

Polarizasyonu Yeniden Yapılandırılabilir Grafen Tabanlı Terahertz Anten Tasarımı

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 29.05.2024

Kabul/Accepted: 09.10.2024

Yayımlandı/Published: 07.02.2025

Polarization Reconfigurable Graphene-Based THz Antenna Design

Ersin BULAN* , Miraç Dilruba KARAKAŞ 

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye



© Afyon Kocatepe Üniversitesi

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, mikroşerit antenin ışına sağlayan yama kısmında grafen malzemesi kullanılarak yeniden yapılandırılabilir polarizasyonlu anten tasarımı önerilmiştir. Önerilen anten 1.65 THz çalışma frekansında, üçgen mikroşerit anten konfigürasyonu kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen antenin -10 dB referansında empedans bant genişliği yaklaşık %12.2, yönlülük değeri 4.13 dBi ve yönlü uzak alan ışına örüntüsüne sahiptir. Yeniden yapılandırılabilir yama antenin konfigürasyonu, grafenin kimyasal potansiyeli değiştirilerek dairesel polarizasyon, eliptik polarizasyon ve lineer polarizasyon elde edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. DC bias gerilimi uygulanarak oluşturulan harici elektrik alanı ile grafenin fermi enerji seviyesi doğrudan etkilenmektedir. Çeşitli fermi enerji seviyeleri sayesinde 1.65 THz'de eksenel oran 1.23 dB, 6.50 dB ve 40 Db değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafen; THz Anten; Polarizasyon; Yeniden Yapılandırılabilir Anten

Abstract

In this study, a reconfigurable polarization antenna design was proposed using graphene material in the radiating patch part of a microstrip antenna. The proposed antenna was designed at an operating frequency of 1.65 THz using a triangular microstrip antenna configuration. The proposed antenna has an impedance bandwidth of approximately 12.2% at the -10 dB reference, a directivity value of 4.13 dBi, and an directional far-field radiation pattern. The configuration of the reconfigurable patch antenna was designed to achieve circular, elliptical, and linear polarization by changing the chemical potential of graphene. The Fermi energy level of graphene is directly affected by the external electric field created by the application of a DC bias voltage. Different Fermi energy levels allow the achievement of axial ratio of 1.23 dB, 6.50 dB, and 40 dB at 1.65 THz.

Keywords: Graphene; THz Antenna; Polarization; Reconfigurable Antenna

1. Giriş

Son yirmi yılda veri trafiği, veri iletişim ihtiyacının sürekli artması sebebiyle benzeri görülmemiş bir hızla artış göstermektedir. Kablosuz cihazlar, yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti, Metaverse, Makine Öğrenimi gibi yeni gelişen teknolojiler ve sistemler, yüksek iletişim hızları gerektirmektedir (Xu ve Skorobogatiy 2022). Kablosuz ağların hızla gelişmesi ile kullanıcılar daha geniş frekans bandına ve yüksek veri hızına ihtiyaç duymaktadır. Bu talep, hem daha büyük bant genişliği hem de daha kompakt iletişim bileşenleri gerektirdiğinden, iletişim uygulamalarını sürekli olarak daha yüksek çalışma frekanslarına (daha kısa dalga boyları) doğru sürüklenmektedir. Modern kablosuz iletişim dünyası, daha geniş bant genişliği ile daha yüksek veri hızı sağladığı için Terahertz (THz) spektrumuna doğru ilerlemektedir (Federici ve Moeller 2010). Kablosuz iletişim için geliştirilmiş kanal kapasitesi ve yüksek veri hızı gerekli olduğundan Tera-bit/sn (Tbps) hızında veri transferi yapabilen THz aralığında çalışan antenli iletişim sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç

doğrultusunda çeşitli anten tasarımları literatüre kazandırılmıştır (Xu ve Skorobogatiy 2022, Das ve Varshney 2021, Upendar ve Kumar 2021). THz dalgalarını göndermek ve almak için antenlerin küçük boyutlu ve yüksek hassasiyetli olması talep edilen önemli özelliklerdendir (Aliqab vd. 2022). THz frekans aralığı düşük dalga boyuna sahip olması sebebiyle minyatürleştirmeye uygunluğundan dolayı mikroşerit yama anteni dikkat çeken bir anten çeşididir.

