

151332

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**NÜKLEER GÜÇ REAKTÖRLERİNDE
SENSÖR GÜVENİLİRLİĞİNİN
REAKTÖR İŞLETİMİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Burak BARUTÇU
Enstitü No: 302972003

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ekim 2004

Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Melih GEÇKİNLİ

Prof.Dr. Hasan SAYGIN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Yorgo İSTEFANOPULOS (B.Ü.)

Doç.Dr. Akif ATALAY (İ.T.Ü.)

Melih Geçkinli
H. Saygin
A. Kayran

Yorgo İstefanopulos
Akif Atalay

22.04.2005

EKİM 2004

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, tamamlandığını göremeden vefat eden tez danışmanım sayın Prof. Dr. Hasbi YAVUZ'un aziz hatırasına ithaf edilmiştir.

Prof. Dr. Hasbi YAVUZ'un 26.02.2004 tarihinde vefatı üzerine tez danışmanlığımı üstlenen sayın Prof. Dr. Melih GEÇKİNLİ'ye, ikinci tez danışmanlığımı yürüten sayın Prof. Dr. Serhat ŞEKER'e, Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali ile bağlantımı sağlayan ve gürültü analizi konusunda yardımlarını esirgemeyen sayın Erdiç TÜRKCAN'a, Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santralının Bakım Bölümü Başkanı sayın Paul STOK'a ve aynı departmandan sayın Jan BREVOORD'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Nisan 2004

Burak BARUTÇU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. EPZ BORSSELE NÜKLEER GÜÇ SANTRALI VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ	15
2.1. EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali	15
2.2. EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali Veri Toplama Sistemi	17
2.2.1. MS-Panelli	18
2.2.2. MR-Panelli	24
3. AC-İŞARETLERLE SENSÖR DOĞRULAMA VE DURUM İZLEME	27
3.1. Sensör Cevap Zamanı Tayini ile Sensör Doğrulama	27
3.1.1. Öz-Bağılanımlı (Auto-Regressive: AR) Model	27
3.1.2. Öz-Bağılanımlı Modelle Sensör Cevap Zamanlarının Belirlenmesi	29
3.2. Yapay Sinir Ağlarıyla Nötron Sensörlerinin Doğrulanması	31
3.2.1. Boron Konsantrasyonu – Reaktivite İlişkisi	31
3.2.2. Öz-İlişkili (Auto-Associative) YSA Yaklaşımı	33
3.2.3. Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA Yaklaşımı	35
3.3. Kalp Kazanı Titreşimleri ile Durum İzleme	38
3.3.1. EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali Kalp Kazanı Titreşim Analizi	48
4. DC-İŞARETLERDE SENSÖR DOĞRULAMA	51
4.1. DC-İşaretlerde Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA Yaklaşımıyla Sensör Doğrulama	51
4.2. DC-İşaretlerde Çok Girişli Çok Çıkışlı YSA Yaklaşımıyla Sensör Doğrulama	54
4.3. DC-İşaretlerde ÇGTÇ ve ÇGÇÇ-YSA Yaklaşımları ile Sensör Doğrulama Üzerine Yorumlar	60
5. DC-İŞARETLERDE GERÇEK ZAMANDA ÇEVİRİM-İÇİ ANORMAL DURUM BELİRLEME	61
5.1. Kalman Filtresi Uygulaması	63

5.2. Dalgacık Analizi Uygulaması	64
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	70
EKLER	76
ÖZGEÇMİŞ	88



KISALTMALAR

AB	: Alçak Basınç
ABK	: Akaike Bilgi Kriteri
Ad	: Alt Değer
ADC	: Analog Digital Çevirici
AG	: Alçak Geçiren (Filtre)
AR	: Auto-Regressive (Öz-bağlanımlı)
BG	: Buhar Generatörü
CUSUM	: Cumulative Sum Test
ç	: Çıkış
ÇGÇÇ	: Çok Girişli Çok Çıkışlı (YSA)
ÇGSY	: Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu
ÇGTÇ	: Çok Girişli Tek Çıkışlı (YSA)
ECN	: Energieonderzoek Centrum Nederland
EPZ	: Electriciteits-Produktiemaatschappij Zuid-Nederland
FFT	: Fast Fourier Transform
g	: Giriş
İm	: İmaginer
İGO	: İşaret Gürültü Oranı
K	: Kuvvetlendirici
KCB	: Kerncentrale Borssele
KF	: Kalman Filtresi
K _n	: Kanal No.
NÖGSY	: Normalize Öz Güç Spektral Yoğunluğu
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
ÖGSY	: Öz Güç Spektral Yoğunluğu
PPS	: Santral İzleme Sistemi
PWR	: Pressurized Water Reactor (Basınçlı Sulu Reaktör)
Re	: Reel
SBK	: Schwarz Bilgi Kriteri
SÖH	: Son Öngörü Hatası
sy	: Saat yönü
Üd	: Üst Değer
YB	: Yüksek Basınç
YG	: Yüksek Geçiren (Filtre)
YSA	: Yapay Sinir Ağı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 2.1 : MS-Panelli İşaret Listesi (ADC çalışma aralığı +10/-10 V)	19
Tablo 2.2 : MR-Panelli İşaret Listesi (ADC çalışma aralığı 0/5 V)	24
Tablo 3.1 : Kalp-dışı nötron sensörlerinin zaman sabitleri	30
Tablo 3.2 : Isıl-çiftlerin zaman sabitleri	30
Tablo 3.3 : Basınç sensörlerinin zaman sabitleri	31
Tablo 3.4 : Literatürde verilen μ değerleri	40
Tablo 4.1 : ÇGTÇ-YSA uygulaması için MR-Panelinden seçilen işaretler	51
Tablo 4.2a : Birinci Grup: Buhar Generatörü-1'e ait işaretler	54
Tablo 4.2b : İkinci Grup: Buhar Generatörü-2'ye ait işaretler	54
Tablo 4.2c : Üçüncü Grup: Reaktör Kalbine ait işaretler	55

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 2.1 : EPZ Borssele Nükleer Güç Santralının prensip şeması	16
Şekil 2.2 : EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işaret işleme sistemi	18
Şekil 2.3 : MS-Panelli işaret koşullandırma devresi prensip şeması	18
Şekil 2.4 : Kalp-dışı nötron kanallarının NÖGSY'ları	21
Şekil 2.5 : Kalp-içi nötron kanallarının NÖGSY'ları	22
Şekil 2.6 : Birincil devre pompaları üzerindeki basınç sensörlerinin ÖGSY'ları	23
Şekil 2.7 : Birincil Devre Pompası-1 üzerinde bulunan titreşim sensörlerinin ÖGSY'ları	23
Şekil 2.8 : Birincil Devre Pompası-2 üzerinde bulunan titreşim sensörlerinin ÖGSY'ları	24
Şekil 3.1 : Kalp-dışı nötron sensörlerinin impuls ve birim basamak cevapları ...	29
Şekil 3.2 : Isıl-çift impuls ve birim basamak cevapları	30
Şekil 3.3 : Basınç sensörü impuls ve birim basamak cevapları	31
Şekil 3.4 : Boron konsantrasyonunda azalmayla nötronik gürültüdeki artış	32
Şekil 3.5 : Boron konsantrasyonunda azalmayla nötronik gürültü enerjisindeki artış	32
Şekil 3.6 : Öz-İlişkili YSA topolojisi	33
Şekil 3.7 : YX003X052 sensörünün frekans bileşenlerindeki aşamalı değişim	34
Şekil 3.8 : Sağlam sensörlerden oluşan deneme kümesiyle YSA'nın sınanması	34
Şekil 3.9 : Sağlam ve arızalı girişler için YSA hatasının değişimi	35
Şekil 3.10 : ÇGTÇ yapay sinir ağları	36
Şekil 3.11 : ÇGTÇ-YSA'larının sağlam girişler için nötron sensörlerinin NÖGSY'larını simüle etmesi	37
Şekil 3.12 : Sağlam ve arızalı girişler için YSA hatasının değişimi	37
Şekil 3.13 : Reaktör kalp kazanı ve basınç kabı	38
Şekil 3.14 : Nötron detektörlerinin kalp kazanına göre konumları	41
Şekil 3.15 : Nötron detektörleri ve kalp kazanı titreşim doğrultusu	41
Şekil 3.16 : NÖGSY'unda boron konsantrasyonundaki azalmayla görülen aşamalı değişim	48
Şekil 3.17 : Boron konsantrasyonunda azalmayla reaktivite gürültüsünde görülen artış ve kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri	49
Şekil 3.18 : Kalp kazanı titreşimlerinin fazları	50
Şekil 4.1a : ÇGTÇ-YSA 1-6'nın hatalı giriş işaretine cevapları	52
Şekil 4.1b : ÇGTÇ-YSA 7-12'nin hatalı giriş işaretine cevapları	52
Şekil 4.1c : ÇGTÇ-YSA 13-16'nın hatalı giriş işaretine cevapları	53
Şekil 4.2a : ÇGÇÇ-YSA-1	55
Şekil 4.2b : ÇGÇÇ-YSA-2	56
Şekil 4.2c : ÇGÇÇ-YSA-3	57
Şekil 4.3 : ÇGÇÇ-YSA-1'in hatalı işaret cevabı	58
Şekil 4.4 : ÇGÇÇ-YSA-2'nin hatalı işaret cevabı	58
Şekil 4.5 : ÇGÇÇ-YSA-3'ün hatalı işaret cevabı	59

Şekil 5.1	: Dalgacık analiziyle gürültüden arındırma işlemi	62
Şekil 5.2	: Dalgacık analizi programının gerçek zamanda çevrim-içi çalışması	63
Şekil 5.3	: Kalman filtresiyle DC-işaretle çevrim içi anomali deteksiyonu	64
Şekil 5.4	: Dalgacık analiziyle DC-işaretle çevrim içi anomali deteksiyonu	65
Şekil 5.5	: Kalman filtresi ve Dalgacık analizi sonuçlarının karşılaştırılması	65
Şekil B.1	: Ayrık zaman sistemi	80
Şekil B.2	: z_1 , z_2 ve μ konumlarının olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi	83
Şekil C.1	: $c_0(n)$ 'nin iki ölçeğe ayrıştırılması	87



SEMBOL LİSTESİ

δr	: Global Reaktivite Etkisi
δx^ℓ	: θ^ℓ Doğrultusundaki Toplam Gürültü
$\delta \eta^\ell$	: θ^ℓ Doğrultusundaki Kalp Kazanı Titreşimi
η	: Kalp Kazanıyla Basınç Kabı Arasındaki Mesafe
μ	: Makroskobik Tesir Kesiti
ρ	: Yoğunluk
σ	: Standart Sapma
$\hat{\sigma}_x^2$	: Öngörü Hatası Varyansı
τ	: Zaman Sabiti
C	: Katsayılar Matrisi
D_i, D_j	: Nötron Detektörü
F	: Çevirme Faktörü
i	: Detektör Akımı
K_1, K_2	: Kazanç
$k_{c^T c}$	: $C^T C$ Matrisinin Kondisyon Sayısı
K_t	: Toplam Kazanç
KKT	: Kalp Kazanı Titreşimi
U	: Gerilim
N	: Örneklenen İşaret Sayısı
N_0	: Avagadro Sayısı
n	: Model Mertebesi
$P_{xx}, P_{rr}, P_{\eta\eta}^\ell$	: Öz Güç Spektral Yoğunluğu
$P_{x_i x_j}, P_{\eta\eta}^\ell, P_{r\eta}^\ell$	: Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu
Q	: Sistem Gürültüsü
R	: Ölçme Gürültüsü
REA	: Reaktivite
T^ℓ	: Transfer Fonksiyonu
thr	: Eşik Değeri
W	: Ağırlıklar Matrisi

NÜKLEER GÜÇ SANTRALLARINDA SENSÖR GÜVENİRLİĞİNİN SANTRAL İŞLETİMİNE ETKİLERİ

ÖZET

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

15.7.2001 - 15.12.2001 tarihleri arasında 5 ay süreyle Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde tarafımdan, tez çalışmasına yönelik bilimsel araştırma ve çalışmalarda bulunulmuştur. Tezde kullanılan veriler Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nden elde edilmiştir.

Ön işleminden geçirilmiş sensör işaretleri (AC-işaretler) kullanılarak; sensör doğrulama için öz-bağımlı (auto-regressive) model ile sensör cevap zamanı belirlenmesi, öz-ilişkili (auto-associative) yapay sinir ağı ve çok girişli tek çıkışlı yapay sinir ağı ile kalp dışı nötron sensörlerinin doğrulanması, her iki yapay sinir ağının karşılaştırılması ve bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri üzerinden yapılan analizlerle kalp kazanı titreşimlerinin belirlenmesi yoluyla durum izlemesi gerçekleştirilmiş, EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali için kalp kazanı titreşim analizi yapılmıştır.

Santraldan doğrudan gelen sensör işaretleri (DC-işaretler) üzerinde çok girişli tek çıkışlı yapay sinir ağı yaklaşımı ile sensör doğrulama çalışması yapıldıktan sonra bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri kullanılarak çok girişli çok çıkışlı yapay sinir ağı ile bileşen bazında doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca DC-işaretlerle, gerçek zamanda çevrim-içi anormal durum belirleme ele alınmış, 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.

THE EFFECT OF SENSOR RELIABILITY ON REACTOR OPERATION IN NUCLEAR POWER PLANTS

SUMMARY

In this study several effective methods were studied for validation & verification of The Netherlands EPZ Borssele Nuclear Power Plant's new data acquisition system sensors, plant wide sensor fault and operational anomaly detection and new methods were presented for this purpose.

A research study as a part of this thesis has been done in EPZ Borssele NPP between the dates of 15 July to 15 December 2001. The data used in this thesis were taken from the EPZ Borssele Nuclear Power Plant.

Sensor response times were determined using auto-regressive model on pre-processed sensor signals (AC-signals) for sensor validation. Auto-associative artificial neural networks and multi input single output artificial neural networks were used for ex-core neutron sensors verification. Core barrel motion analyses have been done for EPZ Borssele Nuclear Power Plant by using the validated signals for condition monitoring purpose.

After the generation of validation process using a multi-input single-output neural network approach on the sensor signals coming from the plant, a component based validation study was generated by a multi-input multi-output neural network using these validated sensor signals.

A study on real-time on-line anomaly detection by DC-signals has been output, and a new wavelet analysis based method as an alternative to a widely used classical Kalman Filtering based method has been recommended. The superiority of the wavelet based detection method to the former Kalman Filtering based method has been shown in this study.

GİRİŞ

Nükleer güç reaktörlerinde U^{235} 'in termal nötron yutarak fisyonu uğraması sonucu ortaya çıkan fisyon fragmanları, nötron, α ve β parçacıkları ortam içinde durdurulurken kinetik enerjilerinin ısıya dönüşmesi yoluyla ısı üretilir. Bu ısıyı dışarı taşımak için (aynı zamanda moderatör olarak) çoğu reaktörde su kullanılır. Dünyada en çok kullanılan reaktör tipi olan Basıncılı Sulu Reaktörlerde (PWR: Pressurized Water Reactor) suyun kaynamasına izin verilmez. Bunun için reaktör kalbi basınç altında tutulur. PWR'lerde birincil devre suyunun kalbe giriş sıcaklığı 290 – 300 °C, çıkış sıcaklığı ise 320 – 330 °C civarındadır. Basıncı ise 150 – 160 bar'lar civarında tutulur. Birincil devre suyu birincil devre pompaları yardımıyla (1956 – 1970 yılları arasında yapılan reaktörlerde iki tane birincil devre pompası bulunur, daha sonra geliştirilmiş -Siemens EPR gibi- reaktörlerde dört birincil devre pompası kullanılmaya başlanmıştır. SSCB'de yapılan PWR'lerde ise daha düşük kapasiteli altı pompa kullanılmaktadır) reaktör kalbinden geçirilerek aldığı ısıyı ikincil devre suyuna aktarmak için ısı değiştiriciye taşınır. Dolayısıyla bir nükleer güç reaktöründe ölçülmesi ve gözlenmesi gereken en önemli fiziksel büyüklükler: Nötron akısı, yakıt sıcaklığı, soğutucu sıcaklığı, soğutucu basıncı, soğutucu debisi ve pompa titreşimleri olarak sayılabilir. Bunların dışında kalp kazanı titreşimlerinin maksimum genliği gibi bazı özel değerler de reaktör güvenliği açısından önem taşımaktadır.

Nükleer güç reaktörlerinde işaretlerin ölçümünde karşılaşılan üç önemli problem vardır. Bunlar radyasyon, basınç ve sıcaklıktır. Radyasyon metallerde sertlik ve mukavemetin artmasına, sünekliğin azalmasına ve yoğunluğun %1 – 2 kadar artmasına sebep olur (Aybers, 1963). Yine radyasyon yüzünden sıcaklık ölçümünde yarı-iletken malzemeler kullanılamaz. Yüksek basınç ve sıcaklık da sensörleri olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla reaktör içinde kullanılacak sensörlerin radyasyona dayanıklı olmaları, yüksek basınç ve sıcaklık altında kararlı çalışabilmeleri gerekir. Fiziksel dayanıklılığın dışında sensör cevabının radyasyon etkisiyle değişmemesi de gerekir. Bu duruma iyi bir örnek yarı-iletkenlerdir. Sıcaklık

ölçümünde kullanılan yarıiletken sensörler radyasyon altında yanlış cevaplar verirler. Bu nedenle reaktörlerde sıcaklık ölçümü için ısıl-çiftler (thermo-couple) kullanılır.

Sıradan bir PWR'nin yakıtları senede bir kere değiştirilir (fuel shuffling). Bu değişim işlemi sırasında reaktörün iç ortamında çalışan sensörlerin de bakımı ve ayarı yapılır, bızulanlar değiştirilir. Reaktör yeniden çalışmaya başladıktan itibaren bir sene sonraki yakıt değişimi işlemine kadar basınç kabı tekrar açılmaz. Reaktörün işletimi sırasında içeride gerçekleşen olaylar hakkında tek bilgi kaynağı reaktör içine yerleştirilmiş olan sensörlerdir.

Nükleer güç santralleri gibi büyük sistemlerde sistem işaretleri, güvenlik, izleme, kaza sonrası tanısı, olayların önceden kestirimi, geçici olayların kontrolü için de kullanılırlar. Bu sistemlerin güvenilirliğini arttırmak için işaret ve sensör cevabının doğrulanması gereklidir. Bunun için çeşitli hata deteksiyon ve kestirim metotları kullanılır. İşaretlerin değerlendirilmesinde iki konu önemlidir. Bunlardan birincisi işaret doğruluğudur (qualification), diğeri de sistem davranışındaki değişimlerden kaynaklanan hataların izole edilebilmesi için sensör cevaplarının değerlendirilmesidir. İşaret doğrulaması (signal validation) genelde işaretlerin kararlılığını kontrol yoluyla yapılır. Bakışımı Gauss dağılımından uzaklaşma, sensör çıkışında ani sıçrama, işaret modülasyonu, doyma ve yığılma gibi olağandışı durumlar izlenir. Problem, sensör hatasının ve büyüklüğünün belirlenmesi şeklindedir. Önemli sorun, sistem davranışında, sensör davranışındaki değişimlerden kaynaklanan etkilerin izole edilmesinde uygulanacak metottur (Upadhyaya, 1985; Holbert ve Upadhyaya, 1990).

Bu alanda 1967'den bu yana düzenli bir çalışma içinde, nükleer güç santrallerinden alınan işaretlerin kullanımı ve reaktör dinamiğı üzerine 4-5 yıllık aralarla SMORN (Specialists Meeting On Reactor Noise) isimli sekiz uluslararası konferans düzenlenmiştir.

Bu toplantılarda nükleer güç santrallerinden alınan gerçek işaretlerin, uygulamalı olarak değerlendirildiğı yüzlerce çalışma sunulmuştur. Bu tezin diğeri bölümlerinde bu çalışmalarla ilgili bilgiler referanslar içinde verilecektir. IMORN (Informal Meeting On Reactor Noise) Konferansları ise başta her yıl grup toplantıları olarak başlamış sonra daha düzenli olarak SMORN toplantısının olmadığı yıllarda yapılmıştır.

Nükleer güç santrallerinde sensörlerden gelen işaretler doğrudan kullanılabileceği gibi (DC-işaretler); ortalama değeri çıkarılmış durumda, ortalama civarındaki dalgalanmaları gözönüne alınarak AC-işaretler üzerinde gürültü analizleri gerçekleştirilebilir. DC-işaretlerde hata deteksiyonu için bir durum uzayı (state space) yaklaşımı yapılabilir. Literatürde bu anlamda bir deteksiyon sistemi için sensörlerden gelen işaretleri giriş olarak alıp Kalman filtreleme metoduyla DC-işaret durumunu belirleyen çalışmalar vardır. Bu bağlamda Kalman filtresinin kestirdiği DC-işaret durumları kümülatif toplam testiyle kontrol edilmiştir. 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 ispatlamıştır (Peeters ve diğ., 1991). Burada bir sensör ve onunla ilişkili aygıtların ayarlarının doğrulamasını yapacak bir sistem için süreç modellemesi olarak bir doğrusal olmayan durum belirleme (state estimation) tekniği geliştirilmiştir. Modelin öngördüğü değerler, sağlam sensörlerin ölçtüğü değerlere ardışık olasılık oran testi (sequential probability ratio test) uygulanarak izlenmiştir (Black ve diğ., 1998).

Nükleer güç santrallerinde durum izleme ve arıza tanısı için olağandışı durumları belirleme yöntemleri açıklanmıştır. Nükleer güç santrallerinde sistemin sürekli gözetimi güvenli işletim için yüksek derecede önem taşır. Santral sisteminin sürekli izlenmesiyle, başlangıç aşamasındaki hatalar, arızalar ve olağandışı durumlar belirlenebilir. Bu belirleme, olağan durumdan sapma santralin veriminde dikkate değer bir düşüğe neden olmadan gerçekleştirilebilir. Bunun için bir en iyi-altı (suboptimal) sezim işlemcisi gerçekleştirilmiştir.

İşlemci, gürültü seviyesini ve gürültünün istatistiksel değerlerindeki değişimleri izlediği için santralda gerçekleşen durağan olmayan (non-stationary) değişimleri hızla belirler. Santral sisteminin AC-işaretleri bu tür bir deteksiyonda önem kazanır. Çünkü olağandışı bir durumda DC-işaretlerin ortalama değerlerinde dikkate değer bir değişim gerçekleşmeden önce gürültüde anlamlı ve belirlenebilir değişimler olur (Çiftçioglu ve diğ., 1989).

Nükleer güç santrallerinin güvenliği, santral işaretlerinin sürekli izlenmesiyle artırılabilir. Eskiden beri işaret analizi uygulamalarında en çok kullanılan teknik, zaman-tanım bölgesindeki işaretin Fourier dönüşümüyle frekans-tanım bölgesine

geçip, güç spektral yoğunluğunun hesaplanmasıdır. Daha sonraları dalgacık dönüşümü olarak adlandırılan zaman-ölçek boyutunda işlem yapan güçlü bir teknik geliştirilmiştir.

Dalgacık dönüşümünün uygulamalarını göstermek için Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin sürekli çalışması sırasında işlenen çeşitli işaretler kullanılmıştır. Bu tip uygulamalarda nötron detektörleri, birincil devre soğutma suyu basınç sensörleri ve birincil devre pompalarının üzerindeki titreşim sensörlerinin işaretlerine çok çözünürlüklü analiz uygulanmış ve işaretlerin Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilen güç spektrumlarıyla, çok çözünürlüklü dalgacık analizi yoluyla elde edilen sonuçlar arasında büyük eşdeğerlik görülmüştür. Dalgacık dönüşümü tabanlı alt bant analizi, işaretle minimum bozulmayla (distorsiyon) analize imkan tanımaktadır ve frekans bilgilerinin klasik Fourier dönüşümünden daha etkin olarak izlenmesini sağlamaktadır (Şeker ve diğ., 1998).

Ayrıca, yapay sinir ağı ve uzman sistemin birlikte kullanılmasıyla da nükleer güç santrallerinin izlenmesinde yeni bir metot geliştirilmiştir. Bu iki metodun birleştirilmesindeki amaç, sistemin operatörleri desteklemedeki potansiyelini arttırmaktır.

Dinamik davranışları modellemedeki yüksek performanslarından dolayı santral modellemesi ve olağandışı durumların belirlenmesi için uyarlamalı olarak eğitilen yinelemeli (recurrent) ve ileri-beslemeli (feed-forward) yapay sinir ağları tercih edilmiştir. Uzman sistem ise karar verme aracı olarak kullanılmıştır. Bu konuda Borssele Nükleer Güç Santrali'nin örneklenerek kaydedilen işaretleriyle çevrim-dışı (off-line) olarak yapılan denemeler, gerçekleşen sistemin, santralin durumunu başarıyla belirleyebildiğini göstermiştir (Nabeshima ve diğ., 2003).

Nükleer güç santralleri gibi karmaşık sistemlerde güvenli ve güvenli olmayan işletim durumlarını belirlemek için kullanılmak üzere sınıflandırılabilir çok sayıda işaret vardır. Bu zor ayrımı, Yapay Sinir Ağını (YSA) bir sınıflandırıcı (classifier) olarak kullanarak yapmak etkin ve kolay bir yoldur. Eğitilmiş bir YSA sensörlerden gelen sürekli işaretleri değerlendirerek sistemin işletim durumundaki değişimleri gerçek zamanda belirlemekte kullanılabilir. 1980'lerin sonlarından itibaren yapay sinir ağlarının nükleer güç santrallerinde bu amaçla kullanımı yaygınlaşmıştır. Yapay sinir

ağlarının nükleer güç santrallerinde kullanım alanları genel bir bakışla şöyle sınıflanabilir:

- i) Yapay sinir ağının bir uzman sistem (expert system) içinde kullanımı: Örüntü eşleme (patern mapping) üstünlüklerinden dolayı yapay sinir ağı, sistemi basitleştirmek için bir uzman sistemin akıllı bilgi tabanı (intelligent knowledge base) olarak kullanılabilir (Şeker, 1990).
- ii) Uyarlamalı (adaptive) sistem modelleme ve kontrolü: Pek çok uygulamada iç yapısı bilinmeyen sistemin (santral) giriş ve çıkışları gözlenebilir durumdadır. Bilinmeyen sistemin dinamiği hakkında bilgi edinmenin bir yolu esnek yapılı bir sistemle modellemektir. Bu esnek sistem kendi parametrelerini uyarlamalı olarak düzenleyerek santralin giriş ve çıkışları arasında bir model oluşturur. Bu yaklaşım istatistiksel öngörü, gürültü filtrelemesi, geçici olaylar vb işletimsel değişimlerin başlangıç aşamasında belirlenmesi gibi uygulamalarda kullanılır (Şeker, 1990).
- iii) Sistem tanılama, işaret doğrulaması ve hata deteksiyonu: Yapay sinir ağları birbirleriyle bağlantılı lineer olmayan işlem elemanlarından (nöronlar) oluşur. Bilgi bu elemanlar arasındaki bağlantıların ağırlıklarında saklanır. Ağ içinde bilgi yayılmış olarak saklandığından sinir ağları yüksek gürültü ve hata toleransına sahiptirler. Bu nedenle yapay sinir ağları hata deteksiyonu ve izleme amacıyla kullanılabilirler (Şeker, 1990).
- iv) Geribesleme parametreleri, kalp içi akışkan debisi, kalp kazanı titreşimi analizi gibi nükleer güç santralının fiziksel parametrelerinin belirlenmesinde YSA kullanılabilir (Çiftçioğlu ve diğ., 1991).
- v) Öngörülü bakım (predictive maintenance) ve operatör yardımcı sistemleri (operator aid applications) için modelleme ve tanılamada YSA'lar yaygın olarak kullanılabilirler (Çiftçioğlu ve diğ., 1991).

Literatürde nükleer güç santrallerinin işaretleri üzerinde yapay sinir ağları kullanılarak yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Örneğin geriye yayılma metoduyla eğitilen üç tabakalı bir yapay sinir ağı, EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin birincil devre soğutma suyu basınç sensörü işaretlerinin güç spektrumlarında hata

deteksiyonu için kullanılmıştır. Birincil devre basınç sensörlerinin işaretleri birincil devre suyu sıcaklığına, bu sıcaklık da reaktör gücüne bağlı olduğundan, reaktörün çalışmasındaki değişimler basınç işaretlerinden de gözlenebilir. Bu uygulamada yapay sinir ağlarının örüntü sınıflama potansiyeli, nükleer güç santralı işaretleri üzerinde gösterilmiştir (Çiftçioğlu ve diğ., 1991).

Bir diğer YSA uygulamasında gerçek bir ısı değiştirici – sürekli karışım tankından oluşan reaktör sistemi incelenmiş, 14 gürültülü ölçüm ve 10 hata durumu üzerinde çalışılarak hata tanısı ve deteksiyonu, süreç ölçümlerinin yapay sinir ağı ile sınıflanması yoluyla yapılmıştır. Bunlar için, çok tabakalı algılayıcı (perceptron) ağı, *radial basis function network*, ART2 network ve *Kohonen Feature Map* kullanılmıştır (Sorsa ve Koivo, 1993).

