



Araştırma Makalesi - Research Article

Çok Bantlı ve Çok İşlevli Lineerden Dairesel Polarizasyona Dönüşüm Bandını İyileştiren Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü

Multi-Band and Multi-Functional Metasurface Polarization Converter Improving Linear to Circular Polarization Conversion Band

Öznur Türkmen Küçüksarı^{1*}

Geliş / Received: 13/07/2023

Revize / Revised: 29/08/2023

Kabul / Accepted: 27/09/2023

ÖZ

Bu çalışmada, arka yüzeyi metal ile kaplı bir FR4 plaka üzerine iç içe yerleştirilmiş iki yarıklı iki metal halka ve en içe yerleştirilmiş bir yarıklı dairesel yamadan oluşan yansıtıcı çok işlevli bir metalmazeme polarizasyon dönüştürücü tasarlanmıştır. Önerilen polarizörün 2-12 GHz arasında davranışı incelenmiştir. 4.64 GHz önerilen yapının en düşük çalışma frekansıdır. Dört bölgede (5.42-5.44 GHz, 7.28-7.34 GHz, 8.05-8.07 GHz ve 11.57-11.59 GHz) dar bantlı doğrusaldan doğrusala (LTL) neredeyse ideal polarizasyon dönüşümü elde edilmiştir. İki bantta (4.64-4.71 GHz ve 8.7-10.43 GHz) ise doğrusaldan dairesele (LTC) neredeyse ideal polarizasyon dönüşümü elde edilmektedir. Bu polarizasyon dönüştürücü için sayısal benzetimler yaygın olarak kullanılan CST elektromanyetik simülasyon programı ile gerçekleştirilmiştir. LTL bantlarında doğrusal dönüşüm için gerekli olan polarizasyon dönüşüm oranı (PCR) ≈ 1 ve eliptiklik değeri (e) ≈ 0 sağlanmıştır. LTC bantlarında ise dairesel dönüşüm için gerekli olan PCR ≈ 0.5 ve $e \approx -1$ sağlanmıştır. Önerilen ve referans verilen bazı polarizasyon dönüştürücülerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü, Çok İşlevli Dönüştürücü, Doğrusaldan Doğrusala Dönüştürme, Doğrusaldan Dairesele Dönüşüm Bandını İyileştirme, Çok Bantlı Dönüştürücü

ABSTRACT

In this study, a metasurface multifunctional reflective polarization converter consisting of two metal rings with two slots and a circular patch with an innermost slot is designed on an FR4 plate with a metal back surface. The behavior of the proposed polarizer between 2-12 GHz is investigated. 4.64 GHz is the lowest operating frequency of the proposed structure. An almost ideal narrow band linear to linear (LTL) polarization conversion is obtained at four regions such as 5.42-5.44 GHz, 7.28-7.34 GHz, 8.05-8.07 GHz and 11.57-11.59 GHz. An almost ideal polarization conversion from linear to circular (LTC) in two bands is obtained at 4.64-4.71 GHz and 8.7-10.43 GHz. Numerical simulations for this polarization converter are carried out with CST which is a widely used electromagnetic simulation program. In LTL bands, polarization conversion ratio (PCR) ≈ 1 and ellipticity (e) ≈ 0 required for a linear conversion are achieved. In LTC bands, PCR ≈ 0.5 and $e \approx -1$ required for a circular conversion are provided. A comparison between the proposed and some referenced polarization converters is performed.

Keywords- Metasurface Polarization Converter, Multi-Functional Converter, Linear to Linear Conversion, Improved Linear to Circular Conversion Band, Multiband Polarizer

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: oznur.kucuksari@kocaeli.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2177-3793>)
Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Kampüsü, Kocaeli, Türkiye

I. GİRİŞ

Polarizasyon dönüştürücüler, gelen bir elektromanyetik dalganın polarizasyonunu belirli frekans bandında değiştiren aygıt veya yüzeylerdir [1]. Elektromanyetik alanların polarizasyon dönüşümü antenler, radar haberleşmesi ve hassas algılayıcılar gibi birçok alanda önemlidir [1-2]. Minyatürizasyon ve bant genişletme gibi önemli avantajlar sunduğu için genelde periyodik olarak tekrarlanan birim hücrelerden oluşan metayüzeyler yeni polarizasyon dönüştürücülerin tasarımında ya da geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Metayüzey temelli literatürde birçok polarizasyon dönüştürücü çalışması bulunmaktadır [1-20]. Bu çalışmalar yansıtıcı türü anizotropik metayüzey [1, 18] ya da iletim türü şiral metayüzeyler [4-6] kullanılarak yapılan polarizörler olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Mikrodalga [1-14] ya da Terahertz [15-17] bandı gibi değişik bantlarda tasarımlar gerçekleştirilebilir. Tasarımlar ayrıca çok bantlılık [3-7], çoklu polarizasyon dönüşümü [3, 4, 11] ve geniş bantta dönüşüm [9, 12, 13] gibi farklı özelliklere sahip olabilir. Yansıtıcı türü anizotropik metayüzey tasarımlar genelde arka tarafı tamamen metal ile kaplı bir dielektrik tabaka üzerine anizotropik şekiller basılarak elde edilirler [18].

Çift bantlı LTC (9.1-16.5 GHz, 20-25.4 GHz) polarizasyon dönüşümü ve tek bantlı LTL (17.4-18.9 GHz) polarizasyon dönüşümü için çift katmanlı metalik L-modellerinden oluşan bir polarizör çalışılmıştır [7]. Çok bantlı LTL ve LTC polarizasyon dönüşümü 3.6 mm kalınlığındaki bir dielektrik tabaka üzerine çapraz olarak yerleştirilmiş altıgen metalik parçalar yerleştirilerek elde edilmiştir [3]. Çift bantlı LTC dönüşümü (5.95-8.8 GHz, 12.68-15.58 GHz) ve tek bantlı LTL dönüşümü (9.33-11.77 GHz) 3.1 mm kalınlığında alt tabakaya sahip bir FR4 üzerinde iç çapraz yapıları ve dıştaki iki serpantin çizgi çiftini aşındıran bir polarizör önerilmiştir [11]. Kaynak [8]'de metal destekli bir yalıtkan tabaka üzerine kelebek şekilli yamalar kullanarak 4.2-4.9 GHz bant genişliğini kapsayan yeniden yapılandırılabilir bir polarizasyon dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu çalışmada polarizasyon durumu, öngerilim voltajı değiştirilerek ayarlanmıştır. Kaynak [9]'da verilen çalışmada yansıtıcı modunda 6.8-9.7 GHz bandında LTL polarizasyon dönüşümü yapan tasarım üzerinde çalışılmıştır. Kaynak [10]'da 5.35-6.3 GHz bant genişliğinde çalışan çok katmanlı bir topoloji kullanan daireselden doğrusala polarizasyon (CTL) dönüştürücü önerilmiştir. Kaynak [1]'de S/C/X bantlarında metal destekli bir FR4 tabaka üzerine basılmış iki bağlı metal halka ve iki bağlantısız metal kare yamadan oluşan birim hücreye sahip çok bantlı yansıtıcı metamalzeme polarizasyon dönüştürücü çalışılmıştır.

