

YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANIMI İLE YÜKSEK SICAKLIKLI GAZ SOĞUTMALI NÜKLEER REAKTÖRLERDE ÖLÇÜLEMİYEN FİZİKSEL BÜYÜKLÜKLERİN BELİRLENMESİ

Emine AYAZ¹

Serhat ŞEKER²

Burak BARUTÇU³

^{1,2}İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

³İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, 80626, Maslak, İstanbul

e-posta: ¹ayaz@elk.itu.edu.tr ²seker@elk.itu.edu.tr ³barutcu@nukleer.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yapay Sinir Ağı, Yüksek Sıcaklıklı Mühendislik Test Reaktörü, Simülasyon.

ÖZET

Bu çalışma gerçek zamanda, güç üretimi esnasında nükleer santraldaki bozucu durumları belirlemede Yapay Sinir Ağlarından (YSA) nasıl yararlanılacağını gösterir. Çalışmada kullanılan veri, Japonya'daki Yüksek Sıcaklıklı Mühendislik Test Reaktörü (YSTR)'ünün güçte işletimi için simüle edilmiştir. Güç işletiminin geniş bir aralığında elde edilen 56 farklı işaret reaktör dinamiği simülasyonu kodu yardımı ile bir kaç saatlik bir süre için farklı güç eğilimlerinde, 30-100% nominal güç aralığında üretilmiştir. YSA uygulamaları ile de sisteme ilişkin ölçülebilir fiziki büyüklüklerden ölçülemeyen fiziki büyüklüklerin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

1. GİRİŞ

Yavaşlatıcı olarak grafit ve soğutucu olarak helyum gazı kullanan Yüksek Sıcaklıklı Gaz Soğutmalı Reaktör (YSGR) [1], 1000°C'a yakın sıcaklıklar sağlayabilir. Bu sadece elektrik üretimi alanında faydalanılan bir olanak değil, aynı zamanda endüstriyel ısı işlemlerde yararlanılacak bir imkandır.

Japon Atom Enerji Enstitüsü (JEARI), ilk olarak 1998'in Kasım ayında kritik hale gelen, çıkış sıcaklığı 950°C, termal gücü 30 MW olan bir Yüksek Sıcaklıklı Mühendislik Test Reaktörünü (YSTR) Oarai de kurdu ve. Bundaki amaç yüksek sıcaklık mühendisliğindeki yenilikçi temel araştırmaları yapmak ve ısı kullanımına yönelik olarak deneysel çalışmalarını yapmaktır. Ayrıca buradaki nükleer ısı, buharın oluşması esnasında metandan yanma öncesi CO₂ in ayrıştırılması ile açıkta kalacak olan metan gazının kullanımı ile, hidrojen üretimi amaçlı olarak da kullanılabilir [2,3]. Nükleer reaktör dinamiğinin ve ısı yararlanma sisteminin farklı olmasından dolayı, reaktörü açma ve kapama esnasında veya yük değişimi ve kaza gibi durumlarda herhangi bir negatif etkinin sisteme yayılmasını önlemek için, tüm sistem yeterli sayıda ölçme cihazı ile donatılmıştır. Bu sebeple böyle bir sistemde test amaçlı olarak YSA teknikleri kullanılırken, sistem izleme ve buhar oluşumunda da bulanık denetim (fuzzy control) gibi ileri denetim sistemlerinin kullanımı düşünülebilir. YSTR, 2007 yılı civarında hidrojen üretmek için planlanmıştır. İleri yönlü YSA uygulaması ise, 1993'ten beri kullanılmakta olup, Hollanda'da basınçlı sulu reaktör (PWR)'ler için geliştirilmiştir [4-10]. Kullanılan

gerçek zaman sistemi, ileri yönlü uyarlamalı YSA'larının kompleks ve dinamik sistemlerin modellenmesi için çok uygun olduğunu göstermiştir ve ayrıca izleme sistemi de bu teknik vasıtasıyla geleneksel uyarı sistemlerine göre, küçük bozucu etkilerin erken belirlenmesinde çok daha başarılı olmuştur.

