

YAPAY SİNİR AĞLARIYLA NÜKLEER REAKTÖRLERDE KONTROL ÇUBUĞUNUN TİTREŞİM ANALİZİ

Burak BARUTÇU¹

Emine AYAZ²

Serhat ŞEKER³

¹İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, 80626, Maslak, İstanbul

^{2,3}İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi

Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

¹e-posta: barutcu@nukleer.itu.edu.tr

²ayaz@elk.itu.edu.tr

³seker@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yapay Sinir Ağı, Nükleer Reaktör, Kontrol Çubuğu, Titreşim.

ABSTRACT

In normal weekly operation of the Delft Interfaculty Research Reactor (HOR) very small periodic fluctuations were observed on the reactor safety signals. To understand the cause of these periodic fluctuations, signals were measured with on-line reactor noise analysis in time and frequency domain. In addition, reactivity was derived on-line from the safety channel signals using the inverse kinetics method. The amplitudes of these oscillations were decreasing only with the safety control rod 2-out position in the core. The neural network technique is used to understand the changes of the reactivity in connection with applied network topology. This paper presents the methods and the results of the reactivity and the noise measurements and the applicability of the neural networks.

1. GİRİŞ

Hollanda Delft Üniversitesi, Disiplinler Arası Reaktör Enstitüsü'nde (IRI) bulunan Araştırma Reaktörü'nün (HOR) verileri, bu çalışma için esas alınıp incelemeler bu veriler üzerinde yapılmıştır [1-4]. Söz konusu bu reaktörün çalışması sırasında bazı küçük, periyodik salınımlar saptanmıştır. Bu periyodik salınımlar 1999'un başlarında, reaktör operatörleri tarafından, güvenlik kanalındaki nötron detektörlerinde gözlenmiştir. Sürekli olmamalarına ve genliklerinin küçük olmasına (tepeden tepeye % 1-2) rağmen salınımlar açıkça görülebilmektedir. Salınımların genliği ise haftalık işletimin sonuna doğru yavaşça azalmıştır. Bu etkinin sebebini araştırmak için, online dinamik işaret analiz sistemi DSA-2 (PS/DSP-ADC tabanlı bir online gerçek-zaman sistemi) dört güvenlik kanalına doğrudan bağlanmış, daha sonra ölçümlere reaktör soğutucu akışkanının debimetresinden alınan işaretler de eklenmiştir [5]. Güvenlik kanallarından alınan işaretler, haftalık işletimin başından sonuna kadar zaman ve frekans domenlerinde online olarak analiz edilmiştir. Online olarak hesaplanan Normalize Öz Güç Spektral Yoğunluğu (NÖGSY) ve Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu (ÇGSY) fonksiyonları, haftalık işletimin başında görülen 1.30 Hz frekanslı spektral

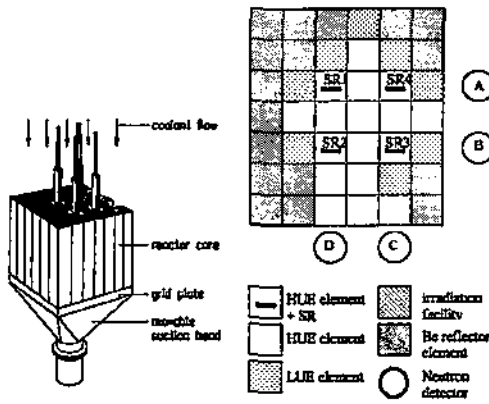
tepelelerin genliklerinin, çalışmanın sonuna doğru yavaşça düştüğünü ve frekansın da 1.50 Hz'e çıktığını göstermiştir. Detektör işaretleri arasındaki çapraz ilişki, faz kaymalarının pratik anlamda sıfır olduğunu, yani işaretlerin çok ilintili olduğunu göstermiştir. Ayrıca dört güvenlik kanalı nötron detektöründen, farklı global ve lokal etkiler de gözlenmiştir. Salınımların RMS'inin, SR-2'nin daldırılma derinliğine lineer bağımı olduğu görülmüştür. Bu gözlemlerde 16 bitlik ADC kullanılmıştır. Ek olarak online ters kinetik metot kullanılarak reaktivite hesaplanmış ve reaktivite değişimleri doğrudan doğruya işaretlerden bulunmuştur. Kontrol çubuklarının daldırma derinliklerinin değiştirilmesi, reaktivite salınımlarının genliğinin sadece SR-2 kontrol çubuğunun daldırma derinliğiyle değiştiğini göstermiştir. İşletme çevriminin sonunda kontrol çubuklarının saptamaları kontrol edilmiş ve SR-2'nin mekanik saptamasının 1/3 tür gevşemiş olduğu görülmüştür. Çubuğun sabitlenmesiyle salınımlar kaybolmuştur [6].

