



Baca gazlarının ekserji analizi ve yapay sinir ağları ile modellenmesi Exergy analysis of flue gases and modeling with artificial neural networks

Ayşe BİLGİN AKSOY¹ , Özgür SOLMAZ² , Yiğit AKSOY³ 

^{1,2}Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.
aysebilgen.aksoy@cbu.edu.tr, ozgur.solmaz@cbu.edu.tr

³Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.
yigit.aksoy@cbu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.11.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 01.02.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.32549

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada doğal gaz yakıtlı endüstriyel fırınlara ait bacalardan çıkan baca gazları termodinamiksel açıdan incelenmiştir. Analizlerde, baca gazı bileşenlerinin (O_2 , CO_2 , H_2O ve N_2) konsantrasyonu, baca gazı sıcaklığı ile baca gazı çıkış hızı deneysel ölçüm değerleri kullanılmıştır. Farklı çıkış parametrelerine göre baca gazlarıyla çevreye salınan kullanılabilir enerji (ekserji) miktarları hesaplanmış, daha sonra baca gazlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, ekserji kayıplarına etkisi irdelenmiştir. Ayrıca hesaplanan ekserji verileri Yapay Sinir Ağları (YSA) metoduyla modellenmiş ve gizli katmandaki nöron sayısı değiştirilerek en iyi doğruluğa sahip YSA modeli belirlenmiştir. Belirlenen YSA modeli ile baca gazlarının konsantrasyonu, çıkış sıcaklığı ve hızı kullanılarak baca gazlarının ekserjisi yüksek doğrulukta tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kimyasal ekserji, Baca gazı, YSA

Abstract

In this study, flue gases from natural gas-fired industrial furnaces were thermodynamically investigated. In the analysis, the experimentally measured values of concentration of the flue gas components, i.e. O_2 , CO_2 , H_2O and N_2 , the flue gas temperature and the flue gas outlet rate were used. The usable amount of energy (exergy) released to the environment by flue gases in terms of different output parameters was calculated, then effects of physical and chemical properties of flue gases on the exergy losses were investigated. In addition, the calculated exergy data were modeled by Artificial Neural Network (ANN) method, besides that ANN model with best accuracy was determined by altering the number of neurons in the hidden layer. With the help of ANN model as well as concentration, temperature and rate of flue gases, it has been shown that the exergy of flue gases value can be estimated with high accuracy.

Keywords: Chemical exergy, Flue gas, ANN

1 Giriş

Sanayi devrimi ile beraber insanlığın biyolojik ihtiyaçlar haricindeki yaşantısı ve sürdürülebilir ekonomi için gerekli enerji miktarının her geçen gün artması, enerji kaynaklarında yeni arayışlara ve mevcut kaynakların daha verimli kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalara ivme kazandırmıştır.

Dünya üzerinde üretilen enerjinin büyük bir kısmı endüstriyel tesislerde sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda farklı enerji dönüşüm çevrimlerinde kullanılmaktadır. Bu dönüşümler sırasında oluşan enerji kayıpları veya diğer bir deyişle tersinmezlikler, enerjinin verimli kullanılamaması anlamına gelmektedir. Sanayide enerjinin verimli kullanılamaması enerji kaynaklarının hızla tükenmesinin yanı sıra, üretim maliyetlerinde artışa, dolayısıyla da firmaların uluslararası pazardaki rekabet gücünde azalmaya yol açmaktadır.

Ülkemizdeki enerji tüketiminin %47'sini doğal gaz, %26'sını elektrik ve %17'sini motorin oluşturmaktadır. Doğal gaz tüketiminde endüstri %49 ile en yüksek tüketim payına sahiptir [1]. Endüstriyel tesislerde genellikle doğal gaz yakıtı kullanılan fırınlarda, ham malzemenin uzama, mukavemet vb. özelliklerinin son hal aldığı ısı işlem aşaması gerçekleşmektedir. Isıl işlem için gereken yüksek ısı, fırınlarda farklı enerji türlerinin (elektrik, fosil yakıtlar) ısı enerjisine dönüşümüyle sağlanmaktadır. Ancak bu dönüşümlerin tersinir olmayışı, enerji kayıplarına ve çevresel etkilere sebep olmaktadır [2].

