları için farklı NOx değeri elde edilmiştir. Ayrıca her bir deney noktası için uygulanan giriş parametreleri de grafikte verilmiştir. Bu veriler motor yükü, devri, EGR oranı ve emme manifolduna giren egzoz sıcaklığı şeklinde sıralanmıştır. EGR soğutucu çıkışı egzoz gaz sıcaklığı çalışma kapsamında tasarlanan kapalı döngü soğutma sistemiyle ayarlanmıştır. Kontrol sisteminin referans girişi olarak Çizelge 2'de verilen değerler girilerek egzoz gaz sıcaklığı denetlenmiştir. Verilerin elde edilmesiyle ANFIS modeli tasarlanmıştır. Model çıktıları ile ölçülen NOx değerleri ise Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Bu grafikte görüldüğü gibi tahmin ve gerçekleşen değerler arasında iyi bir uyum vardır.



Şekil 5. Çizelge 2 ile belirlenen motor çalışma koşulları için elde edilen NOx değişimi.

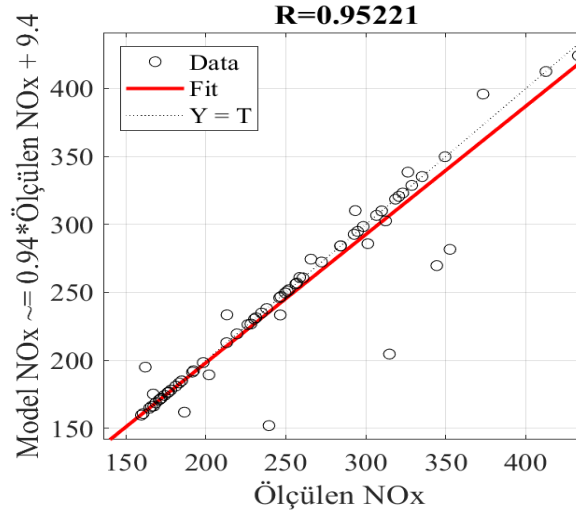


Şekil 6. NOx değişimi için model çıktıların gerçek verilerle karşılaştırılması.

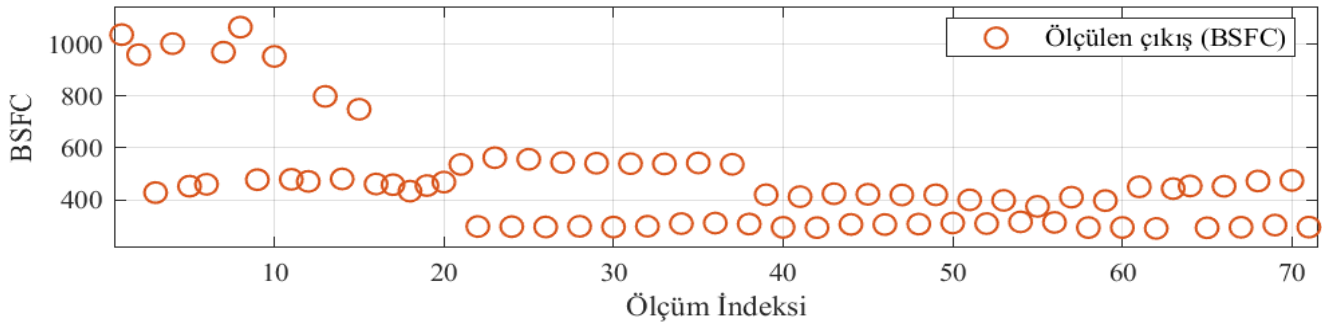
Modelin başarısı ise farklı istatistiksel hata yöntemleri ile analiz edilmiştir. Bu analizde ortalama karesel hata ve bu hatanın karekök değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin model başarısı açısından düşük değerler olması istenmektedir. Ayrıca diğer istatistiksel parametre ise R^2 determinasyon katsayısı olup bu değer 1'e yakın olması modelin gerçek verilerle uyumunu göstermesi bakımından önemlidir. Buna göre elde edilen NOx çıktıların uyum grafiği Şekil 7'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Determinasyon katsayısının hesaplanan değeri 0.95221 olup tasarlanan NOx modelinin tahmin işlemi açısından güvenilirliğini iyi seviyede olduğu söylenebilir. Ayrıca modelin OKH ve KOKH değerleri ise 488.0758 ve 22.0924 şeklinde elde edilmiştir. Bu değerler gerçek verilerle elde edilmiş olup verilerin normalizasyonu 1'den küçük elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan diğer önemli bir motor çıkış parametresi ise BSFC'dir. Çizelge 2'de verilen motor çalışma koşulları için BSFC değişimi elde edilmiş ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Benzer şekilde bu grafikte de motor yükü, devri, EGR oranı ve manifolda giren egzoz gaz sıcaklığı her bir çalışma noktası için grafikte verilmiştir.

