



KÖMÜR YAKMA SİSTEMLERİNDE VERİM TAHMİNİ DOĞRULUĞUNU ARTIRAN BİR YÖNTEM

Cem ONAT ^{1*}

¹ Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adıyaman
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4295-4860>

Anahtar Kelimeler

Öz

Kömür, yakıcı, alev, görüntü işleme, yapay sinir ağı

Bu çalışmada, bir CCD (Yük Bağlısımlı Cihaz) kamera ile donatılmış evsel kömür yakma sisteminde alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artıran bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, kameradan elde edilen sayısal alev bilgisi ve baca gazı sıcaklığının hava fazlalık katsayısı ile ilişkisini ortaya koyan çoklu lineer regresyon bağıntısına dayanmaktadır. Bu bağıntı ile oluşturulan mimarinin basit yapısı pratik uygulamalar bakımından önemli bir avantajdır. Deneysel veriler üzerinden yapılan doğruluk çalışması önerilen sistemin geleneksel sisteme göre doğruluğu kayda değer biçimde artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, önerilen tahmin sistemi kullanılarak daha yüksek doğrulukta yanma durumu izleme sistemleri geliştirilebilir.

* conat@adiyaman.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1557793

A METHOD INCREASING THE ACCURACY OF EFFICIENCY FORECAST IN COAL FIRING SYSTEMS

Keywords

Coal, combustor, flame, image processing, artificial neural network, forecast

Abstract

In this study, a method increasing the forecast accuracy of the excess air coefficient from the flame image in a domestic coal burning system equipped with a CCD (Charge Couple Device) camera has been proposed. The proposed method is based on a multiple linear regression formula that reveals the relationship between the digital flame information obtained from the camera and the flue gas temperature with the excess air coefficient.

The simple structure of the architecture created with this relation is an important advantage in terms of practical applications. The accuracy study based on experimental data shows that the proposed system significantly increases the accuracy compared to the traditional system. As a result, combustion status monitoring systems with higher accuracy can be developed using the proposed prediction system.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 29.09.2024

Kabul Tarihi : 26.11.2024

Research Article

Submission Date : 29.09.2024

Accepted Date : 26.11.2024

Extended Abstract

Coal burning systems are one of the energy production methods used especially in industry and residential heating. These systems produce heat energy by using coal as fuel and use this energy for various purposes. Coal burning systems can be broadly categorized into three main types. Grill type (stoker) boilers are widely used especially in small and medium-sized businesses and residences. Coal is fed continuously onto a grate, where it burns in a controlled manner. Although these systems are low cost and simple in structure, their combustion efficiency is low and their emission values are high. On the other hand, fluidized bed systems are systems in which coal is mixed with air in the form of small particles at high temperatures and combustion occurs. High combustion efficiency, low emission values and compatibility with different fuel types are the advantages of fluidized bed systems. However, their initial investment costs and operating costs are high. Another system is pulverized coal burning systems. In these systems, coal is ground into very thin powder and burned by mixing with air in the combustion chamber. The systems, which can provide consistently high combustion efficiency, are preferred in large power plants. The installation and operation of coal dust systems are more complex than others, and the storage and transportation of coal dust are risky operations.

The gases (carbon dioxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides and particles) released during coal burning are very harmful to the environment. Therefore, in modern systems, emissions are controlled by using flue gas purification and filtering systems. Additionally, in modern coal burning systems, the combustion process is controlled automatically. In this way, emissions can be reduced while efficiency is increased. From this perspective, coal burning systems have become a more frequently discussed topic in recent years, especially due to their environmental impacts and interest in renewable energy sources. New technologies continue to be developed to both reduce emissions and increase efficiency. Combustion control designs are among the leading new technologies. In closed-loop combustion systems that aim to control the excess air coefficient (λ) at its ideal value, it is very valuable to extract instant information about combustion from the flame image. Because if air excess coefficient estimation information is produced from flame images, the structural time delay in the system can be eliminated. There are different regression models developed recently for estimating the air excess coefficient from the flame image. Onat and Daskin (2019) created a prediction model by combining the trace value of the gray scale flame image matrix and the flue gas temperature information through an artificial neural network. In this study, it was reported that the trace of the flame image matrix and the flue gas temperature information constitute a good combination in estimating the excess air coefficient. However, their proposed prediction system requires a low-pass filter. On the other hand, Golgiyaz, Talu, Daskin and Onat (2022) managed to predict the air excess coefficient value with 96% accuracy using only flame image features. However, the fact that the prediction model they propose requires 768 inputs makes the system extremely complicated. In this study; A new method is proposed to increase the prediction accuracy of the air excess coefficient from the flame image. The method uses the multiple linear regression formula and offers a practical way to increase prediction accuracy.

