

# Güç Transformatorü Uç Empedans Eğrisinin Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Kestirimi

İlhan KOŞALAY\*, Ercan Nurcan YILMAZ\*\*

\* TRT Stüdyolar Dai. Baş. Enerji Müdürlüğü Oran-ANKARA

\*\*Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Bölümü  
06500 Teknikokullar, ANKARA

## ÖZET

Elektrik güç sistemlerinin simülasyonunda, modellenmesi en fazla önem arz eden elemanlardan birisi güç transformatorleridir. Özellikle geçici olay analizinde sargı parametrelerinin frekansa, akıma ve gerilime bağımlı olarak değişmesi bunun en önemli nedenleri arasındadır. Bu çalışmada öncelikle literatürde kullanılmış bir çok güç transformatorü modeli tanıtılmış daha sonra uç empedans modelinin tam ve geniş bir aralıkta belirlenebilmesi için yapay sinir ağlarına (YSA) dayalı kestirim işlemi geliştirilmiştir. Bu uygulama için YSA'nın performansı da test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç transformatorleri, modelleme, yapay sinir ağları

## Estimation of Power Transformer End Impedance Curve by Using Artificial Neural Networks

### ABSTRACT

Power transformers are one of the most important elements for modeling in simulation of electric power systems. Specially in transient analysis, varying of winding parameters depending on frequency, current and voltage is the main reason for that. In this study, firstly many power transformer models are introduced in literature. Then to determine end impedance model exactly and in wide frequency area, an estimation process based on Artificial Neural Network (ANN) is developed. Then performance of ANN is tested.

**Key Words:** Power transformers, modeling, artificial neural network

### 1. GİRİŞ

Enerji iletim hatları, güç transformatorleri ve güç anahtarları (kesiciler) bir enerji iletim ve dağıtım sistemini oluşturan temel elemanlardır. Sistemde bunların yanı sıra seri reaktörler, filtreler, kompanzasyon kapasiteleri, parafudrlar, çeşitli ölçme ve koruma düzenleri gibi yardımcı elemanlar da vardır. Enerji sistemlerini hem sürekli işletim koşulları altında hem de geçici olaylar açısından analiz etmenin en temel yolu, sistemi oluşturan elemanların her birinin ayrı ayrı uç bağıntılarının tanımlanması ve elde edilen diferansiyel denklemlerin bilgisayarda sayısal yöntemlerle çözülmesidir. Günümüzde bu amaçla yazılmış EMTP, PSPICE gibi hazır paket programlar da bu işi temin edebilmektedir. Analize başlamadan öncelikle sistem elemanlarının modellenmesi gerekir. Tüm sistem elemanlarını geniş bir frekans bandında temsil eden modellerin oluşturulması oldukça zor bir işlemdir. Buna karşın geçici olay analizleri için geniş frekans aralığında modellere ihtiyaç vardır. Bu nedenle bir elemanın modeli oluşturulurken oluşabilecek geçici olayın fiziksel özellikleri ve etkilediği parametreler göz önüne alınmak zorundadır. Bilgisayar simülasyonu yardımıyla yapılan geçici olay hesaplamalarının doğruluğu büyük ölçüde uygun modelin seçimine, simülasyondaki zaman adımının seçimine ve modeli oluşturmada kullanılan verilerin doğruluğuna dayanır.

Modeller genellikle üç şekilde oluşturulur. Bunlar, iç yapı göz önünde tutularak kurulan modeller, dış ölçümlerle kurulan uç modelleri ve elektromanyetik

modellerdir. Son yıllarda genelde, özellikle döner makine-lar, transformatorler ve reaktörler gibi sistem elemanlarının modelleri dışarıdan ölçümlerle oluşturulan uç modellerine dayanır. Dışarıdan yapılan ölçümlerle oluşturulan uç modellerinin elde edilmesinde bir çok yeni yaklaşım yapılmıştır. Örneğin bazı çalışmalarda dış ölçüm verilerinin belirsiz (uncertain) değerlerinin fuzzy küme teorisinden faydalanılarak bulunmasıyla çeşitli modelleme yaklaşımları yapılmıştır (1).

