

# MİKROŞERİT HAT ENDÜKTANS BÜYÜKLÜĞÜNÜN BİLGİ TABANLI YAPAY SİNİR AĞLARI ile MODELLENMESİ

Levent AKSOY  
e-posta: levent@ehb.itu.edu.tr

Neslihan Serap ŞENGÖR  
e-posta: neslihan@ehb.itu.edu.tr

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü Elektrik-Elektronik Fakültesi  
İstanbul Teknik Üniversitesi, 84499, Maslak, İstanbul

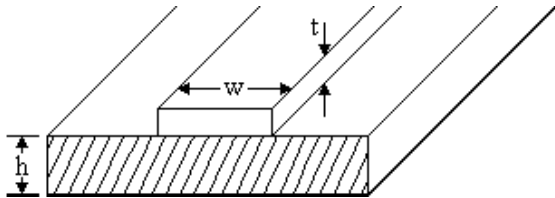
*Anahtar sözcükler: Mikroşerit hat, radyal tabanlı yapay sinir ağı, bilgi tabanlı yapay sinir ağı*

## ABSTRACT

*In this paper modeling self inductance of microstripline using knowledge-based neural networks with prior knowledge input and difference methods is presented. Knowledge-based neural networks are compared with radial basis network with respect to accuracy of results and CPU time in execution. It is shown that although less data is used in training of knowledge-based neural networks, more accurate results are obtained with faster convergence in training and although unseen data is used in test of knowledge-based neural networks, accuracy of results is preserved.*

## 1. GİRİŞ

Düşük maliyetli, küçük boyutlu ve oldukça tümleşik mikrodalga transmisyון hatları dairesel, dikdörtgen, mikroşerit dalga kılavuzu ve koaksiyel transmisyון hatları olarak karşımıza çıkar. Aktif ve pasif elemanların birlikte yer aldığı mikroşerit dalga kılavuzları birçok uygulamada kullanılmaktadır. Mikroşerit iletim hattı (Şekil 1) toprak yüzey ile transmisyון hattı arasının dielektrik tabaka ile kaplanması ile oluşur. Mikroşerit hattını ifade eden büyüklükler;  $w$ , iletim hattının genişliği,  $h$ , dielektrik tabakanın yüksekliği,  $t$ , iletim hattının kalınlığı,  $\epsilon_r$ , dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabitidir [1].



Şekil 1. Mikroşerit transmisyון hattı

Yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bilgisayar destekli tasarım araçları mikrodalga problemlerine çözüm getirmede son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır [2,3]. Bunun nedenleri olarak YSA modellerinin

elektromagnetik (EM) simülasyonlardan daha hızlı olması, yaklaşık formüllerden daha yüksek doğruluklu sonuçlar üretmesi, interpolasyon özelliğine sahip olması, okuma tablolarından daha fazla girişe sahip olması ve yeni bir eleman teknolojisi üretildiğinde geliştirilme işleminin kolay olması verilebilir [4].

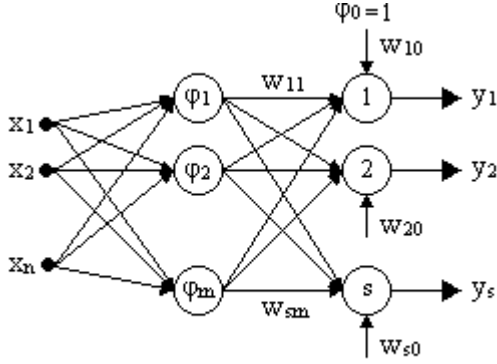
YSA modelinin doğruluğunun sağlanması için çok fazla öğrenme bilgisine ihtiyaç duyulmakta ve yetersiz öğrenme bilgisi ile YSA modelleri gerçekçi olmamaktadır. Mikrodalga problemleri için öğrenme bilgisi genellikle EM simülasyonlar veya ölçüm ile elde edilir. Fakat öğrenme bilgisi, bir elemanın giriş değişkenlerinin farklı değerlerdeki birçok kombinasyonları ile elde edildiğinden dolayı simülasyon veya ölçme işlemleri oldukça zahmetli olmaktadır. Aynı zamanda çok fazla öğrenme bilgisi ile YSA modellerinin eğitim aşaması oldukça uzun sürebilmektedir. Bunun yanında eğitim aşamasında kullanılan giriş değişkenlerinin değer sınırları dışındaki değerlere sahip girişler test aşamasında YSA modellerine uygulandığında, yüksek doğruluklu çıkışlar elde edilememektedir.