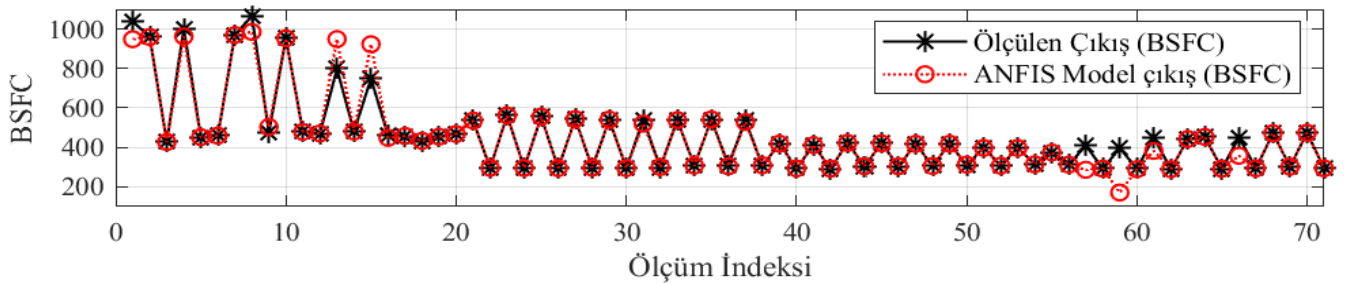
BSFC parametresi için ANFIS modeli tasarlanmış ve model çıktısı ile gerçek veriler Şekil 9'daki grafikte karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde ise model çıktılarının gerçek verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca model geçerliliği için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 7. Elde edilen NO_x modelinin gerçek verilerle karşılaştırıldığı uyum grafiği.



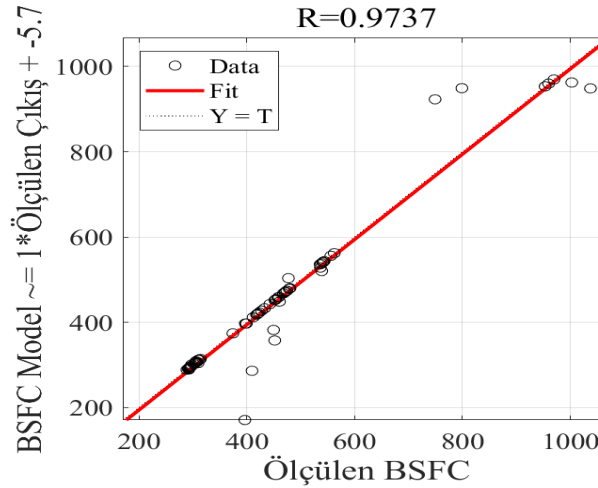
Şekil 8. Çizelge 2 ile belirlenen motor çalışma koşulları için elde edilen BSFC değişimi.



Şekil 9. Elde edilen BSFC modelinin gerçek verilerle karşılaştırıldığı uyum grafiği.

BSFC çıkış parametresi için modelin uyum grafiği ise Şekil 10'da verilmiştir. Ayrıca belirlenen determinasyon katsayı değeri ise 0.9737 olup belirlenen model gerçek verilerle oldukça uyumludur. Diğer istatistiksel hesaplamalarda ise OKH ve KOKH değerleri ise **533.5064** ve **39.16** 'dır.

