



**YENİ BİR POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE
RADAR KESİT ALANI AZALTILMASI
UYGULAMASI**

Fatih TUTAR

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Doktora Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YENİ BİR POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE RADAR KESİT ALANI
AZALTILMASI UYGULAMASI**

(Utilizing a Novel Polarization Converter for the Reduction of Radar Cross Section)

DOKTORA TEZİ

Fatih TUTAR

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Erzurum
Kasım, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

YENİ BİR POLARIZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE RADAR KESİT ALANI AZALTILMASI UYGULAMASI

Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK danışmanlığında, Fatih TUTAR tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr Mehmet ERTUĞRUL <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Uğur Cem HASAR <i>Gaziantep Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL <i>Marmara Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Muhammed Fatih ÇORAPSIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FDK-2024-14282

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç.Dr.Gökhan ÖZTÜRK* danışmanlığında sunulan “**Yeni bir Polarizasyon Dönüştürücü ile Radar Kesit Alanı Azaltılması Uygulaması**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	4	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuçlar	2	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'ten büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Fatih TUTAR	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
22.10.2025	22.10.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatım boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana rehberlik eden, karşılaştığım her zorlukta desteğini esirgemeyen, sabrı ve anlayışıyla araştırma sürecime yön veren değerli danışmanım Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK'e içten şükranlarımı sunarım.

Akademik kariyerim süresince desteklerini her zaman hissettiğim Karadeniz Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a ve Atatürk Üniversitesi öğretim üyeleri Prof. Dr. Tevhit KARACALI ile Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na teşekkür ederim. Tez kapsamında gerçekleştirilen ölçümler ve doktora sürecim boyunca sağladığı destek ve katkılarından dolayı Gaziantep Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Uğur Cem HASAR'a teşekkür ederim.

Araştırma sürecim boyunca gösterdiği özveri, sabır ve desteğiyle her aşamada yanımda olan, beni her zaman motive eden ve bu yolculuğu benim için anlamlı kılan Yurdanur Feyza TOĞRAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince iş birliği ve katkılarıyla sürece değer katan ekip arkadaşım Dr. Merve KURT'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB) ve Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Öncelikli Alan Doktora Burs Programı'na teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan, bana her zaman inanan ve destekleyen anne ve babama sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YENİ BİR POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE RADAR KESİT ALANI AZALTILMASI UYGULAMASI

Fatih TUTAR

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Amaç: Bu tezin amacı, polarizasyondan bağımsız ve yüksek geliş açılarında performansını sürdürebilen polarizasyon dönüştürücüler tasarlamak ve bu aygıtlar kullanılarak farklı geometriler ile geliş açılarında monostatik ve bistatik RCS azalması gerçekleştirmektir.

Yöntem: Polarizasyon dönüştürücüler, CST Microwave Studio ve Ansys HFSS programları kullanılarak modellenmiş, yansıma katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılardan yola çıkarak MATLAB ortamında PCR, eliptiklik, eksenel oran, E_{co}/E_{cross} ve u-v vektör dönüşümü parametrelerine ait genlik ve faz grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca, geliş açısına bağlı olarak birim hücrelerin yansıma katsayısı tepkileri ve yüzey akım dağılımları incelenmiştir. Birim hücreler belirli kodlama düzenleriyle dizilerek, aynı boyut ve geometrideki PEC plaka ile monostatik ve bistatik RCS değerleri karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Geniş bantlı dairesel ve lineer polarizasyon dönüştürücüler elde edilmiştir. Polarizasyon dönüştürücü birim hücreler, çeşitli dizilimlerle değerlendirilmiş ve RCS azalma performansları farklı geliş açıları ile geometrilerde, aynı boyut ve geometrideki PEC malzeme referans alınarak incelenmiştir. Bu kapsamda, monostatik RCS analizleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB eşik değerlerinde; bistatik RCS analizleri ise monostatik konfigürasyonda en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında gerçekleştirilmiştir. Bistatik RCS sonuçları, PEC ve metayüzey uzak alan ışıma örüntüleriyle birlikte sunulurken, metayüzey ve PEC arasındaki yansıma karakteristikleri açık biçimde ortaya konmuştur.

Sonuç: Çalışma sonucunda, farklı malzemeler ve yapısal düzenlemeler kullanılarak C-, X-, Ku-, K- ve Ka- bantlarında çalışan polarizasyon dönüştürücü aygıtlar tasarlanmıştır. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücreler kullanılarak kapsamlı RCS analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde genellikle belirli bir açığa veya yüzey tipine odaklanan çalışmalardan farklı olarak, bu tez kapsamında 0°, 15°, 30° ve 45° geliş açıları için düz plaka, 90° dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik geometriler üzerinde monostatik ve bistatik RCS azalması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metayüzey, Polarizasyon Dönüştürücü, RCS Azaltım, Monostatik RCS, Bistatik RCS, Polarizasyon Dönüşüm Oranı,

Kasım 2025, 261 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

UTILIZING A NOVEL POLARIZATION CONVERTER FOR THE REDUCTION OF RADAR CROSS SECTION

Fatih TUTAR

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Purpose: The aim of this thesis is to design polarization converters that are independent of polarization and can maintain their performance at high incidence angles, and to achieve monostatic and bistatic RCS reduction at different geometries and incidence angles by utilizing these devices.

Method: The polarization converters were modeled using CST Microwave Studio and Ansys HFSS, and their reflection coefficients were obtained. Based on these coefficients, amplitude and phase graphs of the parameters — PCR, ellipticity, axial ratio, E_{co}/E_{cross} , and u-v vector transformation — were generated in MATLAB. In addition, the reflection responses and surface current distributions of the unit cells were analyzed as a function of the incidence angle. The unit cells were then arranged according to specific coding patterns, and their monostatic and bistatic RCS values were compared with those of a PEC plate having the same size and geometry.

Findings: Broadband circular and linear polarization converters were successfully achieved. The polarization converter unit cells were arranged in various configurations, and their RCS reduction performances were evaluated at different incidence angles and geometries, taking a PEC surface of the same size and geometry as a reference. In this context, monostatic RCS analyses were performed at 10 dB, 5 dB, and 3 dB threshold levels, while bistatic RCS analyses were carried out at the frequencies where the maximum monostatic RCS reduction was obtained. The bistatic RCS results were presented together with the far-field radiation patterns of the PEC and metasurface, clearly revealing the difference in reflection characteristics between them.

Results: As a result of this study, polarization converter devices operating in the C-, X-, Ku-, K-, and Ka-bands were designed using different materials and structural configurations. Comprehensive RCS analyses were conducted based on the proposed polarization converter unit cells. Unlike the studies in the literature that generally focus on a specific incidence angle or surface type, this thesis achieved both monostatic and bistatic RCS reduction for incidence angles of 0°, 15°, 30°, and 45° on planar, 90° dihedral, and cylindrical geometries with radii of 200 mm and 300 mm.

Keywords: Metasurface, Polarization Converter, RCS Reduction, Monostatic RCS, Bistatic RCS, Polarization Conversion Ratio

November 2025, 261 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	11
Malzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı	11
Metamalzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı	13
Polarizasyon.....	15
Lineer polarizasyon	15
Dairesel polarizasyon	16
Eliptik polarizasyon.....	17
Radar Kesit Alanı	17
Radar Kesit Alanı Azaltma	18
Şekillendirme.....	18
Radar soğurucu malzemeler	19
Pasif iptal etme	19
Aktif iptal etme	19
MATERYAL ve METOT.....	21
S- Parametreleri	21
Polarizasyon Elipsi ve Eksenel Oran	22
Stoke's Parametreleri	24
Eliptiklik	26
Polarizasyon Dönüşüm Oranı	26
Matematiksel Analiz	28
Serbest Uzak Ölçüm Düzenegi.....	30
ARAŞTIRMA BULGULARI	32

X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	32
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	42
Düz Plaka	44
Dihedral Plaka	48
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	52
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	56
Karşılaştırma.....	59
C-, X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Çok Katmanlı Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	61
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	70
Düz plaka	72
Dihedral plaka.....	76
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	80
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	84
Karşılaştırma.....	87
X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	88
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	96
Düz plaka	98
Dihedral plaka.....	102
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	106
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	110
Karşılaştırma.....	113
X-, Ku-, K- ve Ka-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	114
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	123
Düz plaka	125
Dihedral plaka.....	129
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	133
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	137
Karşılaştırma.....	140
C-, X- ve Ku- Bant Uygulamaları için Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı .	141
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	149
Düz plaka	151
Dihedral plaka.....	155
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	159
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	163

Karşılaştırma.....	166
C-, X-, ve Ku-Bant Uygulamaları için 3D Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı	167
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	176
Düz plaka	178
Dihedral plaka.....	182
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	186
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	190
Karşılaştırma.....	193
X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı ..	194
RCS Azaltım Performansının İncelenmesi	202
Düz plaka	204
Dihedral plaka.....	208
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)	212
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)	216
Karşılaştırma.....	219
SONUÇLAR.....	221
KAYNAKLAR.....	228
ÖZGEÇMİŞ.....	235

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Eşdeğer Devre RLC Parametreleri	41
Tablo 2. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku- ve K Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması	59
Tablo 3. Eşdeğer Devre RLC Parametreleri	69
Tablo 4. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X-, Ku- ve K- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması	87
Tablo 5. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku- ve K- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması ..	113
Tablo 6. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre RLC parametreleri	122
Tablo 7. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku-, K- ve Ka Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması ..	140
Tablo 8. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X- ve Ku- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması ..	166
Tablo 9. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücüye ait Eşdeğer Devre RLC Parametreleri ..	175
Tablo 10. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X-, ve Ku-Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey tabanlı 3D Polarizasyon Dönüştürücüler ile Karşılaştırılması	193
Tablo 11. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku- ve K- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması ..	219
Tablo 12. X-, Ku- ve K- Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	222
Tablo 13. C-, X-, Ku- ve K- Bantlarında Çalışan Çok Katmanlı Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	223
Tablo 14. X-, Ku- ve K-Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	223
Tablo 15. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	224
Tablo 16. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	224
Tablo 17. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	225