THz anten uygulamalarında, istenen performans göre çeşitli metaller kullanılmaktadır. (Tamagnone ve ark. 2012). Bakır, THz bandındaki anten uygulamaları için en fazla tercih edilen metaldir (Keller ve ark. 2014). Ancak, THz frekanslarında bakır kullanımı ile düşük hareketlilik, dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük güç işleme kapasitesi, zayıf empedans uyumu ve önemli ölçüde zayıflama gibi dezavantajların ortaya çıktığı görülmektedir (Shalini ve Ganesh Madhan 2021). Bunun nedeni mikrodalga frekansında iletkenliğin gerçek kısmının önemli olması ve dolayısıyla yüzey direncinin baskın olmasıdır. Tasarımlarda kullanılan geleneksel

malzemelerin yanı sıra, THz dalgaları için gelecek vaat eden, iletkenliğin hem gerçel hem de imajiner kısmı üzerinde dinamik kontrol sağlanabilen ve iletkenliği büyük ölçüde frekansa bağlı olarak değişkenlik gösteren, 2 boyutlu bir malzeme olan grafen önemli bir malzemedir. Geleneksel metallere kullanımında ortaya çıkan dezavantajların giderebilmesi için grafen tabanlı antenler, metal antenlere alternatif olarak kullanılmaktadır. Grafen, altın ve gümüş gibi diğer soy metallere kıyasla çok yüksek iletkenliğe ve düşük plazma frekansına sahip iki boyutlu bir malzemedir. Bu nedenle, grafen tabanlı antenlerin THz frekanslarında elektromanyetik dalgaları verimli bir şekilde yayması beklenmektedir. Ayrıca ayarlanabilir özelliklere sahip olduğu için anahtarlama görevinde kullanılarak anten performanslarında güçlendirici etki ortaya çıkarmaktadır.

Kiani vd. (2021) ve Yaghoobi vd. (2022) gibi literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde, grafen tabanlı mikroserit yama antenlerin konfigürasyonu üzerinde farklı DC gerilimi uygulaması ile anahtarlama yapılarak dairesel ve lineer polarizasyon arasında geçişler elde edilmiştir. Diğer taraftan Madhan ve Nissiyah (2021), Dash ve Patnaik (2020) gibi farklı araştırmalar incelendiğinde ise grafen tabanlı yama antenlere farklı DC gerilimi uygulanarak kimyasal potansiyelin değiştirilmesi ile antenin rezonans frekansının kaydırılması sağlanmıştır. Önerilen anten konfigürasyonu eşkenar üçgen şeklinde tasarlandı. Tasarlanan anten 1.65 THz merkez frekansında analiz edildi. Analizi yapılan frekans, tıp alanında THz kanserli hücrelerin görüntülenmesi ve tedavisi için kullanılmaktadır (Polat vd 2022). Simülasyonlar CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Antene ait performans parametreleri detaylı olarak sunulmuştur.

Yazarların bilgisine göre üç polarizasyon çeşidinin tek anten konfigürasyonu üzerinde grafenin ayarlanabilirlik özelliği kullanılarak elde edildiği bir çalışma ile karşılaşılmadı. Önerilen çalışma ile literatüre grafen tabanlı yenilikçi bir anten kazandırılarak, tek konfigürasyon üzerinde grafen fermi enerji seviyesi değiştirilerek doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyon elde edildi.

2. Grafenin THz Bandında Modellenmesi

Grafen, dahili olarak kimyasal doping ve harici olarak elektriksel kontrol yöntemleri ile ayarlanabilen karmaşık iletkenliğe sahip sıfır enerji aralıklı bir yarı iletkenidir (Naghdehforushha ve Moradi 2017). Grafen iletkenliğinin izotropik olduğu ve herhangi bir manyetik alana maruz kalmadığı varsayılarak manyetostatik-biasin olmadığı bir durumda Kubo formülüne dayalı olarak grafen yüzey iletkenliği, intraband σ_{intra} (bant içi) ve interband σ_{inter}

(bantlar arası) olmak üzere iki bölümden oluşur (Jabbarzadeh vd. 2019).

$$\sigma_s = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (1)$$

Fiziksel olarak, interband elektron-boşluk çifti oluşturma ve rekombinasyon olaylarına karşılık gelir. Intraband ise serbest taşıyıcı iletkenliğine bağlıdır. Grafenin iletkenliği hesaplamak için Kubo formülü kullanılmaktadır (Jabbarzadeh vd. 2019).

$$\sigma_{inter} = \frac{-je^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - j\tau^{-1})\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j\tau^{-1})\hbar} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{intra} = \frac{-e^2 k_B T}{\pi\hbar^2} \left(\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(-e^{\mu_c/(k_B T)} + 1) \right) \frac{j}{\omega - j\tau^{-1}} \quad (3)$$

2. ve 3. formüllerde, μ_c grafenin kimyasal potansiyeli veya Fermi enerjisi (E_f)'dir ve grafen üzerinde bir bias (polarlama) gerilimi veya elektrostatik bir polarlama kullanılarak ayarlanabilir. T Sıcaklığı, e elektronun yük sayısını, $\hbar = h/(2\pi)$ azaltılmış Planck sabitini (h, Planck sabit), τ dinlenme süresini, ω açısal frekansı ve k_B Boltzmann sabitini ifade eder (Jabbarzadeh vd. 2019).

