

# Nükleer güç santrallerinde sensör güvenilirliğinin reaktör işletimine etkileri

**Burak BARUTÇU\***, **Melih GEÇKİNLİ**, **Serhat ŞEKER**

İTÜ Enerji Enstitüsü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Bu çalışmada Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin yeni veri toplama sistemi incelenerek işaret doğrulama ve sağlaması için kullanılacak çeşitli metotlar ele alınmış ve bu amaca yönelik yeni yöntemler önerilmiştir. Sensör doğrulama amacıyla AC-ışaretler üzerinde Öz-İlişkili Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA'ları uygulanmıştır. Daha sonra, doğrulanmış kalp-dışı nötron sensörlerinin işaretleri kullanılarak kalp kazanı titreşim analizi yapılmıştır. Ayrıca santral genelinde bileşen tabanlı doğrulama yapmak için DC-ışaretler üzerinde Çok Girişli Çok Çıkışlı YSA'ları kullanılmıştır. DC-ışaretlerde çevrim-içi anormal durumların belirlenmesi problemine yeni bir çözüm yolu olarak dalgacık analizi kullanımı önerilmiş ve Kalman filtresi uygulamasına üstünlüğü gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Zaman serileri, kalp kazanı titreşimleri, yapay sinir ağları, çok çözünürlüklü dalgacık analizi, Kalman filtrelemesi.

## The effect of sensor reliability on reactor operation in nuclear power plants

### Abstract

*In this study, the data acquisition system of the Netherlands EPZ Borssele Nuclear Power Plant (NPP) is considered and studied for signal validation and verification purposes. The collected data is separated into two groups as AC and DC-signals. Here AC-signals are pre-processed before being sampled for noise analysis studies, while DC-signals are sampled and recorded as received. With the aim of sensor validation, sensor response times were determined using auto-regressive model on pre-processed sensor signals (AC-signals), Artificial Neural Networks (ANNs) applied to AC-signals and Auto-Associative-ANN and Multi Input Single Output (MISO) ANN structures are implemented to solve the sensor validation problem. Spectral analysis of the ex-core neutron sensors' AC-signals reveals the presence of a peak at 9.2 Hz due to global noise caused by the reactivity fluctuations, followed peaks characteristic of the Core Barrel Motion (CBM) in the range of 10.5 to 19.0 Hz, and finally a peak attributed to the action of the primary pumps at 25.0 Hz. Also, CBM analysis is carried out using the ex-core neutron sensors' information which has already been validated. Furthermore MISO and Multi Input Multi Output (MIMO) ANNs are used for the component based validation study in the plant-wide monitoring. As a new tool, wavelet analysis is proposed for on-line anomaly detection problem by DC-signals and it is found out to be superior tool to Kalman Filtering approach.*

**Keywords:** Time series analysis, core barrel motion, artificial neural networks, multiresolutionary wavelet analysis, Kalman filtering.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Burak BARUTÇU. barutcub@itu.edu.tr, Tel: (212) 285 38 86.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Enerji Enstitüsü'nde tamamlanmış olan "Nükleer güç santrallerinde sensör güvenilirliğinin reaktör işletimine etkileri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 14.10.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.11.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Bu çalışmada Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin (PWR, 480 MWe) yeni veri toplama sisteminde kullanılan sensörlerin doğrulanması, santral genelinde sensör hatası ve işletimden kaynaklanan anormal durumların belirlenmesi için etkin olarak kullanılacak çeşitli metotlar incelenmiş ve bu amaca yönelik yeni yöntemler önerilmiştir.

Santralin ön-işlemeden geçirilmiş sensör işaretleri (AC-ışaretler) kullanılarak; sensör doğrulama için Öz-Bağlanımlı (Auto-Regressive) model ile sensör cevap zamanı belirlenmesi, Öz-İlişkili (Auto-Associative) Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA ile kalp dışı nötron sensörlerinin doğrulanması, her iki YSA'nın karşılaştırılması ve bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri üzerinden yapılan analizlerle kalp kazanı titreşimlerinin belirlenmesi yoluyla durum izlemesi gerçekleştirilmiş olup, EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali için kalp kazanı titreşim analizi yapılmıştır (Barutçu vd., 2003a; 2003b).

Santraldan doğrudan gelen sensör işaretleri (DC-ışaretler) üzerinde ÇGTÇ-YSA yaklaşımı ile sensör doğrulama çalışması yapıldıktan sonra bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri kullanılarak Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) YSA ile bileşen bazında doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Nükleer güç santrallerinde anormal durum belirlenmesi için genelde AC-ışaretler kullanılır. Santralin DC-ışaretlerinden de hata deteksiyonu yapmak mümkündür. Literatürde bu anlamda bir deteksiyon sistemi için sensörlerden gelen işaretleri giriş olarak alıp Kalman filtreleme metoduyla DC-ışaret durumunu belirleyen çalışmalar da vardır. Bu bağlamda Kalman filtresinin kestirdiği DC-ışaret durumları Kümülatif Toplam (CUSUM) testiyle kontrol edilmiştir (Morgenstern vd., 1988a; 1988b). Metodun verimliliğini belirlemek için EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işletimi sırasında, geçici olayların meydana geldiği durumlara ait işaret kümeleri kullanılmıştır. Gerçek zamanda yapılan testler kurulan sistemin verimliliğini ispatla-

mıştır (Peeters vd., 1991). Kümülatif Toplam testinde bazı parametrelerin seçimi sorun doğurmaktadır. Parametreler uygun seçilmezse test başarılı olmamaktadır.

DC-ışareten çevrim-içi anormal durum belirlemedeki temel yaklaşım, uygun bir yöntemle işaretin çevrim-içi olarak gürültüden arındırılması ve ışıaretteki marjinal değişimlerin belirlenmesi için gürültüden arındırılmış işaretin türevinin izlenmesidir. DC-ışaretin doğrudan türevi ışıaretteki gürültü nedeniyle anlamlı bir bilgi vermez. Kalman filtrelemesi literatürde bu amaç için kullanılan etkili bir metottur.

Ancak bu çalışmada literatürde kullanılan klasik metoda (Kalman filtrelemesi tabanlı) alternatif olarak, dalgacık analizi kökenli yeni bir metot önerilmiş ve EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işaretleri üzerinde Kalman filtrelemesi tabanlı eski metoda üstünlüğü gösterilmiştir.

