

PAPER DETAILS

TITLE: Kivrimli Serit Elemanlarini Temel Alan Frekansi Ayarlanabilir Düzlemsel Evrilmiş-F Anten Tasarimi

AUTHORS: Burçin Ramazan,Ahmet Rifat Görgün,Siddik Cumhuri Basaran

PAGES: 309-317

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2735858>



Araştırma Makalesi - Research Article

Kıvrımlı Şerit Elemanlarını Temel Alan Frekansı Ayarlanabilir Düzlemsel Evrilmiş-F Anten Tasarımı

Frequency Tunable PIFA Design Based on Meander Line Elements

Burçin Ramazan¹, Ahmet Rıfat Görgün², Sıddık Cumhuri Başaran^{3*}

Geliş / Received: 31/10/2022

Revize / Revised: 13/03/2023

Kabul / Accepted: 26/04/2023

ÖZ

Bu çalışmada, WLAN ve WiMAX uygulamaları için elektriksel olarak frekansı ayarlanabilir yeni bir düzlemsel evrilmiş-F anten (DEFA) tasarımı önerilmektedir. $30 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki antenin ana radyatörü simetrik olmayan kıvrımlı şerit elemanlarından oluşmakta ve frekans cevabı bu elemanlar arasında optimum konumda kullanılan bir PIN diyotu aracılığıyla dinamik olarak ayarlanabilmektedir. Sayısal tasarımı Ansoft-HFSS ve CST Microwave Studio benzetim yazılımları aracılığıyla gerçekleştirilen antenin prototip üretimi de gerçekleştirilerek, diyotun açık/kapalı durumları için geri dönüş kaybı ölçümleri alınmıştır. Önerilen anten diyotun kesim durumunda WiMAX bandında tek bent rezonans gösterirken, iletim durumunda 2.4 ve 5.2 GHz WLAN bantlarında rezonansa gelmektedir. Ayrıca *E* ve *H*-düzlemleri için ilgili frekans bantlarında oldukça düzgün ışıma karakteristikleri sergileyen antenin mutlak kazanç değerleri 2-4 dBi arasındadır.

Anahtar Kelimeler- Düzlemsel Evrilmiş-F Anten, Frekansı Ayarlanabilir Anten, Kıvrımlı Şerit Rezonatör

ABSTRACT

In this study, a new electrically frequency tunable planar inverted-F antenna (PIFA) design is proposed for WLAN and WiMAX applications. The main radiator of the antenna with dimensions of $30 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$ consists of unsymmetrical meander line elements and the frequency response can be adjusted dynamically by means of a PIN diode used in the optimum position between these elements. The prototype fabrication of the antenna, whose numerical design was carried out using Ansoft-HFSS and Microwave CST studio simulation software, was also realized, and return loss measurements were taken for the on/off states of the diode. While the proposed antenna shows a single bent resonance in the WiMAX band in the off state of the diode, it resonates in the 2.4 and 5.2 GHz WLAN bands in the on state. In addition, the realized gain values of the antenna, which exhibits very uniform radiation characteristics in the relevant frequency bands for the *E* and *H*-planes, are between 2-4 dBi.

Keywords- Planar Inverted-F Antenna, Frequency Reconfigurable Antenna, Meander Line Resonator

¹İletişim: burcinrmzn@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2008-876X>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Konyaaltı, Antalya, Türkiye

²İletişim: agahmetgorgun@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1416-5570>)

Elektronik Teknolojisi Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Çünür, Isparta, Türkiye

^{3*}Sorumlu yazar iletişimi: cbasaran@akdeniz.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6432-4512>)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Konyaaltı, Antalya, Türkiye

I. GİRİŞ

Son zamanlarda, düşük profilli, verimli, kompakt, yüksek hızlı, düzlemsel, ucuz ve kolayca entegre edilebilen cihazlara talep oldukça yüksektir. Bu cihazlar, modern telekomünikasyon endüstrisinde farklı rollerde çeşitli uygulamalara sahiptir. Anten, gelişen iletişim sistemlerinin en önemli parçalarından biridir ve modern elektronik cihazlarda giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Çoğunlukla sabit polarizasyon, ışın genişliği, uzak alan özellikleri gibi sabit fonksiyonel özellikler gerektiren uygulamalar için kullanılırlar. Ancak, bu tür sabit işlevsel özelliklere sahip anten sistemleri, devrenin karmaşıklığını artırabilir ve verimliliği azaltabilir. Ayrıca, birden fazla radyo haberleşmesinin ve anten sistemlerinin tek bir cihaz içinde entegrasyonu, sistemin performansını da düşürebilir [1,2].