YSA'nın bu eksikliklerinden dolayı son zamanlarda daha az eğitim verisi ile daha kısa zamanda ve ekstrapolasyon durumunda daha yüksek doğruluklu sonuçlar üreten bilgi tabanlı YSA modelleri kullanılmaya başlanmıştır [5].

Bu bildiride ön bilgi girişli ve fark metodlarını içeren bilgi tabanlı YSA modelleri, mikroşerit hattın endüktans büyüklüğünün modellenmesinde kullanılmış ve bilgi tabanlı YSA modellerinin performansı, radyal tabanlı YSA'nın performansı ile karşılaştırılmıştır. Bildirinin bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde radyal tabanlı YSA yapısı sunulmuştur. Üçüncü bölümde bilgi tabanlı YSA'lar tanıtılırken dördüncü bölümde bilgi tabanlı YSA'larda kullanılan radyal tabanlı YSA modelinin özellikleri ve üzerinde deneyler yapılan eğitim ve test kümeleri verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel sonuçlar sunulmuş ve son olarak sonuç bölümü verilmiştir.

## 2. RADYAL TABANLI YAPAY SİNİR AĞ

Radyal tabanlı YSA, eğri uydurma probleminin çözümünü çok boyutlu uzayda arar. Bu anlamda öğrenme işlemi, eğitim kümesindeki değerler ile oldukça tutarlı olan (istatistiksel anlamda) çok boyutlu uzaydaki bir yüzeyi bulmaya denktir. Buna karşılık, genelleştirme işlemi ise bu çok boyutlu uzayın test kümesindeki değerleri büyük bir doğrulukla elde etmesi sonucunda belirlenmesidir. Radyal tabanlı YSA, giriş katmanı, bir adet gizli katman ve çıkış katmanından oluşur [6]. Şekil 2'de radyal tabanlı YSA yapısı verilmektedir.



Giriş Katmanı Gizli Katman Çıkış Katmanı  
Şekil 2. Radyal tabanlı yapay sinir ağı yapısı

Gizli katmanında  $m$  adet nöron içeren  $n$  girişli  $s$  çıkışlı radyal tabanlı ağı çıkış ifadeleri,

$$y_k(\mathbf{x}) = \sum_{j=0}^m w_{kj} \phi_j(\mathbf{x}) \quad k=1 \dots s$$

şekindedir. Burada  $\mathbf{x}$ ,  $n$  boyutlu giriş vektörü,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m$  gizli katmandaki nöronlara ait hücre fonksiyonları iken  $w_{k0}, w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  çıkış katmanındaki  $k$ . nörona ait ağırlıklardır. Gizli katmandaki nöronlara ilişkin aktivasyon fonksiyonu aşağıda verildiği gibi Gauss fonksiyonudur.

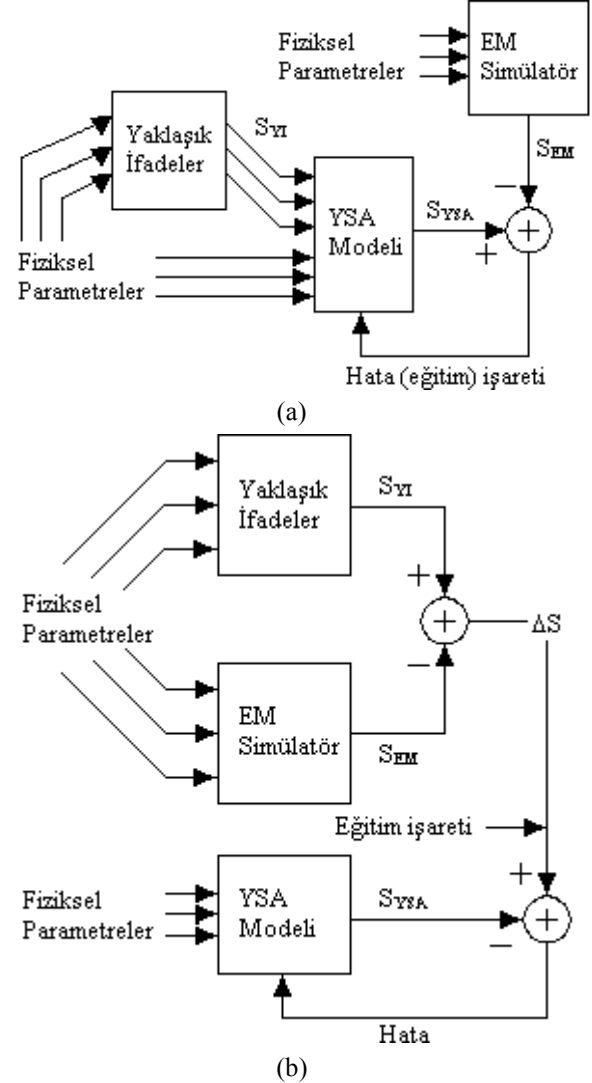
$$\phi_j(\mathbf{x}) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n (x_i - t_{ji})^2 / 2\sigma_j^2\right) \quad j=1 \dots m$$