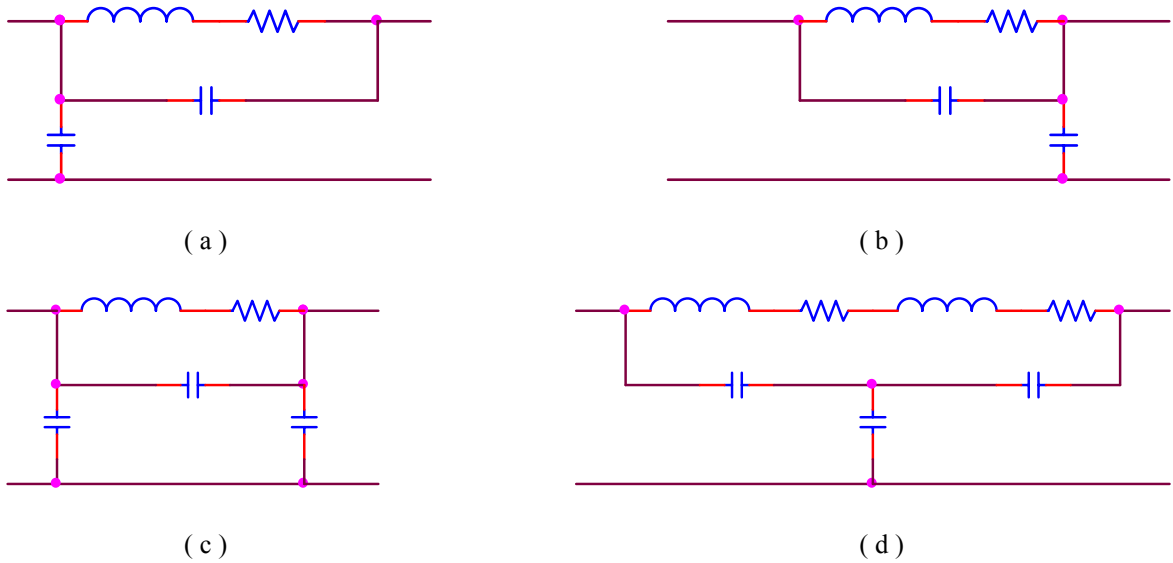
### 2. GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ MODELLERİNİN GELİŞİMİ

Literatürde, geçici olay analizinde, transformator için bir çok model ele alınmıştır. Bu modellerde yer alan eşdeğer devrelerin R, L, C parametrelerinin bulunmasında yaklaşık amirik ifadeler kullanılmıştır. Değişik araştırmacıların önerdiği bağıntılar farklı sonuçlar verebilmektedir. Geçici olayları doğru ve tam olarak analiz edebilmek için sargılara ilişkin R, L, C ve M parametrelerinin akıma, gerilime ve frekansa göre değişimlerinin göz önüne alınması gerekir. Fakat literatürde tavsiye edilen transformator modellerinde genellikle akım ve frekansa olan bağımlılık görülmemektedir (2).

Güç transformatorlerinde kullanılan sargı türlerine bağlı olarak yani sargı geometrisine göre kurulan ardışıl toplu parametrelili eşdeğer devrelerin kurulmasında sargının bölmeleri Şekil.1'de gösterilen devrelerden birisi ile temsil edilir. Bu devreler ard arda birleşti-

rilir. Burada bir sargı bölümü; direnci, öz endüktansı, toprak kapasitesi ve sarımlar arası kapasite ile temsil

olur. Bu tür model örneğin foster devreleri ile kurulabilir(3).



