

# Yapay Zekâ Yöntemleri ile Bir Kömür Yakıtlı Santralde Kontrol Uygulaması

## Control Application in a Coal-Fired Power Plant with Artificial Intelligence Methods

Mert AKSÖZEK<sup>1</sup>, Sedat İN<sup>1</sup>, Yılmaz Seryar ARIKUŞU<sup>2</sup> Nevra BAYHAN<sup>1</sup>, Hasan TİRYAKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, İstanbul

<sup>2</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa

[mertaksozek@ogr.iuc.edu.tr](mailto:mertaksozek@ogr.iuc.edu.tr), [sedat.in@iuc.edu.tr](mailto:sedat.in@iuc.edu.tr), [yilmaz.arikus@cbu.edu.tr](mailto:yilmaz.arikus@cbu.edu.tr)  
[nevra@iuc.edu.tr](mailto:nevra@iuc.edu.tr), [hasan.tiryaki@iuc.edu.tr](mailto:hasan.tiryaki@iuc.edu.tr),

### Özetçe

Birçok endüstriyel termik santralin dinamik davranışı, giriş ve çıkıştaki bozulmalardan, set noktalarındaki değişikliklerden ve işletme şartlarındaki bazı faktörlerden etkilenir. Bu durum özellikle büyük kömür yakıtlı güç santrallerinde görülür. Yükte meydana gelen değişiklikler, kömürün kalitesi, kazan yüzeyindeki kirlenmeler gibi etkiler karşısında klasik kontrolörler her zaman istenen performansı sağlayamamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kömür yakıtlı bir elektrik santralinde kararlılık ve yapay zekayı birleştiren bir PI kontrolü yöntemi önerilmiştir. Bu amaçla, kömür yakıtlı bir termik santral sistemini kapalı çevrimde Kp-Ki düzleminde kararlı hale getirecek PI denetleyici bölgesi parametre uzayı yaklaşımıyla bulunmuştur. Bu makalenin bir sonraki adımında bu bölgedeki Kp ve Ki değerleri ile yapay zeka öğrenmesi yapılmış ve parametre değerleri elde edilmiştir. Elde edilen yapay zekâ çıktıları ile PI kontrolör tasarımı geliştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, IBk-PI kontrolörün tüm işletme şartları altında, sisteme verdiği hızlı cevaplarla diğer kontrolörlerden daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir.

### Abstract

The dynamic behavior of many industrial thermal power plants is affected by disturbances at the input and output, changes in set points and some factors in the operating conditions. This is particularly the case for large coal-fired power plants. Conventional controllers do not always provide the desired performance in the face of effects such as changes in the load, quality of the coal, and contamination on the boiler surface. Therefore, a method for PI control in a coal-fired power plant that combines stability and artificial intelligence is proposed in this study. For this aim, the PI controller region that will stabilize a coal-fired power plant system in the closed loop in the Kp-Ki plane has been found by the parameter space approach. In the next step of this article, artificial intelligence learning was performed with Kp and Ki values in this region and parameter values were obtained. PI controller design was developed with the obtained artificial intelligence outputs and their performances were compared. Simulation results show that the IBk-PI controller outperforms the other controllers with its fast responses to the system under all operating conditions.

### 1. Giriş

Enerji, genel olarak iş yapabilme yeteneği veya potansiyeli olarak tanımlanmakla beraber, değişikliklere yol açan etken olarak da tanımlanabilir. Bilim ve teknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte; yaşam standartları ve tarzlarında büyük bir değişim gözlenmekte, mal ve hizmet üretim ve tüketim kalıpları, fiyatları, talep yapıları, pazar koşulları, çalışma şartları, verimlilik vb. konularında önemli değişiklikler meydana gelmekte, global ürün ve pazarlar, küresel dev organizasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu gelişme ve değişimin sürati ve yönü büyük ölçüde enerji arzı konusundaki gelişmelere bağlı bulunmakta, enerji konusu bilim ve teknoloji alanındaki çalışmaların odak noktalarından birini oluşturmaktadır [1].

Elektrik enerjisini kullananların beklentisi, bu enerjiyi istedikleri miktarda kullanabilmektir. Diğer taraftan bilindiği gibi elektrik enerjisi büyük miktarlarda depo edilememektedir. Bunun anlamı; üretimin sürekli ihtiyaç miktarında yapılması mecburiyettir. Tüm bunların yanında termik santrallerde kimyasal enerji önce termik enerjiye sonra mekanik enerjiye ve sonunda elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Üretimdeki bu süreklilik ve kalite elektrik güç santrallerinin önemini ortaya koymaktadır. Bunun yanında bu tesisler çok girişli çok çıkışlı olduğundan, kontrol teknikleri açısından oldukça zor ve kompleks bir süreç sergilenir. Bu sürecin dinamiği; yakıtın kalitesine, iklime, tesisteki yıpranmaya, çalışma noktasına bağlı olarak değişmektedir [2].

Mühendislikte ve diğer bilim dallarında sistemler, kesin matematiksel işlemler kullanılarak modellenir. Günlük hayatta karşılaşılan problemlerin büyük çoğunluğu bir kesin olmama veya tam olarak tanımlanamama durumu içerir. Bu problemlerin daha etkin çözülebilmesi için bir yol bulunması gerekmektedir. Günümüzde sistemler genel olarak kararlı, lineer ve zamana bağımlı değişmeyen bir yapıda modellenir. Bu özelliklerin dışına çıktığı zaman sistem, kontrol edilmesi güç bir hale gelir. Bu gibi durumlar, bilim adamlarını son yıllarda insan gibi karar verebilen sistemler yapmaya yöneltmektedir. Bu amaçla modern kontrol sistemleri geliştirilmiştir ve bu sistemler şu an birçok alanda kullanılmaktadır.