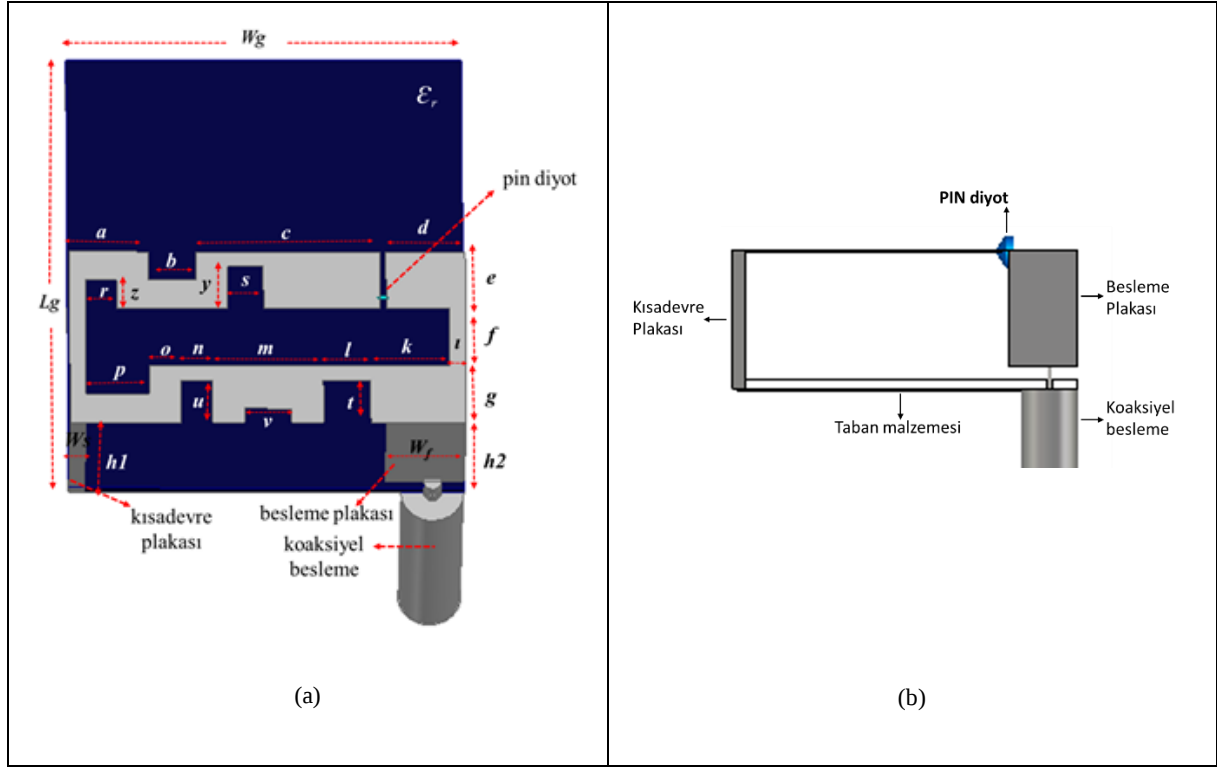
Frekansı yeniden yapılandırılabilen antenler, istenen frekans bantlarında frekans ayarına ve spektrumun verimli kullanımına odaklanırken; paterni yeniden yapılandırılabilir antenler, sinyalleri istenen yöne yönlendirmeye, enerji tasarrufu sağlamaya, kanal kapasitesini iyileştirmeye, kazancı arttırmaya ve bant içi girişimi azaltmaya odaklanır [3-6]. Bir antenin yeniden yapılandırılması, frekansının, polarizasyonunun veya radyasyon özelliklerinin değiştirilmesiyle elde edilir. Bu değişiklik, anten akımlarını yeniden dağıtan ve böylece antenin etkin açıklığının elektromanyetik alanlarını değiştiren farklı tekniklerle elde edilebilir. Yeniden yapılandırılabilir antenler, geometrilerini ve elektriksel davranışlarını modifiye ederek karmaşık sistem gereksinimlerini karşılayabilir, böylece çevresel koşullar veya sistem gereksinimleri içindeki değişikliklere (yani gelişmiş bant genişliği, çalışma frekansındaki değişiklikler, polarizasyon ve radyasyon modeli) uyum sağlayabilir. Yeniden yapılandırılabilirlik, kablosuz iletişim ve uydu iletişimi, algılama ve görüntüleme için modern, çevik, radyo frekansı (RF) sistemlerinin önemli ve istenen bir özelliği haline gelmiştir. Hem çevredeki RF ortamını algılayabilen hem de herhangi bir çekimeli/sıkışık ortam içinde aynı anda haberleşebilen akıllı, bilişsel ve tetiklemeli RF cihazlarını birleştirmeye doğru bir kayma vardır. Verimli spektrum ve güç kullanımıyla olduğu kadar, genişletilebilir ve yeniden yapılandırılabilir çoklu hizmet, çoklu standart ve çoklu bant çalışmalarıyla başa çıkmak için istenen yeni yeteneklerden bazıları; frekans tetikleme, yazılım tanımlama ve bilişsel radyoları içerir. Bu içerikler, esnek olmayan donanımlı uyumsuz iletişim sistemlerine dayanan günümüz radyo teknolojisine kıyasla bileşenlerin sayısını ve dolayısıyla donanım karmaşıklığını ve maliyeti önemli ölçüde azaltabilir [7].