Çevreye salınan ve kullanılmayan bu enerjinin, en büyük kaynağı baca gazları kaynaklıdır. Birçok ülkenin sanayi

kuruluşlarında atılan sıcak gazlar ve sıvılar, enerji tüketiminin yaklaşık %26'sını oluşturmaktadır [3]. Baca gazları ile birlikte çevreye salınan atık ısı ve kimyasal bileşikler, ülkeler arasında yapılan anlaşmalarla kontrol altına alınarak çevresel etkileri azaltılmaya çalışılmaktadır. Literatürde baca gazları üzerine yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bunların çoğunluğu ısı performansın ve verimliliğin artırılması üzerine yapılan çalışmalardır. Rosen ve Dinçer [4] yaptıkları çalışmada atık ısı ve çevre arasındaki ilişkiyi karakterize etmek için emisyon gazlarının ekserji analizini yapmışlardır. Chen ve diğ. [5] yaptıkları çalışmada baca gazında yoğunlaşma ile ısı geri kazanımı için gözenekli seramik bir ortam kullanmışlardır. Kılcal yoğunlaşma etkisinin söz konusu olduğu sistemde, baca gazından su geri kazanım oranının %80, ısı geri kazanım verimliliğinin ise %40 olduğunu belirtmişlerdir. Ersöz [6]'da ısı borusu tasarımı ile baca gazı sıcaklıklarında geri kazanılabilecek ısı miktarlarını deneysel olarak belirlemiştir. Wei ve diğ. [7] tasarladıkları açık çevrimli absorpsiyonlu ısı pompasının kullanıldığı bir baca gazı ısı geri kazanım sistemi ile toplam sistem verimliliğini %11 civarında arttırdıklarını göstermişlerdir. Çomaklı ve diğ. [3] yaptıkları çalışmada, sıcak su elde etmek için bir merkezi ısıtma sisteminin baca ısısını kullanarak baca gazından kaybolan enerjinin %37'sinin geri kazanılabileceğini belirtmişlerdir.

Bacalardan olan atık ısının yararlı enerjiye dönüştürülmesi atık ısı geri dönüşüm sistemlerinin kurulması ile yapılabilmektedir. Fakat sanayi için büyük bir yatırım olan bu sistemlerden sağlanabilecek enerjinin doğru bir şekilde tahmin edilerek, geri dönüşüm oranının hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama ise ekserji analizi ile mümkündür.

Bu çalışmada bir seramik fabrikasında yer alan doğal gaz yakıtlı endüstriyel fırınlara ait bacalardan çıkan baca gazları incelenmiştir. Fırınlara ait bacalardan çıkan baca gazlarıyla çevreye salınan ekserji kayıpları hesaplanmış, baca gazlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, ekserji kayıplarına etkisi irdelenmiştir. Ayrıca hesaplanan ekserji verileri Yapay Sinir Ağları (YSA) metoduyla modellenmiş ve gizli katmandaki nöron sayısı değiştirilerek en iyi performansa sahip YSA modeli belirlenmiştir. Sonuçta Yapay Sinir Ağları metodu kullanılarak tahmin edilen değerler ile gerçek değerler karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

Demir- çelik üretimi ve demir dışı metallerin üretildiği tesisler, toprak ürünleri tesisleri, ağaç ürünleri üretim tesisleri, gıda üretim tesisleri vb. tesisler "Proses tesisleri" olarak adlandırılmaktadır. Bu tesislerde üretilen ürünlerin en önemli aşaması fırında gerçekleşmektedir. Üretimde endüstriyel fırınlarda, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtlar kullanılarak, üretim için gerekli olan çok yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir.

Fırınlarda yanma işlemi, tutuşma sıcaklığının üzerinde yakıt ve havanın tepkimeye girmesi ile gerçekleşir. Yakıt, hava karışımında tam yanma gerçekleştiğinde yakıtta bulunan tüm karbon (C) karbondioksit (CO₂), tüm hidrojen (H) su buharına (H₂O) ve tüm sülfür (S) sülfür dioksit (SO₂) dönüşür [8].



Yanma sonucu oluşan bileşikler, yanma ürünü olarak yüksek sıcaklıklarda çevre havaya salınmaktadır. Bu aynı zamanda kullanılmayan ekserji anlamına gelmektedir.

Baca gazında bulunan bileşiklerin miktarları, çıkış sıcaklıkları ve hızlarının ekserji kayıplarına olan etkisinin araştırılması için proses tesislerinden biri olan seramik fabrikasında bulunan fırınların baca gazı ölçümleri ele alınmıştır.

Doğal gazın yakıt olarak kullanıldığı endüstriyel fırınlar, tesiste seramik karo üretimi için kullanılmaktadır. Yanma sıcaklıkları 1200 °C olan fırınlarda kullanılan doğal gazın alt ısıl değeri ise 8250 kcal/m³tür ve %90 metan, %5 etan ve %5 diğer bileşiklerden oluşmaktadır.

Baca alanı 0.31157 m² olan fırın bacasından alınan ölçümlerde, baca çıkış sıcaklıkları minimum 175.9 °C ve maksimum 207.5 °C olduğu tespit edilmiştir. Baca çıkış hızlarının ise 8.5 m/s ile 13.1 m/s arasında değiştiği saptanmıştır. Baca çıkış parametreleri için ölçümler farklı baca gazı çıkış sıcaklıkları ve hız değerlerinde tekrarlanmış ve bu değerlerin 12 tanesi seçilerek, ekserji kayıplarının karşılaştırılması için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 1'de seçilmiş olan hız ve sıcaklık değerleri yer almaktadır.