Burada  $t$ , Gauss fonksiyonunun merkezini ifade ederken,  $\sigma$ , Gauss fonksiyonunun standart sapma değerini ifade etmektedir.

## 3. BİLGİ TABANLI YAPAY SİNİR AĞ

Yaklaşık ifadelerin EM simülasyon sonuçları ile eğitim ve test aşamasında YSA içine katıldığı ön bilgi girişli (PKI) ve fark (DIFF) metodları olarak bilinen iki adet bilgi tabanlı YSA modeli bulunmaktadır. PKI metodunda yaklaşık ifadelerin çıkışları, YSA modelinde ek giriş olarak kullanılır (Şekil 3a) ve bu durumda YSA tarafından öğrenilen bilgi, simülasyon (kesin) sonuçları ile yaklaşık ifade sonuçları arasındaki giriş-çıkış ilişkisidir. DIFF metodunda ise YSA, simülasyon çıkışı ile yaklaşık ifade çıkışları arasındaki fark ile eğitilir (Şekil 3b). Giriş değişkenleri cinsinden ifade edilen fark

fonksiyonunun giriş-çıkış ilişkisi, simülasyon çıkışlarının aynı giriş değişkenleri cinsinden ifade edilen fonksiyonunun giriş-çıkış ilişkisinden daha basit bir ilişkiye sahip ise DIFF metodu, daha yüksek doğruluklu sonuçlar verecektir [5].



Şekil 3. Bilgi tabanlı YSA modelleri (a) PKI metodu (b) DIFF metodu [5]

## 4. YAPAY SİNİR AĞ MODELİ

Bilgi tabanlı YSA'larda kullanılan YSA yapısı radyal tabanlıdır. Bu yapı gizli katmanında 20 adet nöron içermektedir. Eğitim aşamasında hata fonksiyonu olarak karesel hata fonksiyonu kullanılarak çıkışın ortalama ani hata değeri veri uyarlamalı yaklaşımda en dik iniş yöntemi (gradyen düşüm) kullanılarak azaltılmaya çalışılmıştır. Bu aşamada öğrenme değeri olarak 0.2, momentum katsayısı olarak 0.3 alınmıştır. Gizli katmanlarda yer alan Gauss aktivasyon fonksiyonlarının merkez, standart sapma ve nöronların ağırlık değerlerinin tümü bir arada eğitilmiştir. Eğitim aşamasının sonlanma kriteri, ortalama ani hata değerinin 0.0001'e ulaşmasıdır. Bu özellikler ile oluşturulan

radyal tabanlı YSA, yapılan deneyler sonucunda en yüksek doğruluklu sonuçların elde edildiği ağıdır ve bu ağı aynı zamanda bilgi tabanlı YSA'lar ile yapılan karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

Radyal ve bilgi tabanlı YSA modellerinde kullanılan mikroşerit hattın endüktans değerine ilişkin EM simülasyon sonuçları LINPAR adlı simülatörden alınmıştır. Öğrenme verileri, 264 adet eğitim verisi ve 90 adet test verisi olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunun yanında 264 adet eğitim verisinden her bir giriş değişken değerinin eğitim kümesinde bulunma dağılımı korunarak 200 ve 100 adet veri içeren eğitim kümeleri elde edilmiştir. Bu eğitim kümelerinin oluşturulma amacı, eğitim aşamasında kullanılan veri sayısı azaltıldığında bilgi tabanlı YSA modellerinin performansının belirlenmesi içindir. Bu şekilde oluşturulan eğitim kümelerinde ve test kümesinde bulunan verilerin değer aralıkları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. İnterpolasyon durumunda kullanılan eğitim ve test kümelerindeki verilerin değer aralıkları