Antenlerde ayarlanabilirlik sağlamak için elektriksel, optik, mekanik ve malzeme değişiklikleri olmak üzere dört ana teknik vardır [8]. Literatürde, PIN diyot, varaktör diyot, kapasitif yükleme, RF-MEMS, farklı akıllı malzemeler, optik anahtarlar kullanılarak yeniden yapılandırılabilir antenleri tasarlamak için farklı teknikler kullanılmış ve yeniden yapılandırılabilir ve ayarlanabilir anten tasarımları önerilmiştir [9-20]. Pin diyot, DEFA kısa devre piminin konumunu değiştirmek için kullanılarak DEFA frekansı yeniden ayarlanabilir ancak böyle bir durumda dört farklı anten durumunu etkinleştirmek için dört yeniden yapılandırılabilir bileşenin kullanılması gerekmektedir. Durum sayısı ve kullanılan bileşenler arasında daha iyi bir oran iç içe yuvalara dayalı bir geometri sayesinde elde edilmiştir ve burada, yeniden yapılandırılabilir bir DEFA sadece iki PIN diyotu kullanarak dört farklı duruma olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, PIN diyotlarının basit açık-kapalı özelliği, onların anten rezonansının ince ayarını sağlamak yerine çok bantlı çalışmayı sağlamak için kullanımlarını daha uygun hale getirmektedir [21,22]. Ayrıca çok bantlı veya geniş bantlı minyatür anten tasarımı elde etmek için kıvrımlı şerit yapıların temel alan anten tasarımları literatürde rapor edilmiştir [23,24].

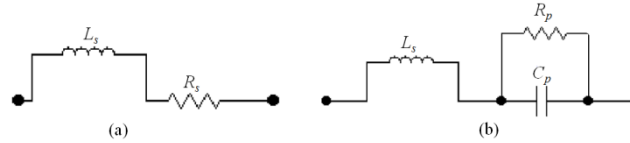
Bu çalışmada, kıvrımlı şerit yama elemanlarını temel alan yeni bir frekansı ayarlanabilir DEFA tasarımı geliştirilmiştir. Çeyrek dalga yarım yama anteninden türetilen DEFA tasarımları, çeyrek dalga boyunda rezonansa geldiğinden, geleneksel yama antenlerine göre elektriksel olarak daha küçük olarak elde edilebilmektedirler. Öte yandan, ana ışıma elemanı olarak kıvrımlı şerit hatların kullanılması sayesinde görece uzun olan akım yolu sınırlı bir hacimde elde edilerek antenin küçültülmesine olanak sağlamaktadır. Önerilen anten tasarımı tipik bir DEFA konfigürasyonudur ve tasarımın birincil radyatörü Şekil 1'de görüldüğü gibi simetrik olmayan kıvrımlı şerit elemanlarından oluşmaktadır. Bu elemanlar arasında optimum konumda yerleştirilen bir PIN diyotu aracılığıyla antenin frekans cevabı dinamik olarak ayarlanabilmektedir.

II. ÇİFT BANTLI FREKANSI AYARLANABİLİR KIVIRIMLI ŞERİT DÜZLEMSEL EVRİLMİŞ F ANTEN TASARIMI

Önerilen antenin konfigürasyonu ve tasarım parametreleri Şekil 1'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi önerilen anten, 0,64 mm kalınlığa ve $\epsilon_r=6,15$ dielektrik sabitine sahip Rogers RO3006 taban malzemesi üzerinde simetrik olmayan kıvrımlı şerit elemanlarından oluşmaktadır. Anten yüksekliği 10 mm'dir ve üst plaka ile taban malzemesi arasındaki tipik DEFA tasarımlarında olduğu gibi boşluk bulunmaktadır. Kısa devre levhasının genişliği 3 mm iken, besleme levhasının genişliği 4 mm'dir. Kısa devre levhası, üst levhanın sol üst köşesi ile taban malzeme arasına konumlandırılmıştır. Kısa devre ve besleme plakaları arasındaki yatay mesafe ise 20 mm'dir. Önerilen anten, simülasyonlarda besleme plakasına yerleştirilmiş bir akım probu ile beslenmiştir.



