

**Atf İçin:** Ozturk G, Tutar F, Bulut M, 2022. Ku Band Uygulamaları İçin Geniş Açılı, Basit Dizayn Hibrit Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2): 680-691.

**To Cite:** Ozturk G, Tutar F, Bulut M, 2022. Wide-Angle, Low Profile Hybrid Metasurface Polarization Converter for Ku Band Application. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(2): 680-691.

### **Ku Band Uygulamalar İçin Geniş Açılı, Basit Dizayn Hibrit Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü**

Gökhan ÖZTÜRK<sup>1\*</sup>, Fatih TUTAR<sup>1</sup>, Mustafa BULUT<sup>1</sup>

**ÖZET:** Bu çalışmada mikrodalga Ku bandı uygulamaları için metayüzey bazlı yansıtıcı lineer ve dairesel polarizasyon dönüştürücü amaçlandı. Önerilen mikrodalga aygıt, elektrik alan şiddeti y yönünde polarize gelen dalgayı x yönünde yansıtarak lineerden lineere polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Bu amaçla önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü 12 GHz-18 GHz aralığında %90 polarizasyon dönüşümü oranı (PCR) performansı ile çalışmaktadır. Ayrıca önerilen dizayn 11.01-11.19 GHz aralığında ve 20.79-22.08 GHz aralığında sağ eli polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmektedir. Önerilen dizayn kolay erişilebilir FR-4 malzemesi ile dizayn edilmiş olup, metayüzey ve metal sonlandırma için metal olarak bakır seçilmiştir. Tasarlanan aygıtın eğik açı performansı 50 dereceye kadar %80 polarizasyon dönüşüm oranı performansı ile çalışmaktadır. Mikrodalga aygıtın fiziksel mekanizmasının anlaşılması için yüzey akım analizi güçlü rezonans bölgelerinde incelendi. Ayrıca fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması için eşdeğer devre yaklaşımı ile mikrodalga iletim hattı modeli gösterildi. Önerilen dizayn CST mikrodalga simülatörü ile dizayn edildi ve gerçek zamanlı uygulaması için geleneksel PCB teknikleri ile üretildi. Simülasyon sonuçlarının doğrulaması için üretilen aygıtın gerçek zamanlı ölçümleri serbest uzay ölçümleri kullanılarak deneysel olarak doğrulandı. Sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandı ve literatürde yer alan diğer Ku bandı polarizasyon dönüştürücülere kıyasla sadece lineer dönüşüm sağlamayıp aynı zamanda dairesel polarizasyon da sağlamaktadır. Ayrıca üretilen dizayn literatürde yer alan diğer Ku band uygulamalara kıyasla daha kolay erişilebilir materyal olan FR4 material ile dizayn edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polarizasyon, Metayüzey, Ku band

### **Wide-Angle, Low Profile Hybrid Metasurface Polarization Converter for Ku Band Application**

**ABSTRACT:** In this study, metasurface based reflective linear and circular polarization converter was aimed for microwave Ku band applications. The proposed microwave device provides linear to linear polarization conversion in the x direction by reflecting the incoming wave polarized in the y direction of the electric field intensity. For this purpose, the proposed metasurface polarization converter works in the 12 GHz-18 GHz range with a 90% polarization conversion ratio (PCR) performance. In addition, the proposed design performs right-handed polarization conversion in the range of 11.01-11.19 GHz and in the range of 20.79-22.08 GHz. The proposed design was designed with easily accessible FR-4 material, and copper was chosen as the metal for the metasurface and metal termination. The oblique angle performance of the designed device works with 80% polarization conversion rate performance up to 50 degrees. In order to understand the physical mechanism of the microwave device, surface current analysis was investigated in strong resonance regions. In addition, the equivalent circuit approach and the microwave transmission line model are shown for a better understanding of the physical mechanism. The proposed design was designed with a CST microwave simulator and fabricated with conventional PCB techniques for real-time application. To verify the simulation results, the real-time measurements of the produced device were experimentally verified using free space measurements. The results were compared with the studies in the literature and compared to other Ku band polarization converters in the literature, it provides not only linear conversion but also circular polarization. In addition, the manufactured design consist of FR4 material, which is a more accessible material compared to other Ku band applications in the literature

**Keywords:** Polarization, Metasurface, Ku band

<sup>1</sup>Gökhan ÖZTÜRK ([Orcid ID: 0000-0001-8106-0053](https://orcid.org/0000-0001-8106-0053)), Fatih TUTAR ([ORCID ID: 0000-0003-0668-3319](https://orcid.org/0000-0003-0668-3319)), Mustafa BULUT ([Orcid ID: 0000-0001-8251-4387](https://orcid.org/0000-0001-8251-4387)) Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Gökhan ÖZTÜRK, e-mail: gokhan.ozturk@atauni.edu.tr

## GİRİŞ

Elektromanyetik dalgaların kontrolü, manipülasyonu ve polarizasyonu mikrodalga aygıtların performansı ve davranışı için önemli bir parametredir. Polarizasyon dönüştürücüler hassas polarizasyon gerektiren sensor, optik haberleşme, anten ve radar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadırlar (Dutta ve ark.,2019). Polarizasyon elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşenin zamanda nasıl ilerlediğinin bir göstergesidir. Polarizasyon ile elektromanyetik dalganın kontrol edilmesi başta radar olmak üzere, 5G antenler, uydu haberleşme, navigasyon gibi birçok mikrodalga aygıt çalışmaları için önem arz etmektedir (Fahad ve ark.,2020). Faraday etkisi, fotoelastik modülatörler, optik ızgara ve çift kırılma etkisi gibi geleneksel yöntemler kullanılarak elde edilen polarizasyon dönüştürücüler dar bant genişliği, yalnızca normal açılı geliş için çalışma, büyük hacim ve tasarım için yüksek kompleksiteye ihtiyaç duyar (Mutlu ve Ozbay.,2012). Son yıllarda bu dezavantajların üstesinden gelmek için metayüzeyler yapıları ile polarizasyon dönüştürücüler gerçekleştirilmiştir (Chen ve ark.,2016). Metayüzey yapıları negative kırılma indisi özelliği ve güçlü rezonans özelliği ile optic lensler (Kundtz ve Smith.,2010), antenler (Ziolkowski ve Erentok.,2006), enerji hasatı (Wang ve ark.,2015), sensörler (Withayachumnankul ve ark.,2013), görünmezlik pelerini (Schuring ve ark.,2006), emiciler (Landy ve ark.,2008) ve polarizasyon dönüştürücüler (Rahman ve ark.,2016; Dutta ve ark.,2019; Nguyen ve ark.,2021; Yang ve ark.,2021) gibi birçok mikrodalga aygıtlarında kullanılan periyodik yapılardır. Literatürde metayüzeyler ile oluşturulan bu polarizasyon dönüştürücüler bakır ve FR-4, F4B, Rogers gibi epoksi materyaller ile lineer ve dairesel polarizasyon mikrodalga aygıtları olarak tasarlanılmıştır. Metayüzeyler kullanılarak oluşturulan lineer polarizasyon dönüştüren aygıt tasarımlarında yüzde dönüşüm oranı (PCR), bant aralığı, kalınlık-hacim ve geliş açısı ve frekans bölgesi (GHz veya THz) performanslarına odaklanılmıştır (Fahad ve ark.,2020). Ayrıca bu tasarımlar metamalzemenin metal ile sonlandırılma durumuna göre yansıma veya iletim temelli olarak iki türlü gerçekleştirilmiştir (Dutta ve ark.,2019; Fahad ve ark.,2020). İletim türü ile yapılan yapılar şirhal malzemeler ile gerçekleştirilmesi ve S21 parametrelerinin de kullanılması ile daha karmaşık bir çözüm sunmaktadır. Doğrusal polarizasyonda iyonosfer kayıplarının yüksek olması, çok yönlü pet kayıplarının yüksek olması, antenlerin yönlerine bağımlı olması dezavantajlarından dolayı bazı mikrodalga uygulamalarında dairesel polarizasyon tercih edilmektedir. Ayrıca anten yönelimlerinin zor olduğu uydu haberleşmesinde anten yönelimi olmaksızın veri aktarımı dairesel polarizasyon ile aşılmaktadır (Fahad ve ark.,2020).