## Kullanılan matematiksel yöntemler

### Yapay sinir ağları

İleri-Beslemeli bir YSA  $\mathbf{x}(x_1, \dots, x_n)$  şeklindeki bir giriş ışıareti serisini bir ya da daha çok çıkış ışıaretine  $\mathbf{y}(y_1, \dots, y_m)$  çevirir. Bu durum Denklem 1 ile ifade edilebilir.

$$y_j = f_j(\mathbf{x}) \quad j = 1, \dots, m \quad (1)$$

Bununla birlikte, bir YSA bu ilişkiyi açık bir şekilde göstermez, içinde bulunan ağırlık faktörleriyle tanımlar. Bir  $j$  nöronunun net girişi hesaplanırken, evvelki tabakada bulunan tüm  $m$  nöronlarından gelen çıkışlar değerlendirilmektedir. Giriş ışıareti kümesinin değerleri genellikle  $-1/+1$  aralığına normalize edilir.  $j$ . nöronun net değeri  $Net_j$ , Denklem 2'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Net_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i \quad (2)$$

Burada  $w_{ji}$  elemanı,  $i$ . ve  $j$ . nöronlar arasındaki ağırlık değerlerini ifade etmektedir.  $j$ . nöronun çıktısı  $y_j$  Denklem 3'te görüldüğü gibi ifade edilir.

$$y_j = f(Net_j) = 1/[1 + \exp(-\alpha Net_j + \theta_j)] \quad (3)$$

$f$  fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır ve burada bir sigmoid fonksiyonu-dur.  $\theta_j, j$ . nöron için eşik değeridir. Eğitim sırasında,  $y_j$  çıkışlarını elde etmek için giriş örüntüleri ağa girilir. Bulunan sonuç, hedeflenen çıkış  $t_j$  ile kıyaslanır. Bundan sonra, ağırlık faktörleri,

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_j (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (4)$$

hata terimini minimize etmek için değiştirilir. Ağırlık faktörleri, hata terimi kullanılarak bir parametre optimizasyon tekniği yardımıyla ayarlanmaktadır (Beale ve Jackson, 1990; Haykin, 1999). Bu çalışmada YSA'larının eğitiminde, Levenberg - Marquardt algoritması kullanılmıştır.

### Dalgacık dönüşümü ve çok çözünürlüklü analiz (ÇÇA)

$L^2(R)$  sonlu enerjili işaretler için bir vektör uzayını göstermek üzere,  $x(t)$ ,  $L^2(R)$  uzayında tanımlanan bir işaret olsun. Burada  $R$  gerçel sayılar kümesidir. Bu durumda sonlu enerjili işaretler:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (5)$$

bağıntısını sağlarlar ve  $x(t)$ 'nin sürekli dalgacık dönüşümü de

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (6)$$

olarak tanımlanır. İntegral içindeki  $\psi_{a,b}(t)$  fonksiyonu ise, normalize edilmiş olarak

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

şeklinde verilebilir. Burada  $\psi(t)$  baz fonksiyonu ya da ana dalgacı, \* sembolü kompleks eşleniği ve  $a, b$  parametreleri ise  $a, b \in R, a \neq 0$  olmak üzere sırasıyla genişleme ve öteleme parametrelerini gösterir. Sürekli genişleme ve ötele-

me parametreleri yerine,  $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$  şeklindeki ayrık parametreleri tanımlamak mümkündür. Burada  $a_0$  ve  $b_0$  sabit sayılar olup,  $a_0 > 1$  ve  $b_0 > 0$  koşullarını sağlar. Ayrıca  $m, n$  sayıları da,  $Z$  tam sayılar kümesinin elemanlarını oluşturur. Bu durumda ayrıklaştırılmış ana dalgacık;

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (8)$$

haline gelir ve ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü;

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (9)$$

ile verilir.  $a_0$  ve  $b_0$ 'ın uygun seçimiyle ana dalgacık ailesi  $L^2(R)$ 'nin ortonormal bazını oluşturur.  $a_0$  ve  $b_0$ 'ın uygun seçimleri  $a_0 = 2$  ve  $b_0 = 1$  değerleri için dalgacık dönüşümü, diadik-ortonormal dalgacık dönüşümü adını alır. Bu durumdaki ortonormal bazın önemli özelliklerinden birisi ise  $a_0$  ve  $b_0$ 'ın yukarıdaki gibi seçimiyle, işareti farklı zaman ve frekans çözünürlüklü ölçeklere ayırtırmayı sağlayan ve Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi (ÇÇDA) denilen algoritmanın kullanılabilmesidir. Bu algorithmada işaret, alçak ve yüksek geçiren filtre yapıları ile alt bantlara ayrıştırılır.

Bu çalışmadaki uygulamanın ana konusunu oluşturan Çok Çözünürlüklü İşaret Ayırtırması algoritması şu şekilde verilir:  $c_0(n)$ , fiziksel bir ölçme cihazından kaydedilen bir ayrık zaman işareti olsun. Bu işaret, yaklaşım ve detay gösterimi denilen iki ayrı frekans aralığına ayrıştırılabilir. Bu anlamda çok çözünürlüklü işaret ayrıştırma tekniği kullanılarak ölçek-1'de ayrıştırılmış işaretler  $c_1(n)$  ve  $d_1(n)$  olur. Bu durumda  $c_1(n)$ , orijinal işaretin yaklaşım versiyonunu ve  $d_1(n)$  de, işaretin dalgacık dönüşümü formundaki detay gösterilimini oluşturur. Bunlar sırasıyla;

$$c_1(n) = \sum_k h(k-2n) c_0(k) \quad (10)$$

$$d_1(n) = \sum_k g(k-2n) c_0(k) \quad (11)$$

olarak tanımlanırlar. Burada  $h(n)$  ve  $g(n)$ ,  $c_0(n)$ 'i,  $c_1(n)$  ve  $d_1(n)$ 'e ayırıştırıran birleşik filtre katsayılarıdır. Bir sonraki ölçek ayırıştırılmasında ise, yine  $c_1(n)$  işareti temel alınır. Bu durumda ölçek-2'deki ayırıştırılmış işarete ilişkin yaklaşım ve detay katsayıları ise

$$c_2(n) = \sum_k h(k - 2n)c_1(k) \quad (12)$$

$$d_2(n) = \sum_k g(k - 2n)c_1(k) \quad (13)$$

ile verilir. Böylece daha yüksek seviyelerdeki ölçek ayırıştırırmaları da benzer yolla sürdürülebilir (Mallat, 1989).

### EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali ve veri toplama sistemi

Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin veri toplama sistemi iki bağlantı panosundan oluşur. "MS-Paneli (Koşullandırılmış İşaretler Paneli)" gürültü analizi için, "MR-Paneli (Koşullandırılmamış İşaretler Paneli)" santralin çalışmasını izlemek için kullanılmaktadır. Bağlantı panolarına gelen veriler santralin yerel ağına verilir.

### MS-Paneli

MS-Panelinde 32 işaret 64 örnek/s hızla AC ve DC olarak örneklenip 30 dakikalık dosyalar halinde kaydedilmektedir. DC-işaretler hiç bir koşullandırma yapılmadan kaydedilmektedirler. Bu işaretlerin AC kısımlarını ayırmak ve gürültü analizi için elverişli bir hale getirmek için işaretler, önce 0.03 Hz yüksek geçiren filtreden, kuvvetlendiriciden (x20 bütün işaretler için), şebeke etkisini ve örtüşmeyi önlemek için 30 Hz alçak geçiren filtreden ve tekrar kuvvetlendiriciden (yazılım kontrollü, işaretlerin cinsine göre farklı kazançlara sahip) geçirilirler. Bu işaretler 16 bit'lik bir ADC ile kaydedilirler, ADC'nin çalışma aralığı  $\pm 10V$ 'tur. MS-Panelinde örneklenen işaretlerin listesi Tablo 1'de verilmiştir.

