



6G Ağlarında Dikdörtgen Yarıklı Kare Yama Antenin Farklı Dielektrik Malzemeler İçin Işıma Karakteristikleri Analizi

Analysis of Radiation Characteristics of a Rectangular Slotted Square Patch Antenna for Different Dielectric Materials at 6G Networks

¹Barış Gürçan HAKANOĞLU

¹Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 10200 Bandırma/Balıkesir, Türkiye

bhakanoglu@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 8 March 2024

Accepted : 19 April 2024

Keywords:

6G, Square Patch Antenna, THz Band, Wireless Communication, Slotted Patch Antenna

ABSTRACT

In this study, square patch antenna designs with 1 THz resonance frequency have been designed for 6G communication systems. Increases in antenna bandwidth have been achieved with rectangular slots etched on the antenna. Thanks to different dielectrics such as arlon, silicone, polyamide and polyimide used in the antenna structure, the responses of the proposed model for different materials at THz frequencies have also been investigated. As a result of the parametric analyses, a decrease in return loss has been observed at certain values of the rectangular slots for the antenna designed using Arlon material, while multi-frequency radiation has been obtained for some values of the rectangular slots in the patch antenna designed using silicone material. The antennas designed with polyamide and polyimide materials are the designs that showed the least variation in bandwidth for the proposed structure.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 8 Mart 2024

Kabul : 19 Nisan 2024

Anahtar Kelimeler:

6G, Kare Yama Anten, THz Bandı, Kablosuz Haberleşme, Yarıklı Yama Anten

ÖZET

Bu çalışmada 6G haberleşme sistemleri için 1 THz rezonans frekansına sahip kare yama anten tasarımları yapılmıştır. Anten üzerine kazınan dikdörtgen şekilli yarıklar ile anten bant genişliğinde artışlar sağlanmıştır. Anten yapısında kullanılan arlon, silikon, poliyamit ve poliyimit gibi farklı dielektrikler sayesinde önerilen modelin THz frekanslarında farklı malzemeler için tepkileri de araştırılmıştır. Yapılan parametrik analizler sonucunda arlon malzemesi kullanılarak tasarlanan anten için dikdörtgen şekilli yarıkların belirli değerlerinde geri dönüş kaybı azalması görülürken silikon malzemesi kullanılarak tasarlanan yama antende dikdörtgen yarıkların bazı değerleri için çoklu frekans ışımaları elde edilmiştir. Poliyamit ve poliyimit malzemeleri ile tasarlanan antenler ise önerilen yapı için bant genişliğinde en az değişiklik gösteren tasarımlar olmuştur.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

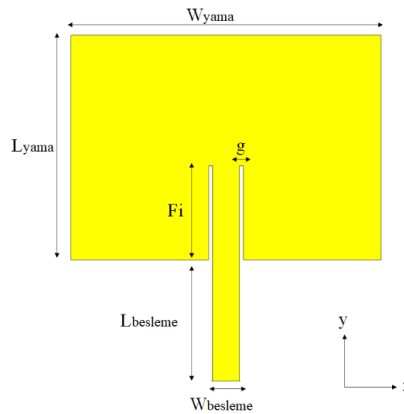
1. GİRİŞ

Gün geçtikçe artan büyüklükte kablosuz veri transferi ihtiyacı, araştırmacıları yeni haberleşme bantlarını kullanmaya zorlamaktadır. Günümüzde beşinci nesil (5G) haberleşme sistemleri ile milimetre dalga bandı kullanılırken 2030'lu yıllarda altıncı nesil (6G) haberleşme sistemleri THz bandının kullanıma girmesini sağlayacaktır [1]. Gelişmiş endüstriyel otomasyon, duyuların iletimi, sağlık teknolojileri ve dijital ikiz gibi çeşitli uygulamalar gigabit seviyesinde veri hızına ihtiyaç duyacak ve bu da THz bandı ile mümkün olacaktır [2]. THz bandı 300 GHz ile 10 THz frekansları aralığını kapsamaktadır [3]. Ayrıca alt THz bandı olarak isimlendirilen 100 GHz ile 300 GHz arası da bu bant içerisine girer [4]. Ek olarak 6G haberleşme bantları 5G haberleşme bantlarından keskin sınırlarla ayrılmayacaktır ve bu frekans bölgelerinin ihtiyaçları için anten tasarımları yine odak noktasında olacaktır. 6G orta band frekansları için önerilen 2.69 GHz ile 20.05 GHz aralığında UWB çalışma gösteren bir yama antene ışyan kısmında bardak şekli verilmiş ve üst kenarın ortasında bir dairesel yarık açılmıştır [5]. Bu sayede %152,8'lik bir kesirli bant genişliği elde edilmiştir. 5G ve 6G haberleşme sistemleri için UWB özellikli bir başka anten ise 23-150 GHz arasında %147,2'lik bir kesirli bant genişliği sergilemiştir [6]. 6G ağlarını kullanan otonom araçlar için yapılan çalışmada ise 77 GHz frekansında yeni ve yüksek kazançlı dış şeklinde bir yama anten tasarlanmıştır [7]. 6G için yama antenlerin tasarlanmasında esnek baskılı devreler de kullanılabilir. Böyle bir örnek WR08 bandı olarak da adlandırılan 90-140 GHz bandı için önerilmiştir [8]. THz bandı aşırı yüksek bir frekans bölgesi olduğundan bu aralıktaki malzeme davranışları mikrodalga frekans bölgesinden farklı olacaktır. Bu sebeple farklı malzemelerin antenlerde kullanımı da araştırılmıştır. D bandı (110-170 GHz) için bir anten cam aralayıcı üzerine ve bir anten dizisi ise yine aynı band için cam aralayıcı içine bir gömülü kap ile 6G kablosuz haberleşme uygulamaları için önerilmiştir. Böylece antenlerin entegre paketler içinde kullanımı için bir çözüm sunulmuştur [9-10]. 0.7 THz için önerilen anten yapısında ışyan kısımda bakır yerine grafen kullanılarak hem geri dönüş kaybında iki katına varan bir düşüş elde edilmiş hem de grafenin farklı değerdeki harici elektrik alan değerlerine verdiği tepkiler frekansa bağımlı olarak araştırılmıştır [11]. Ek olarak 2x2 dairesel bir dizi anten yapısında da grafen kullanılarak THz kısa mesafeli haberleşme için yeni bir yapı sunulmuştur [12].