Yapay sinir ağları, nükleer güç santralları gibi gerçek anlamda kompleks sistemleri modellemede lineer olmamalarından dolayı başarılı olmaktadır. Örneğin bir çalışmada bir PWR'nin buhar generatörüne ait bazı büyüklükler arasındaki ilişkileri modellemek için yapay sinir ağı kullanılmıştır. Yapay sinir ağının eğitiminde gerçek bir PWR'den alınan işaretlerden yararlanılmıştır. Eğitim aşamasında gereksiz ağ bağlantılarını eleyen Ishikawa yapısal öğrenme metodu tercih edilmiştir. Eğitimin sonunda elde edilen yapay sinir ağının topolojisi üç küçük ve ayrı yapay sinir ağının süperpozisyonu şeklindedir. Sistemin yapısını ve fizik kurallarını bilmeksizin, giriş-çıkış işaretleri bağımsız kısımlara bölünebilmektedir. Elde edilen yapay sinir ağlarının yapısı basit olduğundan giriş-çıkış işaretleri arasında yapmış oldukları haritalamalar kolaylıkla deneysel denklemlere dönüştürülebilir. Bu denklemlerle yapılan sayısal denemeler de iyi sonuçlar vermiştir (Marseguerra ve Mazzarella, 1999).

Nükleer güç santrallarının işletiminde hataları başlangıç aşamasında belirlemek ve kaza durumuna dönüşmeden önlemek işletim güvenliği ve bakım maliyeti açısından önemlidir. YSA'ları gerçek zamanda tatmin edici sonuçlar verdikleri ve güç seviyesine bağlı geniş spektrumlu denetleme yapabildikleri için nükleer güç santrallarında kullanımları giderek artmaktadır. YSA'larının en önemli üstünlüğü çok çıkışlı bir sistemin işaretlerini kullanarak hiç bir matematiksel bağıntı kurmadan modelleme yapabilmeleridir. YSA'ları nükleer güç santrallarında işaret doğrulama, santral genelinde sensörlerin izlenmesi ve sensör hatalarının belirlenmesi amacıyla

da kullanılırlar (Nabeshima ve diğ., 1995; Uhrig, 1991; Türkcan ve Eryürek, 1992; Türkcan ve diğ., 1992; Nabeshima ve diğ., 1993; Uhrig ve Tsoukalas, 1999).

Reaktörde meydana gelen geçici olayların tanısı için uygulanan bir yol da paradigma geliştirmektir. Literatürde, Değiştirilmiş Varsayımsal Tabanlı Bakım Sistemi (Modified Assumption-based Truth Maintenance System), uzman güvenlik seviyeleri kullanılarak bir çakışma ayrıştırma (conflict resolution) sistemiyle genişletilmiş, düğümlü (nodal) sinir ağları kullanılmıştır. Yazılım denemeleri; Besleme Suyu Kaybı Kazası (Loss of Feedwater), Soğutucu Akışkan Kaybı Kazası (Loss of Coolant Accident), scram'le sonuçlanmayan geçici olay (anticipated transient without scram), Buhar Generatörü Tüp Yarılması (Steam Generator Tube Rupture) kazaları için uygulanmıştır.

Bir nükleer güç reaktörünün normal çalışması, santral trip'i ve kontrol sistemleriyle kontrol edilir. Reaktivitede normal olmayan bir geçici olayın oluşması halinde, bu durumun belirlenmesi ve etkisinin azaltılması için reaktörün içinde bulunduğu durumun duyarlı ve tam olarak bilinmesi gerekir.

Geçici olayın tam olarak belirlenebilmesi için reaktör sisteminin pek çok fiziksel elemanının yakından izlenmesi gerekir. Birden çok hatanın birlikte meydana geldiği geçici olaylarda tanılama daha zor olur. Sıklıkla bir elemandaki hata başka bir elemanda da hataya sebep olur ya da geçici olayın sönümlenmesine mani olur. Reaktörün bilgisayarı ile bağlantı halinde olan diğer bir bilgisayar santral enformasyonunu toplayıp pek çok geçici olayı hemen hemen gerçek zamanda ya da olmadan önce öngörerek analiz edebilir. Nükleer güç santralleri gibi kompleks sistemlerde, kayıp ya da hatalı sensör verileri ile de sıklıkla karşılaşılır (Martin ve Nassersharif, 1990).

Ayrıca pek çok endüstriyel süreçte, sensörlerin doğru çalıştığından emin olmak için periyodik sensör ayarlamaları gereklidir. Ayarı bozulan sensörler; üretim kalitesinin düşüşü, kazancın azalması gibi olaylara sebep olurlar. Sensör ayarlarının gerçek-zamanda sürekli izlenmesi, üretim kalitesinin korunması ve elle yapılan gereksiz ayarlama işlemlerinin ortadan kalkması nedeniyle istenen bir durumdur. Sensörlerin durumu hakkında sürekli bilgi almak için yapay sinir ağı tabanlı bir sensör izleme sistemi de kullanılabilir.

Böyle bir sistem, sensörlerin sürekli izlenmesiyle hatalı sensör işaretlerinin sistem tarafından kestirilen en iyi değerle değiştirilmesine izin verir.

YSA-tabanlı, Sensör İzleme ve Ayar Doğrulama Sistemi (Instrument Surveillance and Calibration Verification System) şu bileşenlere sahiptir: Öz-ilişkili yapay sinir ağı kullanan bir işaret kestirim modülü, Ardışık Olasılık Oran Testi tabanlı bir istatistik mantıksal karar modülü; bir hatalı sensör düzeltme modülü ve sinir ağı ayarlama modülü (network tuning module). Kullanılan yapay sinir ağı üç gizli tabakaya sahiptir. Sonuçlar göstermiştir ki izlenen sensörlerin göreceli olarak küçük bir kısmında, parametre seçimini tasfiye etmek için lineer bir düzeltme katsayısı kullanmak oldukça etkin ve basittir. üç gizli tabaka kullanımının santral genelinde sensör izleme sistemi için mükemmel sonuç verdiği gözlenmiştir (Xu ve diğ., 1998).

Bir başka çalışmada, nükleer güç santrallerinde sensör işaretlerinin dinamik davranışlarını izlemek için yapay sinir ağı kullanılmıştır. Bunun için ileri-beslemeli yapay sinir ağı, genişletilmiş Kalman filtresiyle eğitilmiştir. İki yapay sinir ağı topolojisi kullanılmıştır:

Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA, bu yöntemde yapay sinir ağı, diğer sensörlerin çıkışlarından, bir sensörün çıkışını belirlemek için eğitilmiştir. Bu, her sensör için ayrı ayrı yapılmıştır. Dolayısıyla ÇGTÇ sistemi sensör sayısı kadar sinir ağına sahiptir. Her sinir ağının giriş tabakasında sensör sayısından bir eksik sayıda nöron vardır. Çıkış tabakasında ise bir nöron bulunur. Sinir ağlarının her biri bir gizli tabakaya sahiptir (Türkcan ve Versteegh, 1998).

Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) YSA, bu sistemde sensörler, santralin farklı bileşenleri için gruplanmıştır. ÇGÇÇ sisteminde bir grubun çıkışı diğer gruplardan belirlenmektedir. Bu durum her grup için tekrarlanmıştır. Örnek bir çalışmada 20 sensör sekiz, sekiz ve dört olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Burada her sinir ağının bir gizli tabakası vardır ve YSA, genişletilmiş Kalman filtresiyle eğitilmiştir (Türkcan ve Versteegh, 1998).

Literatürde yapay sinir ağlarının yanında genetik algoritma ve bulanık mantık uygulamaları da anlamlı bir yer tutmaktadır. Bir nükleer güç santralında hataların duyarlı tanısı temel öneme sahiptir. Bu tür tanılamada iki karakteristik gözönüne alınabilir: Gerçek zaman özellikleri ve uyarılma yetisi. İlk karakteristik operatörlere,

indirgenmiş operasyonları kestirme ve bu özel duruma bağlı kritik güvenlik fonksiyonlarını izleme olanağı verir. İkincisi ise sisteme eğitim kümesinde bulunmayan, operatörlerin hazırlıklı olmadığı kazalarla başa çıkabilme imkanı verir. Three Mile Island kazası (Mosey, 1990) bu tür olaylara klasik bir örnek olarak alınabilir. Oluşturulan modelde davranışı simüle etmek için bir sinir ağı, bulanık kümeler ve genetik algoritma kullanılmaktadır. Amaç, reaktör operatörlerine normal olmayan durumlarda karar verirken yardımcı olacak bir gerçek-zaman tanı sistemi oluşturmaktır (Alvarenga ve diğ., 1997).

Bu tez çalışmasında bir PWR olan EPZ Borssele Nükleer Güç Santralının işaretleri kullanılmıştır. Hollanda'nın Zeeland Bölgesi'nde Westerschelde yakınlarında kurulmuş olan 480 MWe gücündeki Basıncılı Sulu Borssele Reaktörü (Kerncentrale Borssele: KCB) NV Electriciteits-Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ) firması tarafından işletilmektedir. Siemens/KWU tarafından 1968 – 1973 yılları arasında yapımı tamamlanan Borssele reaktörü 24 yıl boyunca ortalama %80 güçte işletilmiştir. 1997 yılının ilk yarısında dünyanın en iddialı nükleer yeniden yapılanma projesi başarıyla sonuçlandırılarak güç santrali 1998 - 1999'da ortalama %91 güçte çalışmaya başlamıştır (Gruhl ve Kalverboer, 1997).

Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin AC ve DC-işaretleri iki ayrı dağıtım panosu üzerinden kaydedilmektedir. MS-Paneli 32 işareti 64 örnek/s hızla AC ve DC olarak 30 dakikalık dosyalar halinde kaydetmektedir. DC-işaretler hiç bir koşullandırmaya uğramadan kaydedilirler. İşaretin AC kısmı ise bir yüksek geçiren filtre yardımıyla ayrılır. Ön kuvvetlendiriciden sonra (x20) örtüşme (aliasing) etkisinden kurtulmak için 30 Hz alçak geçiren filtreden ve tekrar kuvvetlendiriciden (yazılım kontrollü kanallara göre değişik değerlerde) geçirilir. MS-Panelinin işaretleri yardımıyla reaktörün gürültü analizleri yapılmaktadır. MR-Paneli ise 96 kanal üzerinden 10 örnek/s hızla santralin DC-işaretlerini kaydetmek için kullanılır. Bugün 96 kanalın ilk 72 tanesi kullanılmaktadır. Bu panelde işaretler sadece kuvvetlendiriciden geçirilirler (x2). MR-Panelinin işaretleri santralin genel işletim durumunun izlenmesini sağlar.

Bir nükleer güç santralının AC-işaretlerinden santralin yapısal titreşimleri, kalp kazanı titreşimleri, basınç gürültüsü (soğutucu akışkanın türbülansından doğar), yakıt demetlerinin titreşimi, soğutucu akışkanın debisi, boru ve vanaların mekanik ve

hidrolik davranışları, akışkan kaçağı gibi mekanik olayların yanında sensörlerin cevap zamanları (response time), süreç değişkenleri arasındaki transfer fonksiyonları, korozyon gibi önemli parametreler belirlenebilir (Thie, 1981).

Nükleer güç santrallerinin DC-ışaretleri ise bize santralin işletim durumu hakkında bilgi verir. Santral içinde ölçülen çok sayıda büyüklük arasındaki ilişkileri belirlememizi ve kontrol etmemizi sağlar. Santralin DC-ışaretleriyle, işletimi genel anlamda izlenebildiğinden meydana gelen geçici olaylar başlangıç aşamasında, santral performansını etkileyecek düzeye ulaşmadan belirlenip önlenabilirler.

Fiziksel bir süreçte, süreç değişkenleri ortalama değerleri civarında salınır. Salınımlar sistemden kaynaklanırlar ve sistem hakkında önemli bilgiler içerirler. Bu bilgilerin işaretlerden elde edilebilmesi için özel teknikler kullanmak gerekir. Bu tekniklerin tümüne birden *Gürültü Analizi* denir. Gürültü analizi için sensörlerden gelen işaretlerin (DC-ışaretler) ortalama değerleri çıkarılarak elde edilen AC-ışaretler kullanılır. Normal işletim durumunda işaretlerin istatistik özelliklerinin değişmediği kabul edilir. Beklenen değerlerden herhangi bir sapma, başlamakta olan bir hatanın işareti olabilir. Nükleer güç santrallerinde oldukça zengin gürültü kaynakları olduğundan, gürültü analizi teknikleri nükleer güç santrallerinin izlenmesinde önemli bir yer tutar. Gürültü analizinde kullanılan metotlar temel olarak ikiye ayrılır. Bunlar frekans-tanım bölgesi analizi ve zaman serisi modellemeleridir. Bu analizlerde sensörlerden gelen işaretlerin Fourier dönüşümü alınarak frekans-tanım bölgesine geçilir veya işaretlerin *öz-bağımlı* (Auto-Regressive: AR), *çok değişkenli öz-bağımlı* (Multi-variate Auto-Regressive: MAR) modellemesi yapılarak ya da korelasyon teknikleri kullanılarak zaman-tanım bölgesinde çalışılır. Bu teknikler sistem tanılama için kolaylıkla genişletilebilir ve verimli olarak kullanılabilirler. Hata deteksiyonu ve giderilmesinde etkindirler. Hem frekans hem de zaman-tanım bölgesi analizleri aynı sistem parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilirler. Belirlemede birden fazla, farklı metodun kullanılabilmesi özellikle doğrulama ve sağlama işlemleri için önemlidir.

Rastlantısal işaret modellemesinde *öz-bağımlı* ve *çok değişkenli öz-bağımlı* modelleme sıklıkla kullanılır (Black ve diğ., 1998; Çiftçioğlu ve Türkcan, 1991a). Kalman filtrelemesi işaret ve model tabanlı uygulamalar için en iyi metottur (Çiftçioğlu ve Türkcan, 1991b; Çiftçioğlu ve Türkcan, 1992). En basit ifadeyle

Kalman filtresi aynı anda ve öz-yineli olarak çözülen, durum uzayı şeklinde bir birinci mertbe lineer diferansiyel denklemler kümesidir.

Deterministik modelleme santral bileşenlerinin basit modellerinden oluşur. Bu modeller birbirlerine, süreç değişkenlerinin ölçülen değerlerine bağlı denge denklemleriyle bağlıdır. Güç, debi, sıcaklık, basınç gibi model tarafından belirlenen süreç değişkenleri ölçülen değerlerle karşılaştırılır ve farklılıklar hata işareti olarak değerlendirilir. Eğer farklılıklar, belirlenmiş limitlerin dışına çıkarsa model alarm verir (Sørenssen, 1990).

Bir nükleer güç santralında nötron akısını ölçmek için nötron detektörleri, sıcaklık ölçmek için ısılıçiftler, basınç ölçmek için basınç sensörleri, titreşim ölçmek için titreşim sensörleri ve ivme-ölçerler, debi ölçmek için debimetreler ve daha pek çok sensör kullanılır. Bu sensörlerin ölçtükleri büyüklükler birbirlerinden oldukça farklıdır. Dolayısıyla sensörlerin fiziksel yapıları ve çalışma prensipleri de büyük farklılıklar gösterir. Bu nedenle sensörlerin doğrulama ve sağlamasında farklı yaklaşımlar yapmak gerekir. Bu yaklaşımları belirlerken ölçülen büyüklüklerin doğası yanında sensörlerin fiziksel yapıları da dikkate alınmalıdır. Örneğin nükleer reaktörlerde sıcaklık ölçmek için kullanılan ısılıçiftlerin AC-işaretlerine bakıldığında 3 Hz'in üstünde bilgi olmadığını görürüz. Halbuki nötron detektörlerinde 20 Hz'e kadar, titreşim sensörlerinde ise 200 Hz'e kadar bilgi vardır. Sensör işaretlerinin frekans spektrumlarında görülen beyaz gürültünün ortalama değeri sensörün duyarlılığı hakkında bilgi verir. Fiziksel yapıya bakılırsa; nükleer güç reaktörlerinde, yüksek sıcaklık ve basıncın yanısıra şiddetli radyasyon altında çalışan sensörler zamanla korozyona uğrarlar, kafes yapılarında gerilmeler meydana gelir. Sensörlerin cevap zamanlarının değişip değişmediği kontrol edilerek meydana gelen yapısal değişikliklerin sensörün çalışmasına etkiyip etkimediği belirlenebilir. Bunun için en çok kullanılan yöntem sensör işaretinin öz-bağımlı bir modelini yapıp, modelin cevap zamanını belirlemektir. Bu anlamda cevap zamanındaki değişme sensörde fiziksel bozulmanın da işaretidir.

15.7.2001 - 15.12.2001 tarihleri arasında tarafımdan beş ay süresince EPZ Borssele NGS'nda yapılan tez çalışmasına yönelik ilk çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, Borssele Nükleer Güç Santrali'nin yeni veri toplama sisteminde (AC ve DC) kullanılan sensörlerin doğrulaması ve sağlamanın yapılması, Kalp Kazanı Titreşimlerinin (KKT) genlik ve doğrultularının çevrim-içi hesaplanması; santral genelinde sensör hatası ve işletimden kaynaklanan anormal durumların belirlenmesi için etkin olarak kullanılabilecek çeşitli metotların incelenmesi ve bu amaca yönelik yeni yöntemlerin önerilmesi; bütün bu analizlerin santral operatörleri tarafından kullanılabilecek, santral ölçme sistemine entegre edilmiş yazılımlar oluşturularak pratikte uygulanabilmesinin sağlanması amaçlanmıştır.

Bu bağlamda Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin (NGS) yeni veri toplama sisteminde kullanılan sensörlerin doğrulanması incelenmiş ve çeşitli yöntemler sınanmıştır.

MS-Panelli işaretleriyle sensör doğruluğu ve durum izlemesi için bütün sensör tipleri için (ısıl-çift, nötron sensörü, basınç sensörü) öz-bağımlı (auto-regressive) model yaklaşımıyla sensör cevap zamanları hesaplanmış ve bu yolla sensör güvenilirliği izlenmiştir.

Kalp dışı nötron detektörlerinin Öz-İlişkili (auto-associative) YSA ve Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA ile sağlması yapılmış, ÇGTÇ-YSA'ların Öz-İlişkili YSA'lardan daha çok bilgi sağladığı gösterilmiştir.

Doğrulukları belirlenmiş olan 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 aldıkları ve genliklerinin 15 μ m'yi geçmediği gösterilmiştir.

MR-Panelinden seçilen DC-işaretlerle ÇGTÇ-YSA'ları kullanılarak sensör doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra bu işaretler, aralarındaki fiziksel ilişkilere göre gruplanarak ÇGÇÇ-YSA'ları kullanılarak 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 uygulamasının anomaliler karşısında Kalman filtresinden daha büyük genlikli sonuçlar verdiği, ayrıca dalgacık analizi uygulamasında işaret gürültü oranının Kalman filtresindekinden daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Dolayısıyla önerilen dalgacık analizi tabanlı metodun anormal durumların belirlenmesinde daha etkin bir yol olduğu gösterilmiştir.

Beş bölümden oluşan bu tez aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Giriş bölümünde konunun literatür bilgisi verilerek nükleer güç santrallerinde işaret işleme çalışmaları ve bunların uygulamaları anlatılmıştır.

İkinci bölümde bu tez çalışmasının veri kaynağını oluşturan, Hollanda'da bulunan EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin kısa bir tanıtımı yapıp, santralin veri toplama sistemi anlatılmıştır. Yine bu bölümde EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde gürültü analizi için kullanılan MS-Paneli'nin işaretleri ve bunların karakteristikleri üzerinde durulmuştur.

Tezin üçüncü bölümü ön işlemden geçirilmiş sensör işaretleri (AC-işaretler) ile sensör doğrulama ve durum izlemeye ayrılmıştır. Sensör doğrulama için öz-bağımlı (auto-regressive) model ile sensör cevap zamanı belirlenmesi, öz-ilişkili (auto-associative) YSA ve çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) YSA ile kalp dışı nötron sensörlerinin doğrulaması, her iki YSA'nın karşılaştırılması ve bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri üzerinden yapılan analizlerle kalp kazanı titreşimlerinin belirlenmesi yoluyla durum izlemesi anlatılmıştır. Son olarak da EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali için yapılan kalp kazanı titreşim analizi sonuçları verilmiştir.

Dördüncü bölüm santraldan koşullandırılmadan gelen sensör işaretleri (DC-işaretler) üzerinde yapılan sensör doğrulama çalışmalarına ayrılmıştır. DC-işaretlerde çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) YSA yaklaşımı ile sensör doğrulama çalışması

anlatıldıktan sonra. Bu doğrulanmış sensörlerin işaretleri kullanılarak çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ) YSA ile bileşen bazında doğrulama çalışması verilmiştir.

Beşinci bölümde DC-işaretlerle, gerçek zamanda çevrim-içi anormal durum belirlemesi ele alınmış, literatürde kullanılan klasik metoda (Kalman filtrelemesi tabanlı) alternatif olarak dalgacık analizi kökenli yeni bir metod önerilmiş ve EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işaretleri üzerinde Kalman filtrelemesi tabanlı eski metoda üstünlüğü gösterilmiştir.

Sonuç ve öneriler bölümünde bu tez çalışmasında yapılan analizler, uygulanan yöntemler ve önerilen yeni metotlar üzerinde durulduktan sonra, tez çalışmasının veri kaynağını oluşturan EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali üzerinde yapılan analiz sonuçları verilmiştir. EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali üzerinde gelecekte yapılabilecek çalışmalar bakımından önerilerde bulunulmuştur.



BÖLÜM 2

EPZ BORSSELE NÜKLEER GÜÇ SANTRALI VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ

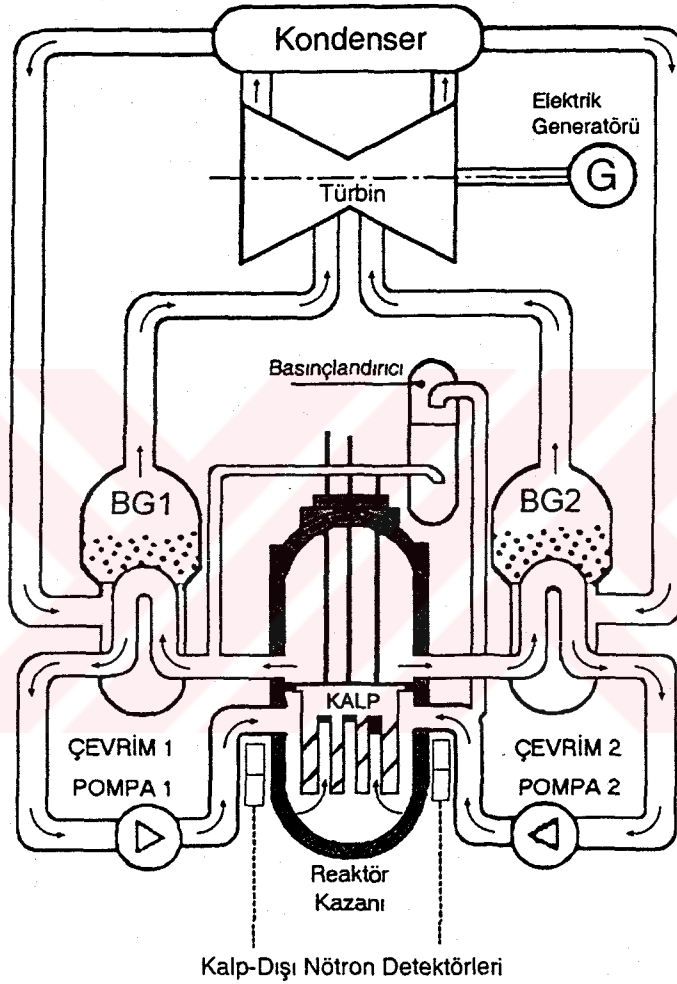
Bu bölümde bu tez çalışmasının veri kaynağını oluşturan, Hollanda'da bulunan EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin kısa bir tanıtımı yapıp veri toplama sisteminden söz edilecektir.

2.1 EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali

Hollanda'nın Zeeland bölgesinde Westerschelde yakınlarında kurulmuş olan 480 MWe gücündeki Basınçlı Sulu Borssele Nükleer Güç Santrali (KCB) NV Electriciteits-Produktiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ) firması tarafından işletilmektedir. Siemens/KWU tarafından 1968 – 1973 yılları arasında yapımı tamamlanan santral ilk defa 1974 yılında 1360 MW_t (450 MW_e) güce çıkarak kritik 1998 - 99'da ortalama %91 güce (480 MW_e) çalışmaya başlamıştır (Gruhl ve Kalverboer, 1997). Borssele Nükleer Güç Santrali Hollanda'nın elektrik ihtiyacının %5'ini sağlamaktadır. Bugün Hollanda'nın çalışan tek nükleer güç reaktörüdür.

Şekil 2.1'de Borssele Nükleer Güç Santralının bir prensip şeması görülmektedir. İki birincil devre pompası tarafından tahrik edilen birincil devre suyu reaktör basınç kabına yandan girerek kalp kazanı tarafından aşağıya yönlendirilir. Daha sonra yakıt çubukları arasından, aşağıdan yukarıya doğru geçen su, kalbin üst kısmından çıkarak ısı değiştiriciden geçer ve pompalara geri döner. Borssele Nükleer Güç Santrali'nin iki birincil devre pompası, dolayısıyla iki birincil devre çevrimi vardır. Yakıt çubukları arasından geçerken yakıtlarda üretilen ısının bir kısmı birincil devre suyuna geçer; daha sonra su tarafından taşınan ısı enerji, ısı değiştiricide ikincil devre suyuna aktarılır. Birincil devre suyunun reaktör basınç kazanına giriş sıcaklığı yaklaşık 290 °C, çıkış sıcaklığıysa 320 °C'dır. Birincil devre suyunun basıncı

-kaynama olmaması için-, basınçlandırıcı tarafından 150 bar civarında tutulur. Isı değiştiricinin üst tarafında yer alan buhar generatöründe üretilen doymuş buhar yüksek basınç türbinine gönderilir. Yüksek basınç türbininde genleşen buhar buradan alçak basınç türbinlerine gelir. Türbinler vasıtasıyla elektrik generatörü tahrik edilir. Sonunda kalitesi iyice düşmüş olan ıslak buhar kondensere gelerek yoğuşturulur ve buhar generatörüne sıkıştırılmış sıvı halinde döner.



Şekil 2.1 EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin prensip şeması.

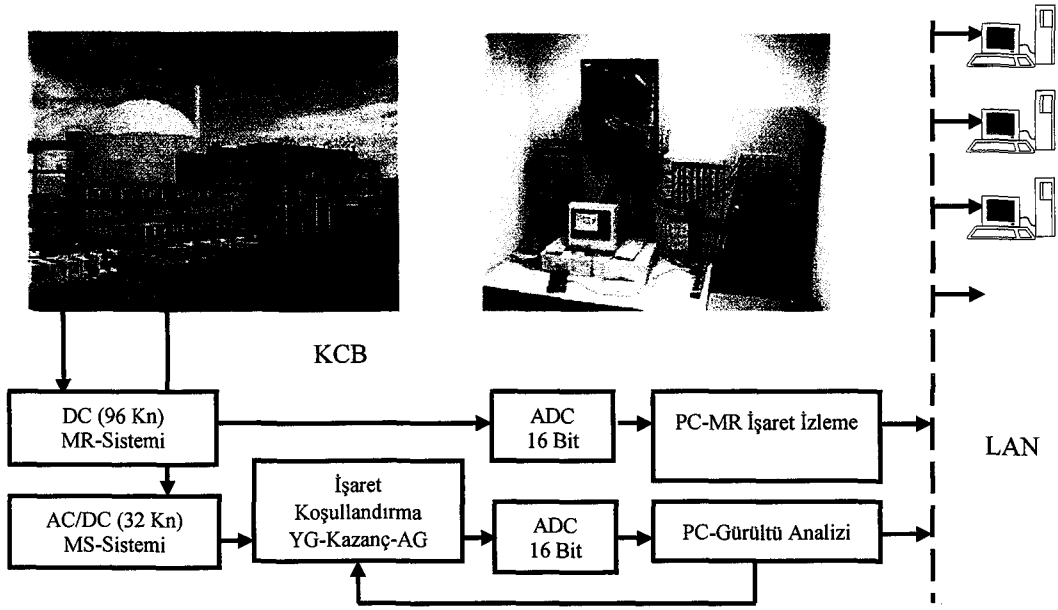
2.2 EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali Veri Toplama Sistemi

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nda gürültü ölçümleri 1974 yılında ilk yakıt çevrimiyle başlamış ve 1982 yılına kadar düzenli olarak devam ettirilmiştir (Dragt ve Türkcan, 1977; Türkcan ve Dragt, 1977; 1978). 1981 yılının sonlarında bir çevrim-içi (on-line) reaktör gürültü izleme sistemi kurulmuş ve bu sistem 9. yakıt çevriminin başlarında çalışmaya başlamıştır. Reaktörün birincil ve ikincil devrelerinden seçilen 32 işaret AC ve DC olarak sürekli izlenip analiz sonuçları sayısal olarak bantlara kaydedilmeye başlanmıştır. Bu sistemde işaretler gerilim-frekans çeviricileri kullanılarak sayısallaştırılmıştır (Türkcan, 1982; Türkcan ve Oguma, 1984; Türkcan ve diğ., 1991).