### MR-Paneli

MR-Paneli 96 kanallı bir sistemdir. Bugün sadece ilk 72 kanalı kullanılmaktadır. Toplam 72 işareti 10 örnek/s hızla DC olarak örnekleyip 30 dakikalık dosyalar halinde kaydetmektedir. MR-Paneline gelen işaretler bir kuvvetlendiriciden (x2 bütün işaretler için) geçer. Buradaki ADC'nin çalışma aralığı 0-5V'tur. MR-Panelinde örneklenen işaretlerin listesi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. MS-Paneli işaret listesi

No	İşaret Kodu	İşaret Adı	No	İşaret Kodu	İşaret Adı
0	YQ032T006	Kalp Çıkış Sıcaklığı	16	YD001V003	Titreşim Sensörü Radyal Volan
1	YA001T095	Kalp Giriş Sıcaklığı	17	YD001V004	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan
2	TV050A001	Boron Konsantrasyonu	18	YD001V018	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan
3	SP010E001	Reaktör Aktif Elektrik Gücü	19	YD001V005	Titreşim Sensörü Radyal Volan (90°)
4	YX003X082	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (50° sy)	20	YD001V006	Titreşim Sensörü Radyal Volan
5	YX003X062	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (140° sy)	21	YD001V017	Titreşim Sensörü Aksiyel Salmastra
6	YX003X072	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (230° sy)	22	YD001V007	Titreşim Sensörü Radyal Salmastra
7	YX003X052	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (320° sy)	23	YD001V008	Titreşim Sensörü Radyal Salm. (90°)
8	YX003X061	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (140° sy)	24	YD002V003	Titreşim Sensörü Radyal Volan
9	YQ023X015	Kalp-İçi Nötron Kanalı	25	YD002V004	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan
10	YQ023X016	Kalp-İçi Nötron Kanalı	26	YD002V018	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan
11	YA001P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	27	YD002V005	Titreşim Sensörü Radyal Volan (90°)
12	YA002P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	28	YD002V006	Titreşim Sensörü Radyal Volan
13	YA001P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	29	YD002V017	Titreşim Sensörü Aksiyel Salmastra
14	YA002P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	30	YD002V007	Titreşim Sensörü Radyal Salmastra
15	YX003X051	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (320° sy)	31	YD002V008	Titreşim Sensörü Radyal Salm. (90°)

Tablo 2. MR-Panelli işaret listesi

No	İşaret Kodu	İşaret Adı	No	İşaret Kodu	İşaret Adı
0	YD001Y051	Birincil Dev. Pompası % Hız (Ç-1)	36	YP001T003	Basınçlandırıcı Su Sıcaklığı
1	YD002Y051	Birincil Dev. Pompası % Hız (Ç-2)	37	YP001P001	Basınçlandırıcı Su Basıncı
2	YB001L051	Buhar Gen. Su Seviyesi (Geniş Bant)	38	YX003X050	Nötron Detektörü (50)
3	YB002L051	Buhar Gen. Su Seviyesi (Geniş Bant)	39	YX003X060	Nötron Detektörü (60)
4	RA000P021	İkincil Devre Buhar Basıncı	40	YX003X070	Nötron Detektörü (70)
5	SF010C014	Düşük Basınç Türbini Buhar Basıncı	41	YX003X080	Nötron Detektörü (80)
6	SF010C116	Yoğuşturucu Basıncı	42	SP010E001	Generatör Aktif Gücü
7	SF010C213	Yoğuşturucu Basıncı	43	SP010E002	Generatör Reaktif Gücü
8	SA011S011	Yük. Bas. Türb. Giriş Vanası Kon.	44	TB010F101	Boron/Su Sistemi Su Debisi
9	SA011S012	Yük. Bas. Türb. Giriş Vanası Kon.	45	TB000F101	Boron/Su Sistemi Boron Debisi
10	SA011S013	Yük. Bas. Türb. Giriş Vanası Kon.	46	RA001P051	İkincil Devre Buhar Basıncı
11	SA011S014	Yük. Bas. Türb. Giriş Vanası Kon.	47	RA002P051	İkincil Devre Buhar Basıncı
12	SF000U801	Yoğ. Devridaim Vanası Kon.	48	RA001F001	İkincil Devre Buhar Debisi
13	SO010Y020	Türbin-Gen. Grubu Devir Say.	49	RA002F001	İkincil Devre Buhar Debisi
14	RM010P001	Yoğuşturucu Pompa Basıncı	50	RA001T001	İkincil Devre B.G. Buhar Sic. (Ç-1)
15	SD011P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-1	51	RA002T001	İkincil Devre B.G. Buhar Sic. (Ç-2)
16	SD012P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-2	52	TA020P002	Bir. D. Hac. Kont. Sist. Tank Bas.
17	SD013P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-3	53	TA020F001	Bir. D. Hac. Kont. Sist. Deb.
18	SD011L001	Kondenser Su Seviyesi-1	54	TA030F001	Bir. D. Hac. Kont. Sist. Deb.
19	SD012L001	Kondenser Su Seviyesi-2	55	TA020L001	Bir. D. Hac. K. Sist. Tank Su Sev.
20	SD013L001	Kondenser Su Seviyesi-3	56	YS000S126	Kont. Çubuğu Pozisyonu L-Bank
21	Kanal 21	Boş	57	YS000S116	Kont. Çubuğu Pozisyonu D-Bank
22	YA001P001	Birincil Pompa Basıncı (Ç-1)	58	RL021F001	Güv. Bes. Suyu Pompası-21 Debisi
23	YA001P002	Birincil Pompa Basıncı (Ç-1)	59	RL022F001	Güv. Bes. Suyu Pompası-22 Debisi
24	YA002P001	Birincil Pompa Basıncı (Ç-2)	60	RL023F001	Güv. Bes. Suyu Pompası-23 Debisi
25	YA002P002	Birincil Pompa Basıncı (Ç-2)	61	RL021P001	Güv. Bes. Suyu Pompası-21 Bas.
26	YA001T001	Birincil Devre Su Sıc. (g+ç)/2 (Ç-1)	62	RL022P001	Güv. Bes. Suyu Pompası-22 Bas.
27	RL050P051	Besleme Suyu Akış Bas. (B.G.-1)	63	RL023P001	Güv. Bes. Suyu Pompası-23 Bas.
28	YA002T001	Birincil Devre Su Sıc. (g+ç)/2 (Ç-2)	64	YB001L001	B.G.-1 Su Seviyesi (dar bant)
29	YA000T101	Birincil Dev. Su Sıc. (g+ç)/2 (Ç-1, 2)	65	YB002L001	B.G.-1 Su Seviyesi (dar bant)
30	YA001T093	Birincil Devre Su Sıc. (Giriş) (Ç-1)	66	YB001L002	B.G.-2 Su Seviyesi (dar bant)
31	YA001T096	Birincil Devre Su Sıc. (Çıkış) (Ç-1)	67	YB002L002	B.G.-2 Su Seviyesi (dar bant)
32	YA002T093	Birincil Devre Su Sıc. (Giriş) (Ç-2)	68	RL040F001	Bes. Suyu Debisi (B.G.-1)
33	YA002T096	Birincil Devre Su Sıc. (Çıkış) (Ç-2)	69	RL050F001	Bes. Suyu Debisi (B.G.-2)
34	YP001L101	Basınçlandırıcı Su Seviyesi	70	RL040P051	Bes. Suyu Akış Basıncı (B.G.-1)
35	Kanal 35	Boş	71	YB001L151	Buhar Generatörü-1 Su Seviyesi

## AC-işaretlerle sensör doğrulama ve durum izleme

Bu kısımda sensör güvenilirliği; sensör cevap zamanındaki değişim ve YSA yaklaşımında da sistemin cevap hatasının bir eşik değere göre karşılaştırılması ile belirlenecektir.