Bu bildiride reaktörün yapısı, deney yoluyla yapılan gözlemler, gürültü ölçümlerinin sonuçları, reaktivite ölçümleri, yapay sinir ağı uygulamaları ve varılan sonuçlar verilecektir.

2. ARAŞTIRMA REAKTÖRÜNÜN YAPISI VE ÖLÇME SİSTEMİ

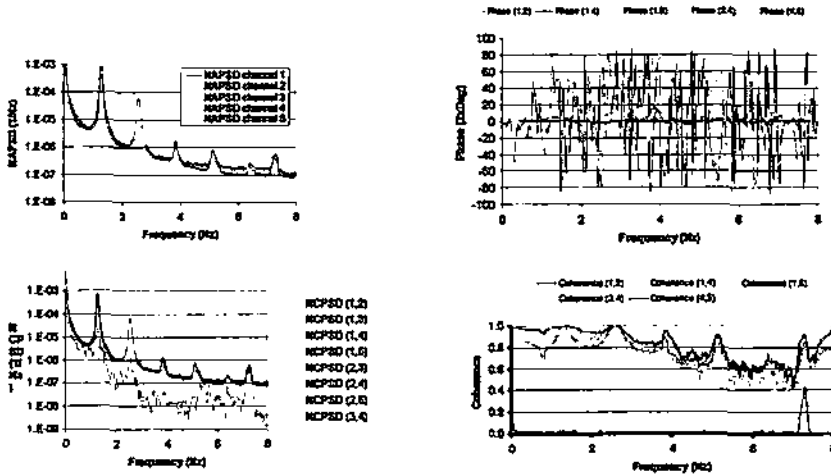
HOR, Hollanda Delft Üniversitesi Disiplinler Arası Reaktör Enstitüsü'nde bulunan havuz tipi bir araştırma reaktörüdür. 1963'ten beri işletilmektedir. American Machine & Foundry Company tarafından dizayn ve inşa edilmiştir. Hem yüksek zenginlikte (YZU) hem de düşük zenginlikte (DZU) MTR tipi yakıtlara sahiptir. Maksimum lisanslı gücü 3 MW'tır ve sürekli olarak haftada 100 saatlik periyotlarla, yılda 40 hafta, 2 MW gücünde işletilmektedir. Ortak Bilimsel Program (IRI 1998) dahilinde, Hollanda üniversitelerinin çoğu tarafından araştırmalarda ve çeşitli reaktör gürültüsü deneylerinde kullanılmıştır.

Şekil-1'de HOR'un kalbinin şematik görünümü, dört reaktör güvenlik kanalı nötron detektörlerinin (B-10 kaplı iyonizasyon odası) konumu da dahil olmak üzere gösterilmektedir. 1999'un başlarında, reaktör güvenlik kanallarındaki nötron detektörlerinde önce zaman zaman, daha sonraları bütün haftalık işletim boyunca çok küçük salınımlar gözlenmiştir. Reaktörün tam güçte (2 MW) işletiminin başlangıcında, 4 kontrol çubuğu ortalama %55 dışarıdadır, haftalık operasyonun sonunda ise %89 çekilmiş olurlar. Kontrol çubuklarının asimetric daldırılması durumunda (SR'lar arasında maksimum %10 farka izin verilmektedir) kontrol çubuğu SR-2, diğerlerinden daha çok daldırıldığında salınımların arttığı gözlenmiştir. Salınımların global normalize genliği, 4 nötron detektöründen (kanal 1-4'te, A, B, C ve D ile işaretli) alınan işaretlerin normalize değerlerinin %1'i civarındadır.



