



Kömür yakıcılarında alev görüntüsü temelli çoklu lineer regresyon analizi

Cem ONAT

Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Uçak Gövde-Motor Bölümü, Elazığ
cem.onat@inonu.edu.tr ORCID: 0000-0002-2886-0470

Mahmut DAŞKIN*

İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya
mahmut.daskin@inonu.edu.tr ORCID: 0000-0001-7777-1821, Tel: (422) 377 4708

Mehmet Emin TAĞLUK

İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Tel: (422) 377 4825
mehmet.tagluk@inonu.edu.tr ORCID: 0000-0001-7789-6376

Muhammed Fatih TALU

İnönü Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, Tel: (422) 377 4764
fatih.talu@inonu.edu.tr ORCID: 0000-0003-1166-8404

İsmail YÜKSEK

Antalya Bilim Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya
yukseki@yildiz.edu.tr ORCID: 0000-0003-1693-8725

Geliş: 14.02.2018, Kabul Tarihi: 12.04.2018

Öz

Bu çalışmada, bir CCD (Charge Coupled Device) kamera ile donatılmış küçük ölçekli bir fındık kömür yakıcısında alev görüntüsü ile hava fazlalık katsayısı arasındaki ilişki incelenmiştir. İncelemede alev görüntüsünden anlık olarak elde edilen farklı sayısal veriler filtre edilip baca gazı sıcaklığı ile birlikte değerlendirilerek eş zamanlı olarak baca gazı analiz cihazı ile elde edilen hava fazlalık katsayısı ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak, alev görüntüsünden elde edilen farklı bilgiler alçak geçiren bir filtreyle filtrelenmiştir. Bu şekilde yüksek frekans dinamiklerinden arındırılmış alev görüntüsü parametrelerinin değerlendirilmesi matris yaklaşımı çoklu lineer regresyon analiziyle gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, alev görüntüsünden anlık çekilen görüntü matrisi iz değerinin diğer matris parametrelerine göre daha yüksek bir doğruluk sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kömür Yakıcıları; Alev Görüntüsü Özellikleri; Görüntü işleme; Hava fazlalık katsayısı; Kömür yakıcısı kontrolü.

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Kömür yakıcılarında yanma veriminin iyileştirilmesi konusu, artan yakıt fiyatları ve artan çevresel kaygılar yüzünden, her geçen gün mühendisleri daha iyi tasarımlar yapma noktasında motive etmektedir (Onat 2014; Onat vd., 2015). Homojen olmayan, kompakt bir doğal kaynak olan kömürlerin (Karaman, 2014) yanma prosesleri oldukça karmaşıktır (Wojcik vd., 2012; Sujatha vd., 2012). Kömürü oluşturan elementler ve uçucu madde bileşiminin aynı madenden elde edilen kömürlerde bile farklılıklar arz etmesi, kömür yakma sistemlerinin modellenmesi ve kontrolcü tasarımı konularını güç kılmaktadır. Tasarım ve işletme koşullarının aynı olmasına rağmen kazanların, uzun bir süre çalıştırdıktan sonra genellikle farklı yanma karakteristikleri sergilemeleri de konunun zorluk derecesini artırmaktadır (Yang vd., 2014). Yanma prosesindeki bu karmaşıklık, kömür yakma sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü konusunu araştırmacıların üzerinde çalıştığı güncel bir konu kılmaktadır ve dolayısıyla da bu konuda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar baca gazı analizi temeline dayalı modelleme, optimizasyon ve kontrol tasarımı çalışmaları (Astrom ve Eklund, 1972; Kocaarslan, 1993; Kouprianov vd., 1999; Hao vd., 2001; Donne vd., 2001; Rees ve Lu, 2002; Hao vd., 2003; Zheng ve Yao, 2008; Lee ve Jou, 2011; Liu vd., 2012) ve yanma odasının gözlenmesi temeline dayalı modelleme ve kontrol tasarımı çalışmaları (Burkardt, 1992; Zhou vd., 1996; Yamaguchi vd., 1997; Linovd, 1998; Docquer ve Candel, 2002; Lu vd., 2004; Koshevd, 2005; Yu, 2006; Huang vd., 2010; Chen vd., 2010; Chen vd., 2012; Chen ve Chang, 2013; Toth vd., 2014; Liu vd., 2016; Talu vd., 2017) şeklinde iki kategoride ele alınabilir. Baca gazı analizi ile oluşturulacak kapalı çevrim kontrol sistemlerinde en büyük problem kaçınılmaz olarak belirli bir zaman gecikmesi değeriyle karşılaşılması ve bunun verime kötü yönde yansımalarıdır. Sistem zaman gecikmeli olduğu için, bozucu etkiler sisteme etki ettiğinde kapalı çevrim kontrol sistemi doğası gereği geç cevap vermek suretiyle kötü bir bozucu reddi performansı sergilemektedir (Onat vd., 2012; Onat, 2013). Pratik değerlendirmeler çerçevesinde küçük ölçekli stokerli kömür

yakma sistemlerinde karşılaşılan majör bozucu girişler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Değişen güç gereksinimiyle birlikte sistemin farklı modlarda çalışabilmesi.
- Emilen hava kalitesindeki değişimler.
- Yakıtın ısı değerindeki değişimler.
- Yakıt nemine bağlı yüklemesinde oluşan tıkanmalar.
- Emilen hava sıcaklığındaki değişimler.