THz frekans aralığında, bir fotonun enerjisi, fermi enerjisine kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir (Varshney ve ark. 2018). Bu nedenle, THz aralığında grafenin bantlar arası (interband) σ_{inter} iletkenlik değeri, bant içi (intraband) σ_{intra} iletkenliğine kıyasla oldukça düşüktür ve ihmal edilebilir. THz frekans bandında foton enerjisi Fermi enerjisi E_f 'den çok daha azdır ($E_f \gg k_B T$), bu nedenle, grafenin iletkenliği Drude modeli ile basitleştirilmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$\sigma(\omega, E_f, \tau) = \frac{-e^2 E_f}{\pi\hbar^2} \frac{j}{\omega - j\tau^{-1}} \quad (4)$$

4. eşitlikten açıkça görüldüğü gibi grafenin intraband iletkenliği μ_c ve τ ile ciddi bir şekilde bağlantılıdır. Grafen iletkenliği, kimyasal potansiyel tarafından değiştirilebilir ve bu kimyasal potansiyel, doplanma konsantrasyonunu değiştirerek veya harici elektrostatik bir gerilim uygulayarak değiştirilebilir. Dinlenme süresi veya gevşeme süresi τ , grafen iletkenliğinin temel parametresidir. Grafen örneğinin kalitesine bağlıdır ve kimyasal potansiyel fonksiyonu olarak değiştirilir.

Grafen kimyasal potansiyeli μ_c , 0-1 eV aralığında bir değer almaktadır (Sharma ve Dominic, 2018). μ_c , yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır ve elektrostatik bias ile kontrol edilir. V_g bias (polarlama) gerilimi tanımlayan μ_c veya E_f 'yi ile aşağıdaki formül ile hesaplanır.

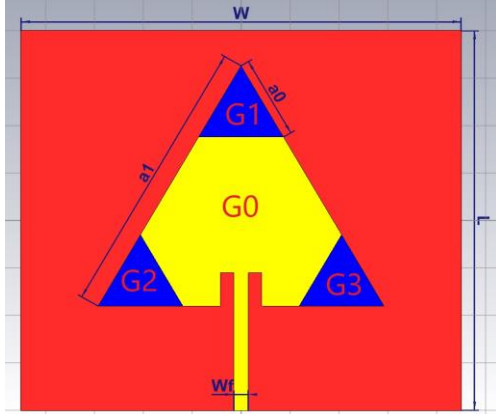
$$E_f = \mu_c \approx \hbar V_f \sqrt{\frac{\pi\epsilon_r\epsilon_0 V_g}{et_s}} \quad (5)$$

ϵ_0 boşluğun dielektrik geçirgenlik katsayısı, ϵ_r yalıtkan malzeme bağlı dielektrik geçirgenlik katsayısı, $V_f = 1,1 \times 10^6$ m/s grafenin Fermi hızı, t_s grafen ve elektrot arasındaki (altaş) kalınlık ve V_g grafen üzerine uygulanan gerilimdir. Grafen, μ_c kimyasal potansiyeli 0 yapan DC gerilim değeri

ile dielektrik olarak işlev görür. Bununla birlikte, μ_c kimyasal potansiyeli sıfırdan farklı yapan DC gerilimi değeri ile polarlanırsa iletken olarak işlev görür.

2. Materyal ve Metot

Şekil 1'de tasarlanan grafen tabanlı mikroşerit yama antenin görüntüsü verilmiştir. Yama antenin ışımaya yapmayı sağlayan grafen iletken kısmı silisyumdoksit (SiO_2) katmanı üzerinde yer almaktadır. SiO_2 polimerik biyomalzeme olması ve alttaşa ayarlanabilir olma özelliği katmasından dolayı tercih edilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan Yama Antenin Geometrisi

Mikroşerit anten tasarımında tercih edilen dielektrik profillerin dielektrik sabitleri $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığında olmalıdır. Bu çalışmada 3.9 dielektrik katsayısına (ϵ_r) sahip SiO_2 seçilmiştir.

Dielektrik tabaka yüksekliği $t_p \ll \lambda_0$ olmak üzere

$$0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0 \quad (6)$$

aralığında seçilir. Bu tasarımda $0.55\mu\text{m} \leq h \leq 9\mu\text{m}$ aralığında olacak şekilde parametrelerin optimizasyonuna uygun gelen h kalınlığı belirlendi. SiO_2 alttaşı ise alttaşa aynı genişlik ve uzunluğa sahip t_g kalınlıklı grafen toprak yüzeyi üzerinde yer almaktadır.