Şekil-1. HOR'un kalbinin şematik görünümü

Bu işaretlerin davranışını incelemek için 4 akım işareti, izolasyon amplifikatörü üzerinden alınmıştır.



Şekil-2. SR-2 (%67.1 dışarıda) gürültü deneyinin NÖGSY, NÇGSY, Faz ve Koherens değerleri

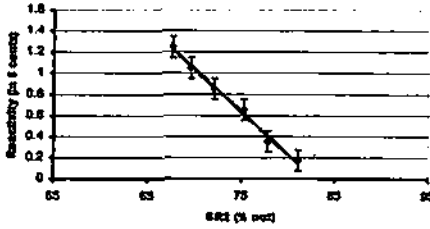
ECN Dynamic Signal Analyzer DSA-2, yüksek performanslı, PS/DSP-ADC bir ölçme sistemidir [5]. DSA-2 gerçek-zamanda, hem frekans hem de zaman domeninde çalışır. 8 kanala kadar işareti işler, analog ve digital filtrelemede eşit zaman sabitlerine sahiptir, 16 bit data dönüşümlüdür. Bu sistemle frekans ve zaman domeninde çok kanallı ve çok modlu digital işaret işleme gerçekleştirilmiştir. DSA-2 aynı zamanda örneklenmiş olan nötron detektörü işaretlerinden ters kinetik denklemlerini çözen bir online, çift kanal reaktivite analizörüdür. Reaktivite hesabında işaretler 4 örnek/s hızla örneklenmiştir. Ölçümler sırasında temel olarak reaktörün 5 işareti kullanılmıştır. Bunlar, dört güvenlik kanalından gelen işaretler (bak. Şekil-1, A-D detektörleri, Centronic type: RC7EB/AERE, B-10 kaplı iyon odaları) ve kalp soğutucu akışkanından ısı değiştiricide alınan işarettir. İşaretler, gürültü amplifikatörleriyle ayrı ayrı işlenmemiş, ölçümler esnasında DC supression modu kullanılmıştır. Verilen işaret kombinasyonları için gerçek-zamanda FFT ve IFFT'den önce, digital alçak geçiren filtreleme, zaman tabanlı desimasyon ile uygulanmıştır. Ayrıca bütün işaret kombinasyonları için tüm çapraz fonksiyonlar $N\dot{C}GSY_{jk}(f)$, $Faz_{jk}(f)$ ve $Koherens_{jk}(f)$ değerleri hesaplanmıştır.

3. REAKTÖR GÜRÜLTÜ ÖLÇÜMLERİ

DSA-2 sistemi kullanılarak ölçülen beş işaretin (soğutucudan ve dört detektörden) AC komponentleri zaman ve frekans domeninde online analiz edilmiştir. Bu ölçümlerde genellikle 16 örnek/s örnekleme hızı seçilmiş ve çapraz kombinasyonlar zaman ve frekans domenleri için aynı anda hesaplanmıştır. Bu çalışmada iki örnek verilecektir. İlki işaretlerin frekans domenindeki davranışlarını göstermektedir. Dört nötron detektöründen alınan işaretlerin NGSY'lerinin davranışı aynıdır. Sadece ilk rezonans tepesinin genliği biraz değişim göstermekte ve daha yüksek harmonikler görülmektedir (Bkz. Şekil-2, sol üst).

NÇGSY kombinasyonlarının çoğu da özdeş frekans tepeleri göstermektedir (Şekil-2, alt). İşaretler arasındaki faz da Şekil-2'de (sağ üst) gösterilmiştir. Nötron detektörlerinin arasındaki fazın pratikte sıfır olduğu, akış ve nötron detektörleri arasındaki ise -180 ile +180 arasında değiştiği görülmektedir. Nötron detektörlerinden alınan işaretler birbirleri ile yüksek koherens gösterirken, nötron detektörü işaretleri ile soğutucu akış hızı işareti arasındaki koherens sıfırdır. SR-2 %65 dışarıdayken salınım frekansı 1.30 Hz'dir.