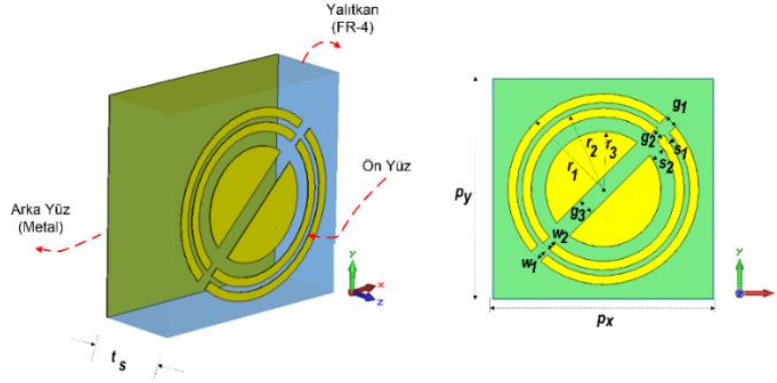
Bu çalışmada tasarım açısından daha az karmaşık bir yöntem olan yansıtıcı türü anizotropik metayüzey tasarımı yapılmıştır. Önerilen yapı arka yüzeyi metal ile kaplı bir FR4 plaka üzerine iç içe yerleştirilmiş iki yarıklı iki metal halka ve en içe yerleştirilmiş bir yarıklı dairesel yamadan oluşan basit bir geometriye sahiptir. Literatürde yaygın olarak karşılaşılan sonuçları yanlış değerlendirme durumunun [14, 15, 17] önüne geçmek için yansıma büyüklüğü, bağlı faz farkı, polarizasyon dönüşüm oranı, eliptiklik ve eksenel oran eş zamanlı olarak değerlendirilerek polarizasyon dönüştürücünün çalışma bandına ve polarizasyon durumuna karar verilmiştir. Önerilen yapı dört frekans civarında (5.42-5.44 GHz, 7.28-7.34 GHz, 8.05-8.07 GHz ve 11.57-11.59 GHz) dar bantlı LTL polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Önerilen yapı iki bantta (4.64-4.71 GHz, 8.7-10.43 GHz) LTC polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. 8.7-10.43 GHz = 1.73 GHz'lik geniş bir bantta oldukça kararlı mükemmel yakın LTC bölgesi elde edilmiştir. Önerilen çalışmada ideal LTC bandının sistematik şekilde nasıl genişletildiği gösterilmiştir. Ayrıca polarizasyon dönüştürücüler konusunda çok az sayıda Türkçe literatür [18] bulunmaktadır. Çalışma bu yönüyle de Türkçe literatüre katkı sağlayacaktır. Tasarlanan yapının literatürde bulunan bazı yapılarla karşılaştırması yapılmıştır.

II. POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

A. Birim Hücre Tasarımı

Önerilen çok fonksiyonlu polarizasyon dönüştürücünün birim hücrenin perspektif ve önden görünüşleri Şekil 1’de verilmiştir. Tasarım parametreleri Şekil 1 üzerine yazılmıştır. Polarizasyon dönüştürücü, kolay erişilebilir bir yalıtkan tabaka olan FR4 plaka kullanılarak tasarlanmıştır. Tabakanın dielektrik sabiti $\epsilon_r=4.3$, kayıp tanjantı $\tan \delta = 0.0009$ değerlidir. Yalıtkan tabakanın kaplaması iletkenliği $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m ve kalınlığı $t_m=0.035$ mm olan bakırdır. Yapının birim hücresi, köşegenlerden iki kesiğe sahip iki metal dairesel halka ve en içte kesikli metal dairesel yamadan oluşmaktadır. Tasarlanan polarizasyon dönüştürücü, x ve y yönleri boyunca periyodik olarak tekrarlanan bu metal birim hücrelerden oluşmaktadır. Yalıtkan tabakanın arka tarafı tamamen metal kısma sahiptir.

CST Mikrodalga Stüdyosunun “Frequency Domain Solver” yazılımıyla, tasarlanan birim hücrenin x ve y yönleri boyunca periyodik sınır koşulu (unit cell) kullanılarak periyodik olarak tekrarlanması sağlanmıştır. z yönünde ise yapının yansımaya ve iletim karakteristiğini elde edebilmek için açık sınır koşulu (open-add space) tanımlanmıştır. Yapının optimum boyutlarına detaylı parametrik çalışmalar sonucunda karar verilmiştir. Tasarlanan birim hücrenin x ve y yönleri boyunca uzunluğu $p_x=p_y=10$ mm’dir. Dış ve iç halkanın genişliğini sırasıyla $w_1 = w_2=0.4$ mm’dir. r_1, r_2 ve r_3 dairesel yapıların yarıçaplarına karşılık gelmektedir. $r_1=4.3$ mm, $r_2=3.65$ mm ve $r_3=2.6$ mm olarak seçilmiştir. s_1 ve s_2 dairesel yapılar arasındaki mesafeyi göstermektedir. $s_1=0.25$ mm ve $s_2=0.65$ mm olarak seçilmiştir. $g_1=0.6$ mm, $g_2=0.4$ mm ve $g_3=0.8$ mm ise dairesel yapıların birim hücre köşegeni doğrultusunda açıklık genişliğidir.



Şekil 1. Tasarlanan polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin perspektif(sol) ve ön(sağ) görünüşü.

B. Teori ve Benzetim Sonuçları

Genelde polarizasyon dönüştürücüler yansıtıcı ya da ileten dönüştürücüler olarak iki grupta incelenir. Bu makalede çalışılan yapının arka tarafı tamamen metal olduğundan tasarlanan polarizasyon dönüştürücü yansıtıcı bir dönüştürücüdür. Doğrusal polarizasyonlu bir dalga, yansıtıcı bir yüzey üzerine geldiğinde yansıyan dalgalar hem eş-polarizasyonlu hem de çapraz-polarizasyonlu bileşenlerden oluşur. Gelen ve yansıyan elektrik alanlar arasındaki ilişki Eşitlik (1)’de verilen matris ile tanımlanır. i ve r sırasıyla gelen ve yansımaya ifade etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, x ve y polarizasyon durumlarını göstermektedir [3].

$$\begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Buradan y polarize gelen dalga için eş-polarizasyon (r_{yy}) ve çapraz-polarizasyon (r_{xy}) yansımaları aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$r_{yy} = E_y^r / E_y^i \quad (2)$$

$$r_{xy} = E_x^r / E_y^i \quad (3)$$

Yansımaya katsayıları, yansımaların genlik değerleridir. Doğrusaldan doğrusala ideal polarizasyon dönüşümü için, eş polarizasyon yansımaya katsayısı değerleri $|r_{yy}|=0$ ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayısı değerleri $|r_{xy}|=1$ olmalıdır. Doğrusaldan dairesel polarizasyon dönüşümü içinse $|r_{yy}|$ ’nin ve $|r_{xy}|$ 0.7 yakın olmalıdır. Bağlı faz farkı ($\Delta\phi_{xy}$) ise Eşitlik (4)’teki gibidir. Şekil 2 ve Şekil 3’te sırasıyla yansımaların genlik ve faz değerleri verilmiştir.

$$\Delta\phi_{xy} = \phi_{yy} - \phi_{xy} = \arg(r_{yy}) - \arg(r_{xy}) \quad (4)$$

Polarizasyon dönüşüm bölgelerine karar verilirken göz önüne alınan diğer bir büyüklük polarizasyon dönüşüm oranı (PCR)'dir. PCR ise Eşitlik (5)'teki gibi verilebilir. Doğrusaldan doğrusala ideal polarizasyon dönüşümü için PCR=1, doğrusaldan dairesele ideal polarizasyon dönüşümü içinse PCR=0,5 olmalıdır. Şekil 4'te PCR değerleri verilmiştir.