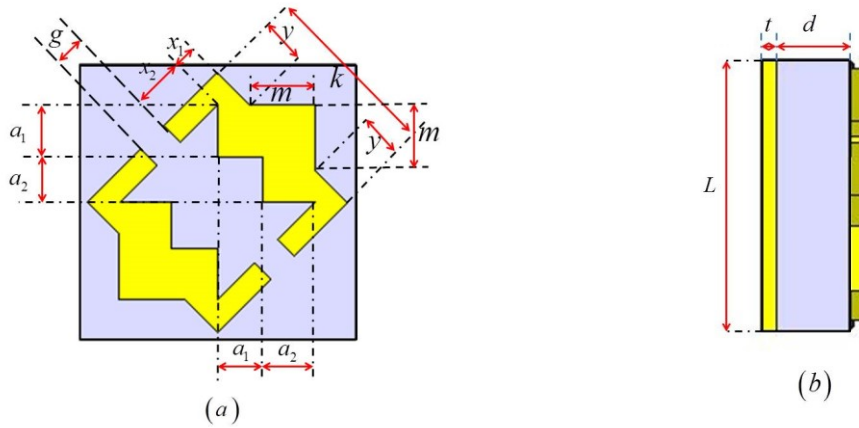
Lineer polarizasyon ile elde edilen çapraz polarizasyon dönüşüm çalışmalarında genellikle en az %90 polarizasyon dönüşüm performansı amaçlanmıştır. Bu çalışmaların hepsi alttaş olarak FR4, Rogers ve PTFE gibi epoksi materyaller kullanarak esnek ve transparan olmayan yapıda polarizasyon dönüştürücüler elde edilmiştir (Khan ve ark.,2019;Kamal ve ark.,2021). Bu çalışmalarda PCR ve ellipticity değerleri üzerinden lineer ve dairesel polarizasyon analizleri yapılmış ve bant genişliği, kompaktlık, eğik açı performansı açısından literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Tek tabakalı yapıların dar bir bölge için PCR sağlama dezavantajları sebebi ile daha geniş bant aralıkları için kullanılan alttaşın dielektrik sabiti daha düşük seçilerek veya çok tabakalı yapılar kullanılarak daha geniş bant için PCR dönüşümü sağlanabilmiştir (Khan ve ark.,2019).

Bu çalışmada; FR4 alttaş olarak kullanılan metayüzey temelli yansıtıcı Ku band lineer ve dairesel mikrodalga polarizasyon dönüştürücü tasarımı gerçekleştirildi. Önerilen aygıt literatürde yer alan diğer Ku band polarizasyon dönüştürücülere kıyasla sadece lineer polarizasyon dönüşümü değil, aynı zamanda dairesel polarizasyon da gerçekleştirmektedir. Önerilen dizaynın simülasyon çalışmaları CST Studio simülasyon programında gerçekleştirilip, simülasyon ile elde edilen sonuçlar MATLAB

programı vasıtasıyla işlenerek sonuçlar elde edildi. Simulasyon çalışmalarının doğrulaması için simülasyonu yapılan dizayn gerçek zamanlı olarak üretilerek serbest uzay ölçümleri ile deneysel olarak doğrulandı. Organizasyonun kalan kısmı şu şekilde gerçekleştirildi. Materyal ve Yöntem kısmında önerilen dizaynın dizayn ve teorisi verildi. Bulgular ve Tartışma kısmında önerilen çalışmanın simülasyon sonuçları, fiziksel mekanizması yüzey akımları üzerinden açıklandı. Ayrıca kısımında ölçümler için kurulan deneysel ortam ve ölçüm sonuçları paylaşıldı ve elde edilen sonuçlar literatürdeki en güncel çalışmalar ile kıyaslanarak üstün yönleri ile yorumlandı.

## MATERYAL ve METOT

Önerilen dizaynın birim hücresi Fig. 1’de gösterilmiştir. Figure 1 de görüleceği üzere yapının el alt kısmı iletkenliği  $5.7 \times 10^8 \text{ S m}^{-1}$  iletkenliğe sahip  $t=0.035 \text{ mm}$  kalınlıklı bakır malzeme ile sonlandırılmıştır. Yapının en üst kısmında yer alan metayüzey aynı bakır malzeme ile oluşturuldu. Yapının orta kısmında yer alan ve alttaş olarak kullanılan malzeme, dielektrik sabiti 4.3 ve kayıp tanjantı 0.025 olan ve kalınlığı  $d=1.6 \text{ mm}$  olan FR-4 malzeme ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca figüre 1 de verilen yapı için birim hücre uzunluğu  $L=6 \text{ mm}$  ve metayüzeyi oluşturan diğer uzunluklar sırasıyla  $x_1=0.5 \text{ mm}$ ,  $x_2=1.15 \text{ mm}$ ,  $y=1 \text{ mm}$ ,  $m=1.41 \text{ mm}$ ,  $a_1=1.12 \text{ mm}$ ,  $a_2=1 \text{ mm}$  ve  $k=4 \text{ mm}$  olarak seçildi. Ayrıca, tasarım yapılırken geniş bant aralığı için metayüzey diagonal düzlem üzerine anizotropik yapı sağlayacak şekilde seçildi (Rahman ve ark.,2020).



