



Review Paper / Derleme Makalesi

DESIGN AND FABRICATION OF E-SHAPED COMPACT MICROSTRIP ANTENNA

Abdurrahim TOKTAŞ¹, Ali AKDAĞLI^{*2}

¹Mersin Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Yenişehir-MERSİN

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yenişehir-MERSİN

Received/Geliş: 19.09.2011 Accepted/Kabul: 25.11.2011

ABSTRACT

In this work, the design and the fabrication of E-shaped compact microstrip antennas (ECMAs) are carried out. ECMAs having different size are simulated by packed software IE3D™ based on method of moment (MoM) and the effects of the antennas' loaded slots on the resonant frequency and the bandwidth are investigated. As slots area is increased, a decrease on the resonant frequency is observed. It was seen that the slots width is more effective than the slots length for the reduction of the resonant frequency. In order to verify the results obtained in this work, an ECMA operated at 2.4 GHz is fabricated by using material of Rogers RT/duroid 5870. It was observed that the patch size of ECMA is 61% smaller than rectangular microstrip antenna; however the bandwidth reduces from 32.2 MHz to 10.1 MHz for a given resonant frequency. Return loss and radiation patterns of simulated and fabricated ECMAs are given comparatively.

Keywords: Microstrip antenna, E-shaped compact microstrip antenna, resonant frequency, bandwidth.

E ŞEKİLLİ KOMPAKT MİKROŞERİT ANTENİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, E şekilli kompakt mikroşerit antenlerin (EKMA) tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Farklı boyutlara sahip antenlerin simülasyonları MoM'a (Method of Moment) dayanan IE3D™ paket yazılımı ile yapılarak antenlerde açılan boşluk alanının rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Boşluk alanı artırıldıkça rezonans frekansının ve bant genişliğinin azaldığı görülmüştür. Rezonans frekansının düşmesinde, boşluk eninin boşluk boyundan daha etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçları doğrulamak için Rogers RT/duroid 5870 malzemesi kullanılarak 2.4 GHz frekansında çalışan bir EKMA gerçekleştirilmiştir. EKMA'nın yama boyutlarının aynı rezonans frekansında çalışan dikdörtgen mikroşerit antene göre % 61 daha küçük olduğu, buna karşın bant genişliğinin 32.2 MHz'den 10.1 MHz'e düştüğü gözlenmiştir. Simülasyonu yapılan ve gerçekleştirilen EKMA'ların geriye dönme kaybı (return loss) grafikleri ve ışınma diyagramları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Mikroşerit anten, E şekilli kompakt mikroşerit anten, rezonans frekansı, bant genişliği.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: akdagli@mersin.edu.tr, tel: (324) 361 00 01/7056

1. GİRİŞ

Evrensel mobil iletişim sistemi (Global system for mobile - GSM), dijital kablosuz telefon (Digital enhanced cordless telephone - DECT), geniş bant uzun mesafe internet erişimi (Worldwide interoperability for microwave Access - WIMAX), kablosuz yerel ağ (Wireless local area network - WLAN), evrensel konum sistemleri (Global positioning system - GPS) ve diğer küçültülmüş yeni nesil kişisel iletişim sistemlerinde (Personal communication systems - PCS) küçük antenlerin kullanımı önem taşımaktadır. Mikroserit antenler (MA) küçük boyut, hafiflik, düşük maliyet, üretim basitliği ve entegre devrelere kolay yerleşimi gibi özelliklerinden dolayı özellikle kablosuz iletişimde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. MA'lar bu avantajların yanında, düşük kazanç, düşük güçte çalışma ve dar bant genişliği gibi dezavantajlara da sahiptir [1-3]. MA'lar üzerinde yapılan çalışmaların çoğu, analiz ve tasarım kolaylığı bakımından dikdörtgen, üçgen ve daire gibi düzgün şekilli antenler üzerinde yoğunlaşmıştır [1-3]. Düzgün geometrilere sahip MA'ların boyutları UHF bandında çalışması için nispeten büyüktür, bu yüzden modifiye edilmesi gerekmektedir. MA'ların iletken yama (patch) veya toprak düzleminde boşluk açma (slot loading) [4] ve kısa devre pin (shorting pin) [5] gibi çeşitli modifikasyonlar yapmak suretiyle daha düşük çalışma (rezonans) frekansı elde edilebilmektedir ve küçültülmüş bu antenlere kompakt MA (KMA) denilmektedir. Rezonans frekansını düşürmek amacıyla iletken yamada boşluk açma yöntemi kullanılarak elde edilen C, E, L ve H gibi şekillere sahip KMA içeren çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur [6-11]. Bu geometrilere sahip KMA'larda, dikdörtgen MA'nın (DMA) ışına yapmayan kenar(lar)ında (baskın mod için) oluşturulan girintilerin etkisiyle (slot loading) antenin etkin uzunluğu artmakta, böylece rezonans frekansı azalmaktadır.