Her ki çıkış parametresi için hesaplanan OKH ve KOKH değerleri Çizelge 3'te toplu şekilde verilmiştir. Bu değerler de parametrelerin değişim aralığında olup büyüklük olmaları çıktılarının normalizasyonu ile ilgilidir.

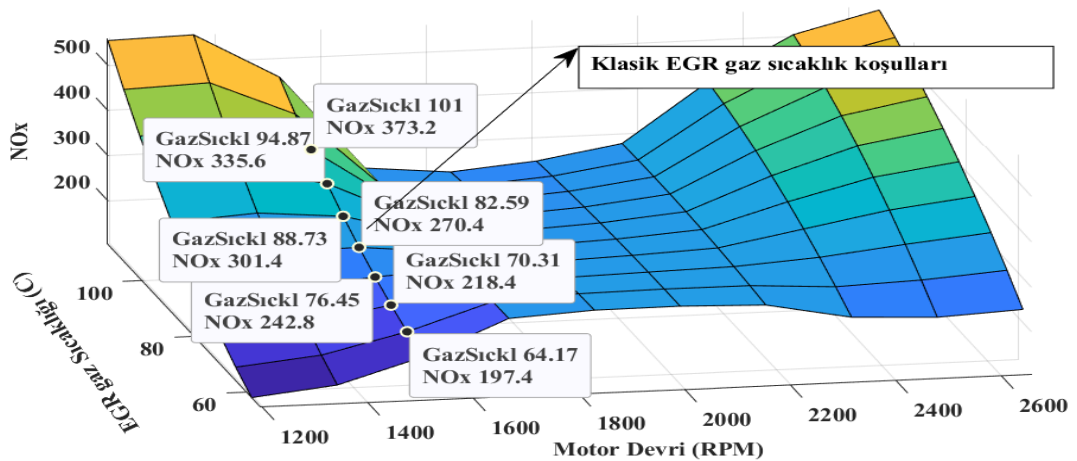


Şekil 10. Elde edilen BSFC modelinin gerçek verilerle karşılaştırıldığı uyum grafiği.

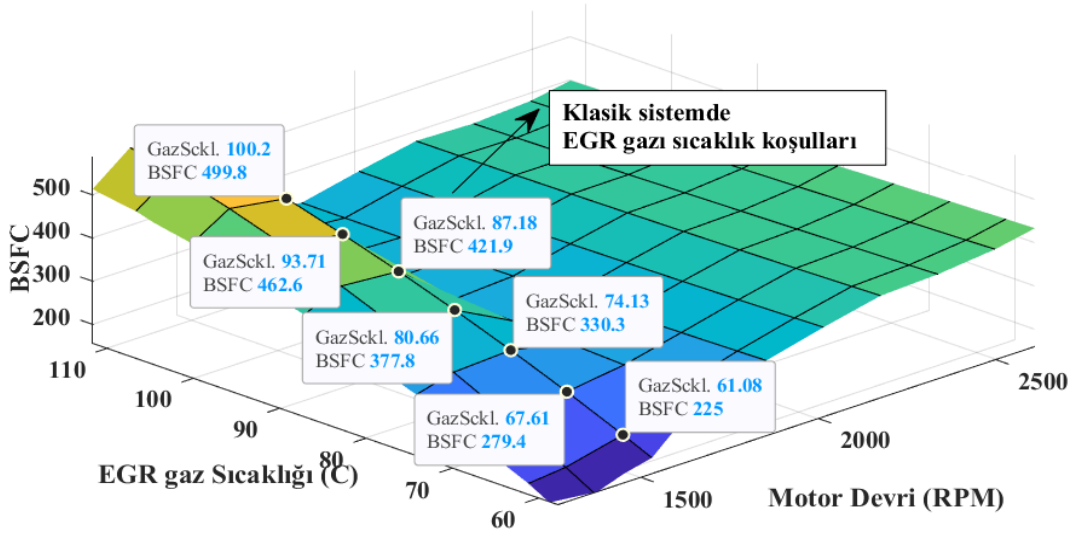
Çizelge 3. Kontrollü EGR soğutma sistemi deney test koşulları.