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nda ilk geniş kapsamlı işaret işleme çalışması 1993 – 1997 yılları arasında Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) tarafından gerçekleştirilmiştir. 4 yakıt çevrimini kapsayan bu işaret işleme çalışmasında 32 işaret AC ve DC olarak kaydedilmiştir. Normal çalışma durumunda istatistik analizlerin yapılabilmesi için büyük hacimde işaretin yanı sıra değişik işletim koşullarında alınmış işaretler de oluşturulan veri tabanına eklenmiştir.

Alınan işaretlerin çevrim-içi analizi için ECN projesi kapsamında C++ programlama diliyle PC-TSMAR programı yazılmıştır. Bu program sayesinde alınan işaretlerin öz-güç spektral yoğunluğu, öz-ilişki fonksiyonu gibi parametreleri, AR (Auto-regressive model) modeli kullanılarak impuls ve birim basamak cevapları ile birlikte zaman sabitleri belirlenmiştir (Türkcan ve Verhoef, 1997).

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

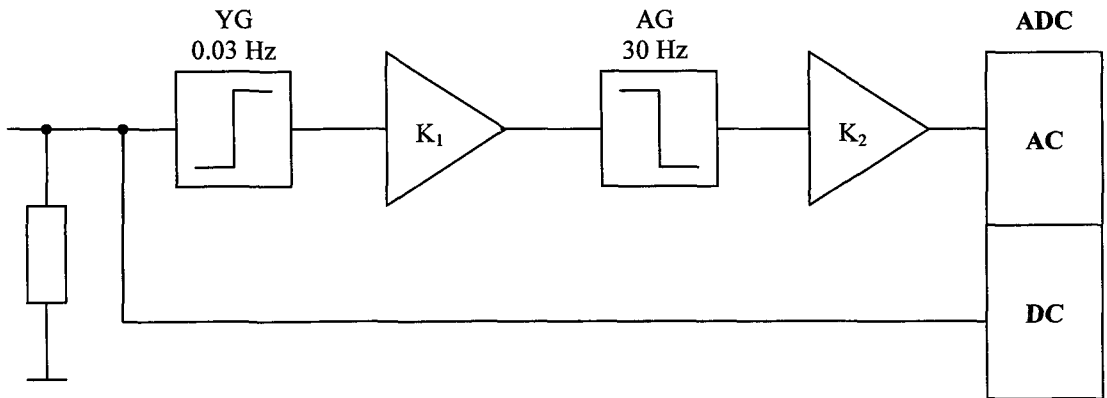


Şekil 2.2 EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işaret işleme sistemi.

Santralin veri toplama sistemi Şekil 2.2'de görülmektedir.

2.2.1 MS-Paneli

MS-Panelinde 32 işaret 64 örnek/s hızla örneklenip AC ve DC olarak 30 dakikalık dosyalar halinde kaydedilmektedir. DC-işaretler hiç bir şekillendirme yapılmadan kaydedilmektedirler. Bu işaretler AC-kisimlerini ayırmak için 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 yapılan koşullandırmanın prensip şeması Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 MS-Paneli işaret koşullandırma devresi prensip şeması.

MS-Panelinde örneklenen işaretlerin listesi Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 MS-Paneli İşaret Listesi (ADC çalışma aralığı +10/-10 V)

Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Kazanç (x20)	Çevirme Faktörü	Birim
0	YQ032T006	Kalp Çıkış Sıcaklığı	100	443	°C
1	YA001T095	Kalp Giriş Sıcaklığı	100	400	°C
2	TV050A001	Boron Konsantrasyonu	5	1	ppm
3	SP010E001	Reaktör Aktif Elektrik Gücü	20	500	MWe
4	YX003X082	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (50° sy)	5	1	V
5	YX003X062	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (140° sy)	5	1	V
6	YX003X072	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (230° sy)	5	1	V
7	YX003X052	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (320° sy)	5	1	V
8	YX003X061	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (140° sy)	5	1	V
9	YQ023X015	Kalp-İçi Nötron Kanalı	5	1	V
10	YQ023X016	Kalp-İçi Nötron Kanalı	5	1	V
11	YA001P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	20	180	bar
12	YA002P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	20	180	bar
13	YA001P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	20	10	bar
14	YA002P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	20	10	bar
15	YX003X051	Kalp-Dışı Nötron Kanalı (320° sy)	5	1	V
16	YD001V003	Titreşim Sensörü Radyal Volan	10	50.8	mm/s
17	YD001V004	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan	10	50.8	mm/s
18	YD001V018	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan	10	33.246	mm/s
19	YD001V005	Titreşim Sensörü Radyal Volan (90° sy)	10	33.246	mm/s
20	YD001V006	Titreşim Sensörü Radyal Volan	10	33.246	mm/s
21	YD001V017	Titreşim Sensörü Aksiyel Salmastra	10	33.246	mm/s
22	YD001V007	Titreşim Sensörü Radyal Salmastra	2	0.127	mm/s
23	YD001V008	Titreşim Sensörü Radyal (90° sy) Salm.	2	0.127	mm/s
24	YD002V003	Titreşim Sensörü Radyal Volan	10	50.8	mm/s
25	YD002V004	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan	10	50.8	mm/s
26	YD002V018	Titreşim Sensörü Aksiyel Volan	10	33.246	mm/s
27	YD002V005	Titreşim Sensörü Radyal Volan (90° sy)	10	33.246	mm/s
28	YD002V006	Titreşim Sensörü Radyal Volan	10	33.246	mm/s
29	YD002V017	Titreşim Sensörü Aksiyel Salmastra	10	33.246	mm/s
30	YD002V007	Titreşim Sensörü Radyal Salmastra	2	0.127	mm/s
31	YD002V008	Titreşim Sensörü Radyal (90° sy) Salm.	2	0.127	mm/s

Birinci sütunda kanal numarası, ikinci sütunda işaretin panel kodu, üçüncü sütunda adı, dördüncü sütunda ikinci kuvvetlendiricinin kazancı, beşinci sütunda gerilim işaretlerini fiziksel büyüklüğe çevirmek için kullanılan katsayı ve son sütunda da birimler verilmiştir. Seçilmiş olan işaretler Kalp soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, reaktör içinde yanıcı zehir olarak kullanılan boronun su içindeki konsantrasyonu, reaktörün elektrik gücü, altı kalp dışı ve iki kalp içi nötron kanalı, birinci devre pompalarına ait dört basınç ve bu pompalar üzerinde çeşitli yerlere yerleştirilmiş onaltı titreşim sensörünün işaretleridir.

Sensörlerin ölçtükleri değeri fiziksel büyüklüğe çevirmek için bir çevirme faktörü (F) kullanılır. Borssele Nükleer Güç Santrali'nde kullanılan sensörler için bu çevirme faktörleri Tablo 2.1'de 5. Sütunda verilmiştir. ADC'nin ölçtüğü işaretleri fiziksel değerlerine çevirmek için önce ADC'nin çözünürlüğüyle çarpmak gerekir. ADC'nin çalışma aralığı ± 10 V olduğundan kayıt bant genişliği $\Delta U = +10 - (-10) = 20$ V'tur. Bu değer ADC'nin bit sayısına bölünerek bit başına düşen gerilim değeri bulunur. Bu değer, ADC'nin ölçebileceği en küçük gerilim değişimi dolayısıyla ADC'nin çözünürlüğüdür. Sensörün elektriksel işarete çevirdiği fiziksel büyüklüğün değerini elde etmek için o sensöre ait çevirme faktörüyle (F) çarpıp gerçek değere ulaşmak için toplam kazanca ($K_t = K_1 \times K_2$) bölmek gerekir. Nötron kanalları dışındaki kanallar için fizisel değer (AC_f):

$$AC_f = AC \cdot \frac{\Delta U}{2^{bit}} \cdot \frac{F}{K_t} = AC \cdot \frac{20}{2^{16}} \cdot \frac{F}{K_t} \quad (2.1)$$

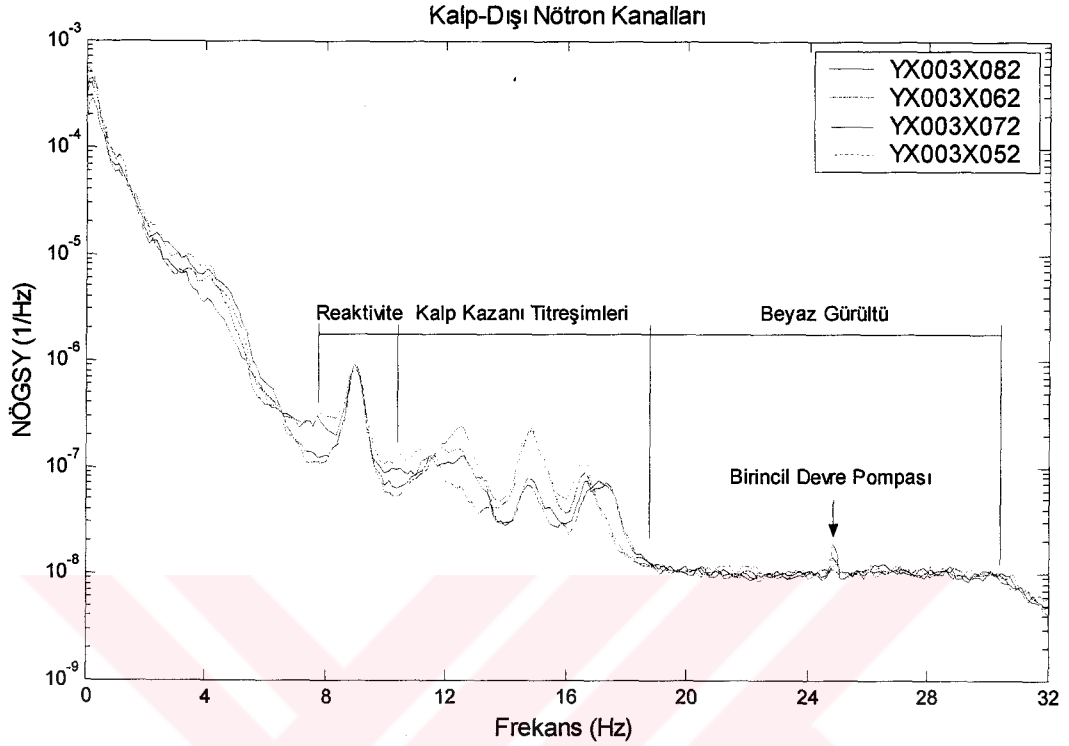
şeklinde hesaplanır.

Nötron kanallarında ise ölçülen değeri boyutsuz hale getirip normalize etmek için aynı kanalın DC değerinin ortalamasına bölünür. Nötron kanalları için normalize değer (AC_n):

$$AC_n = \frac{AC \cdot \frac{\Delta U}{2^{bit}}}{DC \cdot \frac{\Delta U}{2^{bit}}} \cdot \frac{1}{K_t} = \frac{AC}{DC} \cdot \frac{1}{K_t} \quad (2.2)$$

olarak hesaplanır.

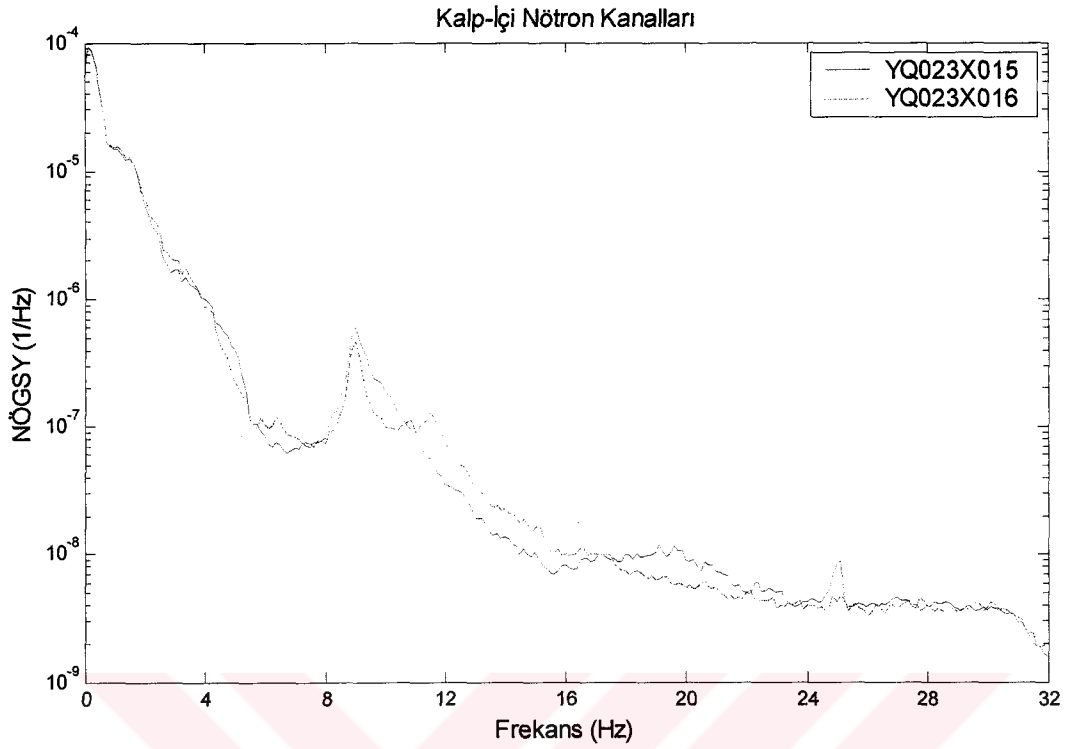
MS-Panelli'nde bulunan kalp-dışı nötron kanallarından dördünün AC-ışaretlerinin NÖGSY'ları (Normalize Öz-Güç Spektral Yoğunluğu: Normalized Auto-Power Spectral Density) Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Kalp-dışı nötron kanallarının NÖGSY'ları.

8 ile 10.5 Hz arasında birincil devre soğutma suyunun kalp kazanına çarpmasından kaynaklanan ve bütün sistem üzerinde global olarak görülen reaktivite salınımı görülmektedir. Borssele Nükleer Güç Santrali'nde maksimum genlik değerini 9.2 Hz'de alır. 10.5 ile 19 Hz arasında kalp kazanı titreşimlerinden doğan nötron akısı salınımları görülmektedir. 19 Hz'den sonra beyaz gürültü kendisini gösterir. Sadece 25 Hz'de birincil devre pompalarının pervanelerinden kaynaklanan bir bileşen görülür. 30 ila 32 Hz arasında 30 Hz alçak geçiren filtrenin etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 2.4'den de görülebileceği gibi nötron kanallarında 20 Hz'den sonra bilgi yoktur. Beyaz gürültünün ortalama değeri sensörün duyarlılığı hakkında bilgi verir.

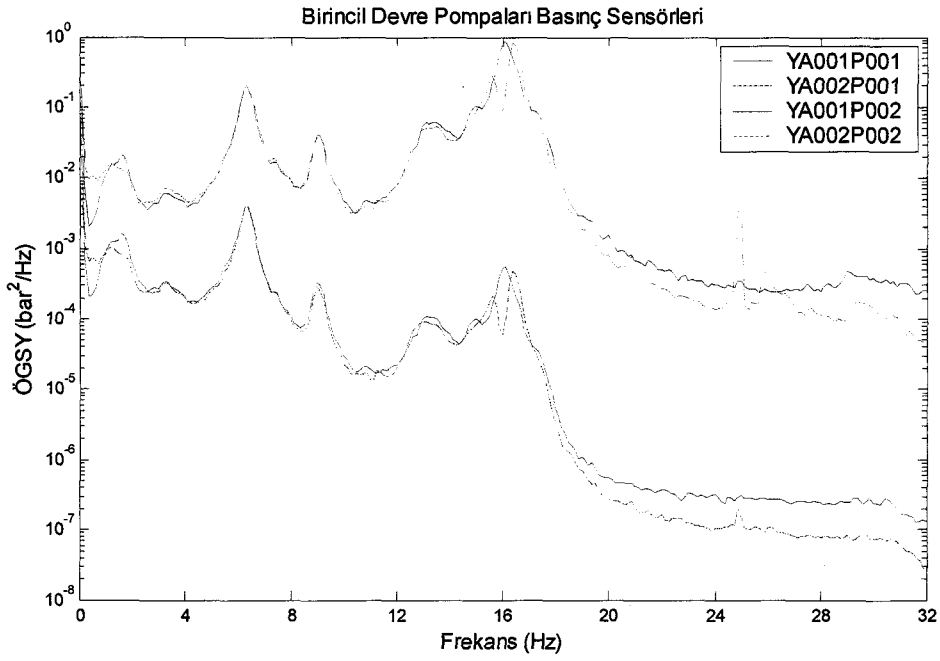
Şekil 2.5’de iki kalp-içi nötron kanalının NÖGSY’ları verilmiştir.



Şekil 2.5 Kalp-içi nötron kanallarının NÖGSY’ları.

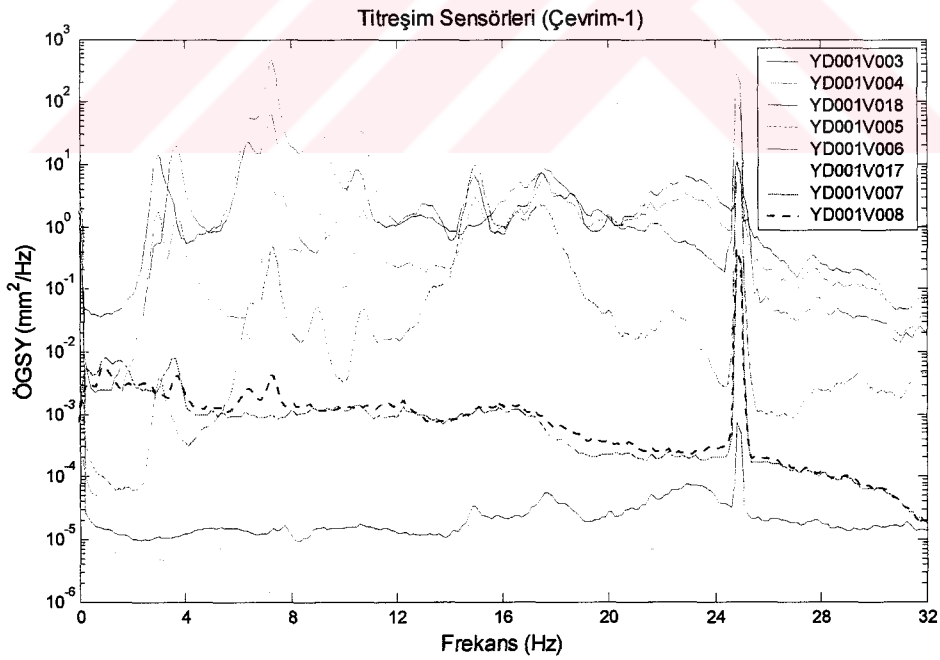
9.2 Hz’deki global reaktivite etkisi burada da açıkça görülmektedir. Kalp kazanının titreşimlerinden kaynaklanan nötron akısı değişimleri kalp içinde anlamlı bir şekilde gözlenememektedir. Birincil devre pompalarının pervanelerinden kaynaklanan 25 Hz’deki bileşen ise açıkça görülmektedir. Kalp-içi nötron kanallarında da 20 Hz’in üstünde bilgi yoktur.

Birincil devre pompaları üzerindeki basınç sensörlerinin ÖGSY’ları (Öz-Güç Spektral Yoğunluğu) Şekil 2.6’da verilmiştir. Basınç sensörlerinde de 20 Hz’in üstünde bilgi yoktur.

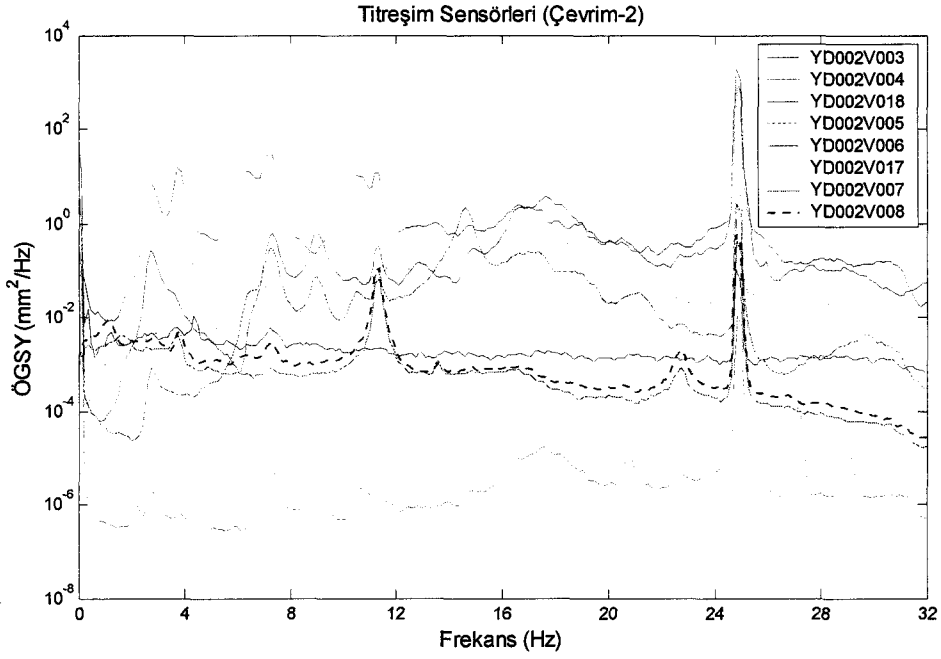


Şekil 2.6 Birincil devre pompaları üzerindeki basınç sensörlerinin ÖGSY'ları.

İki birincil devre pompası üzerinde bulunan titreşim sensörlerinin ÖGSY'ları Şekil 2.7 ve 2.8'de verilmiştir. Titreşim sensörlerinde 32 Hz'in üstünde de bilgi vardır.



Şekil 2.7 Birincil Devre Pompası-1 üzerinde bulunan titreşim sensörlerinin ÖGSY'ları.



Şekil 2.8 Birincil Devre Pompası-2 üzerinde bulunan titreşim sensörlerinin ÖGSY'ları.

2.2.2 MR-Panelli

MR-Panelli 96 kanallı bir sistemdir. Bugün sadece ilk 72 kanalı kullanılmaktadır. Toplam 72 işareti 10 örnek/s hızla örnekleyip DC olarak 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-Paneline örneklenen işaretlerin listesi Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 MR-Panelli İşaret Listesi (ADC çalışma aralığı 0/5 V)

Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Alt Değer	Üst Değer	Birim
0	YD001Y051	Birincil Devre Pompası-1 % Hız	0	110	%
1	YD002Y051	Birincil Devre Pompası-2 % Hız	0	110	%
2	YB001L051	Buhar Generatörü Su Seviyesi (Geniş Bant)	0	12.055	m
3	YB002L051	Buhar Generatörü Su Seviyesi (Geniş Bant)	0	12.055	m
4	RA000P021	İkincil Devre Buhar Basıncı	0	100	bar
5	SF010C014	Düşük Basıncı Türbini Buhar Basıncı	0	60	bar
6	SF010C116	Yoğuşturucu Basıncı	0	100	bar
7	SF010C213	Yoğuşturucu Basıncı	0	100	bar
8	SA011S011	Yüksek Basıncı Türbini Giriş Vanası Konumu	0	100	%
9	SA011S012	Yüksek Basıncı Türbini Giriş Vanası Konumu	0	100	%
10	SA011S013	Yüksek Basıncı Türbini Giriş Vanası Konumu	0	100	%
11	SA011S014	Yüksek Basıncı Türbini Giriş Vanası Konumu	0	100	%
12	SF000U801	Yoğuşturucu Devridaim Vanası Konumu	0	100	%
13	SO010Y020	Türbin-Generatör Grubu Devir Sayısı	45	58.33	1/s
14	RM010P001	Yoğuşturucu Pompa Basıncı	0	40	bar

15	SD011P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-1	70	100	% vak.
16	SD012P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-2	70	100	% vak.
17	SD013P005	Yoğuşturucu Vakum Basıncı-3	70	100	% vak.
18	SD011L001	Yoğuşturucu Su Seviyesi-1	0	1.829	m
19	SD012L001	Yoğuşturucu Su Seviyesi-2	0	1.829	m
20	SD013L001	Yoğuşturucu Su Seviyesi-3	0	1.829	m
21	Kanal 21	Boş	0	100	%
22	YA001P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	0	180	bar
23	YA001P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-1)	0	200	bar
24	YA002P001	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	0	180	bar
25	YA002P002	Birincil Pompa Basıncı (çevrim-2)	0	200	bar
26	YA001T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-1)	275	325	°C
27	RL050P051	Besleme Suyu Akış Basıncı (Buhar Gen.-1)	0	160	bar
28	YA002T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-2)	275	325	°C
29	YA000T101	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-1, 2)	275	325	°C
30	YA001T093	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (Giriş) (çevrim-1)	0	400	°C
31	YA001T096	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (Çıkış) (çevrim-1)	0	400	°C
32	YA002T093	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (Giriş) (çevrim-2)	0	400	°C
33	YA002T096	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (Çıkış) (çevrim-2)	0	400	°C
34	YP001L101	Basınçlandırıcı Su Seviyesi	0	8.22	m
35	Kanal 35	Boş	0	100	%
36	YP001T003	Basınçlandırıcı Su Sıcaklığı	0	400	°C
37	YP001P001	Basınçlandırıcı Su Basıncı	0	200	bar
38	YX003X050	Nötron Detektörü (50)	0	120	%
39	YX003X060	Nötron Detektörü (60)	0	120	%
40	YX003X070	Nötron Detektörü (70)	0	120	%
41	YX003X080	Nötron Detektörü (80)	0	120	%
42	SP010E001	Generatör Aktif Gücü	-125	500	MW
43	SP010E002	Generatör Reaktif Gücü	-350	400	MVA _r
44	TB010F101	Boron/Su Sistemi Su Debisi	0	12	kg/s
45	TB000F101	Boron/Su Sistemi Boron Debisi	0	1.4	kg/s
46	RA001P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-1)	0	100	bar
47	RA002P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2)	0	100	bar
48	RA001F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-1)	0	450	kg/s
49	RA002F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-2)	0	450	kg/s
50	RA001T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-1)	0	350	°C
51	RA002T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-2)	0	350	°C
52	TA020P002	Birincil D. Hacim Kontrol Sist. Tank Basıncı	0	25	bar
53	TA020F001	Birincil D. Hacim Kont. Sist. Debisi (çevrimlere)	0	14	kg/s
54	TA030F001	Birincil D. Hacim Kont. Sist. Debisi (çev.'den)	0	11.2	kg/s
55	TA020L001	Birincil D. Hacim Kont. Sist. Tank Su Seviyesi	0	1.5	m
56	YS000S126	Kont. Çubuğu Pozisyonu L-Bank (1 adım=1 cm)	0	100	adım
57	YS000S116	Kont. Çubuğu Pozisyonu D-Bank (1 adım=1 cm)	0	300	adım
58	RL021F001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-21 Debisi	0	36	kg/s
59	RL022F001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-22 Debisi	0	36	kg/s
60	RL023F001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-23 Debisi	0	36	kg/s
61	RL021P001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-21 Basıncı	0	160	bar
62	RL022P001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-22 Basıncı	0	160	bar
63	RL023P001	Güvenlik Besleme Suyu Pompası-23 Basıncı	0	160	bar
64	YB001L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	4.385	12.055	m
65	YB002L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	4.385	12.055	m
66	YB001L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	4.385	12.055	m
67	YB002L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	4.385	12.055	m
68	RL040F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-1)	0	450	kg/s
69	RL050F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-2)	0	450	kg/s
70	RL040P051	Besleme Suyu Akış Basıncı (Buhar Generatörü-1)	0	160	bar
71	YB001L151	Buhar Generatörü-1 Su Seviyesi	0	12.055	m

MR-işaretlerinin fiziksel değere çevrilmesi işlemi MS-işaretlerinden farklıdır. İşaretlerin lm aralıkları Tablo 2.2’de 4. ve 5. stnlerde alt değer (Ad) ve st değer ($d$) olarak verilmiştir. MR-işaretlerini kaydetmek için kullanılan ADC’nin kayıt bant genişliği $\Delta U = 5 - 0 = 5$ V’dur. MR-işaretlerinin fiziksel değerleri (MR_f):

$$MR_f = \left(MR \cdot \frac{\Delta U}{2^{bit}} \cdot \frac{1}{K} \cdot (\ddot{U}d - Ad) \right) + Ad = \left(MR \cdot \frac{5}{2^{16}} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\ddot{U}d - Ad) \right) + Ad \quad (2.3)$$

şeklinde hesaplanır.

BÖLÜM 3

AC-İŞARETLERLE SENSÖR DOĞRULAMA VE DURUM İZLEME

Tezin bu bölümünde ön işlem den geçirilmiş sensör işaretleri ile sensör doğruluğu araştırılacak ve sisteme ilişkin durum izlemesi aşağıdaki alt başlıklar doğrultusunda incelenecektir. Bu bağlamda sensör güvenilirliği, sensör cevap zamanındaki değişim ve YSA yaklaşımında da sistemin cevap hatasının bir eşik değere göre karşılaştırılması ile belirlenecektir.

