

# ELEKTRİKSEL OLARAK İNCE VE KALIN DİKDÖRTGEN MİKROŞERİT ANTENLERİN REZONANS FREKANSININ FARKLI ALGORİTMALARLA EĞİTİLEN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE HESAPLANMASI

S. Sinan GÜLTEKİN<sup>1</sup> Kerim GÜNEY<sup>2</sup> Şeref SAĞIROĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Bölümü, Konya

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Bölümü, 38039, Kayseri

<sup>3</sup>Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Bölümü, 38039, Kayseri

<sup>1</sup>e-posta:sgultekin@selcuk.edu.tr <sup>2</sup>e-posta:kguney@erciyes.edu.tr

<sup>3</sup>e-posta:ss@erciyes.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Yapay Sinir Ağları, Mikroşerit Antenler, Rezonans Frekansı*

## ABSTRACT

*Neural models for calculating the resonant frequency of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas, based on the multilayered perceptrons, are presented. Eleven learning algorithms are used to train the multilayered perceptrons. The reason for using eleven different learning algorithms is to speed up the training time and to compare the performance of neural models for this specific application. The resonant frequency results obtained by using neural models are in very good agreement with the experimental results available in the literature. When the performances of neural models are compared with each other, the best results were obtained from the multilayered perceptrons trained by the conjugate gradient of Fletcher-Reeves.*

## 1. GİRİŞ

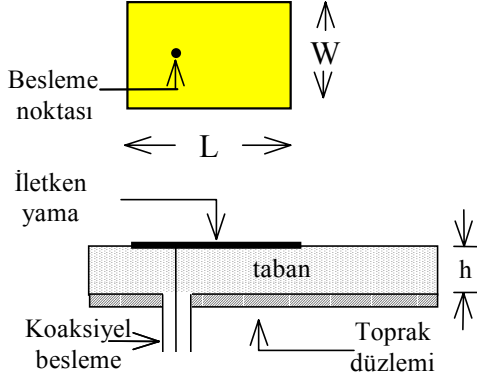
Mikroşerit antenler dar band genişliğine sahip oldukları ve yalnız rezonans frekansının komşuluğunda verimli olarak çalışabildikleri için rezonans frekansının doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir [1-14]. Literatürde bu konuda önerilen yöntemlerin çoğu yalnız elektriksel olarak ince dikdörtgen mikroşerit antenler ( $h/\lambda_d \leq 0.02$ , burada  $h$  dielektrik taban kalınlığı ve  $\lambda_d$  dielektrik tabandaki dalga boyudur) için geçerlidir. Elektriksel olarak ince mikroşerit antenlerin band genişliği düşüktür. Bu tür antenlerin band genişliğini artırmak için kullanılacak tekniklerden biri, uygun bir şekilde dielektrik taban kalınlığını artırmaktır. Literatürdeki mevcut klasik ve nümerik yöntemlerle elektriksel olarak hem ince hem de kalın dikdörtgen mikroşerit antenlerin rezonans frekansı için elde edilen teorik sonuçlar, deneysel sonuçlarla iyi bir uyumluluk içerisinde değildir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada, öğrenme yeteneği, kolayca farklı problemlere uyarlanabilirliği, genelleme yapabilmesi, daha az bilgi gerektirmesi, paralel yapılarından dolayı hızlı çalışabilme yeteneği ve kolay bir şekilde

uygulanabilmesi gibi pek çok avantajından dolayı yapay sinir ağlarına (YSA) [15-17] dayanan bir yöntem, elektriksel olarak hem ince hem de kalın dikdörtgen mikroşerit antenlerin rezonans frekansını hesaplamak için sunulmuştur.