### Sensör cevap zamanının hesaplanması

Nükleer güç reaktörlerinde, yüksek sıcaklık ve basıncın yanı sıra şiddetli radyasyon altında çalışan sensörler zamanla korozyona uğrarlar, malzemenin kafes yapısında çok sayıda dislokasyon meydana gelir, bunun sonucunda sertleşme görülür. Sensörlerin cevap zamanlarının değişip değişmediği kontrol edilerek meydana ge-

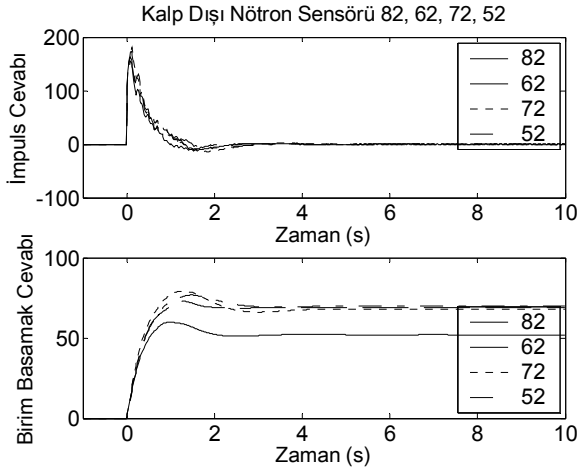
len yapısal değişikliklerin sensörün çalışmasını etkileyip etkilemediği belirlenebilir. Sensörün işaretlerinden impuls ve birim basamak cevaplarını belirlemek için en çok kullanılan yöntem sensör işaretinin bir Öz-Bağlanımlı (AR: Auto-Regressive) modelini yaparak, modelin cevap zamanını belirlemektir. Cevap zamanındaki değişme, sensörde fiziksel bozulmanın işaretidir.

Bir rastgele  $y(t)$  işaretini, işaretin  $t$  anından önce aldığı değerler ve işaretle ilintili olmayan, sabit spektral güç yoğunluklu bir beyaz gürültünün ( $x(t)$ ) kombinasyonu şeklinde ifade etmek mümkündür.  $y$  işareti  $\Delta t$  zaman aralıklarıyla örneklenmiş olsun:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t - i\Delta t) + x(t) \quad (14)$$

şeklinde ifade edilebilir ve bu ifade de Öz-Bağlanımlı Model olarak isimlendirilir. Burada,  $n$  değeri modelin mertebesidir (Thie, 1981). Düşük model mertebeleri yumuşatılmış bir spektral öngörü yapar. Çok yüksek mertebeden modeller spektral öngöründe yapay detayların ortaya çıkmasına sebep olurlar. AR-model mertebesinin arttırılması öngörü hatasının düşmesini sağlar (Mitra ve Kaiser, 1993).

AR-modelinin bir uygulaması olarak EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde kullanılan dört kalp-dışı nötron sensörünün impuls ve birim basamak cevapları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Dört kalp-dışı nötron sensörünün impuls ve birim basamak cevapları

Birim basamak cevabının, maksimum değerinin  $1-e^{-1} = 0.632$  katına ulaşması için gereken süre  $\tau$  "zaman sabiti" olarak tanımlanır. Kalp-dışı nötron sensörleri için zaman sabitleri Tablo 3'te verilmiştir:

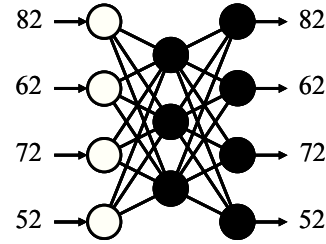
Tablo 3. Kalp-dışı nötron sensörlerinin zaman sabitleri

Kn	Sensör Kodu	Zaman Sabiti $\tau$ (s)
4	YX003X082	0.3054
5	YX003X062	0.3562
6	YX003X072	0.3644
7	YX003X052	0.3945

## Öz-İlişkili YSA yaklaşımı ile sensör doğrulama

Yukarıda cevap zamanları hesaplanan sensörlerin işaretleri, bir sinir ağı üzerinde öz-ilişkili (auto-associative) bir yapıda eğitilerek sensör arızasının belirlenmesi için kullanılabilir.

Kalp kazanı titreşimlerinin hesaplanmasında kullanılan nötron sensörlerinin doğru çalışıp çalışmadıkları kazan titreşimi hesabı yapılmadan önce kontrol edilmelidir. Bunun için bu çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak iki yaklaşım yapılmıştır. İlk yaklaşımda, girişinde ve çıkışında aynı sensör işaretleri olan öz-ilişkili bir YSA kullanılmıştır. Dört nötron sensörü için, gizli tabakasında üç nöron ve çıkış tabakasında dört nöron olan ileri beslemeli bir YSA, Levenberg-Marquardt algoritmasıyla eğitilmiştir. Bu YSA'nın topolojisi Şekil 2'de görülmektedir. Şekilde görülen rakamlar YX003X082, YX003X062, YX003X072 ve YX003X052 kodlu sensörleri göstermektedir.

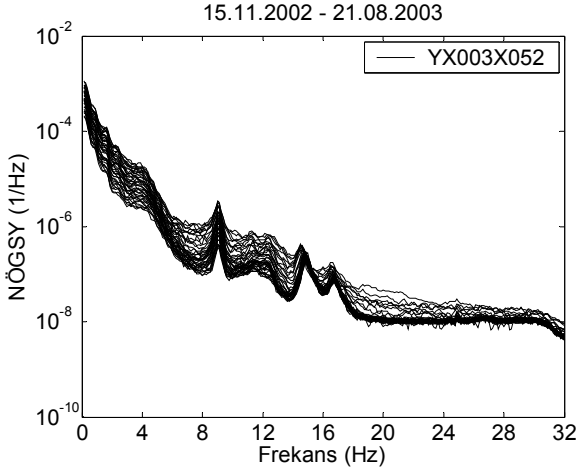


Şekil 2. Dört nötron sensörü için öz-ilişkili YSA topolojisi

Reaktör işletiminde 16.05.2003 tarihinden itibaren YX003X052 kodlu nötron sensörü bozulmuş, sensörün gürültüsü Şekil 3'te verilen spektrumlardan görüldüğü gibi giderek artmaya başlamıştır. Sensörün beyaz gürültü seviyesindeki artış, duyarlılığının azaldığını göstermektedir.

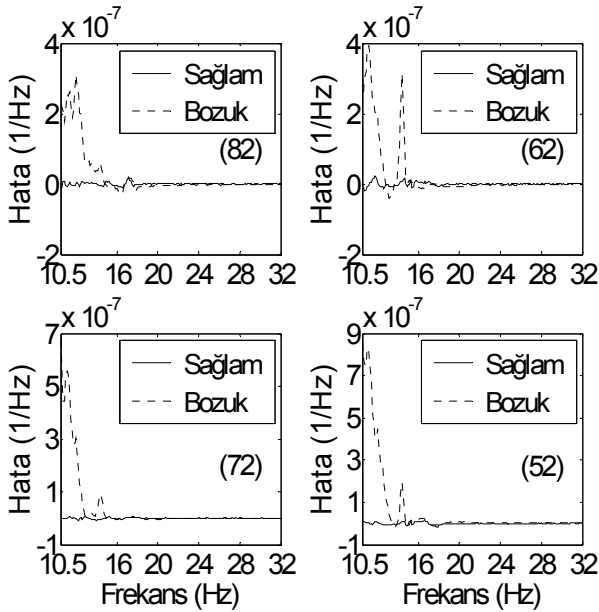
Zaman-tanım bölgesinde nötron sensörlerinin işaret-gürültü oranı çok küçük olduğu (gürültü büyük olduğundan) ve boron konsantrasyonundaki azalmayla birlikte düşük frekanslı gürültü bileşenleri zamanla arttığı için YSA'ları iyi sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle YSA'na nötron sensörlerinin Normalize Öz-Güç Spektral

Yoğunluklarının (NÖGSY) kalp kazanı titreşimlerini ve beyaz gürültüyü kapsayan kısmı (10.5 – 32 Hz arasındaki kısım) öğretilmiştir. Sağlam sensör işaretleriyle eğitilen YSA, içlerinde bozuk sensörün de bulunduğu işaret kümeleriyle deneyerek bozuk sensörler kolayca belirlenmiştir.