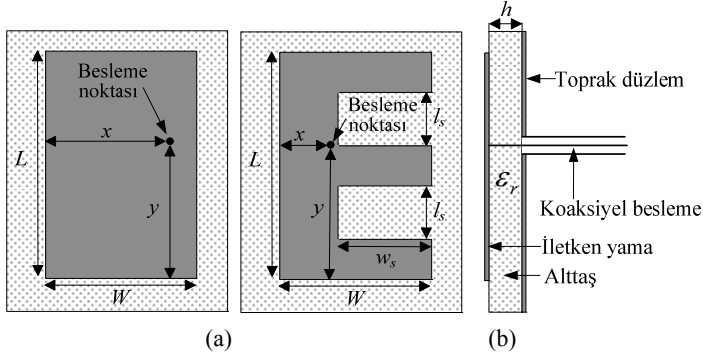
Düzgün şekilli MA'ların analizinde boşluk modeli (cavity model) [12] ve iletim hattı modeli (transmission line model) [13] gibi teknikler kullanılmaktadır. Ancak, düzgün olmayan şekillerinden dolayı KMA'ların analizi bu teknikler kullanılarak yapılması oldukça zordur. Bunun yerine, genellikle KMA'ların analiz ve tasarımında simülasyon yöntemlerinden faydalanılmaktadır. FDTD (finite difference time domain) [14] veya MoM (method of moment) [15] gibi matematiksel ileri sayısal teknikleri içeren elektromanyetik yöntemleri kullanan simülasyon araçları kullanılmaktadır.

E şekilli KMA (EKMA) dikdörtgen şekilli iletken yamanın ışına yapmayan kenarında iki simetrik boşluğun açılmasıyla elde edilir. E şekilli KMA ile ilgili ilk çalışma 2000 yılında Ooi ve Shen tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 4.5 GHz frekansı civarında çalışan bir anten tasarlanmış ve daha büyük bant genişliği elde etmek için anten yapısında bazı değişiklikler de yapılmıştır [16]. Daha sonra, kablosuz iletişimde kullanılabilen 1.9 ile 2.4 GHz frekans aralığında çalışan genişbant bir anten tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir [17]. 2003 yılında bir EKMA modifiye edilerek bant genişliğinin iyileştirilmesi yöntemi sunulmuştur [18]. Daha sonra, 5-6 GHz bandında çalışan mikroserit beslemeli bir anten tasarlanarak parametreleri araştırılmıştır [19]. 900 MHz frekansında çalışan alttaşı yükseltilmiş EKMA, 2005 yılında tasarlanmış ve çeşitli parametreleri araştırılmıştır [20]. 2010 yılında WLAN 802.11 b/g uygulamasına uyumlu dairesel kutuplu, modifiye edilmiş EKMA üzerinde çalışılmıştır [21]. Literatürde sunulan çalışmalarda, genellikle küçük boyutlu yüksek frekanslarda (>UHF) çalışan antenler veya büyük boyutlu düşük frekanslarda (UHF) çalışan antenler sunulmuştur. Literatürde önerilen anten yapılarının karşılıklı avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte, küçük boyutlu ve 3G, WIMAX, WLAN gibi kablosuz iletişim uygulamalarına yönelik çalışmalar azdır [1-3].