Üçgen mikroşerit anten konfigürasyonunda a_1 kenar uzunluğu aşağıdaki denklemle hesaplanarak bulunur.

$$a = \frac{2c}{3f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

Toprak tabakasının genişlik ve uzunluğu Nakar (2004)'a göre alt tabaka kalınlığının yaklaşık altı katı kadar yama boyutlarından daha büyük olmalıdır.

$$W = 6 * h + a \quad (8)$$

$$L = 6 * h + \frac{a\sqrt{3}}{2} \quad (9)$$

6,7,8 ve 9 numaralı denklemlere göre mikroşerit yama antenin fiziksel boyutları belirlendi ve Çizelge 1'de gösterilmektedir.

Çizelge 1. Antenin fiziksel ölçüleri

Boyut	L	W	W _f	L _f	h	t _p	a ₀	a ₁
μm	80	90	3	22	4,50	0.785	17.32	58.37

Mikroşerit kare yama antenlerde farklı polarizasyon oluşturmada uygulanan iki yöntem vardır:

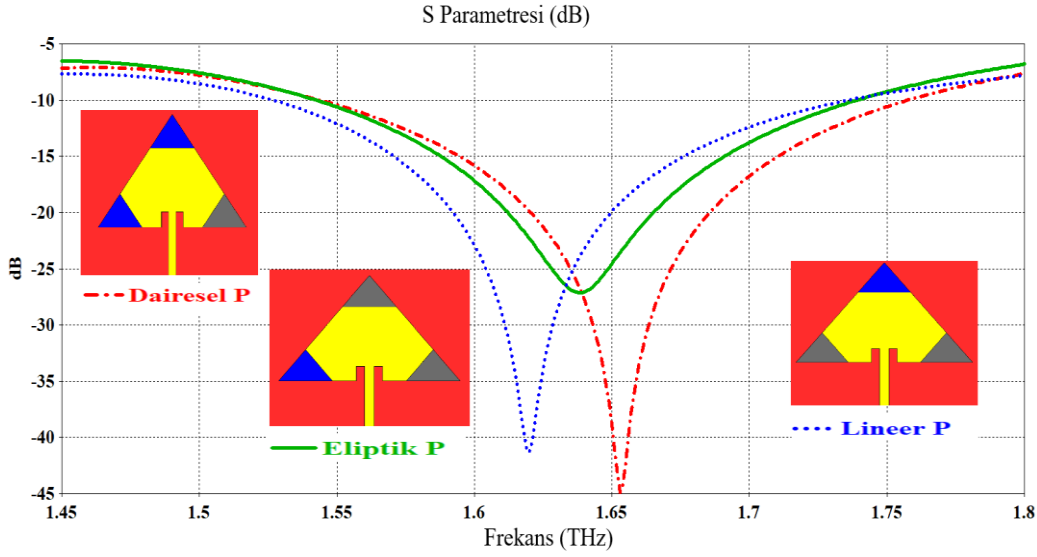
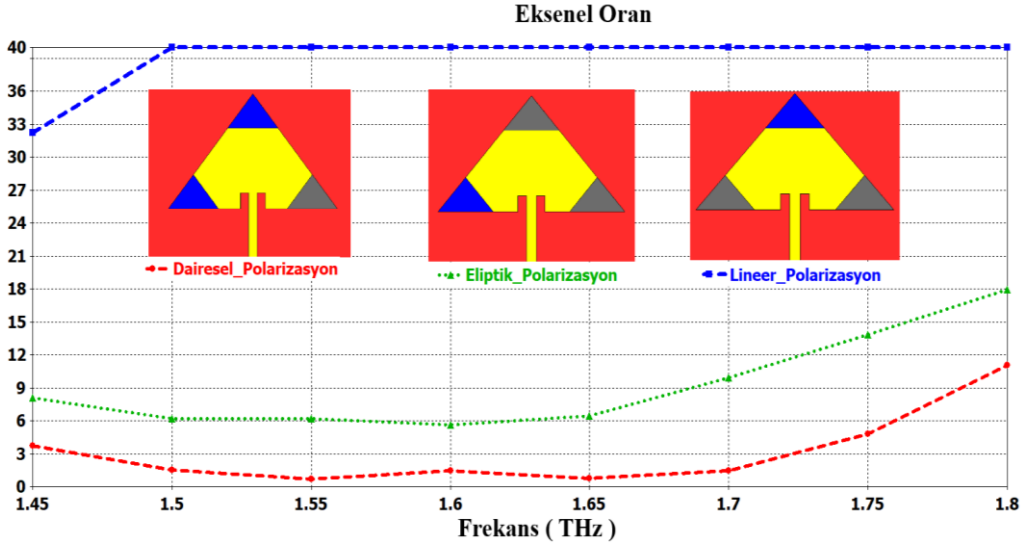
- 1) Yama kenarlarında kesik yapmak
- 2) Yamanın köşegen köşelerine ek bölümler eklemek

Antenin kenarlarında kesik oluşturulduğunda sadece dairesel polarizasyon tipli anten oluşturulmakta ve bu durumda Polarizasyon değişmediği için yeniden yapılandırılabilir anten olarak tasnif edilememektedir.

