

ASILI VE TERS MİKROŞERİT HATLARIN KARAKTERİSTİK EMPEDANSLARININ HESAPLANMASINDA YENİ BİR YAKLAŞIM: YAPAY SİNİR AĞLARI

Celal YILDIZ¹ Şeref SAĞIROĞLU² Oytun SARAÇOĞLU³ Mustafa TÜRKMEN⁴

^{1,4}Elektronik Mühendisliği Bölümü

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

³Kayseri MYO Endüstriyel Elektronik Bölümü
Erciyes Üniversitesi, 38039, Melikgazi, Kayseri

¹e-posta: yildizc@erciyes.edu.tr, ²e-posta: ss@erciyes.edu.tr

³e-posta: saraco@erciyes.edu.tr, ⁴e-posta: turkmen@erciyes.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektromagnetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği, Asılı ve Ters Mikroşerit Hat, Yapay Sinir Ağları, Karakteristik Empedans.

ABSTRACT

In this work, a study based on artificial neural network (ANN) to compute the characteristic impedances of the suspended and inverted microstrip lines was successfully presented. Multilayered Perceptron (MLP) architecture was used and trained with Levenberg-Marquardt learning algorithm. Two MLPs have been used to compute the characteristic impedances of the inverted and suspended microstrip lines for different relative dielectric constants and geometries. When the results of Spectral Domain Approach were compared to the neural results presented in this work, the average absolute error percentages for suspended and inverted microstrip lines were 0.49% and 0.56%, respectively. The results were also compared with the other CAD model results available in the literature.

1. GİRİŞ

Asılı (suspended) mikroşerit ve ters (inverted) mikroşerit hatlar, mikrodalga ve milimetrik dalga uygulamaları için önemli iletim ortamları olup geleneksel mikroşerit hatlara göre daha düşük dispersiyon ve kayıplara sahiptirler [1]. Bu hatların uygulama açısından en önemli parametreleri karakteristik empedans ve onu belirleyen efektif dielektrik sabitidir. Bu ve buna benzer çok katmanlı mikroşerit hatların analizleri bir çok araştırmacı tarafından farklı metotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2-9]. Bu çalışmalarda çok az doğruluğa sahip karmaşık nümerik metotlar kullanılmış olup, asılı ve ters mikroşerit hatların efektif dielektrik sabitlerini hesaplamak için faydalı CAD modellerde ortaya konmuştur [10-13]. Bu modellerde şerit kalınlığı ihmal edilmiş açık yapıların dispersif olmayan (quasi-statik) analizleri yapılmıştır. Bu CAD modeller, uzun hesaplama süresi gerektiren, son derece karmaşık işlemler içeren ve güçlü bir teorik

bilgi birikimine ihtiyaç gösteren yaklaşımlar olup Schellenberg'in modeli [13] hariç çok doğru çözümler sunmamaktadırlar.

Bu çalışmada, literatürde mevcut olan dört CAD modelde elde edilen asılı ve ters mikroşerit hatta ilişkin efektif dielektrik sabitlerinin, yine bu tür yapıların karakteristik empedanslarının hesaplanmasını sağlayan ifadede [14] kullanılmaları ile yapıların karakteristik empedansları hesaplanabilir ve böylece sözü edilen bu modeller asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik empedanslarının hesaplanmasında kullanılırlar.

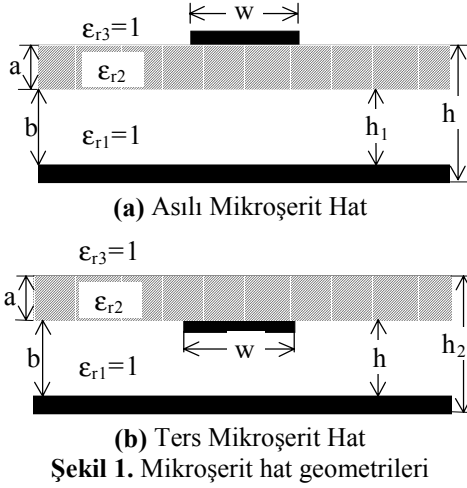
Yapay sinir ağları (YSA), probleme özel basit yapıları, öğrenme ve genelleme yapabilme kabiliyetleri, hızlı hesaplama, lineer olmayan farklı problemlere kolay çözümler sunabilmelerinden dolayı birçok mühendislik probleminin çözümünün yanı sıra, son yıllarda birçok mikrodalga ve elektromagnetik problemlerin çözümünde de sıkça kullanılmaktadır [15-18]. Bu çalışmada YSA'ların belirtilen cazip özelliklerinden faydalanılarak asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik empedanslarının hesaplanması gerçekleştirilmiş ve sonuçlar literatürde mevcut diğer CAD modelleri sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ASILI VE TERS MİKROŞERİT HATLAR İÇİN LİTERATÜRDE MEVCUT MODELLER