		Eğitim	Test
w (m)	Min.	2,50E-05	5,50E-05
	Maks.	2,75E-04	2,45E-04
h (m)	Min.	5,00E-05	8,00E-05
	Maks.	3,00E-04	2,50E-04
t (m)	Min.	1,00E-04	1,60E-04
	Maks.	6,00E-04	5,00E-04
$\epsilon_r$ (F/m)	Min.	1,5	2,1
	Maks.	12	10,8

Bunun yanında 100, 200 ve 264 adet veri içeren eğitim kümelerinden her bir giriş değişkenin maksimum değerinin bulunduğu veriler yeni bir test kümesine aktararak sırasıyla 48-52, 105-95 ve 138-126 (eğitim-test kümesindeki veri sayısı) olarak yeni eğitim ve test kümeleri oluşturulmuştur. Bu eğitim ve test kümelerinin oluşturulma amacı, eğitim aşamasında kullanılmayan veya kullanılan değer sınırları dışında kalan veriler test aşamasında sunulduğunda YSA modellerinin performansının belirlenmesi içindir. Bu şekilde oluşturulan eğitim ve test kümelerinde bulunan verilerin değer aralıkları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Ekstrapolasyon durumunda kullanılan eğitim ve test kümelerindeki verilerin değer aralıkları

		Eğitim	Test
w (m)	Min.	2,50E-05	2,50E-05
	Maks.	2,50E-04	2,75E-04
h (m)	Min.	5,00E-05	5,00E-05
	Maks.	1,80E-04	3,00E-04
t (m)	Min.	1,00E-04	1,00E-04
	Maks.	3,60E-04	6,00E-04
$\epsilon_r$ (F/m)	Min.	1,5	1,5
	Maks.	10,5	12

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Mikroşerit transmisyon hattın endüktans (L) büyüklüğüne ilişkin yaklaşık ifadeler [1]

$$L = Z_0^{\text{air}} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad Z_0^{\text{air}} = Z_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12h/w}}$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), & \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \left(\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right)\right)}}, & \frac{w}{h} > 1 \end{cases}$$

şeklinde. YSA modellerinin test aşamasında kullanılan EM simülasyon çıktıları ile yaklaşık ifadelerin çıktıları arasındaki ortalama ve maksimum hata değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Bu tabloda TKES, test kümesindeki eleman sayısını OH ve MH ise sırasıyla ortalama ve maksimum hata değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 3. EM simülasyon ile yaklaşık ifade çıktıları arasındaki ortalama ve maksimum hata değerleri

	TKES	OH	MH
90	7,82E-08	8,37E-08	
52	7,83E-08	8,39E-08	
95	7,68E-08	8,39E-08	
126	7,85E-08	8,39E-08	

MATLAB programında YSA için varolan araçlar kullanılmadan gerçekleştirilen radyal tabanlı ve bilgi tabanlı YSA modellerinin interpolasyon ve ekstrapolasyon durumlarındaki davranışı 880MHz Pentium IV işlemciye ve 256MB RAM'e sahip bilgisayar ile deneyler yapılarak belirlenmiştir. YSA modelleri interpolasyon durumunda 100, 200 ve 264 adet veriden oluşan eğitim kümeleri ile eğitilmiş ve 90 adet veri içeren test kümesi ile test edilmiştir. Ekstrapolasyon durumunda ise 48, 105 ve 138 adet veriden oluşan eğitim kümeleri ile eğitilmiş ve sırasıyla 52, 95 ve 126 adet veri içeren test kümeleri ile test edilmiştir. YSA modellerinde aktivasyon fonksiyonların merkez, standart sapma ve nöronların ağırlık değerleri başlangıçta rastgele olarak atandığından dolayı bu rastgele aşamanın etkisini ortadan kaldırmak için her bir deney 50 defa çalıştırılmıştır.