Bu deneyler, işletim esnasında kontrol çubuklarının konumları değiştirildiği için haftalık işletim süresince tekrarlanmıştır. NÖGSY'ler bütün nötron detektörlerinde tepe frekanslarının 1.30 Hz - 1.50 Hz arasında değiştiğini göstermiştir. Bütün nötron detektörlerinin işaretleri için de bu davranışın aynı olduğu görülmüştür. Diğer karakteristikler hemen hemen aynı kaldı. Haftalık işletim esnasında alınan birkaç ölçüm, frekansın SR-2'nin konumuna bağlı olarak yavaşça değiştiğini gösterdi. Şekil-3 SR-2'nin pozisyonuna bağlı olarak gerçekleşen reaktivite değişimlerini göstermektedir.



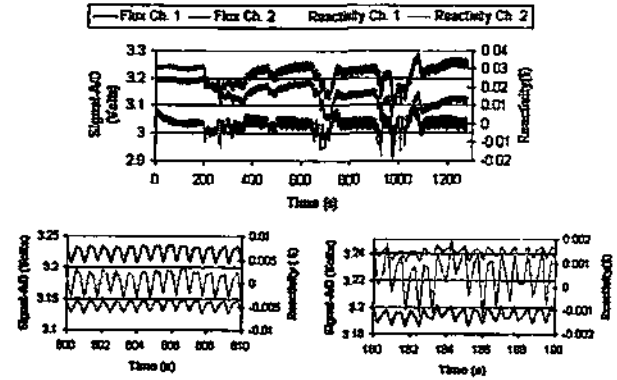
Şekil-3. SR-2'nin pozisyonuna bağlı olarak gerçekleşen reaktivite değişimleri

Bu analiz sonucunda bulunan reaktivite değeri ölçümlerden hesaplanan değerle aynı mertebededir. Bu analizlerden elde edilen bilgi zaman domenli analizinden elde edilenlere uymaktadır.

SR-2 farklı konumlara getirilerek, reaktörün güçlü diğer çubuklarla sabit tutulurken, salınımların genlik ve frekansının dolayısıyla reaktivitenin SR-2'nin pozisyonuna (% dışarıda) bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Şekil-4'te SR-2'nin farklı konumları için iki güvenlik kanalından alınan işaretler ve hesaplanan reaktiviteler gösterilmektedir.

Ölçümlerin 200 saniyesinde SR-2 %80 dışarıda, SR-1 %77, SR-3 %72 ve SR-4'de %77 dışarıdadır. Takip eden adımda SR-2 %74 dışarıda konumuna getirilmiş ve diğerleri de denemenin sonuna kadar yeni pozisyonlarına gelmişlerdir. Her iki işaret için de reaktivite salınımlarının genliğinin sabit olduğu ayrıca A ve D işaretlerinden hesaplanan reaktivitelerin tam olarak aynı olduğu (üst üste çakıştıkları için sadece biri görülebiliyor) Şekil-4'te görülmektedir. Bu durum

alttaki iki pencerede SR-2'nin farklı konumları için yakından gösterilmiştir. (Solda %74 dışarıda, sağda %80 dışarıda)

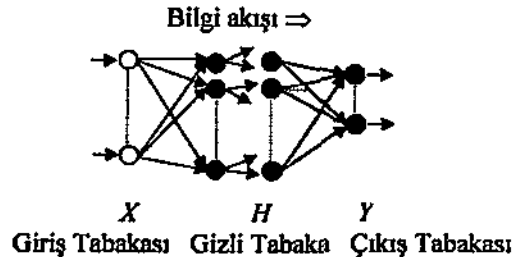


Şekil-4. SR-2'nin farklı konumları için iki güvenlik kanalından (A ve D) alınan işaretler ve hesaplanan reaktiviteler

Evvelkinin tersine SR-2'nin pozisyonu sabit tutulup diğer çubukların konumları değiştirildiğinde akı salınımlarının hemen hemen hiç olmadığı gözlenmiştir [7].

4. REAKTİVİTE ÖLÇÜMÜNDE YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMALARI

Basit ileri-beslemeli bir yapay sinir ağı (YSA), bir giriş tabakası, bir veya daha çok gizli tabaka ve bir çıkış tabakası olmak üzere üç bileşenden oluşur (Şekil-5).