Şekil 1. Önerilen anten konfigürasyonu ve tasarım parametreleri. (a) Perspektif görüntüsü. (b) Yandan görüntüsü.



Şekil 2. HPND-4028 diyotunun eşdeğer devre modeli. (a) Pin diyot iletimde. (b) Pin diyot kesimde.

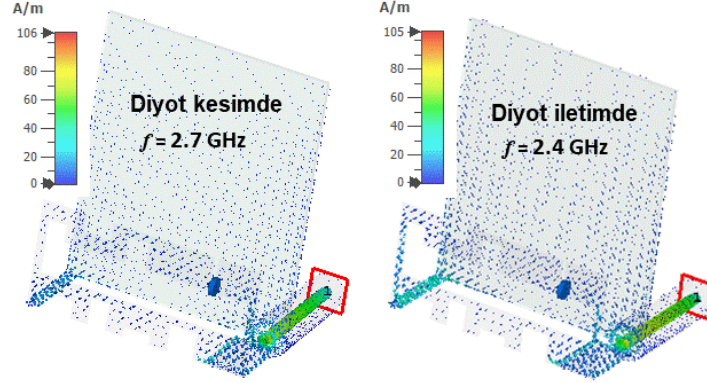
Tablo 1. Eşdeğer devre parametreleri ve değerleri.

Devre Elemanı	Değeri
Seri İndüktans (L_s)	0,5 nH
Seri Rezistans (R_s)	2,3 Ω
Paralel Rezistans (R_p)	1 k Ω
Paralel Kapasitans (C_p)	0,02 pF

Başta rezonans frekansları ve geri dönüş kaybı özellikleri olmak üzere arzu edilen anten performansını elde edebilmek için bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır. Bu tasarım sürecinde, alt tabakanın kalınlığı ve geçirgenliği, kıvrımlı hat elemanlarının boyutları, kısa devre plakası ve besleme hattının konumu ve boyutları optimize edilen başlıca anten parametreleridir. Benzetim programları aracılığıyla elde edilen optimum anten parametreleri ise $W=25$ mm, $L=30$ mm, $W_s=1$ mm, $W_f=4$ mm, $a=5$ mm, $b=3$ mm, $c=8$ mm, $d=3,6$ mm, $e=5$ mm, $f=g=h=p=4$ mm, $k=5$ mm, $l=3$ mm, $m=7$ mm, $h_1=10$ mm, $h_2=8,36$ mm ve $h_g=0,76$ mm'dir. Antenin frekans yapılandırması için kıvrımlı şerit hattı üzerinde bir süreksizlik açıklığı yaratılmış ve bu açıklıkta bir HPND-4028 PIN diyeti kullanılmıştır. Sayısal tasarımda PIN diyetin açık ve kapalı konumlarına ilişkin eşdeğer devre modelleri kullanılmış ve ilgili durumlar için anten performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2'de gerçek uygulamalarda aç/kapa anahtar elemanı olarak kullanılabilecek özelliklerdeki yarı-iletken teknolojisiyle üretilmiş HPND-4028 PIN diyotuna ilişkin RLC eşdeğer devre modeli verilmektedir. Fiziksel boyutları $0,06 \times 0,28 \times 0,69$ olan diyetin eşdeğer devre modeli eleman değerleri ise Tablo 1'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere söz konusu eşdeğer devre modelinde; PIN diyet iletim durumunda iken seri direnç elemanı (R) ile, kesim durumunda (akım geçişine izin verilmediği ters besleme durumunda) ise düşük kapasitans değerine sahip bir kondansatör elemanı (C) kullanılmaktadır.

Önerilen antenin çalışma mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi için PIN diyotunun kesim ve iletim durumlarında yüzey akım dağılımı karakteristikleri Şekil 3’ de sunulmuştur. Görüleceği üzere diyotun her iki durumunda da besleme plakası ve kısa devre plakası üzerinde akım dağılımları yoğunlaşmakta ve ilgili frekanslarda antenin rezonansa gelmesinde belirgin rol oynamaktadırlar. Diğer taraftan diyot kesimde iken diyotun bağlı bulunduğu kol üzerinde akım geçişi sınırlı iken diyotun iletime geçmesi ile birlikte akım yoğunluğunun belirgin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Önerilen antenin yüzey akım dağılımları.