Şekil.1 Ardışıl toplu parametrelili devrede transformatör sargısının bölmelerini temsil eden çeşitli devreler

edilmektedir. Sargının tümüne ilişkin ardışıl toplu parametrelili devrede, bölmeler arasındaki tüm ortak endüktansların göz önüne alınması gerekir. Ayrıca transformatör sargısının düzenleniş biçimine göre, karşı karşıya gelen sarım grupları arasındaki kapasiteler ve ortak endüktanslarda eşdeğer devreye katılmalıdır. Bu yöntemle eşdeğer devre elde edilmesi için transformatör iç yapısının ve bütün malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekir. Fakat imalatçı firmalar genellikle transformatörlerin yapısıyla ilgili ayrıntılı proje bilgileri vermezler, bunun yanı sıra kurulmuş ve çalışmakta olan sistemlerde değişik ülkelerde imal edilmiş, çeşitli markalarda bir çok farklı transformatör bulunmaktadır. Bunların iç yapılarının bilinmesi pratik olarak mümkün değildir. Bu durumda kurulu tesislerde bulunan ve iç yapısı bilinmeyen transformatörler için dışardan yapılan ölçümlerle oluşturulabilen bir modelin geliştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Bu yeni modelin eldesi için sargının  $Z(s)$  uç empedans fonksiyonunun bulunması gerekir ki bu bir deney düzeneği yardımı ile sargıya uygulanan frekansın değişimiyle ona karşı düşen sargı empedansının bulunmasıdır (3).

Transformatörün sargılarından görülen uç empedansının frekansla değişimi, sargının yapısına geniş ölçüde bağlı olup matematiksel modelin özdeğerleriyle ve dolayısıyla transformatörün geçici rejim davranışıyla ilgili önemli bilgiler içerir. Uç empedans karakteristiği, sargı empedansının hem genliğinin hem de fazının frekansla değişimini gösterir. Dolayısıyla problem, deneysel olarak belirlenmiş bir uç empedans karakteristiğini sağlayan R-L-C devresinin sentezine dönüşür. Bunların sonucunda transformatörün devre modeli elde edilmiş

Anahtarlama işlemlerinden yada yıldırım deşarjından kaynaklanan geçici olayların incelenmesinde genellikle sistemin bir fazı üzerinde simülasyon yapılması yeterlidir. Transformatör için yapılan incelemelerde, geçici rejimde ortaya çıkan salınımların frekansı arttıkça çekirdeğin içindeki akı bileşeninin zayıflayarak demir çekirdeğin etkilerinin giderek azaldığı ve ihmal edilebilir düzeye geldiği gösterilmiştir (2). Böylelikle sargılar lineer pasif devrelerle temsil edilebilir hale gelir ve transformatör için kurulacak modelde transformatörlerin sadece incelenen devreye bağlı olan sargısıyla temsili mümkün olmaktadır.

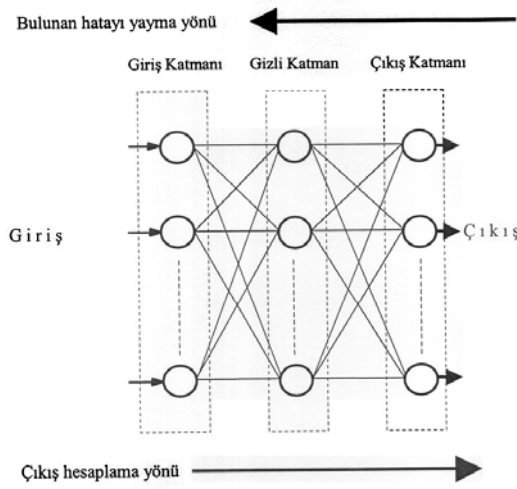
### 3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin çalışma sisteminin yapay olarak taklit edilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. YSA, insan beynindeki sınırlara karşılık gelen yapay basit işlemcilerin birbirlerine değişik etki seviyeleri ile bağlanmasından oluşan karmaşık bir sistemdir. Yapay sinir ağlarının pratikte kullanımı genelde değişik yapıda ve formlarda bulunabilen verileri hızlı bir şekilde sınıflandırma (ölçülen değerleri, normal veya hatalı olarak ayrılabilme), tanıma ve algılama (insanın konuşmasını öğrenme), tahmin (görülme veya bilinmeyen veriyi bulma) ve kontrol (hedef değerin optimal ayarı) üzerinedir (4). YSA sistemine insan beyninin modeli denilebilir.