Bu çalışmada 6G haberleşme sistemleri için 1 THz bandında yeni bir kare yama anten yapısı araştırılmıştır. Antenin ışyan kısmının üst kenarı üzerinde dikdörtgen yarıkların kazınarak antenin karakteristiklerinde iyileştirme elde edilmiştir. Farklı malzemelerin aynı tasarım prosedürüne tepkisini anlayabilmek için dielektrik malzeme olarak arlon, silikon, poliyamit ve poliyimit malzemeleri seçilmiştir. Anten üzerinde açılan yarıkların en ve boyları değiştirilerek parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Beklendiği şekilde performans artışı gözlenmiştir fakat bu iyileşmeler seçilen malzemeler için aynı oranda olmamıştır. Arlon malzemesi kullanılarak tasarlanan yama antende geri dönüş kaybı seviyelerinde iyileşme elde edilirken, silikon malzemesi kullanılarak tasarlanan antende yarıkların bazı değerlerinde çift frekansta ışma gözlenmiştir. Poliyamit malzemesi kullanılarak tasarlanan antende ise geri dönüş kaybı iyileşmesi ve bant genişliği artışı elde edilirken, poliyimit malzemesi kullanılarak tasarlanan antende sadece bant genişliği artışı olmuştur.

2. TASARIM

Çalışma için tasarlanan antenler Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS) yazılımı kullanılarak analiz edilmişlerdir [13]. Antenler için kullanılan dielektrik malzemeler arlon, silikon, poliyamit ve poliyimit olarak seçilmiştir. Bu malzemelerin seçiminde 6G haberleşme için literatüre sunulmuş çalışmalar örnek alınmıştır [14-17]. Mikroşerit antenlerde verimli ışmanın olması için dielektrik taban kalınlığı $h \ll \lambda_0$ ve kullanılan iletken kalınlığı $t \ll \lambda_0$ olmalıdır [18]. Dielektrik tabanların yükseklikleri mikroşerit antenlerin yayılım koşulları dikkate alınarak arlon, poliyamit ve poliyimit için 6 μm , silikon için 6.5 μm alınmıştır. Ek olarak ışmayı yapan bakır kısmının kalınlığı ise yine yayılım koşullarına göre ayarlanarak 1 μm alınmıştır.



Şekil 1. Referans anten tasarım parametreleri.

Bu çalışmada önerilen anten modeli için tasarım üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada referans anten modeli boyutları tasarım denklemlerine (1-4) göre belirlenmiştir. Daha sonra (5) ile kare yama anten için anten genişliği, anten uzunluğuna eşit alınmıştır. Bu tasarım Anten#1 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 1 referans anten yapısını ve tasarım parametrelerini göstermektedir. Anten besleme yöntemi olarak mikroşerit hat ile içeriden besleme tekniği kullanılmıştır. Burada L_{besleme} mikroşerit hattın boyunu, W_{besleme} hattın enini, F_i içeriden besleme hattının boyunu ve g ise içeriden besleme hattının enini göstermektedir. Bu parametreler 50Ω luk giriş empedansı için optimize edilmişlerdir. Tasarım parametreleri ve aşamaları 1 THz rezonans frekanslı her üç dielektrik malzeme ile tasarlanan antenler için aynıdır.

$$W_{\text{yama}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

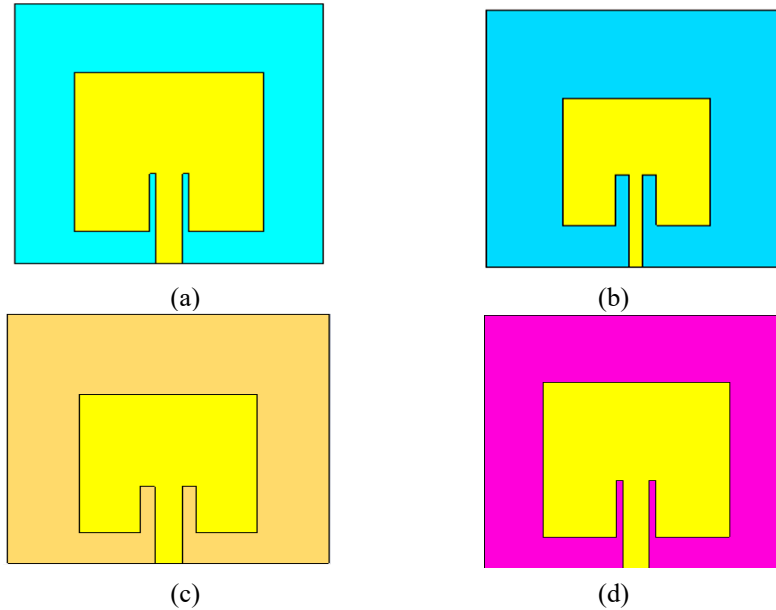
$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_{\text{yama}}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta L_{\text{yama}}}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W_{\text{yama}}}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W_{\text{yama}}}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L_{\text{yama}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L_{\text{yama}} \quad (4)$$