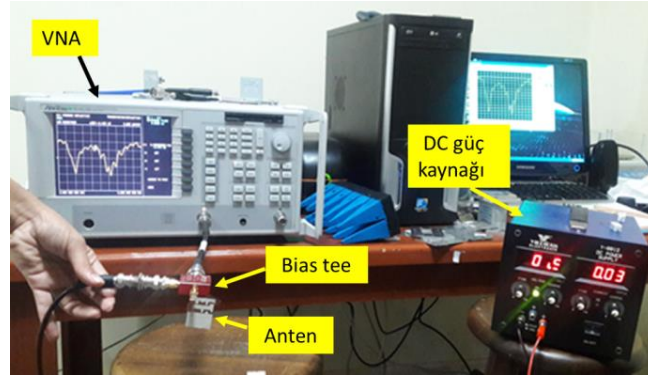
III. BENZETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu çalışmada önerilen antenin üretimi Akdeniz Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan hassas kazıma özelliğine sahip LPKF baskı devre cihazı aracılığıyla 0,2 mm kalınlığında bakır kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen prototip antenin geri dönüş kaybı ölçümleri ise Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) laboratuvarında, Anritsu 9 KHz- 9.3 GHz Vektör Network Analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4 ve 5’de sırasıyla üretilen prototip antenin fotoğrafı ve geri dönüş kaybı ölçüm düzeneğine ilişkin fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 4. Önerilen antenin prototipi

HPND-4028 PIN diyotunun katalogunda, ileri yöndeki eşik gerilimi 1,1 V iken taşıyabileceği maksimum akım 20 mA olarak verilmektedir. Diyot akımının sınırlanması için DC gerilimle diyotun bağlandığı hat arasında 270 Ω seri direnç kullanılması diğer taraftan, AC/DC gerilimlerinin izole edilmesi için 10 nH değerinde bobin ve 10 μ F değerinde kondansatör kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle anten deney düzeneğinde ilgili frekans arasında diyotun izolasyon, iletim ve kesim durumlarının eş zamanlı olarak sağlanabilmesi için Şekil 5’den görüleceği gibi antenin AC giriş sinyali ve diyotun DC beslemesi bir Bias tee üzerinden sağlanmıştır. Ölçüm düzeneğinde kullanılan Bias tee’nin fotoğrafı ve eş değer devre modeli Şekil 6’da verilmektedir. Diyotun iletim durumu için DC güç kaynağı üzerinden 1,5 V uygulanırken kesim durumu için ise 0V uygulanmıştır.

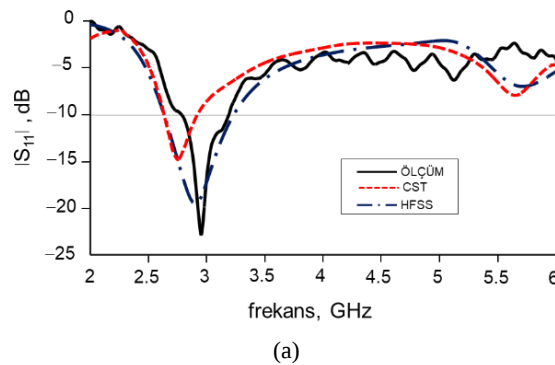


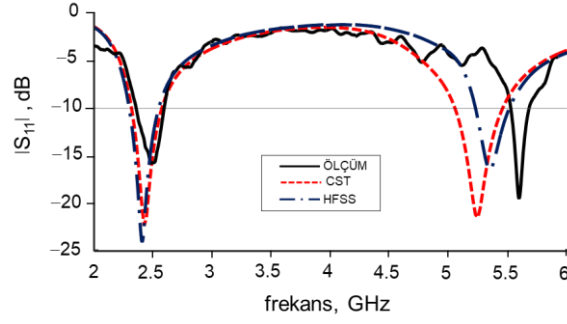
Şekil 5. Antenin geri dönüş kaybı ölçüm düzeneği.



Şekil 6. HPND-4028 PIN diyodu aktif etmek için kullanılan Bias tee ve eşdeğer devre modeli.

