
Araştırma Makalesi / Research Article

5G Haberleşme İçin Geniş bant Mikroşerit Anten Tasarımı ve Alttaşı Kalınlığının Anten Performansına Etkisinin İncelenmesi

Bilal TÜTÜNCÜ, Mahmut KÖSEM*

*Van Yüzyüncü Yıl Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Van, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-7439-268X) (ORCID: 0000-0003-0343-5504)*

Öz

5G teknolojisinde kullanılacak yüksek frekanslı mikroşerit antenlerin kazanç, verimlilik ve bant genişliği gibi performans kriterlerinin dielektrik alttaşı fiziksel ve elektriksel parametrelerine bağımlılığı, düşük frekanslı antenlerden çok daha hassastır. Bu nedenle, 5G haberleşmede kullanılacak milimetre dalga antenler için en uygun boyuta ve karakteristiğe sahip bir alttaşı seçimi anten performansı açısından çok önemlidir. Bu çalışmada 5G haberleşme için yeni bir mikroşerit anten tasarımı, simülasyonu ve alttaşı kalınlığına bağlı performans analizi yapılmıştır. Önerilen bu anten için kullanılan Arlon AD300C alttaşının fiziksel boyutlarının anten performansına etkileri 4 farklı alttaşı kalınlığı kullanılarak incelenmiştir. Optimum kalınlık değerini elde etmek için sonuçlar bant genişliği, geri dönüş kaybı, kazanç, gibi kriterler açısından ayrı ayrı analiz edilmiştir. Sonuç olarak 5G haberleşme için 5.65 GHz çalışma frekansında önerilen bu mikroşerit yama antende kullanılan Arlon AD300C alttaşının en yüksek performansı kalınlık 1.2 mm iken 7.5 dBi'lık kazanç ve 140 MHz'lik bant genişliği olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: 5G, mikroşerit anten, dielektrik malzeme.

Wideband Microstrip Antenna Design and Investigation of the Effect of the Substrate Thickness On Antenna Performance for 5G Communication

Abstract

The dependence of performance criteria such as gain, efficiency and bandwidth of high frequency microstrip antennas to be used in 5G technology on the physical and electrical parameters of the dielectric substrate is much more sensitive than low frequency antennas. Hence, deciding a substrate with the most suitable size and characteristic for mm-wave antennas for 5G communication is very important in terms of antenna performance. In this study, a new microstrip antenna for 5G communication was designed and simulated and performance analysis was performed according to substrate thickness. The effects of the physical dimensions of the proposed antenna substrate (Arlon AD300C) on antenna performance were investigated using 4 different substrate thicknesses. In order to obtain the optimum thickness value, the results were analyzed in terms of criteria such as bandwidth, return loss and gain. Consequently, the highest performance of the proposed antenna for 5G communication at 5.65 MHz operating frequency was achieved at a thickness of 1.2 mm, with a gain of 7.5 dBi and a bandwidth of 140 MHz.

Keywords: 5G, microstrip antenna, dielectric material.

1. Giriş

Günümüzde özellikle Covid-19 pandemisinden sonra, ticaretten eğitime kadar birçok ihtiyacın internet ile sanal ortama taşınmasıyla veri hızına olan ihtiyaç ve talep artmış ve mevcut en hızlı 4G LTE standardından 100 kat daha hızlı olacak şekilde her ülke kendi 5G kablosuz haberleşme standartlarını belirlemiştir. Ayrıca cep telefonları için yeni uygulamaların geliştirilmesi, daha büyük bant genişliği ve daha hızlı veri aktarımına olan ihtiyacı daha da artırmıştır. Geçtiğimiz son 5 yıl içerisinde 5G haberleşme için birçok farklı mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Tüm bu çalışmalarda anten performans kriterleri çeşitli parametrelerle ele alınıp analiz edilmiş ve yeni nesil 5G Haberleşme için birçok farklı anten tipleri

*Sorumlu yazar: mahmutt.kosem@gmail.com

Geliş Tarihi: 28.12.2020, Kabul Tarihi: 01.05.2021

literatüre kazandırılmıştır [1-5]. Örneğin Mak ve ark. [6] çalışmalarında, yeni bir dairesel polarize yama anteni, 5G teknolojisi için uygun çalışma frekansı, polarizasyon, üretim maliyeti ve anten boyutu gibi parametreleri dikkate alarak analiz edilmişlerdir. Çalışmalarında özellikle huzme-genişliğini iyileştirmeye ve anten profilini küçültmeye odaklanmışlardır. Bu nedenle çalışmada, dörtlü dairesel şekilli katlanır tip anten ve antenin boyutunu küçültmek için 8 yuva eklemiştir. Sonuç olarak yama antenin huzme genişliğinin iki teknikte artırılması kanısı ortaya çıkmıştır. Birinci yöntem, antenin dielektrik alıtış ile çevrili olması, ikinci yöntem ise antenin arka tarafına metalik blok eklenmesi olmuştur. Böylelikle yama antenin minyatürleştirilmesi ve aynı zamanda huzme genişliğinin artırılması için yeni bir yöntem önermişlerdir. Gaid ve ark. [7] ise çalışmalarında 5G kablosuz iletişim için iki kompakt ve çoklu-bant dikdörtgen mikroşerit yama anten önermişlerdir. İlk önerilen anten, $7,68 \times 9,18 \times 0,78 \text{ mm}^3$ boyutuna sahip çift bantlı bir yapıdır. Bu anten, 28 GHz / 38 GHz'de sırasıyla yaklaşık 2,086 GHz / 7,143 GHz bant genişliği sunmakta ve yine sırasıyla 8.13 dBi / 6.33 dBi maksimum kazanç sağlamaktadır. Bu çalışmada önerilen ikinci anten ise, 28 GHz, 45 GHz ve 60 GHz'de rezonansa giren bir üçlü-bant antendir. Bu antenin boyutu $7,2 \times 8,8 \times 0,78 \text{ mm}^3$ 'dür. Birinci bant aralığı 3.543 GHz genişliğindedir ve elde edilen maksimum kazanç 5,19 dBi'dir. İkinci bant 4,687 GHz genişliğinde ve maksimum kazancı 5.85 dBi'dir. Bant genişliği 5.926 GHz olan üçüncü bantta ise maksimum 6.07 dBi kazanç elde edilmiştir. Önerilen antenler düşük profilli ve el tipi mobil birimlere entegre edilecek kadar kompakttır. Ayrıca antenler, mm-dalga 5G kablosuz sistemlerin gerektirdiği kadar yeterli bant genişliği (%5 BG) sağlamakta ve kabul edilebilir bir kazanç sunmaktadırlar.