Günümüzdeki arz ve talepteki değişiklikler, kimyasal enerjinin en iyi şekilde değerlendirilmesi, üretimin ekonomik

olma isteği, artan çevre sorumluluğu vb. nedenler, modern kontrol yöntemlerinin güç sistemlerinde de kullanımını zorunlu hale getirmektedir [3, 4].

Literatürde termik santrallerin kontrolü için klasik kontrol yöntemi dışında yapay zekâ tabanlı kontrol yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler bulanık mantık tabanlı kontrolörler ve metasezgisel algoritmalar [5-8].

Santral dinamiği, kazanın kirlenmesi, ani yük ihtiyaç değişimleri, yakıt kalitesindeki düşüşler gibi birçok nedenden dolayı her an değişime uğrayabilir. PID gibi klasik kontrol yöntemleri bu değişimlere hızlı bir şekilde genellikle karşılık verememektedir. Bu nedenle bu çalışmada öncelikle K<sub>p</sub> ve K<sub>i</sub> parametreleri için sistemi kararlı kılabilecek olan bölgeler parametre uzayı yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Farklı yapay zekâ yöntemleri ile söz konusu bölgelerde K<sub>p</sub> ve K<sub>i</sub> parametrelerinin belirlendiği PI kontrolörler geliştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır.

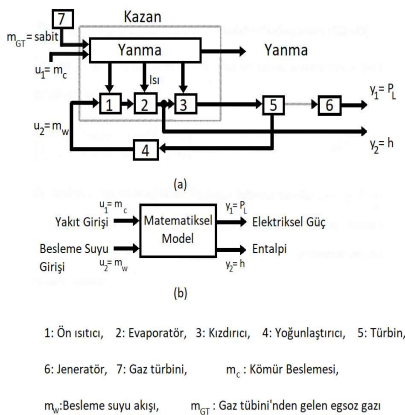
## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Kömür Yakıtlı Santralin Modellenmesi

Bu çalışmada referans alınan kömür yakıtlı santral [9], 195 bar ve 535 °C canlı buhara sahip bir kömür yakıtlı zorlamalı kazandan beslenen, 652.5 MW elektriksel güç sağlayan bir jeneratör/buhar türbin ünitesi ve diğer 112.5 MW elektriksel güç sağlayan jeneratör/gaz türbin ünitelerinden oluşan bir 765 MW'lık kombine bloktur. Kömür tozu 4 katta sıralanmış 32 brülör tarafından beslenmektedir. Yanma için gerekli hava vantilatörlerden sağlanmakta, türbin çıkışındaki gazlar buhar kazanının verimini artırmak için ısı ve oksijen taşıyıcı olarak kullanılmaktadır.

Güç santrali; kazan, gaz türbin, buhar türbin ve jeneratörden oluşur. Kazan sıkı bir şekilde birbiriyle bağımlı çok değişkenli bir sistemle modellenebilir. Bu, kazanı kontrol mühendisliği açısından oldukça ilginç kılar. Kazanda, kimyasal enerji termal enerjiye (buhar) dönüştürülür [10].

Verimli bir kontrol sistemi için, sistemin dinamik ve statik özellikleri çok iyi bilinmelidir. Diğer bir taraftan, birçok giriş ve çıkışlı bir karmaşık sistemi ele almak oldukça güç ve karmaşıktır. Bu yüzden, Şekil 1'de görüldüğü gibi model tasarımında en önemli giriş ve çıkış değişkenleri kullanılır. İstenen proses davranışını tanımlamak üzere incelenen güç santrali için iki girişli ve iki çıkışlı değişkenler yeterlidir.



Şekil 1: Şematik diyagram, (a) kömür yakıtlı santral ve (b) matematiksel modeli [11].

Şekil 1'de görüldüğü gibi, yakıt beslemesi ve besleme suyu akışı giriş değişkenleri olarak seçilmiştir. Çıkış değişkenleri ise elektriksel güç ve entalpidir. İki giriş ve iki çıkış değişkenine sahip olan bir proses, (1) denklemine özetlenmiştir.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Söz konusu santrale ait kazanın dinamik davranışının işletme şartları ile yakından ilgili olduğunu da göz önüne alarak, bütün ölçümler CADACS (Computer Aided Design and Control) yazılımı ile yapılarak  $G_{11}(s)$ ,  $G_{12}(s)$ ,  $G_{21}(s)$  ve  $G_{22}(s)$  fonksiyonları elde edilmiştir [3].

Yukarıdaki kazan modelinin daha kolay kontrol edilebilmesi için, oluşturulan modele ayırıcı sistem eklenmelidir. Yani,  $Y_1(s)$  çıkışı sadece bir girişten,  $Y_2(s)$  çıkışı ise sadece diğer girişten etkilenmelidir. Oysa yukarıdaki eşitlikten de anlaşıldığı gibi  $Y_1(s)$  ve  $Y_2(s)$  çıkışları hem  $U_1(s)$  hem de  $U_2(s)$  girişlerinden etkilenirler. Giriş ve çıkışlar arasında doğrusallık kurabilmek için bir ayırma sistemi kullanılmıştır. Kullanılan ayırma sistemi, özellikle çok giriş ve çok çıkışlı sistemlerde kullanılan, kontrol edilecek sistemin öz değerlerini değiştirmeden girişler ve çıkışlar arasında doğrusallık kuran bir sistemdir. Kullanılan ayırma sisteminin vektör-matris şeklinde gösterimi de (2) denklemine sunulmuştur.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -G_{12}/G_{11} \\ -G_{21}/G_{22} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada  $V_1$  ve  $V_2$  ayırıcının girişleri,  $U_1$  ve  $U_2$  ayırıcının çıkışları ve aynı zamanda boilerin girişleridir.  $G_{12}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{11}$  ve  $G_{22}$  değerleri de (1) denklemine kullanılan değerlerin aynılarıdır. (1) denklemine görülen [U] matrisinin yerine (2) denklemdeki [U] matrisi konulduğunda (3) denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} - \frac{G_{12} \cdot G_{21}}{G_{22}} & 0 \\ 0 & G_{22} - \frac{G_{12} \cdot G_{21}}{G_{11}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Giriş ve çıkış ilişkilerinin doğrusallaştığı, vektör-matris gösteriminden daha rahat bir şekilde algılanabilmektedir. Vektör-matris gösterimi açıldığında  $Y_1$  çıkışının sadece  $V_1$  girişine,  $Y_2$  çıkışının da sadece  $V_2$  girişine bağlı olduğu görülmektedir [12].