$$W_{\text{yama}} = L_{\text{yama}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (5)$$

Şekil 2a-d her dört anten için referans modeli göstermektedir. Her dört anten için kullanılan parametre değerleri ise Tablo 1-4'te görülmektedir.



Şekil 2. Dört farklı dielektrik malzeme için tasarlanan referans antenler, Anten#1, a) Arlon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, b) Silikon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, c) Poliyamit tabanı kullanılarak tasarlanan anten, d) Poliyimit tabanı kullanılarak tasarlanan anten.

Tablo 1. Arlon tabanı kullanılarak tasarlanan anten boyutları (μm).

| W_{yama} | L_{yama} | W_{taban} | L_{taban} | g |
|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----|
| 79,7 | 79,7 | 130 | 130 | 2,7 |
| F_i | W_{besleme} | L_{besleme} | t | h |
| 29 | 11 | 16 | 1 | 6 |

Tablo 2. Silikon tabanı kullanılarak tasarlanan anten boyutları (μm).

| W_{yama} | L_{yama} | W_{taban} | L_{taban} | g |
|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----|
| 42,5 | 42,5 | 86 | 86 | 4 |
| F_i | W_{besleme} | L_{besleme} | t | h |
| 17 | 4 | 14 | 1 | 6,5 |

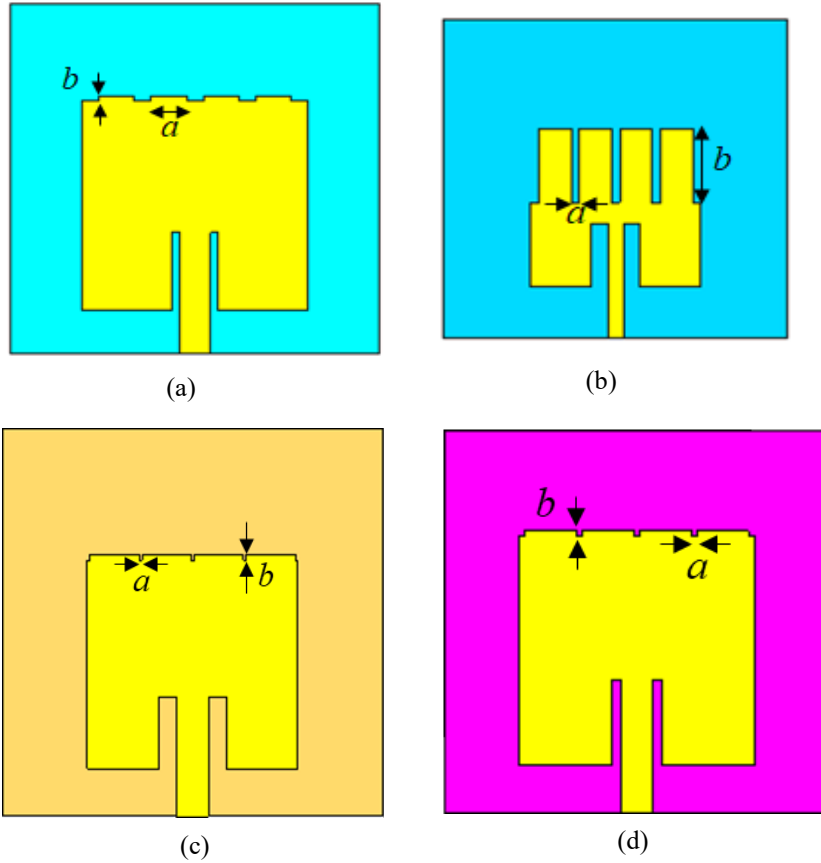
Tablo 3. Poliyamit tabanı kullanılarak tasarlanan anten boyutları (μm).

| W_{yama} | L_{yama} | W_{taban} | L_{taban} | g |
|------------|---------------|---------------|-------------|-----|
| 72 | 72 | 130 | 130 | 6 |
| F_i | $W_{besleme}$ | $L_{besleme}$ | t | h |
| 24 | 11 | 16 | 1 | 6 |

Tablo 4. Poliyimit tabanı kullanılarak tasarlanan anten boyutları (μm).

| W_{yama} | L_{yama} | W_{taban} | L_{taban} | g |
|------------|---------------|---------------|-------------|------|
| 79,7 | 79,7 | 130 | 130 | 2,86 |
| F_i | $W_{besleme}$ | $L_{besleme}$ | t | H |
| 29 | 11 | 16 | 1 | 6 |

İkinci aşamada antenin üst kenarında boyutları birbirine eşit beş adet dikdörtgen şekilli yarı -y yönüne doğru açılmıştır. Bu yarıkların en ve boyu parametrik analizler ile belirlenmiştir. Parametrik analizler, $1 \times 1 \mu\text{m}$ ' den başlayıp en ve boy yönünde artırılmıştır. Daha sonra anten geri dönüş kaybı en az veya anten bant genişliği en fazla olan değerler için bitirilmiştir. Bu yapı Anten#2 olarak isimlendirilmiştir. Şekil 3a-d'de dört farklı dielektrik malzeme için Anten#2 görülmektedir. Anten üzerine açılan yarıkların eni a parametresi ile boyu ise b parametresi ile gösterilmektedir.