Chauhan ve ark. [8] ise çalışmalarında, 5G mobil iletişim için 9,0583 dB'lik yüksek kazanç ve %83.308 verimlilik sağlayan tek katmanlı RT / Duroid 5880 alıtış kullanan iki dikdörtgen yama elemanından oluşan bir anten modelleyip simüle etmişlerdir. Sunulan anten merkez frekansı 38 GHz'de, kazanç, yönlülük, geri dönüş kayıpları, Duran Dalga Oranı (DDO), karakteristik empedans, bant genişliği ve verimlilik açısından iyi bir performansa sahiptir. Gaikwad ve Chougale [9] yapmış oldukları çalışmada, 5G hücresel haberleşme için 3,73 GHz, 5,56 GHz ve 8,4 GHz rezonans frekanslarında eşdüzlemsel dalga kılavuzu (CPW) beslemeli anten çalışmışlardır. Ayrıca önerilen bu antenin WLAN, WI-FI ve Hiperlan gibi alanlar için uygunluğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında 5G için önerdikleri mikroşerit anteni, HFSS (High Frequency Structure Simulator) yazılımını kullanarak tasarlamışlar ve bu antenin; bant genişliği, akım dağılımı, ışınma örüntüsü, kazanç ve geri dönüş kaybı gibi parametreler açısından iyi bir performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Atima ve Sweta ise yapmış oldukları çalışmada [10], 5G iletişimi için aşamalı dizi anten paketinin yeni bir tasarımını sunmuşlardır. Önerdikleri anten üç alt diziden oluşmakta olup her bir alt dizi tarama alanının bir bölümünü kapsamaktadır. Ana tasarımdaki zorluk, yüksek kazançlı 5G cep telefonları için radyasyon ışınma alanının en az yarısını kapsamaktadır. Bu özelliği elde etmek için üç doğrusal alt yama anten dizisi tasarlamışlardır. Sonuç olarak her dizide 13 dBi'lik bir kazanç elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Amrutha ve Sudha [11] 5G uygulamalarına uyumlu mm dalga frekansı bandında (30 GHz-300 GHz) çalışır kompakt üçlü bant (26,92 GHz, 35,08 GHz ve 54,74 GHz) mikroşerit yama anteni sunmuşlardır. Anten, 54,74GHz'de % 13.92 bant genişliği ve 6,36 dB kazanç ile -52.87dB'lik bir geri dönüş kaybı göstermektedir.

Bu çalışmada ise 5G haberleşme için yeni bir mikroşerit anten tasarımı ve simülasyonu yapılmış ve bu antenin alıtış kalınlığına bağlı performans analizi yapılmıştır. Anten tasarım ve simülasyon çalışmaları CST Microwave Studio programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu anten için kullanılacak alıtışın fiziksel boyutlarının anten performansına etkileri 4 farklı alıtış kalınlık değeri baz alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar bant genişliği, kazanç, verimlilik gibi kriterler açısından analiz edilmiştir. Neticede 5G frekans bandında 5,65 GHz çalışma frekansı için optimum alıtış kalınlık değeri elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. 5.65 GHz çalışma frekansında mikroşerit yama anten tasarımı

5G haberleşme için mikroşerit anten tasarımında kullanılacak olan ve Tablo 1'de verilen; alıtış çeşidi, alıtış dielektrik sabiti, alıtış kalınlığı, rezonans frekans değerler için yamanın genişlik ve uzunluk değerleri Denklem (1-4) kullanılarak mm cinsinden elde edilmiştir. Formülde bulunan fc merkez

frekansı, c ışık hızı, ϵ_r yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısı, ϵ_e etkin dielektrik katsayısı, Δl besleme hat genişliği ve h alttaş kalınlığını göstermektedir [12,13].

Tablo 1. Mikroşerit Anten Parametreleri

Dielektrik malzeme	Arlon AD 300C
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	2,98
Kayıp Tanjant ($\tan(\delta)$)	0.002
Dielektrik malzeme (alttaş) kalınlığı (h)	12 mm
Çalışma frekansı	5,65 GHz

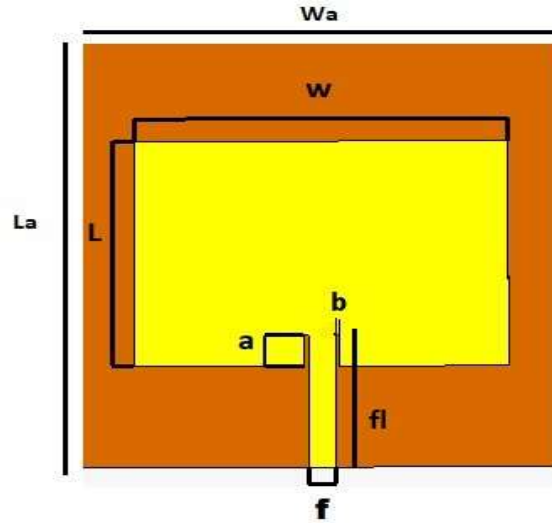
$$W = \frac{c}{2f_c} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (4)$$

Seçilen değerler doğrultusunda yamanın genişliği (W) 28 mm, yamanın uzunluğu (L) 20 mm olarak elde edilmiştir. Burada daha büyük ebatlarda alttaş kullanılması mikroşerit anten verimliliğini arttırsa bile parazitlenme gibi olumsuz etkileri doğurabilmektedir [14]. 5,65 GHz çalışma frekansı için yukarıdaki eşitliklerden ve CST STUDIO yardımıyla optimize edilen anten şekli ve boyut parametreleri Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca bu parametrelerin ebatları Tablo 2’de görülmektedir.