	OKH	KOKH	R2
NOx	488.0758	22.0924	0.95221
BSFC	533.5064	39.16	0.9737

Bu çalışma kapsamında tasarlanan ANFIS modeli sayesinde seçilen motor çalışma koşulları sınırlarında global bir model elde edilmiştir. Bu model kullanılarak tasarlanan kontrol sistemi için referans Çizelgesi oluşturulabilmektedir. Çünkü istenilen bir çalışma koşulunda NOx ve BSFC çıkış değerlerinin minimize edilmesine göre olması gereken emme manifolduna giren egzoz gazı sıcaklık değeri belirlenebilmektedir. Bu durumu göstermesi için Şekil 11 ile 12’de motor devri ve emme manifolduna giren egzoz gaz sıcaklık giriş değerlerine karşılık elde edilen NOx ve BSFC değişimi üç boyutlu grafiklerle gösterilmiştir. Bu grafiklerde egzoz gaz sıcaklığının NOx ve BSFC üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Bu grafiklerin elde edilmesinde EGR oranının etkisi göz önünde bulundurulmamıştır.



Şekil 11. Emme manifolduna giren egzoz gaz sıcaklığının farklı motor çalışma koşulları için NOx üzerindeki etkisi.



Şekil 12. Emme manifolduna giren egzoz gaz sıcaklığının farklı motor çalışma koşulları için BSFC üzerindeki etkisi.

Şekil 11 ve 12’de motor devri ve egzoz gaz sıcaklık girdilerine karşılık NOx ve BSFC değerleri gösterilmektedir. Bu grafiklerde seçilen noktalarda sabit motor devir sayısı göz önünde bulundurulmuştur. Her iki grafikte de okla gösterilen kutucuktaki çalışma koşulu klasik sistemi temsil etmektedir. Bilindiği üzere, klasik sistemde EGR eşanjöründen ana motor soğutma akışkanı geçmektedir ve EGR valfinden geçen gazı bu akışkan soğutmaktadır. Ana soğutma akışkanı 90°C olduğundan bu değer okla gösterilmiştir. Grafikte etiketlenen diğer değerler ise bu çalışmada tasarlanan ana sistemden ayrı bir şekilde egzoz gazını soğutmaktadır. Bu sayede gaz sıcaklığının BSFC ve NOx üzerindeki etkisi doğrudan gözlemlenebilmektedir. Ayrıca klasik motor soğutma sistemlerine göre tasarlanan soğutma sistemindeki gaz sıcaklığının ayarlanması ile hem NOx ve hem de BSFC değeri önemli oranda azaltılabilmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada EGR eşanjörü içinden akan akışkanın debisi için bir kapalı döngü kontrol sistemi tasarlanmış ve bu sayede farklı motor çalışma koşulları için emme manifolduna giren gazın sıcaklığı ayarlanmıştır. Tasarlanan harici EGR soğutma sistemi, soğutucu akışkan debisini ve sıcaklığını kontrol edebilen elektronik kontrollü pompa, aktüatörler ve sıcaklık sensörleri ile donatılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle her bir motor koşulu için referans EGR gaz sıcaklığı belirlenmiştir. Manifolda alınan artık gazın etkisini araştırmak için farklı devir ve yük koşullarında bir deney Çizelgesi hazırlanmıştır. Bu Çizelgenin hazırlanmasında şehir içi trafik koşulları (yoğun olarak kullanılan motor devri ve yükü) göz önünde bulundurulmuştur. Motor devri ile yükün yanı sıra farklı EGR oranı ve gaz sıcaklıkları da belirlenerek motorun NOx ve BSFC verileri kaydedilmiştir. Bu veriler çevrimdışı olarak analiz edilerek toplanan verilere dayalı matematiksel bir model oluşturulmuştur. Model için sezgisel sinirsel bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Böylece motor devri, yükü, EGR oranı ve emme manifolduna giren gaz sıcaklık giriş parametreleri kullanılarak seçilen motor çalışma koşulları için global bir model elde edilmiştir. Bu modelin gerçek verilerle uyumu için istatistiksel yöntemlerden faydalanılmış ve model geçerliliği ortalama karesel hata, bu hatanın karekökü ve determinasyon katsayı değerleri kullanılarak ortaya konmuştur. Buna göre ANFIS modeli sırasıyla NOx çıkış parametresi için 488.075-22.0924 ve 0.95221 değerlerine ve BSFC için 533.5064 – 39.16 ve 0.9737 OKH, KOKH ve R² değerlerine sahiptir. Bu sonuçlar tasarlanan modelin gerçek verilerle oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, karmaşık motor kontrol sistem tasarımları için