Çeşitli tipteki mikroşerit antenlerin karakteristik parametrelerinin başarılı bir şekilde YSA ile hesaplandığı çalışmalar literatürde mevcuttur [18-23]. Bu çalışmalardan [20,23]'de dikdörtgen mikroşerit antenin rezonans frekansı YSA ile belirlenmiştir. Ancak [20,23]'de, YSA ağ yapılarından çok katlı perseptronların (ÇKP) eğitilmesinde sadece geri yayılım (GY), genişletilmiş delta-bar-delta (GDBD), delta bar delta (DBD), hızlı yayılım (HY), yönlendirilmiş rasgele arama (YRA) ve genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Sunulan bu çalışmada ise, ÇKP'lerin eğitilmesinde [20,23]'de kullanılmayan öğrenme algoritmaları kullanılmış ve bu algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır. Levenberg-Marquardt (LM) [24,25], Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) [26], otomatik düzenleme (OD) [27], ölçeklendirilmiş eşlenik gradyent (ÖEG) [28], esnek geri yayılım (EGY) [29], tek adım secant (TAS) [30], eşlenik gradyent Powell-Beale (PB) [31], eşlenik gradyent Polak-Ribière (PR) [32], eşlenik gradyent Fletcher-Reeves (FR) [33], adaptif öğrenme oranlı geri yayılım (AGY) [32] ve momentumlu geri yayılım (MGY) [32] algoritması gibi farklı on bir öğrenme algoritması kullanılarak ÇKP'ler eğitilmiştir. Farklı öğrenme algoritmalarının kullanılmasının amacı daha doğru ve hızlı sonuç elde edebilmek ve YSA öğrenme algoritmalarını bu tip uygulamalar için test etmektir. Nöral modellerden elde edilen sonuçlar, hem deneysel sonuçlarla hem de literatürdeki mevcut klasik ve nöral yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. REZONANS FREKANSI

Şekil 1'de gösterilen yama genişliği  $W$ , uzunluğu  $L$ , dielektrik taban kalınlığı  $h$  ve bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$ ,



Şekil 1. Dikdörtgen mikroşerit anten geometrisi

olan bir dikdörtgen mikroşerit antenin rezonans frekansı aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir [1-3].

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e}} \left[ \left( \frac{m}{L_e} \right)^2 + \left( \frac{n}{W_e} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Burada,  $\epsilon_e$  efektif dielektrik sabiti,  $c$  boşlukta elektromagnetik dalgaların hızı,  $m$  ve  $n$  tamsayı değerler,  $L_e$  ve  $W_e$  ise efektif boyutlardır.  $TM_{10}$  modu için, denklem (1) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_{10} = \frac{c}{2L_e \sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

Effektif uzunluk

$$L_e = L + 2\Delta L \quad (3)$$

ile verilir. Denklem (3)'de  $\Delta L$  kenar uzamasıdır. Effektiv dielektrik sabiti  $\epsilon_e$  ve kenar uzaması  $\Delta L$  için literatürde çok sayıda öneri mevcuttur [1-3]. Literatürde sunulan tüm yöntemlerden [1-14] görülmüştür ki  $TM_{10}$  modundaki dikdörtgen mikroşerit antenin rezonans frekansı sadece  $W$ ,  $L$ ,  $h$  ve  $\epsilon_r$ 'ye bağlıdır.

### 3. YAPAY SİNİR AĞLARI

YSA, biyolojik sinir sisteminin çalışma prensibi temel alınarak geliştirilmiştir [15-17]. YSA nöronların birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmasından oluşur ve genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir. YSA'ların bir çok yapısı mevcuttur [15-17,34]. Bu yapılardan ÇKP ağ yapısı bu çalışmada dikdörtgen mikroşerit antenlerin rezonans frekansını hesaplamak için kullanılmıştır.

Temel bir ÇKP, giriş katı, çıkış katı ve gizli kat olmak üzere üç ana kattan oluşur. Giriş katındaki işlemci elemanlar veya nöronlar, giriş sinyali  $x_i$ 'nin gizli kattaki nöronlara dağıtılmasını sağlarlar. Gizli katta bulunan her bir  $j$  indisli işlemci eleman için çıkış;  $x_j$

giriş sinyali ile ara kat nöron ağırlığı  $w_{ji}$  ile çarpıldıktan sonra toplanır ve toplamın bir  $f$  fonksiyonu olarak  $y_i$  çıkışı aşağıdaki gibi hesaplanır.