Buna göre CADACS (Computer Aided Design and Control) yazılımından elde edilen  $G_{12}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{11}$  ve  $G_{22}$  fonksiyonları (3) denklemine yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında (4) ve (5) denklemleri elde edilir.

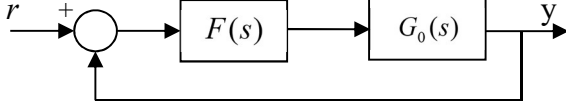
$$Y_1 = \frac{-348.8s^3 + 329.2s^2 + 19.48s + 0.1215}{7063s^3 + 540.3s^2 + 10.51s + 0.0499} V_1 \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{-348.8s^3 + 329.2s^2 + 19.48s + 0.1215}{5950s^3 + 424.4s^2 + 7.128s + 0.03133} V_2 \quad (5)$$

(4) ve (5) denklemleri sadeleştirilmiş olup  $Y_1$  elektriksel güç çıkışı,  $Y_2$  ise entalpi çıkışıdır.

### 2.2. Parametre Uzayı Yaklaşımı İle PI Kontrolör İçin Kararlı Kılan Bölgelerin Belirlenmesi

Şekil 2'de PI kontrolör ile kontrol edilen sistem görülmektedir.



Şekil 2: Bir sistemin PI kontrolü.

Şekil 2'de görülen  $F(s)$ , PI kontrolörüdür ve yapısı

$$F(s) = \left( \frac{K_i}{s} + K_p \right) \quad (6)$$

biçimindedir. Burada  $K_p$  ve  $K_i$  sırasıyla kontrolörün oransal ve integral kazanç parametreleridir.  $G_0(s)$  sistemi,

$$G_0(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (7)$$

biçimindedir.  $G_0(s)$ 'de  $s = j\omega$  yazarsak,

$$G_0(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{N_{re} + jN_{im}}{D_{re} + jD_{im}} \quad (8)$$

bulunur. Burada  $D_{re} \hat{=} \text{Re}\{D(j\omega)\}$ ,  $D_{im} \hat{=} \text{Im}\{D(j\omega)\}$

biçiminde olup  $N_{re}$  ve  $N_{im}$ 'de benzer olarak tanımlanmıştır. Dikkat edilirse,

$$D_{re} = D_e(-\omega^2) \quad D_{im} = D_o(-\omega^2)\omega \quad (9)$$

$$N_{re} = N_e(-\omega^2) \quad N_{im} = N_o(-\omega^2)\omega \quad (10)$$

olarak yazılabilir.

Parametre uzayında kararsız kapalı çevrim kutup sayısı  $\mathcal{D}$ 'nin aynı kaldığı bölgeye, *P-bölgesi* denilir ve  $\mathbb{P}$  ile gösterilir. *P-bölgelerinin sınırlarına, kararlılık sınırları* denilir. Parametre uzayında kararlı kılan bölgeleri bulmak için uygun bir yöntem, kararlılık sınırlarını bulmaktır. Şekil 2 ile verilen sistemin PI kontrolör parametreleri cinsinden bulunan kapalı çevrim karakteristik polinomunda  $s \square j\omega$  yazılmasıyla,

$$p_{0c}(j\omega) = j\omega D(j\omega) + N(j\omega)(K_i + j\omega K_p) = 0 \quad (12)$$

elde edilir.  $p_{0c}(j\omega) = 0$  olmasını sağlayan  $K_p$  ve  $K_i$  değerleri, kararlılık sınırını oluşturur.  $\omega$  değiştirilerek  $K_p - K_i$  düzleminde  $K_p - K_i$  eğrisi çizdirilir ve kararlılık sınırları belirlenir ve kararlı kılan bölgeler bulunur.  $N(j\omega)$  ile  $D(j\omega)$  polinomlarının (11)'deki gibi reel ve sanal kısımlarına ayrılmasıyla elde edilen bağıntılarının (12)'de yazılıp elde edilen  $p_{0c}(j\omega)$  polinomunun reel ve sanal kısımlarına ayrılmasıyla sırasıyla

$$\text{Re}\{p_{0c}(j\omega)\} = -\omega D_{im}(\omega) + N_{re}(\omega)K_i - \omega N_{im}(\omega)K_p = 0 \quad (13)$$

$$\text{Im}\{p_{0c}(j\omega)\} = \omega D_{re}(\omega) + N_{im}(\omega)K_i + \omega N_{re}(\omega)K_p = 0 \quad (14)$$

elde edilir. Son iki denklem, vektör-matris biçiminde

$$\begin{bmatrix} N_{re}(\omega) & -\omega N_{im}(\omega) \\ N_{im}(\omega) & \omega N_{re}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_i \\ K_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega D_{im}(\omega) \\ -\omega D_{re}(\omega) \end{bmatrix} \quad (15)$$