Tablo 1: Baca gazı çıkış hızı ve sıcaklık değerleri.

Ölçüm Numarası	Sıcaklık (°C)	Hız (m/s)	Ölçüm Numarası	Sıcaklık (°C)	Hız (m/s)
1. ölçüm	175.9	10.7	7. ölçüm	207.1	8.5
2. ölçüm	176.3	10.4	8. ölçüm	207.2	9.6
3. ölçüm	176.6	13	9. ölçüm	207.2	9.8
4. ölçüm	176.8	10.5	10. ölçüm	207.3	8.5
5. ölçüm	176.9	13.1	11. ölçüm	207.4	9.6
6. ölçüm	177.3	13.1	12. ölçüm	207.5	8.5

Seçilen ölçümlerde, doğal gaz yakıtlı seramik fırınlarında oluşan baca gazlarının bileşikleri ve bileşiklerin yüzdelik oranları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Baca gazı bileşikleri ve yüzde konsantrasyon oranları.

Ölçüm No.	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O (%)	N ₂ (%)
1. ölçüm	0.149	0.034	0.135	0.682
2. ölçüm	0.151	0.034	0.135	0.680
3. ölçüm	0.149	0.034	0.135	0.682
4. ölçüm	0.151	0.034	0.135	0.680
5. ölçüm	0.149	0.034	0.135	0.682
6. ölçüm	0.149	0.034	0.135	0.682
7. ölçüm	0.160	0.033	0.14	0.667
8. ölçüm	0.164	0.025	0.14	0.671
9. ölçüm	0.163	0.026	0.14	0.671
10. ölçüm	0.160	0.034	0.14	0.666
11. ölçüm	0.161	0.027	0.14	0.672
12. ölçüm	0.159	0.033	0.14	0.668

2.1 Ekserji analizi

Enerji verimliliği ile ilgili yapılan analizlerde genellikle termodinamiğin birinci yasası mühendisler için yeterli görülmektedir. Fakat hesaplanan bu verim değeri, oluşan tersinmezlikler göz önüne alınmadığında ideal şartlardaki olduğu bilinmemektedir. Eğer istenilen, gerçek çalışma şartlarındaki kullanılabilirlik ise bu durumda termodinamiğin ikinci yasası kullanılarak ekserji verimlilikleri irdelenmelidir.

Enerjinin en çok yararlı işe dönüşebilen kısmı ekserji olarak tanımlanmaktadır. Sisteme giren ekserjinin bir kısmı yararlı işe dönüştürülebilirken bir kısmı ise yok olur, diğer bir deyişle tersinmezliklere harcanır. Fırınlarda, baca gazı ile birlikte çevre havaya salınan ısı bir nevi yok olan ekserjidir.

Enerji sistemlerin analiz edilebilmesi için geçerli kabuller yapılması büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada baca gazlarıyla birlikte atılan ısıyla beraber yok olan ekserjinin hesabı için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- ✓ Baca gazları [2] sistemde yüksek sıcaklık ve düşük basınçta bulunduğu için dolayı mükemmel gaz olarak kabul edilebilir,
- ✓ Gaz bileşiklerinin kimyasal bağ enerjileri ihmal edilmiştir,
- ✓ Analizler boyunca ölü hal olarak tanımlanan çevre sıcaklığının $T_0 = 25 \text{ °C}$ ve çevre basıncı $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ olarak sabittir,
- ✓ Baca gazı basıncının P_0 çevre basıncına eşit olduğu kabul edilmiştir.

Bir sistemin toplam özgül ekserjisi birim zamanda aşağıdaki şekildedir [2].

$$\dot{E}_{\text{sistem}} = \dot{E}_{\text{kinetik}} + \dot{E}_{\text{potansiyel}} + \dot{E}_{\text{kimyasal}} + \dot{E}_{\text{fiziksel}} \quad (1)$$

Denklem (1) gazlar için, kinetik ve potansiyel ekserjileri ihmal edilerek düzenlenirse, baca gazının toplam molar ekserjisi

$$\bar{E}_{\text{bacagazi}} = \bar{E}_{\text{kimyasal}} + \bar{E}_{\text{fiziksel}} \quad (2)$$

biçiminde olur.