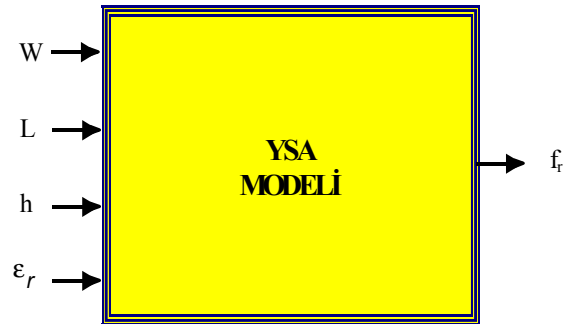
$$y_i = f(\sum w_{ji} x_i) \quad (4)$$

Burada  $f$  sigmoidal veya hiperbolik tanjant fonksiyonu gibi basit bir eşik fonksiyonu olabilir. Çıkış katındaki nöronların çıkışları da benzer şekilde hesaplanır. Bir ağı eğitme işlemi, değişik öğrenme algoritmalarını kullanarak ağı ağırlıklarını ayarlamaktan oluşur. Bir çok öğretim algoritmasının ÇKP ağını eğitmede kullanılabilir olması, bu ağı yaygın olarak kullanılmasının sebebidir. Bu çalışmada LM, BFGS, OD, ÖEG, EGY, TAS, PB, PR, FR, AGY ve MGY algoritmaları ÇKP'lerin eğitilmesinde kullanılmıştır.

### 4. REZONANS FREKANSININ YSA İLE HESABI

Elektriksel olarak ince ve kalın dikdörtgen mikroşerit antenlerin rezonans frekanslarının YSA ile hesaplamasında kullanılan YSA modellerinin girişleri,  $W$ ,  $L$ ,  $h$  ve  $\epsilon_r$ 'dir. Modellerin çıkışı ise ölçülen rezonans frekansı değerleridir. Kullanılan YSA modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. YSA'ları eğitmek ve test etmek için, Tablo 1'de verilen farklı 46 elektriksel ölçme verileri [6,8,13,14] kullanılmıştır. Bu 46 ölçme verisinden 37'si ile ağlar eğitilmiş 9'u ile de ağlar test edilmiştir.

Bu çalışmada sunulan nöral modellerden elde edilen rezonans frekansı sonuçları Tablo 1'de, bu modellerin ara kat nöron ve epok sayıları ile nöral modellerden hesaplanan sonuçlarla ölçülen rezonans frekansları arasındaki mutlak hatalar Tablo 2'de verilmiştir. Literatürdeki mevcut klasik yöntemlerden [1,2,4-7,9-11,14] ve GY, GDBD, DBD, HY, YRA ve GA algoritmaları ile eğitilen nöral modellerden [20,23] bulunan teorik sonuçlarla ölçülen rezonans frekansları arasındaki mutlak hataların toplamı da Tablo 3'de sunulmuştur. Tablo 2 ve 3'den görüldüğü gibi literatürdeki mevcut klasik yöntemlerdeki en



Şekil 2. Rezonans frekansını hesaplamak için kullanılan YSA modeli

Tablo 1. Dikdörtgen mikroşerit antenler için ölçülen rezonans frekansları ile nöral modeller kullanılarak hesaplanan rezonans frekanslarının karşılaştırılması.