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

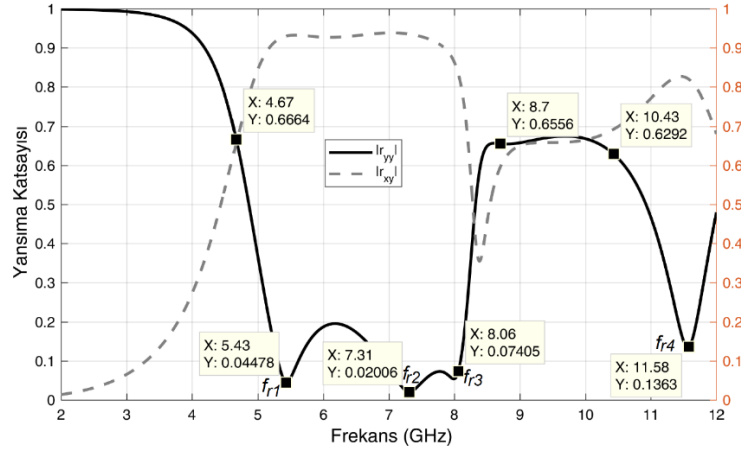
Ayrıca aksenal oran (AR) ve eliptiklik (e), polarizasyon dönüşümünü doğru değerlendirmek için diğer parametrelerle eşzamanlı olarak kullanılmalıdır. e ve AR Eşitlik (6)-(7)'da verilmiştir [11,1].

$$e = \frac{2|r_{yy}||r_{xy}|\sin(\Delta\phi_{xy})}{|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2} \quad (6)$$

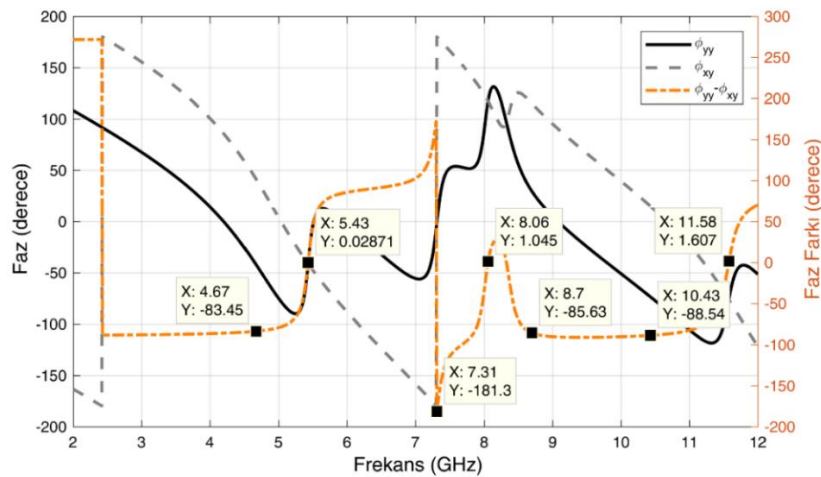
$$AR = \left(\frac{|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2 + \sqrt{a}}{|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2 - \sqrt{a}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de $a = |r_{yy}|^4 + |r_{xy}|^4 + 2|r_{yy}|^2|r_{xy}|^2 \cos(2\Delta\phi_{xy})$ 'dir.

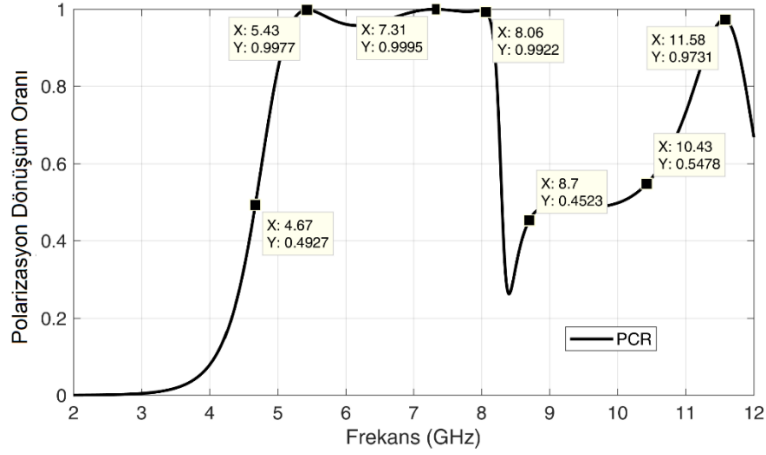
Doğrusaldan doğrusala ideal polarizasyon dönüşümü için $e=0$ ve $AR=\infty$, doğrusaldan dairesele ideal polarizasyon dönüşümü içinse $e=\pm 1$ ve $AR=0$ olmalıdır. Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla e ve AR değerleri verilmiştir. e değerinin 1'e eşit olması sağ elli dairesel polarizasyonu (RHPC) gösterirken -1'e eşit olması sol elli dairesel polarizasyonu (LHPC) gösterir.



Şekil 2. y yönünde polarize gelen dalga için simüle edilmiş eş polarizasyon (r_{yy}) ve çapraz polarizasyon (r_{xy}) yansıma büyüklükleri.

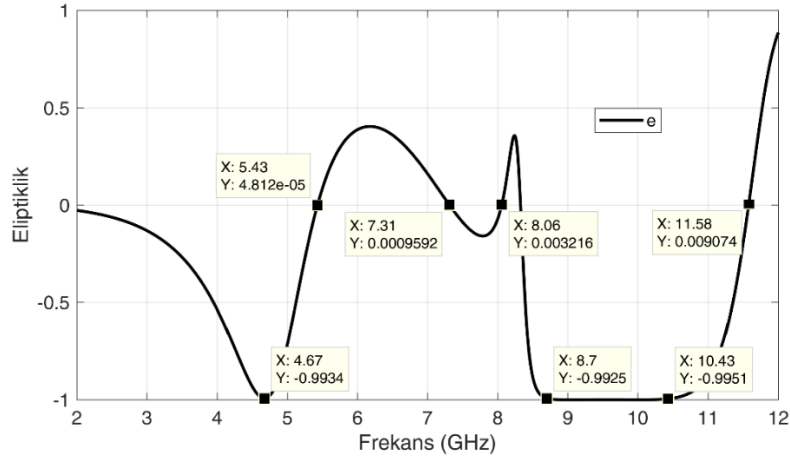


Şekil 3. Derece cinsinden y yönünde polarize gelen dalga için simüle edilmiş eş polarizasyon (r_{yy}) ve çapraz polarizasyon (r_{xy}) yansıma faz değerleri (solda) ve bağıl faz farkları (sağda).

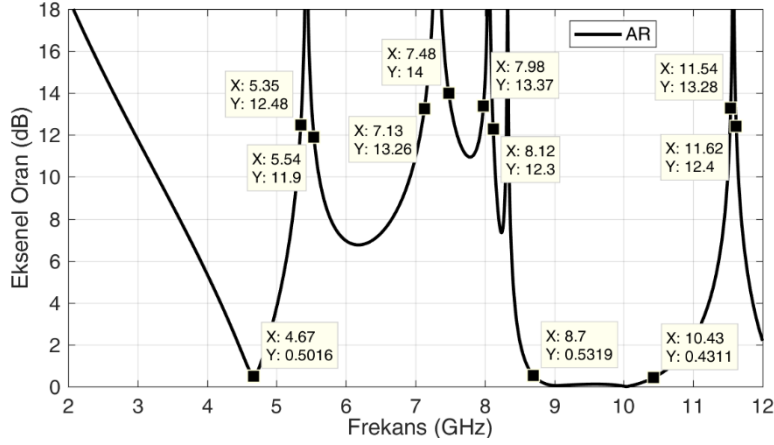


Şekil 4. Polarizasyon dönüşüm oranı (PCR).