Asılı ve ters mikroşerit hatların geometrik yapıları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu yapıların efektif dielektrik sabitlerinin bulunmasına ilişkin olarak literatürde dört ayrı CAD model ortaya konmuştur [10-13].

Pramanick ve Bhartia (PB) tarafından önerilen ilk model [10] efektif dielektrik sabiti için $\ln(b/a)$ cinsinden oldukça basit ampirik bir ifade içerirken, Tomar ve Bhartia (TB) tarafından önerilen ikinci model ise [11], efektif dielektrik sabiti için w/b ve a/b cinsinden katsayıları eğri uydurma yöntemi ile

belirlenen polinom şeklinde bir ifade ortaya koyar. Svanica (SVAC) tarafından ortaya konan üçüncü model [12] ise Wheeler'in klasik Konform Dönüşüm Tekniğini [19] esas alan bir modeldir. Son olarak, Schellenberg (JMS) tarafından ortaya konan dördüncü CAD model [13] ise, Wheeler'in klasik Konform Dönüşüm Tekniğine dayanan Svanica'nın modelini esas alarak bir takım değişikliklerle geliştirilen bir modeldir.



Şekil 1. Mikroşerit hat geometrileri

Efektif dielektrik sabitleri için ortaya konan bu modeller bu tür yapıların karakteristik empedanslarının hesaplanması içinde literatürde mevcut olan aşağıdaki ifadenin kullanılması ile mümkün olabilir.

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

Burada Z ve ϵ_{eff} sırasıyla, asılı ve ters mikroşerit hattın karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini temsil ederken Z_0 ise Hammerstad ve Jensen [14] tarafından ortaya konan basit, $w/h < 1000$ için %0.03 doğruluğa sahip, hava ile dolu olan özdeş mikroşerit hattın karakteristik empedansını göstermekte olup

$$Z_0 = 60 \cdot \ln \left[\frac{f(u)}{u} + \sqrt{1 + \frac{4}{u^2}} \right] \quad (2)$$

ifadesi ile verilir. Burada

$$f(u) = 6 + (2\pi - 6) \cdot e^{-(30.666/u)^{0.7528}} \quad (3)$$

ve

$$u = w/h \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Fakat Şekil 1'den açıkça görüleceği gibi asılı mikroşerit hat için $h=a+b$ ve ters mikroşerit hat içinde $h=b$ olduğuna ve şerit kalınlıklarının ihmal edildiğine dikkat edilmelidir. Literatürde mevcut CAD modellerin doğrulukları hem asılı hem de ters mikroşerit hat için tam teorik sonuçlar ile karşılaştırılarak her iki hat için Tablo 1'de

verilmiştir. Bu modeller ile elde edilen asılı ve ters mikroşerit hatta ait karakteristik empedanslar, literatürde mevcut olan Spektral Domen yaklaşımı [20] ile elde edilen bu tür yapıların efektif dielektrik sabitlerinin (1) nolu denklemde kullanılması ile elde edilen karakteristik empedanslara ait tam teorik sonuçlar ile karşılaştırılarak bu modellerin doğrulukları incelenmiştir.

Bu tablolardan da açıkça görüleceği üzere hem asılı hem de ters mikroşerit hat için en doğru modelin Schellenberg'in modeli olduğu açıkça görülmektedir. Ancak karakteristik empedansların, efektif dielektrik sabitlerine bağlı olarak elde edilmeleri dikkate alındığında bu model ile efektif dielektrik sabitinin hesaplanmasının son derece karmaşık olduğu, uzun işlemlere ve hesaplama sürelerine ihtiyaç duyulduğu unutulmamalıdır.