Şekil 1. Önerilen mikrodalga polarizasyon dönüştürücü aygıtının geometrisi (a) ön-yüz görünüşü (b) yan-yüz görünüşü

Önerilen mikrodalga aygıtın lineer polarizasyon dönüşümü için elektrik alan şiddeti  $y$  yönünde polarize olmuş dalga  $z$  yönünde metayüzey temelli polarizasyon dönüştürücüye doğru ilerlediğini kabul edelim. Zamanda harmonik bağımlılığı  $e^{j\omega t}$  kabul ederek fazör uzayında gelen dalga aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\vec{E}^i = \hat{y}E^o e^{-jkz} \quad (1)$$

Burada  $\vec{E}^i$  gelen dalganın elektrik alan şiddetini ifade eder. Lineer polarizasyon için,  $y$  yönünde elektrik alan bileşenine sahip elektromanyetik dalga metayüzeye çarptıktan sonra aynı yönde ( $y$  yönü – eş polarizasyon) veya geliş düzlemin normali yönünde ( $x$  yönü-çapraz polarizasyon) yansıyacaktır. Bu durumda yansıyan dalga aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{E}^r = (\hat{x}E^{rx} + \hat{y}E^{ry})e^{jkz} \quad (2)$$

Burada  $\vec{E}^r$  yansıyan dalganın elektrik alan şiddetini ifade eder. Elektrik alan şiddeti  $y$  yönünde polarize olmuş dalga için eş yansıma katsayısı  $R_{yy} = E^{ry}/E^{iy}$  ve çapraz yansıma katsayısı  $R_{xy} =$

$E^{rx}/E^{iy}$  olarak elde edilebilir. Benzer şekilde elektrik alan şiddeti x yönünde polarize olmuş dalga için eş yansıma katsayısı  $R_{xx} = E^{rx}/E^{ix}$  ve çapraz yansıma katsayısı  $R_{yx} = E^{ry}/E^{ix}$  olarak elde edilebilir. Lineer polarizasyon konseptinin daha iyi anlaşılabilmesi için gelen dalga Şekil 2'de gösterildiği gibi u ve v eksenlerine ayrıştırılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}^i = \hat{u}E^{iu}e^{-j\varphi_{iu}} + \hat{v}E^{iv}e^{-j\varphi_{iv}} \quad (3)$$

Burada  $E^{iu}, E^{iv}$  gelen dalganın u ve v yönlerindeki elektrik alan bileşenlerini  $\varphi_{iu}$  ve  $\varphi_{iv}$  ise fazlarını göstermektedir. y yönünde elektrik alan bileşenine sahip z yönünde gelen dalganın, -z yönünde ve x yönünde elektrik alan bileşeni ile yansıması, u-v eksenlerinde ayrıştırılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}^r = \hat{u}r_{uu}E^{ru}e^{j\varphi_{ru}} + \hat{v}r_{vv}E^{rv}e^{j\varphi_{rv}} \quad (4)$$

Burada  $E^{ru}, E^{rv}$  yansıyan dalganın u ve v yönlerindeki elektrik alan bileşenlerini  $\varphi_{ru}$  ve  $\varphi_{rv}$  ise fazlarını göstermektedir. Ayrıca u ve v yönlerindeki yansıma katsayıları sırasıyla  $r_{uu} = E^{ru}/E^{iu}$  ve  $r_{vv} = E^{rv}/E^{iv}$  ile ifade edilebilir. Şekil 2 ye göre y yönünde polarize olmuş dalganın x yönünde yansıması için  $E^{iu}$ 'nun aynı genlikte ve yönde (+u yönünde) yansıması, zıtına  $E^{iv}$ 'nin aynı genlikte fakat zıt yönde yansıması gerekmektedir. Yani y polarize olmuş dalganın x polarize olarak yansıması için, u ve v yönlerinde yansıma katsayıları  $|r_{uu}| \cong |r_{vv}| \cong 1$  ve faz olarak  $\varphi_{uu} - \varphi_{vv} = 180^\circ$  olması gerekmektedir. Ayrıca lineer polarizasyon dönüşümünün oranı için, y polarize gelen dalga için polarizasyon dönüşüm oranı (PCR-Polarization Conversion Ratio) aşağıdaki gibi elde edilebilir (Khan ve ark.,2019).

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \quad (5)$$

Eşitlik 1' de benzer olarak x polarize gelen dalga için PCR, x ve y alt indislerinin yer değiştirmesi ile hesap edilebilir. Ayrıca, dairesel polarizasyon dönüşümünün hesaplanması için Stokes Parametrelerinin kullanılması yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Papas,1965). Dairesel polarizasyon dönüşüm için Stokes parametreleri aşağıda verildiği gibi hesap edilebilir.

$$S_0 = |R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2 \quad (6)$$

$$S_1 = |R_{xx}|^2 - |R_{yx}|^2 \quad (7)$$

$$S_2 = 2|R_{xx}||R_{yx}|\cos\varphi \quad (8)$$

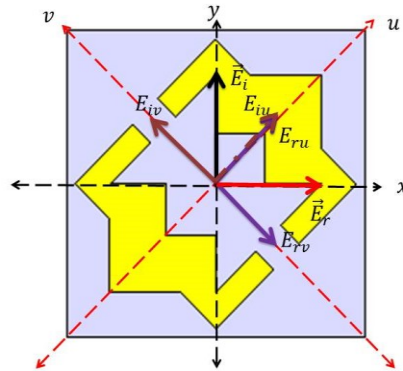
$$S_3 = 2|R_{xx}||R_{yx}|\sin\varphi \quad (9)$$

Stokes parametreleri kullanılarak dairesel polarizasyon hesabı, elipticity ( $e = S_3/S_0$ ) değeri üzerinden bulunur (Khan ve ark.,2019). Elipticity değeri sinüs fonksiyonunun gereği olarak [-1,1] aralığında değişecektir. Dolayısıyla -1 değerine ulaştığı bölgelerde sol eli dairesel polarizasyon, +1 değerine ulaştığı bölgelerde ise sağ eli dairesel polarizasyon gerçekleşecektir. Böylesi bir durum için  $|R_{xx}|$  ve  $|R_{yx}|$  değerlerinin yaklaşık eşit ve  $\varphi$  değerinin  $\pm 90^\circ$  olması gerektiği açıkça bellidir. Ayrıca dairesel polarizasyon analizi için eksenlerin oranı ile elde edilen bir başka analiz ise aksel oran (axial ratio-AR) analizidir. Polarizasyon dönüştürücü için aksel oran aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$AR = \sqrt{\frac{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2 + \sqrt{a}}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2 - \sqrt{a}}}, \quad (10)$$