olarak yazılabilir. Burada

$$\Omega(\omega) \begin{bmatrix} N_{re}(\omega) & -\omega N_{im}(\omega) \\ N_{im}(\omega) & \omega N_{re}(\omega) \end{bmatrix}, \underline{h}(\omega) \begin{bmatrix} \omega D_{im}(\omega) \\ -\omega D_{re}(\omega) \end{bmatrix} \quad (16)$$

tanımlarının (15)'de yazılmasıyla,  $K_p$  ve  $K_i$  için:

$$\begin{bmatrix} K_i \\ K_p \end{bmatrix} = \Omega^{-1}(\omega) \underline{h}(\omega) \quad (17)$$

elde edilir. Böylece  $0 < \omega < \infty$  için, parametre uzayında  $K_p - K_i$  eğrisi çizdirilebilir. Çizdirilen bu eğri, parametre uzayını alt bölgelere böler. Her alt bölge için kapalı çevrim sistemin kararsız kutup sayısı sabittir. (13) ve (14), parametre uzayında doğrular gösterir [14]. (17)'de verilen çözüm, bu doğruların kesişimidir.  $\omega = \omega_s$  tekil frekansı için bu doğrular birbirine paraleldir ve bu durumda  $\Omega(\omega)$ 'nin determinanı için,

$$|\Omega(\omega_s)| = \omega_s (N_{re}^2(\omega_s) + N_{im}^2(\omega_s)) = 0 \quad (18)$$

yazılabilir. O zaman bir çözümün olmasının gerek ve yeter koşulu, bu doğruların birbirine özdeş olması yani tekil frekanslar ( $\omega_s$ ) için

$$\frac{-D_{im}(\omega_s)}{D_{re}(\omega_s)} = \frac{N_{re}(\omega_s)}{N_{im}(\omega_s)} = \frac{-N_{im}(\omega_s)}{N_{re}(\omega_s)} \quad (19)$$

koşulunun sağlanmasıdır. Dikkat edilirse bu durumda çözüm, bir noktada olmak yerine parametre uzayında bir doğrudur. Bu doğru boyunca reel bir kök, sanal eksenden geçer. (17)'de verilen çözümün olabilmesi için  $|\Omega(\omega)|$ 'nin sıfırdan farklı olması gerekir. Diğer yandan bu determinantın sıfıra eşit olması  $\omega = 0$  veya  $N_{re}^2(\omega) + N_{im}^2(\omega) = 0$  olması ile gerçekleşir. İkinci şartın sağlanabilmesi için  $N_{re}(\omega) = 0$  ve  $N_{im}(\omega) = 0$  olması gerekir.

$\omega \rightarrow \infty$  için,  $G_0(s)$  sistemi tersi de nedensel ( $m = n$ ) ise  $K_p = -1/a_m$

doğrusu, bir kararlılık sınırıdır ve *sonsuz kök sınırı* adını alır [14].

$0 < \omega < \infty$  için, (16)'daki ifadeleri kullanarak (17)'yi

$$\begin{bmatrix} K_i \\ K_p \end{bmatrix} = \frac{1}{|\Omega|} \begin{bmatrix} \omega N_{re}(\omega) & \omega N_{im}(\omega) \\ -N_{im}(\omega) & N_{re}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega D_{im}(\omega) \\ -\omega D_{re}(\omega) \end{bmatrix} \quad (21)$$

biçiminde yazabiliriz. (21)'den  $K_i$  ve  $K_p$  için sırasıyla

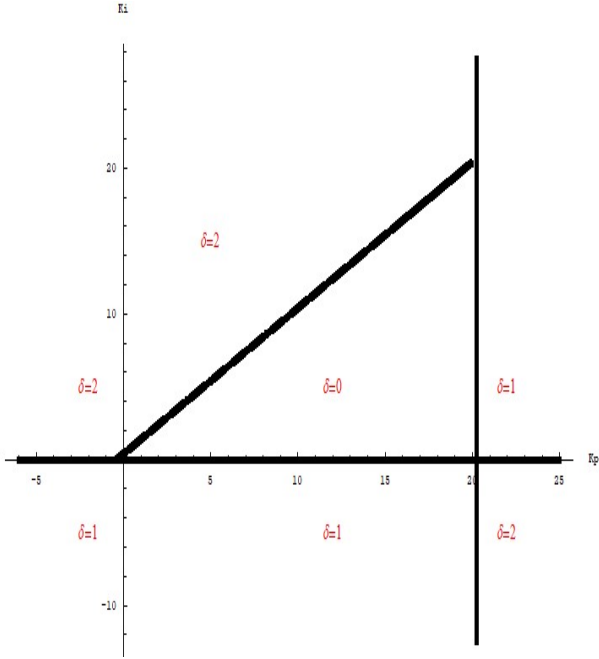
$$K_i = \frac{\omega N_{re}(\omega) D_{im}(\omega) - \omega N_{im}(\omega) D_{re}(\omega)}{N_{re}^2(\omega) + N_{im}^2(\omega)} \quad (22)$$

$$K_p = \frac{-N_{im}(\omega) D_{im}(\omega) - N_{re}(\omega) D_{re}(\omega)}{N_{re}^2(\omega) + N_{im}^2(\omega)} \quad (23)$$

bulunur [14]. (22) ve (23)'deki iki denklemle verilen  $K_p - K_i$  uzayındaki parametrik eğriye, *kompleks kök sınırı* adı verilir.