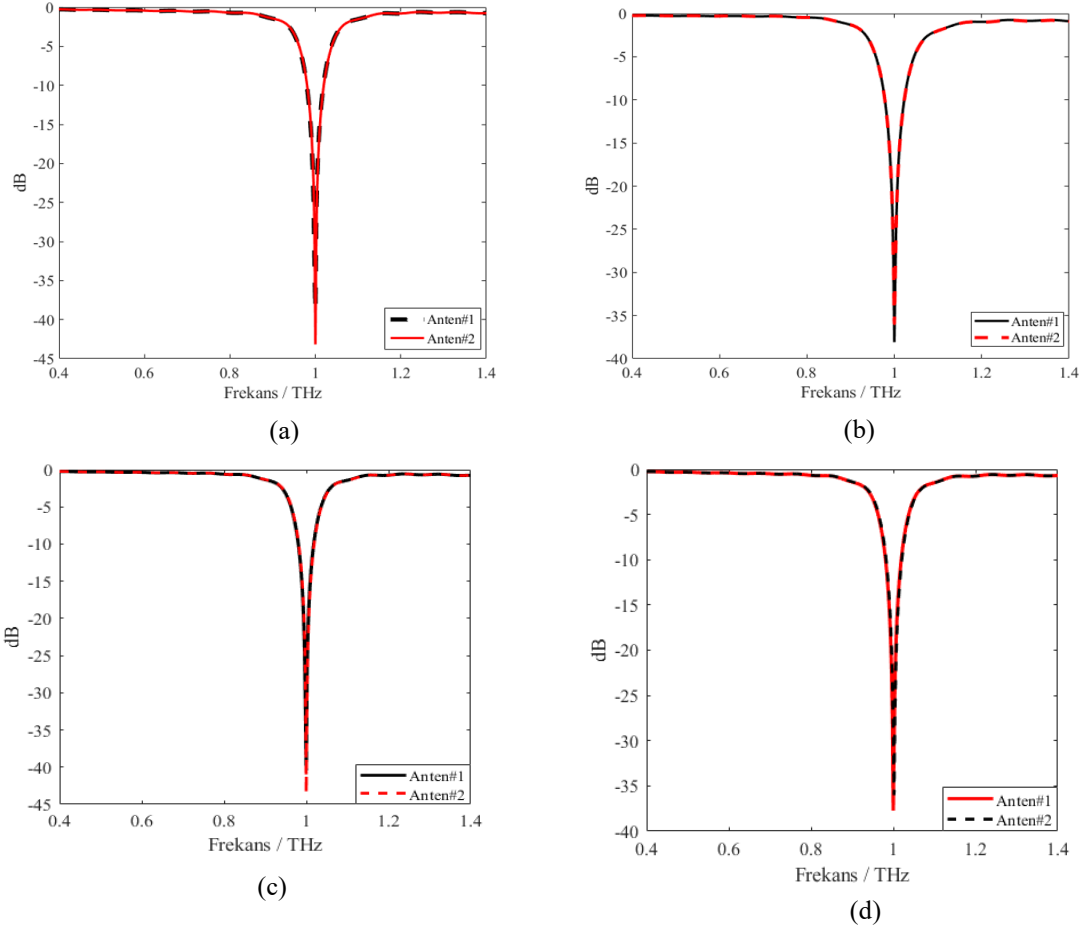


Şekil 3. Dikdörtgen yarıklar kazınmış anten yapıları, Anten#2, a) Arlon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, b) Silikon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, c) Poliyamit tabanı kullanılarak tasarlanan anten, d) Poliyimit tabanı kullanılarak tasarlanan anten.