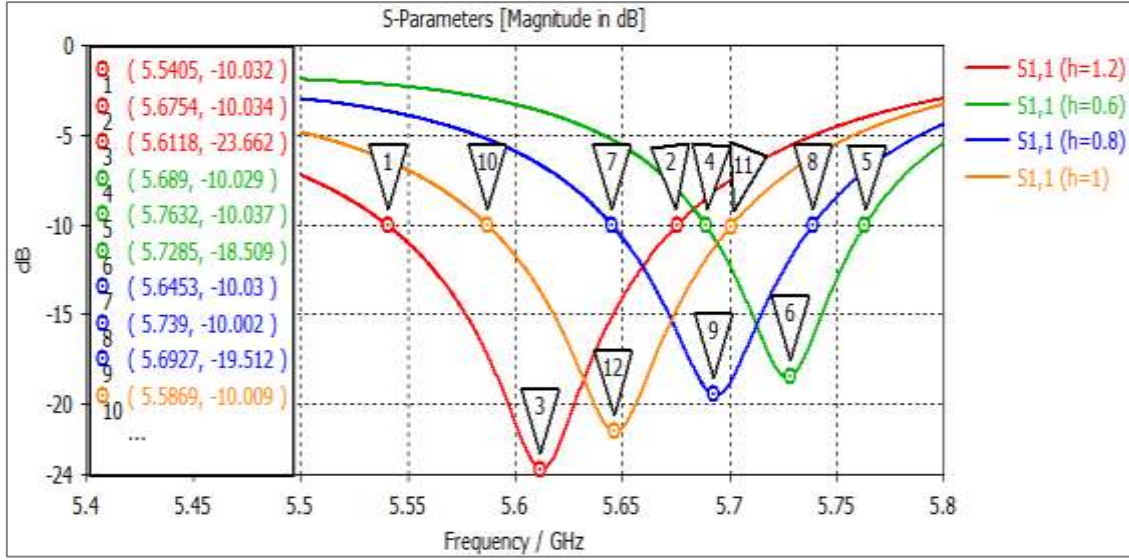
Şekil 1. 5.65 GHz çalışma frekansı için optimize edilen anten modeli.

Tablo 2. 5.65 GHz çalışma frekansı için optimize edilen anten parametreleri

Alttaş kalınlık (h)	1,2 mm
Alttaş genişlik (Wa)	52,92 mm
Alttaş uzunluk (La)	55,56 mm
Besleme giriş genişliği (f)	2,94 mm
Besleme mikroşerit uzunluğu (fl)	13,23 mm
Yama iletken kalınlığı	0,035 mm
Yama genişliği (W)	41,16 mm
Yama uzunluğu(L)	29,40 mm
Besleme oyuk genişliği (b)	0,5 mm
Besleme oyuk uzunluğu (a)	4 mm

2.2. Alttaş Kalınlığının Anten Performansına Etkisi

Bu bölümde, bir önceki bölümde 5,65 GHz için optimize edilen anten parametreleri sabit tutulup sadece alttaş kalınlığı 4 farklı değerde değiştirilerek, alttaş kalınlığının anten performansını nasıl etkilediği incelenmiştir. Alttaş malzemesi Arlon AD 300C için dört farklı alttaş kalınlık değeri (h) seçilerek dielektrik malzeme kalınlığının bant genişliği, kazanç ve geri dönüş kaybı gibi anten performansına etkileri incelenmiştir. Böylece 5,65 GHz merkez frekansında bir mikroşerit anten için optimum alttaş kalınlığı durumu tespit edilmiştir. Şekil 2’de frekansa bağlı olarak 4 farklı kalınlık için geri dönüş kaybı yani S_{11} grafiği verilmiştir.



Şekil 2. Dört farklı alttaş kalınlığında elde edilen S_{11} grafiği.