(4)'de verilen birinci transfer fonksiyonu olan  $G_0(s) \hat{=} Y_1(s)/V_1(s)$  için  $K_i = 0$  doğrusu, reel kök

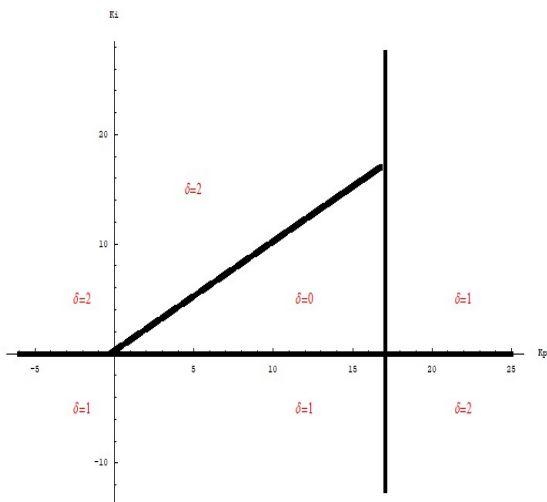
sınırdır ve bu sistem, tersi de nedensel olduğu için; (20)'den bulunan  $K_p = 20.2494$  doğrusu ise sonsuz kök sınırını verir.  $K_p - K_i$  düzleminde kararsız kapalı çevrim kutup sayısının aynı kaldığı  $P$ -bölgeleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: (4)'deki sistem için  $K_p - K_i$  düzleminde  $P$ -bölgeleri.

Şekil 3'de kararsız kutup sayısının sıfır olduğu yani  $\delta = 0$  olan bölge, sistemi kapalı çevrimde kararlı kılan PI kontrolörlerinin bölgesidir.

(5)'de verilen  $G_0(s) \hat{=} Y_2(s)/V_2(s)$  ikinci transfer fonksiyonu için  $K_i = 0$  doğrusu, reel kök sınırı ve bu sistem, tersi de nedensel olduğu için; (22)'den bulunan  $K_p = 17.0585$  doğrusu ise sonsuz kök sınırını olmak üzere kapalı çevrimde sistemi kararlı kılan PI kontrolörlerinin bölgesi ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4: (5)'deki sistem için  $K_p - K_i$  düzleminde  $P$ -bölgeleri.

### 2.3. Yapay Zekâ Yöntemleri

Termik santral için oluşturulan veri setinde tam yükte elektrik güç çıkışı tahmini yapılmış olup giriş değerleri olarak ortam sıcaklığı, atmosfer basıncı, bağıl nem ve egzoz buhar basıncı seçilmiştir [15]. Bu çalışmada ise termik santralinin kontrolü için yeni veri seti oluşturulmuştur. Veri seti girişleri  $Y_1$  elektriksel güç çıkışı ve  $Y_2$  entalpi çıkışından oluşmakta olup için kullanılacak PI kontrolörlerin  $K_p$  ve  $K_i$  parametreleri için sistemi kararlı kılabilecek bölgelerde modeller üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak yapay zekâ çalışmalarında kullanılan veriler elde edilmiştir. Benzetimlerde her iterasyondaki hata ( $e$ ), hatanın türevi ( $de$ ), çıkışlar ( $Y_1$  ve  $Y_2$ ), kararlı bölgedeki  $K_p$  değerleri ve  $K_i$  değerleri kaydedilerek veri setleri oluşturulmuştur.

Ardından bu veri setleri kullanılarak WEKA yazılımında regresyon uygulamalarında [16] tercih edilen Yapay Sinir Ağları (YSA), IBk, Kstar, Bagging, Random Orman (RO), Random Ağaç (RA) ve REP Ağaç (REPA) yöntemleri kullanılarak  $K_p$  ve  $K_i$  değerleri amaç fonksiyonu [17] olacak şekilde eğitimler yaptırılmıştır.

Eğitimin tamamlanmasından sonra yukarıda belirtilen her yöntem için ilk olarak  $K_p$  değerlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Bunun için eğitimlerden elde edilen ağırlık katsayıları kullanılarak test verisi olarak hata ( $e$ ) 0, hatanın türevi ( $de$ ) 0 ve çıkışlar ( $Y_1$  ve  $Y_2$ ) 1 olacak şekilde kararlı bölgedeki en optimal  $K_p$  değerleri bulunmuştur. Aşağıdaki tablolarda yöntemlerin eğitim ve test sonuçları verilmiştir. Eğitim ve test sonuçları elde edilirken, maliyet fonksiyonu olarak Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Karekök Ortalama Hata (KOH) kullanılmıştır. Maliyet fonksiyonları;

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (24)$$

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (25)$$

verilmiştir. Burada  $y_i$ ; istenen çıkış değeri,  $\hat{y}_i$ ; tahmin edilen çıkış değerini ve  $n$ ; örnekleme sayısını ifade etmektedir.

Tablo 1:  $Y_1$  çıkışı için  $K_p$  parametrelerine ait değerler

	Doğulama Katsayısı ( $R^2$ )	Ortama Mutlak Hata (OMH)	Karekök Ortalama Hata (KOH)	Test Sonucunda Tahmin Edilen $K_p$ Değeri
Yapay Sinir Ağları (YSA)	0,6891	2,5226	3,4454	15,435
IBk	1,0000	0,0000	0,0000	18,000
Kstar	0,9651	0,8196	1,3209	16,487
Bagging	0,9603	0,6829	1,3359	18,099
Random Orman (RO)	0,9925	0,2878	0,5963	18,035
Random Ağaç (RA)	0,9998	0,0641	0,0900	19,315
REP Ağaç (REPA)	0,9436	0,8146	1,5594	18,254

Tablo 1'de görüldüğü üzere IBk yöntemi, Doğulama Katsayısı ( $R^2$ ), Ortama Mutlak Hata (OMH) ve Karekök Ortalama Hata (KOH) kriterleri açısından  $Y_1$  modelinin  $K_p$  parametresi için en başarılı yöntemdir.