Sunulan çalışmada, boyutları küçültülmüş ve boşluk açma yöntemi kullanılarak oluşturulmuş EKMA'ların boşluk boyutlarının rezonans frekansı ve bant genişliği parametreleri üzerindeki etkileri MoM'a dayanan bir elektromanyetik analiz yazılımı olan IE3D™ [22] kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca, 2.4 GHz frekansında çalışan bir EKMA tasarlanmış ve Rogers RT/duroid 5870 malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu antenlerin geriye dönme kaybı (s_{11} : return loss) ve ışına diyagramları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

2. E ŞEKLİ KOMPAKT MİKROŞERİT ANTEN

EKMA, Şekil 1(a)'da verilen boyutları $L \times W$ olan dikdörtgen şekilli iletken yamanın uzun kenarların birinde, $l_s \times w_s$ boyutlarında eşit ve merkeze göre simetrik iki boşluğun açılmasıyla elde edilen E şekilli yamanın, toprak düzlem üzerinde bulunan h yüksekliğindeki ϵ_r dielektrik sabitine sahip alttaş malzemenin üzerine yerleştirilmesiyle Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi elde edilmiştir [7, 9].



Şekil 1. (a) DMA ve (b) EKMA geometrileri

EKMA, DMA'dan türetildiği için DMA'nın ilk rezonans frekansı (baskın mod) için kullanılan aşağıdaki ifade EKMA'nın rezonans frekansında da kullanılabilir [1-3].

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

burada, L_{eff} etkin rezonans uzunluğunu ve c ışık hızını belirtmektedir. Eşitlik (1)'den görüldüğü gibi EKMA'da rezonans frekansı antenin etkin uzunluğu ve dielektrik sabitine bağlıdır ve antenin etkin uzunluğunun artması (L_{eff}), rezonans frekansını düşürmektedir.

EKMA'da açılan boşlukların rezonans frekansı ve bant genişliği parametreleri üzerindeki etkileri simülasyonlar yapılarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Çizelge 1'de fiziksel ve elektriksel parametreleri verilen antenlerin simülasyonları IE3D™ yazılımı ile yapılmıştır. Simülasyonlarda, koaksiyel beslemeli dalga kaynağı kullanılmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmalarında, DMA'da açılan boşlukların etkisiyle rezonans uzunluğu arttığı ve buna bağlı olarak rezonans frekansında azalma meydana geldiği görülmüştür. İletken yamada açılan boşluk alanının, antenin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi gözlenmiştir. EKMA'ların boşluk boyutları, rezonans frekans değerleri, Eşitlik (2)'de verilen boşluk alanının yama alanına oranı (BAYAO) ve DMA'ya göre rezonans frekansındaki düşüş oranı (RFDO) Çizelge 1'de verilmiştir. Boşluk alanının yama alanına oranındaki artış rezonans frekansının düşmesine sebep olmuş, bununla beraber, boşluk alanının artması rezonans frekansını doğrusal olarak düşürmediği Çizelge 1'den görülmektedir. Boşluk alanı arttıkça rezonans frekansını düşürmedeki etkisi azalmaktadır.

Çizelge 1. EKMA'nın simülasyon sonuçları

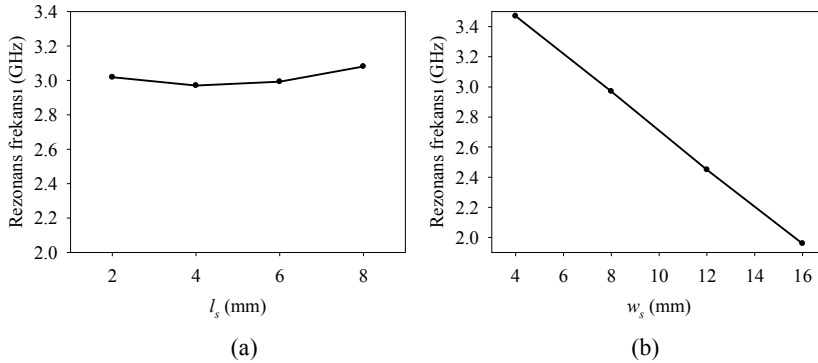
Anten numarası	Boşluk boyutları (mm)		Besleme noktası		Rezonans frekansı (GHz)	Boşluk Alanı (mm ²)	BAYAO (%)	RFDO (%)	Bant genişliği (MHz)
	l_s	w_s	x	y					
1	0	0	17.64	16.63	3.759	0	0	0	78.5
2	2	4	10.77	15.30	3.500	16	3.2	6.6	49.5
3	2	8	11.40	15.52	3.019	32	6.4	19.1	—
4	2	12	3.22	14.25	2.484	48	9.6	33.9	2.2
5	2	16	2.95	14.17	2.001	64	12.8	46.8	11.2
6	3	6	12.70	14.60	3.250	36	7.2	13.6	23.8
7	4	4	12.65	14.80	3.470	32	6.4	7.6	35.1
8	4	8	4.75	14.85	2.970	64	12.8	20.9	22.0
9	4	12	6.25	14.27	2.450	96	19.2	34.8	14.5
10	4	16	2.82	13.97	1.959	128	25.6	47.9	15.2
11	5	10	8.00	14.57	2.711	100	20.0	27.9	15.0
12	6	4	6.40	15.30	3.490	48	9.6	6.9	46.0
13	6	8	6.62	14.90	2.993	96	19.2	20.0	23.2
14	6	12	5.75	14.25	2.472	144	28.8	34.1	—
15	6	16	3.00	14.67	1.970	192	38.4	47.6	—
16	7	14	5.40	14.25	2.259	196	39.2	39.9	7.9
17	8	4	6.25	15.70	3.524	64	12.8	6.2	48.9
18	8	8	6.60	14.90	3.081	128	25.6	18.1	23.6
19	8	12	4.75	14.20	2.559	192	38.4	31.9	14.3
20	8	16	2.30	14.15	2.041	256	51.2	45.7	—