Özet olarak ideal bir doğrusal polarizasyondan doğrusal polarizasyona dönüşüm durumu için, bu nicelikler aynı anda $PCR=1$, $\Delta\phi_{xy}=n\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), $e=0$, $AR=\infty$ olmalıdır. Öte yandan, ideal bir doğrusal polarizasyondan dairesel polarizasyona dönüşüm durumu için; $PCR=0.5$, $\Delta\phi_{xy}=n\pi/2$ ($n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), $e=\pm 1$ ve $AR=0$ aynı anda sağlanmalıdır. Şekil 2-6'dan anlaşıldığı gibi tasarlanan polarizasyon dönüştürücü dört bölgede doğrusaldan doğrusala (LTL) polarizasyon dönüşümünü 5.42-5.44 GHz, 7.28-7.34 GHz, 8.05-8.07 GHz ve 11.57-11.59 GHz bantlarında sağlamaktadır. LTL dönüşüm bölgelerine karar verilirken $PCR \geq 0.95$ ve $e=0 \pm 0.01$ kriterlerinin aynı anda sağlanma şartı göz önüne alınmıştır. Doğrusaldan doğrusala (LTL) polarizasyon dönüşümü gerçekleşen bu bölgeler yapının f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} ve f_{r4} olarak adlandırılan rezonans frekansları civarına denk gelmektedir. Ayrıca iki bölgede doğrusaldan dairesel (LTC) polarizasyon dönüşümü 4.64-4.71 GHz ve 8.7-10.43 GHz bandında elde edilmektedir. LTC dönüşüm bölgelerine karar verilirken $PCR = 0.5 \pm 0.05$ ve $-1 \leq e \leq -0.99$ kriterlerinin aynı anda sağlanma şartı göz önüne alınmıştır. Yapı diyagonal olarak simetrik olup x ve y yönünde polarize normal gelen dalga için yansımalar benzer özelliklere sahip olduğundan dolayı bu bölümde yalnız y polarize normal gelen dalga için sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5. Eliptiklik (e) değerleri.



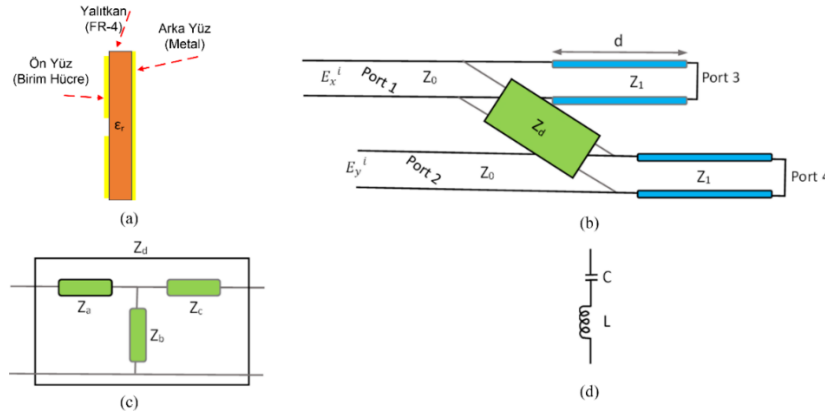
Şekil 6. dB cinsinden eksenel oran (AR).

C. Eşdeğer Devre Modeli

Tek katmanlı bir yansıtıcı polarizasyon dönüştürücünün genel geometrik yapısı Şekil 7 (a)'da verilmiştir. Böyle bir yansıtıcı polarizasyon dönüştürücü birim hücresi, Şekil 7 (b)'de verilen iki modlu Foster devre eşdeğeri ile modellenebilir [1, 18]. E_x^i ve E_y^i normal gelen x ve y polarizasyonlu dalgayı göstermektedir. $Z_1 = Z_0/\sqrt{\epsilon_r}$, Şekil 7 (b)'de mavi transmisyon hattı ile gösterilen d kalınlığına sahip yalıtkan tabakanın karakteristik empedansını ifade etmektedir. $Z_0 = 377\Omega$ serbest uzay dalga boyudur. ϵ_r tabakanın dielektrik sabitidir. Devrede yalıtkan tabakanın arka yüzü tamamen metal kaplamalı olduğu için Port 3 ve Port 4 kısa devre ile gösterilmiştir. Eşdeğer devredeki empedans matrisi Z_d ise Şekil (c)'de verildiği gibi bir T tipi devre ile verilebilir. Devrede Z_a , Z_b , Z_c ve Z_d toplu parametrelili (lumped) elemanlardır. Z_d için basitleştirilmiş bir seri LC devresi Şekil 7 (d)'de verilmiştir. Şekil 7 (d)'de verilen devre Bölüm II-F'de tasarımın elektriksel davranışını açıklamak için ayrıca kullanılacaktır. Devredeki L ve C yapının toplam endüktans ve kapasitans değerlerine karşılık gelmektedir. Empedans matrisi Z_d 'nin toplu parametrelili elemanlar ve yansıma katsayıları cinsinden ifadesi sırasıyla Eşitlik (8) ve Eşitlik (9)'da verilmiştir.

$$Z_d = \begin{bmatrix} Z_a + Z_b & Z_b \\ Z_a & Z_a + Z_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Z_d = Z_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

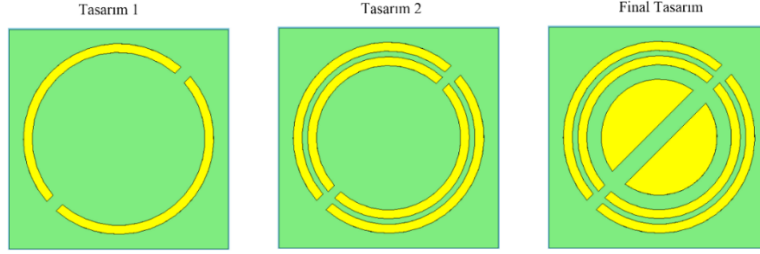


Şekil 7. (a) Tek katmanlı bir yansıtıcı polarizasyon dönüştürücü için genel geometrik yapı, (b) Eşdeğer devre, (c) Z_d için T tipi eşdeğer devre, (d) Z_d için basitleştirilmiş eşdeğer devre.