3. ASILI VE TERS MİKROŞERİT HATLARIN KARAKTERİSTİK EMPEDANSLARININ YAPAY SİNİR AĞLARIYLA MODELLENMESİ

Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sistemini taklit ederek problemlerin zekice çözülebilmeye yardımcı olabilmek amacıyla oluşturulmuş sistemlerdir. YSA'lar bir çok işlemci elemandan oluşmuştur. Temel olarak bir işlemci elemanda, bir transfer fonksiyonu, bir toplama fonksiyonu, ağırlıklar ile giriş ve çıkışlar mevcuttur. Genel olarak bir YSA yapısı bir giriş, bir arakat ve bir çıkış katı olmak üzere üç kattan oluşur. Bu çalışmada, YSA'ya giriş olarak yapıların geometrik boyutları ve bağlı dielektrik sabitleri, çıkış olarak karakteristik empedanslar uygulanmıştır. YSA'ları eğitmek için bir çok öğrenme algoritması kullanılabilir [21,22]. Bu çalışmada Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması (LMA) kullanılmıştır [22-26]. Bu öğrenme algoritmasının seçilmesinin sebebi, hızlı öğrenme ve iyi yakınsayabilme özelliğidir. Temel olarak LMA, maksimum komşuluk fikri üzerine kurulmuş bir hesaplama metodu olup Gauss Newton ve Steepest-Descent algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşmuştur ve bu iki metodun kısıtlamalarını ortadan kaldırır [23,25]. Bu çalışmada, asılı ve ters mikroşerit hatların farklı geometrik boyutlar için karakteristik empedanslarını bulmada iki ayrı YSA ağ yapısı kullanılmıştır. İki ayrı YSA ağ modeli ile asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik empedanslarının farklı bağlı dielektrik sabitleri ve farklı geometrik boyutlar için hesaplanması gerçekleştirilmiştir.

Problemin YSA yaklaşımı ile çözümünde kullanılan modellerde 3 giriş ve 1 çıkış bulunur. Ara katmanda iki ara katlı bir yapı seçilmiştir. Giriş olarak yapıların geometrik boyutları ve bağlı dielektrik sabitleri, çıkış olarak ta karakteristik empedansları alınmıştır. Ağların eğitimlerinde 720'şer eğitim ve tam teorik sonuçlardan oluşan 72'şer adet test verisi kullanılmıştır.

Tablo 1. Asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik empedansları için yüzde hatalar