Denklem (2)'de yer alan fiziksel ekserji, ideal gazlar için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\bar{E}_{\text{fiziksel}} = c_p(T_1 - T_0) - T_0 \left[c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{P_1}{P_0} \right] \quad (3)$$

Denklemde yer alan c_p sabit basınçta özgül ısıyı, R gaz sabitini, T_0 çevre sıcaklığını, T_1 baca gazı sıcaklığını, P_0 çevre basıncını,

P_1 ise baca gazı basıncını ifade etmektedir. Baca gazının basıncı, çevre basıncının çok az üzerinde veya eşit olması durumunda, fiziksel ekserji denkleminde yer alan $\ln(P_1/P_0)$ ifadesi sıfıra yaklaşır. Bu durumda bu ifade ihmal edilerek baca gazı için fiziksel ekserji denklemi:

$$\bar{\epsilon}_{fiziksel,bg} = c_{p,bg}(T_1 - T_0) - T_0 \left[c_{p,bg} \ln \frac{T_1}{T_0} \right] \quad (4)$$

biçiminde sadeleşir. Denklem yeniden düzenlenirse;

$$\bar{\epsilon}_{fiziksel,bg} = c_{p,bg} \left[(T_1 - T_0) - T_0 \left(\ln \frac{T_1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Karışım gazlar için c_p değeri, karışımı oluşturan gazların, c_p değerleri ve yüzde konsantrasyon oranları kullanılarak bulunabilir [9].

$$c_{p,karışım} = \%a * c_{p,a} * \left(\frac{\bar{m}_a}{\bar{m}_T} \right) + \%b * c_{p,b} * \left(\frac{\bar{m}_b}{\bar{m}_T} \right) + \%c * c_{p,c} * \left(\frac{\bar{m}_c}{\bar{m}_T} \right) + \%d * c_{p,d} * \left(\frac{\bar{m}_d}{\bar{m}_T} \right) \quad (6)$$

Yukarıdaki ifadede yer alan %a, %b, %c, %d karışımı oluşturan a, b, c ve d gazların yüzde oranını, $c_{p,a}$, $c_{p,b}$, $c_{p,c}$ ve $c_{p,d}$ karışımı oluşturan gazların özgül ısılarını, \bar{m}_a , \bar{m}_b , \bar{m}_c ve \bar{m}_d ise gazların molar kütlelerini göstermektedir. Yine denklemde yer alan \bar{m}_T ifadesi toplam molar kütle ve karışımın toplam molar kütle;

$$\bar{m}_T = \%a * \bar{m}_a + \%b * \bar{m}_b + \%c * \bar{m}_c + \%d * \bar{m}_d \quad (7)$$

denklem (7) ile hesaplanabilir. Çalışmanın ekserji analizinde yer alan baca gazı bileşenlerinin özgül ısıları, ideal gaz kabulü ile sıcaklığın fonksiyonu olarak Engineering Equation Solver (EES) programı ile belirlenmiştir. Fiziksel ekserji hesaplanırken özgül ısı birimine dikkat edilmelidir. Birim kJ/kmol K ise hesaplanan değer molar fiziksel ekserji değeridir. Baca gazı ile yok olan toplam ekserjinin diğer bileşeni ise kimyasal ekserjidir. Kimyasal ekserji, konsantrasyon ve reaksiyon ekserjilerinin toplamıdır. Baca gazının molar kimyasal ekserjisi,

$$\bar{\epsilon}_{kimyasal,bg} = \sum_k x_k \bar{\epsilon}_k^0 + \bar{R}T_0 \sum_k x_k \ln x_k \quad (8)$$

biçiminde yazılabilir [9]. Denklem (8)'de yer alan x_k , gazı oluşturan bileşenlerin konsantrasyon yüzdelerini, $\bar{\epsilon}_k^0$ ise bileşenlerin standart kimyasal ekserjilerini ifade etmektedir. Elementler için standart kimyasal ekserjiler tablolar halinde bulunabildiği gibi farklı şartlar ve bileşikler için Gibbs fonksiyonu kullanılarak da hesaplanabilir. Analizi yapılan baca gazını oluşturan gazların standart kimyasal ekserjileri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Baca gazı bileşenlerinin standart kimyasal ekserjisi (kJ/kmol) [4],[9].

O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
3970	20140	11710	720

Kimyasal ekserji denkleminin ikinci kısmında yer alan \bar{R} ise universal gaz sabitidir ve analizlerde 8.31447 kJ/kmolK alınmıştır. Dikkat edilirse Denklem (2)'de bulunan toplam ekserji, molar ekserji değerini ifade eder ve birimi kJ/kmol'dür. Birim mol için bulunan değeri birim zamana çevirmek, bulunan

değerlerin daha anlaşılabilir bir şekilde yorumlanabilmesini sağlayacaktır.

Baca gazı için molar gaz debisi ideal gaz denkleminde aşağıdaki gibi hesaplanabilir [6, 10].

$$\dot{n} = \frac{P_{bg} \dot{V}_{bg}}{\bar{R}T_{bg}} \quad (9)$$

Denklem (9)'da yer alan \dot{V}_{bg} hacimsel debiyi, bg alt indisli T ve P ifadeleri de baca gazının sıcaklık ve basıncını ifade etmektedir. Denklem (2)'de ifade edilen toplam özgül ekserji, molar debi ile çarpılırsa toplam ekserji, diğer bir değişle baca gazı ile çevre havaya olan ekserji yok oluşu \dot{X}_{bg} bulunur.

$$\dot{X}_{bg} = \dot{n} \sum_k \bar{\epsilon}_{bg} \quad (10)$$

Tablo 1, 2 ve 3'te verilen standart ve ölçüm değerleri yukarıdaki denklemlerde kullanılarak ekserji analizleri yapılmıştır. Birim mol için hesaplanan ekserji kayıplarının toplamı molar debi ile çarpılarak birim zamanda toplam ekserji kaybı hesaplanmış ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Baca gazının molar debileri, kimyasal, fiziksel ve toplam ekserji kayıpları.