Buna karşın alev görüntüleri yanma odasının anlık durumunu derhal yansıtabilir (Yamaguchi ve Grattan, 1997). Son yıllarda, kazanlarda yanma problemlerine uygulanan görüntü işleme temeline dayalı analiz ve tasarımlarına giderek artan bir ilgi vardır. Yamaguchi vd. (1997) farklı yakıt hava oranlarında spektral karakteristiklerin farklılıklarını keşfetmek için fiber optik sensörler kullanarak alevin emisyon yoğunluğunu analiz etmişlerdir (Burkardt, 1992). (Docquier ve Candel, 2002; Kohse vd., 2005; Toth vd., 2014) çalışmaları bu konuda güzel bir genel değerlendirme sunmaktadır. Ultraviyole ve kızılötesi ışınımlı bazı alev detektörleri yanma rejimini teşhis etmek için kullanılmaktadır fakat bunlar alevin sadece bir kısmını kapsarlar ve böylece yeterli alev bilgisi sağlayamazlar. Bununla birlikte, lazerli yanma odası gözleme sistemleri de yanma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemler yanma dinamiğinin parametrelerini kantitatif olarak ortaya koyabilmelerine karşın karmaşıklıkları ve yüksek maliyetleri endüstride yaygınlaşmalarına engel oluşturmaktadır (Lino vd., 1998; Lu vd., 2004). Lino vd. (1998), alevin dinamik davranışı belirlemek için görüntü işleme teknikleri kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır (Huang vd., 1999). Söz konusu çalışmada alevin yüksek parlaklıktaki bölgesinin zamanla değişimi gözlenmiştir. Alev görüntülerinde yanmanın kalitesini ortaya koyan bol miktarda önemli bilginin mevcudiyetini gösteren bir başka çalışma da (Huang vd., 2010)'tir. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kullanılan yakma sistemleri yakıtlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, kömür yakıtlı kazanlar ile yapılan çalışmaların göreceli olarak seyrek olduğu değerlendirilmektedir. Huang vd. (2010), toz kömür yakıtlı bir kazan için radyant

enerji sinyalli bir kontrol sistemi önermiştir (Zhou vd., 1996; Chen vd., 2010; Chen vd., 2012; Liu vd., 2016). İlk defa Zhou vd. tarafından ortaya konan radyant enerji sinyali kavramı alev görüntülerinin işlenmesi ve spektral analiz konularını kapsamaktadır (Chen vd., 2010). Ancak (Chen vd., 2010) ve (Chen vd., 2012)' de önerilen kapalı çevrim kontrol sistemleri aynı zamanda bir oksijen algılayıcısına da ihtiyaç duymaktadır. Radyant enerji sinyaline bulaşmadan alev görüntülerinin işlenip doğrudan kapalı çevrim kontrol sisteminde değerlendirilmesi konusunda Chen vd.'nin yaptığı çalışmalar oldukça güncel ve kıymetlidir (Yu, 2006; Chen ve Chang, 2013). Chen vd. bu çalışmalarında esas bileşen analizi (PCA- Principle Component Analyze) yöntemini kullanmışlardır. PCA verileri daha küçük boyutlarda temsil edilmesini sağlayan istatistiksel bir boyut indirgeme tekniğidir. (Chen ve Chang, 2013)'da 658x492x3 boyutunda 300 renk görüntüsü PCA'da değerlendirilerek, iki bileşen baskın bileşen olarak sınıflandırılmış ve böylece görüntü kümesi sadece 300x2 lik özellik vektörüyle ifade edilmiştir. PCA ile elde edilen temel bileşenlerin her ikisi de tasarlanan kontrol algoritmasında değerlendirilmiştir. Bir başka ifade ile ideal yanmaya karşılık gelen iki temel bileşen değerlerinin ikisi de referans giriş olarak kullanılmıştır. (Yu, 2006)'de ise tasarlanan kontrol sistemi PCA ile elde edilen temel bileşenlere ek olarak baca gazındaki oksijen miktarı bilgisine de ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca (Yu, 2006)'de önerilen kapalı çevrim sistemde iki adet kontrol girişi vardır. Sisteme giren taze havanın yanı sıra sisteme giren yakıt da kontrolcü tarafından belirlenmektedir. Son zamanlarda Talu vd. (Talu vd., 2017) alev görüntüsünden eş oluşum matrisleri yöntemiyle görüntü öz niteliklerini çekip bir yapay sinir ağı içinde değerlendirerek hava fazlalık katsayısını tahmin etmişlerdir. Söz konusu yöntemin çok sayıda girişe ihtiyaç duyması ve tahmin edilen hava fazlalık katsayısının oldukça gürültülü olması yöntemin uygulanabilirliğini tehdit etmektedir.

Yukarıda anılan çalışmalarda gerek yanma veriminin tahmini ve gerekse kontrol tasarımı