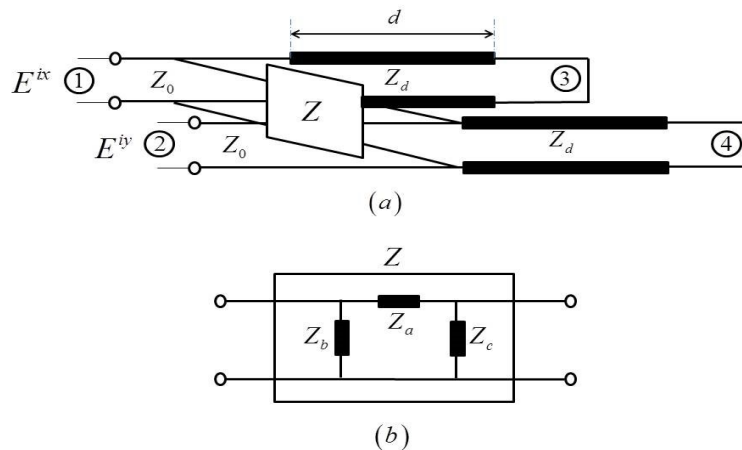
Burada,

$$a = |R_{xy}|^4 + |R_{yy}|^4 + 2|R_{xy}|^2|R_{yy}|^2\cos(2\Delta\varphi) \quad (12)$$



Şekil 2. y yönünde polarize dalganın x yönünde yansımalarının analizi için u-v eksenlerine ayrıştırılması

Önerilen Metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücünün fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması için toplu parametrelili (lumped) elementler kullanarak Bi-Foster eşdeğer devre analizi yapıldı (Pouyanfar ve ark.,2021). 4 portlu 2 iletim hattından oluşan transmisyon hattı ağ şebekesi için, eşdeğer devrede port 1 ve 2, elektrik alan şiddetleri x ve y yönlerinde polarize olmuş gelen dalgalar için, port 3 ve 4 ise metal sonlandırmadan dolayı kısa devreyi temsil etmektedir. Önerilen eşdeğer devre modeli şekil 7a de gösterildiği gibidir. Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün FR-4 alttaş kalınlığı  $Z_d$  kalınlığı ile temsil edildi. Burada  $Z_d = Z_o/\epsilon_r$  dir ve  $Z_o$  serbest uzay dalga empedansını gösterir. Ayrıca şekil 3a'da görüleceği üzere, metayüzey Z empedansı ile modellenmiştir ve modellenen Z empedansı şekil 3b'de gösterildiği gibi toplu parametreler cinsinden bir pi devresi ile modellenmiştir.



Şekil 3. Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün (a) transmisyon hattı eşdeğer devre modeli (b) metayüzeyin toplu parametrelili elemanlar ile temsili

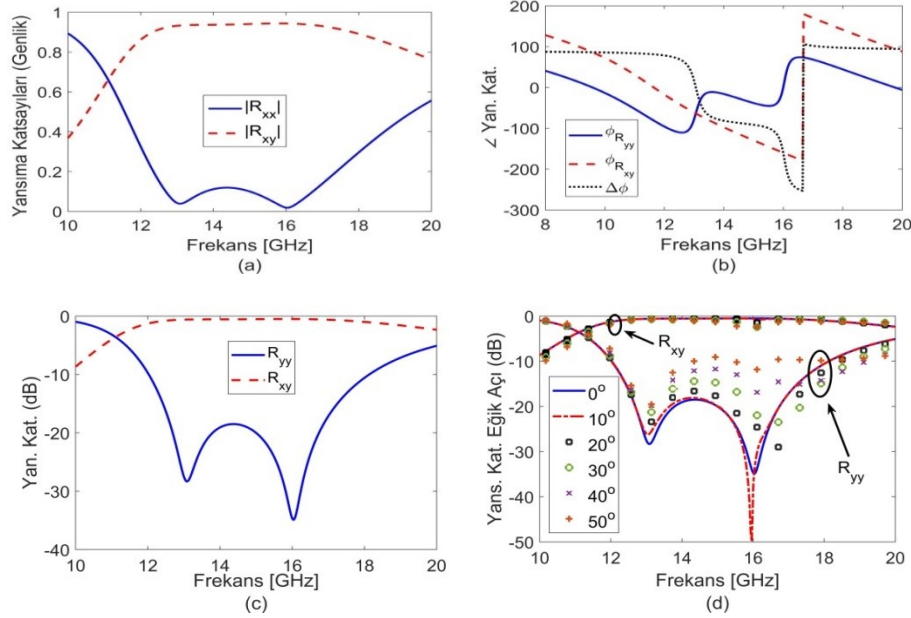
## BULGULAR

### Simulasyon Sonuçları

CST Studio simülasyon programında Şekil 1 deki gibi geometrisi verilen polarizasyon dönüştürücü dizayn edildi. Simulasyonun ayarları yayılma yönünde sınır şartlarının sonsuz (unitcell) seçilerek gerçekleştirildi. Ayrıca floquet sınır şartları seçilerek frekans domaininde

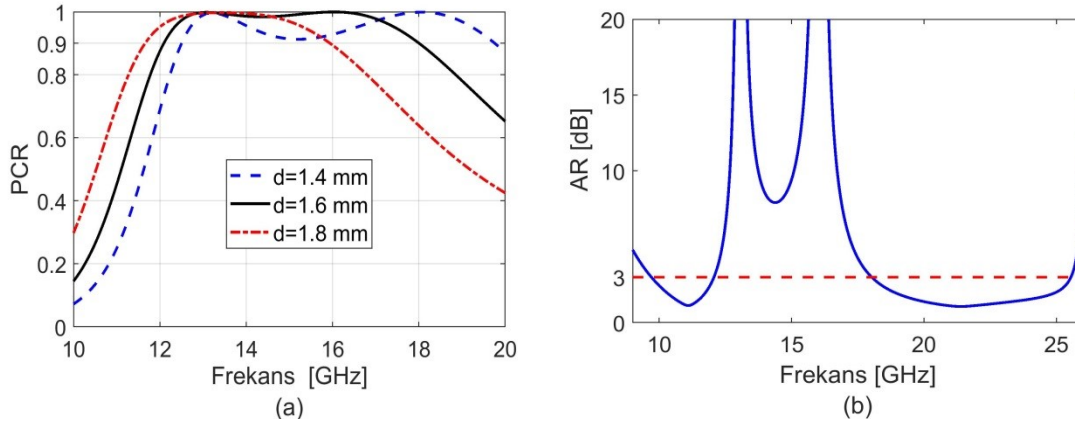


soğurum gerçekleştirildi. Simulasyon sonuçlarının hassas olması için, hexahedral mesh tipi birim hücre başına 30 mesh tipi seçilerek gerçekleştirildi. Şekil 4 de y yönünde polarize elektrik alan şiddetine sahip dalganın önerilen dizayna gönderilmesi durumunda, eş ve çapraz yansımaya katsayıları verilmiştir.