3.1. Sensör Cevap Zamanı Tayini ile Sensör Doğrulama

Nükleer güç reaktörlerinde, yüksek sıcaklık ve basıncın yanı sıra şiddetli radyasyon altında çalışan sensörler zamanla korozyona uğrarlar, kristal yapılarında çok sayıda dislokasyon meydana gelir, bunun sonucunda sertleşme görülür. Sensörlerin *cevap zamanlarının* değişip değişmediği kontrol edilerek meydana gelen yapısal değişikliklerin sensörün çalışmasını etkileyip etkilemediği belirlenebilir. Reaktör içindeki sensörlere ulaşarak bunların cevap zamanlarını doğrudan doğruya ölçmek mümkün değildir. Reaktör içindeki bir sensörün ulaşılabilir tek büyüklüğü o sensörün işaretidir. Sensörün işaretlerinden impuls ve birim basamak cevaplarını belirlemek için en çok kullanılan yöntem sensör işaretinin bir *öz-bağımlı* (Auto-Regressive: AR) modelini yaparak, modelin cevap zamanını belirlemektir. Cevap zamanındaki değişim sensörde fiziksel bozulmanın da işaretidir.

3.1.1 Öz-Bağımlı (Auto-Regressive: AR) Model

AR-modeli basitliği ve model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan etkin algoritmaların varlığı sebebiyle çok kullanılan bir metottur (Cohen, 1986). Ancak buradaki istatistiksel problem modelin mertebesinin, yani modeldeki değişkenlerin gecikme sayılarının belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Modelin mertebesi olması gerektiğinden daha küçük seçildiğinde parametrelerin tahmini tutarlı olmamakta,

olması gerektiğinden daha büyük seçildiğinde ise parametrelerin tahmininin varyansı büyük çıkmaktadır. Bu iki durumda da modelden elde edilen sonuçlar güvenilir olmamaktadır. Güvenilir, doğru sonuçlar veren bir model kurabilmek için model mertebelerini hatasız bir şekilde belirlemek gerekmektedir (Shibata, 1976). Model mertebesinin seçiminde en büyük olabilirlik yöntemi her zaman model için olabilecek en büyük dereceyi seçmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile derece seçimi hatalı sonuçlara neden olmaktadır. En büyük olabilirlik yönteminin geliştirilmiş biçimi Akaike (1974) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde farklı sayıda parametreye sahip olan farklı modeller arasından seçim yapılmaktadır. Bu yöntem, her bir modelin ayrı ayrı en büyük olabilirlik fonksiyonunu bulup, olabilirlik fonksiyonunun değeri en büyük olan modeli en uygun model olarak seçmektedir (Schwarz, 1978). AR-modellerinde kullanılan bu tür model seçim kriterlerinin en yaygın kullanılanları, Akaike Bilgi Kriteri (ABK), Schwarz Bilgi Kriteri (SBK) ve Son Öngörü Hatası'dır (SÖH) (Kadılar ve Erdemir, 2000).

Bir rastgele (random) $y(t)$ 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 Δt zaman aralıklarıyla örneklenmiş olsun:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t - i\Delta t) + x(t) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. n değerine modelin mertebesi denir (Thie, 1981).

Düşük model mertebeleri yumuşatılmış (smooth) bir spektral öngörü yapar. Çok yüksek mertebeden modeller spektral öngöründe gerçek olmayan (suni: spurious) detayların ortaya çıkmasına sebep olurlar. AR-model mertebesinin arttırılması öngörü hatasının düşmesini sağlar. Genelde öngörü hatası artan model mertebeleriyle monoton olarak azalır. Bu nedenle optimal model mertebesinin seçimi bir problemdir.

AR-modelinin mertebesinin seçimi için Akaike (1969; 1974) iki farklı kriter önermiştir. Birincisi, Son Öngörü Hatası Kriteridir. Bir AR-modeli için SÖH:

$$S\ddot{O}H_n = \hat{\sigma}_x^2 \left(\frac{N+n-1}{N-n-1} \right) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N alınan örnek sayısı, n AR-modeli mertebesi ve $\hat{\sigma}_x^2$ de öngörü hatasının varyansıdır. Model mertebesi arttıkça varyans monoton olarak küçülür ikinci terim ise büyür.

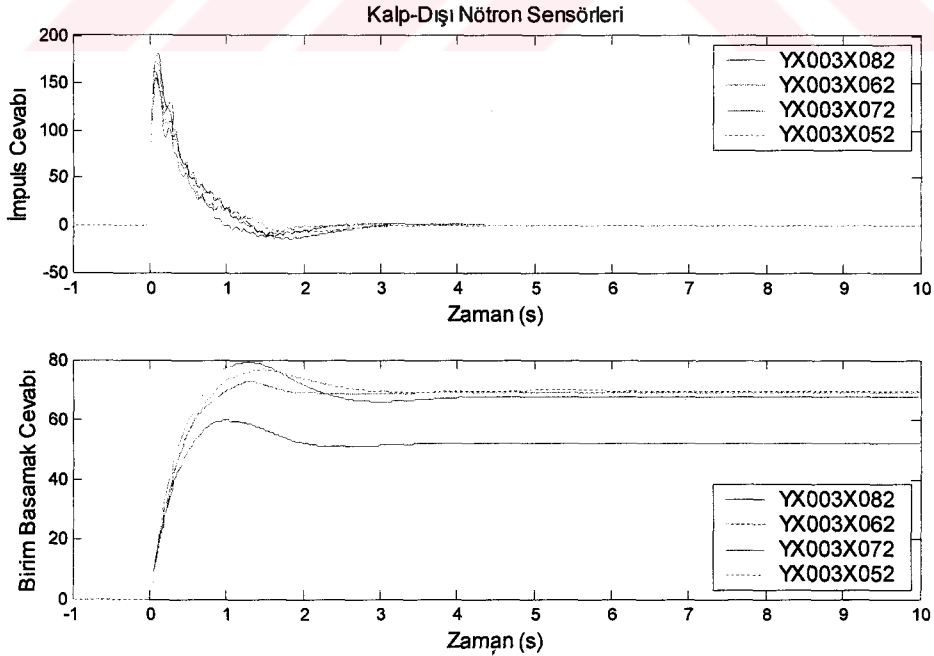
İkinci kriter de Akaike Bilgi Kriteridir:

$$ABK_n = \ln(\hat{\sigma}_x^2) + \frac{2n}{N} \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanır. Model mertebesi arttıkça, ifadenin ikinci terimi ABK'nın büyümesine sebep olurken birinci terimi de monoton olarak azalır (Mitra ve Kaiser, 1993).

3.1.2 Öz-Bağımlı Modelle Sensör Cevap Zamanlarının Belirlenmesi

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde kullanılan dört kalp-dışı nötron sensörünün impuls ve birim basamak cevapları Şekil 3.1'de görülmektedir.



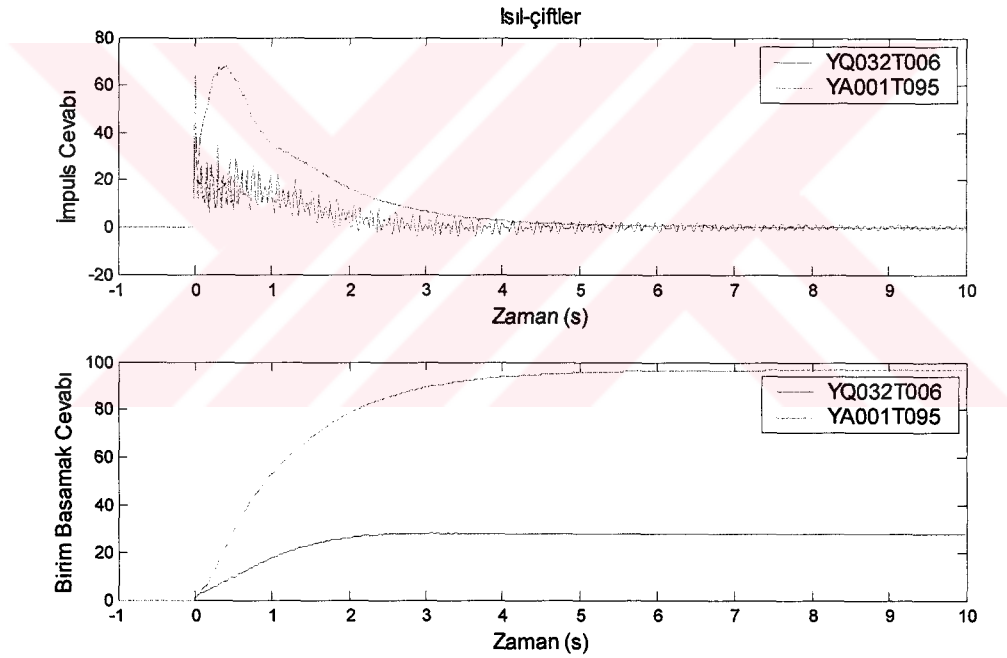
Şekil 3.1 Kalp-dışı nötron sensörlerinin impuls ve birim basamak cevapları.

Birim basamak cevabının, maksimum değerinin $1-e^{-1} = 0.632$ katına ulaşması için gereken süre τ “zaman sabiti” olarak tanımlanır. Kalp-dışı nötron sensörleri için zaman sabitleri Tablo 3.1’de verilmiştir:

Tablo 3.1 Kalp-dışı nötron sensörlerinin zaman sabitleri.

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

Birincil devre suyu giriş sıcaklıklarını ölçen ısı-çiftlerin impuls ve birim basamak cevapları Şekil 3.2’de görülmektedir (YQ032T006 normal çalışmamaktadır).



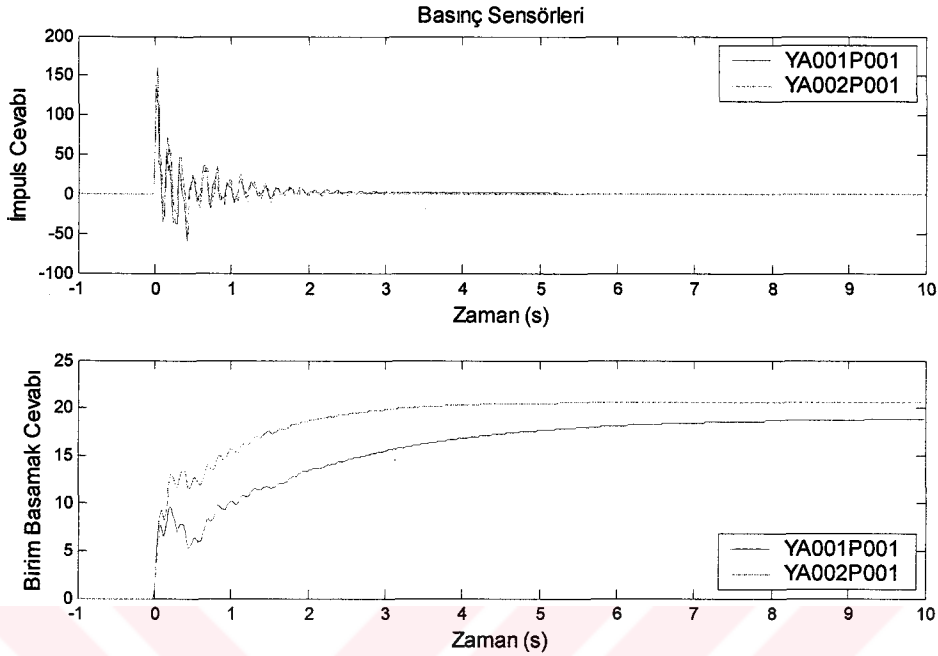
Şekil 3.2 Isıl-çift impuls ve birim basamak cevapları.

Isıl-çiftler için zaman sabitleri Tablo 3.2’de verilmiştir:

Tablo 3.2 Isıl-çiftlerin zaman sabitleri.

Kn	Sensör Kodu	Zaman Sabiti τ (s)
0	YQ032T006	1.0088
1	YA001T095	1.2514

Birincil devre pompası basınç sensörlerinin impuls ve birim basamak cevapları Şekil 3.3’de görülmektedir



Şekil 3.3 Basınç sensörü impuls ve birim basamak cevapları.

Basınç sensörleri için zaman sabitleri Tablo 3.3’de verilmiştir

Tablo 3.3 Basınç sensörlerinin zaman sabitleri.

Kn	Sensör Kodu	Zaman Sabiti τ (s)
11	YA001P001	1.6011
12	YA002P001	0.5639

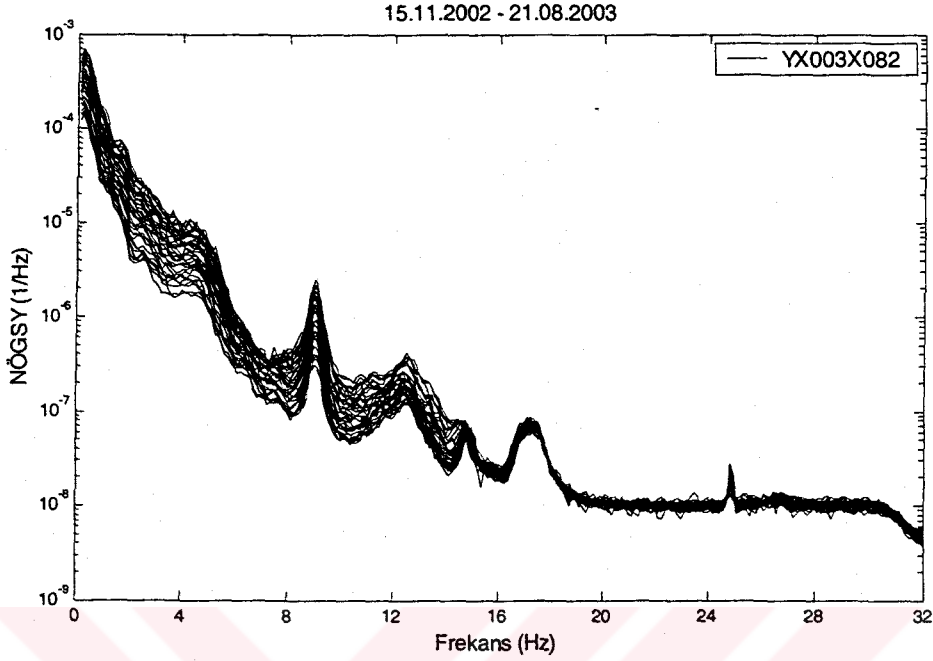
3.2 Yapay Sinir Ağlarıyla Nötron Sensörlerinin Doğrulanması

Bu bölümde önce boron konsantrasyonu ile nötronik gürültü arasındaki ilişki verilir ve çeşitli YSA yaklaşımları sunulacaktır.

3.2.1 Boron Konsantrasyonu – Reaktivite İlişkisi

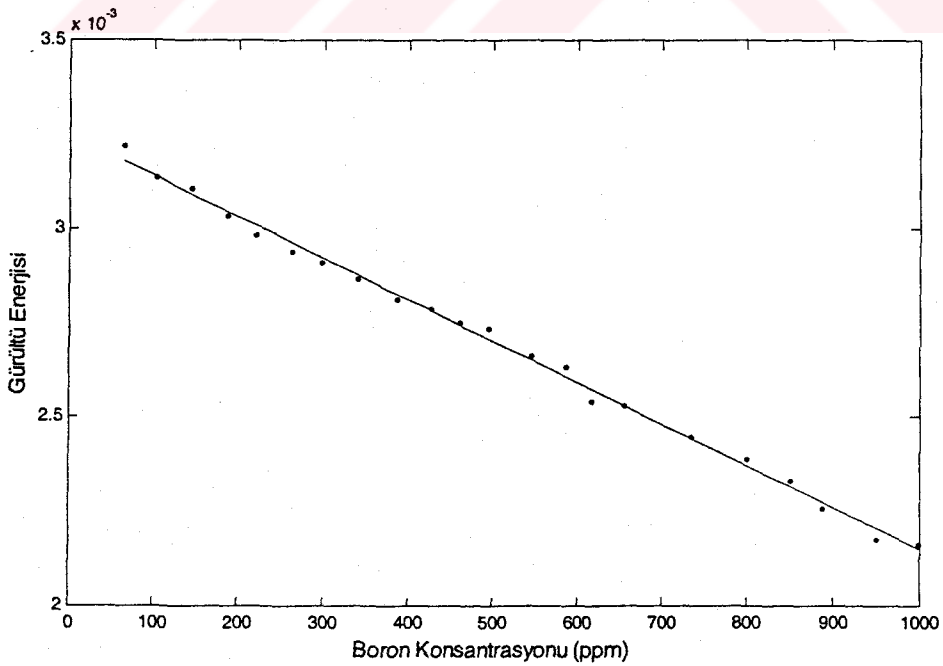
EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali’nde, reaktör kontrolüne yardımcı olmak için yanıcı zehir olarak boron kullanılmaktadır. Reaktör çalıştıkça reaktör suyunda boron konsantrasyonu doğrusal olarak azalmaktadır. Boron azaldıkça nötronik gürültü artar. Bu artış nötron sensörlerinin NÖGSY’lerinde düşük frekanslarda görülür.

Şekil 3.4'de 15.11.2002-21.08.2003 tarihleri arasında birer hafta aryla YX003X082 nötron sensörünün NÖGSY'nun değişimi görülmektedir.



Şekil 3.4 Boron konsantrasyonunda azalmayla nötronik gürültüdeki artış.

Dolayısıyla gürültünün enerjisiyle boron konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki vardır. Boron konsantrasyonuna göre nötronik gürültünün enerjisindeki değişim Şekil 3.5'de görülmektedir.



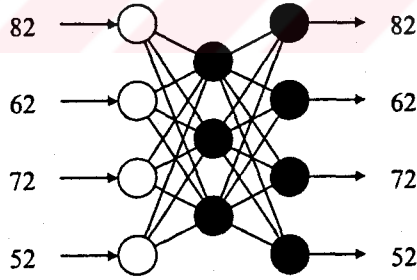
Şekil 3.5 Boron konsantrasyonunda azalmayla nötronik gürültü enerjisindeki artış.

Boron konsantrasyonundaki değişimle nötronik gürültüde meydana gelen değişim nötron sensörlerinin işaretlerinde asıl 10.5 Hz'in altındaki frekanslarda kendisini gösterir. Kalp kazanı titreşimlerinden doğan 10.5 – 20 Hz arasındaki frekans bileşenlerinde, bu etkinin frekans yükseldikçe zayıfladığını görürüz. 20 Hz'den sonra görülen beyaz gürültüdür. Bu gürültünün seviyesi, sensöre giren partikül başına üretilen yük miktarının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla sensörün duyarlılığını gösterir.

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.

3.2.2 Öz-İlişkili (Auto-Associative) YSA Yaklaşımı

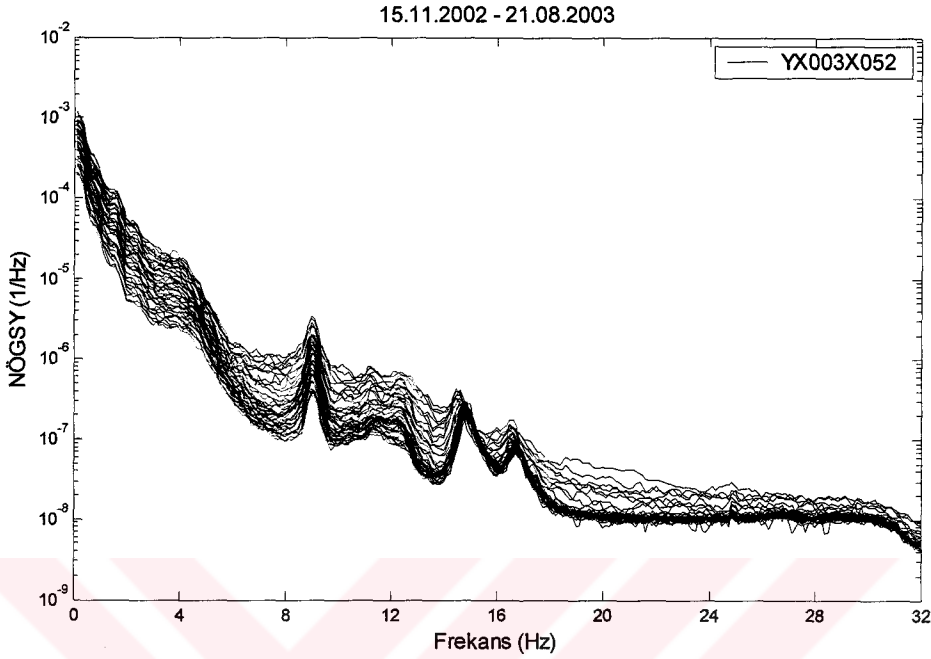
İlk yaklaşımda girişinde ve çıkışında aynı sensör işaretleri olan öz-ilişkili bir YSA kullanılmıştır. Dört nötron sensörü için, gizli tabakasında üç nöron ve çıkış tabakasında dört nöron olan ileri beslemeli bir YSA, Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım (back-propagation) algoritmasıyla eğitilmiştir. Bu YSA'nın topolojisi Şekil 3.6'da görülmektedir. Şekilde görülen rakamlar YX003X082, YX003X062, YX003X072, YX003X052 kodlu nötron sensörlerini göstermektedir.



Şekil 3.6 Öz-İlişkili YSA topolojisi.

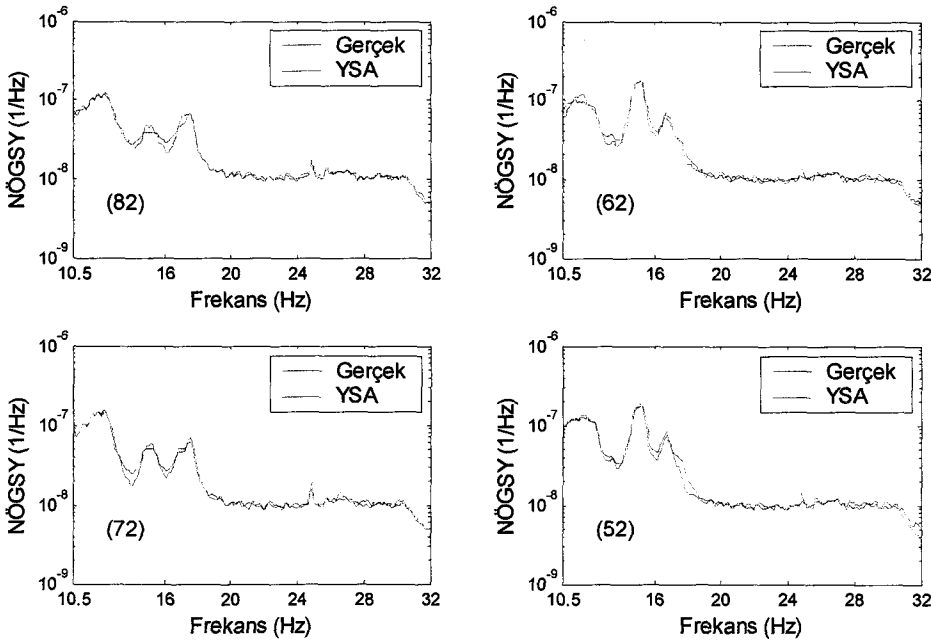
Zaman-tanım bölgesinde nötron sensörlerinin işaret-gürültü oranı çok küçük olduğundan (gürültü büyük olduğundan) ve boron konsantrasyonundaki değişimle birlikte düşük frekanslı gürültü bileşenleri zamanla arttığından dolayı YSA'ları iyi sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle YSA'na sensörlerin NÖGSY'lerinin kalp kazanı titreşimlerini ve beyaz gürültüyü kapsayan kısmı (10.5 – 32 Hz arasındaki kısım) öğretilmiştir.

16.05.2003 tarihinden itibaren YX003X052 numaralı nötron sensörü bozulmuş, sensörün gürültüsü Şekil 3.7’de görüldüğü gibi giderek artmaya başlamıştır. Sensörün beyaz gürültü seviyesindeki artış, duyarlılığının azaldığını göstermektedir.



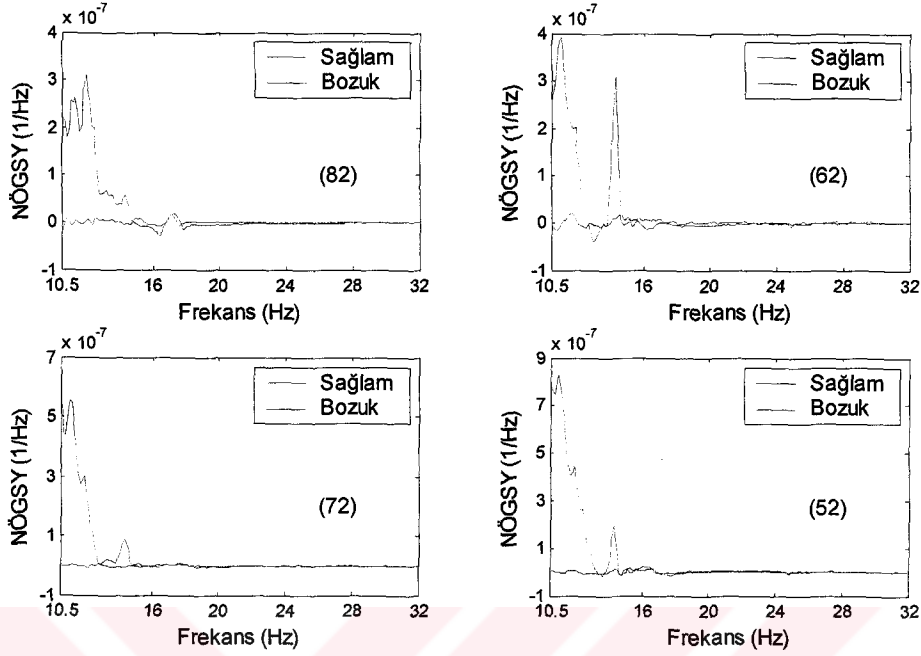
Şekil 3.7 YX003X052 sensörünün frekans bileşenlerindeki aşamalı değişim.

Sağlam sensör işaretleriyle eğitilen YSA, içlerinde bozuk sensörün de bulunduğu işaret kümeleriyle denenmiştir. Şekil 3.8’de YSA’nın sağlam sensör girişleri için verdiği cevap görülmektedir.



Şekil 3.8 Sağlam sensörlerden oluşan deneme kümesiyle YSA’nın sınanması.

Şekil 3.9’da dört girişin de sağlam ve bir girişin hatalı olması durumlarında YSA’nın hatası görülmektedir.



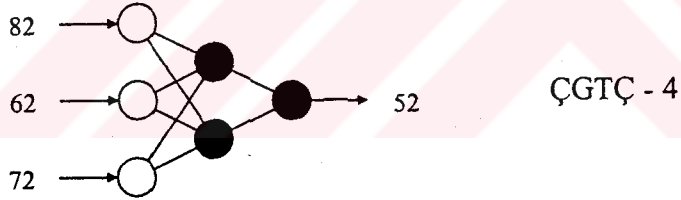
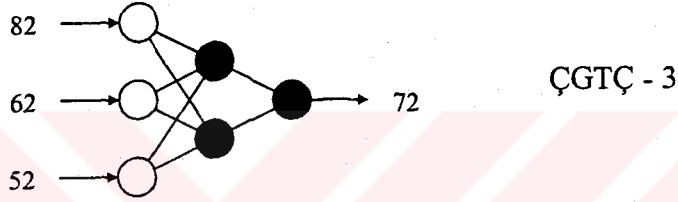
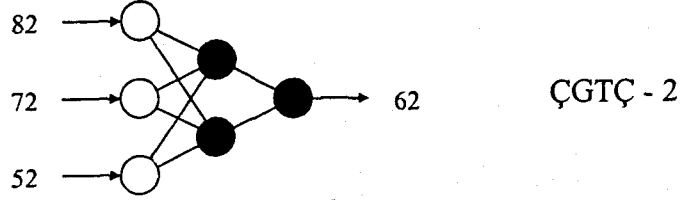
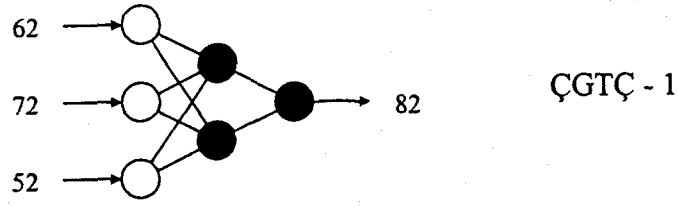
Şekil 3.9 Sağlam ve arızalı girişler için YSA hatasının değişimi.

$1-2 \cdot 10^{-7}$ değerine konulacak bir eşik sensör hatasını tesbit eder.

Öz-ilişkili YSA’daki temel problem hatanın sensörden mi yoksa sistemden mi kaynaklandığını belirleyememesidir.