3. SONUÇLAR

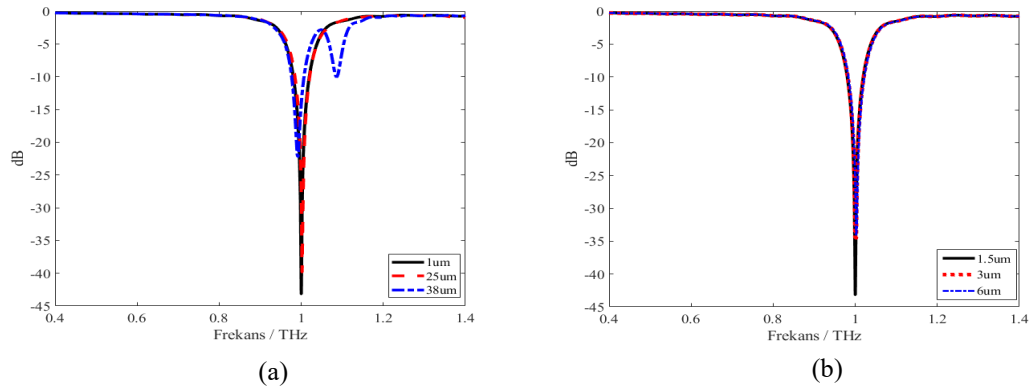
1 THz rezonans frekansına sahip referans antenler ve önerilen antenlerin frekans cevapları Şekil 4a-d'de verilmiştir. Frekans analizleri 0,4-1,4 THz aralığında gerçekleştirilmiştir. Çizimlerde Anten#1 referans anteni, Anten#2 ise önerilen anten modelini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde arlon tabanı için yapılan tasarımda referans anten geri dönüş kaybı -38,68 dB iken önerilen tasarımla beraber, dikdörtgen yarıklar boyutları $a=1,5 \mu\text{m}$ ve $b=1 \mu\text{m}$ değerlerini aldığı anda, -43,17 dB'e azalmıştır. Bant genişliğindeki artış ise 39 GHz'den 39,54 GHz'e olup 0,54 GHz'lik biri iyileşme sağlanmıştır. Silikon tabanı için yapılan tasarımda dikdörtgen yarıkların geri dönüş kaybı azalması ile ilgili çok önemli bir kazanç olmamıştır fakat bant genişliği artışı olarak olumlu yönde etki etmiştir. Yarıklar boyutları $a=0,05 \mu\text{m}$ ve $b=25 \mu\text{m}$ için bant genişliği artışı 44 GHz'den 45,22 GHz'e 1,22 GHz

olmuştur. Ek olarak poliyamit tabanı için yapılan tasarımda yarık boyutları $a=0,9 \mu\text{m}$ ve $b=2 \mu\text{m}$ için geri dönüş kaybı seviyesi $-40,47 \text{ dB}$ 'den $-43,41 \text{ dB}$ 'e azalmış, bant genişliğindeki artış ise $0,505 \text{ GHz}$ olmuştur. Poliyimit tabanı için yapılan tasarımda ise yarık boyutları $a=2,02 \mu\text{m}$ ve $b=1,64 \mu\text{m}$ için sadece bant genişliği artışı sağlanmış, referans antende $38,184 \text{ GHz}$ olan bant genişliği, önerilen tasarım için $38,578 \text{ GHz}$ olmuş ve $0,394 \text{ GHz}$ 'lik bir artış elde edilmiştir.



Şekil 4. Anten#1 ve Anten#2 frekans cevabı, a) Arlon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, b) Silikon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, c) Poliyamit tabanı kullanılarak tasarlanan anten, d) Poliyimit tabanı kullanılarak tasarlanan anten.

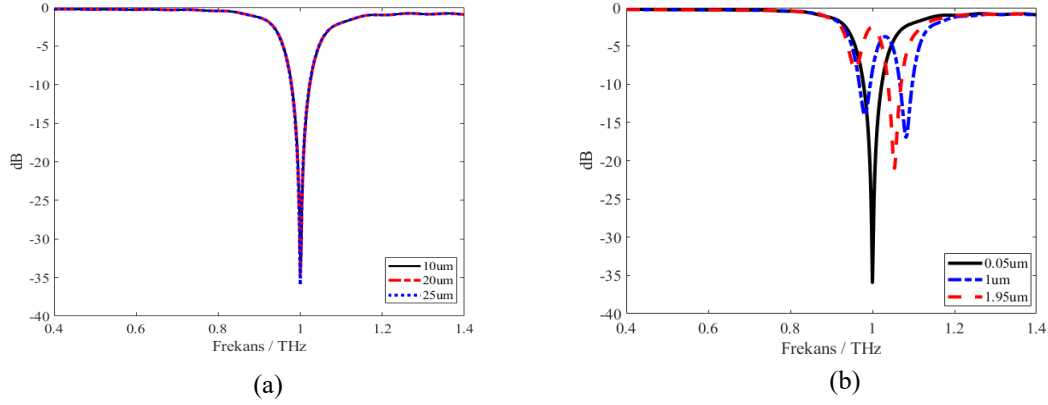
Dikdörtgen yarıkların her bir malzeme için boyut değişimlerinin etkileri parametrik analizlerle belirlenmiştir. En iyi sonucun alındığı değerlerden belirli adımlarla yarıkların boyutları artırılıp azaltılarak sonuçlar incelenmiştir. Bu sonuçlar arlon tabanı için Şekil 5a-b'de görülmektedir. Dikdörtgen yarıkların boyutlarının -y eksenı boyunca değişimi antenin frekans tepkisinde önemli değişikliklere yol açmıştır. Bu değerin artırılması geri dönüş



Şekil 5. Arlon tabanı için dikdörtgen yarıkların parametrik analizi, a) $a=1,5 \mu\text{m}$ için $b=1 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$ ve $38 \mu\text{m}$, b) $b=1 \mu\text{m}$ için $a=1,5 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ ve $6 \mu\text{m}$.