$L=25$, $W=20$, $h=1.575$ mm, $\epsilon_r=2.33$, $\tan\delta=0.0012$, (—): s_{11} (dB) > -10

BAYO: Boşluk alanının yama alanına oranı; RFDO: Rezonans frekansındaki düşüş oranı

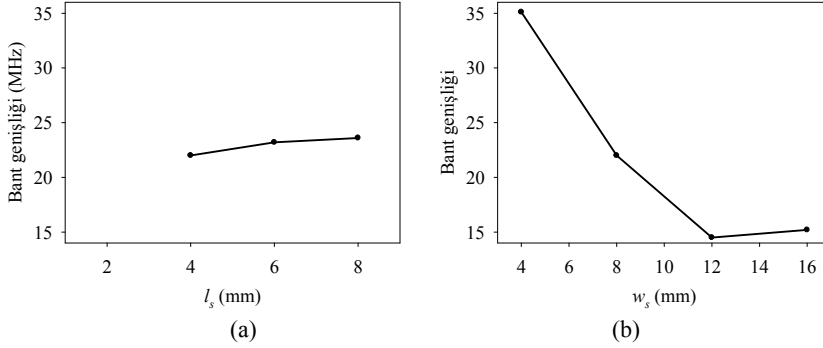
$$BAYAO (\%) = 100 \times \frac{2 \times l_s \times w_s}{L \times W} \quad (2)$$

EKMA'nın boşluk boyu l_s ve eni w_s 'nin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3b'de $l_s = 2$ mm için bant genişliği değeri, daha önce bahsedildiği gibi s_{11} (dB) > -10 olduğundan alınmamıştır. Boşluk boyu l_s değişiminin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerinde çok az etkili olduğu, buna karşın boşluk eni w_s değişiminin bu parametreler üzerinde daha fazla etkili olduğu Şekil 2 ve 3'den görülmektedir. Genel olarak, boşluk boyu l_s değişimi rezonans frekansı ve bant genişliğini çok az değiştirdiği ancak boşluk eninin w_s artması rezonans frekansını ve bant genişliğini etkin olarak düşürdüğü gözlenmiştir. Bu nedenle, rezonans frekansının belirlenmesinde boşluk eninin (w_s) etkin olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. (a) Boşluk boyu l_s 'nin rezonans frekansı üzerindeki etkisi ($w_s = 8$ mm).

(b) Boşluk boyu w_s 'nin rezonans frekansı üzerindeki etkisi ($l_s = 4$ mm).



Şekil 3. (a) Boşluk boyu l_s 'nin bant genişliği üzerindeki etkisi ($w_s = 8$ mm).
(b) Boşluk boyu w_s 'nin bant genişliği üzerindeki etkisi ($l_s = 4$ mm).