(a) Asılı mikroşerit hat

ϵ_{r2}	h_1/h	Metot	w/h=0.1	w/h=0.2	w/h=0.4	w/h=0.8	w/h=1.0	w/h=2.0	w/h=4.0	w/h=8.0	w/h=10	Ortalama Mutlak % Hatalar
3.78	0.2	PB	-16.80	-14.91	-13.55	-12.31	-11.92	-10.51	-8.51	-5.98	-5.11	9.84
		TB	0.80	0.29	-0.31	-0.56	-0.42	0.07	-53.71	57.43	53.92	18.60
		SVAC	2.50	2.34	1.52	-1.36	-3.37	2.17	0.41	-0.76	-1.02	1.71
		JMS	-0.06	-0.09	0.00	0.06	-0.01	0.15	0.04	0.07	0.11	0.06
		YSA	-0.58	0.27	0.45	0.24	0.01	0.45	0.81	-1.71	-0.47	0.55
3.78	0.5	PB	-3.48	-2.01	-1.10	-0.77	-0.74	-0.48	0.48	2.25	2.96	1.58
		TB	0.88	0.30	-0.10	-0.20	-0.14	0.26	0.37	4.66	10.38	1.92
		SVAC	6.18	6.07	5.37	3.45	2.38	4.33	1.48	-0.55	-1.02	3.42
		JMS	0.05	-0.01	0.10	0.03	-0.15	0.01	-0.02	0.04	0.08	0.05
		YSA	0.26	-0.10	0.14	0.24	-0.18	1.08	1.60	-0.62	0.51	0.52
3.78	0.8	PB	2.66	2.34	1.49	0.53	0.30	-0.05	0.25	1.21	1.63	1.16
		TB	3.44	1.89	0.63	0.09	0.10	0.47	0.68	0.49	1.27	1.00
		SVAC	7.76	7.00	5.67	3.82	3.08	3.05	0.53	-1.27	-1.70	3.76
		JMS	0.22	0.02	0.00	-0.11	-0.26	0.10	0.05	0.13	0.16	0.12
		YSA	1.01	0.15	-0.24	-0.49	-0.53	0.51	1.11	-0.70	0.49	0.58
12.9	0.2	PB	-21.67	-19.14	-17.28	-16.30	-16.18	-16.04	-15.37	-13.56	-12.75	16.47
		TB	5.50	4.62	3.88	3.37	3.29	4.21	16.07	61.63	75.04	19.73
		SVAC	14.53	-9.88	11.48	2.87	-3.01	12.25	6.11	1.70	0.67	6.94
		JMS	0.13	-0.06	0.07	0.16	0.03	0.43	-0.27	0.04	0.33	0.17
		YSA	-0.06	-0.57	-0.45	-0.08	-0.09	0.37	0.35	-0.64	1.08	0.41
12.9	0.5	PB	6.77	8.90	9.54	8.51	7.88	5.63	4.10	4.09	4.44	6.64
		TB	2.13	0.58	-0.43	-0.63	-0.52	0.28	0.99	4.26	9.45	2.14
		SVAC	28.14	27.41	25.09	19.80	17.08	18.52	10.21	4.03	2.53	16.97
		JMS	0.05	-0.13	0.11	0.10	-0.17	0.10	0.07	0.19	0.30	0.14
		YSA	0.21	-0.18	-0.08	0.10	0.06	0.43	0.12	-0.89	1.04	0.34
12.9	0.8	PB	17.63	16.29	13.75	10.51	9.45	6.48	4.44	3.77	3.85	9.57
		TB	4.49	1.93	0.23	-0.15	0.02	0.93	1.50	1.19	1.27	1.30
		SVAC	30.45	28.01	24.18	18.90	16.86	13.85	7.10	2.14	0.93	15.82
		JMS	-0.05	-0.21	0.11	0.28	0.08	0.14	-0.22	-0.21	-0.15	0.16
		YSA	0.14	-0.42	-0.70	-0.69	-0.62	0.37	0.44	-1.35	0.02	0.53