YSTR henüz 30 MW'lık nominal işletim gücünde olmamasına rağmen 2001 yılı civarında bu güce erişmesi beklenmektedir. Bu sebeple, reaktör işletimi bir kaç saatlik güç işletiminin geniş bir aralığı içinde ACCORD dinamik kodu kullanılarak simüle edilmiştir ve tüm santraldan (hidrojen üretim kısmı dışında) 56 işaret YSA tekniklerinin denenmesi için üretilmiştir. Simüle edilmiş reaktör işletimi ve veri üretimi ikinci bölümde kısaca verilecektir.

2. YÜKSEK SICAKLIKLI GAZ SOĞUTMALI REAKTÖR VE SİMÜLASYONU

Japonya'da bulunan Yüksek Sıcaklıklı Mühendislik Test Reaktöründe (YSTR) güvenli işletimin tanıtı olacak olan deneme, yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörlerin gelecekteki modellerinin güvenilirliğini de ortaya çıkartacaktır. Yapısal olarak YSTR, 30 MW'lık termal güce sahiptir ve reaktör kalbi, ana soğutma sistemi, yardımcı soğutma sistemi ve kanal soğutma sisteminden oluşur. Şekil-1 santralin şeklini ve simülasyonun yapıldığı 56 işaretin yerlerini göstermektedir. Aktif reaktör kalbi 30 prizmatik yakıt sütununu içerip, yüksekliği 2.9 m ve eşdeğer çapı 2.3 m'dir. Reaktörün soğutucu giriş sıcaklığı 395°C dir ve soğutucu çıkış sıcaklığı ise 850-950°C'tır. ağırlıkça ortalama %6 zenginleştirilmiş UO₂ yakıt kullanılmaktadır. Santral dinamik analiz kodu ACCORD, geniş güç aralığı içinde santral işletimini simüle etmek için ve güvenilirlik gösterimine ilişkin testi öngörmek için kullanılmıştır. YSTR reaktörü sistemi içindeki Ara Isı Değiştirici'ye (IHX) 950°C'ta 10 MW'lık ısıyı sağlar ve bu ısı, hidrojen üretiminde yararlanılmak üzere ikincil helyum çevrimine transfer edilir. Santral simülasyonu kodu ACCORD'un esas karakteristikleri aşağıdaki gibi verilebilir [11].

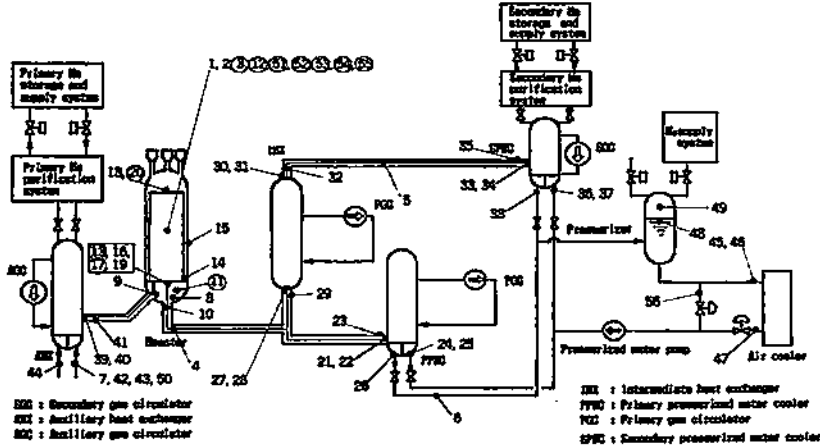
- Santral, bir olay meydana geldikten sonra reaktör kalbinin ısı kapasitesini modelleyerek uzun bir işletim için simüle edilebilir.

- Kalp içi santral dinamiği, teker teker santral elemanlarını simüle eden yazılım paketlerini yeniden düzenleyerek analiz edilebilir.
- Termal hidrolik durum, helyum kalp soğutma devresi ve basınçlı su soğutma sistemi arasında her bir eleman için ısı transfer hesaplamalarını ayrı ayrı analiz edilebilir.