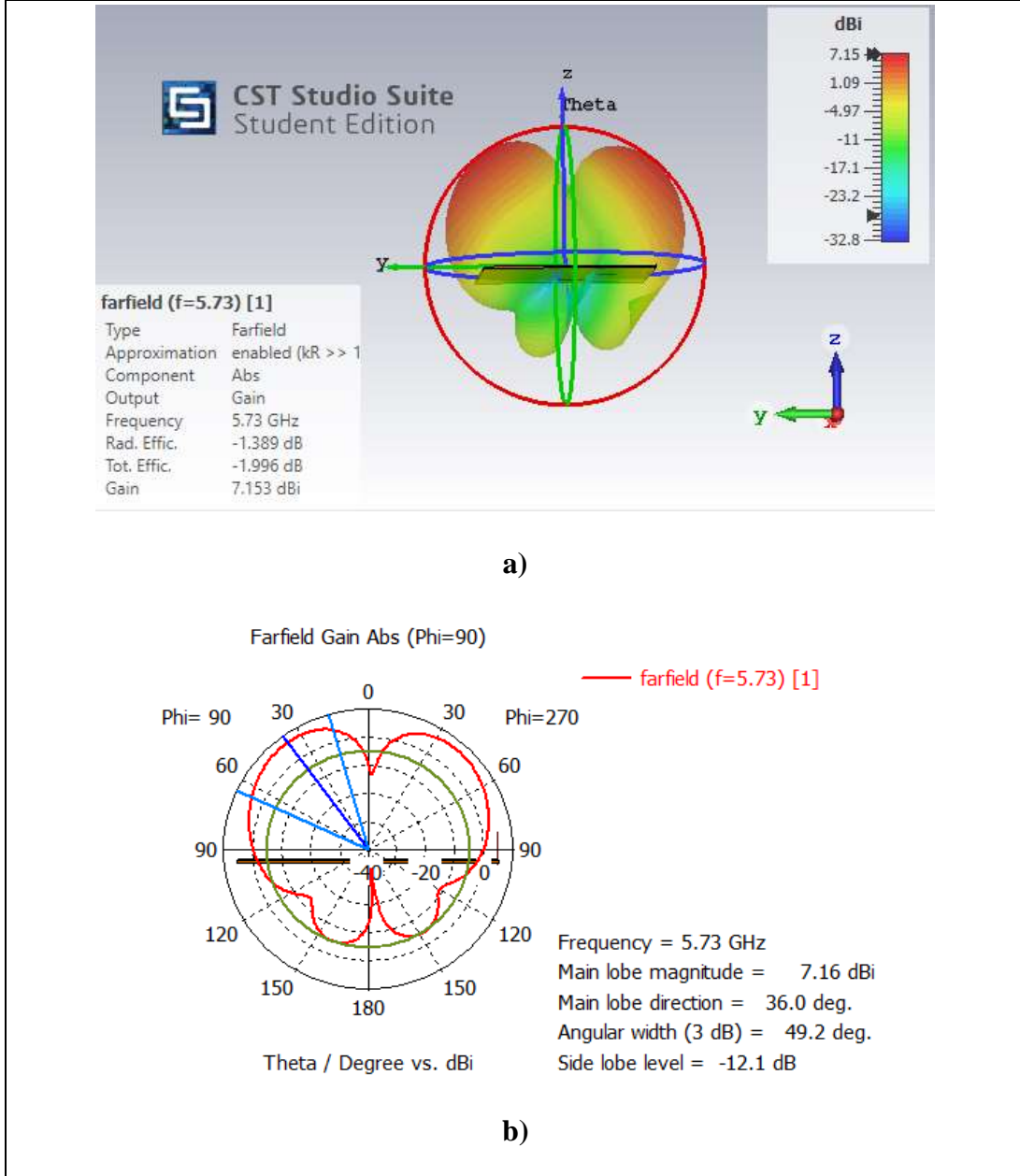
Şekil 2’den görüldüğü üzere Arlon AD 300C alttaşının kalınlığı her adımda 0,2 mm artacak şekilde sırasıyla 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm ve 1,2 mm olarak alınmıştır. Her bir alttaş kalınlık değeri için; üst ve alt frekans değerleri bulunup bant genişliği, kazanç, merkez frekans ve geri yansıma değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Böylece tasarlanacak olan mikroşerit yama antende kullanılacak optimum alttaş kalınlığı elde edilmiş olacaktır.

2.2.1. h=0,6 mm için performans analizi

İlk etapta kalınlık h=0,6 mm alındığında; geri dönüş kaybı $S_{11}=-18,51$ dB, çalışma frekansı $f_c=5,73$ GHz, üst frekans değeri $f_{\bar{u}}=5,76$ GHz, alt frekans değeri $f_a = 5,69$ GHz olarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler dikkate alınarak bant genişliği (BG) Denklem 5’den 70 MHz olarak hesaplanmıştır.

$$BG = f_{\bar{u}} - f_a \quad (5)$$

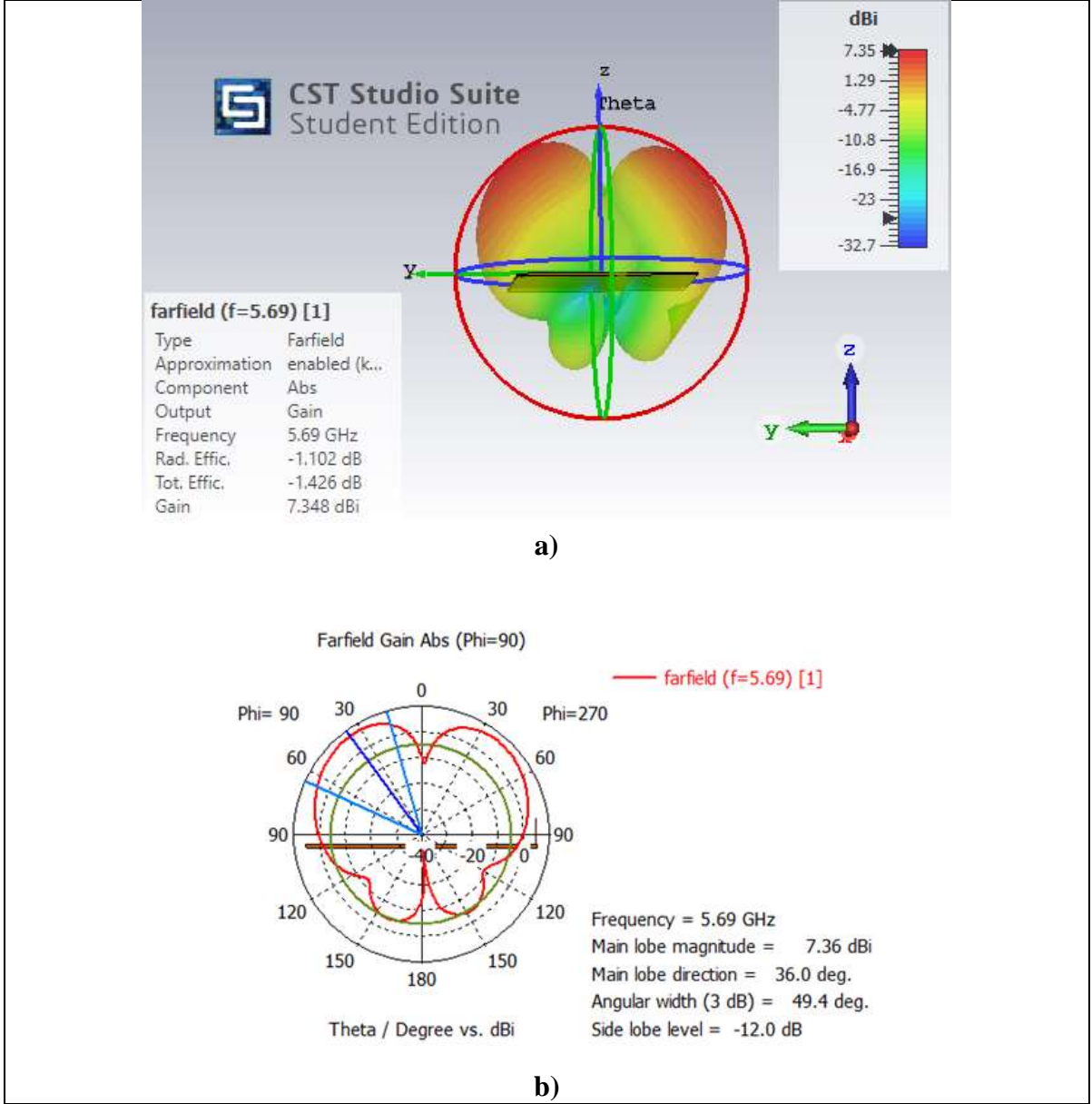
Merkez frekans 5,73 GHz için elde edilen ışınma örüntüsü hem 3D, hem polar düzlemde olacak şekilde Şekil 3’de verilmiştir. Alttaş kalınlığı 0,6 mm için hesaplanan uzak alan kazanç grafiğinden görüldüğü üzere maksimum kazanç 7.15 dBi’dir.