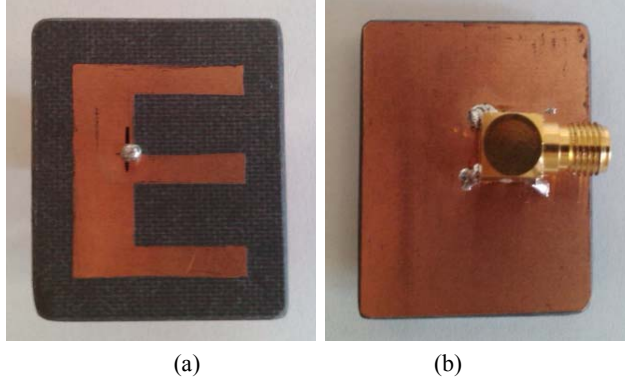
3. E ŞEKLİ MİKROŞERİT ANTENİN TASARLANMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Çizelge 2'de parametreleri verilen bir EKMA ve bir DMA, IE3D™ yazılımı [22] aracılığıyla 2.4 GHz frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan EKMA, daha sonra Rogers™ RT/duroid 5870 malzemesi kullanılarak Şekil 4'de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda s_{11} (dB) < -12 amaç fonksiyonunu kullanarak optimizasyon sonucunda gerçekleştirilen EKMA'nın besleme noktası $x=6.45$ ve $y=14.23$ olarak elde edilmiştir. Şekil 5'te verilen antenin geriye dönme kaybı grafiği (s_{11}), Agilent E5071B ENA Series RF network analizör ile ölçülmüştür. Simülasyon ve ölçüm ile elde edilen geriye dönme kaybı uyum içinde olmakla birlikte, antende kullanılan malzemenin parametrelerindeki olası üretim kaynaklı hatalardan, antenin gerçekleştirilmesinde kullanılan alet ve cihazların yeterince hassas olmamasından ve simülasyon yazılımdaki hesaplama hatalarından dolayı rezonans frekansında % 0.3 gibi bir kayma meydana gelmiştir.

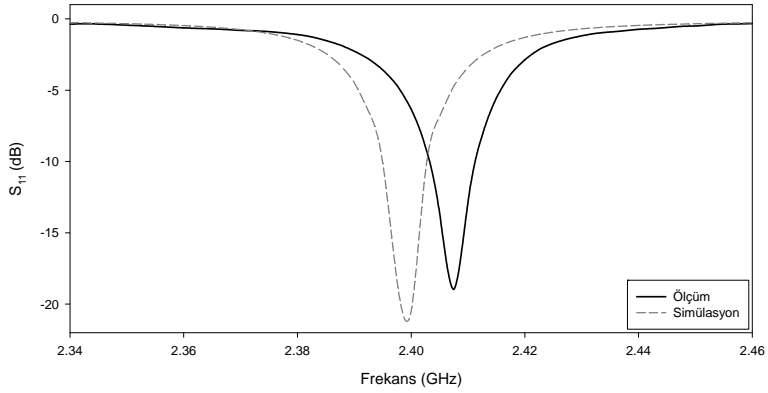
Çizelge 2. Gerçekleştirilen EKMA'nın simülasyon ve ölçüm sonuçları

	Yama boyutları (mm)				Besleme noktası		Rezonans frekansı (GHz)		Bant genişliği (MHz)	
	L	W	l_s	w_s	x	y	Sim.	Ölç.	Sim.	Ölç.
EKMA	25.00	20.00	7.47	13.03	6.45	14.23	2.400	2.407	10.1	9.8
DMA	39.85	32.35	—	—	31.07	26.3	2.400	—	32.2	—