Şekil-5. Çok tabakalı ileri-beslemeli ağ.

Sinir ağının her bir tabakası "düğüm" ya da "nöron" denilen bir grup işleme ünitesini içerir. Bir ağ tabakasındaki her işleme elemanı, çıkışını -bilgi akışı doğrultusunda- bir sonraki tabakada bulunan bütün elemanlara gönderir. Fakat aynı tabakaya dahil elemanlar arasında bağlantı yoktur. Sinir ağının giriş tabakası, dış dünyadan bilgiyi alıp ağına iç işleme ünitelerine aktaran bir arabirim görevini yapar. Gizli tabakalar, bilgi akışı esnasında bilgiye ilişkin özellik çıkarımı için kullanılır. Çıkış tabakası sistem çıkışını verir. İleri beslemeli YSA'nın kullanımında, iki adım vardır. Biri öğretim ve diğeri de YSA'nın bilinmeyen çıkış örüntüsünü veren giriş örüntüsünü geri almak ya da istemektir. Bu uygulamada YSA modeli olarak

4.1 GERİ-YAYILMA ALGORİTMASI VE REAKTÖR VERİLERİNE UYGULANMASI

Geri-yayılma öğretim algoritması çok kullanılan ve öğretimde hatayı en hızlı düşüren algoritmadır. E hatasını en küçüğe indirmek için optimal bir w arar. Genel yöntem aşağıdaki gibidir:

- 1) $\frac{\partial E}{\partial w}$ hesaplanır
- 2) Ağırlık $w(n)$ 'den $w(n+1)$ 'e güncellenir
 $w(n+1) = w(n) + \Delta w(n)$ (1)
 $\Delta w_{ji}(n+1) = \eta \delta_j o_j + \alpha \Delta w_{ji}(n)$ (2)

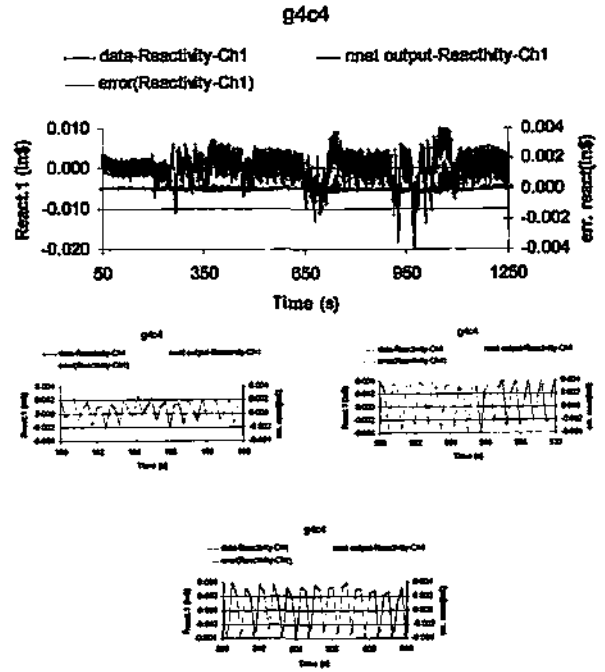
(2) denklemine delta kuralı denir. Ağ ağırlıklarını adapte etmek için çok kullanılan bir yoldur. Bu eşitlikte, η 'ya öğrenme hızı denir. $\alpha \Delta w_{ji}$ ise momentum terimi diye adlandırılır ve ağırlık güncelleme eşitliğine, lokal minimumu elimine etmek için katılır. Bu çalışmada, nükleer araştırma reaktöründe, reaktör kontrol çubuğunun durumunun izlenmesi amacıyla yapay sinir ağları kullanılmıştır. Akı ve reaktivite verileri farklı giriş ve çıkışlar için kullanılarak üç YSA uygulaması yapılmıştır. Bir gizli tabakalı ve geriye yayılım algoritmasının kullanıldığı YSA'ların yapıları şöyledir:

YSA1: Giriş ve çıkış verileri 1. ve 2. kanallara ait akı ve reaktivite verileri olmak üzere 4 giriş ve 4 çıkış düğümü bulunan ve gizli tabakadaki nöron sayısı 10 olan oto-asosyatif bir ağıdır.