Tablo 18. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı	226
---	-----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Periyodik ince tel yapılardan oluşan plazma ortamı (Pendry et al., 1998)	1
Şekil 2. SRR yapısı(Pendry et al., 1999)	2
Şekil 3. Smith ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı yapı (Smith et al., 2001).....	3
Şekil 4. Malzeme ortamında elektrik alan (E), manyetik alan (H) ve EM dalganın yayılım yönünün sağ el kuralıyla gösterilmesi (Tutar, 2021).	13
Şekil 5. Metamalzemelerin ϵ ve μ işaretlerine göre sınıflandırılması ve davranışları (Matei et al., 2025).	13
Şekil 6. Metamalzeme ortamında elektrik alan (E), manyetik alan (H) ve EM dalganın yayılım yönünün sol el kuralıyla gösterilmesi (Tutar, 2021).	15
Şekil 7. Lineer Polarizasyon (Balanis, 2011).	16
Şekil 8. a) Sağ eli dairesel polarizasyon b) Sol eli dairesel polarizasyon (Balanis, 2011). .	17
Şekil 9. a) Sağ eli eliptik polarizasyon b) Sol eli eliptik polarizasyon (Balanis, 2011).	17
Şekil 10. Monostatik ve Bistatik RCS konfigürasyonlarının şematik gösterimi.	18
Şekil 11. İki portlu sistem modeli ve S- parametreleri (Denisowski, 2025).	21
Şekil 12. Polarizasyon elipsi, büyük ve küçük eksen	24
Şekil 13. Poincare küresi üzerinde Stoke's parametrelerinin gösterilmesi (Tutar, 2021).	25
Şekil 14. Temsili polarizasyon dönüştürücü birim hücre ve u-v eksenleri.	28
Şekil 15. Serbest Uzay ölçüm düzeneği.	30
Şekil 16. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi.	33
Şekil 17. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.	33
Şekil 18. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri.	34
Şekil 19. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi.	36
Şekil 20. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $x=1,9-2,5$ mm (b) $y=8-9,8$ mm (c) $L=9,7-9,2$ mm (d) $h=2,4-3,6$ mm.	37
Şekil 21. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için u-v eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı.	38

Şekil 22. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 12,81 GHz, (b) 14,36 GHz, (c) 17,66 GHz.	39
Şekil 23. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları.	40
Şekil 24. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.	40
Şekil 25. Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 16 x 23 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey.	41
Şekil 26. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.	42
Şekil 27. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.	44
Şekil 28. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 11,35 GHz, (b) 16,45 GHz, (c) 10,70 GHz ve (d) 10,87 GHz.....	46
Şekil 29. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.....	48
Şekil 30. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 21,53 GHz, (b) 21,09 GHz, (c) 9,58 GHz ve (d) 18,36 GHz.....	50
Şekil 31. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.....	52
Şekil 32. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,04 GHz, (b) 16,64 GHz, (c) 8,04 GHz ve (d) 8,16 GHz.....	54
Şekil 33. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.....	56
Şekil 34. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,04 GHz, (b) 14,95 GHz, (c) 16,64 GHz ve (d) 8,21 GHz.....	58

Şekil 35. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görüşleri ile ölçülendirilmesi.....	61
Şekil 36. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.	61
Şekil 37. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri.....	63
Şekil 38. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi.....	64
Şekil 39. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=1-2,2$ mm (b) $L=6,95-7,9$ mm (c) $a=3,4-4$ mm (d) $b=3-4,2$ mm.....	65
Şekil 40. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı ..	66
Şekil 41. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 7,99 GHz, (b) 10 GHz, (c) 12,77 GHz, (d) 17,64 GHz, (e) 19,97 GHz.....	67
Şekil 42. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları	67
Şekil 43. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.	68
Şekil 44. Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 40×40 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey	69
Şekil 45. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi	70
Şekil 46. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	72
Şekil 47. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10 GHz, (b) 17,5 GHz, (c) 13,5 GHz ve (d) 15,2 GHz.....	74
Şekil 48. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	76

Şekil 49. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,90 GHz, (b) 15,80 GHz, (c) 17,30 GHz ve (d) 9,50 GHz.....	78
Şekil 50. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	80
Şekil 51. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 16,40 GHz, (b) 16,10 GHz, (c) 16,30 GHz ve (d) 17,90 GHz	82
Şekil 52. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.....	84
Şekil 53. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,30 GHz, (b) 14,40 GHz, (c) 8,50 GHz ve (d) 11,6 GHz.....	86
Şekil 54. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi (Ozturk et al., 2023).....	89
Şekil 55. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.....	89
Şekil 56. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri	90
Şekil 57. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi.(Ozturk et al., 2023).....	91
Şekil 58. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=1-2,2$ mm (b) $L=6,95-7,9$ mm (c) $a=3,4-4$ mm (d) $b=3-4,2$ mm	92
Şekil 59. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) ruu , rvv yansıma katsayıları, (b) φ_{uu} , φ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\varphi$ faz farkı	93
Şekil 60. Önerilen yapının yüzey akım dağılımları: (a) rezonatör – 12,94 GHz, (b) rezonatör – 16,72 GHz, (c) metal taban – 12,94 GHz, (d) metal taban – 16,72 GHz.(Ozturk et al., 2023).....	94
Şekil 61. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları.....	95

Şekil 62. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.(Ozturk et al., 2023)	96
Şekil 63. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	98
Şekil 64. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 15,60 GHz, (b) 17,2 GHz, (c) 16 GHz ve (d) 13 GHz	100
Şekil 65. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	102
Şekil 66. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 24,4 GHz, (b) 25,4 GHz, (c) 23,5 GHz ve (d) 24,3 GHz	104
Şekil 67. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	106
Şekil 68. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 17,7 GHz, (b) 18,2 GHz, (c) 16,9 GHz ve (d) 11,10 GHz	108
Şekil 69. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	110
Şekil 70. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 16,70 GHz, (b) 27 GHz, (c) 12,20 GHz ve (d) 20,30 GHz	112
Şekil 71. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi	114
Şekil 72. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu	115
Şekil 73. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri	116
Şekil 74. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi	117

Şekil 75. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $a=1-1,12$ mm (b) $h=1-2,2$ mm (c) $L=6-7,2$ mm (d) $r=0,9-1,2$ mm	118
Şekil 76. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı	119
Şekil 77. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 13,79 GHz, (b) 19,39 GHz, (c) 25,63 GHz.	120
Şekil 78. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları.....	121
Şekil 79. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları	121
Şekil 80. Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 43×43 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey	122
Şekil 81. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.	123
Şekil 82. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	125
Şekil 83. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 19,43 GHz, (b) 23,88 GHz, (c) 13,60 GHz ve (d) 13,15 GHz.....	127
Şekil 84. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	129
Şekil 85. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 26,16 GHz, (b) 14,29 GHz, (c) 26,50 GHz ve (d) 22,97 GHz.....	131
Şekil 86. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	133
Şekil 87. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 12,79 GHz, (b) 21,10 GHz, (c) 21,43 GHz ve (d) 13,21 GHz	135

Şekil 88. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	137
Şekil 89. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 19,06 GHz, (b) 26,30 GHz, (c) 17,81 GHz ve (d) 25,08 GHz	139
Şekil 90. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi.....	141
Şekil 91. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.....	142
Şekil 92. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri.	143
Şekil 93. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) Eliptiklik değerlerinin açısal değişimi	144
Şekil 94. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre eliptiklik değerleri: (a) $L=12-13,3$ mm (b) $h=2,8-4$ mm (c) $a=3-4,25$ mm (d) $b=7-9,84$ mm	145
Şekil 95. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı	146
Şekil 96. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 6,95 GHz, (b) 8,12 GHz	147
Şekil 97. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları	148
Şekil 98. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.	149
Şekil 99. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	151
Şekil 100. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 7,94 GHz, (b) 8,33 GHz, (c) 16,27 GHz ve (d) 6,84 GHz.....	153
Şekil 101. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	155

Şekil 102. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 7,39 GHz, (b) 14,64 GHz, (c) 15,27 GHz ve (d) 6,49 GHz.....	157
Şekil 103. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	159
Şekil 104. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 17,13 GHz, (b) 17,02 GHz, (c) 17,87 GHz ve (d) 14,47 GHz	161
Şekil 105. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	163
Şekil 106. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,37 GHz, (b) 7,25 GHz, (c) 12,66 GHz ve (d) 14,88 GHz	165
Şekil 107. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi.....	167
Şekil 108. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.	168
Şekil 109. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri	169
Şekil 110. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi	170
Şekil 111. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=2-4,4$ mm (b) $L=2-3,2$ mm (c) $a=9,4-10$ mm (d) $L=11,2-14,2$ mm	171
Şekil 112. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) φ_{uu} , φ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\varphi$ faz farkı.....	172
Şekil 113. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 7,99 GHz, (b) 10 GHz, (c) 12,77 GHz, (d) 17,64 GHz, (e) 19,97 GHz.	173
Şekil 114. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları	174
Şekil 115. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.	174

Şekil 116. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi,	176
Şekil 117. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	178
Şekil 118. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 11,59 GHz, (b) 11,59 GHz, (c) 8,38 GHz ve (d) 8,44 GHz.....	180
Şekil 119. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.....	182
Şekil 120. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,75 GHz, (b) 12,25 GHz, (c) 9,81 GHz ve (d) 11,77 GHz.....	184
Şekil 121. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	186
Şekil 122. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 12,18 GHz, (b) 11,91 GHz, (c) 13,48 GHz ve (d) 8,50 GHz	188
Şekil 123. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	190
Şekil 124. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,73 GHz, (b) 5,75 GHz, (c) 8,17 GHz ve (d) 5,99 GHz.....	192
Şekil 125. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi.....	194
Şekil 126. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.....	195
Şekil 127. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri	196
Şekil 128. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) eliptiklik değerlerinin açısal değişimi	197

Şekil 129. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre eliptiklik değerleri: (a) $L=8-9,92$ mm (b) $a=0,64-2,56$ mm (c) $h=1,6-3,52$ mm (d) $b=5,76-6,72$ mm	198
Şekil 130. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı	199
Şekil 131. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için 10,93 GHz frekansında yüzey akım dağılımı	200
Şekil 132. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları	200
Şekil 133. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 35 x 35 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey	201
Şekil 134. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.	202
Şekil 135. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	204
Şekil 136. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,60 GHz, (b) 10,74 GHz, (c) 10,56 GHz ve (d) 10,65 GHz.....	206
Şekil 137. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	208
Şekil 138. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 23,82 GHz, (b) 24 GHz, (c) 10,40 GHz ve (d) 10,01 GHz.....	210
Şekil 139. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	212
Şekil 140. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,43 GHz, (b) 10,27 GHz, (c) 10,49 GHz ve (d) 10,10 GHz	214
Şekil 141. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları	216