Yapılması düşünülen simülasyon, 56 işaret durumu seçilerek meydana getirilir. Bu durumda her biri 10 dakikalık aralıkta simüle edilmiş örnekler, YSA uygulamasında kullanılmak üzere seçilir ve simüle edilmiş reaktör işletimini gösteren 1182 üründü (örnek) elde edilir. İlk önce $P_n=30$ MW'lık nominal gücün %50'sinden başlayarak reaktör 1 saat içinde kararlı duruma ulaşır. Reaktör gücü, saat başına %1.5'lük güç artışı ile %100'e çıkartılır sonra güç

stabilize edilir ve tekrar aynı hızla %30'luk nominal güç miktarına kadar azaltılır ve bu seviyede 5 saatlik işletimden sonra 1.75%/saatlik hızla % 100'lük nominal güce çıkartılır, sonra yeniden stabilize edilir. Güç stabilizasyonu esnasında birincil gaz vantilatörünün dönme hızını bozarak küçük bir pertürbasyon oluşturulurken, güç %50 P_n 'ye kadar azaltılır.

ACCORD kodu, modüler yapı üzerine temellenmiş olarak tasarlanmıştır. Bunlar sırasıyla reaktivite kontrol modülü, güvenlik koruma modülü ve kontrol modülüdür. Tablo-1'de ACCORD simülasyonunun çıkış parametreleri verilmiştir (birimler koda kullanılan birimlerdir).



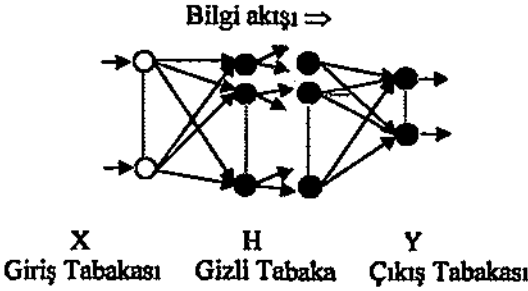
Şekil-1. YSTR şematik gösterimi ve simüle edilmiş işaretlerin yerleri.

Tablo-1. YSA uygulaması için ACCORD un çıkış parametreleri.