Şekil 3. YX003X052 nötron sensörünün frekans bileşenlerinde zamanla görülen değişim

Şekil 4'te dört girişin de sağlam ve bir girişin hatalı olması durumlarında YSA'nın hatası görülmektedir.  $1.-2.10^{-7}$  değerleri arasına konulacak bir eşik sensör hatasını tesbit eder.

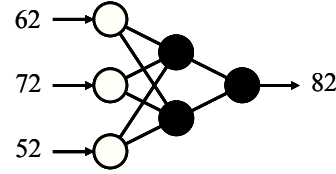


Şekil 4. Sağlam ve arızalı girişler (52 numaralı sensör bozuk) için YSA hatasının değişimi

Ancak öz-ilişkili YSA'daki temel problem, hantanın sensörden mi yoksa sistemden mi kaynaklandığının belirlenememesidir. Bu durumu çözmek bakımından alternatif uygulama Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA yaklaşımının kullanılmasıdır.

### Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA yaklaşımı

Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA yaklaşımında yapay sinir ağı, diğer sensörlerin çıkışlarından bir sensörün çıkışını belirlemek için eğitilir. Bu her sensör için ayrı ayrı yapılır. Dolayısıyla ÇGTÇ sistemi sensör sayısı kadar sinir ağına sahiptir. Her sinir ağının, toplam sensör sayısından bir eksik sayıda girişi vardır. Çıkış tabakasında bir nöron bulunur. Sinir ağlarının her biri bir gizli tabakaya sahiptir. Bu çalışmada dört nötron sensörü bulunduğu dört girişli, gizli tabakasında iki nöron ve çıkışında bir nöron olan ileri beslemeli dört yapay sinir ağı Levenberg-Marquardt algoritmasıyla eğitilmiştir. Kullanılan YSA topolojisi Şekil 5'de görülmektedir.

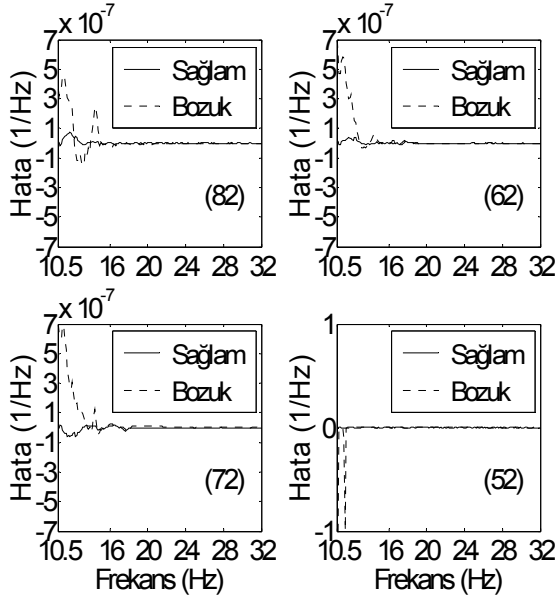


Şekil 5. ÇGTÇ-YSA topolojisi

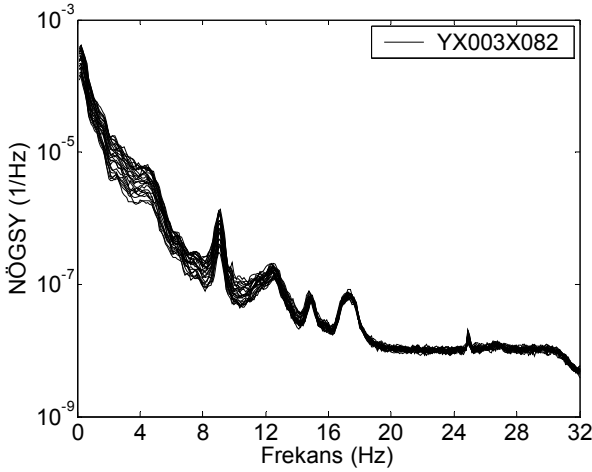
Şekil 6'da sağlam sensör işaretleriyle eğitilen ÇGTÇ-YSA'nın girişlerine arızalı sensör işareti verildiği zaman hataların büyüdüğü görülmektedir.  $(-2.10^{-7} - 2.10^{-7})$  aralığı bir eşik olarak alınrsa sensör hatası tesbit edilir.

### EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali kalp kazanı titreşim analizi

15.11.2002 – 09.05.2003 tarihleri arasında, EPZ Borssele Nükleer Güç Santralının YX003X082 kodlu kalp-dışı nötron detektörünün birer hafta arayla NÖGSY'nun boron konsantrasyonu ile birlikte değişimi Şekil 7'de görülmektedir. 8 – 10.5 Hz arasında görülen, birincil devre soğutma suyunun kalp kazanına çarpmasından kaynaklanan ve bütün sistem üzerinde global olarak görülen reaktivite salınımı Borssele Reaktöründe maksimum değerini 9.2 Hz'de alır.



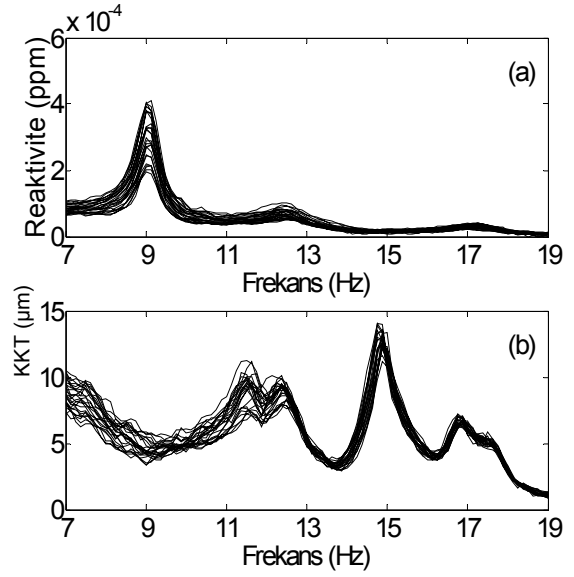
Şekil 6. Sağlam ve arızalı girişler için YSA hatasının değişimi



Şekil 7. Nötron sensörlerinde, boron konsantrasyonundaki azalmayla gürültüde görülen artış

10.5 – 19 Hz arasında kalp kazanı titreşimlerine ait bileşenler görülmektedir. 19 Hz'den sonra nötron sensörlerinde bilgi yoktur. 25 Hz'de görülen tepe birincil devre pompasının dönüş hızından kaynaklanmaktadır. 30 Hz'de bulunan birinci mertebeden analog alçak geçiren filtrenin etkisi 30 – 32 Hz arasında görülmektedir.