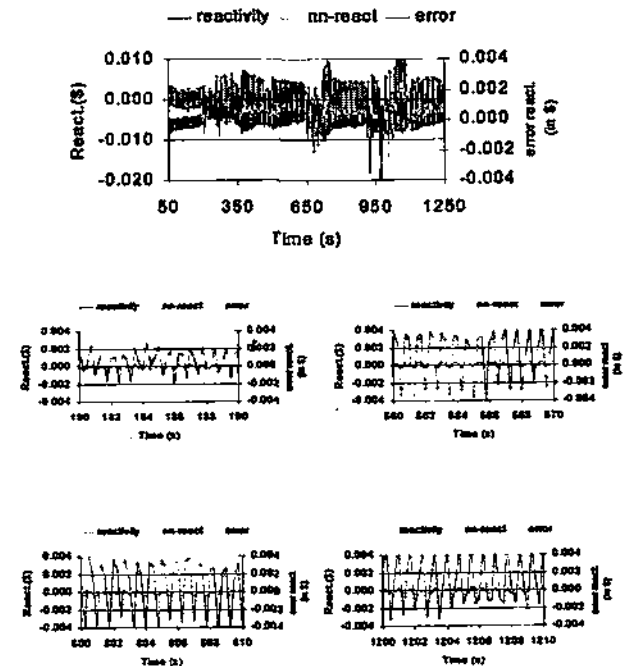
YSA2: Giriş verileri 1. ve 2. kanallara ait akı verileri ile birlikte yine bu kanallara ait reaktivite ölçümleri toplamının yarısı alınarak oluşturulmuş olup çıkış olarak da 1. kanala ait reaktivite verisi kullanılmıştır. 3 giriş 1 çıkıştan oluşan bu ağda gizli tabakadaki nöron sayısı 10'dur.

YSA3: Giriş verileri 1. ve 2. kanallara ait akı ölçümleri ve çıkış verileri yine aynı kanallara ait reaktivite ölçümleri olup giriş ve çıkışta 2 düğüm bulunan bu ağda gizli tabakadaki nöron sayısı 5'dir.

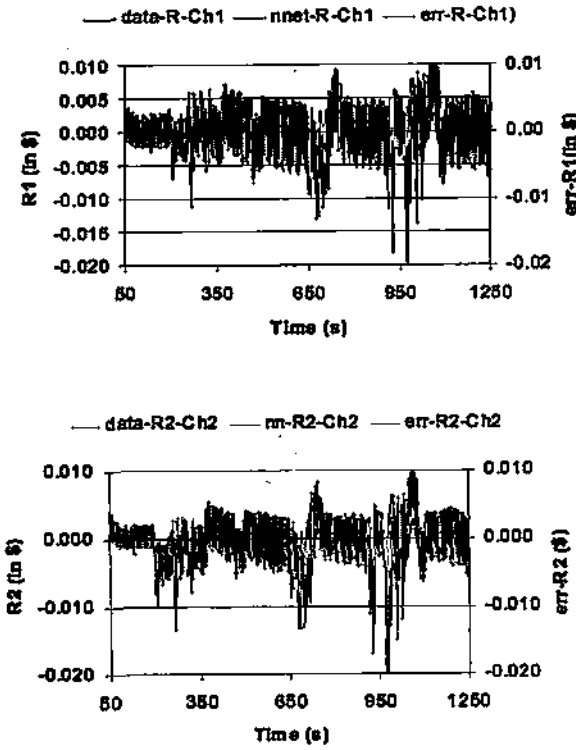
Belirtilen ağ yapıları için öğrenme fazında belli aralıklardan oluşan eğitim seti hazırlanmıştır. Bu aralıklar verilerin sırasıyla 0.25-160, 191-400, 381-480, 491-580, 571-780, 801-830, 851-880, 901-1130, 1151-1200, 1251-1279.25 s'lik kısımlarıdır. Yeterli eğitim sağlandıktan sonra verilerin tümü için YSA'ların testi yapılmıştır. Şekil-6, Şekil-7 ve Şekil-8 da ölçülen veri, YSA sonucu; bu ikisinin arasındaki fark olan hata ve kontrol çubuğunun konumunun sabit bırakıldığı yerlerin bir kısmı açılarak çizilmiştir.