The analysis results based on experimental data show that the proposed method can improve the prediction accuracy by around 2.4%.

The system used to generate experimental data is given in Figure 1. Accordingly, hazelnut coal is transported to the combustion chamber through a spiral. The combustion chamber can be viewed via a CCD camera. On the other hand, instantaneous excess air coefficient (λ) and flue gas temperature (T) are measured with the help of a lambda sensor and a temperature sensor (thermocouple device) placed in the chimney. The trace value (M) of the gray scale matrix from the flame images taken from the CCD camera is calculated instantly and recorded in the database. Simultaneously, air excess coefficient and flue gas temperature information are recorded synchronously in the same data bank. In this experimental study, a total of 550 seconds of recording was created by producing data every second. In other words, the size of the M, T and λ vectors is 550x1.

The article, which presents a new method that increases the prediction accuracy of the excess air coefficient in combustion systems, is organized as follows: In the next section, the system is introduced and how data collection is done is presented. Then, the proposed method is explained. In the last section, the effectiveness of the proposed method is demonstrated based on experimental data.

1. Giriş

Kömür yakma sistemleri, özellikle sanayide ve konut ısıtmasında kullanılan enerji üretim yöntemlerinden biridir (Yılmaz ve Uslu, 2007). Bu sistemler, yakıt olarak kömürü kullanarak ısı enerjisi üretir ve bu enerjiyi çeşitli amaçlarla kullanıma sunar. Kömür yakma sistemleri genel olarak üç ana tipte kategorize edilebilir (Erken, 2016). Bunlar ızgara tipi kazanlar, akışkan yataklı sistemler ve toz kömür yakma sistemleridir. Izgara tipi (stoker) kazanlar özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde ve konutlarda yaygın olarak kullanılır. Kömür, bir ızgara üzerine sürekli olarak beslenir ve burada kontrollü bir şekilde yanması sağlanır. Bu sistemler düşük maliyetli ve basit yapıya sahip olmalarına karşılık yanma verimleri düşüktür ve emisyon değerleri yüksektir. Diğer taraftan akışkan yataklı sistemler, kömürün küçük parçacıklar halinde yüksek sıcaklıkta havayla karıştığı ve yanmanın gerçekleştiği sistemlerdir. Yüksek yanma verimi, düşük emisyon değerleri ve farklı yakıt türleriyle uyumlu olabilmeleri akışkan yataklı sistemlerin avantajlarıdır. Ancak ilk yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Diğer bir sistem de toz kömür yakma sistemleridir. Bu sistemde kömür çok ince toz haline getirilir ve yakma odasında hava ile karışarak yanar. Kararlı bir şekilde yüksek yanma verimi sağlayabilen bu sistemler büyük santrallerde tercih edilir. Toz kömür sistemlerinin kurulumu ve işletimi diğerlerine göre daha komplekstir ve de kömür tozunun depolanması ve taşınması riskli operasyonlardır.