No.	Parametreler	Birim	No.	Parametreler	Birim
1-1	Reaktör Gücü	MW	29	IHX Gövde çıkışında birincil soğutma sıcaklığı	°C
2-0	Toplam Reaktivite	dk/k	30	IHX İkincil soğutma giriş sıcaklığı	°C
3	Maksimum Yalıtı Sıcaklığı	°C	31	IHX İkincil soğutma akış hızı	kg/sec
4	Birincil soğutma Basıncı	kgf/cm ² a	32	IHX İkincil soğutucu çıkış sıcaklığı	°C
5	İkincil soğutma Basıncı	kgf/cm ² a	33	10MW PWC Birincil soğutucu giriş sıcaklığı	°C
6	Basınçlı Su Sistemi Basıncı	kgf/cm ² a	34	10MW PWC Birincil soğutma akış hızı	kg/sec
7	Yardımcı Soğutma Sistemi Basıncı	kgf/cm ² a	35	10MW PWC Gövde çıkışında soğutucu sıcaklığı	°C
8-1	Birincil soğutma sistemi çıkış sıcaklığı	°C	36	10 MW PWC Basınçlı su giriş sıcaklığı	°C
9	Yardımcı Ho Sistemi Reaktör giriş sıcaklığı	°C	37	10MW PWC Basınçlı su akış hızı	kg/sec
10	Birincil soğutma sistemi çıkış sıcaklığı	°C	38	10MW PWC Basınclandırılmış su çıkış sıcaklığı	°C
11	Reaktör alt kenarında birincil soğutma akış hızı	kg/sec	39	Yardımcı soğutucu birincil soğutucu giriş sıcaklığı	°C
12-0	Reaktivite Xe-Yoğunluğu	dk/k	40	Yardımcı soğutucu Birincil soğutucu akış hızı	kg/sec
13	Alt girişte birincil soğutma sıcaklığı	°C	41	Gövde çıkışında yardımcı soğutucu soğutma sıcaklığı	°C
14	Kalp girişinde birincil soğutma sıcaklığı	°C	42	Yardımcı soğutucu basınclandırılmış su giriş sıcaklığı	°C
15	Reaktör kamaı sıcaklığı	°C	43	Yardımcı soğutucu basınclandırılmış su akış hızı	kg/sec
16	Kalp çıkışında birincil soğutma sıcaklığı	°C	44	Yardımcı soğutucu basınclandırılmış su giriş sıcaklığı	°C
17	Kalp çıkışında birincil soğutma akış hızı	kg/sec	45	Hava soğutucusu girişinde basınclandırılmış su sıcaklığı	°C
18-1	Kalp giriş sıcaklığı	°C	46	Hava soğutucusu girişinde basınclandırılmış su akış hızı	kg/sec
19-1	Kalp çıkış sıcaklığı	°C	47	Hava soğutucusu çıkışında basınclandırılmış su sıcaklığı	°C
20	Kalpde Birincil soğutma akış hızı	kg/sec	48	Basınclandırılmış su sistemindeki basınclandırıcının su seviyesi	m
21	20 MW PWC Birincil soğutma giriş sıcaklığı	°C	49	Basınclandırılmış su sistemindeki basınclandırıcının iç basıncı	kgf/cm ² a
22	20MW PWC Birincil soğutma akış hızı	kg/sec	50	Yardımcı su sistemi ve hava soğutucusunda basınclandırılmış su çıkış sıcaklığı	°C
23	20 MW PWC Birincil soğutma çıkış sıcaklığı	°C	51-0	Ortalama yakıt sıcaklığı	°C
24	20MW PWC Basınclandırılmış su giriş sıcaklığı	°C	52-0	Ortalama moderatör sıcaklığı	°C
25	20MW PWC Basınçlı su akış hızı	kg/sec	53-0	Doppler Reaktivitesi	dk/k
26	20MW PWC Basınclandırılmış su çıkış sıcaklığı	°C	54-0	Moderatör Reaktivitesi	dk/k
27	IHX Birincil soğutucu giriş sıcaklığı	°C	55-0	Reaktivite kontrol sistemi	dk/k
28	IHX Birincil soğutma akış hızı	kg/sec	56	Akış by-pass işlemi ile hava soğutucu	kg/sec

3. SİSTEMİN YAPAY SİNİR AĞI TABANLI MODELLENMESİ

Basit ileri-beslemeli bir yapay sinir ağı (YSA), bir giriş tabakası, bir veya daha çok gizli tabaka ve bir çıkış tabakası olmak üzere temel üç bileşenden oluşur (Şekil-2).

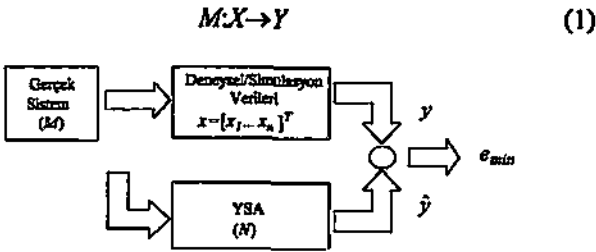


Şekil-2. Çok tabakalı ileri-beslemeli ağı genel yapısı.

Sinir ağının her bir tabakası "düğüm" ya da "nöron" denilen bir grup işlem ünitesi içerir. Bir ağ tabakasındaki her düğüm, çıkışını -bilgi akışı doğrultusunda-, bir sonraki tabakada bulunan bütün işleme elemanlarına gönderir. Fakat aynı tabakaya dahil düğümler arasında bağlantı yoktur. Sinir ağının giriş tabakası, dışarıdan aldığı bilgiyi ağı iç işlem ünitelerine aktaran bir arabirim görevini yapar. Gizli tabakalar, bilgi akışı esnasında özellik çıkarma için kullanılır. Çıkış tabakası sistem çıkışını verir. İleri beslemeli YSA'nın kullanımında başlıca iki adım vardır. Biri eğitime ve diğeri de geri çağırma.