Antenin köşelerine ek bölümler ilave ederek farklı polarizasyona sahip antenler tasarlanabilmektedir. Sonuç olarak, tasarlanan anten üzerindeki akım dağılımı değişerek faz farkına sahip elektrik alanlar elde edilmektedir.

Bu çalışmada, üçgen şekilli yama anten üzerine köşegen köşelerine ek bölümler eklenerek polarizasyon değişikliği uygulandı. İlk aşamada Denk.7 ile eşkenar üçgen mikroşerit yamaya ait boyutlar belirlendi. Daha sonra eş kenar üçgen uzunluğunun yaklaşık üçte bir değeri kadar büyüklüklerde köşegenler üzerine yeni eşkenar üçgenler eklendi (G1, G2, G3). G1, G2, G3 parçaları üzerine farklı grafen μ_c değerleri uygulanarak anahtarlama yöntemi ile 3 farklı polarizasyonu sağlayacak konfigürasyonlar (eliptik, dairesel ve lineer) belirlendi. Grafen yama anten bölümlerinin her biri birbirinden bağımsız bir DC gerilimine sahip olabilmesi için her bir kenar ile antenin orta kısmı (G0) arasında küçük boşluklar bırakılmıştır. Bu kısa mesafe, antenin farklı bölümlerinin DC bias gerilim bağımsızlığını sağlarken, anten yüzeyindeki nihai akım dağılımını etkilememektedir. Sağ üçgen (G3), sol üçgen (G2) ve üst üçgen (G1) ile ana parça (G0) arasına bırakılan boşluk mesafesi $0.01 \mu\text{m}$ 'dir. Grafen kesitlerinin üzerine potansiyel enerji uygulanarak iletken olması sağlanırken potansiyel enerji uygulanmayarak yalıtkan olması sağlanmaktadır.

Bu şekilde grafen yardımıyla açık (mavi)/kapalı (gri) olacak şekilde anahtarlama sağlanarak elektriksel uzunluk üzerinde değişiklik yapılmaktadır. Tasarlanan antenin grafen katmanlarının polarizasyonu ayarlamak için μ_c değerleri Çizelge 2'de gösterilmektedir. Önerilen antenin farklı polarizasyonlardaki konfigürasyon sonuçlarına göre elde edilen yansıma katsayıları, aksenal oranlar (AR), duran dalga oranları (VSWR) ve yönlülük örüntüleri simülasyon sonuçları 3. bölümde yer almaktadır.

Şekil 2. Önerilen Antenin Farklı Anahtarlama için Yansıma Katsayısı (S_{11}) Sonuçları

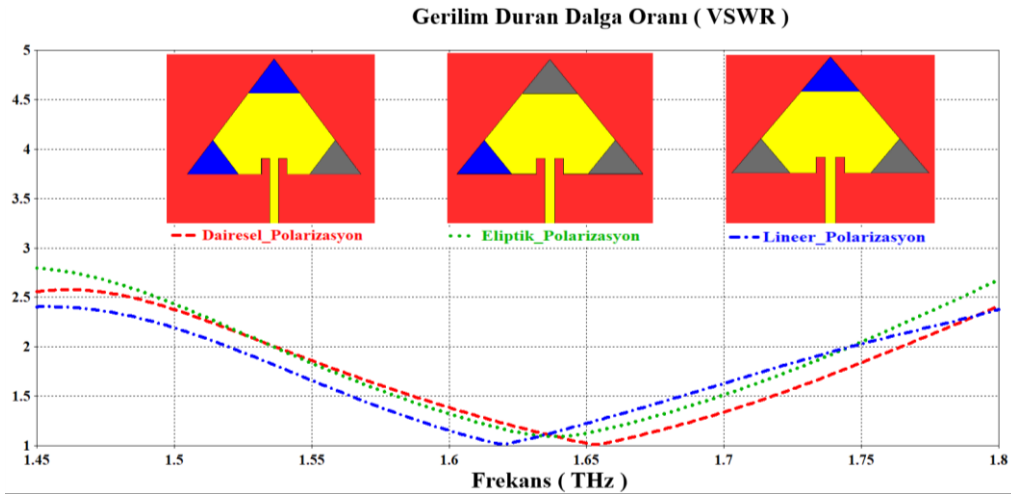
Şekil 3. Önerilen Antenin Farklı Anahtarlama için Eksenel Oran Sonuçları