Şekil 7’de HFSS ve CST benzetim yazılımları ve prototip anten geri dönüş kaybı (S_{11}) ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Görüldüğü gibi diyotun iletim ve kesim durumlarında benzetim sonuçları oldukça uyumludur. Diyotun kesim durumunda benzetim ve ölçüm sonuçları oldukça uyumlu iken, iletim durumunda sadece üst bantta ölçüm sonucu bir miktar yukarı yönlü kayma sergilemiştir. Söz konusu küçük frekans kaymasının antenin üretim ve ölçüm süreçlerindeki tolerans farklılıklarından kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir. Antenin HFSS benzetim sonuçları dikkate alındığında diyotun kesim durumunda, 2.95 GHz’ de %24 bant genişliğine sahip tek bant performans elde edilmiştir. Diyotun iletim durumunda ise 2.47 GHz ve 5.2 GHz’de %6 bant genişliklerine sahip çift bant performans elde edilmiştir. Böylece önerilen antenin frekans cevabı diyotun iletim/kesim durumlarına bağlı olarak dinamik olarak ayarlanabilmiş ve kesim durumunda WiMAX bandında tek bant, iletim durumunda ise 2.4 GHz ve 5.2 GHz WLAN bantlarında çift bant performans elde edilmiştir.

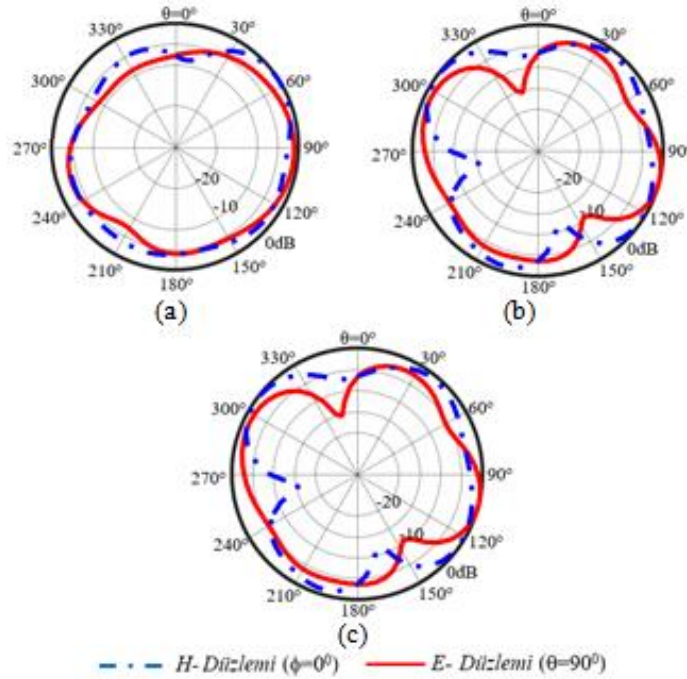




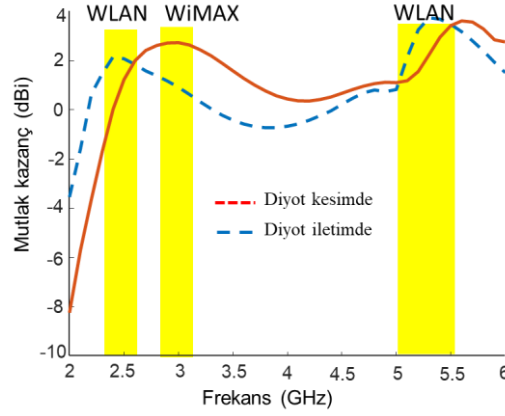
(b)

Şekil 7. Önerilen antenin geri dönüş kaybı benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması. (a) PIN diyot kesimde (b) PIN diyot iletimde.

Önerilen antenin hesaplanan E ve H düzlem ışıma örüntüleri Şekil 8’de verilmektedir. Görüldüğü üzere anten, diyotun iletim ve kesim durumlarındaki frekansların ($f=2.4$, $f=2.7$ ve $f=5.2$ GHz) tamamında düzgün bir ışıma performansı sergilemektedir. Ayrıca antenin PIN diyot iletimde ve kesimde durumları için frekansa bağlı olarak elde edilen mutlak kazanç karakteristikleri Şekil 9’ da verilmektedir. CST benzetim yazılımı aracılığıyla hesaplanan bu kazanç karakteristiği antenin birincil huzmesi durumundaki açı değerlerinde ($\theta = 0^\circ$ ve $\phi = 0^\circ$) elde edilmiştir. Görüldüğü gibi diyotun kesim durumunda olduğu WiMAX bandı boyunca önerilen anten kazancı 3dBi seviyesindedir. Anten kazancı diyotun iletim durumunda 2.4 GHz WLAN bandında 2 dBi ve 5.2 GHz WLAN bandında ise 4 dBi seviyesindedir.



Şekil 8. Önerilen antenin hesaplanan ışıma modelleri. (a) $f=2.4$ GHz diyot iletimde (b) $f=5.2$ GHz diyot iletimde (c) $f=2.7$ GHz diyot kesimde.



Şekil 9. Önerilen antenin diyetot iletimde ve kesimde durumları için mutlak kazanç karakteristiği.