İnterpolasyon ve ekstrapolasyon durumlarında yapılan 50 çalışmanın ortalama sonuçları sırasıyla Tablo 4-5'te verilmektedir. Bu tablolarda EKES, eğitim kümesindeki, TKES, test kümesindeki veri sayısını, ITS ise iterasyon sayısını ifade etmektedir. OH ve MH ise sırasıyla ortalama ve maksimum hata değerlerini ifade etmektedir. Süre ifadesi saniye cinsindedir. Ortalama hata değerinin 50 çalışma sonucunda elde edilen istatistiksel değerleri ise Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 4. İnterpolasyon durumunda yapılan deneylerin 50 çalışma sonucundaki ortalama değerleri

	EKES	TKES	ITS	OH	MH	Süre
Radyal	100	90	574,82	1,61E-08	4,86E-08	44,87
	200	90	511,56	1,86E-08	4,48E-08	79,8
	264	90	404,08	1,79E-08	4,30E-08	82,18
PKI	100	90	127,44	5,93E-09	2,64E-08	10,64
	200	90	84,14	5,55E-09	2,18E-08	13,99
	264	90	63,98	5,78E-09	2,04E-08	13,74
DIFF	100	90	834,26	8,83E-10	2,68E-09	72,65
	200	90	624,94	9,14E-10	2,94E-09	106,05
	264	90	537,84	8,89E-10	2,98E-09	125,8

Tablo 5. Ekstrapolasyon durumunda yapılan deneylerin 50 çalışma sonucundaki ortalama değerleri

	EKES	TKES	ITS	OH	MH	Süre
Radyal	48	52	918,86	5,11E-08	1,86E-07	34,55
	105	95	1173,82	4,19E-08	1,75E-07	95,82
	138	126	1129,2	4,36E-08	1,74E-07	120,02
PKI	48	52	188,7	2,20E-08	8,65E-08	7,6
	105	95	89,16	1,84E-08	8,33E-08	7,83
	138	126	63,3	1,84E-08	8,39E-08	7,32
DIFF	48	52	859,98	3,23E-09	1,23E-08	35,4
	105	95	540,4	2,58E-09	1,14E-08	47,78
	138	126	570,76	2,40E-09	1,02E-08	66,6

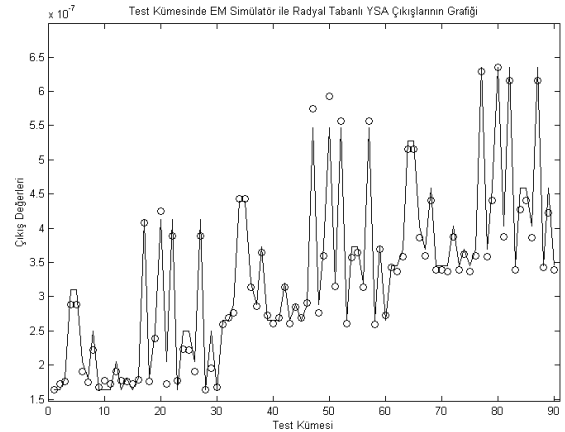
Tablo 6. Her bir deneyde yapılan 50 çalışma sonucu elde edilen ortalama hata değerinin istatistiksel sonuçları

EKES	TKES	YSA	Min. OH	Ort. OH	Maks. OH	T Test
100	90	Radyal	1,15E-08	1,61E-08	2,46E-08	
		PKI	3,95E-09	5,93E-09	1,31E-08	8,91E-27
		DIFF	6,96E-10	8,83E-10	1,05E-09	
200	90	Radyal	1,24E-08	1,86E-08	2,57E-08	
		PKI	3,35E-09	5,55E-09	1,22E-08	
		DIFF	7,91E-10	9,14E-10	1,05E-09	
264	90	Radyal	1,23E-08	1,79E-08	2,51E-08	
		PKI	3,56E-09	5,78E-09	1,20E-08	
		DIFF	7,37E-10	8,89E-10	9,95E-10	
48	52	Radyal	3,36E-08	5,11E-08	7,20E-08	
		PKI	7,71E-09	2,20E-08	3,93E-08	1,82E-25
		DIFF	1,19E-09	3,23E-09	8,94E-09	7,97E-22
105	95	Radyal	3,16E-08	4,19E-08	7,25E-08	
		PKI	7,03E-09	1,84E-08	3,06E-08	
		DIFF	1,20E-09	2,58E-09	7,06E-09	
138	126	Radyal	3,19E-08	4,36E-08	5,57E-08	
		PKI	8,04E-09	1,84E-08	3,11E-08	
		DIFF	1,21E-09	2,40E-09	4,37E-09	