Şekil 3. $h=0.6$ mm için 5.73 GHz’de ışınma örüntüsü, a) 3D görünüm, b) Polar görünüm.

2.2.2. $h=0,8$ mm için performans analizi

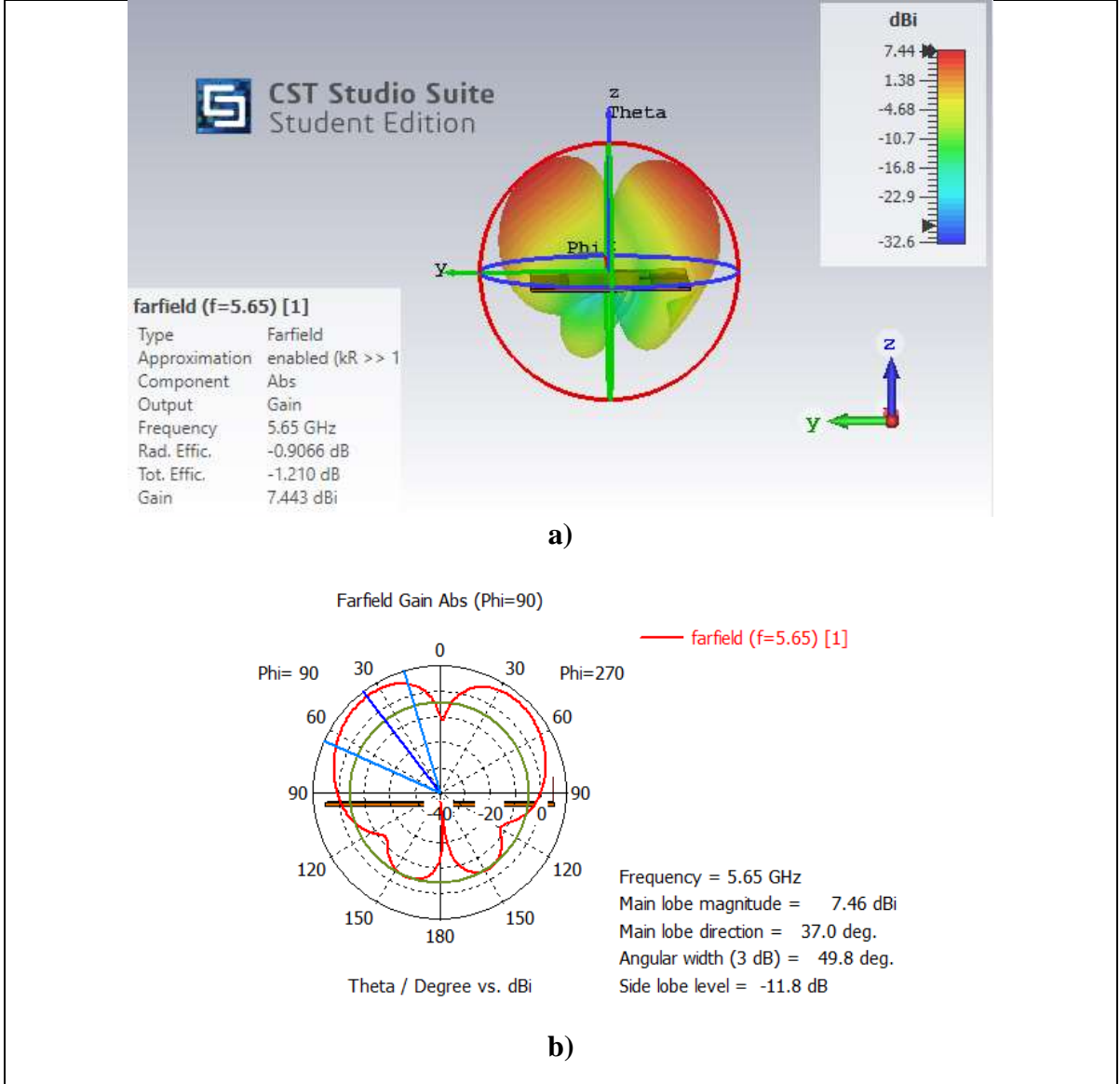
Altaş kalınlığı $h = 0,8$ mm alındığında; geri dönüş kaybı = -19,51 dB, çalışma frekansı $f_c = 5,69$ GHz, üst frekans değeri $f_{\bar{u}} = 5,74$ GHz, alt frekans değeri $f_a = 5,65$ GHz olarak bulunmuştur. Elde edilen bu parametreler dikkate alınarak bant genişliği Denklem 5’den 90 MHz olarak hesaplanmıştır. 5,69 GHz çalışma frekansında elde edilen ışınma örüntüsü Şekil 4’de verilmiştir. Kazanç grafiğinden görüldüğü üzere altaş kalınlığı 0,8 mm olduğu zaman maksimum kazanç 7,35 dBi olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. $h=0,8$ mm için 5,69 GHz’de uzak alan ışınma örüntüsü a) 3D görünüm, b) Polar görünüm.