3.1 MATEMATİKSEL YAPI

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ girişleri (örneğin deneysel veriler) ve bunlara karşılık $y(x) = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ çıkışları olan bir sistem tanımlayalım. Giriş uzayı $X: \{x \in X | x \text{ sistemin girişi}\}$ ile çıkış uzayı $Y: \{y(x) \in Y | y \text{ sistemin } x \text{ girişine karşılık gelen çıkışı}\}$ arasında bir M ilişkisi kurmak kullanışlı olacaktır. Bu ilişki (1) denkleminde ve Şekil-3'te gösterilmiştir.



Şekil-3. Gerçek sistem ve YSA arasındaki giriş-çıkış ilişkisinin şematik gösterimi.

Ağın eğitim süreci, ağı iç parametrelerini (veya ağırlıklarını) w ayarlayarak giriş ile çıkış arasındaki M ilişkisine mümkün olduğu kadar yaklaşmak şeklinde düşünülebilir.

$$\min_w \|\hat{y}(x|w) - y(x)\|, \forall x \in X \quad (2)$$

Böylece p örnektüstenin eğitimindeki öğrenme hatası e_p , (3) denklemi ile ifade edilebilir.

$$e_p = e(x_p, w) = \|\hat{y}(x_p, w) - y(x_p)\| \quad (3)$$

Ağın öğrenim esnasındaki hatası, bütün örnektüler için en küçüğe indirilir. Bu değer (4) denklemiyle bulunur:

$$E(w) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P e(x_p, w) \quad (4)$$

Bu çalışmada, (4) denkleminde verilen hata fonksiyonunu en küçüğe indirmek için geri-yayılma (backpropagation) algoritması (GYA) kullanılmıştır.

Geri-yayılma algoritması çok kullanılan ve eğitimde hatayı en hızlı düşüren algoritmadır. Denklem (4) de ifade edilen E hatasını en küçüğe indirmek için optimal bir w arar. Yöntem aşağıdaki gibidir:

- 1) $\frac{\partial E}{\partial w}$ hesaplanır.
- 2) Ağırlıklar $w(n)$ 'den $w(n+1)$ 'e güncellenir.

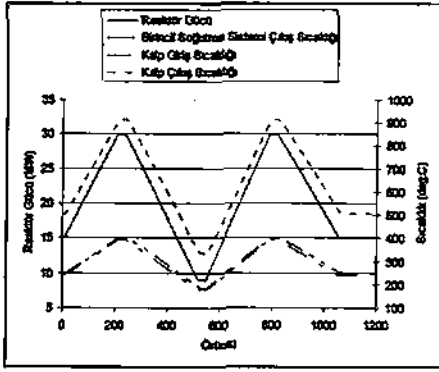
$$w(n+1) = w(n) + \Delta w(n) \quad (5)$$

$$\Delta w_j(n+1) = \eta \delta_j + \alpha \Delta w_j(n) \quad (6)$$

Buradaki (6) denkleminde delta kuralı denir. Ağ ağırlıklarını adapte etmek için çok kullanılan bir yoldur. Bu eşitlikte, η 'ya öğrenme hızı denir. $\alpha \Delta w_j$ ise momentum terimi diye adlandırılır ve ağırlık güncelleme eşitliğinde, lokal minimumu elimine etmek için kullanılır.