haritalama gibi sadece üretici firmaların araştırma-geliştirme (AR-GE) laboratuvarlarında gerçekleştirilebilen kalibrasyonlara gerek duymadan sezgisel makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak farklı motor koşullarında EGR oranı ve manifolda giren egzoz gaz sıcaklık verileriyle, emisyon ve yakıt tüketim gibi önemli çıkış parametrelerinin ayarlanması konusunda uygulanabilir global bir yöntem önermektedir.

TEŞEKKÜR

Yapılan araştırma çalışması Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: 2015/362

KAYNAKLAR

- Abd-Alla GH, 2002. Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: A Review. *Energy Conversion and Management* 43 (8): 1027–42.
- Agarwal D, Singh SK, Agarwal AK, 2011. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance, Emissions, Deposits and Durability of a Constant Speed Compression Ignition Engine. *Applied Energy* 88 (8): 2900–2907.
- Al-Hinti IM, Samhouri A, Al-Ghandoor A, Sakhrieh A, 2009. The Effect of Boost Pressure on the Performance Characteristics of a Diesel Engine: A Neuro-Fuzzy Approach. *Applied Energy* 86 (1): 113–21.
- Hountalas DT, Mavropoulos GC, Binder KB, 2008. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Temperature for Various EGR Rates on Heavy Duty DI Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy* 33 (2): 272–83.
- Heywood J, 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Science.
- Lee DY, Seok H, 2018. A Development of Aluminum EGR Cooler for Weight Reduction and Fuel Economy. SAE International.
- Lee SH, Howlett RJ, Walters SD, Crua C, 2007. Modeling and Control of Internal Combustion Engines Using Intelligent Techniques. *Cybernetics and Systems* 38 (5–6): 509–33.
- Maiboom A, Xavier T, Jean-François H, 2008. Experimental Study of Various Effects of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion and Emissions of an Automotive Direct Injection Diesel Engine. *Energy* 33 (1): 22–34.
- Mariani F, Grimaldi CN, Battistoni M, 2014. Diesel Engine NO_x Emissions Control: An Advanced Method for the O₂ Evaluation in the Intake Flow. *Applied Energy* 113: 576–88.
- Plee SL, Ahmad T, Myers JP, 1981. Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO_x Emissions. SAE Technical Paper.
- Sayin C, Ertunc HM, Hosoz M, Kilicaslan İ, Canakci M, 2007. Performance and Exhaust Emissions of a Gasoline Engine Using Artificial Neural Network. *Applied Thermal Engineering* 27 (1): 46–54.
- Thangaraja J, Kannan C, 2016. Effect of Exhaust Gas Recirculation on Advanced Diesel Combustion and Alternate Fuels - A Review. *Applied Energy* 180 (Supplement C): 169–84.
- Zhao H, Hu J, Ladommatos N, 2000. In-Cylinder Studies of the Effects of CO₂ in Exhaust Gas Recirculation on Diesel Combustion and Emissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 214 (4): 405–19.
- Zheng M, Reader GT, Hawley JG, 2004. Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation—a Review on Advanced and Novel Concepts. *Energy Conversion and Management* 45 (6): 883–900.