Tablo 2:  $Y_2$  çıkışı için Kp parametrelerine ait değerler

	Doğulama Katsayısı ( $R^2$ )	Ortama Mutlak Hata (OMH)	Karekök Ortalama Hata (KOH)	Test Sonucunda Tahmin Edilen Kp Değeri
Yapay Sınır Ağları (YSA)	0,5310	2,8930	3,5750	11,538
IBk	1,0000	0,0000	0,0000	15,250
Kstar	0,9800	0,5509	0,8653	14,231
Bagging	0,9794	0,5023	0,8264	15,097
Random Orman (RO)	0,9958	0,2267	0,3828	15,192
Random Ağaç (RA)	0,9997	0,0727	0,0954	14,954
REP Ağaç (REPA)	0,9661	0,5733	1,0335	12,833

Tablo 2’de görüldüğü üzere IBk yöntemi, Doğulama Katsayısı ( $R^2$ ), Ortama Mutlak Hata (OMH) ve Karekök Ortalama Hata (KOH) kriterleri açısından  $Y_2$  modelinin Kp parametresi için en başarılı yöntemdir.

Benzer şekilde eğitimlerin tamamlanmasından sonra yukarıda belirtilen her yöntem için bu kez Ki değerlerinin tahmin ettirilmesi sağlanmıştır. Bunun için eğitimlerden elde edilen ağırlık katsayıları kullanılarak test verisi olarak hata ( $\epsilon$ ) 0, hatanın türevi ( $d\epsilon$ ) 0 ve çıkışlar ( $Y_1$  ve  $Y_2$ ) 1 olacak şekilde kararlı bölgedeki en optimal Ki değerleri bulunmuştur. Aşağıdaki tablolarda yöntemlerin eğitim ve test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3:  $Y_1$  çıkışı için Ki parametrelerine ait değerler

	Doğulama Katsayısı ( $R^2$ )	Ortama Mutlak Hata (OMH)	Karekök Ortalama Hata (KOH)	Test Sonucunda Tahmin Edilen Ki Değeri
Yapay Sınır Ağları (YSA)	0,7324	2,4608	3,2583	3,204
IBk	1,0000	0,0000	0,0000	0,750
Kstar	0,9733	0,5828	1,1510	3,106
Bagging	0,9743	0,4855	1,0752	6,262
Random Orman (RO)	0,9948	0,1969	0,4940	5,551
Random Ağaç (RA)	0,9998	0,0721	0,0968	4,688
REP Ağaç (REPA)	0,9560	0,6585	1,3764	3,826

Tablo 3’de görüldüğü üzere IBk yöntemi, Doğulama Katsayısı ( $R^2$ ), Ortama Mutlak Hata (OMH) ve Karekök Ortalama Hata (KOH) kriterleri açısından  $Y_1$  modelinin Ki parametresi için en başarılı yöntemdir.

Tablo 4’de görüldüğü üzere IBk yöntemi, Doğulama Katsayısı ( $R^2$ ), Ortama Mutlak Hata (OMH) ve Karekök Ortalama Hata (KOH) kriterleri açısından  $Y_2$  modelinin Ki parametresi için en başarılı yöntemdir.

Tablo 4:  $Y_2$  çıkışı için Ki parametrelerine ait değerler

	Doğulama Katsayısı ( $R^2$ )	Ortama Mutlak Hata (OMH)	Karekök Ortalama Hata (KOH)	Test Sonucunda Tahmin Edilen Ki Değeri
Yapay Sınır Ağları (YSA)	0,5738	2,8273	3,4099	5,981
IBk	1,0000	0,0000	0,0000	0,750
Kstar	0,9768	0,4576	0,9085	3,752
Bagging	0,9718	0,4573	0,9666	4,180
Random Orman (RO)	0,9944	0,1951	0,4438	3,661
Random Ağaç (RA)	0,9997	0,0735	0,0959	1,465
REP Ağaç (REPA)	0,9487	0,6477	1,2668	5,274

### 3. Bulgular

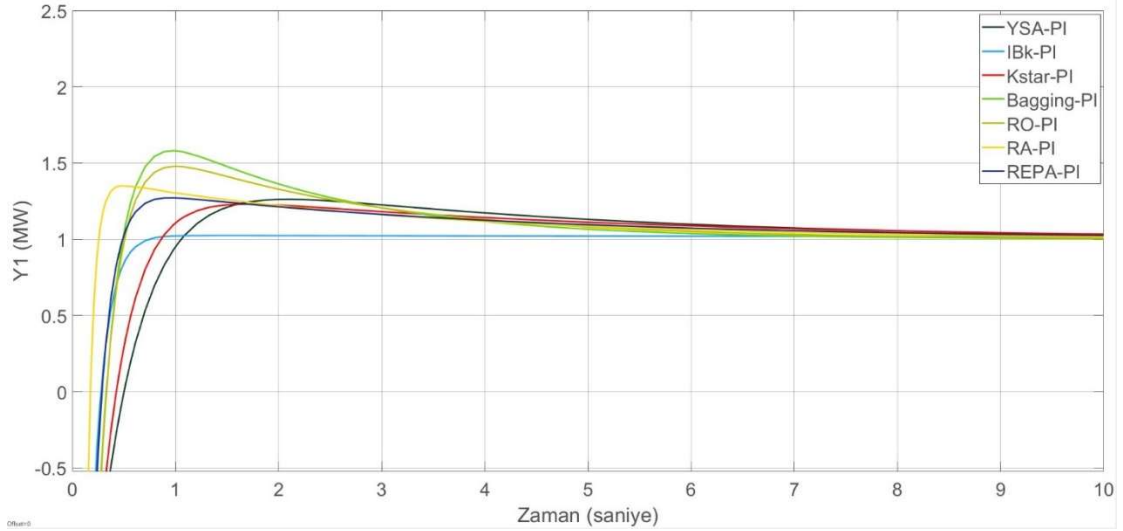
Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’de sunulan Kp ve Ki parametreleri için yapay zeka yöntemleri ile yapılan tahminleri karşılaştırmak için MATLAB Simulink ortamında benzetimler yapılmıştır.