3. Bulgular

Grafen yardımıyla yapılan anahtarlama (açık - mavi / kapalı - gri) sayesinde elektriksel uzunluk üzerinde değişiklikler yapılmaktadır. Elektriksel uzunlukta oluşan farklılıklara göre rezonans frekansı, eksenel oran, VSWR gibi parametreler incelenmektedir. Önerilen antenin 1.65 THz çalışma frekansı için eliptik, dairesel ve lineer polarizasyon konfigürasyonlarda elde edilen yansıma katsayısı sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Polarizasyon dönüşümünde en iyi yansıma katsayısı sonucu dairesel konfigürasyonu sağlayan antenden elde edilmiştir ve geri dönüş kaybı -45dB'dedir. Lineer ve eliptik polarizasyonda çalışma frekansında minimal kayma olduğu gözlemlenmektedir.

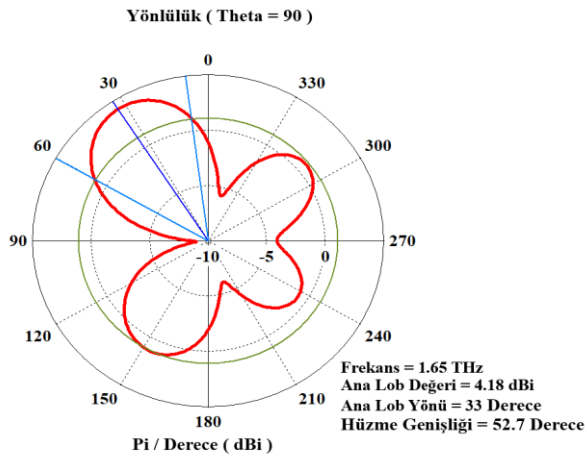
Önerilen antenin farklı anahtarlama ile elde edilen eksenel oran sonuçları Şekil 3'te gösterilmektedir. Farklı

kombinasyonlar ile antenin ışınım konfigürasyonu değiştirilerek üç polarizasyon durumu sağlanmaktadır. Dairesel polarizasyon için üst (G1) ve sol (G2) üçgen grafen kesitlerine potansiyel enerji uygulanması ve sağ (G3) üçgen kesite potansiyel enerji uygulanmamasıyla eksenel oran 1.65 THz çalışma frekansında 3 dB değerinin altına düşürülmüştür. Benzer şekilde sol (G2) üçgen grafen kesitine potansiyel enerji uygulanırken üst (G1) ve sağ (G3) üçgen grafen kesitlerine potansiyel enerji uygulanmayarak eliptik polarizasyon için eksenel oran değeri 3 dB-10 dB aralığına çıkarılmıştır. Son olarak sağ (G3) ve sol (G2) üçgen grafen kesitlerine potansiyel enerji uygulanmayarak ve üst (G1) üçgen grafen kesitine potansiyel enerji uygulayarak yama antenin eksenel oranı 40 dB olarak elde edilmesi ile lineer polarizasyon sağlamıştır.



VSWR değeri empedans uyumunun sağlanabilmesi için 1-2 değer aralığında olması beklenir. Şekil 4'te görüldüğü üzere üç polarizasyon durumunda da 1.65 THz çalışma frekansında 1.5 değerinin altında sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5'te önerilen anten için dairesel polarizasyonun elde edildiği konfigürasyonda 1.65 THz'deki yönlülük örüntüsü verilmiştir. Ana lob değeri 4.18 dBi ve hüzmeye genişliği 52.7 derecede yönlü yayılım yapmaktadır.