Şekil 8(a)'da ayrılmış reaktivite bileşeni görülmektedir. Borssele reaktörünün kontrolünde yanıcı zehir olarak boron kullanıldığından reaktör



Şekil 8. (a) Boron konsantrasyonunda azalmayla reaktivite gürültüsünde görülen artış (b) Kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri

suyundaki boron azaldıkça reaktivitedeki gürültü de artar. Boron miktarıyla gürültü arasında lineer bir ilişki olduğundan reaktivitenin enerjisi hesaplanarak boron miktarı belirlenebilir.

Şekil 8(b)'de kalp kazanı titreşimleri görülmektedir. Borssele reaktöründe kalp kazanı titreşimleri en yüksek genlik değerlerini 15 Hz'de almaktadır ve genlikleri 15 µm'yi geçmemektedir (Barutçu vd., 2003a; 2003b).

Reaktör tam güçte çalışırken titreşim genliklerinde değişme görülürse, bu kalp kazanı civatalarında probleme işaret eder. Kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri büyürse yakıt zarflarının zarar görmesi olasılığı doğar. Bu nedenle kalp kazanı titreşimlerinin genliklerindeki değişimlerin sürekli izlenmesi gerekir. Genliklerin yanında titreşimin fazı da önemlidir. Faz açısında değişme de civatalarda probleme işaret eder.

## DC-ışaretlerde sensör doğrulama

### DC-ışaretlerde Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA yaklaşımı ile sensör doğrulama

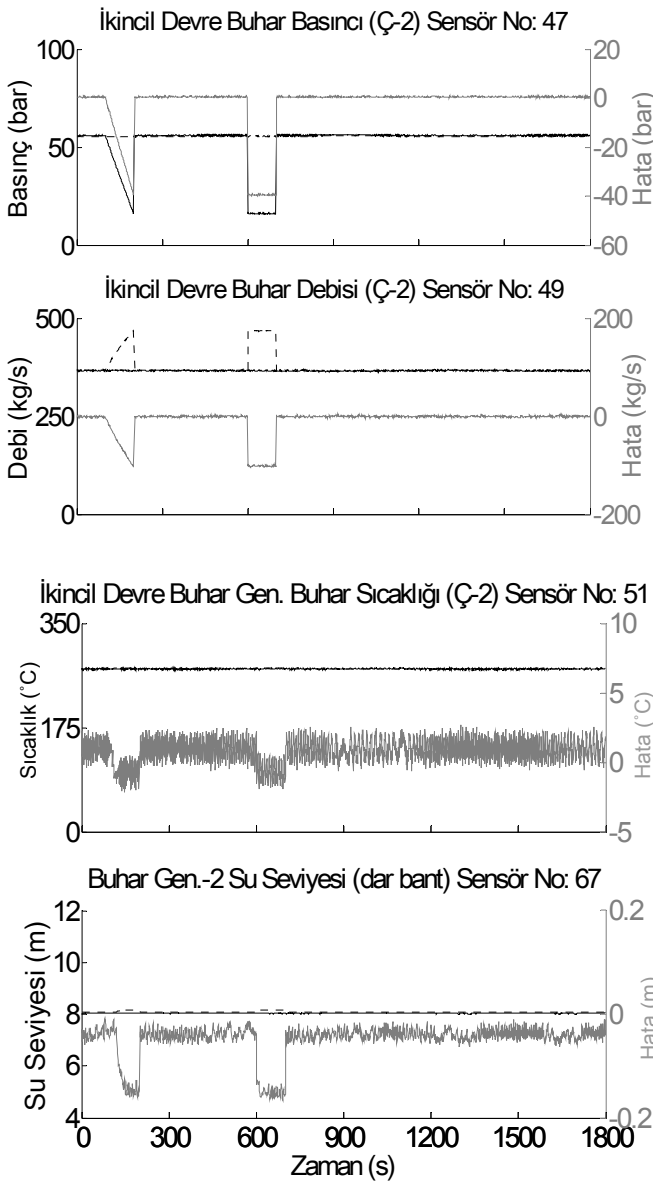
Bu bölümde MR-Panelinden seçilen, reaktörün işletimi için önemli büyüklükleri ölçen 16 sensörün işaretleri için, her biri 15 girişli, gizli tabakasında altı ve çıkış tabakasında bir nöron



bulunan 16 adet ileri-beslemeli ÇGTÇ-YSA Levenberg - Marquardt algoritmasıyla eğitilmiştir. MR-Panelinden seçilen işaretler Tablo 2’de verilen 26, 28, 40, 41, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 64, 65, 66, 67, 68, 69 numaralı sensörlere aittir.

47 numaralı RA002P051 İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2) sensörünün işaretine rampa biçiminde düşüş ve kare dalga biçiminde düşüş hataları eklenerek YSA’ları denenmiştir.

Şekil 9’da seçilen dört ÇGTÇ-YSA’nın cevapları görülmektedir:



Şekil 9. Seçilen dört ÇGTÇ-YSA’nın cevapları

Şekil 9’da düz siyah çizgi sensörün işaretini, noktali siyah çizgi YSA’nın cevabını ve düz gri çizgi de hatayı göstermektedir. Sensör işareti ve YSA’nın cevabı sol eksen, hata sağ eksen verilmiştir.

ÇGTÇ-YSA’larına gelen girişlerden birinin hatalı olması durumunda hatalı sensörü öğrenen YSA dışında bütün YSA’larının bir girişine hatalı işaret gelir (ele alınan durumda 15 YSA’nın birer girişi hatalıdır). Bu durumda bu YSA’larının çıkışları da hatalı olur. Hatalı sensörü öğrenmiş olan YSA ise girişleri doğru olduğu için, çıkışında hatalı sensörün normalde vermesi gereken çıkışı verir.

ÇGTÇ-YSA’ları sayesinde sensör kökenli anomaliler tesbit edilebilmektedir.

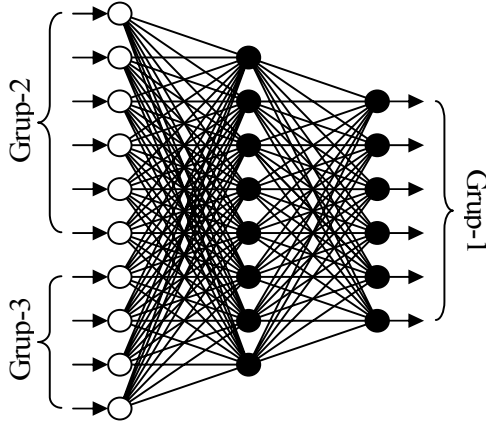
### DC-ışaretlerde Çok Girişli Çok Çıkışlı YSA yaklaşımıyla sensör doğrulama

Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) Yapay Sinir Ağlarında seçilen işaretler ait oldukları büyüklüklerin fiziksel ilişkilerine göre gruplara ayrılırlar. Her bir grup diğer grupların giriş olarak verildiği bir yapay sinir ağına öğretilir. Dolayısıyla grup sayısı kadar sinir ağı vardır (Türkcan ve Versteegh, 1998).

Bu çalışmada MR-Paneli’nden seçilen 16 işaret altı, altı ve dört işareten oluşan üç gruba ayrılmıştır. Birinci grup Buhar Generatörü-1’e ait işaretleri, ikinci grup Buhar Generatörü-2’ye ait işaretleri üçüncü grup da reaktör kalbinden alınan işaretleri içermektedir. Buhar Generatörü-1’e ait işaretler: 46, 48, 50, 64, 65, 68; Buhar Generatörü-2’ye ait işaretler: 47, 49, 51, 66, 67, 69 ve reaktör kalbine ait işaretler: 26, 28, 40, 41 olarak seçilmiştir (Tablo 2).