$h=1.575$ mm, $\epsilon_r=2.33$, $\tan\delta=0.0012$

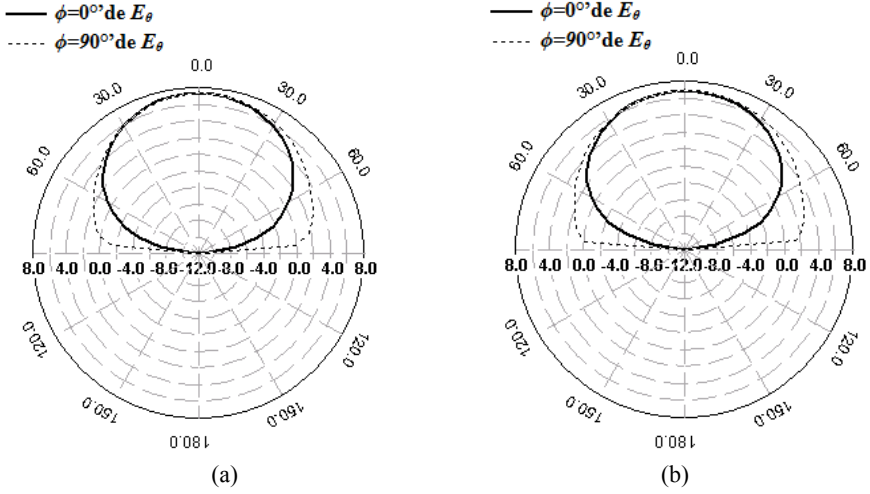


Şekil 4. Gerçekleştirilen EKMA'nın (a) ön yüzü ve (b) arka yüzü fotoğrafları

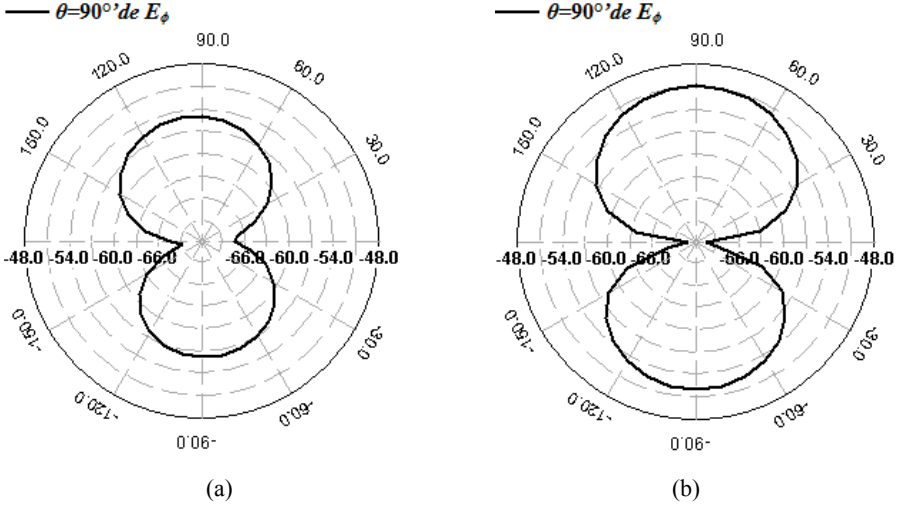


Şekil 5. Gerçekleştirilen EKMA'ya ait geriye dönme kaybı grafiği

Çizelge 2'de verilen EKMA ve aynı boyutlara ($L=25$ mm, $W=20$ mm, $h=1.575$ mm) sahip bir DMA, IE3D™ programı aracılığıyla simülasyonu yapılmış ve elde edilen ışın diyagramları ve Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Işıma diyagramları: (a) 3.759 GHz için DMA ($L=25$ mm, $W=20$ mm, $h=1.575$ mm), (b) 2.4 GHz için EKMA ($L=25$ mm, $W=20$ mm, $l_s=7.47$ mm, $w_s=13.3$ mm, $h=1.575$ mm).



Şekil 7. Işıma diyagramları: (a) 3.759 GHz için DMA ($L=25$ mm, $W=20$ mm, $h=1.575$ mm), (b) 2.4 GHz için EKMA ($L=25$ mm, $W=20$ mm, $l_s=7.47$ mm, $w_s=13.3$ mm, $h=1.575$ mm).