Yapay sinir ağı temel olarak basit yapıda ve yönlü bir devre biçimindedir. Ağın her bir düğümü hücre denilen n. dereceden lineer olmayan bir devredir. Düğümler işlem elemanı olarak tanımlanır ve aralarında bağlantılar vardır. Her bağlantı tek yönlü işaret iletim

yolu (gecikmesiz) olarak görev yapar. Her işlem elemanı istenildiği sayıda giriş bağlantısı ve tek bir çıkış bağlantısı olabilir. Fakat bu bağlantı kopya edilebilir. Yani bu tek çıkış birçok hücreyi besleyebilir. Ağdaki tek gecikme, çıkışları ileten bağlantı yollarındaki iletim gecikmeleridir. İşlem elemanının çıkışı istenilen matematiksel tipte olabilir. Giriş işaretleri YSA'ya bilgi taşır. Sonuç ise çıkış işaretlerinden alınabilir.

Bu çalışmada İleri beslemeli hatayı geriye yayan yapay sinir ağı devre modeli (feedforward error back propagation) kullanılmıştır. Şekil.2'de görülen bu modelde, gizli tabakadaki sinir sayısı istenildiği kadar kullanılabilir.



Şekil.2 Geriye yayımlı ağı topolojisi.

YSA birtakım alt kümelere ayrılabilir. Bu alt kümelerdeki elemanların transfer fonksiyonları aynıdır. Bu küçük gruplara "katman" adı verilir (çok katmanlı perceptron, MLP gibi). Ağ, katmanların birbirlerine hiyerarşik bir şekilde bağlanmasından oluşmuştur. Dış dünyadan alınan bilgi giriş katmanı ile taşınır. Giriş katmanı düğümlerinin transfer fonksiyonları yoktur. YSA transfer fonksiyonu ve yerel bellek elemanı bir öğrenme kuralı ile giriş çıkış işareti arasındaki bağıntıya göre ayarlanır. Aktif yapma girişi için bir zamanlama fonksiyonu tanımlaması gerekebilir. YSA'nın giriş veri tipleri ikili (binary) 0-1 veya sürekli değerlerdir.

Yapay sinir ağlarının görevlerini gerçekleştirmede, sahip oldukları fiziksel yapının da önemi vardır. Bugün 50'ye yakın farklı yapılanma, diğer bir deyişle farklı model görülmekte ve bu sayı her geçen gün artmaktadır. Farklı yapılaşma, işlem elemanlarının birbirleriyle olan bağlantılarından ve uygulanan öğrenme kuralından kaynaklanmaktadır. YSA uygulamalarında ileri beslemeli ağ, kas kat bağlantılı ağ, geri beslemeli ağ şeklinde üç çeşit ağ tipi vardır (5).

Transfer veya işaret fonksiyonları olarak da adlandırılan eşik fonksiyonları; muhtemel sonsuz domen girişli işlem elemanlarını, önceden belirlenmiş sınırdan

çıkış olarak düzenler. Dört tane yaygın eşik fonksiyonu vardır. Bunlar, sırasıyla lineer, rampa, basamak ve sigmoid fonksiyonlarıdır.

Bir çok YSA öğrenme işlemi, işlem elemanlarının ağırlığı değiştirilerek sağlanır. Böylece tanımlanan ağırlık değiştirilerek öğrenmede iyi bir model kullanıp, ağırlıkların bu modele göre değiştirilmesi esastır. Böylece yeni bir giriş örüntüsü uygulandığında önceki eğitim örüntülerinin cevabı en az bozulmuş olur. Hata değişimini inceleyen iki çeşit kural vardır:

- Hata düzeltme kuralları,
- Gradyen kuralları.