Ölçüm No	Kimyasal Ekserji kJ/kmol	Fiziksel Ekserji kJ/kmol	Molar Debi kmol/s	Toplam Ekserji kJ/s
1. ölçüm	1042.91	888.20	0.09019	174.17
2. ölçüm	1041.91	892.50	0.08758	169.42
3. ölçüm	1042.91	895.55	0.10941	212.08
4. ölçüm	1041.91	897.75	0.08833	171.32
5. ölçüm	1042.91	902.95	0.11017	214.19
6. ölçüm	1042.91	898.71	0.11008	213.92
7. ölçüm	1061.73	1242.68	0.06699	154.38
8. ölçüm	967.61	1236.94	0.07565	166.76
9. ölçüm	979.17	1237.77	0.07722	171.19
10. ölçüm	1073.73	1245.91	0.07027	155.33
11. ölçüm	991.13	1240.90	0.07561	168.77
12. ölçüm	1062.03	1247.34	0.07019	154.58

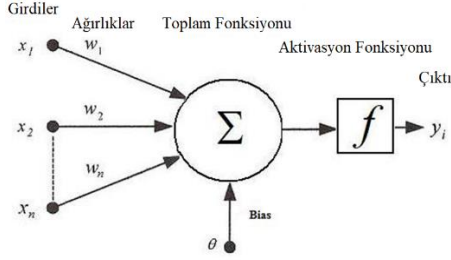
2.2 Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları, lineer olmayan kompleks problemlerin çözümünde özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanan alternatif bir çözüm metodudur. Yapay sinir ağları, insan beyni esas alınarak modellenmiş bir sistemdir. Çeşitli bağlantılarla birbirine bağlı birimlerden oluşmaktadır. Ağ içinde olan birimlerin her birinin belli bir işlevi vardır ve katmanlar şeklinde örgütlenmiştir.

Yapay Sinir Ağları (YSA), biyolojik sinir sistemlerinden esinlenmiştir. Yapay bir nöron, girdi, ağırlık, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktıları olmak üzere beş elementten oluşur. Yapay bir nöron Şekil 1'de gösterilmektedir. w_1, w_2, \dots, w_n değerleri ağırlıkları, x_1, x_2, \dots, x_n girdileri göstermektedir. Her bir giriş, ilgili ağırlık ile çarpılmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve bias önce toplam fonksiyonundan daha sonrada aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek nöronun çıktısı elde edilir [11].

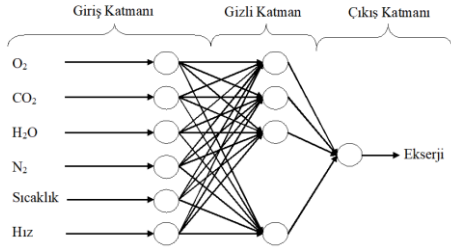
YSA metodu her zaman zor problemlerin en güçlü ve evrensel çözücüsü olarak günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır [12]. Mühendislikte ve pek çok alanda en çok kullanılan öğrenme algoritması, geriye yayılma algoritmasıdır. Bunun en büyük nedeni, öğrenme kapasitesinin yüksek ve algoritmasının basit

olmasıdır. Bu yüzden yapılan çalışmada YSA'yı eğitmek için geriye yayılım algoritması kullanılmıştır. Bu tür ağlar, gizli, gizli ve çıktı katmanlarından oluşmaktadır. Tipik bir geri yayılım ağı göz önüne alındığında, giriş, çıkış ve en az bir gizli katman olmak üzere üç katman vardır. Bir katmandaki her nöron, ardışık katmanın tüm nöronlarıyla bağlantılıdır. Aynı katmandaki nöronlar arasında geri beslemeye benzeyen bir bağ yoktur. Geri yayılım, denetlenen öğrenmeye dayanan ve yapay sinir ağlarının eğitimi için kullanılan bir tekniktir.



Şekil 1: Bir yapay sinir ağı nöronu.