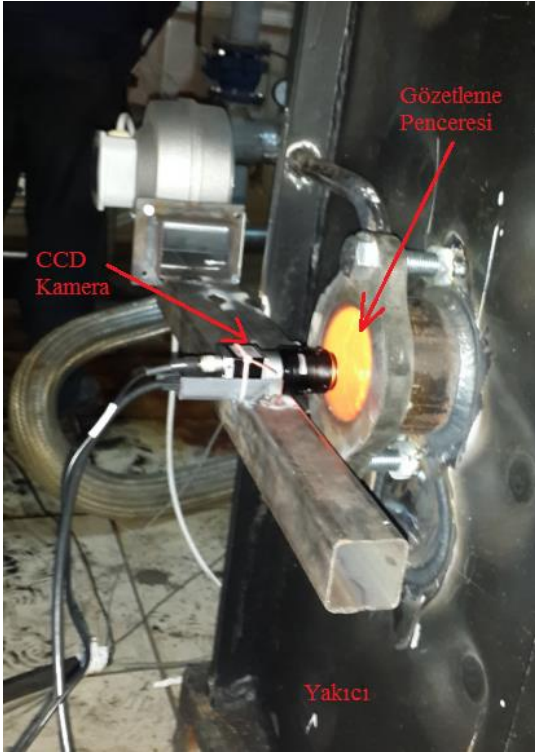
sadece alev görüntüsü temelli gerçekleştirilmiştir. Oysa piyasadan kolaylıkla temini mümkün ölçüm aletleriyle baca gazı sıcaklığı ekonomik olarak ölçülebilir ve bu ölçümler alev görüntüsünden alınan sayısal bilgileri tamamlayabilir. Bu çalışmada, hava fazlalık katsayısı ile alev görüntüsünden alınan farklı anlık bilgiler filtre edilerek yüksek frekans dinamiklerinden arındırıldıktan sonra ayrı ayrı baca gazı sıcaklığı bilgisiyyle birlikte kullanılarak matris yaklaşımı çoklu lineer regresyon analizine tabi tutulmuştur. Analizde karşılaştırılan matris bilgileri; bir normu, iki normu, sonsuz normu, Frobenius normu, normalize edilmiş piksellerin toplamı, matrisin izi, matrisin rankı, eşik değeri 30'dan büyük olan piksel toplamı, en küçük öz-değer, en küçük 10 öz-değerin toplamı ve tüm öz-değerlerin toplamıdır. Regresyon analizi sonuçlarına göre, yüksek doğruluk için baca gazı sıcaklığı bilgisini en iyi tamamlayan görüntü bilgisinin matris izi olduğu görülmüştür.

Deney Sistemi

Çalışmada kullanılan deney sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem otomatik fındık kömür yüklemeli bir kömür yakıcısı olup yanma odası gözetlene bilmektedir. Dairesel formdaki gözetleme penceresinin çapı 12 cm'dir.

Veri Toplama

Kömür yakıcısının yanma odası saniyede 14 çerçeve resim çekebilene bir CCD kamera (Aptina MT9P031 CMOS sensörlü Basler acA2500-14gc GigE (Basler, 2015)) aracılığıyla görüntülenmiştir. CCD kameradan anlık elde edilen alev görüntülerine karşılık baca gazı sıcaklığı (T_{baca}) ve hava fazlalık katsayısı (λ) bilgisi Testo'nun baca gazı analiz cihazından eş zamanlı olarak kayıtlanmıştır. Sistemden Elde edilen veriler işlenip değerlendirmek için kişisel bilgisayara aktarılmıştır.



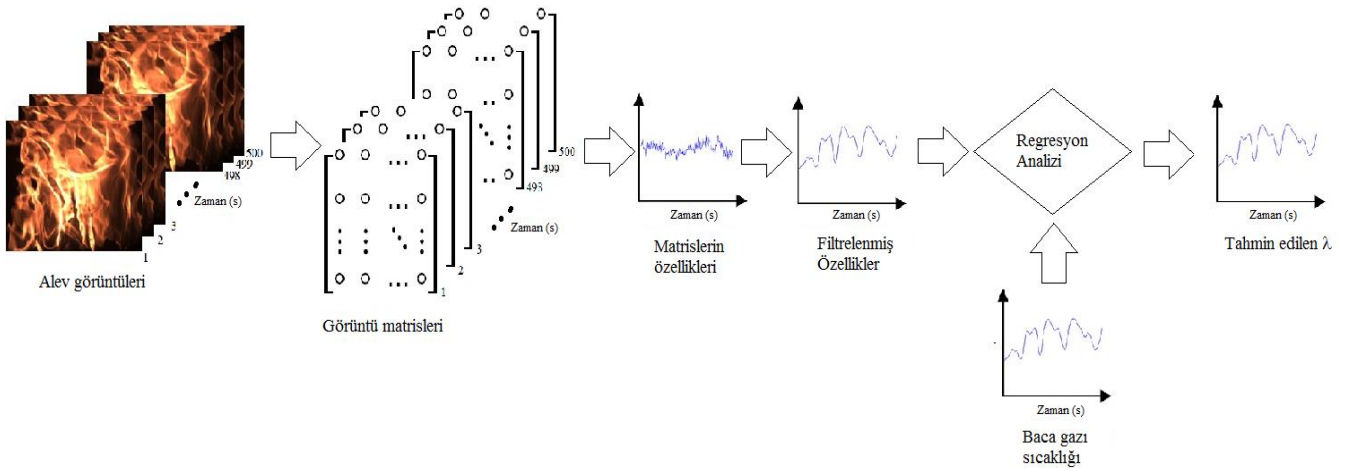
Şekil 1. Deney sistemi.