3.2.3 Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA Yaklaşımı

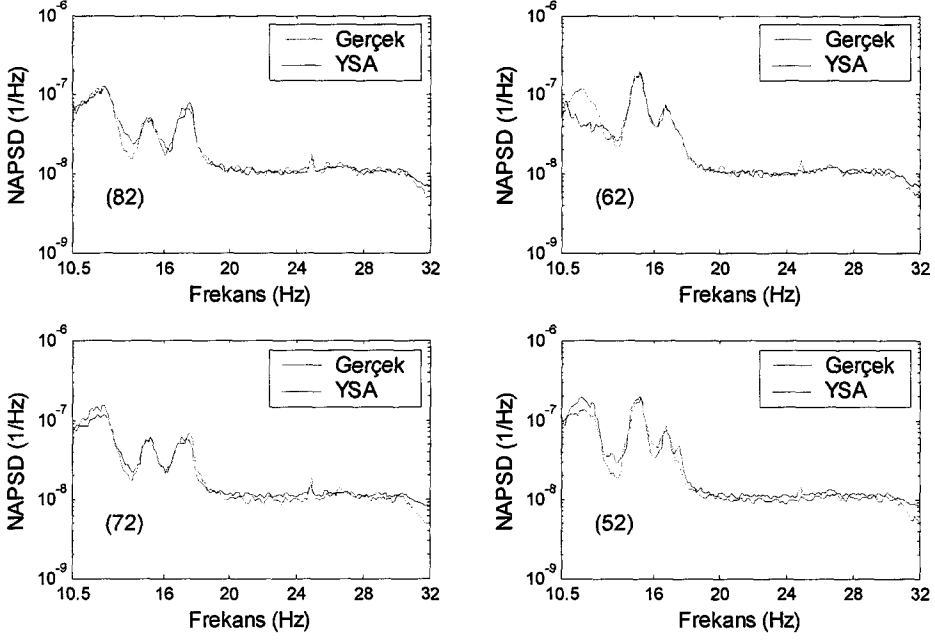
Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA yaklaşımında yapay sinir ağı, diğer sensörlerin çıkışlarından bir sensörün çıkışını belirlemek için eğitilir. Bu işlem her sensör için ayrı ayrı yapılır. Dolayısıyla ÇGTÇ sistemi sensör sayısı kadar sinir ağına sahiptir. Her sinir ağının, toplam sensör sayısından bir eksik sayıda girişi vardır. Çıkış tabakasında bir nöron bulunur. Sinir ağlarının her biri bir gizli tabakaya sahiptir. Bu çalışmada dört nötron sensörü bulunduğu için üç girişli, gizli tabakasında iki nöron ve çıkışında da bir nöron bulunan ileri-beslemeli dört yapay sinir ağı Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım algoritmasıyla eğitilmiştir. Kullanılan YSA’nın topolojisi Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10 ÇGTÇ yapay sinir ağları.

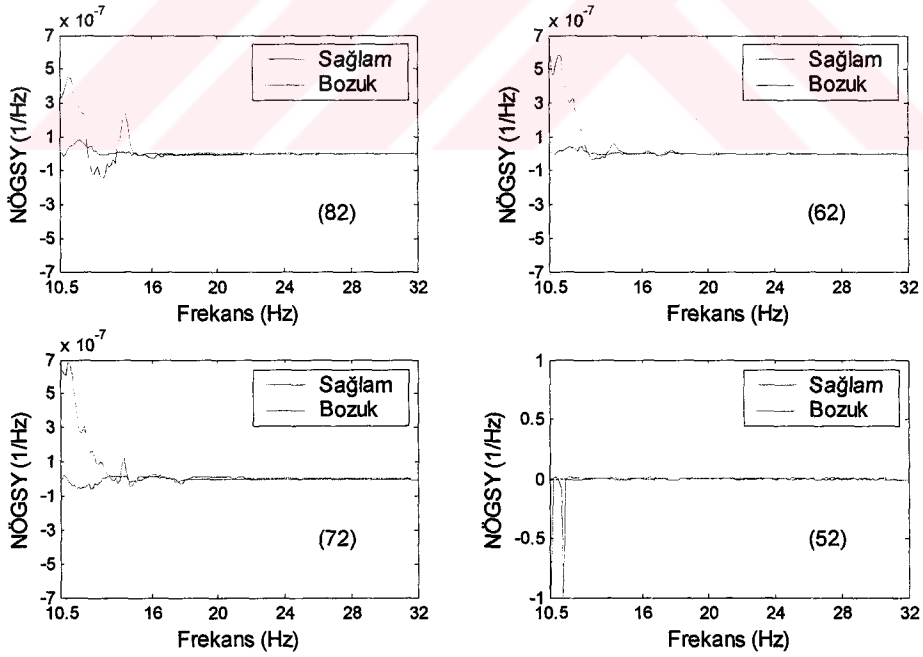
Şekilde görülen rakamlar YX003X082, YX003X062, YX003X072, YX003X052 kodlu nötron sensörlerini göstermektedir.

Şekil 3.11'de ÇGTÇ-YSA'larının, sağlam sensörlere ait girişlerle nötron sensörlerinin NÖGSY'larını simüle etmesi görülmektedir.



Şekil 3.11 ÇGTÇ-YSA'larının sağlam girişler için nötron sensörlerinin NÖGSY'larını simüle etmesi.

Şekil 3.12'de sağlam sensör işaretleriyle eğitilen ÇGTÇ-YSA'nın girişlerine arızalı sensör işareti verildiği zaman hataların büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 3.12 Sağlam ve arızalı girişler için YSA hatasının değişimi.

$-2.10^{-7} - 2.10^{-7}$ aralığı bir eşik olarak alınırsa sensör hatası tesbit edilir.

38

Birincil devre suyunda meydana gelen basınç salınımları kalp kazanında da titreşimlere neden olur. Normalde bu titreşimlerin genlikleri 10 – 20 μm 'ler düzeyinde kalır. Fakat zaman içinde kalp kazanını basınç kabına bağlayan civatalarda aşınmalar meydana gelebilir. Bu durumda kalp kazanı titreşimlerinin genliği büyür. Kazanın yakıt çubuklarına çarpması ve yakıt zarflarına zarar vermesi ihtimali doğar. Palisades (Fry ve diğ., 1974; 1975; Thie, 1975) ve Trino Vercellese (Calcagno ve Cioli, 1970) nükleer güç santrallerinde müsaade edilen düzeyin üstünde titreşimler görülmüş ve kaza durumu gerçekleşmeden reaktörler durdurulmuştur.

Bir kaza sebebi olduğu için PWR'lerde kalp kazanı titreşimlerinin izlenmesi çok önemlidir. Kalp kazanı titreşimlerinin genlik ve doğrultuları, reaktör basınç kabı etrafına yerleştirilmiş olan kalp-dışı nötron detektörlerinin (Şekil 3.13) işaretlerinden belirlenebilir.

Literatürde kalp kazanı titreşimlerinin belirlenmesi üzerine ilk çalışma J. Thie (1975) tarafından yapılmıştır. İki yıl sonra Dragt ve Türkcan (1977) tarafından geliştirilen metot daha sonra Türkcan tarafından vektör işlemcisi (array processor) kullanılarak çevrim-içi uygulanmıştır (Türkcan, 1982; 1985; 1986). Daha sonra zaman ve frekans-tanım bölgesinde analizlerle metot daha da geliştirilmiştir (Pázsit ve diğ. 1998; Berta ve Pór, 1999; Lipcsei ve Kiss, 2000).

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin kalp kazanı çevresinde 90° açıyla her bir seviyede dört tane olmak üzere dört seviyede yerleştirilmiş 16 kalp-dışı nötron detektörü vardır. Bunlar saat yönünde 50°, 140°, 230° ve 320° konumlarına yerleştirilmiştir. Üstteki iki seviyede bulunan detektörlerin işaretleri alt alta seri ve alttaki iki seviyede bulunan detektörlerin işaretleri de alt alta seri bağlanarak işaret işleme sistemine verilmektedir.

Kalp kazanıyla basınç kabı arasındaki η aralığı değiştikçe su içinden geçen nötronların miktarı değiştiği için kalp-dışı nötron detektörlerinin akımı da değişir.

Kalp kazanı bir sarkaç gibi yanal (lateral) hareketler yaptığında kalp-dışı nötron detektörlerinin akımları (i_0 ortalama değer olmak üzere):

$$\frac{i(t)}{i_0} - 1 = \frac{\Delta i(t)}{i_0} = -\mu \Delta \eta(t) \quad (3.4)$$

şeklinde değişir. Çünkü tek boyutlu modele göre nötronların yutulması $e^{-\mu(x+\Delta x)}$ ifadesine bağlı olacaktır.

μ su aralığında, fisyonndan doğan hızlı nötronlar için ortalama makroskobik tesir kesitidir:

$$\mu = N_0 \sigma \rho \quad (3.5)$$

Bütün PWR'ler için $\rho \cong 0.74 \text{ g/cm}^3$ olduğundan yukarıdaki formülden hesaplanan $\mu=0.015 \text{ mm}^{-1}$ değeri kullanılabilir. Bu sadece yaklaşık bir değerdir. Gerçekte μ 'nün değeri hesap metoduna veya seçilen reaktör geometrisine göre yapılan ölçümlere bağlıdır. Tablo 3.4'de çeşitli kaynaklarda kullanılan μ değerleri verilmiştir:

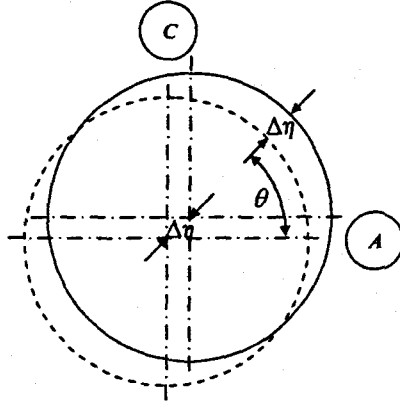
Tablo 3.4 Literatürde verilen μ değerleri

$\mu (\text{mm}^{-1})$	Kaynak
0.01	Tek boyutta tesir kesitlerinden.
0.015	İyon odası duyarlılığı ölçümlerinden.
0.018	İki boyuta uyarlanmış tek boyutlu tesir kesiti hesaplarından.
0.009 veya 0.006	0 ve 180° konumlarındaki detektörler için, yaklaşık iki boyutlu transport denklemi çözümlerinden.
0.012	Tek boyutlu transport denklemi çözümlerinden.
$0.016\rho = 0.012$	Bir PWR kazanı maketi üzerinde, oda sıcaklığında, noktasal nötron kaynağı kullanılarak yapılan ölçümlerden. ρ : yoğunluk.
0.017	Kalp kazanı ve kalp-dışı nötron detektörleri üzerindeki ivmeölçerler arasında ölçülen transfer fonksiyonlarından.

Kalp kazanının üst ve alt seviyelerinde kazanı çevreleyen detektörler kullanılarak kalp kazanı titreşimleri iki boyutta ve her iki seviye için incelenebilir. Eğer bir detektör kalp kazanının hareket yönüyle aynı doğrultuda değilse dolayısıyla hareket doğrultusuna Şekil 3.14'de görüldüğü gibi bir θ açısı yapıyorsa bu detektörün işaretleri, gözlem eksenine (monitoring axis) göre:

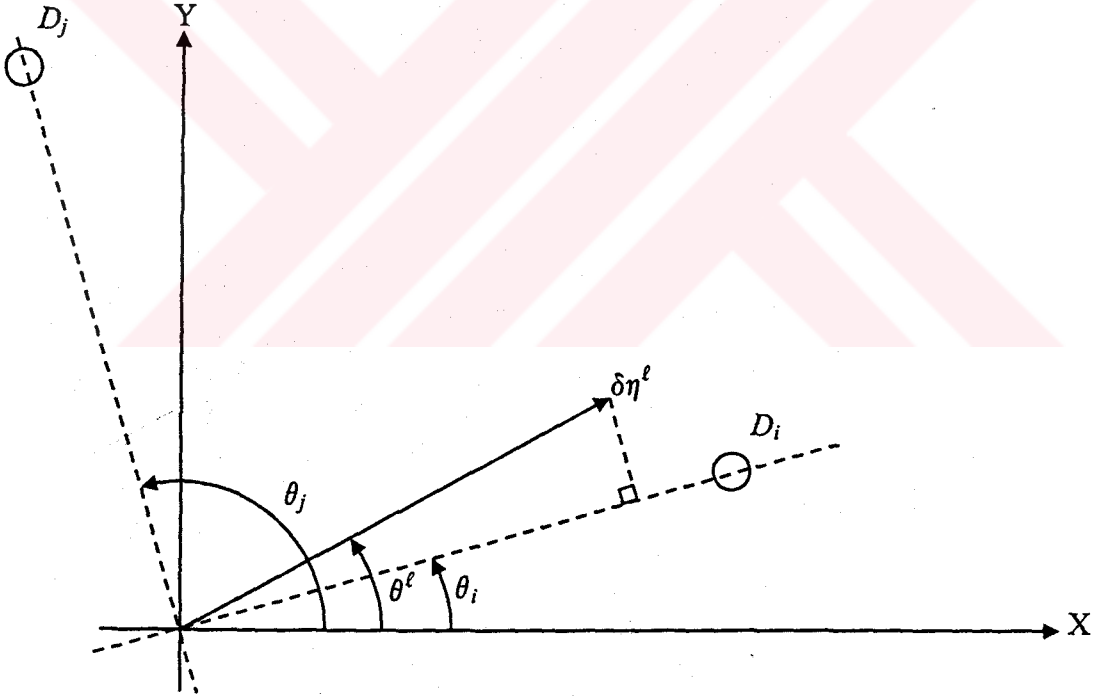
$$\left. \begin{array}{l} \Delta i_A / \Delta i_0 \\ \Delta i_C / \Delta i_0 \end{array} \right\} = -\mu \Delta \eta \begin{cases} \cos \theta \\ \sin \theta \end{cases} \quad (3.6)$$

şeklinde olacaktır (Thie, 1981).



Şekil 3.14 Nötron detektörlerinin kalp kazanına göre konumları.

İki nötron detektörü D_i ve D_j 'nin (Şekil 3.15) güç spektrumlarında görülen gürültü δx^ℓ iki bağımsız gürültü kaynağının (global reaktivite etkisi δr ve θ^ℓ doğrultusundaki kalp kazanı titreşimi $\delta \eta^\ell$) etkilerinin toplamıdır.



Şekil 3.15 Nötron detektörleri ve kalp kazanı titreşim doğrultusu.

Reaktivite salınımlarından kaynaklanan gürültü bileşeni bütün detektörlerden aynı şekilde algılandığı için en basit yaklaşımla $f(\theta) = \text{sabit}$ şeklinde öngörülebilir. θ^ℓ doğrultusundaki kalp kazanı titreşiminin gürültü etkisinin, θ doğrultusunda bir

detektörden görülen kısmı ise $f(\theta) = \text{sabit} \cdot \cos(\theta - \theta')$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda θ_i doğrultusundaki detektörün işaretlerinde görülen toplam gürültü:

$$\delta x_i' = \delta r + \mu \delta \eta' \cos(\theta_i - \theta'), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3.8)$$

şeklinde yazılır (Burada $\mu = 0.15 \text{ cm}^{-1}$ 'dir). D_i ve D_j detektörleri arasındaki ÇGSY (n , frekans noktası sayısını göstermek üzere)

$$P_{x_j}(n) = P_{rr}(n) + \mu^2 P_{\eta\eta}'(n) \cos(\theta_i - \theta') \cos(\theta_j - \theta') + \mu P_{rr}'(n) \cos(\theta_i - \theta') + \mu P_{r\eta}'(n) \cos(\theta_j - \theta') \quad (3.9)$$

olarak yazılır. Burada θ_i , D_i detektörünün referans eksenle yaptığı açısı; $P_{rr}(n)$ ve $P_{\eta\eta}'(n)$, δr ve $\delta \eta'$ 'nin ÖGSY'ları, $P_{rr}'(n)$ ve $P_{r\eta}'(n)$ de ÇGSY'larıdır. Bunların arasında (F Fourier dönüşümünü göstermek üzere):

$$T_1'(n) = \frac{F\{\delta r(k)\}}{F\{\delta x'(k)\}} \quad (3.10)$$

$$T_2'(n) = \frac{F\{\delta \eta'(k)\}}{F\{\delta x'(k)\}} \quad (3.11)$$

$$T'(n) = T_1'(n) \cdot T_2'(n) \quad (3.12)$$

transfer fonksiyonları tanımlanırsa

$$P_{rr}'(n) = |T_1'(n)|^2 P_{xx}'(n) \quad (3.13)$$

$$P_{\eta\eta}'(n) = |T_2'(n)|^2 P_{xx}'(n) \quad (3.14)$$

$$P_{r\eta}'(n) = T'(n) P_{xx}'(n) \quad (3.15)$$

buradan

$$P_{rr}^{\ell}(n)P_{\eta\eta}^{\ell}(n)=|T^{\ell}(n)|^2[P_{xx}^{\ell}(n)]^2 \quad (3.16)$$

elde edilir. $\delta\eta^{\ell}$ 'nin ilintisiz olduğu kabulüyle, D_i ve D_j detektörleri arasındaki ÇGSY'nun reel ve imajiner kısımları:

$$\begin{aligned} \text{Re}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} &= P_{rr}(n) + \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos(\theta_i - \theta^{\ell}) \cos(\theta_j - \theta^{\ell}) + \\ &+ \mu \text{Re}\{T^{\ell}(n)\} P_{xx}^{\ell}(n) \{\cos(\theta_i - \theta^{\ell}) + \cos(\theta_j - \theta^{\ell})\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\text{Im}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = \mu \text{Im}\{T^{\ell}(n)\} P_{xx}^{\ell}(n) \{\cos(\theta_i - \theta^{\ell}) - \cos(\theta_j - \theta^{\ell})\} \quad (3.18)$$

Her frekans için δr ve $\delta\eta^{\ell}$ 'ye bağlı olarak δx^{ℓ} değerleri ℓ doğrultularına göre hesaplanıp süperpoze edilebileceğinden güç spektrumlarının toplam etkisi:

$$\text{Re}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = \sum_{\ell} \left[P_{rr}(n) + \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos(\theta_i - \theta^{\ell}) \cos(\theta_j - \theta^{\ell}) + \right. \\ \left. + \mu \text{Re}\{T^{\ell}(n)\} P_{xx}^{\ell}(n) \{\cos(\theta_i - \theta^{\ell}) + \cos(\theta_j - \theta^{\ell})\} \right] \quad (3.19)$$

$$\text{Im}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = \sum_{\ell} \left[\mu \text{Im}\{T^{\ell}(n)\} P_{xx}^{\ell}(n) \{\cos(\theta_i - \theta^{\ell}) - \cos(\theta_j - \theta^{\ell})\} \right] \quad (3.20)$$

şeklinde yazılır. Düzenlenerek:

$$\begin{aligned} \text{Re}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} &= A_1 + A_2 \cos(\theta_i + \theta_j) + A_3 \sin(\theta_i + \theta_j) + A_4 \cos(\theta_i - \theta_j) + \\ &+ A_5 (\cos \theta_i + \cos \theta_j) + A_6 (\sin \theta_i + \sin \theta_j) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\text{Im}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = B_1 (\cos \theta_i - \cos \theta_j) + B_2 (\sin \theta_i - \sin \theta_j) \quad (3.22)$$

(C^A ve C^B detektörlerin geometrik konumları ile ilgili olmak üzere):

$$\text{Re}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = \sum_{m=1}^6 A_m(n) C_m^A(i, j) \quad \text{Im}\{P_{x_j x_j}^{\ell}(n)\} = \sum_{m=1}^2 B_m(n) C_m^B(i, j) \quad (3.23)$$

$$A_1(n) = \sum_{\ell} P_{rr}(n) \quad C_1^A(i, j) = 1 \quad (3.24)$$

$$A_2(n) = \frac{1}{2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos 2\theta^{\ell} \quad C_2^A(i, j) = \cos(\theta_i + \theta_j) \quad (3.25)$$

$$A_3(n) = \frac{1}{2} \sum_t \mu^2 P_{\eta\eta}^t(n) \sin 2\theta^t \quad C_3^A(i, j) = \sin(\theta_i + \theta_j) \quad (3.26)$$

$$A_4(n) = \frac{1}{2} \sum_t \mu^2 P_{\eta\eta}^t(n) \quad C_4^A(i, j) = \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3.27)$$

$$A_5(n) = \sum_t \mu \operatorname{Re}\{T^t(n)\} P_{xx}^t(n) \cos \theta^t \quad C_5^A(i, j) = \cos \theta_i + \cos \theta_j \quad (3.28)$$

$$A_6(n) = \sum_t \mu \operatorname{Re}\{T^t(n)\} P_{xx}^t(n) \sin \theta^t \quad C_6^A(i, j) = \sin \theta_i + \sin \theta_j \quad (3.29)$$

$$B_1(n) = \sum_t \mu \operatorname{Im}\{T^t(n)\} P_{xx}^t(n) \cos \theta^t \quad C_1^B(i, j) = \cos \theta_i - \cos \theta_j \quad (3.30)$$

$$B_2(n) = \sum_t \mu \operatorname{Im}\{T^t(n)\} P_{xx}^t(n) \sin \theta^t \quad C_2^B(i, j) = \sin \theta_i - \sin \theta_j \quad (3.31)$$

şeklinde yazılır. Bilinmeyen altı adet A değerinin belirlenebilmesi için detektörler arasında en az altı birbirinden bağımsız çapraz ilişki bulunmalıdır. Bu nedenle en az dört detektöre ihtiyaç vardır. Dört ya da daha çok detektör için her detektör geometrisinde lineer en küçük kareler metodu kullanılabilir. N adet detektör için olası çapraz ilişkiler sayısı:

$$K = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!} = \frac{1}{2} N(N-1) \quad (3.32)$$

olmak üzere 1'den K 'ya kadar numaralansın. Bir n frekansı için çapraz güç spektrumlarının reel kısımları

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 - \theta_2) & \cos \theta_1 + \cos \theta_2 & \sin \theta_1 + \sin \theta_2 \\ 1 & \cos(\theta_1 + \theta_3) & \sin(\theta_1 + \theta_3) & \cos(\theta_1 - \theta_3) & \cos \theta_1 + \cos \theta_3 & \sin \theta_1 + \sin \theta_3 \\ 1 & \cos(\theta_1 + \theta_4) & \sin(\theta_1 + \theta_4) & \cos(\theta_1 - \theta_4) & \cos \theta_1 + \cos \theta_4 & \sin \theta_1 + \sin \theta_4 \\ 1 & \cos(\theta_2 + \theta_3) & \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 - \theta_3) & \cos \theta_2 + \cos \theta_3 & \sin \theta_2 + \sin \theta_3 \\ 1 & \cos(\theta_2 + \theta_4) & \sin(\theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_2 - \theta_4) & \cos \theta_2 + \cos \theta_4 & \sin \theta_2 + \sin \theta_4 \\ 1 & \cos(\theta_3 + \theta_4) & \sin(\theta_3 + \theta_4) & \cos(\theta_3 - \theta_4) & \cos \theta_3 + \cos \theta_4 & \sin \theta_3 + \sin \theta_4 \end{bmatrix}$$

$$P_k(n) = \sum_{m=1}^6 A_m(n) C_{mk}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.33)$$

şeklinde yazılabilir (k indisi detektörlerin ikili kombinasyonlarını gösterir. Örneğin: $i=1, j=2$ için $k=1$). Denklem 3.33'den A_m 'i çekersek, ağırlıklar matrisi

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C})^{-1} \quad (3.34)$$

olmak üzere

$$A_m(f) = \sum_{k=1}^N W_{mk} P_k(n) \quad (3.35)$$

elde edilir.

Bir $\delta\eta^\ell$ harmonik osilatörünün n frekansındaki titreşim enerjisi (c kütle ve sertlikten (stiffness) belirlenen bir sabit olmak üzere):

$$\frac{1}{2} c (\delta\eta^\ell)^2 \quad (3.36)$$

şeklinde yazılır. Kalp kazanı titreşimleri (KKT) için öngörülen lineer modele göre belirli bir n frekansında herhangi bir θ açısı doğrultusundaki toplam titreşim enerjisi:

$$U(n, \theta) = \frac{1}{2} c \sum_i (\delta\eta^\ell(n))^2 \cos^2(\theta - \theta^\ell) \quad (3.37)$$

olarak hesaplanır.

$(\delta\mu^\ell(n))^2$ 'nin umulan değeri:

$$E[(\delta\eta^\ell(n))^2] = P_{\eta\eta}^\ell(n) \quad (3.38)$$

olduğu için

$$U(n, \theta) = \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} \sum_i \mu^2 P_{\eta\eta}^\ell(n) \cos^2(\theta - \theta^\ell) \quad (3.38)$$

şeklinde yazılır.

Maksimum enerji, U 'nun türevinin 0 olduğu θ_0 doğrultusunda olacaktır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(n, \theta)}{\partial \theta} &= -\frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \sin(2(\theta - \theta^{\ell})) = \\ &= -\frac{c}{\mu^2} \left(\frac{1}{2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos 2\theta^{\ell} \right) \sin 2\theta + \frac{c}{\mu^2} \left(\frac{1}{2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \sin 2\theta^{\ell} \right) \cos 2\theta = 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

A katsayıları yerine konulup düzenlenirse:

$$-A_2(n) \sin 2\theta + A_3(n) \cos 2\theta = 0 \Rightarrow \theta_0 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{A_3(n)}{A_2(n)} \right) \quad (3.40)$$

olarak bulunur.

$$\begin{aligned} U(n, \theta_0) &= \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos^2(\theta_0 - \theta^{\ell}) \\ &= \frac{1}{4} \frac{c}{\mu^2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) + \frac{1}{4} \frac{c}{\mu^2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \cos 2\theta^{\ell} \cos 2\theta_0 + \\ &\quad + \frac{1}{4} \frac{c}{\mu^2} \sum_{\ell} \mu^2 P_{\eta\eta}^{\ell}(n) \sin 2\theta^{\ell} \sin 2\theta_0 \\ &= \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} A_4(n) + \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} A_2(n) \cos 2\theta_0 + \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} A_3(n) \sin 2\theta_0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Denklem 3.41'in ilk terimi θ 'dan bağımsızdır ve toplam titreşim enerjisini gösterir.

$$\tan 2\theta_0 = \frac{A_3(n)}{A_2(n)} \quad (3.42)$$

$$\sin 2\theta_0 = \frac{A_3(n)}{\sqrt{(A_2(n))^2 + A_3(n)^2}} \quad (3.43)$$

$$\cos 2\theta_0 = \frac{A_2(n)}{\sqrt{(A_2(n))^2 + A_3(n)^2}} \quad (3.44)$$

olduğundan

$$U(n, \theta_0) = \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} A_4(n) + \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} \sqrt{(A_2(n))^2 + A_3(n)^2} \quad (3.45)$$

Yazılır. Bu maksimum titreşim enerjisi Denklem 3.36'da verilen maksimum genliğe karşılık geldiğinden

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} c u_{\max}^2(n, \theta_0) &= \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} \sqrt{(A_2(n))^2 + A_3(n)^2} + \frac{1}{2} \frac{c}{\mu^2} A_4(n) \\ u_{\max}(n, \theta_0) &= \frac{1}{\mu} \sqrt{\left(A_4(n) + \sqrt{A_2(n)^2 + A_3(n)^2} \right)} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Bu denklemlerden reaktivite (*REA*), kalp kazanı titreşimlerinin genliği (*KKT*) ve doğrultuları (*YÖN*) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$REA(n) = \sqrt{A_1(n)} \quad (3.47)$$

$$KKT(n) = \frac{1}{\mu} \sqrt{A_4(n) + \sqrt{A_2(n)^2 + A_3(n)^2}} \quad (3.48)$$

$$YÖN(n) = \frac{1}{2} \arctan \frac{A_3(n)}{A_2(n)} \quad (3.49)$$

Berta ve Pór (1999) yukarıda belirtilen iki gürültü kaynağına ölçme sisteminin elektroniginden kaynaklanan beyaz gürültüyü (w) de eklemek suretiyle toplam gürültüyü

$$\delta x = \delta r + \mu \delta \eta \cos(\theta_i - \theta') + w \quad (3.50)$$

şeklinde ifade ederek, WWER-440 ve WWER-1000 reaktörlerinde $C^T C$ matrisinin kondisyon sayılarını (condition number) altı, beş ve dört detektör için kıyaslamış ve detektör sayısı arttıkça kondisyon sayısının küçüldüğünü göstermişlerdir. Fakat bu çalışmada kalp kazanı titreşimlerinin genliği, frekansları gibi değerler verilmemiştir.

Pázsit ve diğ. (1998) reaktivite ve titreşim bileşenlerini zaman-tanım bölgesinde ayırmak için yeni bir metot önermiş ve Ringhals-3 reaktörü üzerinde analizler

yapmışlarsa da kalp kazanı titreşimlerinin boyutlarıyla ilgili hiç bir bilgi vermemişlerdir.