4. UYGULAMA

YSTR'nin işletimi sırasında bilinmesi gereken önemli parametreler; *Toplam Reaktivite, Xe Yoğunluğundan gelen Reaktivite, Ortalama Yakıt Sıcaklığı, Ortalama Moderatör Sıcaklığı, Doppler Reaktivitesi, Moderatör Reaktivitesi ve Kontrol Sistemi Reaktivitesidir*. Bu parametrelerin bilinmesi reaktörün güvenli bir şekilde işletimi açısından son derece önemli olmakla birlikte bunları ölçme imkanı yoktur ve bunlar ancak ölçülebilen parametreleri kullanarak birtakım hesaplamalar yoluyla elde edilebilir. Bu çalışmada, YSTR'nin ölçülemeyen bu fiziksel büyüklükleri, öğrenebilen bir sistem olan yapay sinir ağırları kullanılarak elde edilmiştir. Ağ yapısı 4 giriş ve 7 çıkış düğümü ile birlikte bir gizli tabaka içerir. Bu tabakadaki gizli nöron sayısı 10'dur. YSA'da giriş olarak Tablo-1'de "I" ile gösterilmiş 4 tane ölçülebilen parametre kullanılmış olup bu işaretler Şekil-4'te gösterilmiştir. Çıkış olarak da, aynı tabloda "O" ile gösterilmiş 7 tane ölçülemeyen büyüklük kullanılmıştır.



Şekil-4. YSA'da kullanılan giriş işaretleri: Reaktör Gücü (sol eksen), Sıcaklıklar (sağ eksen).

Bu ağ 1-660 örüntüyle yeterli eğitim yapıldıktan sonra tüm örüntü (1182) için test edilmiştir ve sonuçlar Şekil-5'te verilmiştir.

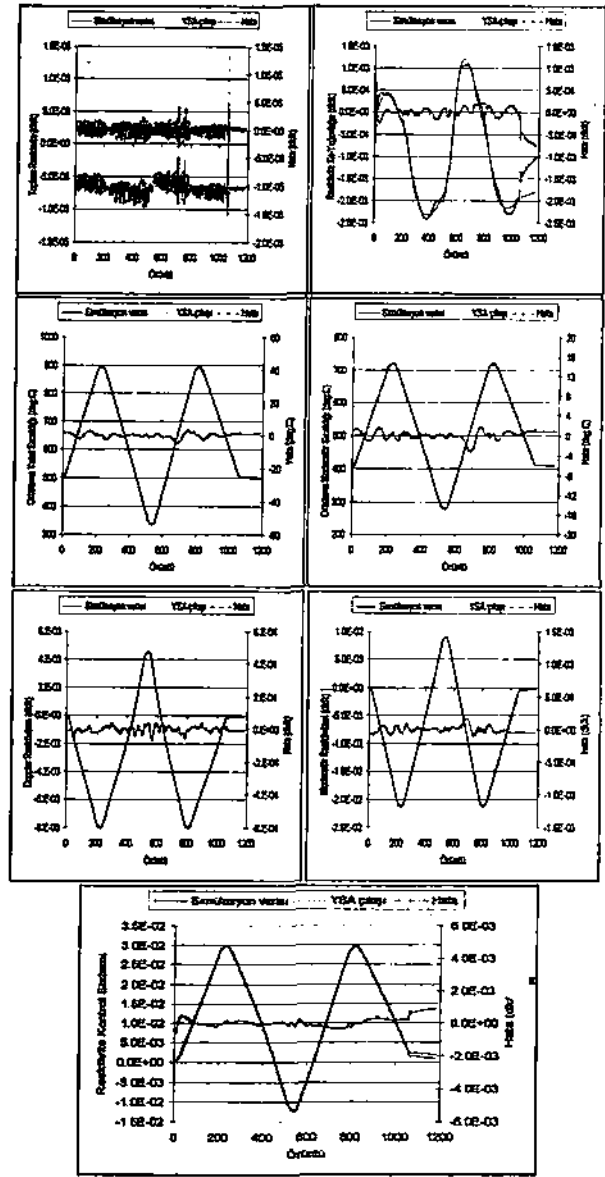
Şekil-5'teki toplam reaktivite verisi ve bunun YSA çıkışına bakıldığında burada YSA'nın bir filtre gibi davranmış olduğu görülür ve hata diğer şekillere kıyasla büyüktür. Fakat bu değer Şekil-5'te gösterilen diğer reaktivitelerin toplamı biçiminde olduğundan ve YSA çıkışında diğer reaktiviteler çok az hata ile öngörülebildiğinden bu büyüklük için YSA çıkışının pek önemi yoktur. Bu uygulamada YSA, tüm veriler için yüksek performans göstermiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada nükleer teknoloji alanında gelişmesi beklenen bir reaktör tipi olan Yüksek Sıcaklık Gaz Soğutmalı (YSGS) reaktör yapısı tanımlanmış olup, YSGS'nin ısıl işlemler bakımından da önemi vurgulanmıştır. Ayrıca reaktör simülasyonu vasıtasıyla elde edilen verilere YSA uygulaması yapılarak 3 tabakalı (4:10:7) ağ modelinde Geriye Yayılım Algoritmasının (GYA) kullanımı ile reaktörde, Güç, Birincil Soğutma Sistemi Çıkış Sıcaklığı, Kalp Giriş Sıcaklığı ve Kalp Çıkış Sıcaklığından oluşan girişlere karşı Toplam Reaktivite, Xe Yoğunluğundan gelen Reaktivite, Ortalama Yakıt Sıcaklığı, Ortalama Moderatör Sıcaklığı, Doppler Reaktivitesi, Moderatör Reaktivitesi ve Kontrol Sistemi Reaktivitesi şeklindeki 7 ölçülemeyen fiziksel büyüklük oldukça hassas olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan veriler için; Japon Atom Enerji Enstitüsü-JEARI ve JEARI&IRI/ECN-Holland ortaklığında çalışmalarını koordine eden Sn. E. TÜRKCAN'a teşekkür ederler.