W (cm)	L (cm)	h (cm)	$\epsilon_r$	$(h/\lambda_d)$	Ölçülen $f_r$ (MHz) [6,8,13,14]	Nöral Modeller										
						LM	BFGS	OD	ÖEG	EGY	TAS	PB	PR	FR	AGY	MGY
5.700	3.800	0.318	2.33	0.03732	2310	2310	2286	2310	2310	2311	2310	2311	2310	2310	2309	2309
1.700	1.100	0.318	2.33	0.1099	6800*	6804	6774	6744	6729	6717	6620	6865	6890	6816	6721	6621
4.550	3.050	0.318	2.33	0.04669	2890	2890	2896	2890	2887	2889	2891	2889	2890	2890	2889	2891
2.950	1.950	0.318	2.33	0.0685	4240	4240	4241	4240	4239	4240	4236	4241	4240	4240	4241	4237
1.950	1.300	0.318	2.33	0.09434	5840	5840	5839	5842	5844	5846	5862	5840	5840	5840	5852	5854
1.400	0.900	0.318	2.33	0.1244	7700	7697	7681	7699	7671	7685	7637	7700	7701	7700	7654	7637
6.858	4.1400	0.152	2.50	0.01767	2200*	2337	2190	2202	2131	2185	2228	2220	2054	2212	2205	2213
1.200	0.800	0.318	2.33	0.1336	8270	8274	8274	8270	8305	8283	8343	8270	8269	8270	8336	8363
1.050	0.700	0.318	2.33	0.1477	9140	9139	9141	9140	9130	9138	9122	9139	9141	9140	9112	9094
1.700	1.100	0.953	2.33	0.2292	4730	4730	4730	4730	4730	4730	4729	4730	4730	4730	4730	4730
1.700	1.100	0.152	2.33	0.06103	7870	7870	7871	7870	7874	7870	7868	7870	7870	7870	7860	7863
4.100	4.1400	0.152	2.50	0.0179	2228	2228	2263	2228	2228	2228	2228	2228	2228	2228	2229	2230
10.80	4.1400	0.152	2.50	0.01752	2181	2181	2174	2181	2182	2181	2181	2181	2181	2181	2181	2181
0.850	1.2900	0.017	2.22	0.00654	7740	7740	7741	7742	7741	7740	7742	7739	7740	7741	7743	7741
2.000	2.5000	0.079	2.22	0.01558	3970	3970	3971	3970	3970	3969	3969	3971	3970	3970	3972	3970
0.790	1.1850	0.017	2.22	0.00713	8450*	8458	8454	8320	8381	8502	8444	8431	8498	8476	8352	8405
1.063	1.1830	0.079	2.55	0.03251	7730	7729	7709	7726	7725	7729	7724	7731	7729	7729	7724	7725
0.910	1.0000	0.127	10.20	0.06219	4600	4600	4601	4600	4600	4600	4600	4600	4600	4600	4600	4600
1.720	1.8600	0.157	2.33	0.04042	5060	5061	5050	5058	5064	5070	5064	5058	5060	5060	5051	5058
1.270	1.3500	0.163	2.55	0.05692	6560	6558	6584	6562	6563	6578	6571	6562	6560	6559	6569	6575
1.810	1.9600	0.157	2.33	0.03838	4805*	4830	4843	4825	4864	4890	4835	4894	4796	4826	4800	4823
1.500	1.6210	0.163	2.55	0.04859	5600	5594	5599	5604	5586	5570	5584	5601	5600	5600	5604	5602