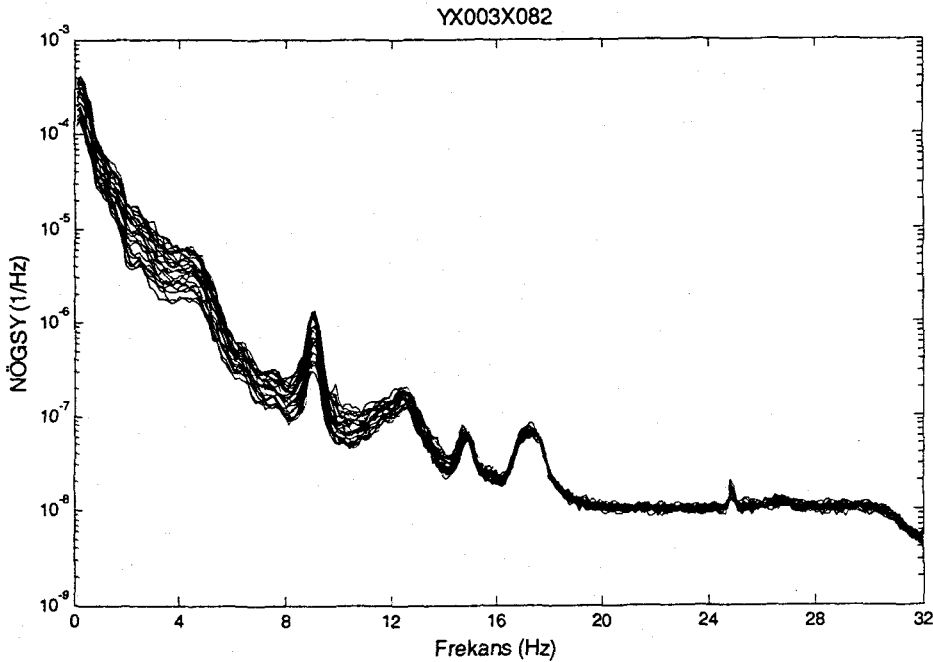
Lipcsei ve Kiss (2000) VVER-440 reaktöründe iki model kullanarak kalp kazanı titreşimleri üzerinde çalışmıştır. Yukarıda belirtilen iki gürültü kaynağına (global reaktivite etkisi δr ve θ^l doğrultusundaki kalp kazanı titreşimi $\delta\eta^l$) kabuk deformasyonlarından kaynaklanan titreşimleri de katmak suretiyle toplam gürültü terimini

$$\delta x = \delta r + \mu_b \delta\eta \cos(\theta_i - \theta^l) + \mu_s \delta s \cos(2\theta_i - \varepsilon) \quad (3.51)$$

şeklinde genişleterek denklemleri türetmişlerdir. Bu çalışmada da kalp kazanı titreşimlerinin boyutlarıyla ilgili hiç bir bilgi verilmemiştir.

3.3.1 EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali Kalp Kazanı Titreşim Analizi

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nda kalp-dışı nötron sensörlerinin konumlarına göre $C^T C$ matrisinin kondisyon sayısı $k_{c^T c} = 5.8284$ olmaktadır. Denklem 3.35'in çıkışıyla girişi arasındaki bağıl hata $C^T C$ matrisinin kondisyon sayısı ile sınırlıdır. Hatanın alabileceği en büyük değer $k_{c^T c} \cdot \text{ölçüm hatası}$ 'dır (Berta ve Pór, 1999).

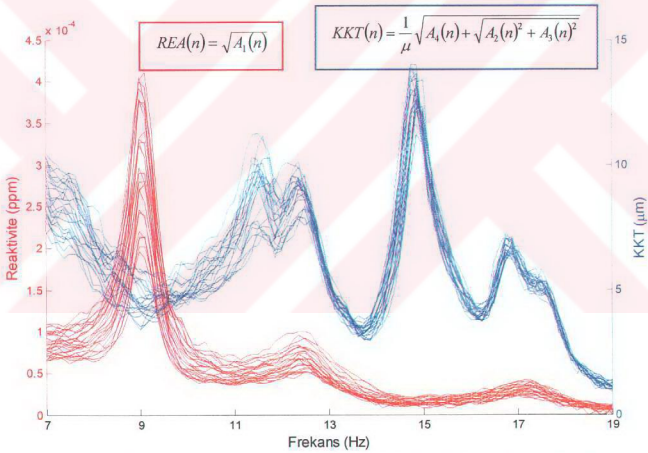


Şekil 3.16 NÖGSY'unda boron konsantrasyonundaki azalmayla görülen aşamalı değişim.

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali için 15.11.2002 – 09.05.2003 tarihleri arasında YX003X082 kalp-dışı nötron detektörünün normalize öz-güç spektral yoğunluğunun boron konsantrasyonuyla birlikte değişimi birer hafta arayla Şekil 3.16’da 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. 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 1. mertebeden analog alçak geçiren filtrenin etkisi 30 – 32 Hz arasında görülmektedir.

Şekil 3.17’de ayrılmış reaktivite ve KKT bileşenleri görülmektedir.

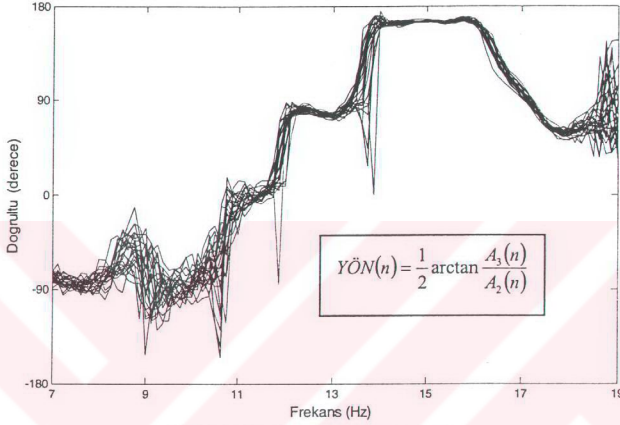


Şekil 3.17 Boron konsantrasyonunda azalmayla reaktivite gürültüsünde görülen artış ve kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri.

Sol ekseninde, reaktörün işletilmesi sırasında reaktivite gürültüsünde görülen değişim (kırmızı) verilmiştir. Borssele reaktörünün kontrolünde yanıcı zehir olarak boron kullanıldığından reaktör suyundaki boron azaldıkça reaktivitedeki gürültü de artar. Boron miktarıyla gürültü arasında doğrusal bir ilişki olduğundan reaktivitenin enerjisi hesaplanarak boron miktarı belirlenebilir. Sağ ekseninde (mavi) kalp kazanı

titreşimlerinin değışimleri görülmektedir. Borssele Reaktörü'nde kalp kazanı titreşimleri en yüksek genlik değ rlerini 15 Hz'de almaktadır ve genlikleri 15  m'yi geçmemektedir (Barutçu ve diğ., 2003a, 2003b).

Şekil 3.18'de kalp kazanı titreşimlerinin fazları görülmektedir.



Şekil 3.18 Kalp kazanı titreşimlerinin fazları.

Reaktör tam güçte çalışırken titreşim genliklerinde değışme görülürse, bu kalp kazanı civatalarında probleme işaret eder. Kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri büyürse kazanın yakıt demetlerine çarpması ve yakıt zarflarına zarar vermesi olasılığı doğar. Bu nedenle kalp kazanı titreşimlerinin genliklerindeki değışimlerin sürekli izlenmesi gerekir. Genliklerin yanında titreşimin fazı da önemlidir. Faz açısında değışme de civatalarda probleme işaret eder.

BÖLÜM 4

DC-İŞARETLERDE SENSÖR DOĞRULAMA

Bu bölümde nükleer güç santralından doğrudan gelen sensör işaretleri Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA yaklaşımı ile doğrulanmış olup, doğruluğu bilinen işaretler üzerinde Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) YSA yaklaşımı ile durum izleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

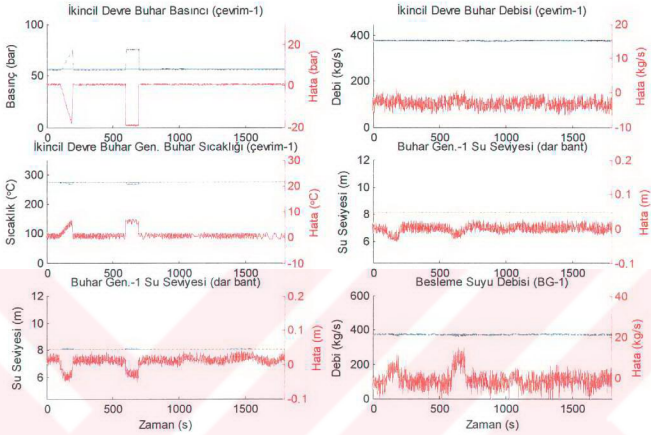
4.1 DC-İşaretlerde Çok Girişli Tek Çıkışlı YSA Yaklaşımıyla Sensör Doğrulama

ÇGTÇ-YSA yaklaşımı Bölüm 3.2.3’de anlatılmıştır. Bu bölümde MR-Panelinden, reaktörün işletimi için önemli büyüklükleri ölçen 16 sensör seçilmiştir. Her biri 15 girişli, gizli tabakasında altı ve çıkış tabakasında bir nöron bulunan ileri-beslemeli 16 adet ÇGTÇ-YSA Levenberg – Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım algoritmasıyla eğitilmiştir. Seçilen işaretler Tablo 4.1’de görülmektedir.

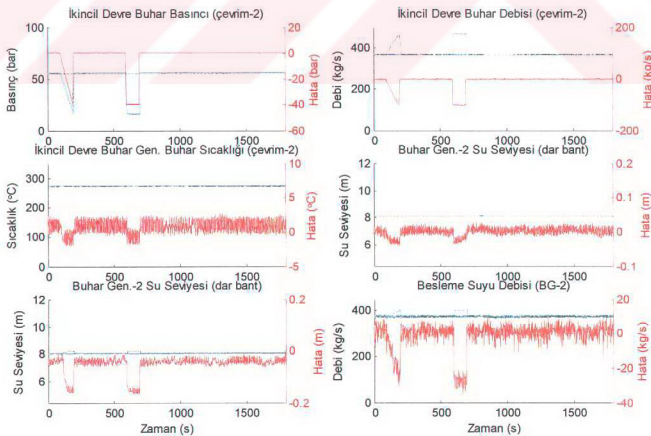
Tablo 4.1 ÇGTÇ-YSA uygulaması için MR-Panelinden seçilen işaretler.

Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Birim
46	RA001P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-1)	bar
48	RA001F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-1)	kg/s
50	RA001T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-1)	°C
64	YB001L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	m
65	YB002L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	m
68	RL040F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-1)	kg/s
47	RA002P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2)	bar
49	RA002F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-2)	kg/s
51	RA002T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-2)	°C
66	YB001L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	m
67	YB002L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	m
69	RL050F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-2)	kg/s
26	YA001T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-1)	°C
28	YA002T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-2)	°C
40	YX003X050	Nötron Detektörü (50)	%
41	YX003X060	Nötron Detektörü (60)	%

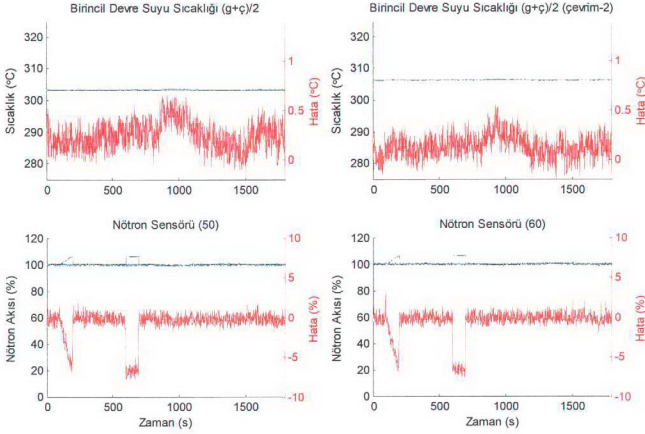
47 numaralı RA002P051 İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2) sensörünün işaretine rampa biçiminde düşüş ve kare dalga biçiminde düşüş hataları eklenerek YSA'ları denenmiştir. Şekil 4.1a, b ve c'de ÇGTÇ-YSA'larının cevapları görülmektedir



Şekil 4.1a ÇGTÇ-YSA 1-6'nın hatalı giriş işaretine cevapları.



Şekil 4.1b ÇGTÇ-YSA 7-12'nin hatalı giriş işaretine cevapları.



Şekil 4.1c ÇGTÇ-YSA 13-16'nın hatalı giriş işaretine cevapları.

Şekil 4.1a, b ve c'de mavi çizgi sensörün işaretini, yeşil çizgi YSA'nın cevabını ve kırmızı 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'ların 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. Şekil 4.1b'nin ilk şeklinde, işaretine hata eklenmiş olan RA002P051 İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2) sensörünün işareti, YSA'nın cevabı ve hatası görülmektedir. Görüldüğü gibi YSA'nın cevabı olan yeşil çizgi sabit bir ortalama değer izlemektedir. Hata, sensörün işareti değiştiği için değişmektedir.

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

4.2 DC-İşaretlerde 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 işaretten 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. İşaretlerin listesi Tablo 4.2a, b ve c'de verilmiştir.

Tablo 4.2a Birinci Grup: Buhar Generatörü-1'e ait işaretler.

Buhar Generatörü – 1			
Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Birim
46	RA001P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-1)	bar
48	RA001F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-1)	kg/s
50	RA001T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-1)	°C
64	YB001L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	m
65	YB002L001	Buhar Gen.-1 Su Seviyesi (dar bant)	m
68	RL040F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-1)	kg/s

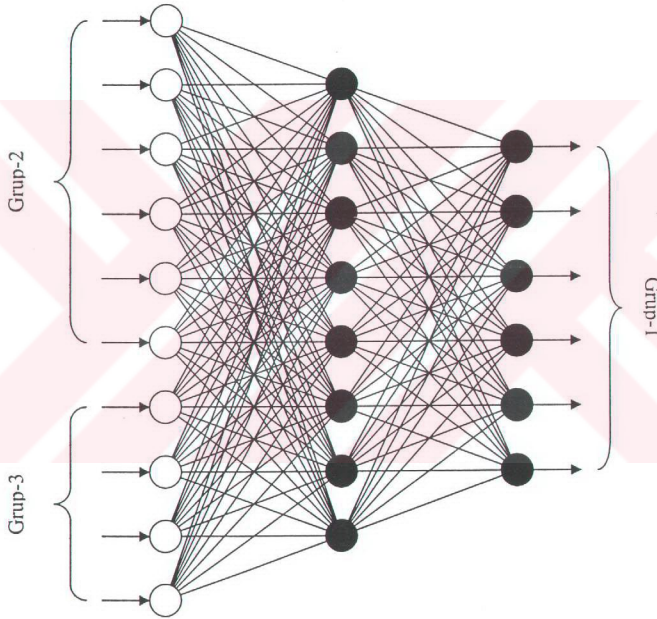
Tablo 4.2b İkinci Grup: Buhar Generatörü-2'ye ait işaretler.

Buhar Generatörü – 2			
Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Birim
47	RA002P051	İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2)	bar
49	RA002F001	İkincil Devre Buhar Debisi (çevrim-2)	kg/s
51	RA002T001	İkincil Devre Buhar Gen. Buhar Sıcaklığı (çevrim-2)	°C
66	YB001L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	m
67	YB002L002	Buhar Gen.-2 Su Seviyesi (dar bant)	m
69	RL050F001	Besleme Suyu Debisi (Buhar Generatörü-2)	kg/s

Tablo 4.2c Üçüncü Grup: Reaktör Kalbine ait işaretler.

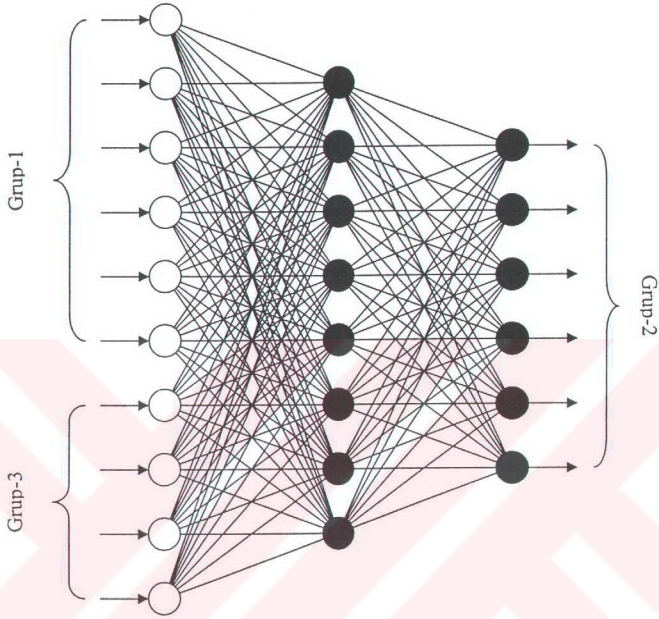
Reaktör Kalbi			
Kn	İşaret Kodu	İşaret Adı	Birim
26	YA001T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-1)	°C
28	YA002T001	Birincil Devre Suyu Sıcaklığı (g+ç)/2 (çevrim-2)	°C
40	YX003X050	Nötron Detektörü (50)	%
41	YX003X060	Nötron Detektörü (60)	%

Kullanılan YSA'larının topolojisi Şekil 4.2a, b ve c'de görülmektedir.



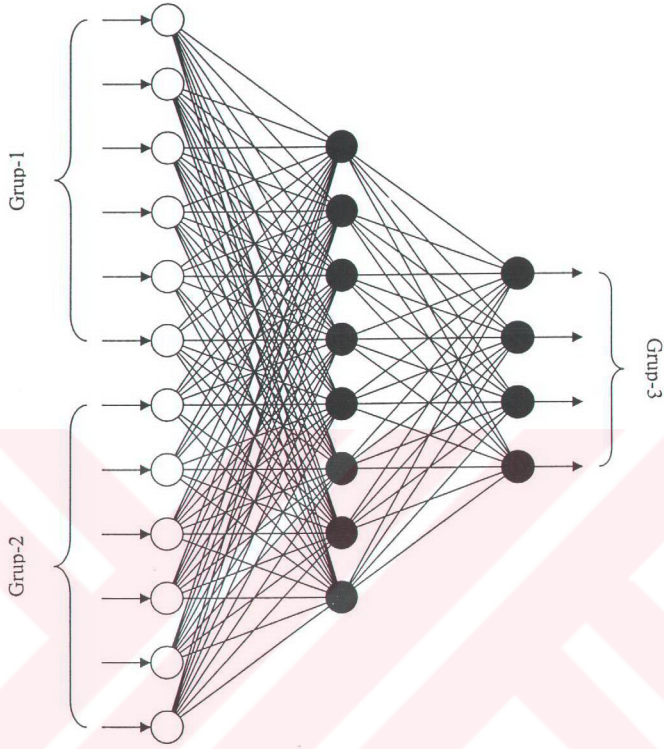
Şekil 4.2a ÇGÇÇ-YSA-1

ÇGÇÇ-YSA-1'in girişinde 2. ve 3. gruplar (6+4=10 giriş), gizli tabakasında sekiz nöron ve çıkışında da 1. grup (altı nöron) bulunmaktadır. İleri-beslemeli YSA Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım (back-propagation) algoritmasıyla eğitilmiştir.



Şekil 4.2b ÇGÇÇ-YSA-2

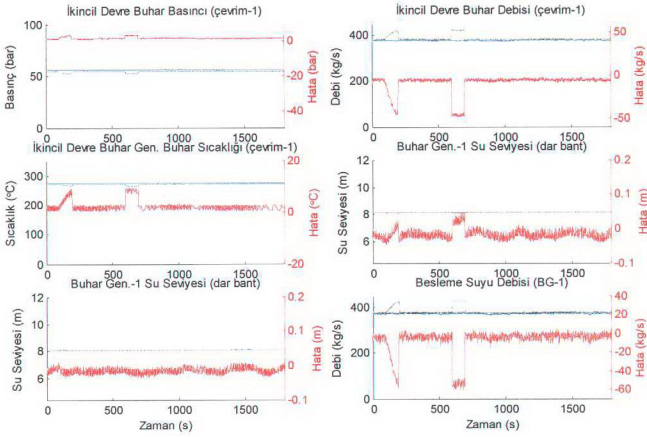
ÇGÇÇ-YSA-2'nin girişinde 1. ve 3. gruplar ($6+4=10$ giriş), gizli tabakasında sekiz nöron ve çıkışında da 2. grup (altı nöron) bulunmaktadır. İleri-beslemeli YSA Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım algoritmasıyla eğitilmiştir.



Şekil 4.2c ÇGÇÇ-YSA-3

ÇGÇÇ-YSA-3'ün girişinde 1. ve 2. gruplar ($6+6=12$ giriş), gizli tabakasında sekiz nöron ve çıkışında da 3. grup (dört nöron) bulunmaktadır. İleri-beslemeli YSA Levenberg-Marquardt optimizasyon yöntemine dayalı geriye-yayılım algoritmasıyla eğitilmiştir.

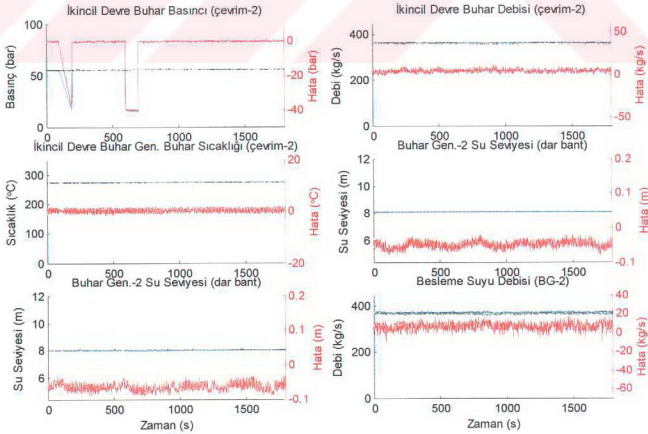
Sensörlerden biri bozulduğu zaman ÇGÇÇ-YSA'larının iki tanesinin girişine bir arızalı işaret gelecektir. ÇGÇÇ-YSA-2'nin girişinde bulunan 47 numaralı RA002P051 İkincil Devre Buhar Basıncı (çevrim-2) sensörünün işaretine rampa biçiminde düşüş ve kare dalga biçiminde düşüş hataları eklenerek YSA'ları denenmiştir. Şekil 4.3'de ÇGÇÇ-YSA-1'in cevabı görülmektedir.



Şekil 4.3 ÇGÇÇ-YSA-1'in hatalı işaret cevabı.

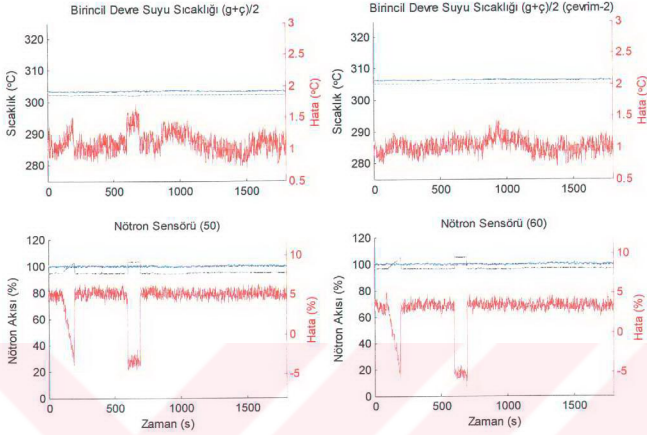
Su seviyesi dışında bütün kanallarda hata görülmektedir.

Şekil 4.4'de ÇGÇÇ-YSA-2'nin cevabı görülmektedir. Bu YSA'nın girişine hatalı işaret gelmediğinden çıkışında da hata görülmektedir. İkincil devre Buhar Basıncı (çevrim-2) kanalında görülen hata çıkış işaretinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4 ÇGÇÇ-YSA-2'nin hatalı işaret cevabı.

Şekil 4.5’de ÇGÇÇ-YSA-3’ün cevabı görülmektedir. Burada da hemen her kanalda hata ayırdedilebilir düzeyde artmıştır.



Şekil 4.5 ÇGÇÇ-YSA-3’ün hatalı işaret cevabı.

Şekil 4.3, .4 ve .5’de mavi çizgi sensörün işaretini, yeşil çizgi YSA’nın cevabını ve kırmızı çizgi de hatayı göstermektedir. Sensör işareti ve YSA’nın cevabı sol eksen, hata sağ eksenle verilmiştir.

Ele alınan örnekte reaktörün iki buhar generatöründen ve 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.

4.3 DC-İşaretlerde ÇGTÇ ve ÇGÇÇ-YSA Yaklaşımları ile Sensör Doğrulama Üzerine Yorumlar

Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi ÇGTÇ-YSA'ları hatalı sensörün tesbitine olanak vermektedir. ÇGTÇ-YSA'ları sensör sayısından bir eksik sayıda girişe ve bir çıkış nöronuna sahiptir. Sensör sayısı kadar YSA vardır. Her sensörün işareti diğer sensörlerin işaretlerini giriş olarak alan bir YSA'na öğretilir. Bu sistemde bir sensör bozulduğu zaman bozuk sensörü öğrenen YSA hariç diğer bütün YSA'ların girişlerinde bir hatalı işaret bulunur. Bu YSA'larının çıkışlarında ayırdedilebilir değişimler görülür. Bozuk sensörü öğrenen YSA'nın girişine gelen işaretler doğru olduğundan sadece bu YSA bozuk sensörün göstermesi gereken çıkışı gösterir. Birden çok sensörün bozulması durumundaysa bütün YSA'larının girişlerinde en az bir bozuk işaret bulunacağından hepsinin çıkışında değişim görülür.

Bölüm 4.2'de anlatılan ÇGÇÇ-YSA'larında ise işaretler ait oldukları sistem bileşenlerine göre gruplanırlar. Her grup, girişinde diğer gruplar bulunan bir YSA'na öğretilir. Grup adedi kadar YSA vardır. Bir bileşende hata olması durumunda o bileşeni öğrenen YSA'nın çıkışları bileşene ait sensörlerin normalde göstermesi gereken değerleri gösterir. Diğer YSA'larının cevaplarında ise girişlerinde hatalı işaretler bulunduğu için ayırt edilebilir sapmalar meydana gelir. ÇGÇÇ-YSA'ları bu özellikleri nedeniyle bileşen hatalarının tesbitinde kullanılabilirler.

Bu çalışmada ayrı ayrı üstünlüklerinden dolayı ÇGTÇ-YSA'ları ile ÇGÇÇ-YSA'ları seri olarak kullanılmıştır. Önce ÇGTÇ-YSA'na gelen işaretler sensör hatası olup olmadığını tesbit etmek için kontrol edilir sonra ÇGÇÇ-YSA'na verilirler. Bir sensörün bozulması durumunda ÇGTÇ-YSA bozuk sensörü tesbit eder. Bütün sensörlerin sağlam olması ya da birden çok sensörün hatalı olması durumunda işaretler ÇGÇÇ-YSA'na verilir. Birden çok sensörün hatalı olması durumunda ÇGÇÇ-YSA hatanın bir bileşen hatası olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılır. Rastlantısal olarak bir veya birkaç sensörün bozulması durumuyla bir bileşenin bozulması durumu ÇGÇÇ-YSA ile ayırdedilebilir.

BÖLÜM 5

DC-İŞARETLERDE GERÇEK ZAMANDA ÇEVİRİM-İÇİ ANORMAL DURUM BELİRLEME

Nükleer güç santrallerinde anormal durum belirlemesi için genelde AC-ışaretler kullanılır. Santralin DC-ışaretlerinden de hata deteksiyonu yapmak mümkündür. Literatürde bu anlamda bir deteksiyon sistemi için sensörlerden gelen ışaretleri giriş olarak alıp Kalman filtreleme metoduyla DC-ışaret durumunu belirleyen çalışmalar vardır. Bu bağlamda Kalman filtresinin kestirdiği DC-ışaret durumları Kümülatif Toplam (CUSUM) testiyle (Morgenstern ve diğ., 1988a; 1988b) kontrol edilmiştir. Metodun verimliliğini belirlemek için EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin işletimi sırasında, geçici olayların meydana geldiği durumlara ait ışaret kümeleri kullanılmıştır. Gerçek zamanda yapılan testler kurulan sistemin verimliliğini ispatlamıştır (Peeters ve diğ., 1991). Kümülatif Toplam testinde bazı parametrelerin seçimi sorun doğurmaktadır. Parametreler uygun seçilmezse test başarılı olmamaktadır.