Ekserji değerlerinin tahmini için kullanılan tipik yapay sinir ağı Şekil 2'de görülmektedir. O₂, CO₂, H₂O ve N₂ konsantrasyonu, baca gazı sıcaklığı ile baca gazı çıkış hızı giriş parametreleridir. Çıkış parametresi ise ekserji değeridir. En uygun YSA yapısını bulmak için gizli katmandaki nöron sayısı 6'dan başlayarak 30'a kadar sırasıyla değiştirilmiştir. Tüm gizli katmanlar için epok sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. Test verileri eğitim süreci boyunca kullanılmayan verilerden oluşmakta olup tüm verilerin %35'ine denk gelmektedir. YSA modellerinde öğrenme algoritması olarak Levenberg-Marquardt (LM) kullanılmıştır. Giriş katmanındaki nöronlar transfer fonksiyonuna sahip değilken, gizli katmanda Lojistik sigmoid transfer fonksiyonu (logsig) ve çıkış katmanı için doğrusal transfer fonksiyonu (purelin) kullanılmıştır.



Şekil 2: Baca gazlarının ekserji değerini tahmin etmek için kullanılan YSA yapısı.

Öğrenme için belirli bir faktörün baskın hale gelmesini önlemek için, YSA modelinde kullanılan girdi ve çıktı verileri normalleştirilmelidir. Genel olarak, normalizasyon 0 ile 1 arasında yapılmaktadır. Fakat, bu çalışmada veriler Denklem (11) yardımıyla 0.1 ile 0.9 arasına normalleştirilerek kullanılmıştır [13]-[15]. Burada, X_N, X_R, X_{min} ve X_{max} sırasıyla normalleştirilmiş, gerçek, minimum ve maksimum değerleri göstermektedir.

$$X_N = 0.8 \left(\frac{X_R - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) + 0.1 \quad (11)$$

YSA modellerini karşılaştırmak amacıyla Denklem (12)-(14)'de verilen ortalama karesel hata MSE Denklem (12), ortalama mutlak hata MAE Denklem (13) ve determinasyon katsayısı R² Denklem (14) kullanılmıştır.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2 \quad (12)$$

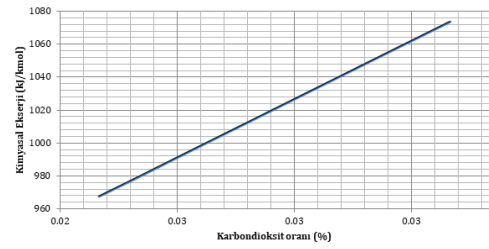
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - p_i| \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i)^2} \quad (14)$$

Burada, a_i hedef veya gerçek değer, p_i çıkış ya da tahmin edilen değeri ve n veri sayısını göstermektedir.

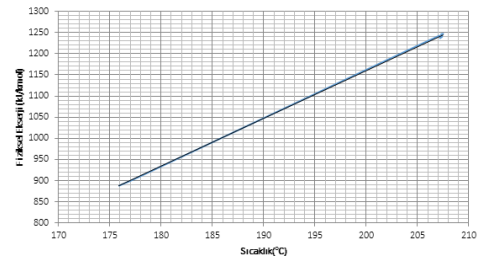
3 Sonuçlar ve tartışma

Fırın içi tam yanmanın gerçekleşmesiyle NO_x bileşiklerinin ihmal edilebilir düzeyde olması durumunda baca gazı bileşenlerini, O₂, CO₂, H₂O ve N₂ gazının oluşturduğu kabul edilmiştir. Baca gazı bileşenlerinin konsantrasyon oranlarındaki değişim kimyasal ekserji kayıpları ile ilgilidir. Örneğin baca gazı bileşenlerinden olan karbondioksit (CO₂) içerisinde karbon ya da diğer bir deyişle yakıt ihtiva etmektedir. Standart molar ekserjisi de yüksek olan CO₂ oranının %0.2 artması kimyasal ekserji kaybını yaklaşık olarak 35.43 kJ/kmol artırdığı hesaplanmıştır. Baca gazında CO₂ gazının konsantrasyonun yüzdelik olarak artışının kimyasal ekserji kaybına etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Karbondioksit konsantrasyonunun kimyasal ekserji kaybına etkisi.

Baca çıkış sıcaklığı 175.4 °C olduğu durumda fiziksel ekserji 888.2 kJ/kmol, çıkış sıcaklığının 207.5 °C ye yükselmesi ile fiziksel ekserji kaybının 1247.34 kJ/kmol'e çıktığı hesaplanmıştır. Çıkış sıcaklığının artması fiziksel ekserji kaybını artırmaktadır ve bu artış grafiksel olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.

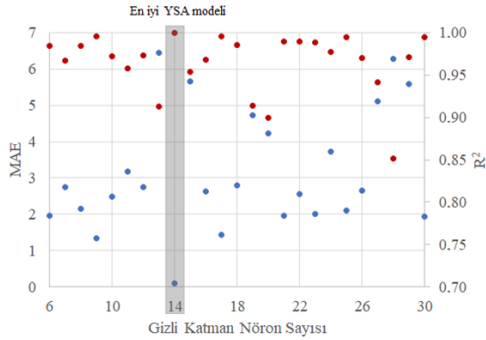


Şekil 4: Sıcaklık artışının fiziksel ekserji kaybına etkisi.