(b) Ters mikroşerit hat

ϵ_{r2}	h_2/h	Metot	w/h=0.1	w/h=0.2	w/h=0.4	w/h=0.8	w/h=1.0	w/h=2.0	w/h=4.0	w/h=8.0	w/h=10	Ortalama Mutlak % Hatalar
3.78	1.2	PB	3.45	2.98	1.99	0.86	0.54	-0.09	-0.02	0.90	1.38	1.36
		TB	0.48	-0.26	-0.49	-0.14	0.04	0.53	0.64	0.43	0.33	0.36
		SVAC	3.18	2.75	1.99	1.22	1.07	2.50	1.77	1.14	0.97	1.84
		JMS	0.36	0.16	0.01	0.20	0.38	-0.02	0.13	0.16	0.15	0.17
		YSA	-0.23	-1.07	-0.92	-0.45	-0.47	-0.12	0.49	0.83	0.92	0.61
3.78	2.0	PB	-5.74	-3.37	-1.43	-0.26	-0.10	-0.18	-0.26	0.95	1.72	1.56
		TB	0.83	0.13	-0.32	-0.39	-0.35	-0.11	0.21	0.35	0.27	0.33
		SVAC	-0.87	-0.95	-1.10	-1.27	-1.26	1.24	2.66	2.53	2.32	1.58
		JMS	0.12	0.01	-0.05	0.01	0.07	0.04	-0.23	-0.36	-0.36	0.14
		YSA	0.49	-0.18	0.08	0.55	0.36	-0.31	-0.72	-0.52	-0.12	0.37
3.78	5.0	PB	-10.19	-7.28	-4.58	-2.39	-1.87	-0.92	-0.85	-0.83	-0.61	3.28
		TB	1.86	1.05	0.25	-0.41	-0.54	-0.49	0.44	1.36	1.35	0.86
		SVAC	-2.83	-3.19	-3.61	-4.01	-4.05	-4.18	-2.18	0.43	1.04	2.84
		JMS	0.01	-0.01	-0.02	0.04	0.08	0.51	0.27	-0.22	-0.39	0.17
		YSA	0.32	-0.29	-0.18	0.42	0.32	0.03	-0.04	-0.46	-0.68	0.30
12.9	1.2	PB	2.02	2.00	1.27	0.19	-0.13	-0.70	-0.06	2.53	3.86	1.42
		TB	4.13	1.58	-0.02	-0.27	-0.07	0.86	1.45	1.24	0.99	1.18
		SVAC	19.26	18.31	16.38	13.75	12.91	12.90	9.01	5.67	4.79	12.55
		JMS	0.34	0.18	0.07	0.07	-0.10	-0.06	0.17	0.19	0.16	0.15
		YSA	-1.03	-1.72	-2.01	-2.19	-2.24	-1.66	-0.98	1.00	0.67	1.50
12.9	2.0	PB	-13.37	-9.94	-6.91	-4.71	-4.25	-3.43	-2.26	1.71	3.97	5.61
		TB	3.88	1.81	0.18	-0.69	-0.79	-0.58	0.24	1.00	1.06	1.14
		SVAC	4.09	4.74	5.39	6.07	6.39	12.77	14.74	11.87	10.57	8.51
		JMS	0.19	-0.04	-6.91	0.13	0.01	-0.20	-0.21	-0.07	-0.02	0.86
		YSA	0.54	0.17	0.21	0.23	0.12	0.05	-0.97	-0.01	0.77	0.34
12.9	5.0	PB	-17.28	-13.28	-9.43	-6.19	-5.38	-3.78	-3.36	-2.67	-1.97	7.03
		TB	5.79	4.16	2.77	1.90	1.78	1.97	2.86	3.90	4.21	3.26
		SVAC	-7.93	-8.64	-9.38	-9.90	-9.85	-12.15	-3.40	6.84	8.70	8.53
		JMS	-0.50	-0.43	-0.20	-0.03	-0.22	0.37	0.17	-0.29	-0.44	0.29
		YSA	-0.21	-0.46	-0.46	-0.21	-0.14	0.62	-0.49	-1.43	-0.27	0.48

Elde edilen sonuçlar ile literatürde mevcut olan diğer dört CAD modellerin tam teorik sonuçlara göre yüzde ve ortalama mutlak yüzde hataları Tablo 1’de asılı ve ters mikroşerit hatlar için ayrı ayrı verilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada YSA’ların belirtilen üstünlükleri asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik empedanslarının elde edilmesinde başarı ile uygulanmıştır.

Mümkün olan tüm tasarımlar için elde edilen YSA sonucu ile diğer CAD modelleri PB, TB, SVAC ve JMS sonuçları literatürde mevcut tam teorik sonuçlara göre karşılaştırıldığında, asılı mikroşerit hat için ortalama mutlak yüzde hataları sırasıyla 0.49, 7.54, 7.44, 8.10 ve 0.12 iken, ters mikroşerit hat için 0.56, 3.37, 1.19, 5.97 ve 0.30 olarak elde edilmiştir. YSA sonucunun JMS sonucuna olan yakınlığı açıkça görülmektedir. Bu sonuçlardan da açıkça görüleceği üzere hem asılı hem de ters mikroşerit hat için en doğru modelin Schellenberg’in modeli (JMS) olduğu açıkça görülse de karakteristik empedansların, efektif dielektrik sabitlerine bağlı olarak elde edilmeleri dikkate alındığında bu model ile efektif dielektrik sabitinin hesaplanmasının son derece karmaşık olduğu, uzun işlemlere ve hesaplama sürelerine ihtiyaç duyulduğu unutulmamalıdır.