Şekil 142. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,66 GHz, (b) 10,74 GHz, (c) 10,48 GHz ve (d) 10,98 GHz 218



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

∇^2	Laplasyan Operatörü
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti vektörü
E_1	Elektrik alanın x yönü bileşeninin genliği
E_2	Elektrik alanın y yönü bileşeninin genliği
E_{iu}	Gelen elektrik alanın u birim vektörü bileşeni
E_{iv}	Gelen elektrik alanın v birim vektörü bileşeni
E_{ru}	Yansıyan elektrik alanın u birim vektörü bileşeni
E_{rv}	Yansıyan elektrik alanın v birim vektörü bileşeni
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti vektörü
R_{xx}	x'den x'e eş polarizasyon yansıma katsayısı
R_{xy}	y'den x'e çapraz polarizasyon yansıma katsayısı
R_{yx}	x'den y'ye çapraz polarizasyon yansıma katsayısı
R_{yy}	y'den y'ye eş polarizasyon yansıma katsayısı
$\vec{S}$	Poynting vektör
S_0	Toplam yayılma alanı yoğunluğu
S_1	Lineer yatay polarizasyon baskınlığı
S_{11}	1.ortamdan yansıma parametresi
S_{12}	2.ortamdan 1.ortama iletim parametresi
S_2	Lineer dikey polarizasyon baskınlığı
S_{21}	1.ortamdan 2.ortama iletim parametresi
S_{22}	2.ortamdan yansıma parametresi
S_3	Sağ ve sol eli dairesel polarizasyon baskınlığı
$\vec{k}$	Dalga yayılım vektörü
r_{uu}	u birim vektörü yansıma katsayısı
r_{vv}	v birim vektörü yansıma katsayısı
ϵ_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ_{metal}	Metal elektriksel geçirgenlik
ϵ_r	Malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği

μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenliği
μ_{eff}	Etkin manyetik geçirgenlik
μ_r	Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği
φ_{uu}	u birim vektör faz açısı
φ_{vv}	v birim vektör faz açısı
φ_x	Elektrik alanın x yönü bileşenin fazı
φ_y	Elektrik alanın y yönü bileşenin fazı
ω_p	Plazma frekansı
∇	Nabla Operatörü
k	Dalga Numarası
Δf	Frekans Bant Genişliği
c	Işık hızı
n	Kırılma indisi
ε	Elektriksel geçirgenlik katsayısı
μ	Manyetik geçirgenlik katsayısı
σ	İletkenlik
χ	Eliptiklik açısı
ψ	Yönelme açısı
ω	Açısal frekans

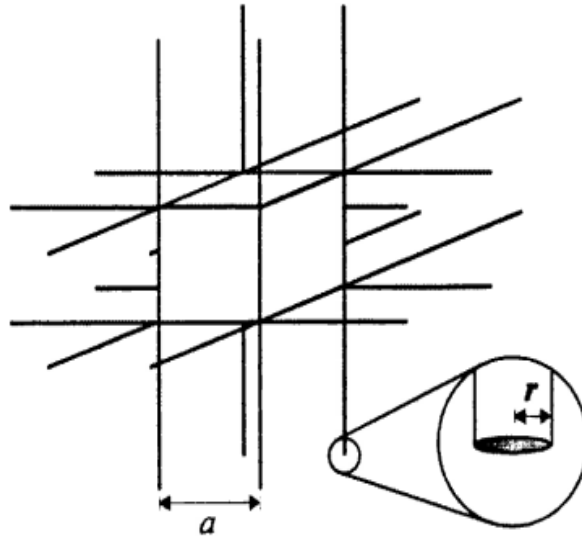
Kısaltmalar

RHCP	Sağ Elli Dairesel Polarizasyon
AR	Eksenel Oran
A-R-A	Absorbsiyon-Yansıma-Absorbsiyon
A-T-A	Absorbsiyon-İletim-Absorbsiyon
BW	Back-Ward (Geri)
CRR	Closed Ring Resonator (Kapalı Halka Resonator)
CST	Computer Simulation Technology (Bilgisayar Simülasyon Teknoloji)
DNG	Double Negative (Çift Negatif)
ERR	Electric Ring Resonator (Elektrik Halka Rezonator)
FSR	Frekans Seçici Rasorber
3D	Üç Boyutlu
GHz	Gigahertz
$\text{GHz} \cdot \text{RIU}^{-1}$	Kırılma İndisi Birimi

HFSS	High Frequency Structure Simulator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITO	Indium Tin Oxide
L+45	Lineer +45° Polarizasyon
L-45	Lineer -45° Polarizasyon
LDP	Lineer Dikey Polarizasyon
LH	Left Handed (Sol Elli)
LHCP	Sol Elli Dairesel Polarizasyon
LP-CP	Lineer Polarizasyondan Dairesel Polarizasyona Dönüşüm
LP-LP	Lineer Polarizasyondan Lineer Polarizasyona Dönüşüm
LYP	Lineer Yatay Polarizasyon
NIM	Negative Index Materials (Negatif İndeks Malzeme)
PCR	Polarizasyon Dönüşüm Oranı
PDMS	Poly Dimethyl Siloxane
PET	Polyethylene Terephthalate
PEC	Mükemmel Elektrik İletken (Perfect Electric Conductor)
PTFE	Poly Tetra Fluoroethylene
RA	Reflective Array
RCS	Radar Kesit Alanı
SAR	Specific Absorption Rate (Özgül Emilim Oranı)
SRR	Splt Ring Resonatör (Yarık Halka Rezonatör)
SRR	Split Ring Resonator (Bölünmüş Halka Resonator)
TA	Transmit Array
TE	Enine Elektrik alan
THz	Terahertz
TM	Enine Manyetik alan

GİRİŞ

Metamalzemeler normal malzemelerin aksine önemli ölçüde farklı elektromanyetik özelliklere sahip doğada bulunmayan, yapay olarak üretilen malzemelerdir. Doğal olarak oluşan tüm malzemelerin kırılma indisi (n), malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği (ϵ_r) ve malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği (μ_r) değerleri pozitif olmasına rağmen, metamalzemeler aynı anda hem negatif ϵ_r hem de μ_r değerlerine sahip olabilir. Metamalzeme alandaki çalışmaların ilki, Sovyet fizikçi Victor Veselago'nun 1968 yılında yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada aynı anda hem negatif manyetik geçirgenlik hem de negatif elektriksel geçirgenlik gösteren bir ortamın fiziksel sonuçlarını tartışmıştır. Negatif manyetik ve elektriksel geçirgenlik sebebiyle kırılma indisi negatif olmaktadır. Bunun sonucunda ise elektromanyetik dalganın parametrelerinden yayılım vektörü ($\vec{k}$) ve Poynting vektörü ($\vec{S}$) zıt yönlü olması dolayısıyla normal ortamlara göre elektromanyetik dalganın yayılımı ters yönde oluşmaktadır (Veselago, 1968). Veselago'nun bu teorik çalışması metamalzemenin teorik temelini atmıştır. Veselago'nun bu çalışmasından 1998 yılına kadar herhangi bir gelişme yaşanmamıştır. 1998'de Pendry, plazma frekansındaki gazların davranışına benzer şekilde, elektrik alandaki bir iletkenin içindeki elektron bulutuna Drude ve Lorentz modellerini uyguladı. Sonsuz uzunluktaki ince teller için, bir elektrik alanının etkisi altında belirli bir frekans aralığında ϵ değerinin negatif olduğunu buldu.



Şekil 1. Periyodik ince tel yapılarından oluşan plazma ortamı (Pendry et al., 1998)

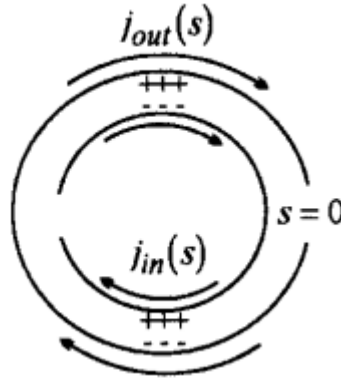
Şekil 1,de Pendry ve arkadaşlarının kullandığı periyodik ince tel yapılarını temsil etmektedir. Bu durumda, a her bir telin uzunluğunu milimetre cinsinden temsil ederken, r tellerin yarıçapını mikron cinsinden temsil eder. Bu yapı serbest elektron gazı gibi davranarak yapay bir plazma davranışı sergiler. Denklem (1), belirli yapılandırma için dielektrik sabitinin değerini sağlar.

$$\epsilon_{metal} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1)$$

Denklem (1)'de ω_p ifadesi plazma frekansı ifadesidir ve denklem (2)'de olduğu gibi ifade edilir.

$$\omega_p = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki n ifadesi elektron sayısını, ϵ_0 ifadesi boşluğun dielektrik sabitini, m elektron kütlesini ve e ise yükü ifade etmektedir. Denklem (1)'de görüleceği üzere plazma frekansından düşük frekanslarda ϵ negatif değerini almaktadır. Bu çalışma ile birlikte yapay malzemelerle ilk kez negatif ϵ elde edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca Drude modeline benzer şekilde hesaplanması ve deneysel olarak doğrulanması ile birlikte bundan sonraki çalışmalar için deneysel bir temel oluşmuştur(Pendry et al., 1998). Bu çalışmadan bir yıl sonra Pendry belli frekanslarda negatif μ elde ettiği bir çalışma yayınlamıştır. Bu çalışmada Split-Ring rezonatör (SRR) yapısı kullanmıştır.