2.2.3. $h=1$ mm için performans analizi

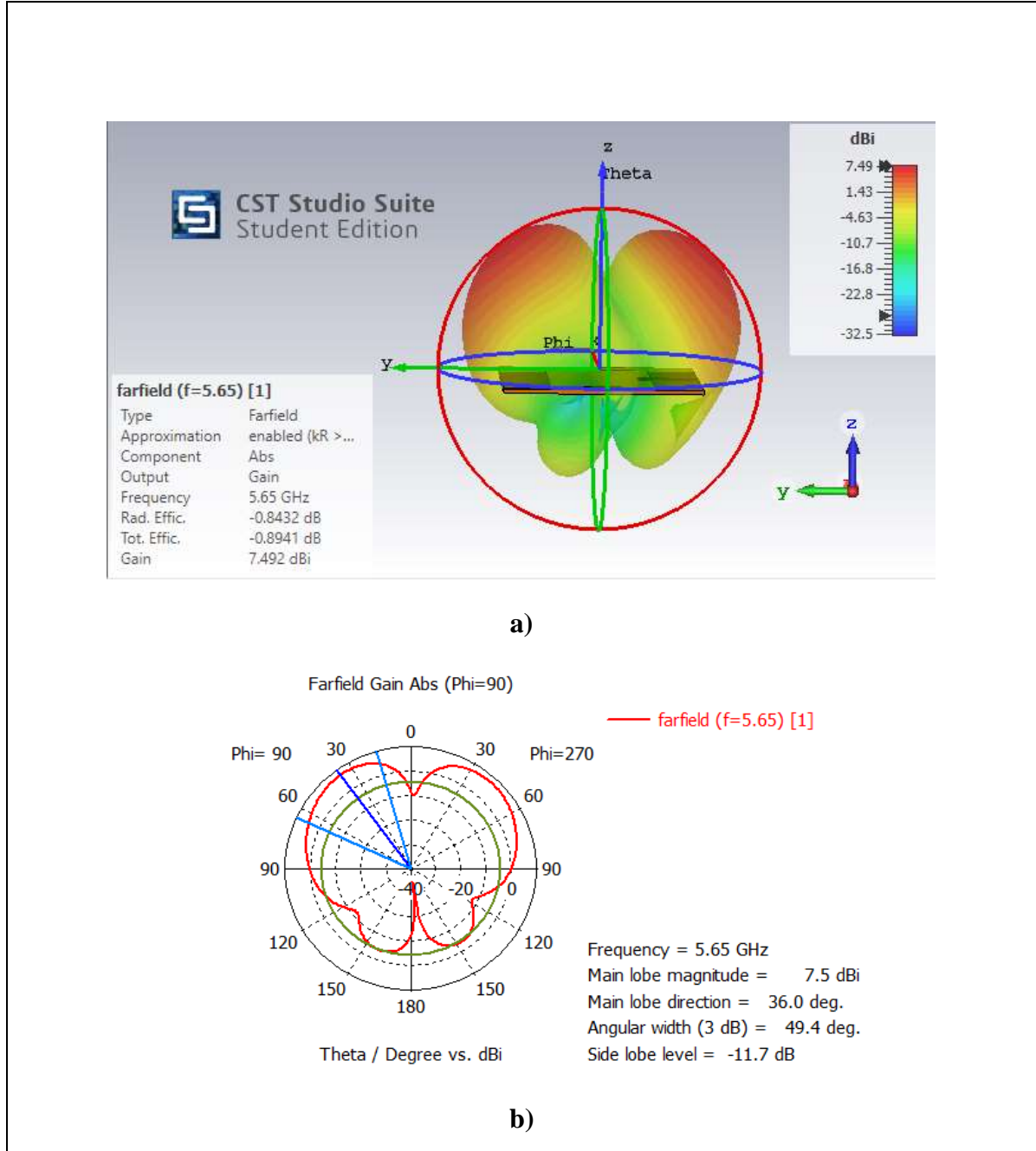
$h=1$ mm için; geri dönüş kaybı $S_{11}=-21,54$ dB, çalışma frekansı $f_c=5,65$ GHz, üst frekans değeri $f_u=5,70$ GHz, alt frekans değeri $f_a=5,59$ GHz’dir. Elde edilen bu parametreler dikkate alınarak bant genişliği (BG) değeri 110 MHz olarak hesaplanmıştır. 5,65 GHz merkez frekansında 1 mm alttaş kalınlığında elde edilen uzak alan ışınma örüntüsü Şekil 5’te verilmiştir. Görüldüğü üzere maksimum kazanç anten merkezinden 37° ’lik sapma ile 7,46 dBi olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. $h=1$ mm için 5,65 GHz 'de uzak alan ışıma örüntüsü a) 3D görünüm, b) Polar görünüm.