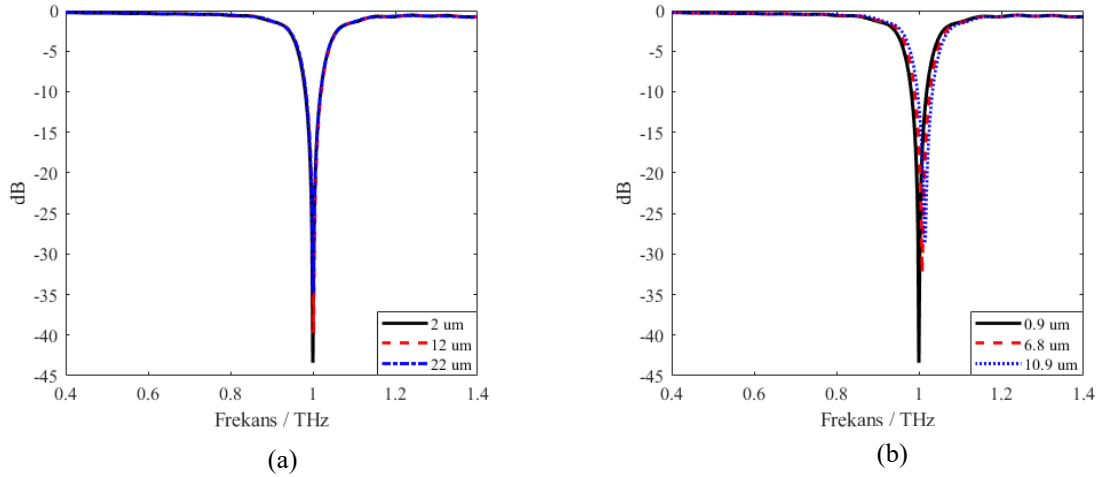
kayıplarında artışa yol açarken, 38 μm için ikinci bir rezonans oluşumu dikkat çekmiştir. Fakat bu rezonans geri dönüş kaybı minimum değeri -10 dB'yi aşmadığından anten için çoklu frekans yayılımı yapar sonucuna varılamamıştır. Parametrik analizlerde dikdörtgen yarıkların boyu sabit tutulup, eni $\pm x$ yönünde değiştirildiğinde ise sadece geri dönüş kaybında değişimler gözlenmiştir. Yarık eni boyutu arttıkça geri dönüş kaybında artışlar olmuştur.

Şekil 6a-b silikon taban malzemesi ile tasarlanan yama anten için yarık parametrik analiz sonuçlarını göstermektedir. Silikon için yarıkların eni sabit, boyu -y eksenı yönünde artırıldığında rezonans frekansında herhangi bir değişme yaşanmazken, geri dönüş kayıplarında çok küçük değişimler görülmüştür. Yarıkların boyu 25 μm 'de sabit tutulup enleri $\pm x$ yönünde değiştirildiğinde rezonans frekansında kaymalar olmuş ve $a=1 \mu\text{m}$ değeri için 0.982 THz ve 1.082 THz frekanslarında çoklu ışımaya elde edilmiştir.



Şekil 6. Silikon tabanı için dikdörtgen yarıkların parametrik analizi, a) $a=0,05 \mu\text{m}$ için $b=10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ ve $25 \mu\text{m}$, b) $b=25 \mu\text{m}$ için $a=0,05 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ ve $1,95 \mu\text{m}$.

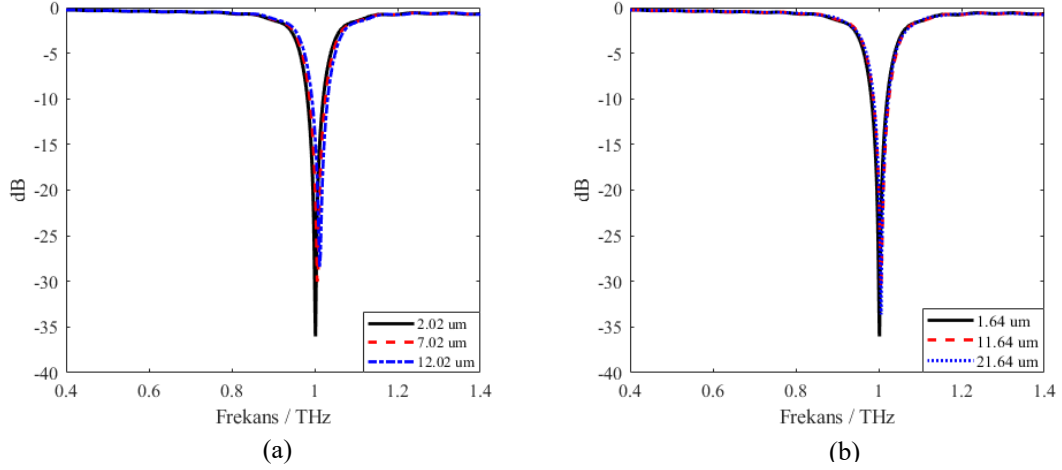
Şekil 7a-b poliyamit taban malzemesi ile tasarlanan yama anten için yarık parametrik analiz sonuçlarını göstermektedir. Poliyamit için hem yarık eni sabit tutulup boyu artırıldığında hem de yarık boyu sabit tutulup eni artırıldığında geri dönüş kaybı seviyesi olumsuz etkilenmiştir. En iyi sonuçlar $a=0,9 \mu\text{m}$ ve $b=2 \mu\text{m}$ değerleri için elde edilmiştir.