Sırasıyla Şekil 5’de  $Y_1$  elektriksel güç çıkışı ve Şekil 6’da  $Y_2$  entalpi çıkışı için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 5’de sunulan benzetim sonuçları Tablo 5’de detaylandırılmıştır.

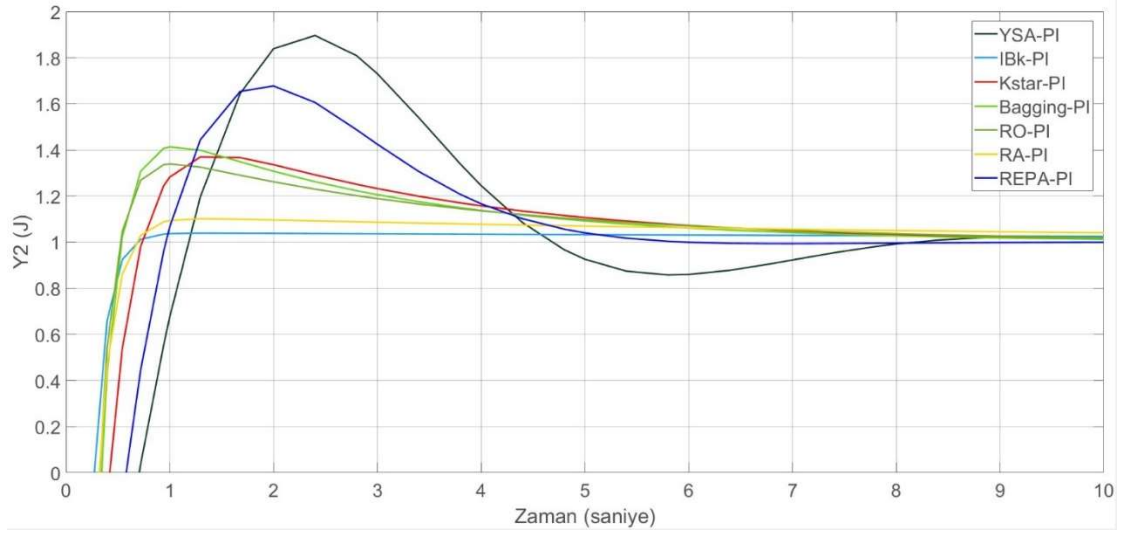
Tablo 5:  $Y_1$  çıkışı için benzetim sonuçları

	Ölü Zaman (ms)	Oturma Zamanı (s) %5’lik band için	Aşma Değeri (%)
YSA-PI	472	8,485	26,4
IBk-PI	278	0,610	2,5
Kstar-PI	420	8,348	22,9
Bagging	332	5,536	58,2
RO-PI	327	6,022	47,9
RA-PI	176	6,685	35
REPA-PI	290	7,436	27,2

Yapılan analizler sonucunda  $Y_1$  modeli için, IBk yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı reaksiyon aldığı görülmektedir. Bu çalışmada önerilen IBk yöntemi ile parametreleri belirlenen IBk-PI kontrolör 278 ms ölü zaman sonrası birim basamak cevabını yakalamaya çalışmaktadır. Ayrıca % 5’lik band için sistem 0,610 saniyede oturmaktadır. Bir diğer önemli kriter olan yüzdesel aşım miktarı göz önünde bulundurulduğunda, IBk yönteminin diğer tüm yöntemlere kıyasla daha iyi bir grafik izlediği ve daha başarılı çıktı ürettiği görülmektedir.



Şekil 5: Y<sub>1</sub> (elektriksel güç) çıkışı için benzetim sonuçları.



Şekil 6: Y<sub>2</sub> (entalpi) çıkışı için benzetim sonuçları.

Şekil 6'da sunulan benzetim sonuçları Tablo 6'da detaylandırılmıştır.

Tablo 6: Y<sub>2</sub> çıkışı için benzetim sonuçları

	Ölü Zaman (ms)	Oturma Zamanı (s) %5'lik band için	Aşım Değeri (%)
YSA-PI	714	7,312	89,7
IBk-PI	275	0,586	3,9
Kstar-PI	429	6,958	37,5
Bagging	341	6,560	41,2
RO-PI	297	7,091	34,1
RA-PI	319	8,108	10,2
REPA-PI	560	4,856	68

Yapılan analizler sonucunda Y<sub>2</sub> modeli için, benzer şekilde IBk yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı reaksiyon aldığı görülmektedir. Bu çalışmada önerilen IBk yöntemi ile parametreleri belirlenen IBk-PI kontrolör 275 ms ölü zaman sonrası birim basamak cevabını yakalamaya çalışmaktadır. Ayrıca % 5'lik band için sistem 0,586 saniyede oturmaktadır. Bir diğer önemli kriter olan yüzdesel aşım miktarı göz önünde bulundurulduğunda, IBk yönteminin diğer tüm yöntemlere kıyasla daha iyi bir grafik izlediği ve daha başarılı çıktı ürettiği görülmektedir.