1.120	1.2000	0.242	2.55	0.09081	7050	7061	7078	7061	7057	7036	7067	7050	7056	7051	7056	7059
1.403	1.4850	0.252	2.55	0.0778	5800	5800	5791	5791	5809	5805	5835	5796	5798	5800	5798	5778
1.530	1.6300	0.300	2.50	0.08333	5270	5280	5279	5274	5270	5278	5255	5272	5272	5271	5276	5283
1.337	1.4120	0.200	2.55	0.066	6200*	6195	6207	6187	6198	6210	6225	6197	6196	6206	6204	6196
0.905	1.0180	0.300	2.50	0.1263	7990	7989	8048	7996	7990	7993	7978	7989	7990	7991	8039	8054
1.170	1.2800	0.300	2.50	0.1039	6570	6559	6549	6554	6562	6577	6537	6570	6566	6570	6554	6561
0.776	1.0800	0.330	2.55	0.1405	8000	7999	7952	7994	7998	7993	7999	8003	7800	7998	7944	7935
1.375	1.5800	0.476	2.55	0.1292	5100*	5101	5132	5188	5171	5164	5192	5117	5165	5188	5148	5165
0.790	1.2550	0.400	2.55	0.1519	7134	7129	7126	7133	7130	7144	7138	7125	7127	7135	7139	7127
0.987	1.450	0.45	2.55	0.1454	6070	6059	6044	6077	6063	6048	6059	6068	6063	6067	6037	6046
0.814	1.4400	0.476	2.55	0.1617	6380	6409	6436	6398	6395	6388	6402	6399	6404	6382	6434	6437
0.790	1.620	0.55	2.55	0.1754	5990	5972	5971	5970	5984	5992	5977	5980	5976	5990	5969	5970
1.200	1.9700	0.626	2.55	0.1553	4660	4662	4677	4662	4662	4663	4667	4661	4663	4660	4663	4664
0.783	2.3000	0.854	2.55	0.2091	4600	4606	4600	4610	4600	4600	4595	4603	4607	4600	4601	4600
0.974	2.6200	0.952	2.55	0.2017	3980	3969	3958	3968	3966	3964	3970	3970	3967	3968	3967	3972
1.000	1.5200	0.476	2.55	0.1475	5820*	5851	5819	5866	5848	5830	5829	5864	5852	5866	5810	5823
1.020	2.6400	0.952	2.55	0.1976	3900	3898	3892	3902	3907	3912	3901	3904	3905	3905	3908	3901
0.883	2.6761	1.000	2.55	0.2119	3980	3984	3977	3986	3990	3976	4000	3986	3986	3990	3981	3990
0.777	2.8351	1.100	2.55	0.2284	3900	3902	3911	3890	3897	3895	3899	3895	3890	3894	3903	3893
1.256	2.7560	0.952	2.55	0.1814	3580*	3570	3595	3587	3585	3610	3560	3562	3600	3584	3678	3544
0.920	3.1301	1.200	2.55	0.2216	3470	3478	3486	3482	3471	3494	3471	3479	3479	3473	3469	3478
1.265	3.5001	1.281	2.55	0.2032	2980	2985	2972	2982	2981	2982	2992	2983	2979	2978	2983	2982
1.080	3.4001	1.281	2.55	0.2148	3150	3140	3151	3144	3148	3135	3133	3143	3149	3151	3146	3143
1.030	3.3801	1.281	2.55	0.2182	3200*	3191	3203	3184	3178	3149	3174	3183	3186	3191	3197	3183