Veri İşleme

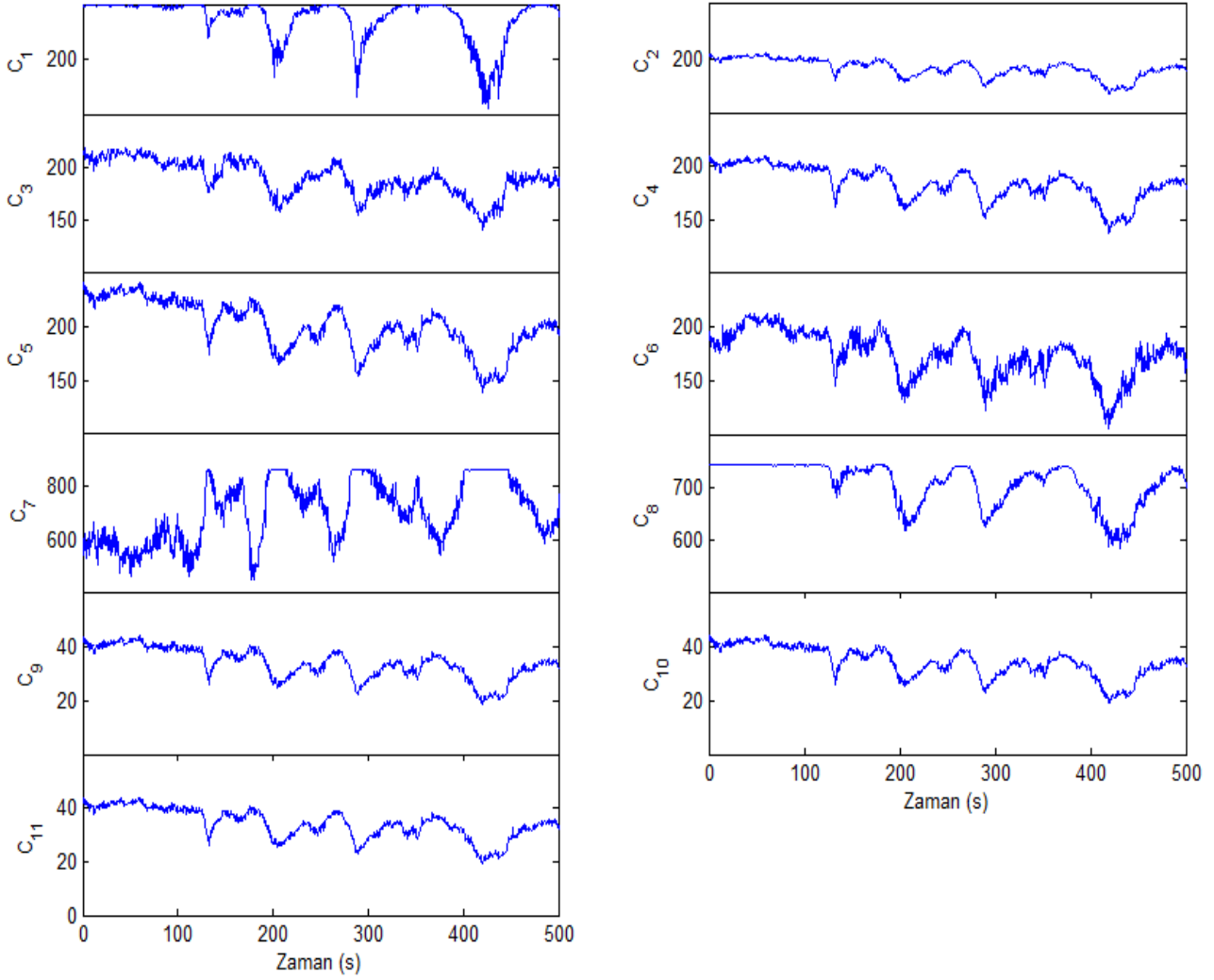
Veri işleme akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. Buna göre CCD kameradan elde edilen alev görüntülerinden elde edilen özellikler Denklem (1)’de verilen alçak geçiren filtre ile filtreledikten sonra baca gazı sıcaklığı bilgisiyle birlikte regresyon analizine tabi tutulmuştur.

$$F(s) = \frac{1}{28s^2 + 10s + 1} \quad (1)$$

Şekil 3’te CCD kameradan alınan görüntülerden elde edilen görüntü matrisinin bir normu, iki normu, sonsuz normu, Frobenius normu, normalize edilmiş piksellerin toplamı, matrisin izi, matrisin rankı, eşik değeri 30’dan büyük olan piksel toplamı, en küçük öz-değer, en küçük 10 öz-değerin toplamı ve tüm öz-değerlerin toplamı gibi özellikleri verilmiştir. Kameradan alınan bu veriler sırasıyla C_1, C_2, \dots, C_{11} şeklinde adlandırılmıştır. Verilerdeki yüksek frekans gürültülerinin elemine edilmesi için Denklem (1) de transfer fonksiyonu verilen $F(s)$ filtresi ile filtre edildikten sonra (0 1) aralığında normalize edilmiştir. Filtrelenmiş veriler sırasıyla $C_{1f}, C_{2f}, \dots, C_{11f}$ Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 2. Veri işleme akış şeması



Şekil 3. Ham alev görüntüsü bilgileri.

Matris Yaklaşımıyla Regresyon Analizi

Regresyon analizinde matrislerin kullanımı; hataların, regresyon katsayılarının ve regressör değişkenlerinin seviyelerini vektörel olarak sunduğundan daha kompakt bir yapı sunar (Wilson vd., 2004). Matris yaklaşımli model denklem 2’de verilmiştir.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

Denklem 2 matris notasyonu kullanılarak Denklem 3’deki gibi tekrar yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