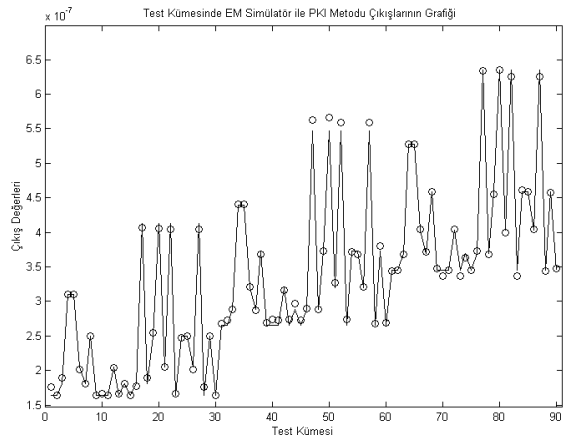
İlk olarak YSA modelleri yaklaşık ifadeler ile karşılaştırılmak istendiğinde tüm YSA modellerinin interpolasyon durumunda yaklaşık ifadelerden daha yüksek doğruluklu sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ekstrapolasyon durumunda ise ortalama hata değeri için tüm YSA model sonuçları, yaklaşık ifade sonuçlarından daha iyi iken, maksimum hata değeri için radyal tabanlı YSA model sonuçları yaklaşık ifade sonuçlarından daha kötüdür. Bunun yanında PKI metodu ile elde edilen sonuçlar yaklaşık ifadeler ile elde edilen sonuçlara yakın iken DIFF metodu ile elde edilen sonuçlar yaklaşık ifade sonuçlarından daha iyidir.

İkinci olarak YSA modelleri ortalama hata değerine göre karşılaştırılmak istendiğinde, ortalama hata değerinin Tablo 6'da sadece üç yerde (Radyal\_100-PKI\_100, Radyal\_48-PKI\_48 ve PKI\_48-DIFF\_48) yüzde 95 emniyet bölgesinin dışında kaldığı görülmektedir. Bu durumlardaki 50 ortalama hata değeri üzerinde uygulanan T testi (sırasıyla 2., 11. ve 12. satırda verilen değerler) ile bu sonuçların aynı dağılımda olma olasılıklarının çok düşük oldukları gösterilmiş ve böylelikle, interpolasyon ve ekstrapolasyon durumlarında bilgi tabanlı YSA modellerinin radyal tabanlı YSA modelinden daha yüksek doğruluklu sonuçlar ürettiği, en yüksek doğruluklu sonuçların ise DIFF metodu ile elde edildiği belirlenmiştir. Bunun yanında her iki durumda da PKI metodu ile yüksek doğruluklu sonuçlar en kısa sürede elde edilmiştir.

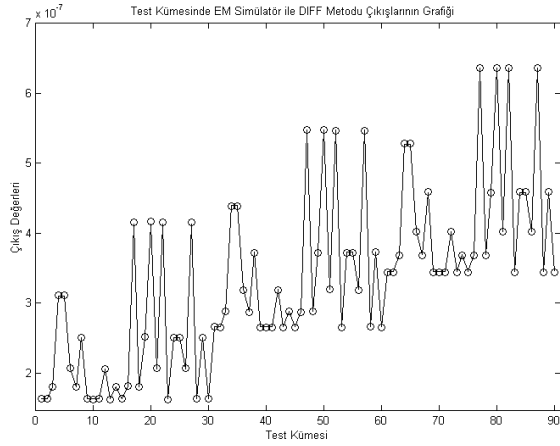
İnterpolasyon durumunda 100 adet veri içeren eğitim, 90 adet veri içeren test kümesi ve ekstrapolasyon durumunda 48 adet veri içeren eğitim, 52 adet veri içeren test kümesi ile YSA modelleri üzerinde yapılan deneylerde elde edilen minimum ortalama hata değerine sahip deneylerin sonuçları sırasıyla Şekil 4-5-6 ve Şekil 7-8-9'da verilmektedir. Burada daireler YSA model, çizgiler ise EM simülör çıkış değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4. Radyal tabanlı YSA sonuçları (İnterpolasyon)

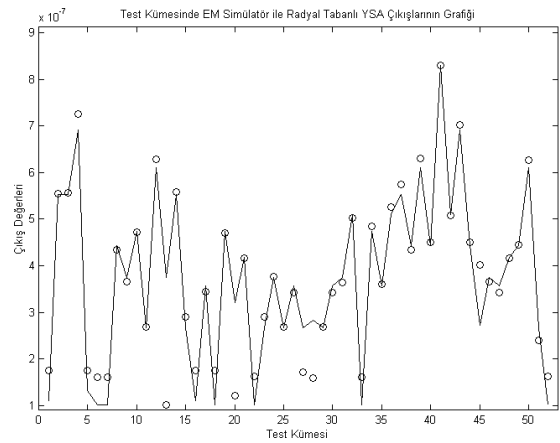


Şekil 5. PKI metodu sonuçları (İnterpolasyon)