\* Test Verileri

düşük toplam mutlak hata 19179 MHz iken bu çalışmada sunulan FR ile eğitilen ÇKP yapısından elde edilen toplam mutlak hata, 281 MHz'dir. Bunu 395 MHz ile LM, 402 MHz ile PB ve 555 MHz ile OD algoritmaları ile eğitilen ÇKP ağ yapıları takip etmiştir. Bu çalışmada ve [20,23]'de sunulan tüm nöral modellerden elde edilen sonuçların, literatürde mevcut olan klasik yöntemlerin sonuçlarından çok

daha iyi deneysel sonuçlarla uyumluluk içerisinde olduğu Tablo 2 ve 3'den açıkça görülmektedir.

## 5. SONUÇ

YSA'ya dayanan bir yöntem elektriksel olarak ince ve kalın dikdörtgen mikroşerit antenlerin rezonans frekansını hesaplamak için sunulmuştur. YSA ağ

Tablo 2. Bu çalışmada kullanılan nöral modellerin ara kat nöron ve epok sayıları ve ölçülen rezonans frekansları ile nöral modeller kullanılarak hesaplanan rezonans frekansları arasındaki mutlak hatalar.

Nöral Modeller	Katlardaki Nöron Sayısı			Eğitim İçin Epok Sayısı	Eğitim Mutlak Hata (MHz)	Test Mutlak Hata (MHz)	Toplam Mutlak Hata (MHz)
	1.Kat	2.Kat	3.Kat				
LM	4	3	-	640	165	230	395
BFGS	6	5	-	1160	526	136	662
OD	5	4	-	290	177	378	555
ÖEG	12	7	-	4500	212	396	608
EGY	10	20	-	9000	265	400	665
TAS	7	7	-	5500	461	416	877
PB	10	7	-	3550	110	292	402
PR	10	7	-	3000	325	428	753
FR	18	10	-	1750	53	228	281
AGY	30	30	12	45000	484	350	834
MGY	35	30	8	35000	592	380	972

Tablo 3. Ölçülen rezonans frekansları ile literatürde mevcut klasik ve nöral yöntemler kullanılarak hesaplanan rezonans frekansları arasındaki mutlak hataların toplamı.

Klasik Yöntemler	[4]	[5]	[6]	[1]	[2]	[7]	[9]	[10]	[11]	[14]
Toplam Mutlak Hata (MHz)	36059	26908	1104916	19179	32930	23746	23761	19899	31436	108707
Nöral Yöntemler [20,23]	GDBD	GY	DBD	HY	YRA	GA				
Toplam Mutlak Hata (MHz)	667	751	806	1365	2692	2760				

yapılarından ÇKP'lerin eğitilmesinde LM, BFGS, OD, ÖEG, EGY, TAS, PB, PR, FR, AGY ve MGY algoritmaları kullanılmıştır. FR ile eğitilen ÇKP ağ yapısından en iyi sonuç elde edilmiştir. Bu çalışmada ve literatürde sunulan tüm nöral sonuçların, literatürde mevcut olan diğer klasik yöntemlerin sonuçlarından çok daha iyi deneysel sonuçlarla uyumluluk içinde olduğu gösterilmiştir. Nöral modellerin avantajları, kolaylıkla uygulanabilmeleri ve elde edilen sonuçların doğruluğudur

## KAYNAKLAR

- [1] Bahl I. J., Bhartia P., Microstrip Antennas, Artech House, Dedham, MA, 1980.
- [2] James J. R., Hall P. S., Wood, C., Microstrip Antennas-Theory and Design, Peter Peregrinus Ltd., London, 1981.
- [3] Garg R., Bhartia P., Bahl I. J., Ittipiboon A., Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Dedham, MA, 2000.
- [4] Howell J. Q., Microstrip Antennas, IEEE TRANS. ON ANTENNAS PROPAG., Vol. AP-23, pp. 90-93, January 1975.
- [5] Hammerstad E. O., Equations for Microstrip Circuits Design, PROC. FIFTH EUROPEAN MICROWAVE CONF., Hamburg, pp. 268-272, September 1975.
- [6] Carver K. R., Practical Analytical Techniques for the Microstrip Antenna, PROC. WORKSHOP ON PRINTED CIRCUIT ANTENNA TECHNOLOGY, New Mexico State University, Las Cruces, Vol. 7, pp. 1-20, October 1979.
- [7] Sengupta D. L., Approximate Expression for the Resonant Frequency of a Rectangular Patch Antenna, ELECTRONICS LETTERS, Vol. 19, pp. 834-835, 1983.
- [8] Chang E., Long S. A., Richards W. F., An Experimental Investigation of Electrically Thick Rectangular Microstrip Antennas, IEEE TRANS. ON ANTENNAS PROPAG., Vol. AP-34, pp. 767-772, 1986.
- [9] Garg R., Long S. A., Resonant Frequency of Electrically Thick Rectangular Microstrip Antennas, ELECTRONICS LETTERS, Vol. 23, pp. 1149-1151, 1987.
- [10] Chew W. C., Liu Q., Resonance Frequency of a Rectangular Microstrip Patch, IEEE TRANS. ON ANTENNAS PROPAG., Vol. AP-36, pp. 1045-1056, 1988.
- [11] Guney K., A New Edge Extension Expression for the Resonant Frequency of Electrically Thick Rectangular Microstrip Antennas, INT. JOURNAL OF ELECTRONICS, Vol. 75, pp. 767-770, 1993.
- [12] Guney K., Resonant Frequency of a Tunable Rectangular Microstrip Patch Antenna, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 7, pp. 581-585, 1994.
- [13] Kara M., The Resonant Frequency of Rectangular Microstrip Antenna Elements with Various