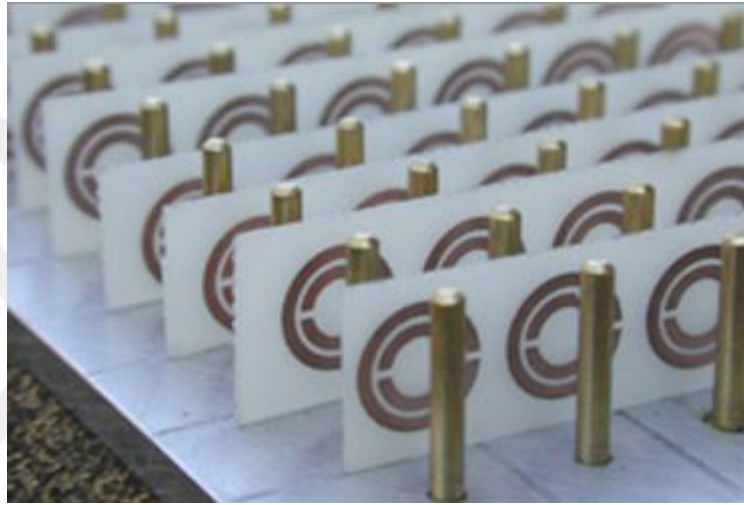


Şekil 2. SRR yapısı(Pendry et al., 1999) .

Pendry'nin bahsi geçen SRR yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu yapı iki yarıklı iletken üzerine manyetik alan uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Burada iletken halkalar induktans halkadaki boşluklar ile kapasitans oluşturur ve bu şekilde bir LC devresi davranışı sergileyerek rezonans oluşturur. SRR yapısının fiziksel boyutları kontrolü ile kapasitans ve induktans kontrol edilebilir. Bu yapı için manyetik geçirgenlik denklem (3)'te verilmiştir.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 - \frac{dc^2}{2\pi^2(N-1)\omega^2 + i\frac{2\rho}{\mu_0(N-1)rw}}} \quad (3)$$

Denklem (3)'te μ_{eff} yapının etkin manyetik geçirgenliğini, N halka sayısını, r SRR yapısının iç yarıçapını, ω açısal frekansı, a birim hücre boyutunu, ρ rezistiviteyi, c ışık hızını, μ_0 ifadesi boşluğun manyetik geçirgenliğini ve σ iletkenliği ifade etmektedir(Pendry et al., 1999). Daha sonrasında Smith ve arkadaşları Pendry'nin yaptığı iki ayrı çalışmayı birleştirerek hem ϵ hem de μ negatif olarak elde etmişlerdir.



Şekil 3. Smith ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı yapı (Smith et al., 2001).

Şekil 3'de Smith ve arkadaşlarının negatif ϵ ve μ elde etmek için kullandığı çalışma görülmektedir. Bu çalışmanın sonucunda Pendry'nin yaptığı teorik çalışmalar deneysel olarak doğrulanmış ve ilk kez negatif indisli bir ortam deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elektromanyetik dalganın parametrelerinden $\vec{k}$ ve $\vec{S}$ zıt yönlü olması dolayısıyla normal ortamlara göre elektromanyetik dalganın yayılım yönünün normal ortam yayılımına göre ters yönlü olduğu ispatlanmıştır(Smith, 2000). Smith'in bu deneysel çalışmasından sonra metamalzeme kavramı birçok uygulama için geniş bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu alanlardan biri de iki boyutlu metamalzemeler olarak bilinen metayüzeylerdir (Holloway et al., 2012). Düzlemsel yapıları sayesinde üretimi kolay olan metayüzeyler, geleneksel malzemelere kıyasla daha hafif ve daha küçük boyutlu çözümler sunarak, son yıllarda elektromanyetik dalgaların kontrolünde araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Metayüzeyler, Absorber(Kurt et al., 2025), Optik lens(Chen et al., 2024), raserber(Lin et al., 2025), enerji toplayıcı(Amer et al., 2025), EMI kalkanlama(Ali et al., 2025) , sensör(Karuppasamy et al., 2025), ve polarizasyon dönüştürücüler(Tutar & Ozturk, 2022) gibi birçok uygulamada aktif olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların kontrol ve manipüle edilmesinde elektromanyetik dalgaların

polarizasyon parametresinin kontrol edilmesi en önemli uygulamalardan biridir. Literatürde polarizasyon dönüştürücüler fiziksel yapısına göre, düzlemsel (Tutar & Ozturk, 2022), eğrisel (Zhao et al., 2021), çok katmanlı (Zhang et al., 2022), ve asimetrik olarak (Zafar, Khan, Jabbar, Kazim, Rehman, et al., 2025), frekans spektrumuna göre, Görünür spektrumda (Wang et al., 2025), THz spektrumunda (Turkmen–Kucuksari & Cimen, 2025), Infrared spektrumunda (Wu et al., 2021) ve Mikrodalga spektrumunda (Kaya et al., 2025a), frekans bantlarında ise çok bantlı(Dutta et al., 2021) ve geniş bantlı (Tutar & Ozturk, 2022) olarak bulunur ve tepki türüne göre yansıma modu (Liu et al., 2017) iletim modu (R Adeline Mellita et al., 2022) ve multifonksyonel olarak hem iletim hemde yansıma modunda (Liu et al., 2021) çalışacak şekilde sınıflandırılabilir. Ayrıca, bu yapıların frekans veya modlarının kontrolü amacıyla varaktör (Gao et al., 2018), PIN diyot (Nobre et al., 2024) ve VO₂ (Zhao et al., 2022) gibi aktif malzemeler entegre edilerek ayarlanabilir (tunable) (Vasić et al., 2017). Yeniden yapılandırılabilir (reconfigurable) (Gao et al., 2018) sistemler geliştirilmektedir. Uygulama alanlarına göre polarizasyon dönüştürücüler özellikle; Radar ve gizlilik teknolojileri (Zhen et al., 2023), Kablosuz ve uydu iletişimi(Naseri et al., 2018), Sensör (Maurya & Singhal, 2024), anten tasarımı (Bhattacharjee & Dwari, 2022), giyilebilir teknolojiler (Wu et al., 2023) alanlarında kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak bu sistemlerin gelişmesinde ITO (Wu et al., 2021), PET (Zhen et al., 2023) FR-4 (Kaya et al., 2025a) PTFE (Zou et al., 2020), PDMS (Mirza et al., 2018), Altın (Turkmen–Kucuksari & Cimen, 2025), Gümüş (Sajjad et al., 2020), GaAs (Huan et al., 2000) ve Grafen (Karuppasamy et al., 2025) gibi malzemeler kullanılmıştır. Kurt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada S, C, X, Ku ve K bantlarında çalışan yedi ayrı frekansında %90'ın üzerinde emilim sağlamıştır; 2,8 GHz, 6,32 GHz, 9,17 GHz, 12,21 GHz, 14,4 GHz, 17,3 GHz ve 19,5 GHz. Ayrıca tasarım, 1,68 GHz, 3,79 GHz, 5,52 GHz, 7,3 GHz, 8,7 GHz, 10,52 GHz ve 11,85 GHz frekanslarında da yüksek absorpsiyon göstermekte ve toplamda çok bantlı performans sergilemektedir (Kurt et al., 2025). Chen ve arkadaşları, geniş açılı odaklama yeteneğine sahip mühendislik metayüzeyleri tasarlamıştır. Deneylerde farklı kodlama dizileri kullanılarak metayüzeyin odak noktaları ve yönleri manipüle edilmiştir. Ölçüm sırasında ortam koşullarının ideal olmaması ve test platformundaki eksiklikler nedeniyle bazı gürültüler ve sapmalar ortaya çıkmıştır. Genel olarak çalışma, metayüzey tasarımlarının çok yönlü ve esnek odak kontrolü sağlayabileceğini göstermektedir (Chen et al., 2024). Lin ve arkadaşları, 1,44-2,39 GHz ve 5,45-6,64 GHz aralıklarını kapsayan iki geniş bantta absorpsiyon sağlayabilen, ayrıca 3,17-5,16 GHz arasında yaklaşık %47,78 genişliğinde geçiş bandına sahip ve bu bandı yansıma moduna geçirebilen bir switchable (değiştirilebilir) frekans seçici rasorber (FSR) tasarlamıştır. Tasarımda zayıflatıcı katmanlar ve PIN diyotların kullanıldığı çok katmanlı, yeniden yapılandırılabilir bir yüzey yer almaktadır. Böylece cihaz, A-T-A (absorpsiyon-

transmisyon-absorpsiyon) ve A-R-A (absorpsiyon-yansıma-absorpsiyon) modları arasında geçiş yapabilmektedir (Lin et al., 2025). Amer ve arkadaşları, 5 GHz frekansında enerji toplama ve verimlilik sağlayan, polarizasyon bağımsız ve geniş açılı bir metayüzey (MS) tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarım, polarizasyon ve açı değişimlerine karşı yüksek verimlilik göstermekte ve normal koşullarda %94'ün üzerinde enerji toplama oranı sağlamaktadır. Çift terminalli yapısıyla güç toplama ağı basitleştirilmiş, yüksek verimlilik ve geniş açı performansı ile öne çıkmıştır. Ayrıca 0° ile 75° arasındaki çeşitli açı ve polarizasyonlarda %90'ın üzerinde enerji verimi elde edilmiştir (Amer et al., 2025). Ali ve arkadaşları, iki dar bant Wi-Fi frekansı (2,4 GHz ve 5,8 GHz) ile geniş bant X-bandını (8–12 GHz) etkili şekilde engelleyebilen, çift taraflı ve plana yerleştirilmiş bir metayüzey tasarımı geliştirmiştir. Tasarım, yaklaşık $11,4 \times 11,4$ mm boyutlarında küçük ve kompakt olup, 20x13 eleman kullanılarak üretilmiştir. Ürün, polarizasyon bağımsızdır ve farklı açılara karşı stabil performans sergilemektedir. Deneysel ve simülasyon sonuçları oldukça uyumlu olup, özellikle WLAN ve X-band iletişim sistemlerinde elektromanyetik girişimlerin engellenmesinde kullanılabilir durumdadır (Ali et al., 2025). Karuppasamy ve arkadaşları, grafen tabanlı çok katmanlı bir metayüzey sensör tasarlamışlardır. 0,589–0,598 THz frekans aralığında çalışan sensör, spermle ilgili refraktif indeks değişikliklerine karşı yüksek hassasiyet göstermek üzere optimize edilmiştir. Sensör, $5000 \text{ GHz} \cdot \text{RIU}^{-1}$ (refraktif indeks birimi) duyarlılık ve $17,986 \text{ RIU}^{-1}$ yanıt değerine ulaşmıştır. Bu özellikleri sayesinde sperm analizinde sıvı ortamındaki küçük indeks değişikliklerini tespit ederek geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve hassas sonuçlar sağlamaktadır (Karuppasamy et al., 2025). Tutar ve arkadaşları, C-band (5,85–8,20 GHz) ve X-band (8,20–12,40 GHz) frekanslarında çalışan hem sağ eli dairesel polarizasyon dönüşümü (RHCP) hem de sol eli dairesel polarizasyon dönüşümü (LHCP) ve lineer polarizasyondan lineer polarizasyona dönüşüm (LP-LP) sağlayan bir metayüzey tasarlamıştır. Tasarım, yaklaşık %90 oranında polarizasyon dönüşüm oranı (PCR) sağlayarak hem lineer hem de dairesel polarizasyon dönüşümü gerçekleştirebilmektedir. Lineer polarizasyonda 4,61–4,85 GHz ve 6,86–7,78 GHz, dairesel polarizasyonda ise 5,35–5,94 GHz (RHCP) ve 8,88–12,03 GHz (LHCP) frekans aralıklarında yüksek performans sergilemektedir. Ayrıca, giriş açıları 45 dereceye kadar olan durumlarda da başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Tutar & Ozturk, 2022). Zhao ve arkadaşları, 3D (Üç Boyutlu) yazıcı teknolojisi kullanarak silindirik ve küresel yüzeylerde çalışabilen, lineer polarizasyondan dairesel polarizasyona dönüşüm sağlayan bir dielektrik kompozit metayüzey tasarlamıştır. Tasarımda, küp biçimli dielektrik bloklar ve ince, kare şeklinde bir dielektrik alt tabaka kullanılmıştır. Bu yapı, 14,2–20,1 GHz aralığında 3 dB eksenel oran ile %34 bant genişliği ve 40° açı stabilitesi ile çalışabilmektedir. Düşük kayıplı, yüksek verimli ve geniş açılı performansı sayesinde uydu ve havacılık gibi uygulamalar için uygundur. 3D yazıcı