Şekil 6 ve Şekil 7’de verilen simülasyon sonuçlarında, maksimum kazanç, $\phi = 90^\circ$ ’da DMA için 7.33 iken EKMA için 6.88 olarak; yarı güç huzme genişliği (half power beam width) DMA için 109.36° iken EKMA için 118.72° olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ışıma diyagramı ve yönlülüğünün ön plana çıktığı uygulamalarda DMA kullanmak yerine daha küçük boyutlu bir EKMA’nın kullanılabileceğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, E şekilli kompakt mikroşerit antenlerde açılan boşlukların rezonans frekansı ve bant genişliği parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, 2.4 GHz’de çalışan bir EKMA ve bir DMA IE3D™ yazılımı aracılığıyla tasarlanmış ve ışına diyagramları karşılaştırılmıştır. Tasarlanan EKMA gerçekleştirilerek geriye dönme kaybı ölçülmüştür. Simülasyonlarda, DMA ve EKMA’nın huzme genişliği ve kazanç değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. EKMA’lardaki boşluk alanı arttıkça rezonans frekansı ve bant genişliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, boşluk eni değişiminin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkisi, boşluk boyu değişiminden daha etkin olduğu ve bu sayede rezonans frekansının ayarlanabileceği gösterilmiştir. EKMA’nın boyutları aynı frekansında çalışan bir DMA’ya göre % 61 daha küçük olduğu görülmüştür. Böylece, boşluk açma yönteminin MA’ların küçültmesinde etkin olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada, EKMA’ların küçük boyutlu anten gereksiniminin olduğu ve bant genişliği ihtiyacının az olduğu uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiştir. İleriki çalışmalarda kısa devre pin, çift katmanlı alttaş kullanımı ve farklı besleme teknikleri gibi yöntemler kullanılarak EKMA’ların bant genişliğinin artırılması planlanmaktadır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Kumar G., Ray K.P., “Broadband Microstrip Antennas”, Artech House, USA, 2003.
- [2] Wong, K. L., “Compact and Broadband Microstrip Antennas”, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [3] Garg R., Bhartia P, Bahl I, Ittipiboon A, “Microstrip Antenna Design Handbook”, Artech House, London, 2001.
- [4] Dobost G., Rabbaa A., “Analysis of a slot microstrip antenna”, IEEE Trans Antennas Propagat, 34, 155 – 163, 1986.
- [5] Pan S. C., Wong K. L., “Dual-frequency triangular microstrip antenna with a shorting pin”, IEEE Trans Antennas Propagat, 45, 1889 – 1891, 1997.
- [6] Deshmukh A. A., Kumar G., “Compact broadband gap-coupled shorted L-shaped microstrip antennas,” Microwave Opt Technol Lett, 47, 599-605, 2005.
- [7] Neog D. K., Pattnaik S. S., Panda D. C., Devi S., Dutta M., Bajpai O. P., “New expression for the resonance frequency of an E-shaped microstrip patch antenna”, Microwave Opt Technol Lett, 48, 8, 1561-1563, 2006.
- [8] Deshmukh A., Kumar G., “Formulation of resonant frequency for compact rectangular microstrip antennas,” Microwave Opt Technol Lett. 49, 498-501, 2007.
- [9] Neog D. K., Devi R., “Determination of resonant frequency of slot-loaded rectangular microstrip patch antennas”, Microwave Opt Technol Lett, 52, 2, 446-448, 2010.
- [10] Akdagli, A., Toktas A., “A novel expression in calculating resonant frequency of H-shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm,” Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 24, 2049-4061, 2010.
- [11] Toktas, A., Akdagli, A., Bicer, M. B., Kayabasi, A., “Simple formulas for calculating resonant frequencies of C and H shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm”, J Electromagnet Wave, 25, 2011; 1718-1729.
- [12] Richards, W. F., Lo Y. T., Harrisson D. D., “An improved theory for microstrip antennas and applications,” IEEE Trans Antennas Propag, 29, 38-46, 1981.
- [13] Bhattacharyya K., Garg R., “A Generalized transmission line model for microstrip patches”, IEEE Proc. Microwave Antennas Propag, 132, 93-98, 1985.
- [14] Taflove, A., “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time Domain Method”, Artech House, Boston, 1995.
- [15] Harrington, R. F., “Field Computation by Moment Methods”, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1993.

- [16] Ooi B. L, Shen Q., “A novel E-shaped broadband microstrip patch antenna”, *Microwave Opt Technol Lett*, 27, 5, 348-352, 2000.
- [17] Yang F., Zhang X. X., Ye X., Rahmat-Samii Y., “Wide-band E-shaped patch antennas for wireless communications”, *IEEE Trans Antennas Propag*, 49, 1094-1110, 2001.
- [18] Yu A., Zhang X., “A method to enhance the bandwidth of microstrip antennas using a modified E-shaped patch”, *Radio and Wireless Conference, Rawcon 03*, 261-264, 2003.
- [19] Ge Y., Essele K. P., Bird T. S., “E-shaped patch antennas for high-speed wireless network”, *IEEE Trans Antennas Propag*, 52, 3213-3219, 2004.
- [20] Deshmukh A. A., Kumar G., “Compact broadband E-shaped microstrip antennas”, *Electronics Letters*, 41, 18, 2005.
- [21] Khidre A., Lee K. F., Yang F., Elsherbeni A., “Wideband Circularly Polarized E-shaped Patch Antenna for Wireless Application”, *IEEE Trans Antennas Propag*, 52, 5, 219-229, 2010.
- [22] IE3D™, version 14, Menthor Graphics Corporation, Mentor Graphics Corporation, Boeckman Road Wilsonville, OR 97070.
- [23] Holland J. H., “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.