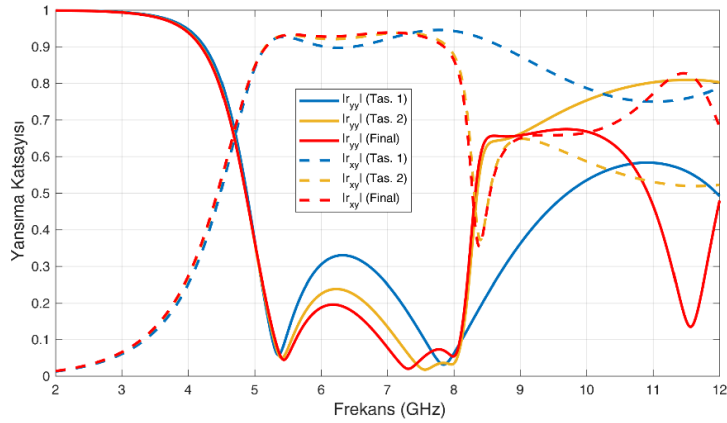
D. Tasarım Aşamaları

Önerilen polarizasyon dönüştürücünün tasarım aşamaları Şekil 8'de görüldüğü gibi üç aşamadan oluşmaktadır. Tasarım 1 olarak adlandırılan tasarımın birim hücresi yarıçapı (r_1) 4.3 mm olan 2 yarıkli tek halkadan oluşmaktadır. Tasarım 2 olarak adlandırılan tasarımın birim hücresi ise Tasarım 1'e yarıçapı (r_2) 3.65 mm olan ikinci bir halka eklenerek oluşturulmuştur. Final tasarım ise Tasarım 2'nin içi kısmına yarıçapı (r_3) 2.6 mm olan yarıkli bir dairesel yama eklenerek oluşturulmuştur. Şekil 9-10'dan görüldüğü gibi Tasarım 1'de bir dar bantta

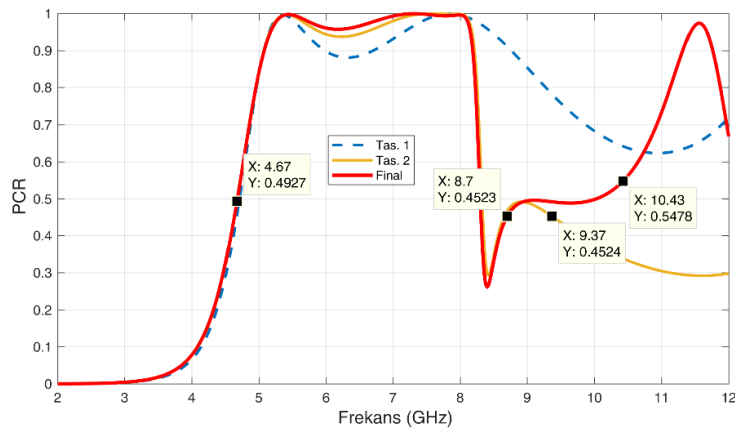
doğrusaldan dairesele (LTC) polarizasyon dönüşümü 4.64-4.71 GHz bandında elde edilmektedir. Tasarım 2’de ise iki bölgede (4.64-4.71 GHz, 8.7-9.37 GHz) doğrusaldan dairesele (LTC) polarizasyon dönüşümü elde edilmektedir. Final Tasarım’da ise doğrusaldan dairesele (LTC) polarizasyon dönüşümü olan ikinci bant 8.7-10.43 GHz aralığına genişletilmiştir. Tasarım 2 de ikinci LTC bölgesi 0.67 GHz iken, Final Tasarım’da 1.73 GHz’dir. Bu bantta PCR değeri 0.5 civarından kararlı bir davranış göstermektedir. LTC dönüşüm bölgelerine karar verilirken $PCR = 0.5 \pm 0.05$ ve $-1 \leq e \leq -0.99$ kriterleri göz önüne alınmıştır. Özetle en içe eklenen yarıklı dairesel yama sayesinde 1.73 GHz’lik frekans bandında mükemmel yakın LTC polarizasyon dönüşümü elde edilmiştir.



Şekil 8. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün tasarım aşamaları.



Şekil 9. Tasarım 1, Tasarım 2 ve Final Tasarım için eş polarizasyon (r_{yy}) ve çapraz polarizasyon (r_{xy}) yansımaları.

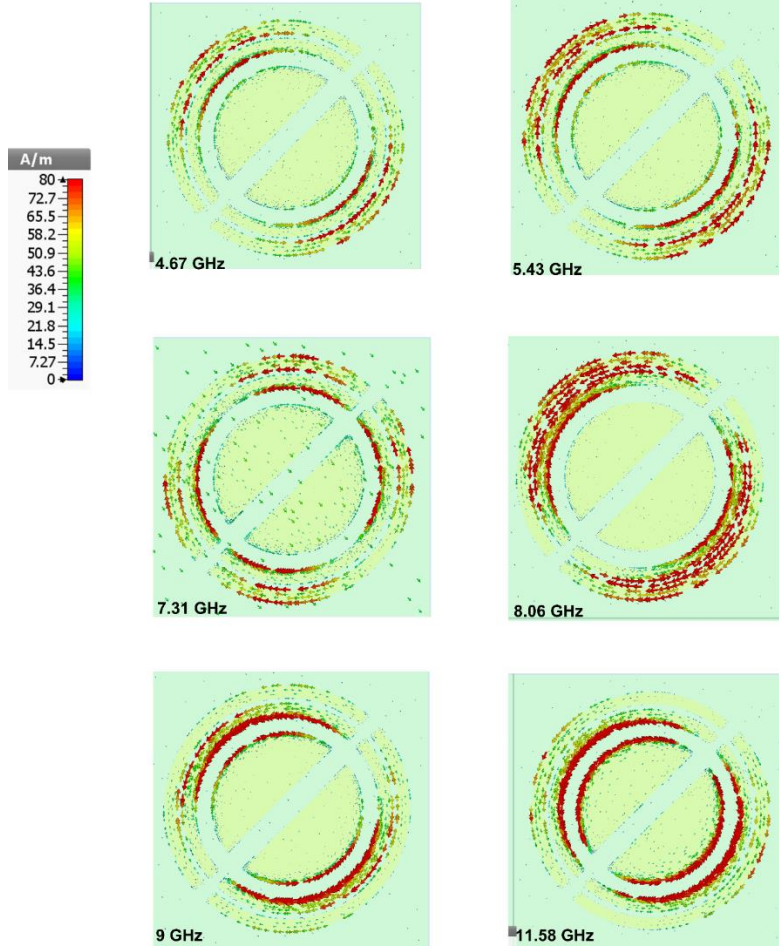


Şekil 10. Tasarım 1, Tasarım 2 ve Final Tasarım için PCR değerleri.

E. Polarizasyon Dönüştürücünün Birim Hücreindeki Akım Dağılımı

Seçilen altı farklı çalışma frekansında (4.67 GHz, 5.43 GHz, 7.31 GHz, 8.06 GHz, 9 GHz ve 11.58 GHz) birim hücre üzerindeki akım dağılımları 0° faz için Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11’den görüldüğü gibi 4.67 ve 5.43 GHz’de akımlar dış ve orta halka üzerinde saat yönünde akacak şekilde yoğunlaşmıştır. Şekil 11’den görüldüğü gibi 7.31 GHz ve 8.06 GHz’de ise akımlar dış ve orta halka üzerinde saat yönünün tersinden akacak şekilde yoğunlaşmıştır. Bölüm II-D de orta halkayı ve yarıklı dairesel yamayı eklemekle 8.7-10.43 GHz ve 11.57-11.59 GHz bölgelerinde polarizasyon dönüşüm bölgeleri ortaya çıktığı gösterilmiştir. 9 GHz ve 11.58 GHz’de ise akımlar orta halka ve dairesel yama üzerinde yoğunlaşmıştır. Burada verilen akım dağılımları Bölüm II-D’de

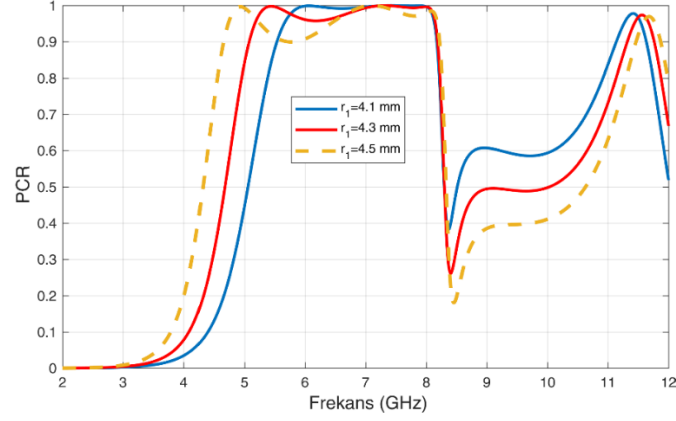
verilen sonuçları desteklemektedir. Şekil 11’de verilen dağılımlar, Bölüm II-F’de tasarım parametrelerinin değişimleriyle çalışılan metayüzey polarizasyon dönüştürücünün karakteristiğinde meydana gelen değişiklikleri açıklamak için de kullanılacaktır.