ile üretimi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetli ve kolaydır (Zhao et al., 2021). Zhang ve arkadaşları, THz frekanslarında geniş bantlı ve açıdan bağımsız lineer polarizasyon dönüşümü sağlayan üç katmanlı metayüzey tasarımları geliştirmiştir. Tasarımlar, üst üste yerleştirilmiş iki dikdörtgen şekilli ve ortada çapraz yapı içeren katmanlardan oluşmaktadır. Çapraz yapı, 90° polarizasyon dönüşümünü sağlarken, çift kesitli küçük teller arasındaki etkileşim bant genişliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, ızgara tabakalar polarizasyon filtreleri görevi görerek dönüşümün verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, 0,45 ile 1,23 THz frekans aralığında, yansıma ve iletimin yüksek olduğu (iletim oranı 0,83'ten 0,97'ye kadar) etkin ve geniş bantlı lineer polarizasyon dönüşümü sağlanmıştır. Bu yapıların THz iletişim ve sensör teknolojileri gibi uygulamalarda kullanılması öngörülmektedir (Zhang et al., 2022). Zafar ve arkadaşları, Ku-, K-, Ka- ve U-bantlarında çalışabilen, asimetrik birim hücreye sahip çok bantlı ve yüksek verimli bir metayüzey tasarlamışlardır. Tasarım, 16,2–17,2 GHz, 23,0–25,4 GHz ve 40,3–54,35 GHz bantlarında %90 PCR oranı ile lineer polarizasyon dönüşümü; 16,1–16,55 GHz, 17,5–22,15 GHz, 26,65–37,75 GHz ve 55,6–59,8 GHz bantlarında ise dairesel polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır.(Zafar, Khan, Jabbar, Kazim, Rehman, et al., 2025) Wang ve arkadaşları, 420–680 nm aralığında yüksek elliptikite ($\epsilon > 0,995$) ve %70–%87 dönüşüm verimliliğine sahip, geniş bant LP-CP meta-ızgaralar sunmaktadır. Tasarım, desenlenmiş GaN grating üzerine 200 nm Ag metal tabakası ile oluşturulmuştur. Üretim, lazer interferometri litografisi ile gerçekleştirilmiş, böylece düşük maliyetli, ölçeklenebilir ve büyük alanlara uygulanabilir bir yöntem sağlanmıştır. Tasarım, GaN tabanlı optoelektronik sistemlerle uyumlu olup, biyomedikal algılama, 3D görüntüleme ve görünür ışık haberleşmesi gibi uygulamalar için uygun, yüksek performanslı ve ekonomik çözümler sunmaktadır (Wang et al., 2025). Turkmen ve arkadaşları, THz frekans aralığında çalışan, kompakt ve çok işlevli bir polarizasyon dönüştürücü tasarlamıştır. Tasarım, dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş üç adet diyagonal yarıklı altın halkadan oluşan yansıtıcı bir yapıya sahiptir. Cihaz, hem lineerden dairesel polarizasyona hem de lineerden lineere çok bantlı dönüşümler gerçekleştirebilmektedir. Tasarımın performansı, sayısal ve analitik olarak doğrulanmış ve literatürdeki benzer çalışmalara göre üstünlükleri ortaya konmuştur (Turkmen–Kucuksari & Cimen, 2025). Wu ve arkadaşları, yaklaşık 1580 nm dalga boyunda, yani yakın kızılötesi (NIR) bölgesinde çalışan aktif bir metayüzey tasarımı sunmuştur. Metayüzey'in aktif bölümü indiyum kalay oksit (ITO) tabakasından oluşmakta olup, bu tabakanın kalınlığı yaklaşık 5 nm'dir. Bu ince ITO katmanı sayesinde elektriksel olarak kontrol edilebilen bir yapı elde edilmiştir. Metal-ITO kompozit filmlerde genellikle 200 nm civarında bir kalınlık kullanılırken, bu çalışmada daha ince bir yapı tercih edilmiştir. Cihaz, uygulanan elektriksel voltaja bağlı olarak gelen lineer y-polarize ışığı, lineer, dairesel veya eliptik polarizasyona

dönüştürebilmektedir. Böylece giriş ışığının polarizasyon durumu dinamik olarak kontrol edilebilmektedir. Bu dönüşüm, telekomünikasyon dalga boyları ve NIR aralığında etkili şekilde gerçekleştirilmektedir (Wu et al., 2021). Kaya ve arkadaşları, C-, X-, Ku- ve K-bantlarında çalışan, ince yapılı, düşük maliyetli ve tek katmanlı bir yansıtıcı tipi metayüzey polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır. Tasarlanan cihaz, : 6,414–6,771 GHz, 10,681–12,160 GHz ve 18,093–19,045 GHz aralığında lineer polarizasyondan–lineer polarizasyon (LP–LP) dönüşümünde %90’dan fazla PCR oranı sağlamaktadır. Ayrıca, aynı frekans bantlarında da dairesel polarizasyon–dairesele polarizasyon (CP–CP) dönüşümünde %90 üzeri Polarizasyon Dönüşüm Oranı (PMR) elde edilmiştir. İki ayrı bantta ise (7,37–9,41 GHz ve 13,79–16,77 GHz) lineer–dairesele polarizasyon (LP–CP) dönüşüm performansı gözlemlenmiştir. (Kaya et al., 2025a) Dutta ve arkadaşları, hem lineer hem de dairesel polarizasyonları yansıtarak çok bantlı ve çok işlevli bir metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır. Tasarımda, kıvrımlı kare halka ve diyagonal şerit rezonatör yapıları kullanılarak birden fazla rezonans oluşturulmuştur. 4,3 GHz, 7,2 GHz, 12,3 GHz ve 15,15 GHz frekanslarında %95 ve üzeri LP–LP sağlanırken; lineerden dairesele (LHCP ve RHCP) polarizasyon dönüşümü ise 4 GHz, 4,75–5,95 GHz, 8,35–8,8 GHz ve 14,35–14,6 GHz frekans bantlarında gerçekleşmektedir. Tasarım, gelen elektromanyetik dalgaların geliş açısına 15°’ye kadar kararlı performans göstermektedir (Dutta et al., 2021). Liu ve arkadaşları, periyodik çift katmanlı L şeklinde metal desenlere dayanan üç bantlı bir polarizasyon dönüştürücü sunmuşlardır. Yapının, 0°–30° geliş açılarında 9,1–25,4 GHz bandında çalıştığı ve TE/TM giriş dalgalarını farklı polarizasyonda yansıtılmış dalgalara dönüştürdüğü gösterilmiştir. Geliştirilen iletim modeli, simülasyon ve ölçüm sonuçlarıyla yüksek uyum göstermektedir. Ayrıca bu model, metayüzeyin analitik olarak tasarlanmasına olanak sağlamakta ve diğer çok katmanlı yapılara da uygulanabilir niteliktedir (Liu et al., 2017). Mellita ve arkadaşları, uydu haberleşmesi için polarizasyon dönüştürücü olarak tasarlanmış, düşük profilli çift bantlı bir frekans seçici yüzey (FSS) sunmuşlardır. Kıvrımlı açık halkalı ve metal şerit ile kesişen tek katmanlı bu FSS yapısı, çift yönlü bir polarizasyon dönüştürücü gibi davranmaktadır. 2,01–2,64 GHz frekans aralığındaki lineer polarize dalgaları LHCP dalgalara, 3,26–3,68 GHz frekans aralığındaki lineer polarize dalgaları ise RHCP dalgalara dönüştürebilmektedir. Çalışma, önerilen polarizasyon dönüştürücünün yapısal tasarım evrimini incelemekte ve frekans tepkisini bir devre modeli kullanarak doğrulamaktadır (R. A. Mellita et al., 2022). Liu ve arkadaşları, yuvarlak ve dikdörtgen biçimli üst yapı ile gradyan ızgara tabanlı alt yapıdan oluşan bir metamalzeme polarizasyon dönüştürücü tanıtmışlardır. Bu yapı, 12,51–13,67 GHz bandında yarı yansımali ve yarı geçirgen çapraz polarizasyon dönüşümünü; 2,58–14,85 GHz aralığında ise yalnızca geçirgen dönüşümü başarıyla gerçekleştirebilmektedir. Tasarım, yansıma, iletim ve yarı ayna özelliklerini