Şekil-5. YSA modelinde kullanılan simülasyon verileri ve bunlara ait YSA çıkışları (sol eksen) ile hesaplama hatasının (sağ eksen) değişimi.

KAYNAKLAR

- [1] Saito, S. et.al., Design of HTTR, JEARI 1332, Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- [2] Hada, K., et al.: Proc. 3rd JAERI Symposium on HTGR Technologies, 1996.
- [3] Y. Inagaki, et al., Out-of-pile Demonstration Test of Hydrogen Production System Coupling With HTTR, 7th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, Nisan 19-23, 1999.

- [4] Türkcan E., et.al., Neural Networks for real-time NPP monitoring, *Nuclear Europe WorldScan*, No.11/12, 31 1993.
- [5] Türkcan E., et.al., On-Line Operator Support System Integrated with Monitoring and Diagnosis System, *ECN-RX-93-065*, 1993.
- [6] Nabeshima K, K.Suzuki and E.Türkcan et al., "Neural Network with an Expert System for Real-time Nuclear Power plant Monitoring", *SMORN-VII, A Symposium on Nuclear reactor Surveillance and Diagnostics*, AEN/NEA-OECD, Avignon France, 19-23 Haziran 1995.
- [7] Nabeshima K., et.al., "Real-time NPP monitoring with neural network", *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, 35, No. 2, 93-100, Şubat 1998.
- [8] Türkcan E., et.al., "Application of Adaptive Neural Networks To Simulated Operational Data of HTTR" *Report IRI-131-99-011*, TU-Delft, IRI, Hollanda, Mayıs 1999.
- [9] Nabeshima K., et.al., "Hybrid Monitoring System for High Temperature Gas Cooling reactor", *HCI International Conference on Human-Computer Interaction*, Münih Almanya, Ağustos 1999.
- [10] Türkcan E. and Versteegh J.G.E., "Neural Network Training by Extended Kalman Filtering For Detection of Signal/System Failures", *MARCON'98*, .66, Knoxville Tennessee A.B.D. , Mayıs 1998.
- [11] Takeda,T, et.al., "Development of Analytical 'ACCORD' for Incore and Plant Dynamics of High Temperature Gas-Cooled Reactor", *JAERI-Data/Code 96-032*, 1996, (Japonca).