Baca bileşenlerinin ve hızın sabit olduğu ölçümlere ekserji analizi uygulandığında, baca gazı çıkış sıcaklığının 0.4 °C azalması ekserji kaybını 0.276 kJ/s azalttığı tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle sıcaklıktaki 1 °C düşme, toplam ekserji yok oluşunda yaklaşık %0.32 azalmasını sağlamaktadır. Çıkış hızının 8.5 m/s olması durumunda toplam ekserji yok oluşu yaklaşık olarak 154.5 kJ/s olurken, çıkış hızının 13.1 m/s'ye

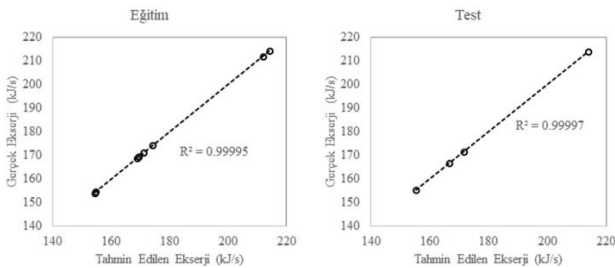
yükselmesi durumunda toplam ekserji yok oluşu yaklaşık olarak 213 kJ/s olduğu hesaplanmıştır. Ancak, toplam ekserji kaybı için genelleme yapmak çok doğru bir yaklaşım olmayacaktır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ekserji çıkışını tahmin etmek için 6 giriş ve 1 çıkışa sahip olan YSA modeli oluşturularak ekserji değerleri için en iyi tahmin yapan YSA yapısı belirlenmiştir. Bunun için YSA yapısında gizli katmandaki nöron sayısı 6'dan 30'a kadar değiştirilmiştir. En iyi YSA yapısı yapısını belirlemek için ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve determinasyon katsayısı (R^2) değerleri incelenmiştir. Ortalama karesel hata için tüm değerlerin $4.32 \cdot 10^{-5}$ 'in altında, eğitim için R^2 değerlerinin yaklaşık 1 olduğu, MAE için ise 0'a yakın değerler elde edilmiştir. Bundan dolayı en uygun YSA yapısını belirlemek için test verilerinin istatistiksel sonuçları incelenmiştir. Test verilerinin en iyi sonucu 14 gizli katmana sahip YSA yapısının olduğu belirlenmiştir. 14 gizli katmana sahip YSA yapısı için istatistiksel sonuçları MSE değerinin $6.75 \cdot 10^{-5}$, MAE değerinin 0.1 ve R^2 değerinin ise yaklaşık 1 olduğu görülmüştür. Şekil 5 gizli katmandaki nöron sayısına bağlı olarak bu değerlerin değişimini göstermektedir.



Şekil 5: Test verilerinin MSE, MAE ve R^2 değerlerinin gizli katmandaki nöron sayısına göre değişimi.

En iyi YSA yapısı olan 14 nöronlu YSA modeline göre eğitim ve test verilerinin gerçek ve tahmin edilen değerlerinin değişimini ve R^2 değeri Şekil 6'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere eğitim ve test verileri için 14 nöronlu YSA yapısı, ekserji değerlerini determinasyon katsayısı yaklaşık 1 olacak şekilde tahmin edebilmektedir.



Şekil 6: Ekserji değerlerini tahmin etmek için oluşturulan 14 nöronlu YSA yapısı için eğitim ve test performansı.

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada, üretim tesislerinde yoğun olarak kullanılan endüstriyel fırınların baca gazlarıyla olan ekserji kayıpları incelenmiştir. Baca gazını oluşturan gazların konsantrasyon miktarları, çıkış sıcaklıkları ve hızları değişen parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin değişim oranlarının ekserji kaybına etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, baca

gazıyla çevre havaya olan ekserji yok oluş miktarını etkileyen değişkenler (baca gazı hızı, sıcaklığı, bileşenler ve bu bileşenlerin oranları) kullanılarak gizli katmandaki nöron sayısının değiştiği YSA modelleri kurulmuş ve baca gazı ekserjisini en iyi tahmin eden YSA yapısı belirlenmiştir.

Çıkış sıcaklığı fiziksel ekserjiyi yükseltirken, hızının yüksek olması molar debiyi dolayısıyla ekserji yok oluşunu artırmaktadır. Ancak hızın artması çıkış sıcaklığını azalmasına yol açtığı için hız ve sıcaklık değişimlerinin ekserji yok oluşuna etkisinin yüzdelik oranlarla belirtilmesini zorlaştırmaktadır.

Baca gazı konsantrasyonunda PPM miktarda bulunan karbonmonoksit (CO) ve azotoksit (NO_x) bileşiklerinin azaltılması, yanma için gereken zamanın fırın içinde sağlanması ile mümkün olabilir. Baca gazı çıkış sıcaklığının düşürülmesi, baca gazı bileşenlerinden karbondioksit ve su miktarlarının azaltılması, karbondioksit yakalama, ısı çekiş ve nem yöntemleri ile değerlendirilerek, kullanılabilir ekserjiye dönüştürülüp ekserji kayıpları azaltılabilir.