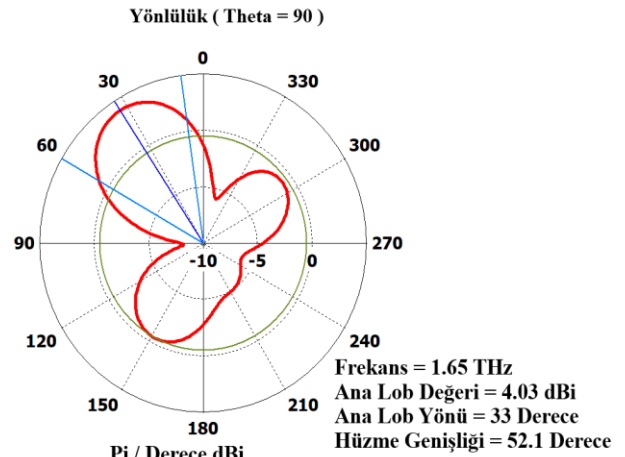


Şekil 5. f=1.65 THz'de Dairesel Polarize Anten Konfigürasyonu için Yönlülük

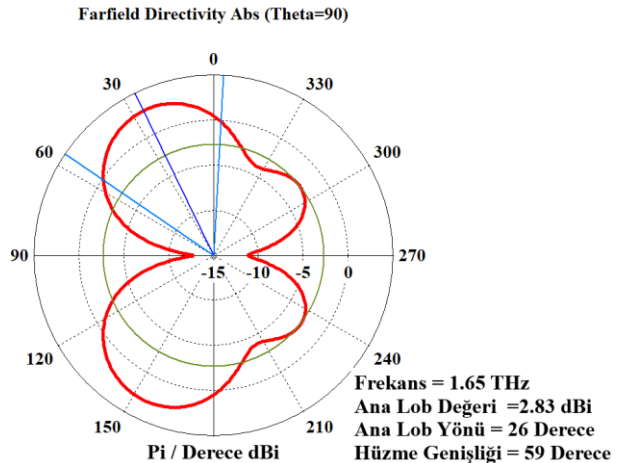
Şekil 6'da önerilen anten için eliptik polarizasyonun elde edildiği konfigürasyonda 1.65 THz'deki yönlülük örüntüsü verilmiştir. Anahtarlama ile polarizasyon değişikliği sağlanırken, ana lob değeri ve hüzmeye genişliğinde azalma meydana gelmiştir. Yönlü bir örüntü modeli sergilemesinin yanı sıra geri ve yan lob seviyelerinde azalma meydana gelmiştir.

Şekil 7'de önerilen anten için lineer polarizasyonun elde edildiği konfigürasyonda 1.65 THz'deki yönlülük örüntüsü verilmiştir. Ana lob değeri 2.83dBi seviyesine düşerken hüzmeye genişliğinde artış söz konusu olmuştur. Yönlülük

örüntüsü tipik dipol anten modeline benzemektedir. Şekil 7'de önerilen anten için lineer polarizasyonun elde edildiği konfigürasyonda 1.65 THz'deki yönlülük örüntüsü verilmiştir. Ana lob değeri 2.83dBi seviyesine düşerken hüzmeye genişliğinde artış söz konusu olmuştur. Yönlülük örüntüsü tipik dipol anten modeline benzemektedir.



Şekil 6. f=1.65 THz'de Eliptik Polarize Anten Konfigürasyonu için Yönlülük



Şekil 7. f=1.65 THz'de Lineer Polarize Anten Konfigürasyonu için Yönlülük

Çizelge 2. Grafen katmanlarının durumu için 1.65 THz rezonans frekansındaki anten değerleri

Anahtarlama Durumu		Kimyasal Potansiyel Değerleri (eV)	Polarizasyon	Eksenel Oran (dB)	VSWR	Bant Genişliği (GHz)
Açık	Kapalı					
G0,G2	G1,G3	$G0 = 0,605$ $G2 = 0,70$	Eliptik	6,50	1,12	197,41
G0,G1	G2,G3	$G0 = 0,605$ $G1 = 1,00$	Lineer	40	1,22	209,27
G0,G1,G2	G3	$G0 = 0,605$ $G1 = 1,00$ $G2 = 0,70$	Dairesel	1,23	1,02	215,68

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu makalede, grafen tabanlı polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir mikroşerit anten tasarımı ve performans parametrelerinin ayrıntılı incelemesi sunulmuştur. Önerilen anten, THz bandında veri trafiği, veri iletişim ihtiyacının sürekli artması sebepleriyle haberleşmede farklı polarizasyon ihtiyacının sağlanabilmesi için analiz edilmiştir. Temel üçgen yama üzerine eklenen üç farklı grafen tabakası üzerinde anahtarlama yapılarak antenin farklı konfigürasyonları için elektriksel uzunluk değişikliği sağlanmıştır. Anahtarlama için grafenin ayarlanabilir iletkenlik özelliği kullanılmıştır. İlk incelemede G0,G1 kısımlarının açık konumda G2,G3 kısımlarının kapalı konumda olması durumunda eksenel oranı değeri 40 dB olarak elde edilmiş ve 1.65 THz merkez frekansı etrafında lineer polarizasyon sağlanmıştır. İkinci incelemede G0,G2 kısımları açık konuma, G1,G3 kısımları kapalı konuma alınmıştır. Bu durumda eksenel oran 6.5 dB olarak edilmiş ve eliptik polarizasyon özelliği sağlamıştır. Finalde G0,G1 ve G2 kısımları açık konuma, G3 kısmı kapalı konuma alınarak 1.23 dB eksenel oran elde edilerek dairesel polarizasyon elde edilmiştir. Toplam da üç farklı anahtarlama sayesinde aynı anten üzerinde farklı polarizasyonlar sağlanabilmiştir. Tek anten üzerinde elde edilen polarizasyon çeşitliliği sayesinde THz bandında veri trafiği, veri iletişim ihtiyacının karşılanmasında önemli bir aday haline gelmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Deney tasarımı, Deneyleme, Yazma, Biçimsel analiz – Görselleştirme,
Yazar-2: Proje Yöneticisi, Doğrulama