Bu çalışmada önerilen anten boyut, çalışma frekans bantları, tasarımda kullanılan anahtar türü ve sayıları açısından güncel literatüre rapor edilen benzer çalışmalarda Tablo 2’ de karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere önerilen anten diğer çalışmalardan farklı frekans bantlarında çalışmaktadır. Ayrıca önerilen çalışmada 3 ayrı frekans bandı tek bir PIN diyetotu kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca önerilen antenin boyutları rapor edilen çalışmalarda sunulan antenler ile kıyaslanabilir durumdadır. Diğer taraftan, rapor edilen çalışmalarda anten kazanç değerleri farklı standartlarda (maksimum kazanç, yönlendirme kazancı veya mutlak kazanç vb) verildiğinden bu bağlamda bir karşılaştırmaya yer verilememiştir. Yine de Şekil 9’ dan da görüleceği üzere önerilen antenin mutlak kazanç değerleri 2-4 dBi seviyelerinde elde edilerek pratik uygulamalar için oldukça yeterli olacağı anlaşılmaktadır.

Tablo 2. Yeniden yapılandırılabilir DEFA antenlerin karşılaştırılması.

Kaynak	Anten boyutları (mm)	Çalışma frekans bantları	Anahtar sayısı ve türü
25	63.5 × 33.5 × 1.6	2.1 / 2.4 / 3.5 GHz	3 adet PIN diyetot
26	44 × 14 × 3.2	GSM 850 / 900 ve UMTS 2100 MHz	2 adet PIN diyetot
27	100 × 66 × 3.15	0.85 / 1.85 / 2.45 GHz	4 adet varaktör diyetot
28	100 × 100 × 6.86	1.52-2.25 GHz	1 adet RF MEMS
29	40 × 95 × 7	88-2175 MHz	1 adet varaktör diyetot
30	63 × 100 × 3.15	0.7-1.1 GHz ve 1.7-2.3 GHz	2 adet varaktör
Önerilen anten	30 × 25 × 10	2.4 / 3.0 / 5.2 GHz	1 adet PIN diyetot

IV. SONUÇLAR

Bu makalede, WLAN ve WiMAX uygulamaları için yeni bir frekansı ayarlanabilir DEFA tasarımı sunulmuştur. Anten boyutunu olabildiğince minyatürize etmek için antenin ana radyatörü olarak simetrik olmayan kıvrımlı şerit elemanları kullanılmıştır. Bu elemanlar arasında optimum konumda yerleştirilen bir PIN diyetot aracılığıyla antenin frekans cevabı dinamik olarak ayarlanabilmektedir. Diyetotun kesim durumunda anten 2.7 GHz WiMAX bandında, iletim durumunda ise 2.4 ve 5.2 GHz WLAN bantlarında rezonansa gelmektedir. Böylece IEEE standartlarınca belirlenmiş olan WiMAX ve WLAN bantları tek bir anten elemanı ile kapsanabilmektedir. Ayrıca kompakt yapıdaki anten diyetotun açık ve kapalı konumları için ilgili rezonans frekanslarında oldukça düzgün bir ışıma performansı sergilemekte ve 2 ile 4 dBi arasında mutlak kazanç performansı sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Önerilen antenin ölçüm süreçlerinde verdikleri destekten dolayı, Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi yönetimine çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Iqbal, A. Tiang, J. J., Wong, S. K., M., Alibakhshikenari, Falcone, F., & Limiti, E. (2020). Miniaturization trends in substrate integrated waveguide (SIW) filters: a review, *IEEE Access*, 8, 223287-223305.