Baca gazı ile çevre havaya salınan ısıyı farklı kullanım alanlarına yönlendirmek, endüstriyel işletmelerden kaynaklı çevresel etkileri azaltırken, enerji kayıplarının da minimuma indirilmesini sağlayacaktır. Gerçekte bütün etkileri göz önüne alınarak fiziksel ve kimyasal ekserji analizlerinin yapılması kolay değildir. Bu sebeple ekserji yok oluş miktarını etkileyen değişkenler olarak baca gazlarının konsantrasyonu, sıcaklığı ve hızı kullanılmış ve daha sonra baca gazının ekserjisi YSA metodu ile modellenmiştir. YSA modelleri arasında en iyi performansa sahip modelin 14 gizli katmana sahip YSA modelinin olduğu ve bu model kullanılarak yapılan tahminlerin gerçek değerlerle ilişkisini ortaya koyan istatistiksel değerler olan R^2 değerlerinin sırasıyla eğitim ve test için yaklaşık 1, MAE değerlerinin ise 0.1 ve 0.124 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar 14 nöronlu YSA modeli ile baca gazlarının konsantrasyonu, sıcaklığı ve hızının bilinmesi ile baca gazının ekserji değerinin yüksek doğrulukta tahmin edilebileceğini göstermektedir. YSA modelinde kullanılan giriş verilerini ölçebilecek bir sistem baca üzerine montaj yapılması ve 14 nöronlu YSA modelinin kullanılması ile anlık ekserji kaybı değerlerinin görülebildiği ve bu tip yanma prosesinin performansının gözlemlenebildiği sistemlerin kurulması ile enerji verimliliği artması sağlanabilecektir.

5 Kaynaklar

- [1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı/Esra Karakış. "Türkiye 2013 Mayıs Ayı Enerji İstatistikleri Raporu-5". http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT/1/Documents/E%20C4%B0GM%20Periyodik%20Rapor/2013_05_Enerji_Istatistikleri_Raporu.pdf (09.11.2017).
- [2] Çengel YA, Boles MA. *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*. Çeviri Editörü: Pınarbaşı A, 5 Baskı. İzmir, Türkiye, Güven Bilimsel, 2008.
- [3] Çomaklı K, Terhan M. "Sıcak su üretimi için baca gazı atık enerjinin kullanımı". *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 124, 43-51, 2011.
- [4] Rosen MA, Dincer I. "Exergy analysis of waste emissions". *International Journal of Energy Research*, 23(13), 1153-1163, 1999.
- [5] Chen H, Zhou Y, Cao S, Li X, Su X, An L, Gao D. "Heat exchange and water recovery experiments of flue gas with using nanoporous ceramic membranes". *Applied Thermal Engineering*, 110, 686-694, 2017.

- [6] Ersöz MA. "Baca gazlarındaki atık ısının ısı borusu ile geri kazanımının deneysel incelenmesi" *IX Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, Türkiye, 6-9 Mayıs 2009.
- [7] Wei M, Yuan W, Song Z, Fu L, Zhang S. "Simulation of a heat pump system for total heat recovery from flue gas". *Applied Thermal Engineering*, 86, 326-332, 2015.
- [8] Kartal E. "Yanma ve yanmanın optimizasyonu". *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği*, 16, 2001.
- [9] Kotas TJ. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. 3rd ed. London, UK, Exergon Publishing Company, 2012.
- [10] Filiz Ç, Uysal C, Kılınç E, Kurt H. "Bir buhar kazanımının enerji ve ekserji analizi yoluyla performansının değerlendirilmesi". *II Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 18-20 Haziran 2014.
- [11] Solmaz O, Kahramanlı H, Kahraman A, Ozgoren M. "Prediction of daily solar radiation using ANNs for selected provinces in Turkey". *10th International Scientific Conference UNITECH10*, GABROVO, Bulgaria, 19-20 November 2010.
- [12] Shin C, Yun UT, Kim HK, Park SC. "A hybrid approach of neural network and memory-based learning to data mining". *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11(3), 637-646, 2000.
- [13] Ozgoren M, Bilgili M, Sahin B. "Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey". *Expert Systems with Applications*, 39(5), 5043-5051, 2012.
- [14] Yang IH, Yeo Ms, Kim KW. "Application of artificial neural network to predict the optimal start time for heating system in building". *Energy Conversion and Management*, 44(17), 2791-2809, 2003.
- [15] Akincioglu S, Mendi F, Çiçek A, Akincioglu G. "Prediction of thrust forces and hole diameters using artificial neural networks in drilling of AISI D2 tool steel with cemented carbide tools". *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 1(2), 11-20, 2013.