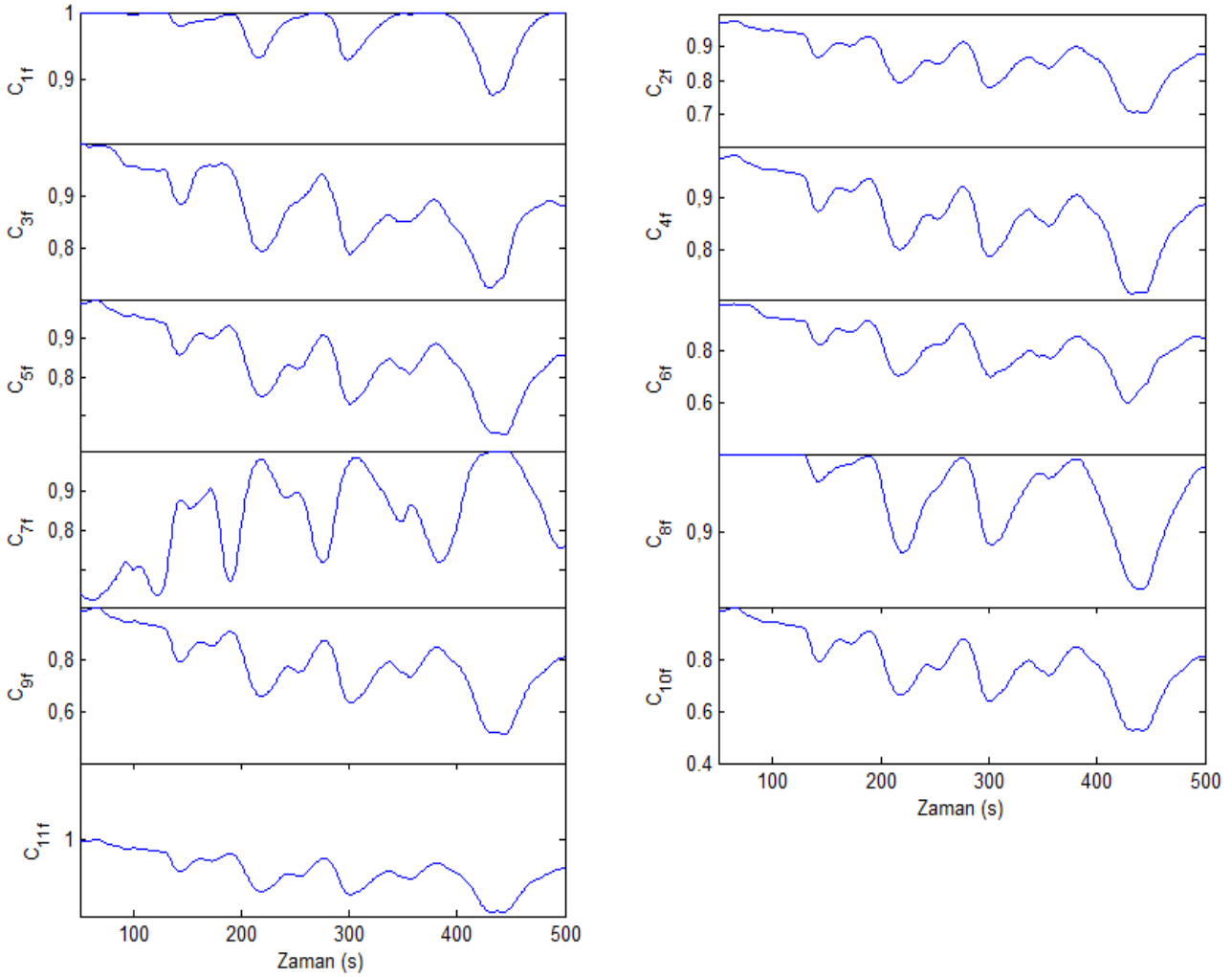
Dikkat edilirse Y modelin çıkışlarını içeren $n \times 1$ boyutlu bir vektör, X regresyon değişkenlerini içeren $n \times (k+1)$ boyutlu bir matris, $\hat{\beta}$ en küçük kareler tahminci vektörü ve ε ise $n \times 1$ boyutlu hataları içeren vektördür.

Matris yaklaşımli çoklu lineer regresyon analizinde ilk adım en küçük kareler tahminci vektörü $\hat{\beta}$ ‘nın belirlenmesidir. Denklem 4’de verilen bağıntı ile $\hat{\beta}$ tanımlanır (Wilson vd., 2004).

$$X^T X \hat{\beta} = X^T Y \quad (4)$$

Buradan $\hat{\beta}$ denklem 5’teki gibi çekilir.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$



Şekil 4. Filtre edilmiş alev görüntüsü bilgileri.

Bu çalışmada, otomatik yüklemeli kömür yakıcısının 500 saniyelik bir çalışma kesiti boyunca elde edilen veriler analiz edilmiştir. Baca gazı analiz cihazından saniyede bir ölçülen anlık hava fazlalık katsayısı (λ) değerlerinin oluşturduğu set bağımlı değişken vektörü (\mathbf{Y}) olarak atanmıştır. Bu yüzden \mathbf{Y} vektörünün satır sayısı $n=500$ 'dür. Buna karşılık eş zamanlı biçimde CCD kameradan çekilen görüntülerden üretilen bilgi seti \mathbf{X}_1 bağımsız değişken vektörü olarak ayrıca baca gazı sıcaklık verileri ile oluşturulmuş set de \mathbf{X}_2 bağımsız değişken vektörü olarak atanmıştır. Dolayısıyla \mathbf{X} matrisinin boyutu $n \times 3$ 'dür. \mathbf{X} matrisinin birinci sütununun 1'lerden oluştuğuna dikkat ediniz. Söz konusu biçimde oluşturulan deneysel veri setleriyle 11 farklı regresyon analizi yapılmıştır. Her bir regresyon analizinde farklı görüntü parametreleri kullanılmıştır (C_{1f} , C_{2f} , ..., C_{11f}).