Şekil 11. Altı farklı çalışma frekansında birim hücre üzerindeki akım dağılımları.

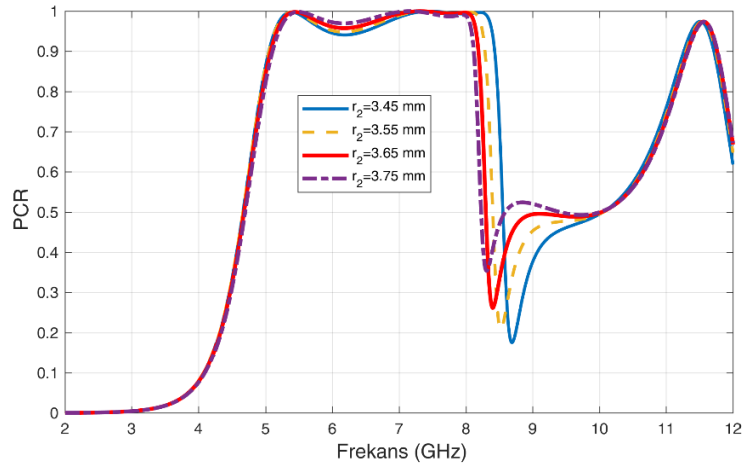
F. Parametrik Çalışma

Bu bölümde bazı tasarım parametrelerinin değiştirilmesinin önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansına etkisi açıklanacaktır. Bir yansıtıcı polarizörün eşdeğeri Bölüm II-C’de açıklandığı gibi en basit haliyle seri bir LC devresi olarak verilebilir [1]. Bir seri LC devresinin rezonans frekansı $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ olarak verilebilir. Burada L ve C yapının toplam endüktans ve kapasitans değerlerine karşılık gelmektedir. Şekil 12’de dış halkanın üç farklı yarıçap uzunluğu (r_1) için PCR değerleri gösterilmiştir. r_1 değeri arttıkça yapının toplam endüktansı arttığı için rezonans frekansları r_1 değerinin artışıyla aşağı frekanslara kaymıştır. Ayrıca r_1 değerinin 0.5 civarında sabit PCR elde etmek için de kritik olduğu anlaşılmaktadır. $r_1=4.3$ mm değeri için 8.7-10.43 GHz aralığında LTC polarizasyon dönüşümü için gerekli olan $PCR \approx 0.5$ sağlanmaktadır.



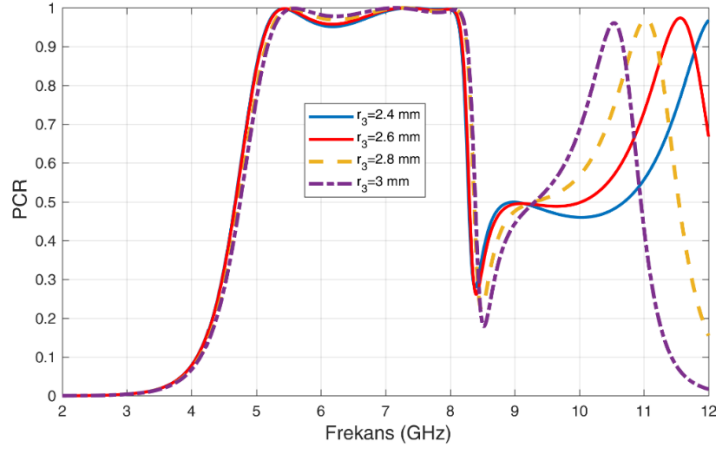
Şekil 12. Dış halkanın farklı yarıçap uzunlukları (r_1) için PCR değerleri.

Orta halkanın yarıçap uzunluğu (r_2) 3.45 mm ile 3.75 mm arasında değiştirilmiştir ve Şekil 13'te elde edilen PCR değerleri gösterilmiştir. r_2 değeri arttıkça 8-9.7 GHz aralığındaki PCR davranışı etkilenmiştir. Diğer frekanslardaki davranış neredeyse aynı kalmıştır. Şekil 11'de verilen akım dağılımlarında görüldüğü gibi orta halka üzerinde en yoğun dağılım 8.06 GHz civarındaki rezonansa oluşmuştur. Bu yüzden r_2 'nin azalmasıyla 8.06 GHz civarında en belirgin artış meydana gelmiştir.



Şekil 13. Orta halkanın farklı yarıçap uzunlukları (r_2) için PCR değerleri.

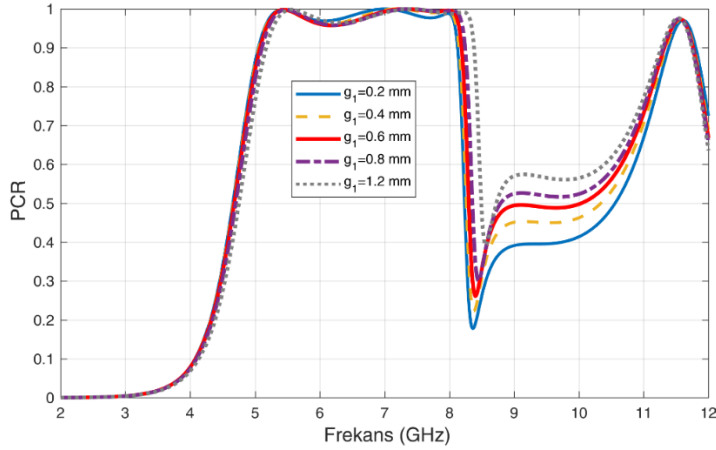
Şekil 14'te ise iç dairenin yarıçap uzunluğu (r_3) 2.4 mm ile 3 mm arasındaki dört farklı değer alınmıştır. r_3 değeri değiştikçe 8-12 GHz aralığındaki PCR davranışı etkilenmiştir. Diğer frekanslardaki davranış neredeyse aynı kalmıştır. Şekil 11'de verilen akım dağılımlarında görüldüğü gibi iç halka üzerinde en yoğun dağılım 11.58 GHz civarındaki rezonansa oluşmuştur. Bu yüzden r_3 'nin azalmasıyla 11.58 GHz civarında en belirgin artış meydana gelmiştir.