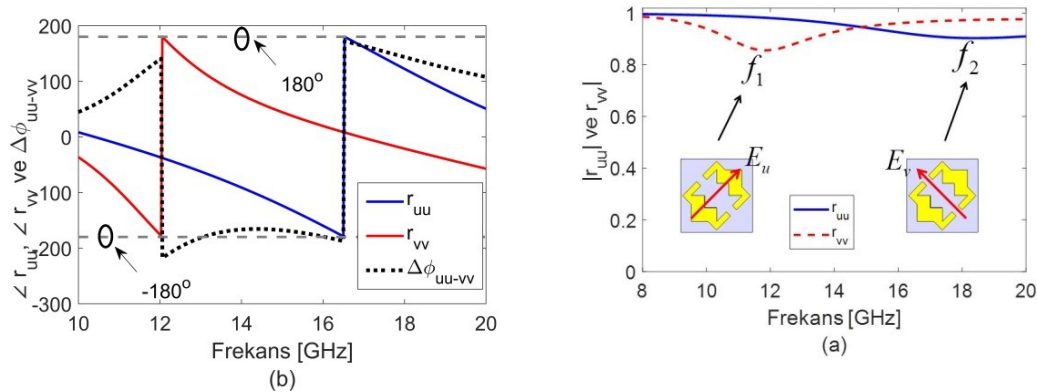
Şekil 4. Eş ve çapraz yansımaya katsayılarının (a) genlikte (b) Faz açıları ile (c) dB olarak normal geliş için ve (d) 50 dereceye kadar eğik açı altında dB olarak değişimi.

Şekil 4a'da eş ve çapraz yansımaya katsayıları genlik olarak verilmiştir. Şekil 4a da görüleceği üzere Ku bandı boyunca (12-18 GHz aralığında) eş yansımaya katsayısı sıfıra yaklaşırken, çapraz yansımaya katsayısı 1 e yaklaşmaktadır. Ayrıca güçlü rezonans frekansları olan 13.1 GHz ve 16.04 GHz frekanslarında eş yansımaya katsayıları sırasıyla 0.042 ve 0.023 değerlerine ulaşırken çapraz yansımaya katsayıları sırasıyla 0.93 ve 0.94 değerlerine ulaşmaktadır. Şekil 4b de eş ve çapraz yansımaya katsayılarının fazları verilmiştir. Şekil 4b de belirtildiği gibi,  $\phi_{yy}$ ,  $\phi_{xy}$ 'nin frekans varyasyonundan daha büyük bir frekans varyasyonuna sahiptir ve  $\Delta\phi$ , normal geliş için 12-18 GHz bandında yaklaşık  $90 \pm k\pi$  derece arasında değişir. Şekil 4(c-d) de normal geliş ve eğik açı altında eş ve çapraz yansımaya katsayılarının dB de değişimleri verilmiştir. Şekil 4c de görüldüğü gibi 12-18 GHz bölgesinde eş yansımaya katsayısı -10 dB nin altında, çapraz yansımaya katsayısı ise -0.66 dB civarında değişim göstermektedir. Ayrıca eğik açılı performans analizi için şekil 4d de görüldüğü gibi 50 dereceye kadar eş yansımaya katsayısı -8 db ve üzerinde seyrederken, çapraz yansımaya katsayısı -2.6 dB bölgesinde değişim göstermektedir. Önerilen dizaynın performansı, dielektrik alttaşın kalınlığı değiştirilerek analiz edildi. Bu amaçla  $d=[1.4-1.8]$  mm arasında süpürüldü ve kalınlığa bağlı olarak PCR nin değişimi Şekil 5a da verildi. Şekil 5a da görüldüğü gibi en etkin PCR değeri  $d=1.6$  mm kalınlığı için sağlandı. Ayrıca denklem .. kullanılarak axial ratio (eksenel oran) grafiği Şekil 5b de verildiği gibidir. Şekil 5b de görüldüğü üzere aksel oran 9.72-12.06 GHz ve 18-25.56 GHz aralığında -3dB nin altında seyretmektedir.



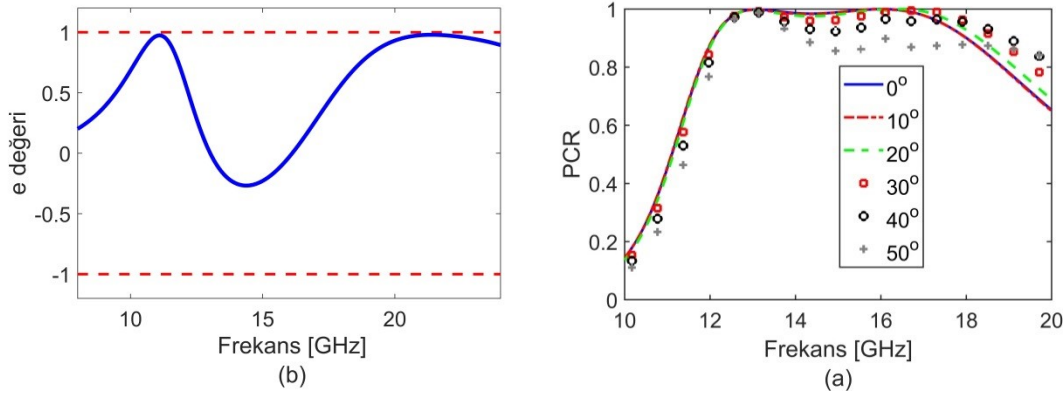
Şekil 5. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün (a)  $d=1.4$ ,  $d=1.6$  ve  $d=1.8$  GHz aralığı için PCR değişimi (b) eksenel oranı (AR)

Linear polarizasyon dönüşümünün gerçekleşmesi için u-v eksen analizi ile gerçekleştirilen u-v yönündeki yansımaya katsayıları ve bu yansımaya katsayılarının faz açıları belirtildiği gibi  $|r_{uu}| \cong |r_{vv}| \cong 1$  ve faz olarak  $\varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pm 180^\circ$  olması gerekmektedir. Linear polarizasyonun gerçekleştirildiği frekans aralığı olan 12-18 GHz bant aralığı için u ve v yönlerindeki yansımaya katsayılarının genliği ( $|r_{uu}|$  ve  $|r_{vv}|$ ) şekil 6a da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 6. u ve v yönlerindeki yansımaya katsayıları (a)  $r_{uu}$  ve  $r_{vv}$  büyüklükleri (b)  $r_{uu}$  ve  $r_{vv}$  fazları ve  $r_{uu}$  ve  $r_{vv}$  arasındaki faz farkı