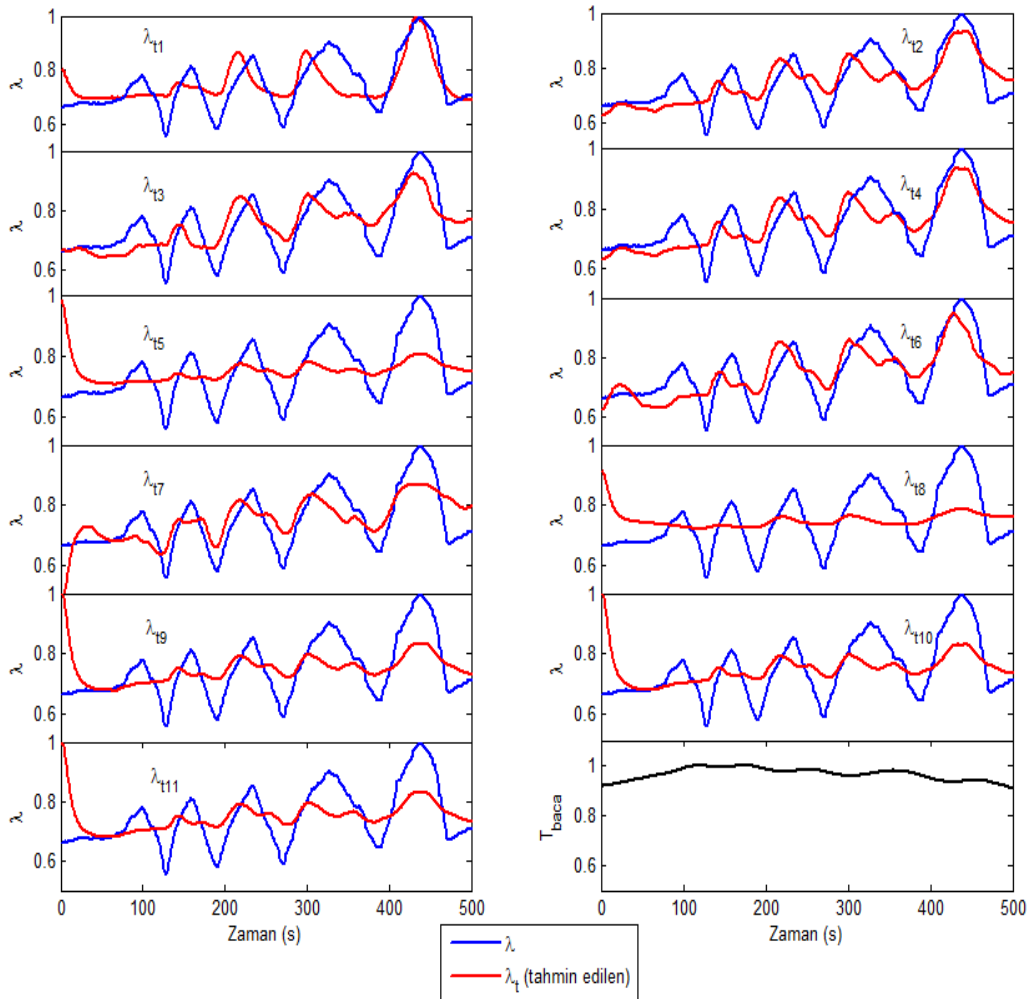
Örneğin, birinci analizde CCD kameradan saniyede bir alınan çerçeve görüntü kaynak matrisinin bir normu \mathbf{X}_1 bağımsız değişken vektörü olarak kullanılmıştır. Alev görüntülerinin 11 farklı parametresi (özelliği) için yapılan regresyon analizlerinin sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Filtre edilmiş görüntü matrisi parametrelerine karşılık elde edilen λ tahmin bağıntıları sırasıyla λ_{11} , λ_{12} , ..., λ_{111} şeklinde gösterilmiştir. Bu analize göre matris izi parametresi minimum hatayla λ ile ilintili olduğu görülmektedir. Norm esaslı görüntü özellik performansları beklendiği gibi birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Regresyon bağıntıları kullanılarak elde edilen tahmini λ değerleri her bir model için ayrı ayrı Şekil 5'de verilmiştir. Alev görüntüsünün filtre edilmiş iz değeri C_{6f} 'in hava fazlalık katsayısı λ 'yı diğer görüntü özelliklerine göre daha iyi bir şekilde takip

edebildiği görülmektedir. Şekil 5’de norm esaslı görüntü özelliklerinin birbirine yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Söz konusu özelliklerin regresyon analizi sonuçlarında da birbirine yakın çıkması yapılan analizlerin tutarlılığına

işaret etmektedir. Örneğin, Şekil 5’de birbirine çok yakın gözükten C_{2f} ve C_{4f} performanslarının regresyon sonuçları sırasıyla %13.53 ve %13.58’dir.

Tablo 1. Regresyon analizi sonuçları.

Filtre edilmiş değişkenler	Sembol	Regresyon bağıntısı	Maksimum hata
Bir normu	C_{1f}	$\lambda_{t1}=2.9700-2.4510*C_{1f}+0.1835*T_{baca}$	% 16.74
İki normu	C_{2f}	$\lambda_{t2}=1.7963 -1.0272*C_{2f} -0.1535*T_{baca}$	% 13.53
Sonsuz normu	C_{3f}	$\lambda_{t3}=1.8350 -1.0177 * C_{3f}-0.1858*T_{baca}$	% 13.62
Frobenius normu	C_{4f}	$\lambda_{t4}=1.8429 -1.0573* C_{4f}-0.1668*T_{baca}$	% 13.58
Normalize edilmiş piksellerin toplamı	C_{5f}	$\lambda_{t5}=1.0876 -0.2709* C_{5f}-0.1168*T_{baca}$	% 31.83
Matrisin izi	C_{6f}	$\lambda_{t6}=1.6353 -0.8118*C_{6f} -0.2171*T_{baca}$	% 11.69
Matrisin rankı	C_{7f}	$\lambda_{t7}=1.5122+0.4354*C_{7f}-1.1531*T_{baca}$	% 20.81
Eşik değeri 30’dan büyük olan piksel toplamı	C_{8f}	$\lambda_{t8}=1.3348 -0.2205*C_{8f}-0.3930*T_{baca}$	% 24.98
En küçük öz-değer	C_{9f}	$\lambda_{t9}=0.8519 -0.3284*C_{9f}+0.1583*T_{baca}$	% 33.51
En küçük 10 öz-değerin toplamı	C_{10f}	$\lambda_{t10}=0.8795-0.3240*C_{10f}+0.1278*T_{baca}$	% 33.48
Tüm öz-değerlerin toplamı	C_{11f}	$\lambda_{t11}=0.8836-0.3230* C_{11f}+0.1231*T_{baca}$	% 33.45



Şekil 5. Regresyon modeliyle tahmin edilen λ değerleri.