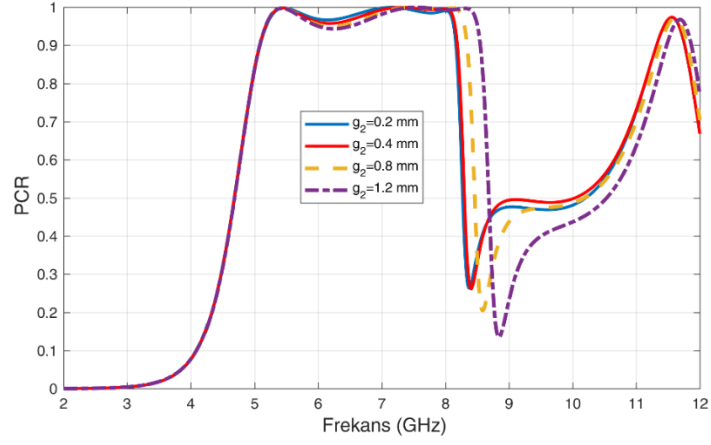
Şekil 14. İç dairenin farklı yarıçap uzunlukları (r_3) için PCR değerleri.

Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de ise dış (g_1) orta (g_2) ve iç (g_3) yapıların farklı yarıçap uzunlukları için PCR değerleri sırasıyla verilmiştir. Şekil 15'ten görüldüğü gibi g_1 'in değişiminin etkisi 8.05-8.07 GHz bandındaki LTL ve 8.7-10.43 GHz bandındaki LTC bölgelerinde daha yoğun olarak ortaya çıkmaktadır. g_2 'nin değişimiyle ise 8.05-8.07 GHz bandındaki LTL, 8.7 GHz-10.43 GHz bandındaki LTC ve 11.57-11.59 GHz bandındaki LTL bandındaki davranışın etkilendiği Şekil 16'dan anlaşılmaktadır. Şekil 17'den, g_3 'ün değişimiyle 8.7 GHz'den daha yüksek frekansların etkilendiği görülmektedir. Bir halkanın ya da yamanın yarıçap uzunluklarının artmasıyla kapasitans değeri azalacağı için rezonans frekansının artması beklenir. Şekil 11'de verilen akım dağılımlarında görüldüğü gibi yarıçap civarına yoğunlaşan akımlar üst frekans bölgelerinde daha fazla olduğu için yarıçap uzunluklarının değişiminden 8-12 GHz'lik üst frekans bölgesi daha baskın olarak etkilenmiştir.

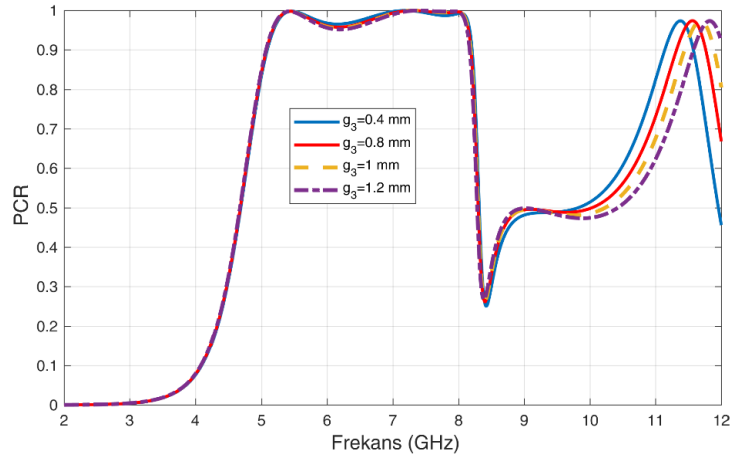
Farklı geliş açısına (θ) sahip x ve y polarizasyonlu dalga için PCR değerleri ise Şekil 18 ve 19'da verilmiştir. PCR değerinden sapma= $\text{PCR} \pm 0.05$ açısal kararlılık belirlenirken değerlendirme kriteri olarak alınmıştır. Şekil 18 ve 19'dan görüldüğü gibi 4.64-4.71 GHz, 5.42-5.44 GHz ve 11.57-11.59 GHz bantlarındaki davranışın $\pm 40^\circ$ 'ye, 7.28-7.34 GHz ve 8.05-8.07 GHz bantlarındaki davranışın $\pm 10^\circ$ 'ye, 8.7-10.43 GHz bandında bantlarındaki davranışın $\pm 20^\circ$ 'ye kadar korunduğu görülmektedir.



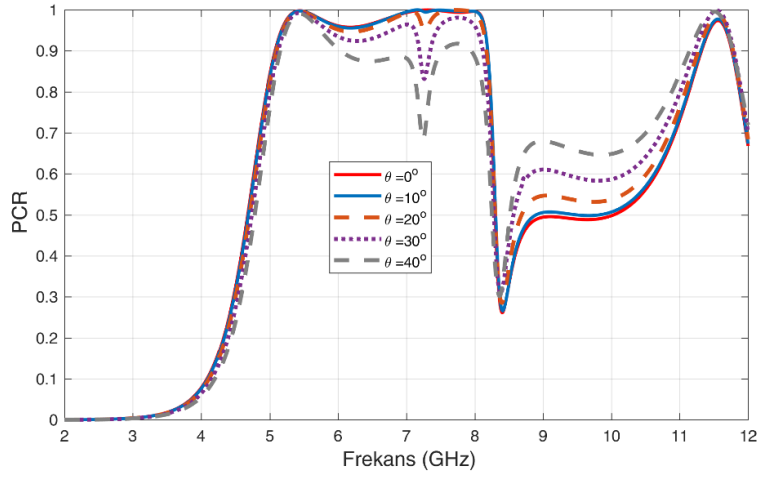
Şekil 15. Dış halkanın farklı açıklık uzunlukları (g_1) için PCR değerleri.



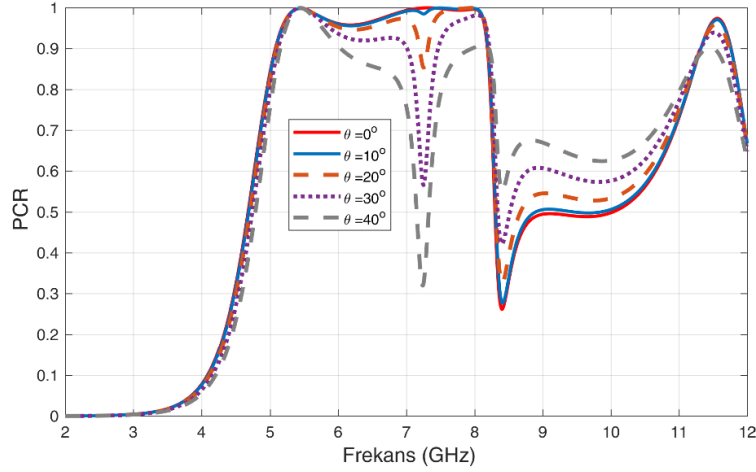
Şekil 16. Orta halkanın farklı açıklık uzunlukları (g_2) için PCR değerleri.



Şekil 17. İç dairenin farklı yarıçap uzunlukları (g_3) için PCR değerleri.



Şekil 18. Farklı geliş açısına (θ) sahip x polarizasyonlu dalga için PCR değerleri.



Şekil 19. Farklı geliş açısına (θ) sahip y polarizasyonlu dalga için PCR değerleri.

G. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma

Bu bölümde makalede önerilen tasarım ile literatürde var olan bazı polarizasyon dönüştürücülerin karşılaştırılması verilmiştir (bkz. Tablo 1). Karşılaştırma kriterleri olarak en düşük çalışma frekansı, bant sayısı, toplam elektriksel kalınlık, toplam tabaka sayısı ve açısal kararlılık değerleri kullanılmıştır. λ_1 her tasarımda polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği en düşük çalışma frekansındaki (f_1) serbest uzay dalga boyudur. Toplam elektriksel kalınlık, λ_1 göz önüne alınarak hesaplanmıştır. $\lambda_1 = c/f_1$ formülü kullanılarak hesaplanır. Burada $c = 3 \times 10^8$ m/s'dir. Kaynak [7, 10]'da verilen çalışma çok katmanlı bir tasarımdır. Bu ve benzeri çok katmanlı tasarımlarla karşılaştırıldığında bu çalışmada önerilen polarizör tasarım kolaylığı sağlamaktadır. Önerilen tasarımın Kaynak [3]'teki tasarım dışındaki Tablo 1'de verilen tüm yapılardan elektriksel olarak kalınlığı daha küçüktür. Kaynak [3]'te verilen tasarımın kalınlığı önerilen tasarımın kalınlığından hafif küçük olsa da bu makalede önerilen yapı daha fazla açısal kararlılık sağlamaktadır. Önerilen tasarım kaynak [3]'te verilen tasarım haricindeki diğer tasarımlardan daha fazla bant sayısı sunmaktadır.

Tablo 1. Bu makalede önerilen tasarım ile literatürde var olan bazı polarizasyon dönüştürücülerin karşılaştırılması.

	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[3]	Önerilen tasarım
En Düşük Çalışma Frekansı (GHz) (f_1)	9.1	3.9	6.8	6.4	5.95	4.34	4.64
Bant Sayısı	3	1	1	2	3	17	6
Toplam Kalınlık	$0.091\lambda_1$	$0.078\lambda_1$	$0.073\lambda_1$	$0.205\lambda_1$	$0.062\lambda_1$	$0.052\lambda_1$	$0.059\lambda_1$
Tabaka Sayısı	2	1	1	7	1	1	1
Açısal Kararlılık(°)	± 30	± 20	X	± 25	X	± 6	$\pm 40, \pm 20, \pm 10$

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada geometrik olarak tasarım kolaylığı sunan, çok bantlı, çok fonksiyonlu yansıtıcı türü bir metayüzey polarizasyon tasarımı önerilmiştir. Önerilen yapı arka yüzeyi metal ile kaplı bir FR4 plaka üzerine iç içe yerleştirilmiş iki yarıkli iki metal halka ve en içe yerleştirilmiş bir yarıkli dairesel yamadan oluşmaktadır. Önerilen yapı dört frekans bölgesinde 5.42-5.44 GHz, 7.28-7.34 GHz, 8.05-8.07 GHz ve 11.57-11.59 GHz dar bantlı neredeyse ideal LTL polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Neredeyse ideal LTC polarizasyon dönüşümü ise 4.64-4.71 GHz ve 8.7-10.43 GHz bölgelerinde sağlanmaktadır. 8.7-10.43 GHz = 1.73 GHz'lik geniş bir bantta oldukça kararlı mükemmel yakın LTC bölgesi elde edilmiştir. Tasarlanan yapının analizleri yansıma büyüklüğü, bağıl faz farkı, polarizasyon dönüşüm oranı, eliptiklik ve eksenel oran parametreleri eş zamanlı olarak değerlendirilerek yapılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen tasarım sürecinden elde edilen deneyimler ışığında ilerleyen çalışma olarak THz ve optik frekanslarda geniş bantlı ve çok fonksiyonlu polarizasyon dönüştürücü tasarımı yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Turkmen-Kucuksari, O. (2023). Multi-functional metamaterial polarization convertor in S/C/X bands. *Optik*, 282, 170865.

- [2] Zhu, L., Zhao, X., Miao, F. J., Ghosh, B. K., Dong, L., Tao, B. R., ... & Li, W. N. (2019). Dual-band polarization convertor based on electromagnetically induced transparency (EIT) effect in all-dielectric metamaterial. *Optics express*, 27(9), 12163-12170.
- [3] Lin, B. Q., Guo, J. X., Chu, P., Huo, W. J., Xing, Z., Huang, B. G., & Wu, L. (2018). Multiple-band linear-polarization conversion and circular polarization in reflection mode using a symmetric anisotropic metasurface. *Physical Review Applied*, 9(2), 024038.
- [4] Cheng, Y., Nie, Y., Cheng, Z., & Gong, R. Z. (2014). Dual-band circular polarizer and linear polarization transformer based on twisted split-ring structure asymmetric chiral metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research*, 145, 263-272.
- [5] Xu, H. X., Wang, G. M., Qi, M. Q., Cai, T., & Cui, T. J. (2013). Compact dual-band circular polarizer using twisted Hilbert-shaped chiral metamaterial. *Optics express*, 21(21), 24912-24921.
- [6] Zhao, Y., Qing, A., Meng, Y., Song, Z., & Lin, C. (2018). Dual-band circular polarizer based on simultaneous anisotropy and chirality in planar metamaterial. *Scientific reports*, 8(1), 1729.
- [7] Liu, X., Zhang, J., Li, W., Lu, R., Li, L., Xu, Z., & Zhang, A. (2016). Three-band polarization converter based on reflective metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 924-927.
- [8] Gao, X., Yang, W. L., Ma, H. F., Cheng, Q., Yu, X. H., & Cui, T. J. (2018). A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(11), 6086-6095.
- [9] Noishiki, T., Kuse, R., & Fukusako, T. (2020). Wideband metasurface polarization converter with double-square-shaped patch elements. *Progress In Electromagnetics Research C*, 105, 47-58.
- [10] Zeng, Q., Ren, W., Zhao, H., Xue, Z., & Li, W. (2019). Dual-band transmission-type circular polariser based on frequency selective surfaces. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(2), 216-222.
- [11] Liao, K., Liu, S., Zheng, X., Zhang, X., Shao, X., Kong, X., & Hao, Z. (2022). A polarization converter with single-band linear-to-linear and dual-band linear-to-circular based on single-layer reflective metasurface. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(2), e22955.
- [12] Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Chaurasiya, D., & Srivastava, K. V. (2015). An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 14, 1172-1175.
- [13] Ahmed, F., Hassan, T., & Shoaib, N. (2020). Comments on “An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings”. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 19(3), 512-514.
- [14] Hoa, N. T. Q., Tuan, T. S., Hieu, L. T., & Giang, B. L. (2021). Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for C-band applications (*Retraction of Vol 9, art no 468, 2019*).
- [15] Pan, W., Yu, X., Zhang, J., & Zeng, W. (2016). A broadband terahertz metamaterial absorber based on two circular split rings. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 53(1), 1-6.
- [16] Tian, X. L., Kong, X. R., Liu, G. B., & Zhang, H. F. (2018). Comment on “A Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Two Circular Split Rings”. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 55(6), 1-3.
- [17] Xu, Z., Sheng, H., Wang, Q., Zhou, L., & Shen, Y. (2021). Terahertz broadband polarization converter based on the double-split ring resonator metasurface. *SN Applied Sciences*, 3, 1-7.
- [18] Öztürk, G., Tutar, F., & Bulut, M. (2022). Ku Band Uygulamalar İçin Geniş Açılı, Basit Dizayn Hibrit Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(2), 680-691.
- [19] Wang, J., Qu, S., Xu, Z., Ma, H., Yang, Y., & Gu, C. (2008). A controllable magnetic metamaterial: split-ring resonator with rotated inner ring. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(7), 2018-2022.
- [20] Feng, J., Chen, X., Wu, L. S., & Mao, J. F. (2023). Broadband electrically tunable linear polarization converter based on a graphene metasurface. *Optics Express*, 31(2), 1420-1431.