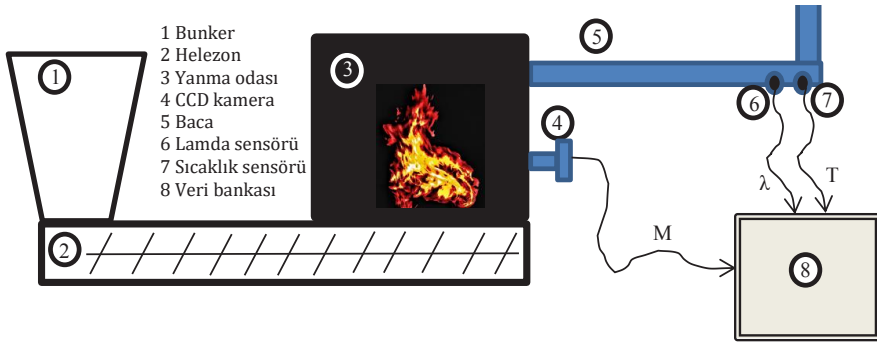
Kömür yakma sırasında açığa çıkan gazlar (karbon dioksit, kükürt dioksit, azot oksitleri ve partiküller) çevreye oldukça zarar verir (Clay, Lewis ve Severnini, 2024). Bu yüzden modern sistemlerde baca gazı arıtma ve filtreleme sistemleri kullanılarak emisyonlar kontrol edilmektedir. Ayrıca modern kömür yakma sistemlerinde, yanma süreci otomatik olarak kontrol edilmektedir. Bu sayede verimlilik artırılırken emisyonlar da azaltılabilmektedir (Yadav ve Mondal, 2019). Bu perspektiften, kömür yakma sistemleri, özellikle çevresel etkileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi nedeniyle son yıllarda daha sık tartışılan bir konu olmaktadır. Hem emisyonları azaltmak hem de verimliliği artırmak için yeni teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir. Yeni teknolojilerin başında yanma kontrolü tasarımları gelmektedir (You ve Xu 2010). Hava fazlalık katsayısını (λ) ideal değerinde denetlemeyi amaçlayan kapalı çevrim yakma sistemlerinde alev görüntüsünden yanmaya ilişkin anlık bilgilerin çıkartılması çok kıymetlidir. Zira alev görüntülerinden hava fazlalık katsayısı tahmin bilgisi üretilirse sistemdeki yapısal zaman gecikmesi ortadan kaldırılabilir (Talu, Onat ve Daskin, 2017; Onat, 2019). Alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmini için son zamanlarda geliştirilmiş farklı regresyon modelleri vardır. Onat ve Daskin (2019) gri skala alev görüntüsü matrisinin iz değeri ve baca gazı sıcaklığı bilgilerini bir yapay sinir ağı aracılığıyla birleştirerek bir tahmin modeli oluşturmuşlardır. Bu çalışmada alev görüntüsü matrisinin izi ile baca gazı sıcaklığı bilgilerinin hava

fazlalık katsayısının tahmininde iyi bir ikili oluşturduğu raporlanmıştır. Ancak önerdikleri tahmin sistemi düşük geçiren bir filtreye muhtaçtır. Diğer taraftan Golgiyaz, Talu, Daskin ve Onat (2022) hava fazlalık katsayısı değerini sadece alev görüntüsü özelliklerini kullanarak %96 doğruluk ile tahmin etmeyi başarmışlardır. Ancak önerdikleri tahmin modelinin 768 adet girişe muhtaç olması sistemi fazlasıyla komplike kılmaktadır. Bu çalışmada; alev görüntüsünden hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artırmak için yeni bir yöntem önerilmektedir. Yöntem çoklu lineer regresyon formülünden yararlanmakta olup tahmin doğruluğunu artırmanın pratik bir yolunu sunmaktadır. Deneysel veriler üzerinden yapılan analiz sonuçları önerilen yöntemin tahmin doğruluğunu %2.4 civarında iyileştirebileceğini göstermektedir.

Yakma sistemlerinde hava fazlalık katsayısının tahmin doğruluğunu artıran yeni bir metot sunan makale şöyle organize edilmiştir: Bir sonraki bölümde sistem tanıtılarak veri toplamanın nasıl yapıldığı sunulmuştur. Ardından önerilen metot açıklanmıştır. Son bölümde deneysel veriler üzerinden önerilen metodun etkinliği gösterilmiştir.

2. Sistem ve Veri Toplama

Deneysel veri üretmek için kullanılan sistem Şekil 1’de verilmektedir. Buna göre fındık kömür bir helezon aracılığıyla yanma odasına sevk edilmektedir. Yanma odası bir CCD kamera aracılığıyla görüntülenebilmektedir. Diğer taraftan bacaya yerleştirilen bir lamda sensörü ve bir sıcaklık sensörü (termocouple cihaz) yardımıyla anlık hava fazlalık katsayısı (λ) ve baca gazı sıcaklığı (T) ölçülmektedir. Ölçümlerden önce gerekli sonda temizliği titizlikle yapıp emisyonuz ortamda kalibrasyonu yapılmıştır. Cihazın hava fazlalık katsayısını ölçerken kullandığı sensörlerin ölçüm aralığı, doğruluğu ve çözünürlüğü Tablo 1’de verilmektedir. CCD kameradan alınan alev görüntülerinden gri yelpaze matrisinin iz değeri (M) anlık olarak hesaplanıp veri-bankasına kaydedilmektedir. Bununla eş zamanlı olarak hava fazlalık katsayısı ve baca gazı sıcaklığı bilgileri senkronize biçimde aynı veri bankasına kaydedilmektedir. Bu deneysel çalışmada saniyede bir veri üretilerek toplam da 550 saniyelik bir kayıt oluşturulmuştur. Başka bir ifade ile M, T ve λ vektörlerinin boyutu 550x1’dir. Ayrıca belirtilmesi gerekir ki “bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur”.