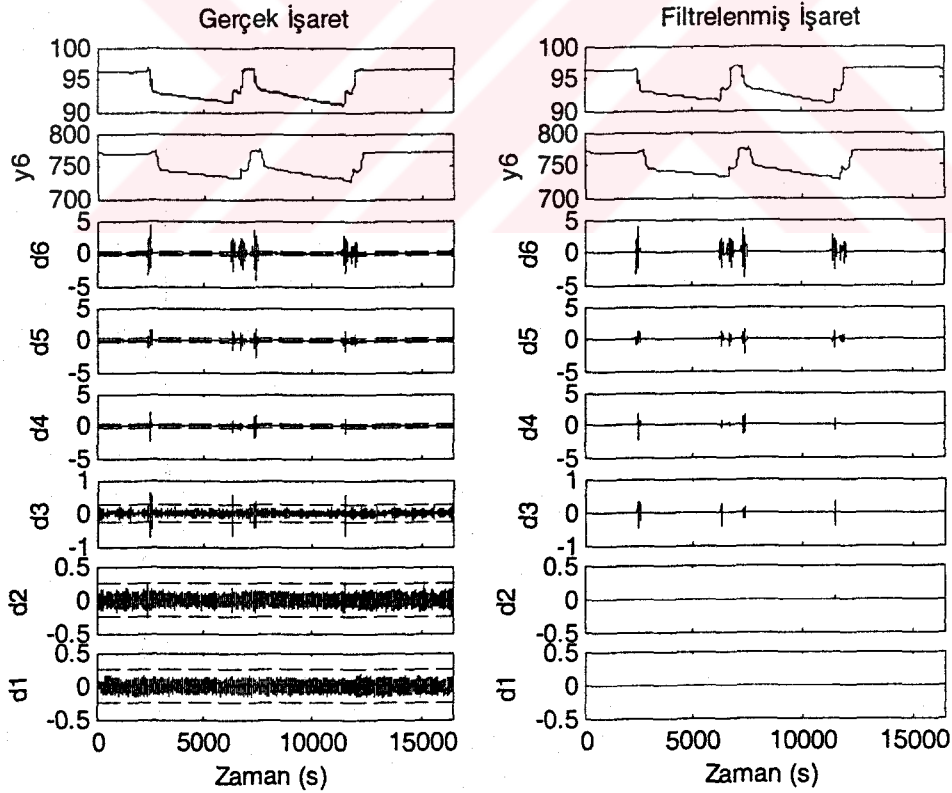
DC-ışareten çevrim-içi anormal durum belirlemesindeki temel yaklaşım, uygun bir yöntemle ışaretin çevrim-içi olarak gürültüden arındırılması ve ışaretteki marjinal değişimlerin belirlenmesi için gürültüden arındırılmış ışaretin türevinin izlenmesidir. DC-ışaretin doğrudan türevi, ışaretteki gürültü nedeniyle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

Bu amaçla kullanılabilecek bir diğer etkin metot da dalgacık analiziyle gürültüden arındırmadır. Bu bölümde literatürde kullanılan Kalman filtreleme metoduyla anormal durum belirlemesi gerçekleştirilmiş ve buna alternatif olarak dalgacık analiziyle anormal durum belirlemesi metodu sunulmuştur. Her iki uygulama da gerçek zamanda, çevrim-içi olarak çalışacak şekilde gerçeklenmiş ve sonuçları birbirleriyle kıyaslanarak dalgacık analizi uygulamasının Kalman filtresi uygulamasına üstünlükleri gösterilmiştir.

Bu çalışmada yeterli gürültüden arındırmanın sağlanabilmesi için Daubechies-8 dalgacık fonksiyonu seçilmiş ve altı seviyede alt-bant analizi yapılmıştır. Gürültü eşiği (σ işaretin standart sapması ve N de örnek sayısı olmak üzere)

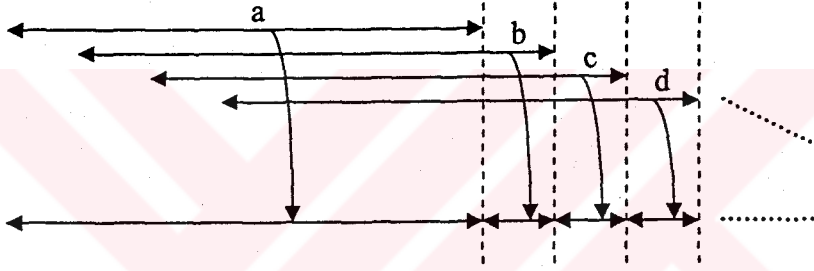
$$thr = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (5.1)$$

ifadesiyle belirlenir. Yaklaşım ve detaylara ayrıştırılan işaretin detaylarında eşiği geçemeyen kısımlar tamamen silinir. Kalan detaylar, yaklaşım ile yeniden birleştirilerek gürültüden arındırılmış işaret elde edilir. Şekil 5.1'de dalgacık analiziyle gürültüden arındırma işleminin şematik gösterimi verilmiştir (y6, yaklaşımı; d1, d2, ..., d6 detayları göstermektedir). Solda gerçek işaret, ayrıştırılmış yaklaşım ve detaylarıyla birlikte görülmektedir. Sağda ise detayların eşik değerini geçen kısımları yaklaşım ile birlikte verilmiş, en üstte de yaklaşımla, gürültüden arındırılmış detayların birleştirilmesinden elde edilen gürültüden arındırılmış işaret verilmiştir.



Şekil 5.1 Dalgacık analiziyle gürültüden arındırma işlemi.

6 seviyede alt-bant analizi için en az $2^6 = 64$ örneğe ihtiyaç vardır. Borssele santralının MR-Panelinde işaretler 10 örnek/s hızla örneklenmektedir. Gerçek zamanda, çevrim-içi çalışan bir programın her bir analiz için 64 örneği beklemesi durumunda her analiz arasında 6.4 s zaman geçecektir. Bu süre, bir nükleer reaktörde anomali deteksiyonu için uzun bir süredir. Bu nedenle gerçekleştirilen program ilk çalıştırıldığında 64 işaretin gelmesi için 6.4 s bekler ve ilk gürültüden arındırma (de-noising) işlemini yapar. Daha sonra her 1 saniyede 64 işaretlik penceresini 10 işaret kaydırarak analiz yapar. Gürültüden arındırılmış yeni 10 işaret analiz edilmiş işaret dizisine eklenir. Dolayısıyla saniyede bir kere analiz sonuçları görüntülenmekte ve yorumlanmaktadır. EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nda kullanılan Santral İzleme Sistemi (PPS) ise 3 saniyede bir işaret kaydetmektedir.



Şekil 5.2 Dalgacık analizi programının gerçek zamanda çevrim-içi çalışması.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi ilk 64 işaretlik kısım (a) gürültüden arındırılıp tamamen alındıktan sonra her bir adımda yeni analizin sadece son 10 işaretlik kısmı (b, c, d, ...) alınarak gürültüden arındırılmış kısma eklenmektedir. Bu şekilde program saniyede bir kere analiz yapmaktadır.

Bu bölümde dalgacık analizi uygulamasının klasik metot olan Kalman filtresi uygulamasının belirlediği bütün anomalileri belirleyebildiği ve Kalman filtresi uygulamasına olan üstünlükleri gösterilmiştir.

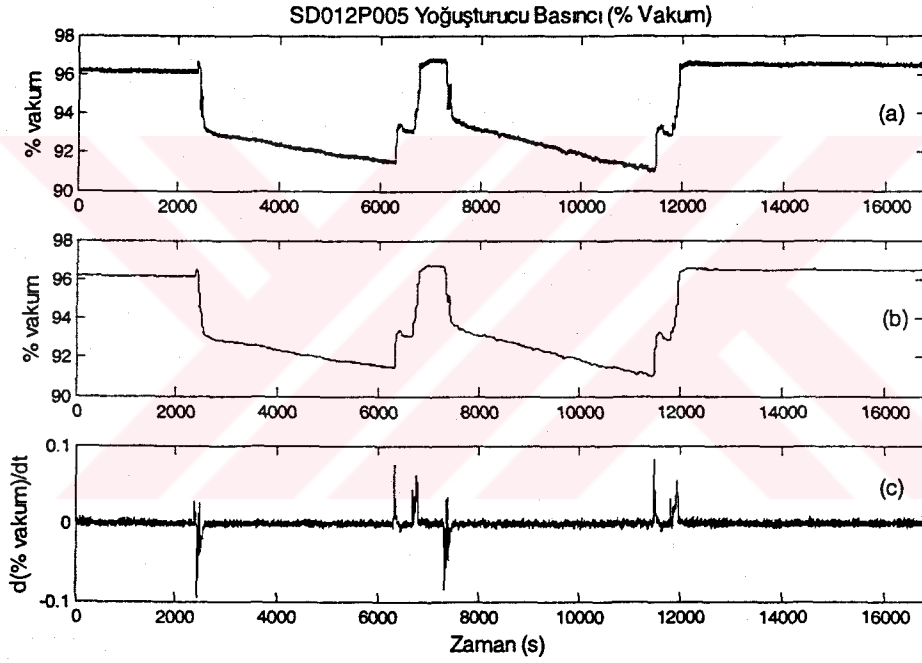
5.1 Kalman Filtresi Uygulaması

Şekil 5.3’de EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali’nda, “Rinsing” işlemi sırasında SD012P005 yoğunlaştırıcı basınç (% vakum) sensörünün (MR-Paneli) işareti üzerinde Kalman filtresi kullanılarak yapılan analiz görülmektedir. Filtrenin sistem gürültüsü (farklı kaynaklardan gelen gürültülerin ilintisiz olduğu kabulüyle):

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1068 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0556 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0897 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.7803 \end{bmatrix} \cdot 10^{-5}$$

yeterince küçük seçilerek ortalama değeri sağlanmıştır. Ölçme gürültüsü: $R = 0.0010$ seçilmiştir.

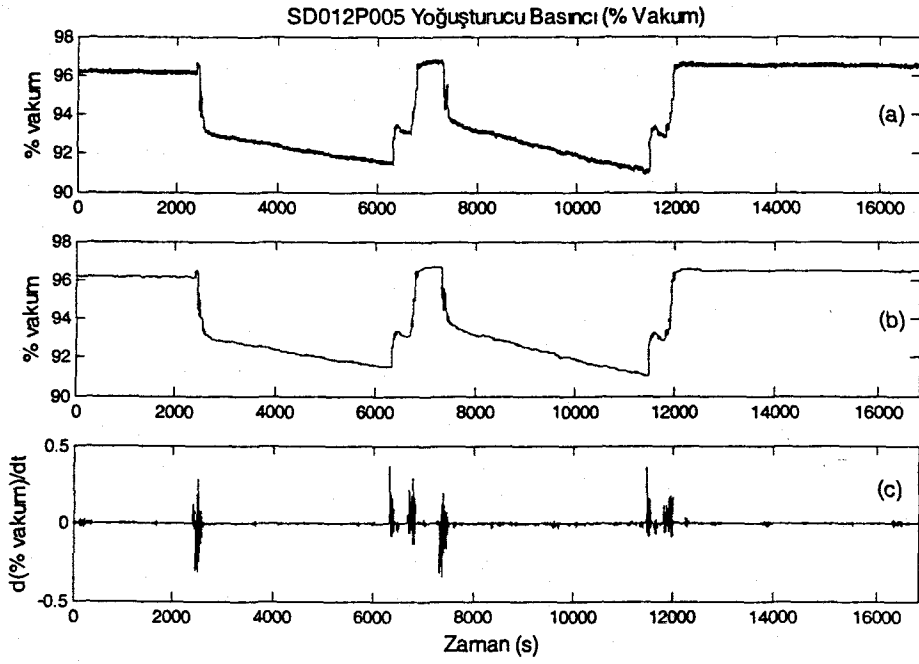
Şekil 5.3'de (a) orijinal işaret, (b) KF'nin cevabı, (c) filtre cevabının türevi görülmektedir



Şekil 5.3 Kalman filtresiyle DC-ışarete çevrim içi anomali deteksiyonu
(a) orijinal işaret, (b) KF'nin cevabı, (c) filtre cevabının türevi.

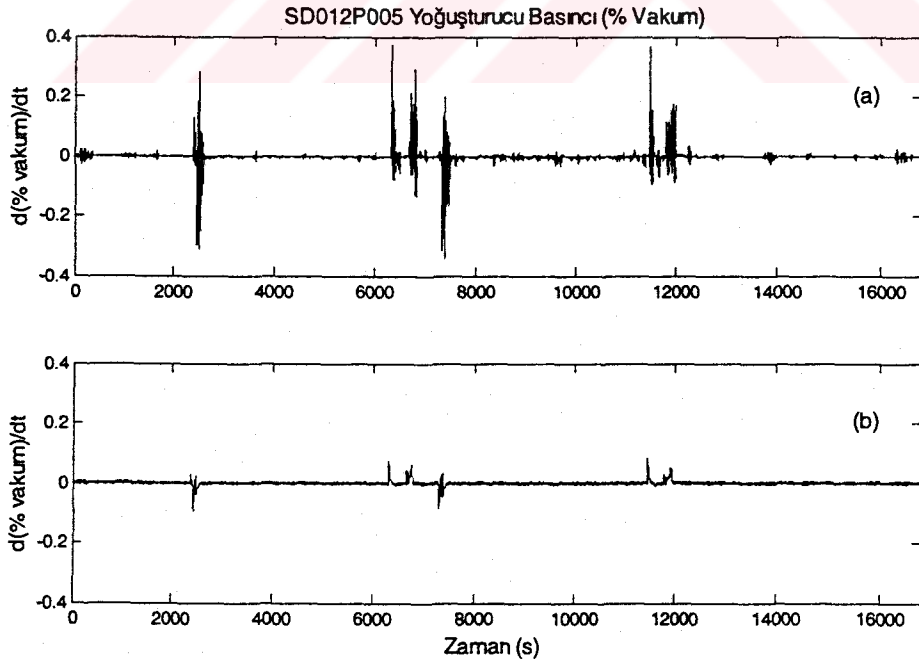
5.2 Dalgacık Analizi Uygulaması

Şekil 5.4'de aynı işaret üzerinde dalgacık analizi kullanılarak yapılan analiz görülmektedir. (a) orijinal işaret, (b) dalgacık analiziyle gürültüden arındırılmış işaret, (c) gürültüden arındırılmış işaretin türevini göstermektedir.



Şekil 5.4 Dalgacık analiziyle DC-ışarete çevrim içi anomali deteksiyonu
 (a) orijinal işaret, (b) dalgacık analiziyle gürültüden arındırılmış işaret,
 (c) gürültüden arındırılmış işaretin türevi.

Şekil 5.5’de EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali’nin, örnek olarak seçilen yoğuşturucu basınç (% vakum) sensörünün işareti üzerinde Kalman filtresi ve dalgacık analiziyle elde edilen sonuçların aynı skalada karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 5.5 Kalman filtresi ve Dalgacık analizi sonuçlarının karşılaştırılması.
 (a) Dalgacık analizi, (b) Kalman filtresi kullanılarak elde edilen sonuçlar.

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 Kalman filtresi ve dalgacık analizi uygulamasıyla yapılan çalışmalarda, dalgacık analizi uygulamasının işaret gürültü oranının ($\dot{I}GO_D = 25.8$ dB) Kalman filtresininkinden ($\dot{I}GO_K = 22.1$ dB) daha büyük olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla dalgacık analizi yöntemi anormal durumların belirlenmesinde daha etkin bir metottur.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Hollanda'nın EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali ilk defa 1974 yılında 1360 MW_t (450 MW_e) güce çıkarak kritik olmuştur. 24 yıl boyunca %80 güçte işletilmiştir. 1997 yılının ilk yarısında dünyanın en iddialı nükleer yeniden yapılanma projesi başarıyla sonuçlandırılarak güç santrali 1998 - 99'da ortalama %91 güçte (480 MW_e) çalışmaya başlamıştır. Yeniden yapılanma projesi kapsamında yenilenen veri toplama sistemi iki bölümden oluşmaktadır. MS-Panelinde 32 işaret 64 örnek/s hızla AC ve DC olarak kaydedilmektedir. MR-Panelinde de 72 işaret 10 örnek/s hızla sadece DC olarak kaydedilmektedir.

Bu tez çalışmasındaki temel amaç EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin yeni veri toplama sisteminde kullanılan sensörlerin doğrulanması, santral genelinde sensör hatası ve işletimden kaynaklanan anormal durumların belirlenmesi için etkin olarak kullanılabilecek çeşitli metotların incelenmesi ve bu amaca yönelik yeni yöntemlerin önerilmesidir. 15.7.2001 - 15.12.2001 tarihleri arasında 5 ay süreyle Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde tarafımdan tez çalışmasına yönelik bilimsel araştırma ve çalışmalarda bulunulmuştur.

MS-Paneli işaretleriyle sensör doğruluğu ve durum izlemesi çalışmasında bütün sensör tiplerinin (ısıl-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) yapay sinir ağı (YSA) ve Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA ile sağlanması yapılmış, ÇGTÇ'li YSA'larının öz-ilişkili YSA'larından daha çok bilgi sağladığı gösterilmiştir. Daha sonra doğrulukları sınanmış olan 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. 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.

Literatürde kalp kazanı titreşimlerinin genlikleri verilmemektedir. Bu tez çalışmasında, MS-Panelinde bulunan kalp-dışı nötron sensörlerinin işaretleri kullanılarak yapılan kalp kazanı titreşim analizlerinin sonuçları, çok duyarlı olarak hesaplanmış ve ilgili literatüre bu anlamda bir katkı sağlanmıştır. Borssele Nükleer Güç Santrali'nde kalp kazanı titreşimlerinin maksimum değerlerini 15 Hz'de aldığı ve genliklerinin 15 μm 'yi geçmediği gösterilmiştir. Operatörlerin kalp kazanı titreşimlerini çevrim-İçi izleyebilmeleri için bir yazılım oluşturulmuştur.

MR-Panelinden seçilen DC-İşaretlerle Çok Girişli Tek Çıkışlı (ÇGTÇ) YSA'ları kullanılarak sensör doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra bu işaretler, aralarındaki fiziksel ilişkilere göre gruplanarak Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) YSA'ları ile sistem genelinde bileşen bazında doğrulama yapılmıştır.

MR-Panelinin DC-İşaretlerinden gerçek zamanda, çevrim-İçi 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 metodunun anormal durumların belirlenmesinde daha etkin bir yol olduğu gösterilmiştir.

EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nin yeni veri toplama sistemi üzerinde yukarıda belirtilen zaman ve frekans-tanım bölgesi analizleri yapılmış ve yeni kurulan sistemin güvenilirliği gösterilmiştir. Ayrıca kalp kazanı titreşimlerinin genliği belirlenerek müsaade edilen sınırların altında olduğu gösterilmiştir. MR-Panelinden seçilen sensörlerin ÇGTÇ-YSA ile doğruluğunun belirlenmesinde ÇGTÇ-YSA'nın arızalı sensörü ayıramadığı hallerde (birden çok sensörün arızalı olması durumu) arızanın bir kaç bağımsız sensörden mi yoksa santralin bir bileşeninden mi kaynaklandığını belirlemek için ÇGÇÇ-YSA kullanılmıştır. Bu tez çalışması bu anlamda orijinallik içermekte olup konunun gelişimine katkı sağlamıştır.

Yapay sinir ağlarının sensör bazında kullanımının haricinde gruplandırılmış bileşenler bazında da kullanımı gerçekleştirilerek bu yolla arızanın sistemden mi yoksa sensörden mi geldiği ayrımı yapılmıştır. Bu anlamda Yapay sinir ağlarının daha fonksiyonel, çift amaçlı kullanımı sağlanmıştır. Bu uygulama gerçek zaman çalışmasında önemli olup, bu anlamda bir katkı sağlamaktadır.

Yapay sinir ağlarının kullanımı haricinde dalgacık analizi gerçek zamanda anormal durum belirlemede kullanılarak, Kalman filtreleme tekniğine bir alternatif olarak sunulmuştur. Ayrıca dalgacık analizi vasıtasıyla mevcut literatürde yer alan, Kalman Filtrelemesinden elde edilen sonuçlara göre daha duyarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu anlamda da Dalgacık analizi uygulaması tezin getirdiği diğer bir yeniliktir.

Santral genelinde sensör ve sistem kökenli hataların tesbiti için YSA tabanlı izleme sistemleri kullanılabilir. Kalp kazanı titreşimleri çevrim-içi olarak sürekli hesaplanıp genliklerinde ve doğrultularında değişme olup olmadığı gözlemlenebilir. Bu YSA ve frekans-tanım bölgesi analizi tabanlı izleme sistemleri santralin yerel ağı üzerinde çalıştırılabilirler.

KAYNAKLAR

- Akaike, H., 1969. Power Spectrum Estimation Through Autoregressive Model Fitting, *Ann. Inst. Stat. Math.*, **21**, 407-419.
- Akaike, H., 1974. A New Look at the Statistical Model Identification, *IEEE Trans. Autom. Control.*, **19**, Issue 6, 716-723.
- Alvarenga, M.A.B., Martinez, A.Q.S. and Schirru, R., 1997. Adaptive Vector Quantization Optimized by Genetic Algorithm for Real-Time Diagnosis Through Fuzzy Sets, *Nuclear Technology*, **120**, 88-197.
- Aybers, N., 1963. Nükleer Reaktör Mühendisleri İçin Metalürji ve Malzeme Bilgisi, İTÜ NEE Genel Yayınlar No. 2, İstanbul.
- Barutçu, B. ve Şeker, S., 2001. İTÜ TRIGA MARK-II Reaktöründe Şebeke Frekansı Etkisinin Dalgacık Analiziyle Filtrelenmesi, *İÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Dergisi*, **1**, 135-139.
- Barutçu, B., Şeker, S., Ayaz, E. and Türkcan, E., 2003a. Real Time Reactor Noise Diagnostics for the Borssele (PWR) Nuclear Power Plant, *Progress in Nuclear Energy*, **43**, No. 1-4, 137-143.
- Barutçu, B., Türkcan, E., Şeker, S. and 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, December 2003, **2**, 158-162.
- Beale, R. and Jackson, T., 1990. Neural Computing: An Introduction, Adam Hilger Publishing Ltd., GB.
- Berta, M. and Pór, G., 1999. The Effect of the Matrix Condition Number on the Estimate of Core Barrel Motion, *Progress in Nuclear Energy*, **34**, 1-11.
- Black, C.L., Uhrig, R.E and Hines, J.W., 1998. System Modeling and Instrument Calibration Verification with a Nonlinear State Estimation Technique, *Maintenance and Reliability Conference MARCON 98*, Knoxville, Tennessee, USA, May 1998, 58.01-58.15.
- Brown, R.G. and Hwang, P.Y.C., 1997. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons, New York.
- Calcagno, M. and Cioli, F., 1970. Trino Vercellese Nuclear Power Plant In-Service Monitoring of Core Structures and Reactor Internals by Neutron Noise

Measurements, *Ente Nazionale per L'Energia Elettrica*, Rome, Italy, August 1970.

Cohen, A., 1986. Biomedical Signal Processing I, CRC Press Inc., Florida.

Çiftçioğlu, Ö., Hoogenboom, J.G. and Van Dam, H., 1989. Suboptimal Processor for Anomaly Detection for System Surveillance and Diagnosis, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A278 (1989) 532-540, North Holland, Amsterdam.

Çiftçioğlu, Ö. and Türkcan, E., 1991a, Failure Detection by Adaptive Lattice Modelling Using Kalman Filtering Methodology: Application to NPP, *A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics SMORN-VI*, Gatlinburg, Tennessee, USA, May 1991, 30.01-30.15.

Çiftçioğlu, Ö. and Türkcan, E., 1991b. Sensor Failure Detection in Dynamical Systems by Kalman Filtering Methodology, *Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN-RX--91-026*, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.

Çiftçioğlu, Ö. and Türkcan, E., 1992. Real Time Sensor Failure Detection by Dynamic Modelling of a PWR Plant, *8th Power Plant Dynamics Control and Testing Symposium*, Knoxville, Tennessee, USA, May 1992, 34.01-34.13.

Çiftçioğlu, Ö., Türkcan, E. and Şeker, S., 1991. Failure Detection Studies by Layered Neural Networks, *International AMSE Conference NEURAL NETWORKS*, San Diego, USA, May 29-31.

Dragt, J.B. and Türkcan, E., 1977. Borssele PWR Noise Measurements and Analysis and Interpretations. *Prog. Nucl. Energy*, 1, 293-307.

Dutton, K., Thompson, S. and Barraclough, B., 1997. The Art of Control Engineering, Addison-Wesley, Dorchester, England.

Eryürek, E. and Türkcan, E., 1992. Neural Networks for Sensor Validation and Plant Wide Monitoring, *Nuclear Europe Worldscan 1-2*, 72-74.

Fry, D.N., Kryter, R.C. and Robinson, J.C., 1974. Analysis of Neutron Density Oscillations Resulting from Core Barrel Motion in the Palisades Nuclear Power Plant, *ORNL-TM-4570*, Oak Ridge National Laboratory.

Fry, D.N., Kryter, R.C. and Robinson, J.C., 1975. Analysis of Neutron-Density Oscillations Resulting from Core Barrel Motion in a PWR Nuclear Power Plant, *Ann. of Nucl. Energy*, 2, 341-352.

Gruhl, H.H. and Kalverboer, C., 1997. Backfitting Borssele, *Nuclear Engineering International*, 42, 12-14.

Haykin, S., 1999. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice Hall Inc., GB.

- Holbert, K.E. and Upadhyaya, B.R., 1990. An Integrated Signal Verification System for Nuclear Power Plants, *Nuclear Technology*, 92 (3), 411-427.
- Kadılar, C. ve Erdemir, C., 2000. Vektör Otoregresyon Modellerinin Derecesinin Seçiminde Kullanılan İstatistiksel Kriterler, *Uludağ Ün. İktisadi ve İdari Bil. Fak. Dergisi*, 18, 2.
- Kalman, R.E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Trans. ASME-J. Basic Eng.*, 82 (Series D), 35-45.
- Kalman, R.E. and Bucy, R., 1961. New Results in Linear Filtering and Prediction, *Trans. ASME-J. Basic Eng.*, 83, 95-108.
- Levenberg, K., 1944. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares, *Quarterly Applied Math.*, 2, 164-168.
- Lipcsei, S. and Kiss, S., 2000. Investigation and Enhancements of Some Models Describing Core Barrel Motion in VVER 440 Type Reactors, *International Meeting On Reactor Noise IMORN 28*, Athens, Greece, November 2000, 245-253.
- Mallat, S., 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intelligence*, 11, No.7, 674-693.
- Marquardt, D., 1963. An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal Applied Math.*, 11, 431-441.
- Marseguerra, M. and Mazzarela, F., 1999. System Structure Identification by Neural Networks: Application to the Thermal-Hydraulic Correlations in a Steam Generator, *Nuclear Science and Engineering*, 133, 293-300.
- Martin, R. P. and Nassersharif, B., 1990. A Best Estimate Paradigm for Diagnosis of Multiple Failure Transient in Nuclear Power Plants Using Artificial Intelligence, *Nuclear Technology*, 91, 297-310.
- Maybeck, P. S., 1979. Stochastic Models, Estimation, and Control, vol. 1, Academic Press, New York.
- Mitra, S.K. and Kaiser, J.F. (ed.), 1993. Handbook for Digital Signal Processing, John Wiley & Sons, New York.
- Morgenstern, V.M., Upadhyaya, B.R. and Benedetti, M., 1988a. Signal Anomaly Detection Using Modified CUSUM Method, *IEEE Proc. 27th Conference on Decision and Control*, Austin, Texas, USA, December 1988, 2340-2341.
- Morgenstern, V.M., Upadhyaya, B.R. and Glockler, O., 1988b. Signal Anomaly Detection and Characterization, Topical Report, DOE/NE/37959-18.

- Mosey, D., 1990. Reactor Accidents, Nuclear Eng. Int. Special Publications in Conjunction with Butterworth Sci. Ltd., Londra.
- Nabeshima, K., Suzudo, T., Şeker, S., Ayaz, E., Barutçu, B., Türkcan, E., Ohno, T. and Kudo, K., 2003. On-Line Neuro-Expert Monitoring System for Borssele Nuclear Power Plant, *Progress in Nuclear Energy*, **43**, No. 1-4, 397-404.
- Nabeshima, K., Suzuki, K. and Türkcan, E., 1995. Neural Network with an Expert System for Real-Time Nuclear Power Plant Monitoring, *A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics SMORN VII*, Avignon, France, Jun 1995, 269-277.
- Nabeshima, K., Türkcan E. and Çiftçioğlu, Ö., 1993. Real-Time Nuclear Power Plant Monitoring with Adaptively Trained Neural Network, *International Conference on Artificial Neural Networks ICANN'93*, Amsterdam, The Netherlands, September 1993, 863-867.
- Pázsit, I., Karlsson, J. and Garis, N.S., 1998. Some Developments in Core-Barrel Vibration Diagnostics, *Annals of Nuclear Energy*, **25**, 1079-1093.
- Peeters, T.T.J.M., Çiftçioğlu, Ö. and 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.
- Schwarz, G., 1978. Estimating the Dimension of a Model, *Ann. of Stat.*, **6**, 461-464.
- Shibata, R., 1976. Selection of the Order of an Autoregressive Model by Akaike's Information Criterion, *Biometrika*, **63**, 1, 117-126.
- Sorenson, H.W., 1970. Least Squares Estimation: from Gauss to Kalman, *IEEE Spectrum*, **7**, 63-68.
- Sørenssen, A., 1990. An Early Fault Detection System Running on a Life Power Plant, HWR-261, OECD Halden Project.
- Sorsa, T. and Koivo, H.N., 1993. Application of Artificial Neural Networks in Process Fault Diagnosis, *Automatica*, **29**, No. 4, 843-849.
- Şeker S., 1990. Fundamentals of Artificial Neural Networks and Suggested Applications to Nuclear Power Reactors, Energieonderzoek Centrum Nederland, ECN NFA-DSA-90-20, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.
- Şeker, S., Türkcan E., Upadhyaya, B.R. and Erbay, A.S., 1998. Application of Wavelet Transforms for Nuclear Power Plant Signal Analysis, *IAEA-IWG-NPPCI-98/2*, 135-147.
- Thie, J.A., 1975. Theoretical Considerations and Their Application to Experimental Data in the Determination of Reactor Internals' Motion from Stochastic Signals, *Annals of Nuclear Energy*, **2**, 253-259.