- Substrate Thicknesses, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 11, pp. 55-59, 1996.
- [14] Kara M., Closed-Form Expressions for the Resonant Frequency of Rectangular Microstrip Antenna Elements with Thick Substrates, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 12, pp. 131-136, 1996.
- [15] Haykin, S., Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, New York, 1994.
- [16] Zhang Q.J., Gupta K.C., Neural Networks for RF and Microwave Design, Artech House, Boston, MA, 2000.
- [17] Christodoulou C.G., Georgiopoulos, M., Application of Neural Networks in Electromagnetics, Artech House, MA, 2001.
- [18] Sağıroğlu, S., Güney K., Calculation of Resonant Frequency for an Equilateral Triangular Microstrip Antenna Using Artificial Neural Networks, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 14, No. 2, pp. 89-93, 1997.
- [19] Sağıroğlu, S., Güney K., Erler M., Resonant Frequency Calculation for Circular Microstrip Antennas Using Artificial Neural Networks, INT. J. OF RF AND MICROWAVE COMPUTER-AIDED ENGINEERING. Vol. 8, pp. 270-277, 1998.
- [20] Karaboğa D., Güney K., Sağıroğlu S., Erler M., Neural Computation of Resonant Frequency of Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas, IEE PROC. MICROW. ANTENNAS PROPAG., Vol. 146, No. 2, pp. 155-159, April 1999.
- [21] Sağıroğlu, S., Güney K., Erler M., Calculation of Bandwidth for Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas with the Use of Multilayered Perceptrons, INT. J. OF RF AND MICROWAVE COMPUTER-AIDED ENGINEERING, Vol. 9, pp. 277-286, 1999.
- [22] Güney, K., Erler M., Sağıroğlu S., Artificial Neural Networks for the Resonant Resistance Calculation of Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas, ELECTROMAGNETICS, Vol. 20, No. 5, pp. 387-400, 2000.
- [23] Güney K., Sağıroğlu Ş., Erler M., Comparison of Neural Networks for Resonant Frequency Computation of Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas, JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC WAVES AND APPLICATIONS (JEW A), Vol. 15, No. 8, pp. 1121-1145, 2001.
- [24] Levenberg K., A Method for the Solution of Certain Nonlinear Problems in Least Squares, QUART. APPL. MATH., Vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- [25] Marquardt D.W., An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, J. SOC. IND. APPL. MATH., Vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [26] Himmelblau D.M., Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, 1972.
- [27] MacKay D.J.C., Bayesian Interpolation, NEURAL COMPUTATION, Vol. 4, No. 3, pp. 415-447, 1992.
- [28] Fletcher R., Practical Methods of Optimization, John Wiley & Sons, 1987.
- [29] Anderson C., Learning and Problem Solving with Multilayer Connectionist Systems, Technical Report Coins TR 86-50, University of Massachusetts, Amherst, MA, 1986.
- [30] Battiti R., First and Second Order Methods for Learning: Between Steepest Descent and Newton's Method, NEURAL COMPUTATION, Vol. 4, pp. 141-166, 1992.
- [31] Powell M.J.D., Restart Procedures for the Conjugate Gradient Method, MATHEMATICAL PROGRAMMING, Vol. 12, pp. 241-254, 1977.
- [32] Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M., Neural Network Design, Boston PWS Publishing Company, 1996.
- [33] Fletcher R., Reeves C.M., Function Minimization by Conjugate Gradients, COMPUTER JOURNAL, Vol. 7, pp. 149-154, 1964.
- [34] Mathworks Inc., Matlab 5.3 Neural Network Toolbox, Users Guide, 5. Printing, Version 3, Mathworks Inc., 1998.