Şekil 6(a-b) de görüldüğü gibi linear polarizasyonun gerçekleştiği 12-18 GHz bant genişliği arasında u ve v yönlerindeki yansımaya katsayıları ( $|r_{uu}|$  ve  $|r_{vv}|$ ) yaklaşık olarak 1 e gitmektedir. Ayrıca bu yönlerdeki yansımaya katsayıları arasındaki faz açısı  $\varphi_{uu} - \Delta\varphi_{uu-vv} = \pm 180^\circ$  'dir. Ayrıca u ve v yönlerinde uygulanan elektrik alan şiddetlerinin etkisi ile metayüzey  $f_1$  ve  $f_2$  frekanslarında eigen modlar tarafından uyarılmıştır (Zhao ve Cheng.,2016). Eşitlik 5 kullanılarak, önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücün PCR performansını şekil 7a da gösterildiği gibi elde edildi. Şekil 7a da görüldüğü gibi önerilen dizaynın linear polarizasyon dönüşüm oranı 12-18 GHz bant genişliği arasında normal geliş için %90 üzerindedir. Ayrıca eğik açılı durum için 50 dereceye kadar PCR performansı %80 in üzerindedir. Önerilen dizaynın dairesel polarizasyon dönüşüm performansı için denklem 6-9 kullanılarak eliptisity değeri üzerinden yapılan analiz şekil 7b'de verilmiştir.



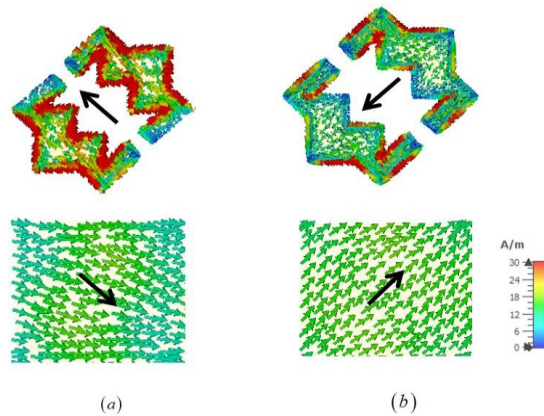
Şekil 7. (a) 50°'ye kadar normal ve eğik geliş açısı altında önerilen dönüştürücünün polarizasyon dönüşüm oranı (PCR) (b) önerilen dönüştürücünün eliptiklik değeri

Şekil 7b'de görüldüğü üzere eliptisite değeri 11.01-11.19 GHz ve 20.79-22.08 GHz aralıklarında +1 değerinde ulaşmaktadır. Kısım 2 de yapılan analiz ile bu bant genişliklerinde önerilen dizaynın sağ elli polarizasyon dönüşüm işlemi yaptığı açıktır.

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması için yüzey akım analizi yapıldı. Metayüzey üzerine normal geliş ile gelen dalga, yüzey üzerinde oluşan elektrik ve manyetik akım dipolleri ile elektriksel ve manyetik yüzey akımlarının indüklenmesini sağlayacaktır. Bu amaçla tüm rezonans frekansları için rezonans yapan metal kısımlar üzerindeki akım dağılımları incelendi. Polarizasyon etkisi ile elektrik ve manyetik alanlar ile elektriksel ve manyetik akım yoğunlukları arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \vec{J} \\ \vec{M} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \alpha_{ee} & \alpha_{em} \\ \alpha_{me} & \alpha_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E} \\ \vec{M} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Burada  $\vec{J}$  ve  $\vec{M}$  elektriksel ve manyetik akım yoğunlukları olup,  $\alpha_{ee}$ ,  $\alpha_{em}$ ,  $\alpha_{me}$  ve  $\alpha_{mm}$  sırasıyla öz ve kapılı elektrik ve manyetik polarizasyonları ifade etmektedir. Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün metayüzey ve sonlandırılmış bakır plaka üzerindeki akım dağılım grafikleri şekil 8 de verildi. Şekil 8(a-b) de yüzey akım dağılımları sırasıyla 13.1 GHz ve 16.04 GHz frekansları için verildi. Şekil 8(a-b) de görüleceği üzere her iki rezonans frekansında da yüzey akımları zıt kutuplanarak manyetik rezonansın gerçekleşmesini sağlamıştır.

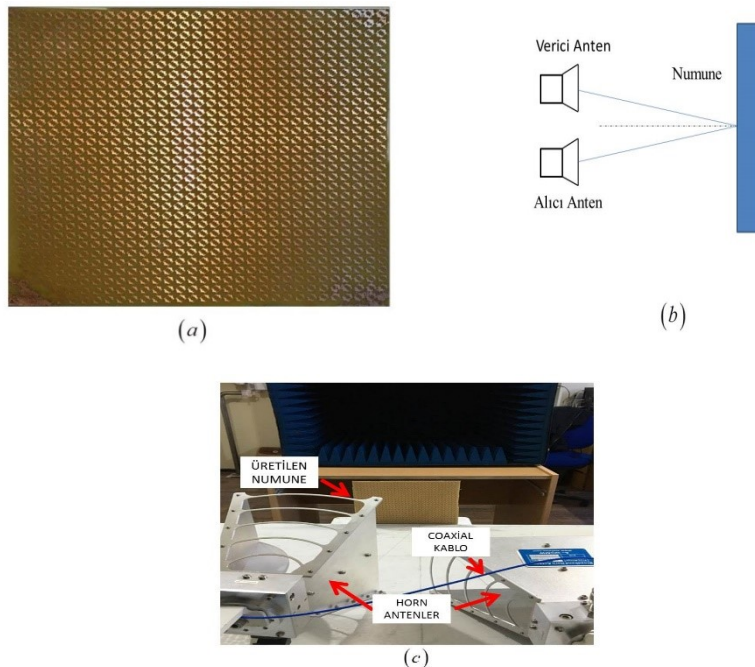


Şekil 8. (a) 13.1 GHz için metayüzey ve metal sonlandırması üzerindeki yüzey akımlarının davranışı (b) 16.04 GHz için metayüzey ve metal sonlandırması üzerindeki yüzey akımlarının davranışı