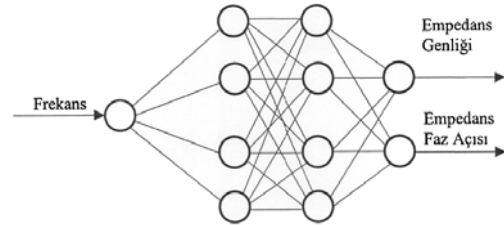
Eğitime algoritmaları yapay sinir ağlarının (YSA) ayrılmaz bir parçasıdır. Eğitim algoritması eldeki problemin özelliğine göre öğrenme kuralını YSA'na nasıl adapte edeceğimizi belirtir. İki çeşit eğitim algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır(6). Bunlar;

- Danışmanlı eğitim,
- Danışmansız eğitim şeklindedir.

Yapay sinir ağları güç sistemlerinin bir çok yerinde uygulama alanı bulmaktadır. Güç tahmini, yük akışı bunlara verilebilecek farklı örneklerdir (7).

#### 4. ÖNERİLEN GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ DEVRE MODELİ VE ALGORİTMANIN UYGULAMASI

YSA bir giriş (frekans) ve iki çıkış (Empedans genliği, empedans faz açısı) sinirlerden oluşmaktadır. 2 gizli katman da 4'er sinir kullanılmıştır. Buna ilişkin şekil Şekil.3'te verilmiştir.



Şekil.3 YSA kullanarak transformatör sargılarının modellenmesi

Eğitim için Tablo 1'de verilen değerlerden faydalanılmıştır. Tablo 1'deki değerler üçe ayrılmış ve üç farklı test kümesi oluşturulmuştur.

Parametrelerin belirlenmesi için deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. 1000 iterasyon baz alınarak, başlangıçta öğrenme hızı  $0 < \eta < 1$  sabit tutulmuş, momentum katsayısı ( $\alpha$ ) 0,1 den 0,9 a kadar değiştirilerek bu çalışma için en iyi katsayı 0,6 bulunmuştur. Yine aynı yaklaşımla momentum katsayısı ( $0 < \alpha < 1$ ) sabit tutularak, öğrenme hızı ( $\eta$ ) 0,1 den 0,9 a kadar değiştirilmiş ve en uygun öğrenme hızı bu çalışma için 0,7 olarak tespit edilmiştir.

Transformatörün devre modeli oluşturmak için,

sargının dışarıdan deneysel bir düzenek yardımıyla ölçümle bulunan sınırlı sayıda uç empedans karakteristik verilerinden (sargı empedansının genlik ve fazının frekansla değişim değerleri) faydalanılarak yapay sinir ağları yardımıyla diğer sargı verileri elde edilmiştir. Ölçülen değerler Tablo.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Deneysel olarak ölçülmüş transformatör değerleri