Sunulan model ile mikroşerit hatların modellenmesi ile, kısa sürede sonuca ulaşılabilen, derin bir teorik bilgi gereksinimine ihtiyaç duyulmamakta, basit YSA yapıları ile modelleme gerçekleştirilebilmekte ve en önemlisi kabul edilebilir hata seviyelerinde çözüm sunabilmektedir. Bu cazip özellikler, mikroşerit hatların modellenmesinde YSA’ları güçlü bir alternatif olarak kullanılabileceğini gösteren en belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Spielman B.E., Dissipation loss effect in isolated and coupled transmission lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-25, pp. 648-656, 1977.
- [2] Yamashita E., Variational method for the analysis of microstrip like transmission lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-16, pp. 529-535, 1968.
- [3] Mitra R., and Itoh T., Charge and potential distributions in shielded striplines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-18, pp. 149-156, 1970.
- [4] Yamashita E and Atsuki K., Strip line with rectangular outer conductor and three dielectric layers, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-18, pp. 238-244, 1970.
- [5] Crampagne R., Ahmadpanah M., and Guiraud L., A simple method for determining the Green’s function for a large class of MIC lines having multilayered dielectric structures, IEEE TRANS. MICROWAVE

- THEORY TECH., vol.MTT-26, pp. 82-87, 1978.
- [6] Jansen R. H., Unified user-oriented computation of shielded, covered and open planar microstrip and millimeter-wave transmission line characteristics, IEEE TRANS. MICROWAVE OPT. ACOUSTICS, vol.3, pp.14-22, 1979.
- [7] Koul S. K. and Bhat B., Inverted microstrip and suspended microstrip with anisotropic substrates, Proc. IEEE, vol. 70, pp. 1230-1231, 1982.
- [8] Medina F. and Horno M., Determination of Green’s function matrix form multiconductor and anisotropic multidielectric planar transmission lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-33, pp. 933-940, 1985.
- [9] Kuo J.T. and Tzuang K.C., Complex modes in shielded suspended coupled microstrip lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-38, pp. 1278-1286, 1990.
- [10] Pramanick P. and Bhartia P., Computer-aided design for millimeter wave finlines and suspended substrate microstrip lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-33, pp. 1429-1434, 1985.
- [11] Tomar R.S. and Bhartia P., New quasi-static models for computer aided design of suspended and inverted microstrip lines, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-35, pp. 453-457, 1987.
- [12] Svanica J., Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-40, pp. 769-772, 1992.
- [13] Schellenberg J.M., CAD Models for suspended and inverted microstrip, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-43, pp. 1247-1252, 1995.
- [14] Hammerstad E., and Jensen O., Accurate models for microstrip computer-aided design, IEEE INT. MICROWAVE SYM. DIG., May 1980, pp. 407-409.
- [15] Watson D.M. and Gupta K.C., Design and optimization of CPW circuits using EM-ANN Models for CPW components, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-45, pp. 2515-2523, 1997.
- [16] Wang F., Devabhaktuni V.K. and Zhang Q.J., A hierarchical neural network approach to the development of a library of neural models for microwave design, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-46, pp. 2391-2403, 1998.
- [17] Sagiroglu S., Güney K. and Erler M., Resonant frequency calculation for circular microstrip antennas using artificial neural

- networks, INT. J. RF.MICROW.C.E., vol.8, pp. 270-277, 1998.
- [18] Günel T., Combination of artificial neural network model with genetic algorithm for the synthesis of microstrip radial stub, AEÜ. INT.JOUR. ELEC. COM., vol.54, pp. 241-243, 2000.
- [19] Wheeler H.A., Transmission line properties of parallel wide strips by a conformal mapping approximation, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-12, pp. 280-289, 1969.
- [20] Jansen R. H., The spectral domain approach for microwave integrated circuits, IEEE TRANS. MICROWAVE THEORY TECH., vol.MTT-33, pp. 1043-1056, 1985.
- [21] Haykin S., Neural Networks: A Comprehensive Foundation. ISBN 0-02-352761-7, MACMILLAN COLLEGE PUBLISHING COMPANY, New York, USA, 1994
- [22] Pham D.T. and Sagirolu S., Three methods of training multi-layer perceptrons to model a robot sensor, INT. J. of ROBOTICA, vol.13, pp. 531-538, 1995.
- [23] Levenberg, K, A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares, QUART. APPL. MATH., vol.2, pp. 164-168, 1944.
- [24] Sagirolu S., Levenberg-Marquardt metodunun bir robot sensörün yapay sinir ağı modellenmesinde kullanılması, TAINN'96 İstanbul, sf. 323-328, 27-28 Haziran 1996.
- [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] Bulsari, A. B. and Saxen, H., A feedforward artificial neural network for system identification of a chemical process, J. SYST. ENG., vol.1, Iss.1, pp. 1-9, 1991.