Şekil-6. YSA1 için ağın hesapladığı reaktivite ve gerçek değerlerle karşılaştırılması.



Şekil-7. YSA2 için ağın hesapladığı reaktivite ve gerçek değerlerle karşılaştırılması.



Şekil-8. YSA3 için ağı hesapladığı reaktivite ve gerçek değerlerle karşılaştırılması.

5. SONUÇ

Güvenlik kanalı nötron detektörü işaretlerindeki salınımlara, güvenlik kontrol çubuğu SR-2'nin salınımı neden olmaktadır. Bu salınımları ise soğutucu akışkanın akışı oluşturmaktadır. Bu gözlemler sonucunda kontrol çubuğu bağlama elemanında çok küçük bir gevşeklik olduğu tespit edilmiş ve düzeltilmiştir. Bu salınımlar, kontrol çubuğunun kalp içindeki konumuna bağlı olarak çok küçük reaktivite dalgalanmalarına neden olmaktadır. Reaktivite salınımlarının genliği, ölçülen işaretlerden ters kinetik denklemleriyle hesaplanmış, reaktivite gürültüsü analizi ile de doğrulanmıştır. Reaktördeki güvenlik kontrol çubuğunun daldırılma derinliğine bağlı olarak ölçülen frekansın 1.30 ile 1.50 Hz arasında değiştiği gözlenmiştir.

Bu çalışma ile yapay sinir ağı girişine uygulanan akı ve reaktivitelerin, çıkışta akı ve reaktiviteyi (YSA1) veya sadece reaktiviteyi (YSA2) verecek şekilde ilişkilendirerek reaktör kontrol çubuğunun durumunun izlenmesi amacıyla yapay sinir ağı modelleri gerçekleştirilmiştir. Ağ girişine akının, çıkışa da reaktivitenin uygulandığı durumda (YSA3) girişle çıkış arasındaki ilişki öğrenilememiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, yapay sinir ağı uygulamaları için deneysel veriyi sağlayan Delft Üniversitesi Disiplinler Arası Reaktör Enstitüsü'ne (IRI) ve özellikle IRI/ECN Nükleer Analiz Grubu'ndan Sn. Erdinç TÜRKCAN'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- [1] IRI Scientific Annual Report 1998. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. J.E. Hoogenboom, H. van Dam, E. B. J. Kleiss, G. C. van Uiter and D. Velthuis, (1982). Determination of Noise Sources and Space-Dependent Reactor Transfer Functions From Measured Output Signals Only, Progress in Nuclear Energy, Vol. 9, p279-290.
- [2] R. Kozma, E. Türkcan, J. P. Verhoef, (1992). Early detection of coolant boiling in research reactors, presented at 15th RERTR Meeting, Roskilde, Denmark.
- [3] E. Türkcan, R. Kozma, K. Nabeshima, J. P. Verhoef, (1993a). On-line system for monitoring of boiling in nuclear reactor fuel assemblies, in *IAEA Technical Committee Meeting on In-Core Instrumentation and In-Situ Measurement in Connection with Fuel Behavior* Petten, The Netherlands, 26-28 October 1992; also in *ECN-RX-93-007*, Petten, The Netherlands.
- [4] H. Schoonewelle, T. H. J. J. van der Hagen and J. E. Hoogenboom, (1995). Practical and theoretical aspects of the sequential probability ratio test for anomaly detection, in *Proceedings of the SMORN-VII Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics*, 19-23 June 1995, Avignon, France, 1, 3.9, pp. 240-246.
- [5] E. Türkcan, J. W. de Vries, S. J. D. van Linge, T. H. J. J. van der Hagen, and H. van Dam, to be presented in "International Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT 2000)", Washington, DC, November 12-16, 2000.
- [6] E. Türkcan, (1993b). Handbook, *On-line Dynamic Signal Analyzer DSA-2*, ECN, Petten, The Netherlands.
- [7] E. Türkcan, (1965). Rod Drive method for calculation of the reactivity, RCN-65, 1965, The Reactor Centrum Nederland, Petten, The Netherlands.