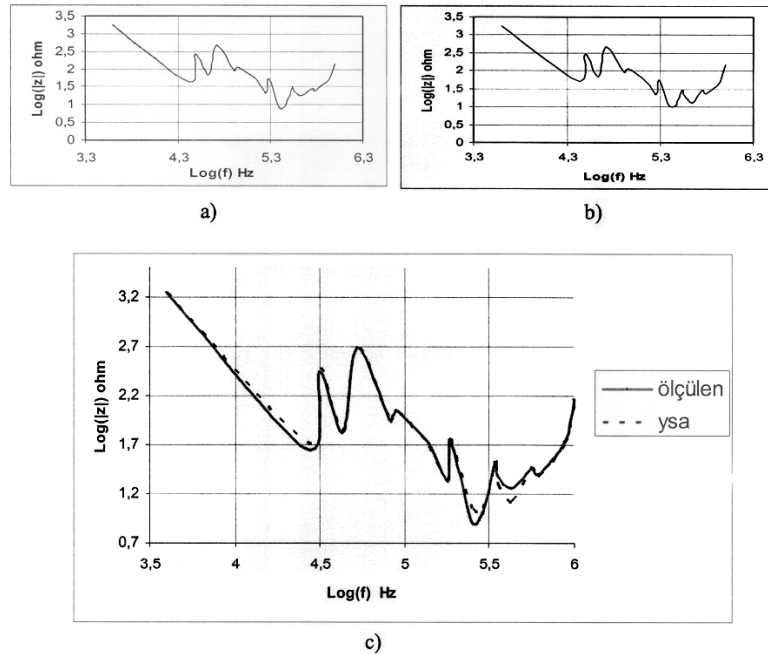
f ( Hz )	Z <sub>GENLİK</sub> ( Ω )	θ ( derece )
4000	1721	-45
26000	53	-45
31500	294	-45
43000	68	0
52800	474	-90
82000	88	-60
90000	112	-80
141000	49	-35
180000	22	-28
189000	56	-45
250000	11	0
290000	11	15
341000	30	45
360000	20	45
430000	13	76
562000	29	76
615000	23	120
886000	51	120
1000000	141	129

Transformatörün sargılarından görülen uç empedansının frekansla değişimi, sargının yapısına geniş ölçüde bağlı olup matematiksel modelin özdeğerleriyle ve dolayısıyla transformatörün geçici rejim davranışıyla ilgili önemli bilgiler içerir. Uç empedans karakteristiği, sargı empedansının hem genliğinin hem de fazının frekansla değişimini gösterir. Dolayısıyla problem, istenen sayıda veri değeri YSA ile belirlenmiş bir uç empedans karakteristiğini sağlayan R-L-C devresinin sentezine dönüşür. Bunların sonucunda transformatörün devre modeli elde edilmiş olur.

Çalışmada ele alınan transformatöre ait sargı empedansının genliği ve faz açısı, geriye yayılım algoritmasına dayalı geliştirilmiş bir yazılım sayesinde elde edilmiştir. YSA tahmini sonucu elde edilen değerlerle ölçüm sonuçlarının kıyaslanmasına ait eğriler, sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

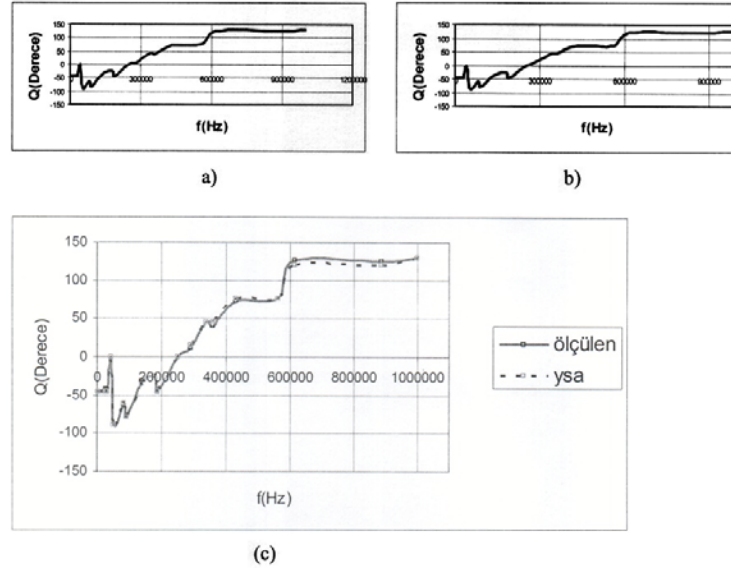
Bu çalışmada her denemede öğrenme hızı ve momentum katsayısı sabit tutulmuştur. En uygun öğrenme hızı ve momentum katsayısı bulunduktan sonra, bu değerler kullanılarak gizli katmanlardaki sinir sayısı 2'den 8'e kadar değiştirilmiş ve en uygun gizli katman sinir sayısı 4 olarak belirlenmiştir. Parametrelerin bulunması aşamasında, eğitim için hatanın etkin değeri, test için ortalama mutlak hata referans olarak alınmıştır. YSA'da uygulanacak parametrelerin belirlenmesinden sonra, eğitimin toplam karesel hatası 0,001'den küçük olana kadar devam edilmiştir.