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Aliqab, K., Alsharari, M., Sorathiya, V., Armghan, A., 2023. A Numerical Investigation of Graphene-Based Hilbert-Shaped Multi-Band MIMO Antenna for the Terahertz Spectrum Applications. *Sensors*, **23**, 37-56. <https://doi.org/10.3390/s23010037>
- Dash, S. ve Patnaik, A., 2020. Behavior of graphene based planar antenna at microwave and terahertz frequency. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, **40**, 100800 <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2020.100800>
- Das, P. ve Varshney, G., 2021. Analysis of tunable THz antennas integrated with polarization insensitive frequency selective surfaces. *Optical and Quantum Electronics*, **53**, 645-666. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03320-0>
- Dudla, P., Kolli, V.R, Varre, V.P, Manepalli, V.R ve Pulikonda, B.C., 2022. Performance prediction of graphene-based patch antenna using different ground plane dimensions. *Materialstoday: Proceedings* **50**, 2392-2397. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.255>
- Geyikoglu, M. D., Polat h. K., Çavusoglu, B., Ertugrul, M. Abbasian, K., 2022. Designing Graphene- Based Antenna for Terahertz Wave Ablation (TWA) System. *Erzincan Üniversitesi Erzincan University Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. **15(2)**, 507-514. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1014513>
- Gupta, R., Varshney, G. ve Yaduvanshi, R.S., 2021. Tunable terahertz circularly polarized dielectric resonator antenna. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* **239**, 166800. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166800>
- Jabbarzadeh, F., Heydari, M., & Habibzadeh-Sharif, A., 2019. A comparative analysis of the accuracy of Kubo formulations for graphene plasmonics. *Materials Research Express*, **6**, 086209. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1e02>
- Khan, A.K., Shaem, T.A. ve Alim, M.A., 2020. Graphene patch antennas with different substrate shapes and

- materials. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, **202**, 163700
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163700>
- Kiani, N., Hamedani, F.T. ve Rezaei P., Chashmi, M.J. Danaie,M., 2020. Polarization Controlling Approach In Reconfigurable Microstrip Graphene-Based Antenna. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, **203**, 163942.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163942>
- Kiani, N., Hamedani, F.T. ve Rezaei,P., 2021. Polarization Controlling Method In Reconfigurable Graphene Based Patch Four Leaf Clover Shaped Antenna. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, **231**, 166454.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166454>
- Mabrouk, A. M., Seliem, A. G., Donkol, A. A., 2022. Reconfigurable graphene-based metamaterial polarization converter for terahertz applications. *Optical and Quantum Electronics*, **54**, 769-782.
<https://doi.org/10.1007/s11082-022-04163-z>
- Madhan, M. G., Shalini, M., 2021. A compact antenna structure for circular polarized terahertz radiation. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **231**, 166393.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166393>
- Naghdehforushha,S.A. ve Moradi,G., 2019. An improved method to null-fill H-plane radiation pattern of graphene patch THz antenna utilizing branch feeding microstrip line. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **181**, 21-27.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.155>
- Nakar, P.S., 2004. Design of a compact microstrip patch antenna for use in wireless cellular devices. Yüksek Lisans Tezi, Florida State University, Florida, 74
- Nissiyah, J. G., Madha, M.G., 2021. Graphene based microstrip antenna for triple and quad band operation at terahertz frequencies. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **231**, 166360.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166360>
- Upender, P. ve Amarjit Kumar, A., 2021. Quad-Band Circularly Polarized Tunable Graphene Based Dielectric Resonator Antenna for Terahertz Applications. *Silicon*, **14**, 5513-5526.
<https://doi.org/10.1007/s12633-021-01336-5>
- Xu, G ve Skorobogatiy,M., 2022. Wired THz Communications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **43**, 728-778.
<https://doi.org/10.1007/s10762-022-00879-x>
- Yaghobi,M., Rezaei,P., ve Fakharian, M.M., 2022. Graphene-based flat microstrip patch antenna with circular polarization controllability. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **261**, 169159.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169159>