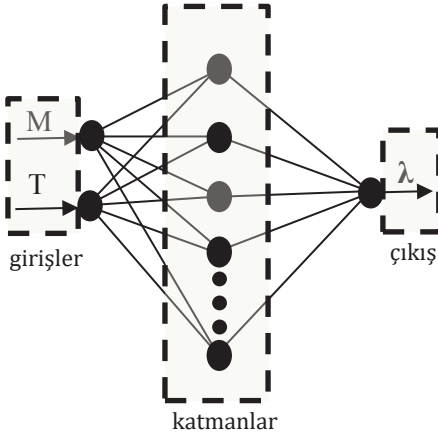
Şekil 1. Deney Sisteminin Şematik Gösterimi

Tablo 1. Ölçüm Cihazının Özellikleri

	Ölçüm aralığı	Doğruluk	Çözünürlük
Baca gazı sıcaklık ölçümü	0 ... +1760 °C	±1 °C	0,1 °C
O ₂ ölçümü	0 ... +25 % hacimsel	±0,8%	0,01 % hacimsel
NO ₂ ölçümü	0 ... +500 ppm	±5 ppm	0,1 ppm
NO ölçümü	0 ... +4000 ppm	±5 ppm	1 ppm
SO ₂ ölçümü	0 ... +5000 ppm	±10 %	1 ppm

3. Önerilen Metot

Bir CCD kamerayı anlık yanma durumlarını yansıtmak amacıyla bir sensör olarak kullanmayı amaçlayan çalışmaların ortak özelliği geleneksel bir yapay sinir ağı kullanmalarıdır. Bu geleneksel yapı Şekil 2'de verilmektedir. Geleneksel yapıda üç aşamadan söz edilebilir. Buna göre ilk aşamada, anlık alev görüntüleri işlenerek görüntü matrisinin iz değeri hesaplanmaktadır. İkinci aşamada senkronize bir şekilde bir veri bankasında toplanmış iz değeri vektörü (M), baca gazı sıcaklığı verisi vektörü (T) ve hava fazlalık katsayısı vektörü (λ) yapay sinir ağının eğitiminde kullanılır. Son aşamada eğitilmiş yapay sinir ağı regresyon modeli gerçek zamanlı giriş verileri üzerinden anlık tahmin değerlerini üretir.



Şekil 2. Geleneksel Yapay Sinir Ağı Regresyon Modeli

Önerilen metod dört aşamada uygulanmaktadır. Birinci aşamada, geleneksel yaklaşımda olduğu gibi, CCD kameradan alınan görüntülerin sayısallaştırılması yapılarak M , T ve λ vektörlerinden oluşan veri kümesi elde edilir. İkinci aşamada çoklu-lineer regresyon formülü elde edilir (Catalina, Iordache ve Caracaleanu, 2013; Brown, 2009). Bunun için ilk önce giriş vektörleri M ve T 'den oluşan X matrisi tanımlanır. X matrisi Denklem 1'de verilmektedir.

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_{550} \end{bmatrix} \text{ ve } T = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{550} \end{bmatrix} \text{ olmak üzere } X = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & T_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_{550} & T_{550} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ardından Denklem 2'de verildiği gibi K matrisi hesaplanır.

$$K = (X^T X)^{-1} \quad (2)$$

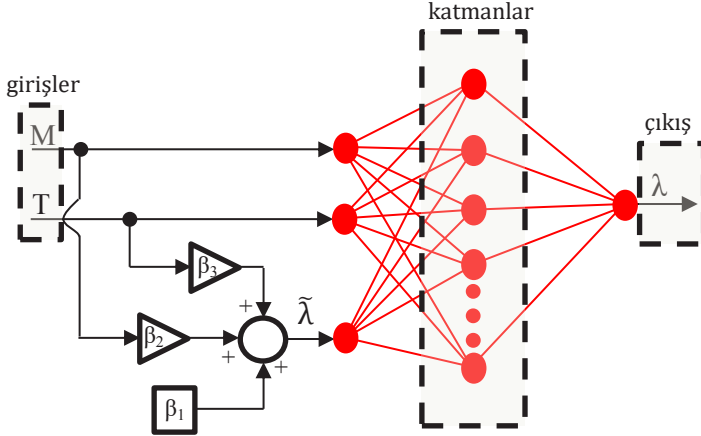
Son olarak X ve K matrisi ile λ çıkış vektörünün Denklem 3'de verilen ifadede değerlendirilmesi ile regresyon bağıntısının katsayıları vektörü β hesaplanır.