Sonuç

Bu çalışmada bir CCD kamera aracılığıyla yanma odası görüntülenen otomatik yüklemeli bir kömür yakıcısının hava fazlalık katsayısı ile alev görüntülerinden filtrelenmiş bir şekilde elde edilen 11 farklı görüntü parametresi baca gazı sıcaklığı ile birlikte matris yaklaşımı regresyon analizine tabi tutulmuştur. Bu şekilde elde edilen regresyon modellerinin doğrulukları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Alev görüntüsünün matris izi değerinin diğer görüntü parametrelerine göre daha iyi bir sonuç sergilediği görülmüştür. Bununla birlikte söz konusu iki sistem değişkeninin giriş teşkil edileceği yapay sinir ağı modelleriyle yüksek doğruluklara ulaşılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK (Proje numarası: 117M121) ve MİMSAN AŞ tarafından desteklenmiştir. Çalışmamıza verdikleri destek için teşekkür ederiz.

Hakemler bu yayın hakkında kritik değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Değerlendirmeleri için hakemlere teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Astrom, K. J., Eklund, K., (1972). A simplified non-linear model of a drumboiler-turbine unit, *Int J Control*, 16, 145–9.
- Burkardt, H., (1992). Image analysis and control of combustion processes, The International Seminar on Imaging in Transport Processes, Athen.
- Chen, L., Xue, H., Sun, B., Zhou, Z., (2010). H₂O Robust control of Combustion Based on the Radiant Energy Signal, Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 837-840.
- Chen, J., Chang, Y.H., Cheng, Y.C., Hsu, C.K., (2012). Design of image-based control loops for industrial combustion processes, *Applied Energy*, 94, 13–21.
- Chen, J., Chang, Y., (2013). Performance Design of Image-Oxygen Based Cascade Control Loops for Boiler Combustion Processes,

Industrial & Engineering Chemistry Research, 52, 2368–2378

- Docquier, N., Candel, S., (2002). Combustion control and sensors: a review, *Prog Energy Combust Science*, 28, 107–50.
- Donne, M. S., Pike, A. W., Savry, R., (2001). Application of modern methods in power plant simulation and control, *IEE Comput Control J*, 12(2), 75–84.
- Hao, Z., Kefa, C., Jianbo, M., (2001). Combining neural network and genetic algorithms to optimize low NO_x pulverized coal combustion, *Fuel*, 80, 2163–2169.
- Hao, Z., Qian, X., Cen, K., Fan, J., (2003). Optimizing pulverized coal combustion performance based on ANN and GA, *Fuel Processing Technology*, 85, 113–124.
- Basler Ace Camera, Basler. Çevrimiçi Erişim: <http://www.baslerweb.com/en/products/area-scan-amerax/ace/aca2500-14gc>. Erişim Tarihi: 13-Mart-2017.
- Huang, Y., Yan, Y., Lu, G., Reed, A., (1999). On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis, *Meas Sci Technol* 10, 726–33.
- Huang, B., Luo, Z., Zhou, H., (2010). Optimization of combustion based on introducing radiant energy signal in pulverized coal-fired boiler, *Fuel Processing Technology*, 91, 660–668.
- Karaman, İ., (2010). Soma linyitinin fiziksel aktivasyonu ve aktiflenmiş ürüne boyarmadde adsorpsiyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi.
- Kohse-Hoinghaus, K., Barlow, R. S., Alden, M., Wolfrum, J., (2005). Combustion at the focus: laser diagnostic and control, *Proc Combust Inst*, 30, 89–123.
- Kocaarslan, I., (1993). Application of adaptive control concept in a 750 MW coal fired power plant, 12th Triennial world congress, Sydney, Australia.
- Kouprianov, V., Chullabodhi, C., Kaewboonsong, W., (1999). Cost based optimization of excess air for fuel oil/gas-fired steam boilers, *RERIC Int Energy J*, 21(2), 83–91.
- Lu, G., Yan, Y., Colechin, M., (2004). A digital imaging based multi function a flame monitoring system, *IEEE Trans Inst Meas* 53(4), 1152–8.