- [2] Ghaffar, A., Altaf, A., Aneja, A., Jun Li, X., Khan, S., Alibakhshikenari, M., Flalcone, F. & Limiti, E. (2022). A Frequency reconfigurable compact planar inverted-F antenna for portable devices, *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 1-9.
- [3] Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C. & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 50 (3), 2127-2159.
- [4] Dong, J., Li, Y., & Zhang, B. (2011). A survey on radiation pattern reconfigurable antennas. *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 1-4.
- [5] Borhani, M., Rezaei, P., & Valizade, A. (2016). Design of a reconfigurable miniaturized microstrip antenna for switchable multiband systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 822-825.
- [6] Lee S. W., & Sung, Y. (2015). Compact frequency reconfigurable antenna for LTE/WWAN mobile handset applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(10), 4572–4577.
- [7] Christodoulou, C. G., Tawk, Y., Lane, S. A., & Erwin, S. R. (2012). Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proceedings of the IEEE*, 100 (7), 2250-2261.
- [8] Costantine, Y., Tawk, G., & Christodoulou, C. G. (2013). Design of reconfigurable antennas using graph models. *Springer*, 148.
- [9] Lim, J.H., Song, C.W., Jin, Z.J., & Yun, T.Y. (2013). Frequency reconfigurable planar inverted-F antenna using switchable radiator and capacitive load. *IET Microwaves Antennas Propag.*, 7(6), 430-435.
- [10] Ghaffar, A., Li, X. J., & Seet, B. C. (2017). Dual frequency band and polarization reconfigurable antenna for mobile devices. *Proceedings of the 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, October, Chengdu, China 696-700.
- [11] Al-Zayed, A. S., Kourah, M. A. & Mahmoud, S. F. (2014). Frequency-reconfigurable single- and dual-band designs of a multi-mode microstrip antenna. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 8(13), 1105-1112.
- [12] Al-Zayed, A. S., Kourah, M. A., & Mahmoud, S. F. (2017). Tunable H-shaped microstrip antenna with dual feeding. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 1-6.
- [13] Basaran, S. C., & Sertel, K. (2015). Dual-band frequency reconfigurable monopole antenna for WLAN applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(1), 55-58.
- [14] Başaran, S. C. (2014). Design of a frequency reconfigurable monopole antenna with complementary split ring resonators. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(4), 977-979.
- [15] Awan, W. A., Hussain, N., Naqvi, S. A., Iqbal, A., Striker, R., Mitra, D., & Braaten, B. D. (2020). A miniaturized wideband and multi-band on-demand reconfigurable antenna for compact and portable devices. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 122, 153266.
- [16] Wright, M. D., Baron, W. J., Miller, J., Tuss, J., Zeppettella, D., & Ali, M. (2018). MEMS reconfigurable broadband patch antenna for conformal applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (6), 2770-2778.
- [17] Ding, Z., Jin, R., Geng, J., Zhu, W., & Liang, X. (2019). Varactor loaded pattern reconfigurable patch antenna with shorting pins. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(10), 6267-6277.
- [18] Smida, A. Iqbal, A. Selmi, M., Althuwayb A. A., & Mallat, N. K. (2021). Varactor diode-based dual-band frequency tunable multiple-input multiple-output antenna. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(2), e22519.
- [19] Wang, C., Yeo, J. C., Chu, H. C., Lim, T. & Guo, Y.-X. (2018). Design of a reconfigurable patch antenna using the movement of liquid metal. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(6), 974-977.
- [20] Iqbal A., & Saraereh, O. A. (2017). A compact frequency reconfigurable monopole antenna for Wi-Fi/WLAN applications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 68, 79-84.
- [21] Thao, H. T. P., Luan, V. T. & Yem, V. V. (2016). Design of compact frequency reconfigurable planar inverted-F antenna for green wireless communications,” *IET Commun.*, 10(18), 2567-2574.
- [22] Asadallah, F. A., Costantine, J. & Tawk, Y. (2018). A multiband compact reconfigurable PIFA based on nested slots. *IEEE Antennas Wireless Propag. Letters*, 17(2), 331-334.
- [23] Lee, M. W. K., Leung, K. W., & Chow, Y. L. (2014). Low cost meander line chip monopole antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62(1), 442-445.
- [24] Chen, I.-F., & Peng, C.-M. (2011). Compact modified pentaband meander-line antenna for mobile handsets applications. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 10, 607-610.
- [25] Minh, P. T., Duc, N. T. P., Vu, X., Chuyen, N. T. & Yem, V. V. (2017). Low profile frequency reconfigurable PIFA antenna using defected ground structure. *REV Journal on Electronics and Communications.*, 7, 9-17.
- [26] Ghaffar, A., Li, X. J. & Ahmad, T. (2020). A compact frequency reconfigurable PIFA antenna for heterogeneous applications. *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Hong Kong, 628-630.
- [27] Alazemi, A. J., & Rebeiz, G. M. (2019). A tunable single-feed triple-band LTE antenna with harmonic suppression. *IEEE Access*, 7, 104667-104672.
- [28] Chaabane, G., Madrangeas, V., Chatras, M., Arnaud, E., Huitema, L., & Blondy, P. (2017). High-linearity 3-Bit frequency-tunable planar inverted-F antenna for RF applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 983-986.

- [29] Liu, L., Rigelsford J., & Langley, R. (2013). Tunable multiband handset antenna operating at VHF and UHF bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(7), 3790-3796.
- [30] Avser, B., & Rebeiz, G. M. (2015). Tunable dual-band antennas for 0.7–1.1-GHz and 1.7–2.3-GHz carrier aggregation systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4), 498-1504.