- Thie, J.A.**, 1981. Power Reactor Noise, American Nuclear Society, Illinois, USA.
- Türkcan, E.**, 1982. Review of Borssele PWR Noise Experiments, Analysis and Instrumentation, *Progress in Nuclear Energy*, **9**, 437-452.
- Türkcan, E.**, 1985. On-Line Monitoring of a PWR for Plant Surveillance by Noise Analysis, *Progress in Nuclear Energy*, **15**, 365-378.
- Türkcan, E.**, 1986. ECN Petten's On-Line Monitoring of NPP via Noise Analysis, *Nuclear Europe Worldscan*, 6/86', 39.
- Türkcan E., Çiftçioglu, Ö., Eryürek, E. and Upadhyaya, B.R.**, 1992. On-Line Plant Wide Monitoring Using Neural Networks, *8th Power Plant Dynamics Control and Testing Symposium*, Knoxville, Tennessee, USA, May 1992, 58.01-58.10.
- Türkcan, E. and Dragt, J.B.**, 1977. Noise Applications in Pressurized Water Reactor. Implementation at the Borssele Reactor, *Enlarged Halden Program Group Meeting*, HPR-217, paper no. 39.
- Türkcan, E. and Dragt, J.B.**, 1978. New Results of the Noise Applications in the Borssele Pressurized Water Reactor, *Enlarged Halden Program Group Meeting*, HPR-221-14, paper no. 61.
- Türkcan, E. and Oguma, R.**, 1984. Improved Noise Analysis Methods for On-Line Testing of In-Core Instrumentations and the Determination of Power Reactor Parameters, Energieonderzoek Centrum Nederland, **ECN-148**, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.
- Türkcan, E., Quaadvliet, W.H.J., Peeters., T.T.J.M and Verhoef, J.P.**, 1991. Operational Experiences on the Borssele Nuclear Power Plant Using Computer Based Surveillance and Diagnostic System On-Line, Energieonderzoek Centrum Nederland, **ECN-RX-91-057**, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.
- Türkcan, E. and Verhoef, J.P.**, 1997. Borssele NPP Operational Data (Core 20 - 23), Energieonderzoek Centrum Nederland, **ECN-CX-97-091**, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Petten, The Netherlands.
- Türkcan, E. and 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.
- Uhrig, R.E.**, 1991. Potential Application of Neural Networks to the Operation of Nuclear Power Plant, *Nuclear Safety*, **32**, No. 1, 68-79.
- Uhrig, R.E. and Tsoukalas, L.H.**, 1999. Soft Computing Technologies in Nuclear Engineering Applications, *Progress in Nuclear Energy*, **34**, 13-75.

- Upadhyaya, B.R.**, 1985. Sensor Failure Detection and Estimation, *Nuclear Safety*, 26 (1), 32-43.
- Wiener, N.**, 1949. Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series, John Wiley & Sons, New York.
- Xu, X., Hines, J.W. and Uhrig, R.E.**, 1998. On-Line Sensor Calibration Monitoring and Fault Detection for Chemical Processes, *Maintenance and Reliability Conference MARCON 98*, Knoxville, Tennessee, USA, May 1998, 55.01-55.10.



EK A

LEVENBERG-MARQUARDT OPTİMİZASYON METODU İLE İLERİ-BESLEMELİ YSA EĞİTİMİ

İleri-Beslemeli bir YSA $x(x_1, \dots, x_n)$ seklindeki bir giriş işareti serisini bir ya da daha çok çıkış işaretine $y(y_1, \dots, y_m)$ çevirir. Bu durum A.1 denklemiyle ifade edilebilir.

$$y_j = f_j(x) \quad j = 1, \dots, m \quad (A.1)$$

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 işareti kümesinin değerleri genellikle $-1/+1$ aralığına normalize edilir. j . nöronun net değeri Net_j , denklem A.2’de gösterildiği gibi hesaplanır.

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

Burada w_{ji} elemanı, i . ve j . nöronlar arasındaki ağırlık değerlerini ifade etmektedir. j . nöronun çıktısı y_j denklem A.3’de görüldüğü gibi ifade edilir.

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

f fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır ve burada bir sigmoid fonksiyonudur. θ_j , j . nöron için eşik değeridir. Eğitim sırasında, y_j çıkışlarını elde etmek için giriş örüntüleri ağırlıklı girilir. Bulunan sonuç, hedeflenen çıkış t_j ile kıyaslanır. Bundan sonra, ağırlık faktörleri denklem A.4’de gösterilen hata terimini minimize etmek için değiştirilir.

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

Ağırlık faktörleri, hata terimi kullanılarak bir parametre optimizasyon tekniği yardımıyla ayarlanmaktadır (Beale ve Jackson, 1990; Haykin, 1999). Bu tez çalışmasında YSA’larının eğitiminde, Levenberg - Marquardt algoritması, kullanılmıştır.

A.1 Parametre Optimizasyonunda Levenberg-Marquardt Algoritması

Levenberg - Marquardt methodu, bir lineer denklem takımının çözümü olan bir arama doğrultusu kullanır (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). Levenberg - Marquardt methodu, Gauss - Newton doğrultusu ile en dik yokuşun arasında bir çaprazlama arama yönü kullanmaktadır.

Bütün Quasi - Netwon metotları gibi, Levenberg - Marquardt algoritması da, ikinci derece eğitim hızına Hessian Matrisini hesaplamadan yaklaşmak üzere tasarlanmıştır. Başarım fonksiyonu toplamların karesi formuna (ileri-beslemeli YSA'ların eğitilmesinde genelde olduğu gibi) ulaştığı zaman, Hessian Matrisi tahmin edilebilmekte ve gradyan bir Jakobiye Matrisi olarak hesaplanabilmektedir. Jakobiye Matrisi, ağırlıklara ve bias'lara bağlı olan ağ hatalarının birinci dereceden türevlerini içermekte, ve e de ağ hatalarının bir vektörü olmaktadır. Jakobiye Matrisi, standart bir geri - yayılım tekniği ile Hessian Matrisinin hesaplanmasına göre çok daha basit bir şekilde hesaplanabilmektedir. Levenberg - Marquardt Algoritması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Algoritma: Öngörü hatalarının toplamı olan bir $J(w)$ fonksiyonu verildiğinde

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \quad (A.5)$$

Minimize edici parametreler

$$\hat{w} = \arg \min_{\theta} J(w) \quad (A.6)$$

aşağıdaki algoritma kullanılarak hesaplanabilir:

1. Başlangıç koşullarını ata:

İterasyon indeksini $l=1$ 'e ayarla.

$\hat{w}(1)$ ve $\mu(1)$ 'e başlangıç değerlerini ata ve η 'yi belirle

2. Modeli ve rezidüleri tayin et:

Tüm k örüntüleri ve p parametreleri için $\hat{y}(k)$ ve $\frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial w_p}$ 'yi tayin et. Rezidüel

vektör R 'yi hesapla:

$$r_k = \hat{y}(k) - y(k)$$

ve $J(\hat{w}(l))$ 'yi hesapla:

$$J(\hat{w}(l)) = \frac{1}{2} R^T R$$

Jakobiye Matrisi G 'yi hesapla:

$$g_{k,p} = \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial \theta_p}$$

3. Parametreleri yenile:

$$\Delta \hat{w}(l) = -[G^T G + \mu(l)I]^{-1} G^T R$$

4. $\hat{w}(l)$ yerine $\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l)$ kullanarak ikinci adımı tekrarla. $J(\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l))$ 'yi hesapla.

Eğer $J(\hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l)) < J(\hat{w}(l))$ ise adım büyüklüğünü artır:

$$\mu(l+1) = \mu(l) / \eta$$

ve parametreleri güncelle

$$\hat{w}(l+1) = \hat{w}(l) + \Delta \hat{w}(l)$$

değilse adım büyüklüğünü küçült:

$$\mu(l+1) = \eta \mu(l)$$

5. $l = l + 1$ olarak ata ve ikinci basamağa dön, ya da çık.

Levenberg-Marquardt Algoritmasının en büyük sorunu, bazı problemlerde çok büyük boyutlara ulaşan birkaç matrisin hafızada saklanmasına gerek göstermesidir.



EK B

KALMAN FİLTRELEMESİ

Filtrelemenin amacı bir büyüklüğü diğerinden ayırmaktır. Elektriksel bir filtrenin belirlenen bir frekans bandını geçirip bandın dışında kalan frekansları geçirmemesi gibi. Filtreleme teorisi, istenilen frekans cevabına sahip elektronik devrenin dizaynı problemiyle doğmuştur (Brown ve Hwang, 1997).

2. Dünya Savaşı sırasında Norbert Wiener başka bir filtreleme problemi üzerinde durmuştur. Gürültüyle karışmış, gürültü karakterli bir işaretin gürültüden ayrılması. Dolayısıyla temeldeki soru “Gürültülü bir işareti giriş olarak alıp işareti gürültüden en iyi şekilde ayıracak lineer işlem nedir?” sorusuydu. Burada “en iyi” ile ifade edilmek istenen ortalama karesel hatanın minimum olması durumudur. Filtrelemenin bu dalı ilk defa Wiener’in çalışmalarıyla başlamıştır (Wiener, 1949). R. E. Kalman aynı probleme state-space yaklaşımıyla yeni bir çözüm getirerek önemli bir katkıda bulunmuştur (Kalman, 1960; Kalman ve Bucy, 1961).

R. E. Kalman’ın, ayrık işaretlerin lineer filtrelenmesi ve öngörü problemi üzerine ünlü makalesinde (Kalman, 1960) açıkladığı özyineli (recursive) algoritma (Kalman Filtresi: KF) genelde sadece Kalman’ın adıyla anılmakla birlikte Kalman ve Bucy tarafından geliştirilmiştir (Dutton ve diğ., 1997). KF’nin iki ana özelliği rastgele prosesin vektörel modellenmesi ve gürültülü ölçümün özyineli işlenmesidir (Brown ve Hwang, 1997). Bu bölümde sadece, bu çalışmada kullanılmış olan ayrık zaman Kalman Filtrelemesi incelenecektir.

Durum (state) ve cevap (output) denklemleriyle ifade edilmiş bir ayrık zaman sistemi

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{u}_k \quad (\text{B.1})$$

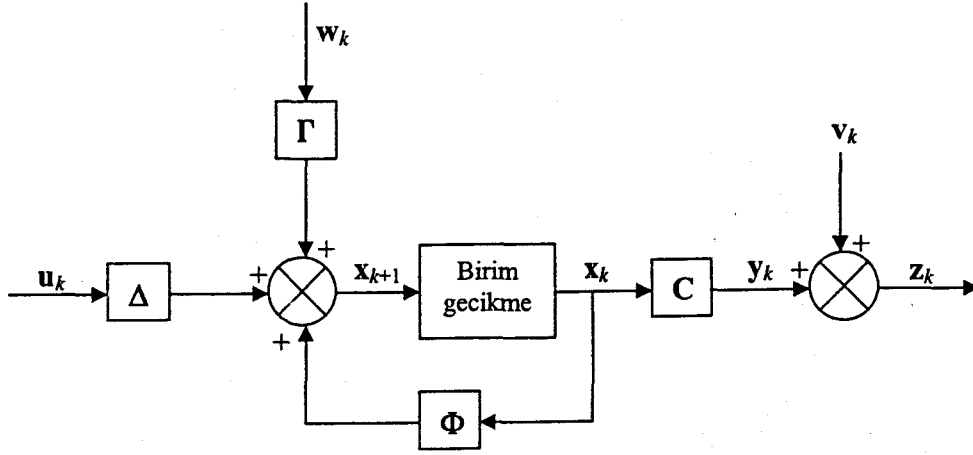
$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{C} \mathbf{x}_{k+1} \quad (\text{B.2})$$

şeklinde tanımlansın. Ayrıca sisteme, sistemden ve modellemekten kaynaklanan hatalar için bir $\mathbf{w}(t)$ rastgele gürültü işareti vektörü ile ölçme hataları ve ayrıklaştırmadan kaynaklanan hatalar için de bir $\mathbf{v}(t)$ rastgele gürültü işareti vektörü eklensin. $\mathbf{w}(t)$ vektörünün sistemle ilgili bütün gürültü kaynaklarını içermesinden dolayı bunu sisteme ekleyebilmek için bir Γ katsayılar matrisi kullanmak gerekir. $\mathbf{v}(t)$ ise her çıkış için bir gürültü faktörü içersin. Bu ayrık zaman sistemi şöyle ifade edilir:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{u}_k + \Gamma \mathbf{w}_k \quad (\text{B.3})$$

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{C} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1} \quad (\text{B.4})$$

Böyle bir sistem modeli Şekil B.1’de görülmektedir.



Şekil B.1 Ayrık zaman sistemi.

Bir ayrık zaman sisteminde belli bir $k+1$ adımında elde sadece $u_0, u_1, u_2, \dots, u_k, u_{k+1}$ ve $z_0, z_1, z_2, \dots, z_k, z_{k+1}$ değerleri olduğunu yani sistemin sadece girişinin ve çıkışta ölçtülen değerlerin bilindiği varsayalım. Amaç bu bilgiden yola çıkarak x_{k+1} (öngörülen değer ' $\hat{x}$ ' şeklinde gösterilecektir) değerini öngörmektir.

$\hat{x}_{i|j} = E[x_{ij}]$, j . adıma kadar verilen değerler kullanılarak, i . adımda x için öngörülen değeri gösterebilir. Bu durumda amaç $\hat{x}_{k+1|k+1}$ değerini bulmaktır.

$\hat{x}_{0|0}$ başlangıç değerini belirledikten sonra her bir $k+1$ adımı için $\hat{x}_{k|k}$ değeri belirlenebilir. Sisteme eklenen rastgele gürültü vektörlerinin ortalama değerleri $E[w_k] = E[v_k] = 0$ seçilecektir.

Denklem B.3'den x 'in öngörülen değeri:

$$\hat{x}_{k+1|k} = \Phi \hat{x}_{k|k} + \Delta u_k \quad (B.5)$$

ve bir sonraki adımda öngörülen ölçüm değeri de:

$$\hat{z}_{k+1} = C \hat{x}_{k+1|k} = C(\Phi \hat{x}_{k|k} + \Delta u_k) \quad (B.6)$$

olarak bulunur. $k+1$. zaman adımında z_{k+1} değeri ölçülebilir. Buradan öngörü hatası:

$$\tilde{z}_{k+1} = z_{k+1} - \hat{z}_{k+1} \quad (B.7)$$

bulunur. Bu öngörü hatasını sıfıra götürmek için uygulanabilecek yollardan biri, durum vektörünün elemanlarına, öngörü hatasını çeşitli oranlarda eklemektir. Bunu ifade etmek için denklem B.5'den

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \Phi \hat{x}_{k|k} + \Delta u_k + K \tilde{z}_{k+1} \quad (B.8)$$

eşitliği yazılabilir. K matrisi hatanın, durum denklemi katsayıları içinde dağılımını belirler. 'Filtre Kazanç Matrisi', 'Kalman Kazanç Matrisi' veya kısaca 'Kalman Kazancı' olarak adlandırılır. Denklem B.6 ve B.7, denklem B.8'de yerine konursa:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k + \mathbf{K} [\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{C}(\Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k)] \quad (\text{B.9})$$

düzenlenirse:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{C}] \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k + \mathbf{K}\mathbf{z}_{k+1} \quad (\text{B.10})$$

elde edilir. Denklem B.10'dan görüldüğü gibi $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1}$ sadece, ölçülen çıkış ($\mathbf{z}_{k+1}$), önceki adımda öngörülen değer ($\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$) ve önceki adımdaki girişe ($\mathbf{u}_k$) bağlıdır.

$\mathbf{K}$ matrisinin seçimi filtrenin performansını belirler.

Öngörü hatası:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} \quad (\text{B.11})$$

şeklinde ve hatanın kovaryans matrisi de

$$\mathbf{P}_k = E[\tilde{\mathbf{x}}_k \tilde{\mathbf{x}}_k^T] \quad (\text{B.12})$$

olarak tanımlansın. KF'si, kovaryans matrisi $\mathbf{P}_k$ 'yi minimize etmek için uygun Kalman Kazanç Matrisi $\mathbf{K}$ 'yi belirler.

$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$: k . adımda öngörülen en küçük varyansa sahip $\mathbf{x}$ değeri,

$\tilde{\mathbf{x}}_k = (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})$: Öngörü hatası,

$\mathbf{P}_k = \text{cov}(\tilde{\mathbf{x}}_k)$: Hatanın kovaryans matrisi (minimize edilen değer),

$\mathbf{Q} = \text{cov}(\mathbf{w}_k)$: Sistem gürültüsünün kovaryansı,

$\mathbf{R} = \text{cov}(\mathbf{v}_k)$: Ölçme gürültüsünün kovaryansı,

olmak üzere $k+1$. adım için KF algoritması:

$$\mathbf{P}_k^* = \Phi \mathbf{P}_k \Phi^T + \Gamma \mathbf{Q} \Gamma^T \quad (\text{B.13})$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}^T [\mathbf{C} \mathbf{P}_k^* \mathbf{C}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (\text{B.14})$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}] \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k|k} + \Delta \mathbf{u}_k + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{z}_{k+1} \quad (\text{B.15})$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{C}] \mathbf{P}_k^* \quad (\text{B.16})$$

şeklinde ifade edilir (Dutton ve diğ., 1997).

KF'nin kullandığı tek bilgi -önceden belirlenmesi gereken- sistem ve ölçme gürültüsü bilgilerini taşıyan $\mathbf{Q}$ ve $\mathbf{R}$ matrisleridir. Bu matrisler (ve Γ matrisi) Kalman Kazanç Matrisi $\mathbf{K}$ 'nin dolayısıyla öngörü hatası kovaryans matrisi $\mathbf{P}_k$ 'nin alacağı değerleri belirler.

KF'nin performansı $\mathbf{Q}$ ve $\mathbf{R}$ matrislerinin belirlenmesindeki doğruluğa sıkı bağlıdır.

Ölçme gürültüsünü modellemek için kullanılan kovaryans matrisi $\mathbf{R}$, sistemin işaretlerinden belirlenebilir.

Sistem gürültüsünü modellemek için kullanılan kovaryans matrisi $\mathbf{Q}$ 'nun belirlenmesi zordur. Pratikte gürültü vektörü $\mathbf{w}$, sadece beyaz gürültüden

oluşturulabilir. Farklı kaynaklardan gelen gürültülerin ilintisiz (uncorrelated) olduğu kabul edilirse, kovaryans matrisi Q diagonal bir matris olur.

KF'nin genel karakteristiği Q ve R matrisleriyle belirlenir. Q kovaryans matrisinin elemanları küçültüldükçe veya R kovaryans matrisinin elemanları büyütüldükçe öngörü, tersi durumda ölçme ağırlık kazanır.

Kalman Kazanç Matrisi K sıfır matrisine doğru gideceğinden Q kovaryans matrisinin diyagonal elemanlarının tamamı sıfır olamaz.

Kalman filtresinin nasıl çalıştığını daha iyi açıklamak için geceleyin denizde kaybolmuş bir tekne gözönüne alınabilir. Başlangıçta teknenin konumu hakkında hiç bir bilgi olmasın. Konumu tayin etmek için bir yıldız seçilsin (problemi basitleştirmek için tek boyutlu bir uzay göz önüne alınsın). Bir t_1 anında konum z_1 olarak belirlensin. Ölçüm cihazının hatalarından ve insan hatasından dolayı belirlenen konum bir belirsizlik taşıyacaktır. Konumu belirlemede yapılan hatanın varyansı $\sigma_{z_1}^2$ olsun. Daha sonra $t_2 \cong t_1$ anında daha iyi navigasyon bilgisine sahip bir diğer kişi konumu tekrar belirlesin ($t_2 \cong t_1$ olduğu için henüz konum değişmemiş kabul edilebilir). İkinci belirlenen, z_2 konumundaki hatanın varyansı da $\sigma_{z_2}^2$ olsun. İkinci kişi daha iyi bir navigasyon bilgisine sahip olduğundan z_2 konumunun belirlenmesinde yapılan hata daha küçük olacaktır ($\sigma_{z_2}^2 < \sigma_{z_1}^2$).

Şimdi konumu belirlemek için kullanılabilecek iki ölçüm değeri var. Kalman filtresi, "konumu en iyi şekilde belirlemek için bu iki veriden nasıl yararlanılabilir?" sorusuna verilmiş bir cevaptır. $t_2 \cong t_1$ anında verilen z_1 ve z_2 konumlarından ortalama değeri μ ve varyansı σ^2 olan en doğru konum öngörüsü:

$$\mu = \left[\sigma_{z_2}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2) \right] z_1 + \left[\sigma_{z_1}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2) \right] z_2 \quad (B.17)$$

$$1/\sigma^2 = (1/\sigma_{z_1}^2) + (1/\sigma_{z_2}^2) \quad (B.18)$$

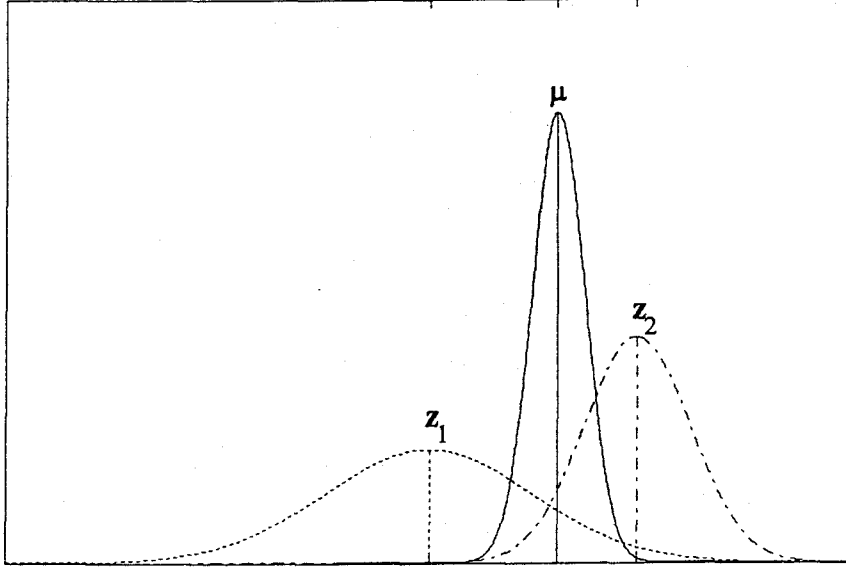
şeklinde yapılabilir. Denklem B.18'den görüldüğü gibi öngörülen konumun standart sapması σ , birinci belirlenen konumun standart sapmasından da (σ_{z_1}) ikinci belirlenen konumun standart sapmasından da (σ_{z_2}) küçüktür. Dolayısıyla iki değer kombinasyonundan elde edilen konum bilgisinin istatistik belirsizliği daha küçük olur.

Bulunan olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre optimal konum öngörüsü

$$\hat{x}(t_2) = \mu \quad (B.19)$$

olacaktır.

z_1 , z_2 ve μ konumlarının olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi Şekil B.2'de görülmektedir.



Şekil B.2 z_1 , z_2 ve μ konumlarının, olasılık yoğunluk fonksiyonlarıyla birlikte şematik ifadesi.

Eğer $\sigma_{z_1} = \sigma_{z_2}$ ise yani ölçümler eşit hataya (precision) sahipse denklem B.17'den görüleceği gibi optimal öngörü iki ölçüm değerinin ortalaması olacaktır. Eğer $\sigma_{z_1} > \sigma_{z_2}$ ise bir diğer deyişle z_1 ölçümündeki belirsizlik z_2 ölçümündekinden büyükse z_2 'nin ağırlığı z_1 'den büyük olacaktır yani öngörülen konum değeri z_2 'ye daha yakın olacaktır.

Denklem B.17 $\hat{x}(t_2)$ için tekrar yazılırsa:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t_2) &= [\sigma_{z_2}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)] z_1 + [\sigma_{z_1}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)] z_2 \\ &= z_1 + [\sigma_{z_1}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2)] [z_2 - z_1]\end{aligned}\quad (B.20)$$

veya Kalman Filtresi'nin gösteriminde kullanılan genel şekliyle ($\hat{x}(t_1) = z_1$ olduğundan):

$$\hat{x}(t_2) = \hat{x}(t_1) + K(t_2)[z_2 - \hat{x}(t_1)] \quad (B.21)$$

$$K(t_2) = \sigma_{z_1}^2 / (\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2) \quad (B.22)$$

şeklinde yazılır.

t_2 anındaki optimal öngörü $\hat{x}(t_2)$, z_2 ölçülmeden önceki optimal öngörü $\hat{x}(t_1)$ terimine; optimal ağırlık değeri düzeltme terimi $K(t_2)$ 'nin, z_2 ile ölçümden önceki optimal öngörü $\hat{x}(t_1)$ 'in farkıyla çarpımının eklenmesiyle bulunur. Bu KF'nin öngörü-düzeltilme yaklaşımıdır. Dolayısıyla öngörülen değerle ölçüm sonuçlarından belirlenen bir düzeltme terimi, takip eden ölçüm alındığı zaman hesaplanmakta ve ölçüm alındıktan sonra yapılan öngörü düzeltmek için kullanılmaktadır.

Denklem B.22'deki $\mathbf{K}(t_2)$ denklem B.18'de yerine konularak tekrar yazılırsa

$$\sigma_x^2(t_2) = \sigma_x^2(t_1) - \mathbf{K}(t_2)\sigma_x^2(t_1) \quad (\text{B.23})$$

elde edilir (Maybeck, 1979).



EK C

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ VE ÇOK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ANALİZ (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

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (C.1)$$

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

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (C.2)$$

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

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (C.3)$$

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

Ters dalgacık dönüşümü:

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (C.4)$$

şeklinde tanımlanır. C_{ψ} terimi

$$C_{\psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (C.5)$$

olarak verilir. Burada $\tilde{\psi}(\omega) = F(\psi(t))$, $\psi(t)$ 'nin Fourier integral dönüşümüdür.

Ters dönüşümün var olabilmesi için $C_{\psi} < \infty$ şartının sağlanması gereklidir.

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

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (C.6)$$

haline gelir ve ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü

$$DWT_\psi x(m,n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (C.7)$$

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 ayrıştırmayı 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 işaret ayrıştırması* 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

$$c_1(n) = \sum_k h(k-2n) c_0(k) \quad (C.8)$$

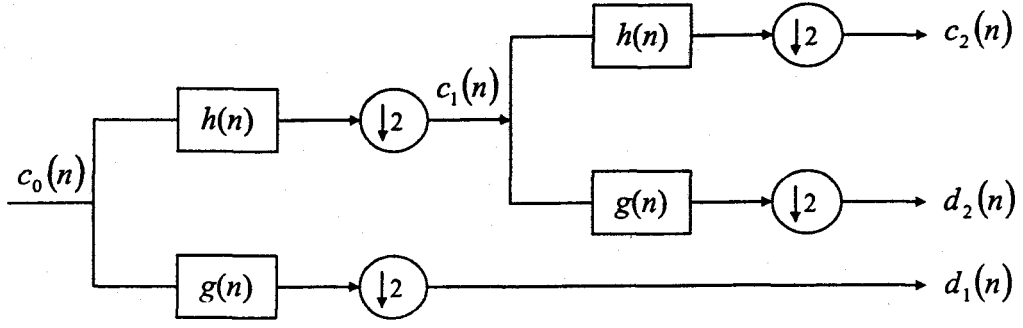
$$d_1(n) = \sum_k g(k-2n) c_0(k) \quad (C.9)$$

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

$$c_2(n) = \sum_k h(k-2n) c_1(k) \quad (C.10)$$

$$d_2(n) = \sum_k g(k-2n) c_1(k) \quad (C.11)$$

ile verilir. Böylece daha yüksek seviyelerdeki ölçek ayrıştırmaları da benzer yolla sürdürülebilir. Çok çözünürlüklü işaret ayrıştırma tekniğinin iki ölçeğe göre gerçekleştirilmesi Şekil C.1'deki gibi gösterilebilir (Mallat, 1989).



Şekil C.1 $c_0(n)$ 'nin iki ölçeğe ayrıştırılması.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında İstanbul'da doğdu. 1994 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 1997 yılında İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, Nükleer Uygulamalar Anabilim Dalı'nda yüksek öğrenimini tamamlayarak Nükleer Enerji Yüksek Mühendisi ünvanını aldı. 15.7.2001 - 15.12.2001 tarihleri arasında 5 ay süreyle Hollanda EPZ Borssele Nükleer Güç Santrali'nde doktora tezine yönelik bilimsel araştırma ve çalışmalarda bulundu. 1997 yılından beri İTÜ Enerji Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