## Önerilen aygıtın üretimi ve deneysel sonuçlar

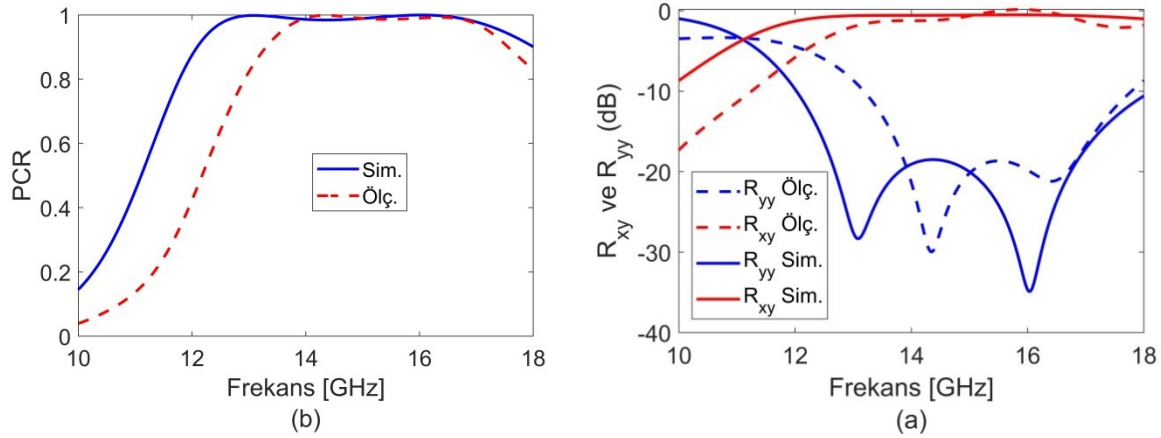
Şekil 9(a)'da görülebileceği gibi, 1.6 mm'lik bir FR4 alttaşı üzerinde 4.3 nispi geçirgenliğe sahip 961 meta-atom içeren (31x31) önerilen polarizasyon dönüştürücünün 200 x 200 mm<sup>2</sup>'lik bir prototipini ürettik ve test ettik. Önerilen dönüştürücünün imalatında geleneksel kart üretim süreci uygulandı. Serbest uzay mikrodalga ölçümleri için deneysel kurulum Şekil 9(b)'de gösterilmiştir. Gerçek zamanlı ölçümler için 26.5 GHz'e kadar S parametrelerini ölçebilen Keysight Technologies'den (model no: N9923A) bir vektör ağ analizörü (VNA) kullanıldı. Elektromanyetik sinyalleri önerilen polarizasyon dönüştürücüye yönlendirmek ve ondan yansıyan sinyalleri elde etmek için Pasternack Company marka iki horn anten kullanıldı. Bu antenler yaklaşık 20.4 cm yüksekliğe ve 16.0 cm genişliğe sahiptir. Ayrıca antenler ve VNA arasındaki bağlantı 120 cm uzunluğunda iki koaksiyel kablo aracılığıyla 1 ile 18 GHz arasında çalışacak şekilde ayarlandı. Ölçümler için TRL (Thru-reflect-line) kalibrasyon standardı kullanıldı. Kalibrasyon yapılırken transmisyon hattının ortasına yansıma için iletkenliği yüksek bakır plaka kullanıldı. Ayrıca kalibrasyon yapılırken iletimde, transmisyon hattının orta noktası için merkez frekansta 90°'ye gelen fazı yakalamak için port 2,  $\lambda/4$  mesafesi olan 5 mm kadar Port 1 doğru kaydırıldı. Kalibrasyondan sürecinin ardından gerçek zamanlı ölçümler, karşılıklı horn antenler ile transmisyon hattı kurularak bu hattın ortasına üretilen numune konuldu ve eş yansıma katsayıları ( $S_{11}$  parametreleri) elde edildi. Çapraz yansıma katsayılarını elde etmek için horn antenler yanyana getirildi ve Port 2 ortogonal düzleminde 90° kaydırıldı. Çapraz yansıma katsayılarının elde edilmesi için sunulan senaryo Şekil 9b de gösterilmiştir. Bu senaryonun gerçekleştirilmesi için kurulan deney ortamının resmi şekil 9c de verildiği gibidir. Çapraz yansıma katsayılarının elde edilmesi için iletim saçılma parametreleri ( $S_{21}$ ) ölçülmüştür.



**Şekil 9.** (a) Önerilen polarizasyon dönüştürücünün üretilmiş hali (b) Çapraz yansıma katsayılarının elde edilmesi için ölçüm senaryosu (c) Yansıma katsayılarının elde edilmesi için kurulan deney düzeneği

Elde edilen deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları şekil 10 da verildiği gibidir. Şekil 10(a-b) de görüldüğü gibi deneysel ve simülasyon sonuçları büyük bir uyum içerisindedir. Ölçüm sonuçlarında frekanslarda gerçekleşen faz kaymaları ve genlikteki uyumsuzluklar üretilen malzemenin üretim

hataları, ölçümün tam soğurumlu odada yapılamaması ve ölçümlerin manuel olarak yapılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 10. (a) Deneysel ve simülasyon olarak elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları (b) Deneysel ve simülasyon olarak elde edilen PCR.

## TARTIŞMA

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün performans analizini yapmak için literatürde yapılan benzer çalışmalarla kıyaslayıp üstün yönlerini tartışmak için Çizelge 1'i oluşturduk. Çizelge 1 de önerilen Ku bant metayüzey polarizasyon dönüştürücü literatürde yapılan diğer Ku band metayüzey polarizasyon dönüştürücüler ile bant genişliği, kalınlığı, alttaş tipi, polarizasyon tipi ve eğik açı performansı açısından performansları kıyasladık.

Çizelge 1. Önerilen Ku band metayüzey polarizasyon dönüştürücünün referans (Nguyen ve ark.,2021)ve (Yang ve ark.,2021)ile kıyaslaması

Referanslar	Bant Genişliği [GHz]	Polarizasyon Tipi	Açı	Kalınlığı	Alttaş
(Nguyen ve ark.,2021)	12-18	LP-LP	45	1.6 mm (0.08 $\lambda$ )	FR-4
(Yang ve ark.,2021)	11.9-18.05	LP-LP	45	1.5 mm (0.074 $\lambda$ )	F4B7
(Fang ve ark.,2017)	6.9-15.4	LP-LP	45	3 mm (0.154 $\lambda$ )	FR-4
(Zheng ve ark.,2018)	9.24-17.64	LP-LP	30	2 mm (0.089 $\lambda$ )	FR-4
Bu çalışma	12-18	LP-LP	50	1.6 mm (0.08 $\lambda$ )	FR-4
	11.01-11.19 ve 20.79-22.08	LP-CP			

Çizelge 1 de görüldüğü gibi, önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü diğer Ku band polarizasyon dönüştürücüler ((Nguyen ve ark.,2021; Yang ve ark.,2021; Fang ve ark.,2017) ile neredeyse aynı bant genişliğinde lineer polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmektedir. Fakat bizim önerdiğimiz aygıt lineer dönüşümün yanı sıra ayrıca 11.01-11.19 GHz ve 20.79-22.08 GHz bant genişliklerinde sağ elli polarizasyon dönüşümü de yapmaktadır. Ayrıca önerilen dizayn (Nguyen ve ark.,2021; Yang ve ark.,2021; Fang ve ark.,2017; Zheng ve ark.,2018)'a göre daha geniş açılı durum için ( $50^\circ$ ) eğik açı performansı göstermektedir. Önerilen dizaynın kalınlığı (Nguyen ve ark.,2021) ve (Yang ve ark.,2021)e göre çok yakın olması rekabet edebilir, fakat (Fang ve ark.,2017; Zheng ve ark.,2018)' a göre daha ince bir kalınlığa sahip olduğunu ve ince uygulama gerektiren durumlar için tercih edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Önerilen çalışmanın bir diğer üstünlüğü ise (Yang ve ark.,2021)'e göre pahalı ve zor bulunan F4B malzemesine nazaran, kolay erişilebilir ve ticari olarak ucuz elde edilebilir FR4 alttaş ile gerçekleştirilmiş olmasıdır.