2.2.4. $h=1.2$ mm için performans analizi

Son olarak alttaş kalınlığı $h = 1,2$ mm alındığında geri dönüş kaybı $S_{11} = -23,66$ dB, çalışma frekansı $f_c = 5,65$ GHz, üst frekans değeri $f_{\bar{u}} = 5,68$ GHz, alt frekans değeri $f_a = 5,54$ GHz olarak bulunmuştur. Elde edilen bu yeni parametreler dikkate alınarak bant genişliği (BG) 140 MHz olarak hesaplanmıştır. 5.65 GHz çalışma frekansında 1,2 mm alttaş kalınlığında elde edilen uzak alan ışıma örüntüsü Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere maksimum kazanç 7,5 dBi olarak bulunmuştur.



Şekil 6. $h=1.2$ mm için 5.65GHz'de uzak alan ışıma örüntüsü a) 3D görünüm, b) Polar görünüm.

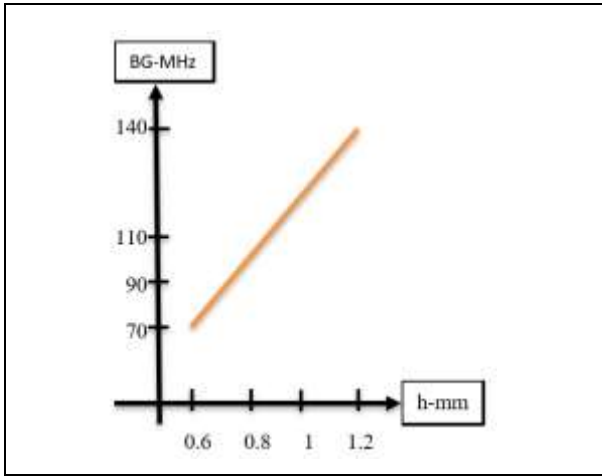
3. Bulgular ve Tartışma

Buraya kadar yapılan hesaplamalardan görüldüğü üzere Tablo 2'de verilen anten boyut parametreleri sabit tutulup alttaş olarak kullanılan Arlon AD 300C'nin kalınlığı (h) 0,2 mm adımlarla artırıldığında bant genişliği ve kazanç artarken geri dönüş kaybı da azalmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir.

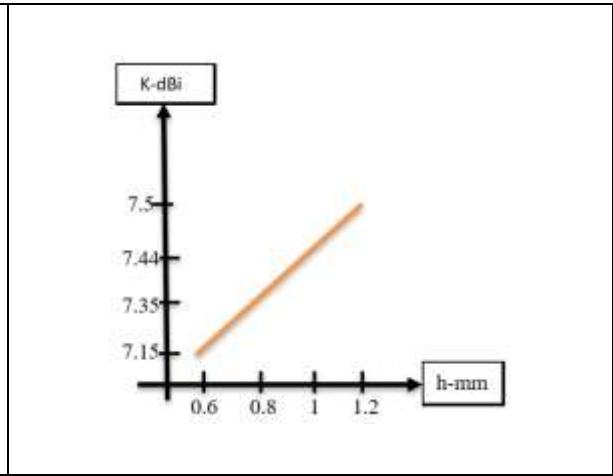
Tablo 3. Arlon AD300C nin kalınlık değerleri göre performans

Alttaş Kalınlığı	Bant Genişliği	Kazanç	S11
0.6 mm	70 MHz	7,15 dBi	-18,51dB
0.8 mm	90 MHz	7,35 dBi	-19,51 dB
1 mm	110 MHz	7,46 dBi	-21,54 dB
1.2 mm	140 MHz	7,50 dBi	-23,66 dB

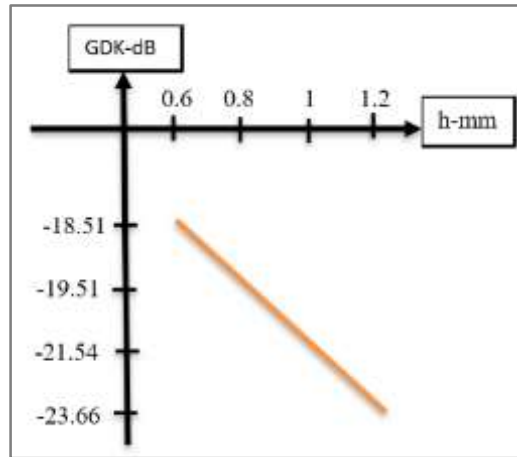
Bir mikroşerit anten için; kazancın ve bant genişliğinin yüksek olması, geri dönüş kaybının ve elektriksel tanjant kaybının küçük olması istenilen bir durumdur [15]. Çünkü daha geniş bant genişliği, daha çok kapsama alanı yani daha çok kullanıcı demektir. Yüksek kazanç ise uzak mesafe haberleşmesi için önem arz etmektedir [16, 17]. Ayrıca kullanılan malzemeden kaynaklanan kayıplar, anten performansını olumsuz yönde etkilediğinden küçük olması istenmektedir. Elde edilen bilgiler ışığında, alttaş kalınlığının belli değerlere kadar artırılmasıyla bant genişliği ve kazancın arttığı ve geri dönüş kaybının ise azaldığı görülmektedir. Ortaya çıkan bu gözlemler, alttaş kalınlığının mikroşerit yama anten performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Dolayısıyla bu çalışmada 5G haberleşmede kullanılmak üzere tasarlanan mikroşerit anten için en yüksek bant genişliği ve en düşük geri dönüş kaybı için alttaş kalınlığı 1,2 mm olduğu gözlemlenmiştir. Alttaş kalınlığı ile birlikte değişim gösteren; bant genişliği grafiği Şekil 7’de, kazanç değer grafiği Şekil 8’de ve geri dönüş kaybı S_{11} grafiği ise Şekil 9’da gösterilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi alttaş kalınlığının artmasına karşın; bant genişliği ve kazanç değerleri lineer olarak artmakta, geri dönüş kaybı değerleri ise lineer olarak azalmaktadır.