birleştirilerek çok işlevli metamalzeme entegrasyonuna yönelik önemli bir adım sunmakta ve anten ile görüntüleme sistemleri gibi alanlarda uygulama potansiyeli taşımaktadır (Liu et al., 2021). Gao ve arkadaşları, varaktör diyot kontrollü kelebek şeklinde bir metayüzey kullanarak yeniden yapılandırılabilir ve geniş bantlı bir polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır. Cihaz, 0 ila -19 V arası bias voltajları ile LP-LP, lineer-eliptik ve LP-CP dönüşümler arasında dinamik geçiş yapabilmektedir. 0 V durumunda, 3,9–7,9 GHz aralığında ortalama %80 PCR ile çapraz polarizasyon sağlanırken, -19 V durumunda 4,9–8,2 GHz aralığında dairesel polarizasyon için 3 dB axial ratio elde edilmiştir. Eşdeğer devre analizi ile açıklanan yapı, sürekli voltaj değişimiyle çok sayıda polarizasyon durumu sunabilmektedir ve deneysel olarak doğrulanmıştır (Gao et al., 2018). Nobre ve arkadaşları, tasarladıkları ve simüle ettikleri çift kare rezonatörlü bir metayüzey yapısını sunmuşlardır. Yapı, PIN diyot kontrollü asimetri sayesinde üç farklı işlevi soğurma, iletim ve polarizasyon dönüşümü fonksiyonlarını aynı anda gerçekleştirebilmektedir. Tam zemin düzlemi yerine kullanılan periyodik yansıtıcı dizi, seçici frekanslarda soğurmayı mümkün kılmıştır. 3,05 GHz’de %97 soğurma, 4,37 GHz’de %98 polarizasyon dönüşümü ve 4,5 GHz’de iletim sağlanmıştır. Soğurma ve dönüşüm bant genişlikleri sırasıyla 60 MHz ve 210 MHz olarak ölçülmüştür. Basit, kompakt ve çok işlevli tasarımıyla bu yapı, ileri seviye elektromanyetik uygulamalarda kullanılmaya uygundur (Nobre et al., 2024). Zhao ve arkadaşları, altın-VO₂ ızgara yapısı ile tasarlanmış ve sıcaklık kontrollü faz geçişine dayanan çok işlevli bir metamalzeme polarizasyon dönüştürücü sunmuşlardır. VO₂ metalik haldeyken yapı, geniş bantta %90’a varan oranlarla yansımali çapraz polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. VO₂ yalıtkan hale geçtiğinde ise 0,64 THz ve 1,28 THz’de belirgin asimetrik iletim (AT) etkisi gözlemlenmiştir. Bu yapı, polarizör ve izolatör gibi optik cihazların yeniden yapılandırılabilir ve çok işlevli tasarımına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmakta olup, iletişim ve görüntüleme sistemlerinde yüksek uygulama potansiyeline sahiptir (Zhao et al., 2022). Vasić ve arkadaşları, nematik sıvı kristalli (LC), metal izolatör metal (MIM) rezonatör temelli ayarlanabilir bir THz polarizasyon dönüştürücü yapısı önermişlerdir. MIM boşlukları sayesinde yüksek yansıma ve büyük faz farkı aynı anda sağlanmıştır. LC hücresi kalınlığı optimize edilerek, doğal çift kırılma yerine MIM yapının optik anizotropisi kullanılmıştır. Elektro-optik kontrol ile rezonans frekansı ve faz farkı ayarlanabilir hâle getirilmiş; bu da Poincaré küresi üzerinde yansıyan polarizasyon durumunun geniş aralıkta kontrolüne olanak sağlamıştır. Q-tensor tabanlı simülasyonlar, <10 V sürücü voltajı ve milisaniye seviyesinde anahtarlama süresiyle yüksek performans potansiyelini doğrulamıştır (Vasić et al., 2017). Gao ve arkadaşları, pin diyot kontrollü aktif bir metayüzey (AMS) tabanlı, yeniden yapılandırılabilir bir iletim tipi polarizasyon dönüştürücü sunmuşlardır. Diyotların OFF durumunda lineer polarizasyon dairesel polarizasyona dönüşmekte, ON durumunda ise

lineer durumda kalmaktadır. Hem simülasyon hem de ölçümler, iletim katsayısı, faz farkı ve axial ratio verileriyle bu dönüşümü doğrulamıştır. Ek bir besleme ağına ihtiyaç duymadan çalışabilen yapı, bir horn antene entegre edilerek test edilmiş ve antenin polarizasyonunun LP–CP arasında kontrol edilebildiği gösterilmiştir (Gao et al., 2018). Zhen ve arkadaşları, faz temelli (PB) tekniğiyle oluşturulmuş polarizasyon döndürme birimlerinden meydana gelen ve balina optimizasyon algoritmasıyla kodlanmış esnek, şeffaf bir metayüzey dizisi sunmuşlardır. ITO, PET ve PVC malzemelerinden oluşan yapı %83,6 geçirgenliğe sahiptir ve 13,2–20,7 GHz frekans bandında 10 dB'nin üzerinde RCS (Radar Kesit Alanı) azalması sağlamaktadır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, dizinin polarizasyona duyarsız, açığa kararlı ve eğrisel yüzeylerde de etkili olduğunu göstermektedir. Bu kodlanmış metayüzey, eğrisel yüzeylerde elektromanyetik gizleme uygulamaları için güçlü bir adaydır (Zhen et al., 2023). Naseri ve arkadaşları, uydu haberleşmeleri için tek açıklıklı, çift bantlı ve yeniden yönlendirilebilir çift dairesel polarizasyon sağlayabilen pasif bir LP–CP polarizör sunmuşlardır. Yapı, iki ayrı frekans bandında LP-CP polarizasyona dönüştürebilmekte ve yalnızca gelen dalganın yönü değiştirilerek uplink/downlink polarizasyon yönleri arasında geçiş yapılabilir. 20/30 GHz horn antenlerle yapılan testlerde ışınlama deseni korunmuş ve polarizasyon dönüşümü başarıyla sağlanmıştır (Naseri et al., 2018). Maurya ve Singhal, THz frekanslarında çalışan, HRR tabanlı tek katmanlı çift bantlı bir RLCP yapıları sunmuşlardır. Yapı, 2,912 THz ve 5,905 THz'de sırasıyla %95 ve %99,2 polarizasyon dönüşüm oranı sunmakta olup, geliş açısı ve polarizasyona duyarsız davranmaktadır. HFSS, CST ve eşdeğer devre modeliyle analiz edilen yapı, literatüre kıyasla %33–93 arasında hacim azalması sağlamaktadır. Ayrıca, %0,85 maksimum hata ile RI algılama, 773 GHz/RIU duyarlılıkla biyosensör olarak teşhis ve 688,6 GHz/RIU ile su içi glikoz dedektörü olarak kullanım potansiyeli ortaya konmuştur (Maurya & Singhal, 2024). Bhattacharjee ve Dwari, 3,4–3,6 GHz alt-6 GHz bandında çalışan, elektronik kontrollü yansıtıcı polarizörle donatılmış, polarizasyonu yeniden yapılandırılabilir bir anten sunmuşlardır. Düzlemsel monopol antenin lineer polarizasyonlu gelen dalgasını, LHCP ve RHCP'ye dönüştürülebilmekte olup, yapı kompakt, RF izolasyonu yüksek düzeydedir. Ucuz, ayarlanabilir ve 5G uygulamaları için uygun bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Bhattacharjee & Dwari, 2022). Zou ve arkadaşları, PTFE malzemesi kullanarak 1,21–2,83 THz frekans aralığında çalışan, yansıma modunda LP-LP dönüşümü gerçekleştiren, çapa biçimli elemanlardan oluşan metal-dielektrik-metal yapıları bir dönüştürücü sunmuşlardır. Yapı, %80,2 göreceli bant genişliği ve %93 üzeri PCR ile geniş bantta çalışmakta, 45°'ye kadar olan geliş açılarında performansını korumaktadır. Simülasyon ve deneyler birbiriyle uyumludur. Yapı, standart fotolitografi ile kolay üretilebilir olması sayesinde haberleşme ve görüntüleme sistemlerinde kullanılabilir (Zou et al., 2020). Mirza ve arkadaşları, 2,2 GHz S-bandında çalışan

CubeSat uygulamaları için keçe ve PDMS malzemeleriyle iki farklı esnek polarizör tasarlamışlardır. Her iki versiyon, iletken katman olarak ShieldIt isimli Super kumaş kullanılarak modellenmiştir. Simülasyonlar, keçe tabanlı tasarımın üstün olduğunu göstermiş ve bu versiyon prototip haline getirilmiştir. Düz konumda %99,3'ün üzerinde dönüşüm verimliliği elde edilirken, bükülme durumunda verimlilik %50–85 aralığında kalmıştır. Bu durum, optimum performans için düz açılmayı garanti eden bir yerleştirme sisteminin gerekliliğini ortaya koymaktadır (Mirza et al., 2018)

Bu tezin temel amacı, C, X, Ku ve K frekans bantlarında çalışan geniş bantlı, geniş açılı ve yüksek verimli doğrusal ve dairesel polarizasyon dönüştürücü yapıları modellemek, üretmek ve performans analizlerini gerçekleştirmektir. Ayrıca, önerilen bu tasarımların çeşitli düz, dihedral ve silindirik geometriler için RCS azaltma performansını kapsamlı bir şekilde incelemek hedeflenmektedir. Literatürde ağırlıklı olarak, normal geliş açısında (0°) düz plaka geometrisinde monostatik RCS azalması sağlayan çalışmalar mevcuttur. Bu tez çalışmasında ise, aynı boyut ve şekildeki referans PEC plakaları kullanılarak, 0° , 15° , 30° ve 45° geliş açılarında, hem monostatik hem de bistatik konfigürasyonlardaki düz, dihedral ve silindirik yüzey geometrilerine sahip yapıların RCS azalma performansını değerlendirmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Malzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Elektromanyetik dalganın yayılması temel olarak Maxwell denklemleri ile modellenir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

Denklem (4), (5), (6) ve (7), doğrusal izotropik ve homojen bir ortam için Maxwell denklemleridir. Burada $\vec{E}$ ifadesi elektrik alan vektörünü, $\vec{B}$ ifadesi manyetik alan vektörünü, $\vec{D}$ elektrik akı yoğunluğunu, $\vec{H}$ manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Ayrıca;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (8)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (9)$$

Denklem (8) elektrik alan vektörü ve elektrik akı yoğunluğu arasındaki bağıntıyı, denklem (9) ise manyetik alan vektörü ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki bağıntıyı tanımlamaktadır. Bu denklemlerde bulunan ϵ ifadesi elektiriksel geçirgenliği, ϵ_0 ($8,854187 \cdot 10^{-12}$) ifadesi boşluğun elektrik geçirgenlik sabitini, ϵ_r yayılma ortamının bağıl elektrik geçirgenliğini, μ manyetik geçirgenliği, μ_0 ($1,256637 \cdot 10^{-6}$) boşluğun manyetik geçirgenlik sabitini, μ_r yayılma ortamının bağıl manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Bu denklemlerden hareketle elektrik ve manyetik alan için Helmholtz denklemi elde edilebilir. İlgili denklemleri elde etmek için öncelikle denklem (4) için her iki tarafın rotasyonelini alalım,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (10)$$

Denklem (5)'de denklem (8) ile yeniden düzenlendiğinde denklem (11) elde edilir.