## SONUÇ

Bu çalışmada mikrodalga Ku band (12-18 GHz) frekansları için metayüzey lineer ve dairesel polarizasyon gerçekleştirebilen yansıma temelli polarizasyon dönüştürücü amaçlandı. Önerilen dizayn 12-18 GHz aralığında %90 PCR performansı ile normal geliş altında ve eğik açı altında 50° ye kadar %80 PCR performansı gösterir. Önerilen dizayn lineer polarizasyon dönüşümünün yanı sıra 11.01-11.19 GHz ve 20.79-22.08 GHz bant genişliklerinde dairesel polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Önerilen mikrodalga aygıtı üretilerek deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçları doğrulandı. Ayrıca sonuçlar literatürde yer alan diğer Ku band metayüzey polarizasyon dönüştürücüler ile kıyaslandı ve sonuçlar gösterdiği bizim ürettiğimiz aygıt diğer Ku bant aygıtların sağladığı lineer polarizasyonun yanı sıra ayrıca dairesel polarizasyon avantajı ile hibrit bir rol üstlenmiştir. Ayrıca lineer polarizasyon performansı diğer çalışmalara kıyasla daha geniş eğik açı altında daha kolay erişilebilir alttaş olan FR4 ile daha yüksek performans göstermektedir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Chen HT, Taylor AJ, Yu N, 2016. A review of Metasurfaces: Physics and Applications. Reports on Progress in Physics, 79 (7): 076401.
- Chen HY, Wang JF, Ma H, Qu SB, Zhang JQ, Xu Z, Zhang AX, 2015. Broadband Perfect Polarization Conversion Metasurfaces. Chinese Physics B, 24 (1): 014201.
- Dutta R, Mitra D, Ghosh J, 2020. Dual Band Multifunctional Metasurface for Absorption and Polarization Conversion. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 30 (7): 1-8.
- Fahad AK, Ruan C, Ali S, Nazir R, Haq TU, Ullah S, He W, 2020. Triple-Wide-Band Ultra-Thin Metasheet for Transmission Polarization Conversion. Sci Rep, 10 (1): 8810.
- Fahad AK, Ruan C, Nazir R, Haq TU, He W, 2020. Dual-Band Ultrathin Meta-Array for Polarization Conversion in Ku/Ka-Band With Broadband Transmission. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19 (5): 856-860.
- Kamal B, Chen J, Yin Y, Ren J, Ullah S, Khan B, 2021. Broad-Band and Broad-Angle Linear and Circular Polarization Converting Metasurface. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, inpress: 1-11.
- Khan MI, Khalid Z, Tahir FA, 2019. Linear and Circular-Polarization Conversion in X-band Using Anisotropic Metasurface. Sci Rep, 9 (1): 4552.
- Kundtz N, Smith DR, 2010. Extreme-Angle Broadband Metamaterial Lens. Nat Mater, 9 (2): 129-132.
- Landy NI, Sajuyigbe S, Mock JJ, Smith DR, Padilla WJ, 2008. Perfect metamaterial absorber. Phys Rev Lett, 100 (20): 207402.
- Mutlu M, Ozbay E, 2012. A Transparent 90° Polarization Rotator by Combining Chirality and Electromagnetic Wave Tunneling. Applied Physics Letters, 100 (5): 051909.
- Nguyen TQH, Nguyen TKT, Nguyen TQM, Cao TN, Phan HL, Luong NM, Vu DL, 2021. Simple Design of a Wideband and Wide-Angle Reflective Linear Polarization Converter Based on Crescent-Shaped Metamaterial for Ku-Band Applications. Optics Communications, 486:126773.

- Papas CH, 1965. Theory of Electromagnetic Wave Propagation. Dover Publications, No:2, s.118-126, New York-ABD.
- Pouyanfar N, Nourinia J, Ghobadi C, 2021. Multiband and multifunctional polarization converter using an asymmetric metasurface. *Sci Rep*, 11 (1): 9306.
- Qi Y, Zhang B, Liu C, Deng X, 2020. Ultra-Broadband Polarization Conversion Meta-Surface and its Application in Polarization Converter and RCS Reduction. *IEEE Access*, 8: 116675-116684.
- Schurig D, Mock JJ, Justice BJ, Cummer SA, Pendry JB, Starr AF, Smith DR, 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science*, 314 (5801): 977-980.
- UrRahman S, Amin F, Ahmed A, Yi W, Cao Q, 2020. Comment on “A Novel Ultrathin Wideband Metamaterial Absorber for X-Band Applications”. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 34 (4): 462-467.
- Wang H, Prasad SV, Mitchell A, Rosengarten G, Phelan P, Wang L, 2015. Highly Efficient Selective Metamaterial Absorber for High-Temperature Solar Thermal Energy Harvesting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137: 235-242.
- Withayachumnankul W, Jaruwongrunsee K, Tuantranont A, Fumeaux C, Abbott D, 2013. Metamaterial Based Microfluidic Sensor for Dielectric Characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189: 233-237.
- Yang X, Ding Z, Zhang Z, 2021. Broadband Linear Polarization Conversion Across Complete Ku Band Based on Ultrathin Metasurface. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 138:153884.
- Zhao J, Cheng Y, 2016. A High-Efficiency and Broadband Reflective 90° Linear Polarization Rotator Based on Anisotropic Metamaterial. *Applied Physics B*, 122 (10): 1-7.
- Fang C, Cheng Y, He Z, Zhao J, Gong R, 2017. , Design of a wideband reflective linear polarization converter based on the ladder-shaped structure metasurface. *Optik*, 137: 148-155.
- Zheng Q, Guo C, Li H, Ding J, 2018. Broadband radar cross-section reduction using polarization conversion metasurface. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10 (2): 197-206.