## 5. SONUÇ



Şekil.4 Transformatör empedansı genliğinin frekans ile değişim eğrileri

- Ölçülmüş değerler ile oluşan eğri
- YSA tahmini sonucu oluşan eğri
- Eğrilerin aynı eksen takımında gösterimi



Şekil.5 Transformatör empedansının faz açısının frekans ile değişimi eğrileri

- Ölçülmüş değerler ile oluşan eğri
- YSA tahmini sonucu oluşan eğri
- Eğrilerin aynı eksende gösterimi

Optimum yalıtım seviyesini belirlemek amacıyla yapılan geçici olay simülasyonlarında, kullanılan modellerin doğru ve hassas bir biçimde oluşturulması ile yapılan analizler sayesinde yalıtım seviyesinden beklenen güvenilirliğin artacağı bir gerçektir. Bu nedenle daha gerçekçi modeller oluşturmak ve bunları geliştirmek için gerçek fiziksel sistemler üzerinde ölçümlerin yapılması zaman zaman gerekmektedir.

Bu çalışmada YSA'nın eğitiminde deneysel ölçülmüş verilerden faydalanılmıştır. Ölçüm değerlerinin genel ve lokal maksimum ve minimumlarına ait sargı empedansı genlik ve fazına ait veriler YSA için eğitim seti olarak kullanıldığında en iyi tahminlerin elde edildiği görülmüştür. Eğitim verileri dışındaki diğer değerler YSA tahmincisi ile kestirilmiş ve oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Tüm frekans aralığında ölçüm yapmak hem zaman alıcı hem de maddi hatalara neden olabilmektedir.

Bu işlemlerde YSA kullanılırken gizli katmandaki sinir sayısı, öğrenme katsayısı vb. faktörler de sonuçlara etki edebilmektedir. Bu çalışma için bir giriş, bir gizli katman (4 adet sinir), iki çıkışlı bir YSA yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmada, geriye yayılım algoritmasının kullanılmasının temel nedeni; yapısının iyi anlaşılması ve son yıllarda yapılan uygulamalarda olumlu sonuç alınmış olmasıdır.

Çalışmadaki YSA'lı simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların birbirlerine kabul edilebilir bir tole-

rans içinde yakın olduğu görülmüştür. Yine çalışmada YSA'yı kullanarak; sistem hakkında ön bilgi sahibi olunmadan daha az matematiksel ifade kullanarak ve eğitim aşaması sonrasında sonuçlara daha hızlı ulaşımla imkanı sağlanmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Saraiva J.T., Miranda, V., Impact on some planning decisions from a fuzzy modelling of power systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol:9 , no:2 , May , pp. 819-824, 1995
- Soysal, O., Transformatör sargılarında oluşan hızlı değişimli geçici olayların incelenmesi ve enerji iletim sistemlerinin modellenmesinde yeni bir yaklaşım, Doktora tezi , İTÜ ofset baskı atel. , İstanbul, 1985
- Koşalay, İ., Enerji sistemlerinde anahtarlama geçici olaylarının incelenmesi, Y. Lisans Tezi, İ.Ü. Fen Bil Enst., 1995
- Freeman, J.A., and Skapura, D.M., Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques, Addison-Wesley Publishing Company, 1992
- Neilson, R.H., Neurocomputing, New York: Addison Wesley, 1990
- Elmas, Ç., Yapay Sinir Ağları, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2003
- Dillon, T. and Niebur, D., Neural Net Applications in Power Systems, CRL Publishing Ltd., Leics, UK, 1996