$$\beta = KX^T \lambda = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Buna göre λ 'nın regresyon bağıntısı Denklem 4'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\tilde{\lambda} = \beta_1 + \beta_2 M + \beta_3 T \quad (4)$$

Yöntemin üçüncü aşamasında, elde edilen tahmin fonksiyonu üçüncü bir giriş gibi yapay sinir ağı mimarisine Şekil 3'de gösterildiği gibi entegre edilir ve ardından sinir ağı eğitilir.



Şekil 3. Önerilen Metot İçin Kullanılan Yapay Sinir Ağı Mimarisi

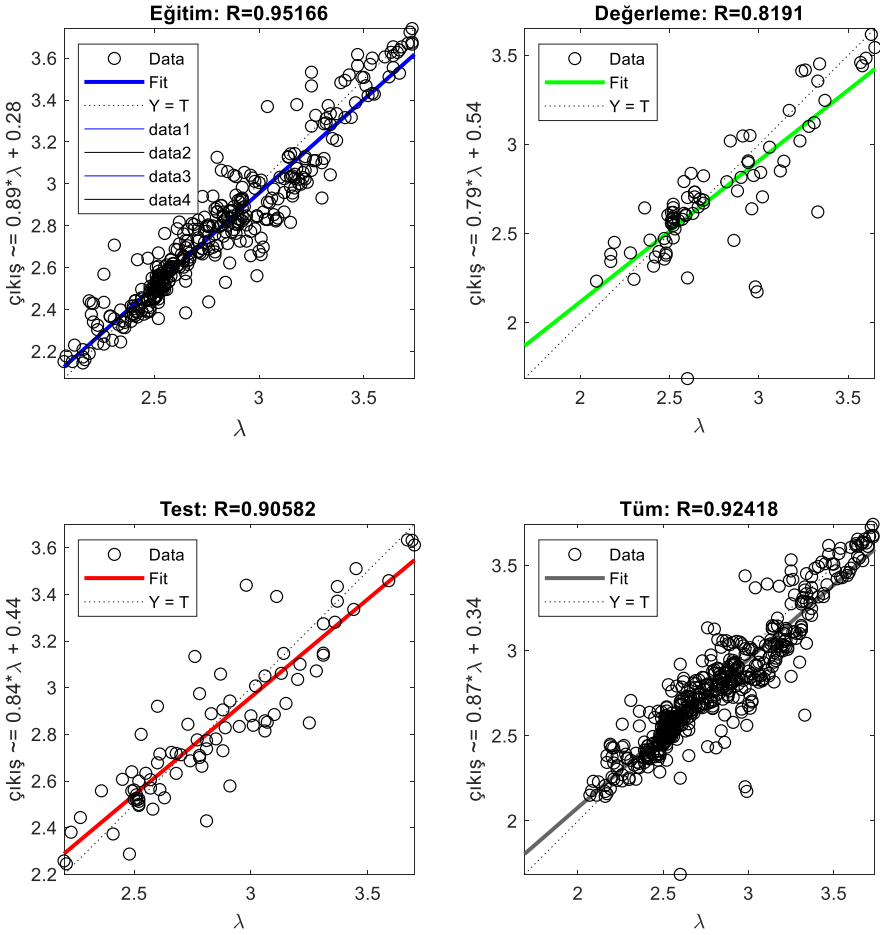
Son aşamada ise eğitilmiş yapay sinir ağı regresyon modeli gerçek zamanlı giriş verileri üzerinden anlık tahmin değerlerini üretir.

4. Deneysel Sonuçlar

Veri bankasında toplanan M, T ve λ vektörleri kullanılarak önerilen metot uygulanmıştır. Buna göre elde edilen β vektörü Denklem 5'de verilmektedir.