Şekil 7. Alttaş kalınlığı değişimi ile elde edilen bant genişliği grafiği.



Şekil 8. Alttaş kalınlığı değişimi ile elde edilen kazanç grafiği.



Şekil 9. Alttaş kalınlığı değişimi ile elde edilen geri dönüş kaybı S_{11} grafiği.

4. Sonuç

Bu çalışmada, 5G haberleşme için mikroşerit anten tasarımında Arlon AD300C dielektrik malzemesi kullanılarak bu alttaşın 4 farklı kalınlık değerinin anten performansına etkisi incelenip yorumlanmıştır. İlk olarak bilinen eşitliklerden faydalanılarak mikroşerit antenin yama kısmının genişlik ve uzunluk değerleri 5,65 GHz merkez çalışma frekansı için hesaplanmıştır. Daha sonra bu boyutlara göre CST Studio simülasyon programı yardımıyla anten modellenip optimizasyon sekmesi yardımıyla optimum

yama ve mikroşerit besleme hat boyutları bulunmuştur. Sonra bu yeni mikroşerit yama anten için dört farklı alttaş kalınlığı seçilerek dielektrik malzeme kalınlığının; bant genişliği, kazanç ve geri dönüş kaybı gibi anten performansına etkileri incelenmiştir. Simülasyon çalışmasında dört farklı alttaş kalınlığı seçimi 0.6, 0.8, 1 ve 1.2 olarak mm cinsinden yapılmış olup her değer için S_{11} grafiği ayrıca elde edilmiştir. Her bir alttaş kalınlığı için; üst ve alt kesim frekans değerleri bulunup buna göre bant genişliği hesaplanmış ve kazanç değerlerinin analizi için de uzak alan ışınma örüntüleri ayrı ayrı çizdirilmiştir. Sonuç olarak 5G haberleşme için 5,65 GHz çalışma frekansında önerilen bu mikroşerit yama antende kullanılan Arlon AD300C alttaşının en yüksek performansı kalınlık 1.2 mm iken 7,5 dBi'lık kazanç ve 140 MHz'lik bant genişliği olarak elde edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından FYL-2020-9265 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü teşekkürü borç biliriz.

Yazarların Katkısı

Bu çalışma yazarlardan Dr. Öğr. Üyesi Bilal TÜTÜNCÜ'nün danışmanlığında yürütülen Mahmut Kösem'in Yüksek Lisans Tezi'nin bir bölümüdür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] An W., Li Y., Fu H., Ma J., Chen W., Feng B. 2018. Low-profile and wideband microstrip antenna with stable gain for 5G wireless applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17 (4): 621-624.
- [2] Genc A., Basyigit I.B., Goksu T., Helhel S. 2017. Investigation of the performances of X-Ku band 3D printing pyramidal horn antennas coated with the different metals. In: 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), IEEE, 1012-1016.
- [3] Sandi E., Rusmono A.D., Vinda K. 2020. Ultra-wideband microstrip array antenna for 5G millimeter-wave applications. *Journal of Communications*, 15 (2): 198-204.
- [4] Sarade S.S., Ruikar S.D., Bhaladar H.K. 2020. Design of Microstrip Patch Antenna for 5G Application. In: *Techno-Societal 2018*, Springer, Cham, 253-261.
- [5] Tütüncü B. 2020. Microstrip Antenna for 5G Communication: Design and Performance Analysis. 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), In: IEEE, 1-4.
- [6] Mak K.M., Lai H.W., Luk K.M., Chan C.H. 2014. Circularly polarized patch antenna for future 5G mobile phones. *IEEE Access*, 2: 1521-1529.
- [7] Gaid A.S., Alhakimi A.M., Alasadee M.S., Ali A.A. 2019. Compact and Bandwidth Efficient Multi-band Microstrip Patch Antennas for 5G Applications. In *International Conference of Reliable Information and Communication Technology*, Springer, Cham, 663-672.
- [8] Chauhan B., Vijay S., Gupta S.C. 2014. Millimeter-wave mobile communications microstrip antenna for 5G-A future antenna. *International Journal of Computer Applications*, 99 (19): 15-18.
- [9] Mohan G.P., Chougale M.S. 2016. CPW Feed Microstrip Patch Antenna Design for Future 5G Communication. *International Journal for Technological Research in Engineering*, 4 (1): 49-51.
- [10] Agarwal A., Agarwal S. 2016. Simulation and Analysis of 5G Mobil Phones Antenna. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*, 7 (5): 7-12.

- [11] Amrutha G.M., Sudha T. 2018. Triple Band Antenna for 5G Applications. In: IEEE, International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 1650-1652.
- [12] Stutzman W.L., Thiele G.A. 2012. Antenna theory and design. John Wiley & Sons.
- [13] Balanis C.A. 2016. Antenna theory: analysis and design. John wiley & Sons.
- [14] Tütüncü B., Torpi H., İmeci Ş.T. 2019. Directivity improvement of microstrip antenna by inverse refraction metamaterial. Journal of Engineering Research, 7 (4): 151-164.
- [15] Tütüncü B. 2020. FSS Wall Design for High Isolation MIMO Antenna Array. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 9 (Özel Sayı): 148-151.
- [16] Park J., Jeong M., Hussain N., Rhee S., Park S., Kim N. 2019. A low-profile high-gain filtering antenna for fifth generation systems based on nonuniform metasurface. Microwave and Optical Technology Letters, 61 (11): 2513-2519.
- [17] Basyigit I., Dogan H., Genc A. 2019. Hizmet kalitesi değerlendirmesi: Türkiye'deki mobil ağ operatörlerinin optimizasyon performansı üzerine bir çalışması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17: 445-453.