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = -\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (11)$$

Denklem (10)' denklemler (11) ve denklem (9)'dan yola çıkarak yeniden düzenlendiğinde;

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (12)$$

denklem (12) elde edilir. $\nabla \times (\nabla \times \vec{E})$ ifadesi için ise $\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ özdeşliği kullanılıp $\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \vec{E} = 0$ ifadeleri yerlerine konulduğunda

$$-\epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \vec{E} \rightarrow \nabla^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (13)$$

Denklem (13) elde edilir ve bu denklem elektrik alan için kayıpsız ve kaynaksız ortam için dalga denklemdir. Aynı işlemler denklem (5) için yapıldığında ise manyetik alan için dalga denklemleri denklem (14)'de olduğu gibi elde edilecektir.

$$\nabla^2 \vec{H} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (14)$$

Elektrik alan dalga denklemleri $e^{-j\omega t}$ harmonik bağımlılığı için fazör uzayında tekrar ifade edildiğinde;

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (15)$$

Denklem (12)'de olduğu gibi yazılabilir. Bu denklem Helmholtz denklemleri olarak adlandırılır. Helmholtz denkleminde bulunan k dalga numarasını ifade eder ve

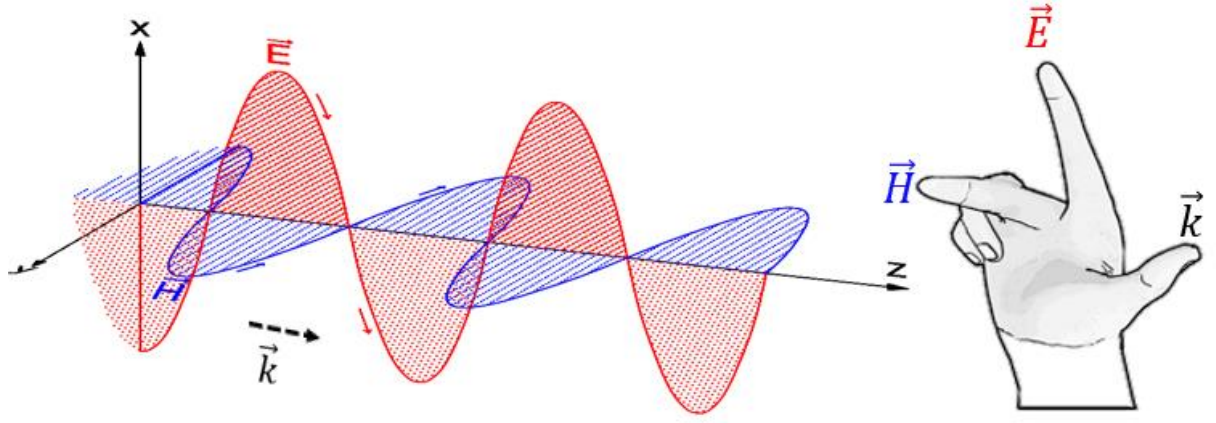
$$k = \omega \sqrt{\epsilon\mu} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (16)$$

Denklem (16)' olduğu gibi ifade edilir. Bu denklemde ω ifadesi açısal frekansını ifade eder.

Bu denklemden hareketle;

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = \frac{c}{v_p} \quad (17)$$

Denklem (17)'de bulunan n kırılma indisini, c ışığın boşluktaki hızını ve v_p ise malzeme ortamındaki yayılma hızını temsil eder ve kırılma indisi n , elektromanyetik dalganın boşluktaki yayılma hızının bir ortam içindeki yayılma hızına oranını ifade eder.

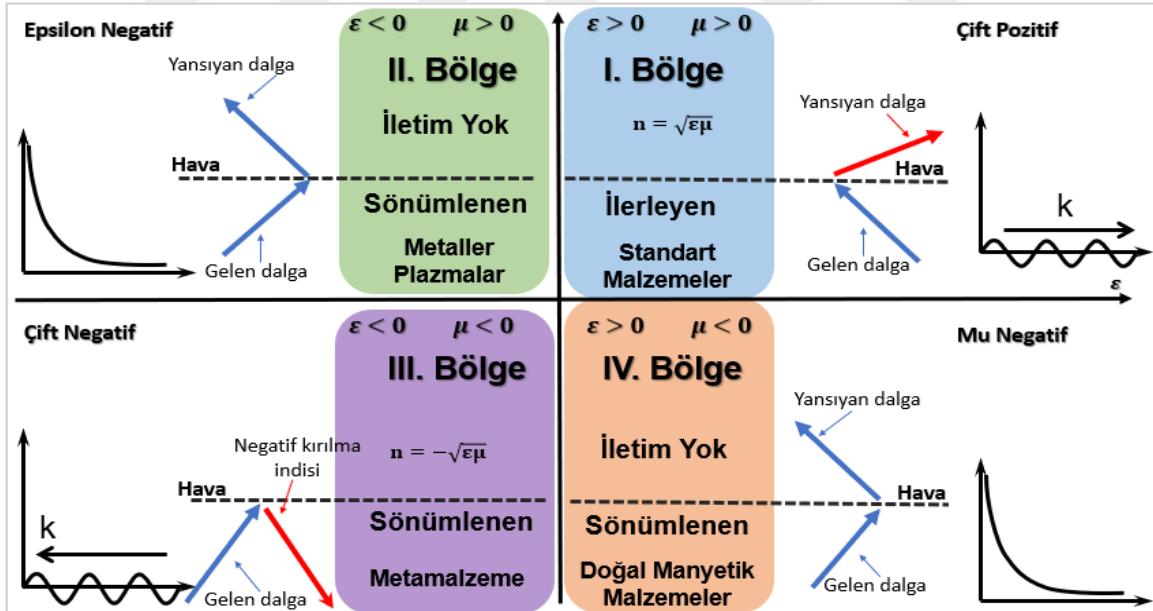


Şekil 4. Malzeme ortamında elektrik alan ($\vec{E}$), manyetik alan ($\vec{H}$) ve EM dalganın yayılım yönünün sağ el kuralıyla gösterilmesi (Tutar, 2021).

Şekil 4’de verilen elektrik alan, manyetik alan ve elektromanyetik alanın yayılım ilişkisinden hareketle malzeme ortamında elektromanyetik dalganın sağ el kuralına uygun olarak hareket ettiği görülmektedir.

Metamalzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Malzeme ortamında dalga yayılımının aksine metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımı $\epsilon_r < 0$ ve $\mu_r < 0$ olması sebebiyle malzeme ortamında olduğundan farklıdır.



Şekil 5. Metamalzemelerin ϵ ve μ işaretlerine göre sınıflandırılması ve davranışları (Matei et al., 2025).

Şekil 5’te metamalzemelerin ϵ_r ve μ_r işaretlerinden yola çıkarak dört bölgeye ayrılmıştır; I.Bölge Çift pozitif bölge olarak adlandırılır ve ϵ_r ve μ_r işaretleri pozitiftir. Doğadaki malzemeleri temsil eder ve sağ el kuralına uygun hareket eder. II.Bölge ise epsilon negatif bölge olarak adlandırılır. ϵ_r negatif değerli μ_r ise pozitif değerlidir. Metaller ve

plazmalar olarak örnek verilebilir. III. Bölge ϵ_r ve μ_r değerlerinin her ikisinde negatif olduğu bölgedir. Bu yüzden çift negatif bölge olarak bilinir. Doğada bulunmayan yapay olarak elde edilen malzemeleri temsil eder ve sağ el kuralının tersine hareket eder. Bu yüzden bu bölgedeki malzemeler metamalzeme veya sol eli malzeme olarak da adlandırılır. IV. Bölge ise mu negatif bölgesidir. Doğal manyetik malzemeleri temsil eder ve sadece μ_r negatif değer alır (Matei et al., 2025).

III. Bölgede bulunan metamalzeme ortamında elektromanyetik dalganın davranışını ortaya koymak için öncelikle denklem (1) ve denklem (2) bulunan Maxwell denklemlerini çift pozitif bölge (ϵ_r ve μ_r her ikisinde pozitif) için $e^{-j\omega t}$ harmonik bağımlı olarak tekrar ifade edersek

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (18)$$

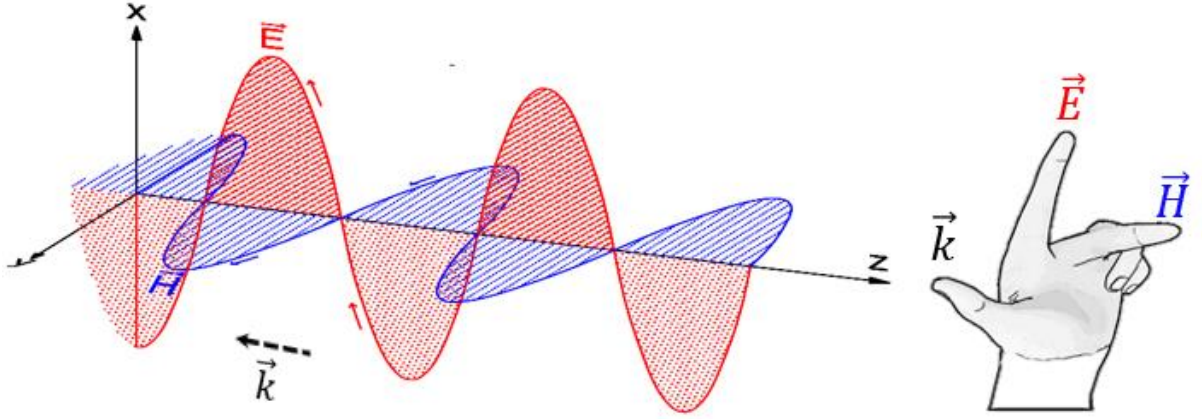
$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E} \quad (19)$$

Denklem (18) ve denklem (19) elde edilecektir. Bu durumda $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{k}$ vektörlerinin Şekil 4'de bulunan sağ el kuralına uygun şekilde hareket ettiğini görürüz. Maxwell denklemlerini ϵ_r ve μ_r 'nin negatif olduğu Çift Negatif bölge için tekrar yazarsak;

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \quad (20)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega|\epsilon|\vec{E} \quad (21)$$

Denklem (20) ve denklem (21) elde edilecektir. Bu durumda ise $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $-\vec{k}$ vektörlerinin Şekil 6'da bulunan sol eli hareket yaptığı görülmektedir.