Şekil 7. Poliyamit tabanı için dikdörtgen yarıkların parametrik analizi, a) $a=0,9 \mu\text{m}$ için $b=2 \mu\text{m}$, $12 \mu\text{m}$ ve $22 \mu\text{m}$, b) $b=2 \mu\text{m}$ için $a=0,9 \mu\text{m}$, $6,8 \mu\text{m}$ ve $10,9 \mu\text{m}$.

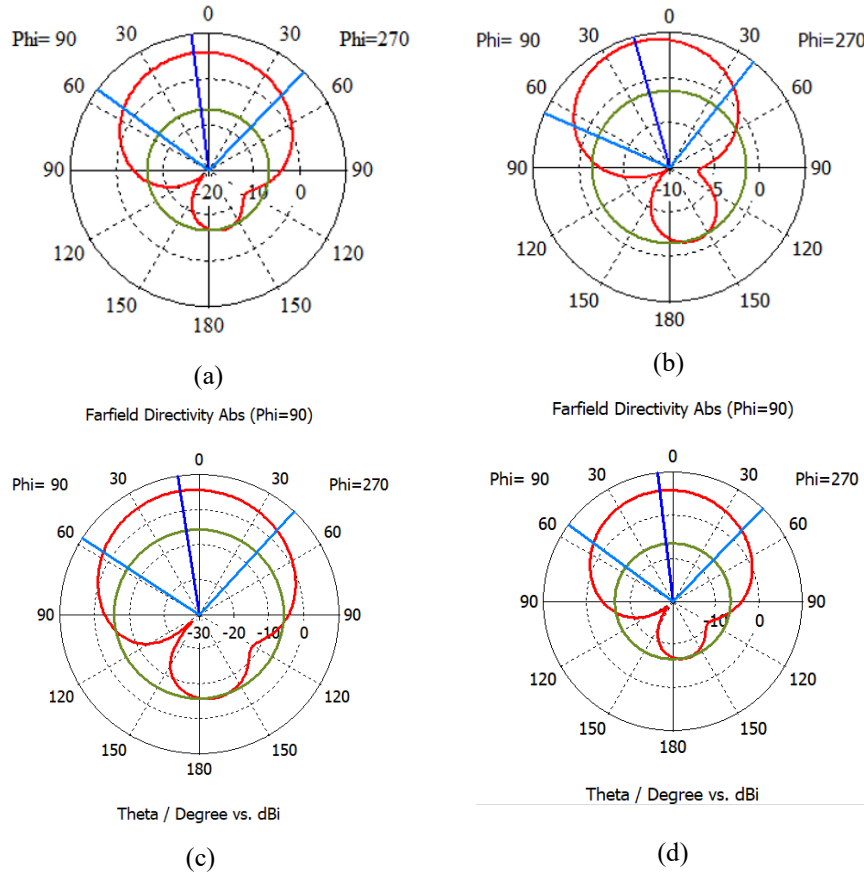
Şekil 8a-b poliyimit taban malzemesi ile tasarlanan yama anten için yarık parametrik analiz sonuçlarını göstermektedir. Poliyimit için hem yarık eni sabit tutulup boyu artırıldığında hem de yarık boyu sabit tutulup eni artırıldığında geri dönüş kaybı seviyesi olumsuz etkilenmiştir. En iyi sonuçlar $a=1,64 \mu\text{m}$ ve $b=2,02 \mu\text{m}$ değerleri için elde edilmiştir.

Şekil 9a-d önerilen antenler için uzak alan ışın diyagramlarını göstermektedir. Arlon ve poliyimit taban malzemesi ile tasarlanan antenlerin ana kulak yönündeki ışın şiddeti 5,82 dBi olurken poliyamit malzemesi kullanılarak tasarlanan antenin ana kulak yönündeki ışın gücü 5,67 dBi olmuştur. Ek olarak silikon malzemesi



Şekil 8. Poliyimit tabanı için dikdörtgen yarıkların parametrik analizi, a) $a = 1,64 \mu\text{m}$ için $b = 2,02 \mu\text{m}$, $7,02 \mu\text{m}$ ve $12,02 \mu\text{m}$, b) $b = 2,02 \mu\text{m}$ için $a = 1,64 \mu\text{m}$, $11,64 \mu\text{m}$ ve $21,64 \mu\text{m}$.

ile tasarlanan antenin ana kulak yönündeki ışınması $4,37 \text{ dBi}$ olmuştur. Yan kulak seviyesinde ise silikon ile tasarlanan anten daha iyi bir performans göstermiştir. Arlon ve poliyimit ile tasarlanan antenlerin yan kulak değerleri $-12,4 \text{ dB}$ ve poliyamit mazlemesi ile tasarlanan antenin yan kulak seviyesi $-11,4 \text{ dB}$ olurken, silikon ile tasarlanan antenin yan kulak değeri $-5,8 \text{ dB}$ olmuştur.



Şekil 9. Önerilen antenlerin rezonans frekansındaki uzak alan ışınma diyagramları, a) Arlon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, b) Silikon tabanı kullanılarak tasarlanan anten, c) Poliyamit tabanı kullanılarak tasarlanan anten, d) Poliyimit tabanı kullanılarak tasarlanan anten.