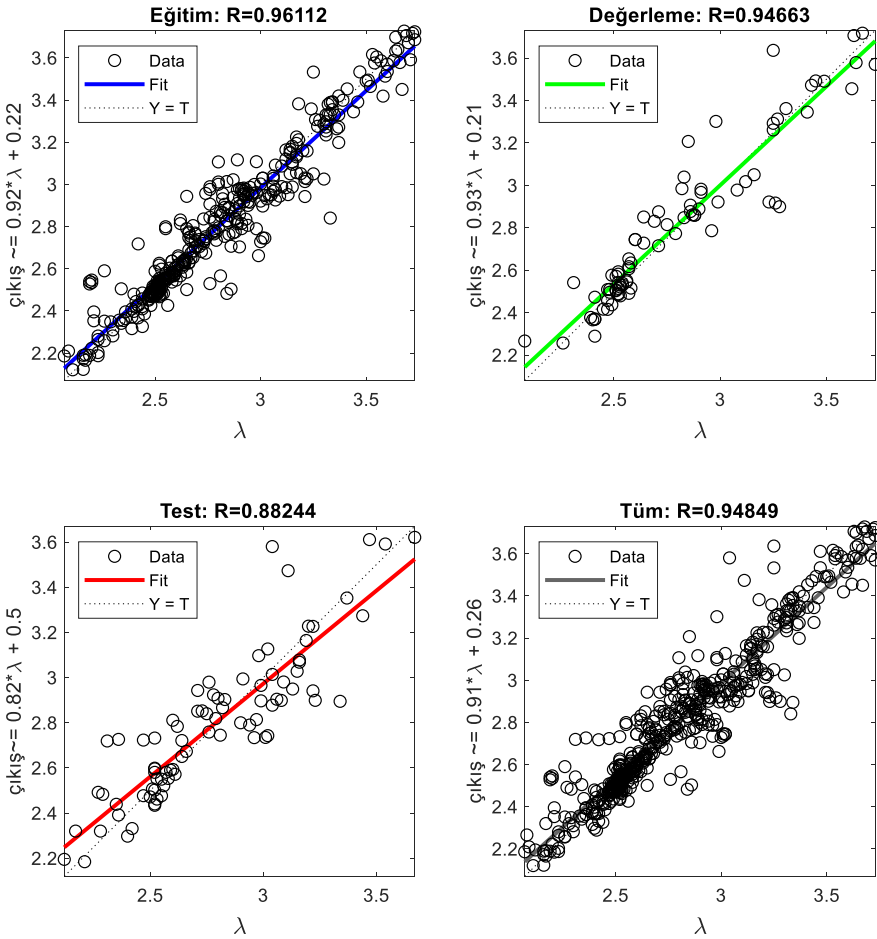
$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.110251 \\ 0.000035 \\ -0.016563 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Önerilen yapay sinir ağı regresyon modelinin doğruluk sınaması geleneksel metot ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Sinir ağının eğitiminde, her iki durum için de, tek bir katman ve 100 adet sinir hücresi kullanılmıştır. Eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma mübadilleri ile karşılaştırıldığında hafızadan ve zamandan tasarruf sağlamaktadır (Mammadli, 2017). Ayrıca, yapay sinir ağlarının kullanımına ilişkin detaylı bilgiler için (Der, Ordu ve Basar 2024; Onat, Daskin, Toraman, Golgiyaz 2021) çalışmalarına bakılabilir. Buna göre Şekil 4 ve 5'de sırasıyla geleneksel metot ve önerilen metot tahmin performansları sunulmuştur. Deneysel olarak elde edilen verilerin %70'i eğitimde, %15'i değerlendirilmede ve %15'i de test için kullanılmıştır.



Şekil 4. Geleneksel Yöntem ile Elde Edilen Regresyon Modelinin Doğruluğu

YSA regresyon modeli performansını değerlendirmek için kullanılan en yaygın ölçüt; determinasyon katsayısı (R^2) ölçütüdür. Determinasyon katsayısı; tahmin edilen değerlerin, gerçek değerlere ne kadar iyi uyduğunu gösterir. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça modelin performansı artar. Şekil 4'de verilen geleneksel mimari ile %92.4 doğruluk sağlanırken ($R=0.924$), Şekil 5'deki önerilen mimari ile doğruluk %94.8'e ($R=0.948$) yükseltilmiştir. Buradan geleneksel ve önerilen mimari üzerinden elde edilen regresyon modellerinin determinasyon katsayıları sırasıyla 0.85 ve 0.9 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Önerilen Yöntem ile Elde Edilen Regresyon Modelinin Doğruluğu

5. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, bir CCD kamera ile yanma odası gözlenen, evsel kömür yakma sisteminde yanma veriminin alev görüntüsünden tahmini için yeni bir yapay sinir ağı mimarisi önerilmiştir. Önerilen sinir ağının fazladan bir girişe ihtiyaç duymaması ve basit yapısı pratik uygulamalarda oldukça avantaj sağlayacaktır. Deneysel veriler üzerinden karşılaştırmalı biçimde yapılan doğruluk analizi önerilen yöntem ile oluşturulan mimarinin geleneksel mimariye göre doğruluğu %2.4 artırdığını göstermektedir. Ölçüm doğruluğu, ölçüm sisteminin kullanıldığı kapalı çevrim kontrol sisteminin performansına da aynı katkıyı yapacağı düşünülürse kontrolcü performansının da %2.4 daha iyi olacağı anlamına gelmektedir. Bu

artışın, 100000 kcal/h kapasiteli evsel bir kömür yakıcısı özelinde saatte 2400 kcal enerjiden tasarruf edileceği anlamına geldiği değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin yanma verimini maksimize etmeyi amaçlayan kapalı çevrim kontrolcü uygulamalarında kullanıldığı düşünüldüğünde söz konusu doğruluk artışının kontrolcü performansına büyük katkı sağlayacaktır. İleriki çalışmalarda görüntü matrisinin farklı özelliklerinin doğruluk üzerine etkileri çalışılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma 114M116 numaralı TÜBİTAK 3001 projesinden elde edilen veriler ile gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a ve destekçi firma MİMSAN AŞ'ne verdikleri destek sebebiyle teşekkür ederim.

Kaynakça

- Brown S H., (2009). Multiple Linear Regression Analysis: A Matrix Approach with MATLAB, *Alabama Journal of Mathematics*, Vol.34, pp.1-3.
- Catalina T., Iordache V. ve Caracaleanu B., (2013). Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand, *Energy and Buildings*, 57, pp 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.010>
- Clay K., Lewis J. ve Severnini E., (2024). The historical impact of coal on cities, *Regional Science and Urban Economics*, 107 (2024) 103951 pp 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2023.103951>
- Erken H T., (2016). Pulverize Kömür Kazanında Yakıcı Açılarının Alev Yapısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Der O., Ordu M., ve Basar G., (2024). Optimization of cutting parameters in manufacturing of polymeric materials for flexible two-phase thermal management systems, *Materials Testing*, 2024. doi.org/10.1515/mt-2024-0127
- Golgiyaz S., Talu M F., Daskin M. ve Onat C. (2022). Estimation of excess air coefficient on coal combustion processes via gauss model and artificial neural network, *Alexandria Engineering Journal*, 61, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.022>
- Mammadli S., (2017). Financial time series prediction using artificial neural network based on Levenberg-Marquardt algorithm, *Procedia Computer Science*, 120, pp 602–607.
- Onat C. (2019). A new design method for PI–PD control of unstable processes with dead time, *ISA Transactions*, 84, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.029>

- Onat C. ve Daskin M., (2019). A Basic ANN System for Prediction of Excess Air Coefficient on Coal Burners Equipped with a CCD Camera, *Mathematics and Statistics* 7(1) pp 1-9. DOI: 10.13189/ms.2019.070101
- Onat C., Daskin M., Toraman S., Golgiyaz S. ve Talu M F., (2021). Prediction of combustion states from flame image in a domestic coal burner, *Measurement Science and Technology*, 32(7), pp 1-10. DOI: 10.1088/1361-6501/abe446
- Talu M F., Onat C. ve Daskin M., (2017). Prediction of excess air factor in automatic feed coal burners by processing of flame images, *Chinese J. Mech. Eng.* 30 (3) (May 2017) 722–731. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0095-3>.
- Yadav S. ve Mondal S S., (2019). A complete review based on various aspects of pulverized coal combustion, *Int J Energy Res.* 2019;43 pp 3134–3165. <https://doi.org/10.1002/er.4395>
- Yılmaz A O. ve Uslu T.,(2007). The role of coal in energy production—Consumption and sustainable development of Turkey, *Energy Policy* 35 pp 1117–1128 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.02.008>
- You C F. ve Xu X C., (2010). Coal combustion and its pollution control in China, *Energy* 35 pp 4467–4472. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.019>