Literatürde önerilen termik santrallerin kontrolünde kullanılan metasezgisel optimizasyon [5] ve bulanık mantık yöntemlerine [6] göre IBk-PI yönteminin oturma süresinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir termik elektrik santralının güç ve entalpi çıkışlarını kontrol etmek amacıyla yapay zekâya dayalı PI kontrolör yöntemleri karşılaştırılmıştır. Öncelikle K<sub>p</sub> ve K<sub>i</sub> parametreleri için sistemi kararlı kılabilecek olan bölge parametre

uzayı yaklaşımı ile belirlenmiştir. Yapay Sinir Ağları (YSA), IBk, Kstar, Bagging, Random Orman (RO), Random Ağaç (RA) ve REP Ağaç (REPA) yöntemleri gibi farklı yapay zekâ yöntemleri ile söz konusu kararlı bölgelerde Kp ve Ki parametreleri belirlenmiştir. PI kontrolcüsünün sistem cevabı ölü zaman, oturma zamanı ve aşma değerleri ile kıyaslanmıştır.

Benzetim sonuçları, bu çalışmada önerilen IBk yöntemi ile parametreleri belirlenen IBk-PI kontrolörün tüm işletme şartları altında, sisteme verdiği hızlı cevaplarla diğer yapay zeka algoritması ile elde edilen kontrolörlerden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Elbette farklı modeller için farklı yapay zekâ yöntemleri ile uygun sonuçlar elde edilebilir.

Özetle günümüzde önemini tartışılmayacağı tüm elektrik üretim santralleri için bu çalışmada olduğu gibi yapay zekâyâ dayalı yöntemlerin uygulanması ve ülkemizdeki mevcut santrallerin kontrolörlerinin güncellenmesi gerekmektedir.

İleride, bu çalışmada kullanılan kömür yakıtlı santral için çalışma grubumuz tarafından üretilecek özgün ve yeni yapay zekâ yöntemleri ile PID kontrolör parametrelerinin tahmin edilerek uygulanması düşünülmektedir. Ayrıca elde edilecek sonuçların başarılı olması durumunda üretilecek yapay zekâ yazılımlarının farklı modellerde de uygulanarak yaygınlaştırılması planlanmaktadır.

### Kaynakça

- [1] İ. Kocaarslan, E. Çam ve H. Tiryaki, "A fuzzy logic controller application for thermal power plants," *Energy Conversion and Management*, Cilt: 47, No: 4, s:442-458, 2006.
- [2] İ. Kocaarslan, E. Çam ve H. Tiryaki, "An investigation of cleanness in boilers of thermal power plants with fuzzy logic controller," Proc. of the 2nd International Conference on TPE, Tabriz, İran., s: 668-672, 2004
- [3] İ. Kocaarslan, E. Çam, H. Tiryaki ve M.C. Taplamacıoğlu, "A fuzzy PI controller application in boilers of thermal power plants," Proc. of the 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'05), Bursa, Türkiye., s: 83-87, 2005
- [4] M. Lüy, İ. Kocaarslan ve E. Çam, "Bir Termik Elektrik Santralinde Yapay Sinir Ağları Kontrolörün Etkilerinin İncelenmesi." *International Journal of Engineering Research and Development*, Cilt: 1, No: 1, s:42-46, 2009.
- [5] Y.Arıkuşu, N. Bayhan H. Tiryaki, "Comparison of Conventional and Modern Controllers for a Gas Turbine Power Plant". *Electrica*,19(2): 146-157, 2019.
- [6] Y.Arıkuşu, N. Bayhan, H. Tiryaki, A. E. Yılmaz. "Bir Gaz Türbininin Parçacık Sürüsü, Karınca Kolonisi ve Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Yöntemleri ile Kontrolü" TOK'2019 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 11-14 Eylül 2019, Muğla.
- [7] D. Wang, M. Wang and Y. Li, "Genetic and Fuzzy Fusion Algorithm for Coal-feeding Optimal Control of Coal-fired Power Plant," 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung City, Taiwan, 2020, pp. 500-503.
- [8] V. Haji Haji, Concepción A. Monje, "Fractional order fuzzy-PID control of a combined cycle power plant using Particle Swarm Optimization algorithm with an improved dynamic parameters selection", *Applied Soft Computing*, Volume 58,2017,Pages 256-264.
- [9] İ. Kocaarslan, *Einsatz Adaptiver Regelkonzepte in Einem Dampfkraftwerk*, Doktora Tezi, Bochum, Almanya, 1991.
- [10] M. Hübel, S. Meinke, M.T. Andrén, C. Wedding, J. Nocke, C. Gierow, E. Hassel ve J. Funkquist, "Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimisation." *Applied Energy*, Cilt:208, No:1, s:319-331, 2017.
- [11] İ. Kocaarslan, ve H. Tiryaki. "PSO-PID ve FGPI Kontrolörlerin bir Termik Santralde Karşılaştırılması." *International Journal of Engineering*, Cilt:2, No:1, s:39-44, 2010.
- [12] M. Waller, J.B. Waller ve K.V. Waller, "Decoupling Revisited", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Cilt: 42, No:20, s:4575-4577, 2003.
- [13] J. Ackermann, P. Blue, T. Bünte, L. Güvenç, D. Kaesbauer, M. Kodt, M. Muhler ve D. Odental, "Robust Control The Parameter Space Approach", Springer-Verlag, London Berlin Heidelberg, 2002.
- [14] N. Bayhan, Y.S. Arıkuşu ve H. Tiryaki, "PI control based on parameter space approach supported metaheuristic optimization algorithms and ANFIS in a natural gas combined cycle power plant," *Optimal Control Applications and Methods*, Cilt:44, No:1, s:846-865, 2021.
- [15] P. Tüfekci, "Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Cilt:60, No:1, s:126-140, 2014.
- [16] T. Doan ve J. Kalita. "Selecting machine learning algorithms using regression models." Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Data Mining Workshop (ICDMW), IEEE, s:1498-1505, 2015
- [17] R. Tabakh ve H. Tiryaki, "Control of the Automatic Voltage Regulator System with a Novel Stability-based Artificial Intelligence Method", *Elektronika Ir Elektrotehnika*, Cilt:27, No:6, s:11-16, 2021.