4. SONUÇ

Bu çalışmada 6G haberleşme sistemleri için bir kare yama antenin farklı dielektrik malzemelere ve dikdörtgen yarıklara tepkisi karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Anten üst kenarı üzerinde dikdörtgen yarıklar açılarak frekans tepkisi analiz edilmiştir. Önerilen yapı arlon, silikon, poliyamit ve poliyimit gibi dört farklı dielektrik

malzeme için aynı tasarım yolu izlenerek parametrik analizler yapılmış ve THz bölgesindeki sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her dört malzeme ile tasarlanan antenlerde aynı tasarım yöntemi izlendiği halde antenlerin frekans tepkileri farklı olmuştur. Silikon ile tasarlanan antende yarıkların belli değerlerinde çoklu ışınım elde edilirken geri dönüş kaybı seviyesinde çok fazla değişim gözlenmemiştir. Arlon ile yapılan tasarımda ise rezonans frekansında değişim olmazken geri dönüş kaybı seviyelerinde önemli farklar oluşmuştur. Poliyamit ve poliyimit malzemelerinde ise yapılan modifikasyonlar ile hem bant genişliği hem de geri dönüş kaybı seviyeleri için çok büyük değişiklikler gözlenmemiştir. Sonuç olarak bu çalışma 6G frekanslarında tasarlanacak antenler için yapılan modifikasyonların farklı malzemelerdeki tepkileri için araştırmacılara fikir verecektir.

Yazar Katkıları

Yazar, makalede çalışılan konunun belirlenmesi, literatür çalışması, makalenin yazılması, deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi süreçlerinin tamamını gerçekleştirmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

KAYNAKÇA

- [1] K. Rikkinen, P. Kyosti, M.E. Leinonen, M. Berg, and A. Parssinen, "THz Radio Communication: Link Budget Analysis toward 6G", IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 11, pp. 22-27, 2020.
- [2] S. Salous, K. Haneda, and V. Degli-Esposti, "5G to 6G: A paradigm shift in radio channel modeling", Radio Science, vol. 57, no. 7, p. e2022RS007447, 2022.
- [3] R. Pant, and L. Malviya, "THz antennas design, developments, challenges, and applications: A review", International Journal of Communication Systems, vol. 36, no. 8, p. e5474, 2023.
- [4] J. Federici, and L. Moeller, "Review of terahertz and subterahertz wireless communications", Journal of Applied Physics, vol. 107, no. 11, 2010.
- [5] Y.M. Hyasat, and Y.S. Faouri, "A Glass Shaped with Circular Slot Patch Antenna for UWB Applications and Potential 6G Wireless Communications", 4th IEEE Middle East and North Africa COMMUNICATIONS Conference (MENACOMM), pp. 106-110, 2022.
- [6] A.I. Omi, M.S. Sagar, M.M.H. Sajeeb, B. Younes, T. Karacolak, and P. Sekhar, "A New Analytically Designed UWB Microstrip Patch Antenna for Future 5G and 6G Applications", United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), pp. 62-63, 2023.
- [7] M.F. Foysal, S. Mahmud, and A.K.M. Baki, "A novel high gain array antenna design for autonomous vehicles of 6g wireless systems", International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST), pp. 1-5, 2021.
- [8] M.H. Maktoomi, Z. Wang, H. Wang, S. Saadat, P. Heydari, and H. Aghasi, "A sub-terahertz wideband stacked-patch antenna on a flexible printed circuit for 6G applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 11, 10047-10061, 2022.
- [9] X. Jia, X. Li, S. Erdogan, K.S. Moon, J.W. Kim, K.Q. Huang, M. and Swaminathan, "Antenna With Embedded Die in Glass Interposer for 6G Wireless Applications", IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 13, no. 2, pp. 219-229, 2023.
- [10] K.Q. Huang, and M. Swaminathan, "Antenna Array on Glass Interposer for 6G Wireless Communications", IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 13, no. 2, pp. 211-218, 2023.
- [11] M.K. Azizi, M.A. Ksiksi, H. Ajlani, and A. Gharsallah, "Terahertz graphene-based reconfigurable patch antenna", Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 71, pp. 69-76, 2017.
- [12] G.K. Pandey, T.R. Rao, and S. Mondal, "Design and Analysis of Graphene based Octagonal Short-angular Circular Patch MIMO Antenna for Terahertz Communications", 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), pp. 1-4, 2022.
- [13] Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS), Ver. 2016, Framingham, MA, USA, 2016.
- [14] S. Singhal, "Ultrawideband elliptical microstrip antenna for terahertz applications", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 61, no. 10, pp. 2366-2373, 2019.
- [15] M.A. Chung, B.R. Chuang, "Design a Broadband U-Shaped Microstrip Patch Antenna on Silicon-Based Technology for 6G Terahertz (THz) Future Cellular Communication Applications", 10th International Conference on Internet of Everything, Microwave Engineering, Communication and Networks (IEMECON), pp. 1-5, 2021.
- [16] R. Bala, A. Marwaha, "Characterization of graphene for performance enhancement of patch antenna in THz region", Optik, vol. 127, no. 4, pp. 2089-2093, 2016.
- [17] M.K. Azizi, M.A. Ksiksi, H. Ajlani, A. Gharsallah, "Terahertz graphene-based reconfigurable patch antenna", Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 71, pp. 69-76, 2017.
- [18] A. Balanis, "Antenna Theory", John Wiley&Sons, Hoboken, New Jersey, USA, pp. 212-217, 2005.