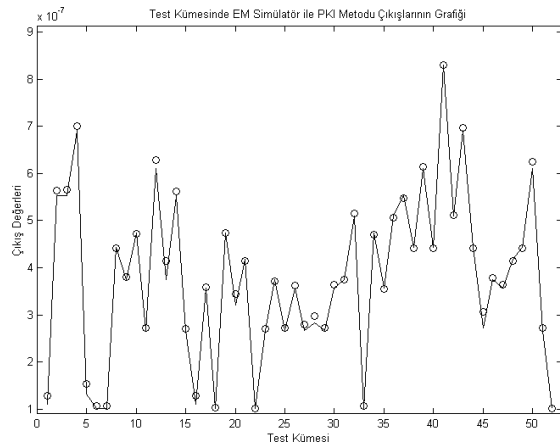


Şekil 6. DIFF metodu sonuçları (İnterpolasyon)

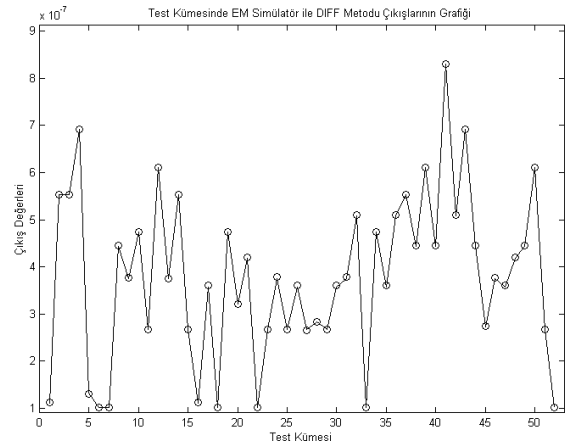
Aynı zamanda eğitim aşamasında kullanılan veri sayısının azaltılması ile YSA modelleri için sonuçların elde edilmesinde geçen sürenin azaldığı fakat bunun yanısıra özellikle ekstrapolasyon durumunda, radyal tabanlı YSA modelinde elde edilen sonuçların doğruluk değerlerinin azaldığı ve bilgi tabanlı YSA modellerinde sonuçların doğruluk değerlerinin korunduğu görülmektedir.



Şekil 7. Radyal tabanlı YSA sonuçları (Ekstrapolasyon)



Şekil 8. PKI metodu sonuçları (Ekstrapolasyon)



Şekil 9. DIFF metodu sonuçları (Ekstrapolasyon)

## 6. SONUÇ

Bilgi tabanlı YSA modelleri kullanılarak, YSA modellerinin eğitim aşamasının uzun sürmesi, eğitim aşamasında kullanılan veri sayısının büyük olması, ekstrapolasyon durumlarında yüksek doğruluklu sonuçlar üretmemesi gibi eksiklikleri ortadan kaldırılabilir. Bundan dolayı hem yüksek doğruluklu sonuçlar üreten hem de eğitim süreci kısa olan bilgi tabanlı YSA modellerini kullanmak önemlidir.

## KAYNAKLAR

- [1] Karmel P. R., Colef G. D. ve Camisa R. L. *Introduction to Electromagnetic and Microwave Engineering*, John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [2] Wang B. Z., Hong J., *Artificial Neural Network Models for the Gap Discontinuities in Stripline Circuits*, International Journal of Infrared and Milimeter Waves, Vol. 20, No. 4, pp. 669-680, 1999.
- [3] Zhang Q. J., Wang F. ve Nakhla M. S., *Optimization of High-speed VLSI Interconnects: A review*, International Journal of Microwave Milimeter-Waves CAD, pp. 83-107, 1997.
- [4] Li C., Xu J. ve Xue L., *Knowledge-Based Artificial Neural Network Models for Finline*, International Journal of Infrared and Milimeter Waves, Vol. 22, No. 2, pp. 351-359, 2001.
- [5] Watson P. M., Gupta K. C. ve Mahajan R. L. *Applications of Knowledge-Based Artificial Neural Network Modeling to Microwave Components*, International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 254-260, 1999.
- [6] Haykin S., *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, MacMillan College Publishing Company, 1994.