- Lino, N., Tsuchino, F., Torii, S., Yano, T., (1998). Timewise variation of turbulent jet diffusion flame shape by means of image processing, *J Flow Visual Image Process*, 275–81.
- Lee, C. L., Jou, C. J. G., (2011). Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace, *Fuel Process Technology* 92, 2335-2340.
- Liu, D. J., Yan, Wang, F., Huang, Q., Chi, Y., Cen, K., (2012). Experimental reconstructions of flame temperature distributions in laboratory-scale and large-scale pulverized-coal fired furnaces by inverse radiation analysis, *Fuel*, 93, 397–403.
- Liu, Z., Zheng, S., Luo, Z., Zhou, H., (2016). A new method for constructing radiative energy signal in a coal-fired boiler, *Applied Thermal Engineering*, 101, 446-454.
- Onat, C. Talu, M.F. Daskin, M. Mercimek, M., (2015). Otomatik Beslemeli Kömür Kazanlarında Alev Formu İle Yanma Verimi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi, *Mühendis ve Makina*, 669, 70-79.
- Onat, C., (2014). WGC Based Robust and Gain Scheduling PI Controller Design for Condensing Boilers, *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 1-13.
- Onat, C., (2013). A New Concept on PI Design for Time Delay Systems: Weighted Geometrical Center, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 9(4), 1539-1556.
- Onat, C., Hamamci, S. E., Obuz, S., (2012). A Practical PI Tuning Approach For Time Delay Systems, *Proceedings of the 10-th IFAC Workshop on Time Delay Systems The International Federation of Automatic Control Northeastern University*, 102-107.
- Rees, N. W., Lu, C. X., (2002). Some thoughts on the advanced control of electric power plants, *Trans. Inst. Meas. Control*, 24(2), 87–106.
- Sujatha, K., Venmathi, M., Pappa, N., (2012). Flame monitoring in power station boilers using image processing, *ICTACT Journal on Image and Video Processing*, 04, 427-434.
- Talu, M.F., Onat, C., Daskin, M., (2017). Prediction of Excess Air Factor in Automatic Feed Coal Burners by Processing of Flame Images, *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 30 (3), 722-731.
- Toth P., Zhan, Z., Fu, Z., Palotas, A. B., Eddings, E. G., Ring, T. A., (2014). The potential of on-line optical flow measurement in the control and monitoring of pilot-scale oxy-coal flames, *Experiments in Fluids*, 55, 1727.
- Wilson, W., Geiger, L., Madden, S., Mecklin, C. J., and Dong, A. (2004). Multiple linear regression using a graphing calculator, *Journal of Chemical Education*, 81(6), 903–907.
- Wojcik, W., Gromazsek, K., Kotyra, A., Lawicki, T., (2012). Pulverized Coal Combustion Boiler Efficient Control, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 11b/2012, 316-319.
- Yamaguchi, T., Grattan, K. T. V., Uchiyama, H., Yamada, T., (1997). A practical fiber optic air-ratio sensor operating by flame color detection, *Rev Sci Instrum*, 68, 197–202.
- Yang, J. H., Kim, J.E. A., Hong, J., Kim, M., Ryu, C., Kim, Y., Park, H.Y., Baek, S. H., (2014). Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design, *Fuel*, 144, 145–156.
- Yu, C.C., (2006). *Autotuning of PID Controllers (2. Basım)*. London, UK, Springer-Verlag.
- Zheng, Z., Yao, M., (2008). Charge stratification to control HCCI: Experiments and CFD modeling with *n*-heptane as fuel, *Fuel*, 88, 354–365.
- Zhou, H., Lou, X., Yin, H., Deng, Y., Gu, Y., Sun, G., (1996). Modeling and simulink research of boiler combustion based on radiant energy, *Proceedings of the CSEE*, 16, 226-229.

Multiple Linear Regression Analysis Based on Flame Image in Coal Burners

Extended abstract

The increasing of the fuel prices and environmental concerns has motivated scientists to design the best systems to improve the fuel technologies which based on fossil fuels. The Combustion process of coals of heterogeneous compact fossil fuels is in fact very complex. The differences in the elements that forms coal and the variability in the volatile substance compounds even in those obtained from the same material makes difficult to model and design both the controller and coal firing systems. Even if the physical burning conditions are kept the same the operation of the boilers after a long time usually exhibit different Combustion characteristics which makes the subject even more difficult. These complication in the Combustion process makes the design and control of coal burning systems a challenging subject for researcher to work on. The immediate translation of instantaneous flame images in the burning chamber gives rise to analysis and design of fossil fuel burning systems based on image processing techniques.

In this study the correlation between air excess coefficient (λ) and the characteristic parameters (features) of flame image captured from the burning chamber were analysed. The images were captured by a CCD camera (Aptina MT9P031 with CMOS sensors Basler acaA2500-14gc Gig E) mounted on a small sized automatic loading small cast coal burning system and λ was measured by a gas analysis device (Testo), and also the flue gas temperature (T_{baca}) was synchronously measured every seconds. The observation window of the burning chamber was circular with 12 cm diameter and the CCD camera frame rate was 14 fps. The flame images were captured as a function of time for 500 seconds and were fed to a personal computer. Different data sets as the characteristic parameters or features of the flame were derived from these flame images and low pass filtered to remove high frequency fluctuations which could be considered as artefact noise. These parameters were then evaluated together with flue gas temperature values. The derived characteristic features were the norm, second norm, infinity norm, Frobenius norm, normalised sum of pixel values, matrix trace, matrix rank, sum of the pixel threshold value greater than

30, smallest eigen value, sum of the smallest 10 eigen values and sum of all eigen values of source matrix (the image). These individual characteristic features of flame and the synchronously obtained flue gas temperature values were analysed using multiple linear regression. Because of offering a vector form of errors and much compact form of analysis, in the study regression analysis was carried out in matrix form. Here, the dependent variable that holding the λ values measured by flue gas analysis device was represented by \mathbf{Y} . The independent variable that holds the characteristic features of flame images was defined by the \mathbf{X}_1 and the independent variable holding flue gas temperature values was defined by \mathbf{X}_2 . Since the regression analysis was done over the data obtained for 500 seconds of operation of burning system, the line number of \mathbf{Y} was 500. With respect to the results obtained from this regression analysis performed on 11 different flame characteristic features, it was found that the matrix trace had the most valuable correlation to the air excess coefficient. This data can be further improved and used in the intelligent flame control mechanisms integrated to coal burning systems.

Keywords: Coal burning system; Flame image features; Image processing; Air excessive coefficient, Coal burning control.