Kullanılan YSA’larının topolojisi Şekil 10’da görülmektedir.

ÇGÇÇ-YSA-1’in girişinde 2. ve 3. gruplar, gizli tabakasında sekiz nöron ve çıkışında da 1. grup bulunmaktadır. Grup sıraları değiştirilerek farklı YSA topolojileri oluşturulabilir. İleri-beslemeli YSA Levenberg - Marquardt algoritmasıyla eğitilmiştir.



Şekil 10. ÇGÇÇ-YSA topolojisi

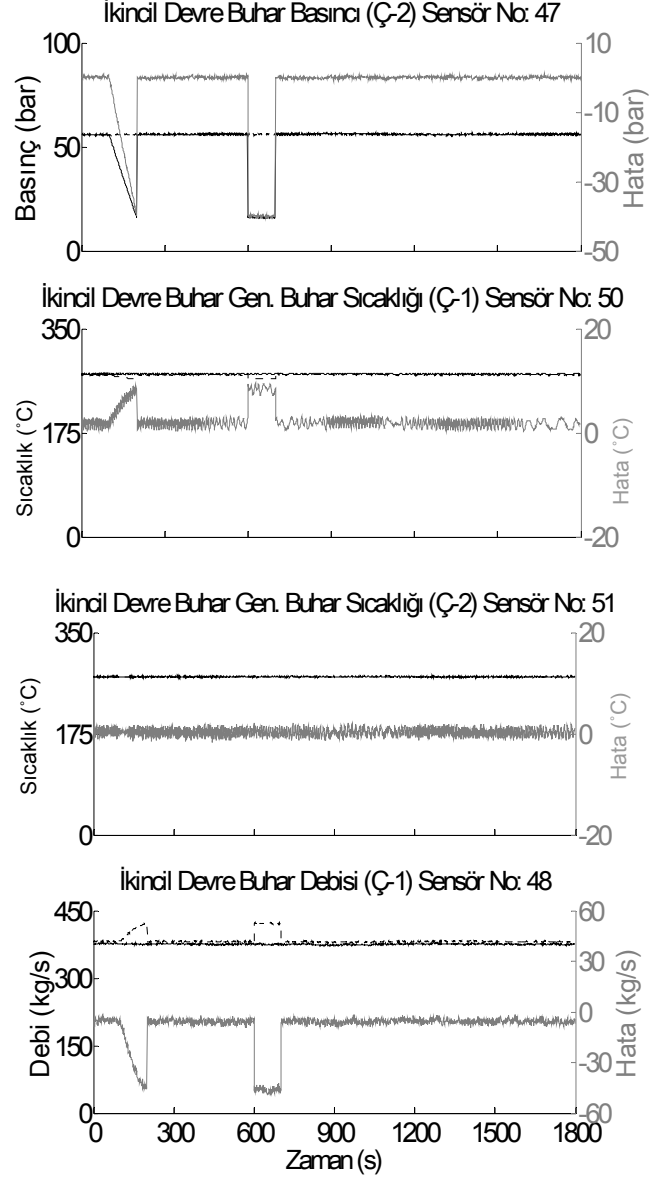
Şekil 11’de ÇGÇÇ-YSA’larının cevaplarından dördü görülmektedir. Düz siyah çizgi sensörün işaretini, noktali siyah çizgi YSA’nın cevabını ve düz gri çizgi de hatayı göstermektedir. Sensör işareti ve YSA’nın cevabı sol eksen, hata sağ eksen verilmektedir. Girişinde hatalı işaret bulunmayan ÇGÇÇ-YSA-2’ye ait İkincil Devre Buhar Generatörü Buhar Sıcaklığı (Çevrim-2) hariç üç kanalda da hata belirgin bir şekilde görülmektedir.

YSA modelleri, farklı işaret grubu kombinasyonları için üç ÇGÇÇ-YSA ile gerçekleştirilmiştir. Bu anlamda, iki buhar generatöründen ve reaktör kalbinden seçilmiş olan işaretler üç grup olarak toplanmıştır. Sistemin bir bileşeninde meydana gelen bir arıza (örneğin bir buhar generatöründe) durumunda bu bileşenden gelen işaretlerin tümünde normal olmayan değişimler görülecektir. Bu durumda bu bileşeni öğrenen YSA hariç diğer YSA’larının girişine hatalı işaretler gelecektir. Bu bileşeni öğrenen YSA ise bileşenin sensörlerinin normalde göstermesi gereken değerleri gösterecektir. Bu özelliklerinden dolayı ÇGÇÇ-YSA’larıyla bileşen kökenli hata tesbiti yapılabilmektedir.

### DC-işaretlerde gerçek zamanda anormal durum belirleme

DC-işaretlerle anormal durum belirlemede kullanılabilir etkin bir metot dalgacık analiziyle gürültüden arındırmadır. Bu amaçla literatürde kullanılan Kalman filtreleme metoduyla anormal durum belirlemesine alternatif olarak, dal-

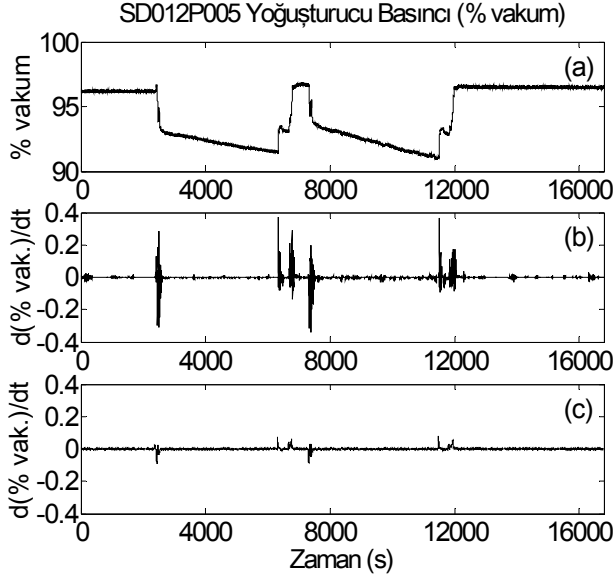
gacık analiziyle anormal durum belirlemesi metodu bu çalışmayla öngörülmüştür. Bu bağlamda dalgacık analizi ve Kalman filtreleme yöntemlerinin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılması olarak sunulmuştur.



Şekil 11. ÇGÇÇ-YSA’larının hatalı işaret cevaplarından dördü

### Kalman Filtresi ve Dalgacık Analizi sonuçları

Şekil 12’de EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali’nin “rinsing” işlemi sırasında, örnek olarak seçilen yoğunlaştırıcı basınç (% vakum) sensörünün işareti üzerinde, dalgacık analizi ve Kalman filtresi ile elde edilen sonuçların aynı ölçekte karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 12. (a) Yoğuşturucu basıncı, (b) Dalgacık analizi ve (c) Kalman filtresi sonuçlarının karşılaştırılması

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işaret işleme sisteminden seçilen, reaktörün birincil ve ikincil devrelerine ait nötron akısı, basınç, debi, sıcaklık, güç büyüklüklerini ölçen çeşitli sensörlerin işaretleri üzerinde dalgacık analizi ve Kalman filtresi uygulamasıyla yapılan çalışmalarda, dalgacık analizi uygulamasının işaret gürültü oranının ( $IGO_D = 25.8$  dB) Kalman filtresininkinden ( $IGO_K = 22.1$  dB) daha büyük olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla dalgacık analizi yöntemi, anormal durumların belirlenmesinde daha etkin bir metottur.

### Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmadaki temel amaç Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin (NGS) yeni veri toplama sisteminde kullanılan sensörlerin doğrulanması, santral genelinde sensör hatası ve işletimden kaynaklanan anormal durumların belirlenmesi için etkin olarak kullanılacak çeşitli metotların incelenmesi ve bu amaca yönelik yeni yöntemlerin önerilmesidir.

Bu tez çalışmasında kullanılan veriler EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nden İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ndeki Elektrikte Nükleer Güç Laboratuvarına internet üzerinden, gönderilmektedir.

Bu veriler laboratuvarında işlenip elde edilen sonuçlar, Borssele Nükleer Güç Santrali ile ikili ilişkiler kapsamında yine bu santrale geri gönderilmektedir.

NGS'nin MS ve MR-Panellerinin işaretleri kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar, ayrı bölümlerde ele alınmıştır.

MS-Paneli işaretleriyle sensör doğruluğu ve durum izlemesi için bütün sensör tiplerinin (ısı çift, nötron sensörü, basınç sensörü) öz-bağımlı (auto-regressive) model yaklaşımıyla sensör cevap zamanları hesaplanıp bu yolla sensör güvenilirliği izlenmiştir. Kalp-dışı nötron detektörlerinin öz-ilişkili (auto-associative) YSA ve Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA ile sağlanması yapılmış, ÇGTÇ-YSA'ların öz-ilişkili YSA'larından daha çok bilgi sağladığı gösterilmiştir. Daha sonra, doğrulukları belirlenmiş bu sensörlerin işaretleri kullanılarak; birincil devre suyunun kalp kazanına çarpmasından doğan global reaktivite etkisi kalp kazanı titreşimlerinden ayrıştırılmış, kalp kazanı titreşimlerinin genlik ve doğrultuları belirlenmiştir. Borssele NGS'nda kalp kazanı titreşimlerinin maksimum değerlerini 15 Hz'de aldığı ve genliklerinin 15  $\mu\text{m}$ 'yi geçmediği gösterilmiştir. Santral operatörlerinin efektif olarak kullanabileceği bir izleme sistemi oluşturulmuştur. Bu anlamda ölçme sistemine entegre olmuş, gerçek zamanda çalışan yazılımlar oluşturularak, bunların pratikte kullanımı da sağlanmıştır.

MR-Panelinden seçilen DC-işaretlerle ÇGTÇ-YSA'ları kullanılarak sensör doğrulanması yapılmıştır. Daha sonra bu işaretler, aralarındaki fiziksel ilişkilere göre gruplanarak ÇGTÇ-YSA'ları ile sistem genelinde bileşen bazında doğrulama yapılmıştır.

MR-Panelinin DC-işaretlerinden gerçek zamanda, çevrim-içi anormal durum belirlemesi yapmak amacıyla literatürde kullanılan Kalman filtresi uygulamasına alternatif olarak dalgacık analizi tabanlı yeni bir metot önerilmiştir. Santral genelinde çeşitli sensörlerin işaretleri üzerinde Kalman filtresi ve dalgacık analizi uygulamasıyla yapılan çalışmalarda, dalgacık

analizi uygulamasında elde edilen sonuçların işaret gürültü oranlarının, Kalman filtresiyle elde edilen sonuçlardan daha büyük olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla önerilen dalgacık analizi tabanlı metodun anormal durumların belirlenmesinde daha etkin bir yol olduğu gösterilmiştir.

Gelecekteki çalışmalar bakımından da santral genelinde sensör ve sistem kökenli hataların tespiti için YSA tabanlı izleme sistemleri kullanılabilir. Kalp kazanı titreşimleri çevrim-içi olarak sürekli hesaplanıp genliklerinde ve doğrultularında değişme olup olmadığı gözlemlenebilir. Ayrıca tüm santral ölçeğinde geliştirilecek akıllı izleme sistemleri, santralin yerel ağı üzerinde çalıştırılarak; yüksek güvenilirlikli, geniş ölçekli akıllı durum izleme ve arıza belirleme sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanınabilecektir.

### Kısaltmalar

ADC	:Analog Digital Çevirici
AR	:Auto-Regressive (Öz-Bağlanımlı)
Ç	:Çevrim
ÇÇA	:Çok Çözünürlüklü Analiz
ÇÇDA	:Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi
ÇGÇÇ-YSA	:Çok Girişli Çok Çıkışlı YSA
ÇGTÇ-YSA	:Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA
MR-Panelli	:Koşullandırılmamış İşaretler Paneli
MS-Panelli	:Koşullandırılmış İşaretler Paneli
NGS	:Nükleer Güç Santrali
NÖGSY	:Normalize Öz-Güç Spektral Yoğunluğu
PWR	:Pressurized Water Reactor (Basınçlı Sulu Reaktör)
sy	:Saat Yönünde
vak.	:Vakum
YSA	:Yapay Sinir Ağı

### Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan deneysel verilerin sağlandığı Hollanda'nın EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali yetkililerine teşekkürlerini sunarlar.

### Kaynaklar

- Barutçu, B., Şeker, S., Ayaz, E. ve Türkcan, E., (2003a). Real Time Reactor Noise Diagnostics for the Borssele (PWR) Nuclear Power Plant, *Progress in Nuclear Energy*, **43**, 1-4, 137-143.
- Barutçu, B., Türkcan, E., Şeker, S. ve Ayaz, E., (2003b). On-Line Identification of the Nuclear Power Plant Physical Parameters at Power Operation, *Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2003*, Bursa, Turkey, 3-7 December 2003, **2**, 158-162.
- Beale, R. ve Jackson, T., (1990). *Neural Computing: An Introduction*, Adam Hilger Publishing. Ltd., GB.
- Haykin, S., (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall Inc., GB.
- Mallat, S., (1989) A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**, 7, 674-693.
- Mitra, S.K. ve Kaiser, J.F., eds. (1993). *Handbook for Digital Signal Processing*, John Wiley & Sons, New York.
- Morgenstern, V.M., Upadhyaya, B.R. ve Glockler, O., (1988a). Signal Anomaly Detection and Characterization, Topical Report, DOE/NE/37959-18.
- Morgenstern, V.M., Upadhyaya, B.R. ve Benedetti, M., (1988b). Signal Anomaly Detection Using Modified CUSUM Method, *IEEE Proceedings 27<sup>th</sup> Conference on Decision and Control*, 2340-2341. Austin, Texas, USA.
- Peeters, T.T.J.M., Çiftçioğlu, Ö. ve Türkcan, E., (1991). An Innovations-Based Method for DC Signal Failure Detection Application to NPP, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-RX--91-043, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.
- Thie, J.A., (1981). *Power Reactor Noise*, American Nuclear Society, Illinois, USA.
- Türkcan, E. ve Versteegh, J.G.E., (1998). Neural Network Training by Extended Kalman Filtering for Detection of Signal/System Failures, *Maintenance and Reliability Conference MARCON 98*, Knoxville, Tennessee, USA, May 1998, 66.01-66.13.