Şekil 6. Metamalzeme ortamında elektrik alan ($\vec{E}$), manyetik alan ($\vec{H}$) ve EM dalganın yayılım yönünün sol el kuralıyla gösterilmesi (Tutar, 2021).

Şekil 6’da gösterilen elektrik alan, manyetik alan ve elektromanyetik alan yayılım ilişkisinden hareketle metamalzeme ortamında elektromanyetik dalganın sol el kuralına uygun olarak hareket ettiği görülmektedir.

Polarizasyon

Elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün ($\vec{E}$) zaman içindeki yönü ve şekli, polarizasyon olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, polarizasyon; yayılma doğrultusuna dik düzlemde, zamanın bir fonksiyonu olarak elektrik alan vektörünün ($\vec{E}$) izlediği yoldur. Polarizasyonunun lineer, dairesel ve eliptik olmak üzere 3 tipi vardır. Polarizasyon türlerini incelemek için $\vec{E}$ ifadesinin zaman uzayı denklemleri, denklem (19) ve denklem (20)’de verilmiştir. (Balanis, 2011; Sadiku, 2018)

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t - \beta z) \quad (22)$$

$$E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - \beta z + \delta) \quad (23)$$

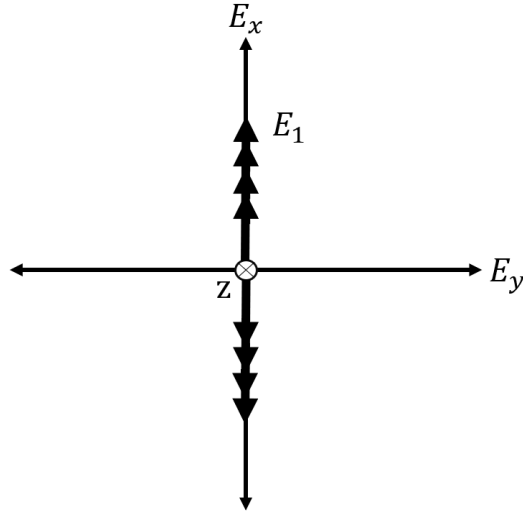
$$\delta = \varphi_x - \varphi_y \quad (24)$$

Denklem (22) ve denklem (23) elektromanyetik dalganın yayılmasını modelleyen x ve y bileşenlerini temsil eder. Burada; E_1 x yönündeki, E_2 ise y yönündeki $\vec{E}$ bileşenin genliğini, z $\vec{E}$ ’nin yayılma yönünü, ω açısal frekansı, β Faz sabitini, δ x ve y yönündeki $\vec{E}$ bileşeninin faz farkını ifade etmektedir. (Kraus & Carver, 1973; Popovic & Popovic, 1999).

Lineer polarizasyon

Lineer polarizasyon $\delta = \pm m\pi$, ($m=0,1,2,3\dots$) koşulunda geçerlidir. Bu durumda $E_2 = 0$ olduğunda x-yönünde lineer polarizasyon, $E_1 = 0$ olduğunda ise y-yönünde lineer

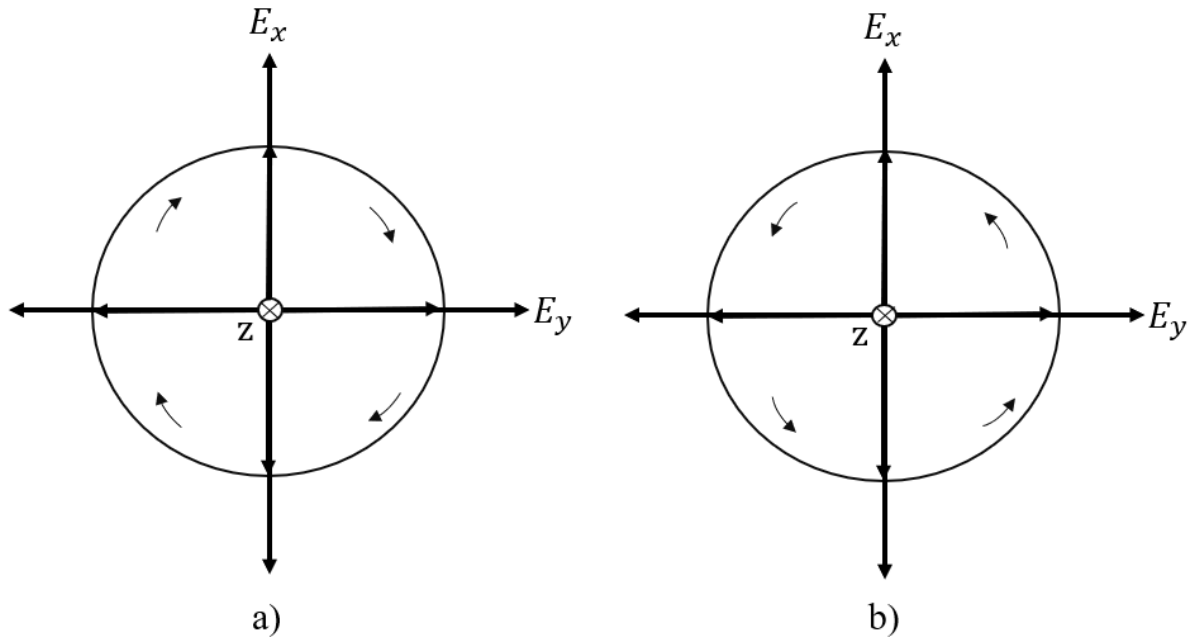
polarizasyon oluşur. Şekil 7’de lineer polarizasyon grafiği verilmiştir. (Balanis, 2011; Kraus & Carver, 1973).



Şekil 7. Lineer Polarizasyon (Balanis, 2011).

Dairesel polarizasyon

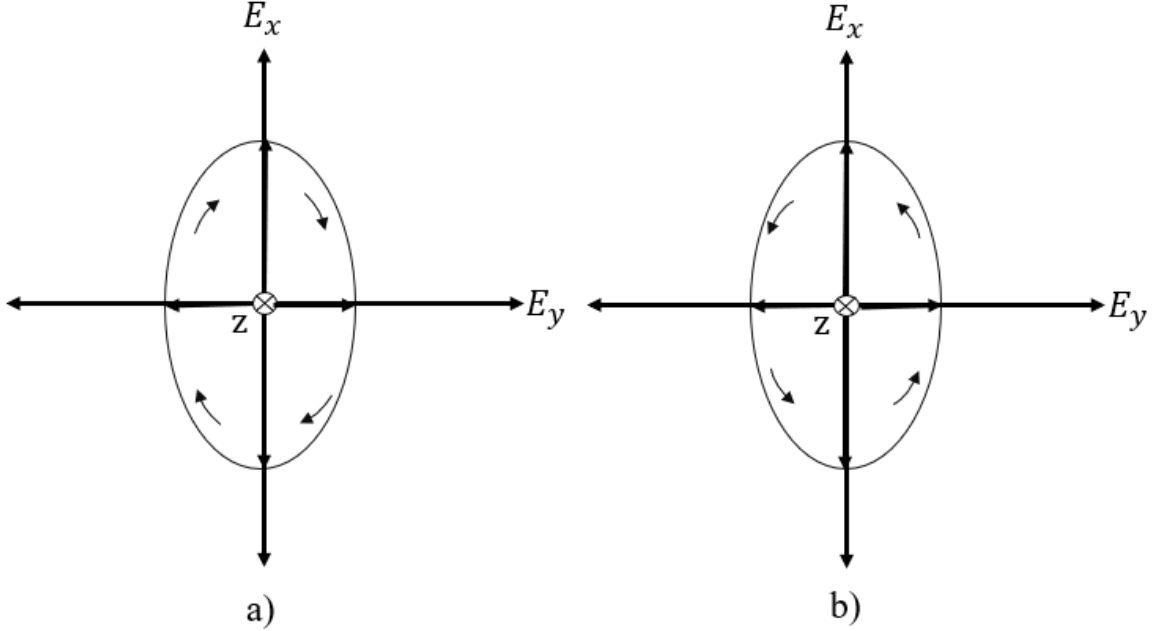
Dairesel polarizasyonun gerçekleşmesi için $\delta = \pm m \frac{\pi}{2}$, ($m=1,3,5,7\dots$) ve $E_1 = E_2$ koşullarında geçerlidir. Dairesel polarizasyon kendi içinde sağ elli dairesel ve sol elli dairesel polarizasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Sağ ve sol elli dairesel polarizasyon, δ faz farkı parametresiyle ilişkilidir. $\delta = +m \frac{\pi}{2}$ durumunda sol elli dairesel polarizasyon oluşur ve $\vec{E}$ saat yönünde döner. Buna karşılık, $\delta = -m \frac{\pi}{2}$ durumunda sağ elli dairesel polarizasyon meydana gelir ve $\vec{E}$ bu kez saat yönünün tersi yönde döner. Sağ ve sol elli dairesel polarizasyon Şekil 8’de verilmiştir.(Balanis, 2011; Kraus & Carver, 1973).



Şekil 8. a) Sağ elli dairesel polarizasyon b) Sol elli dairesel polarizasyon (Balanis, 2011).

Eliptik polarizasyon

Eliptik polarizasyon gerçekleşmesi için $\delta = \pm m \frac{\pi}{2}$, ($m=1,3,5,7\dots$) ve $E_1 \neq E_2$ koşullarında geçerlidir. Sağ ve sol elli eliptik polarizasyon durumları dairesel polarizasyonla aynıdır ve Şekil 9’da gösterilmiştir. (Balanis, 2011; Kraus & Carver, 1973).



Şekil 9. a) Sağ elli eliptik polarizasyon b) Sol elli eliptik polarizasyon (Balanis, 2011).

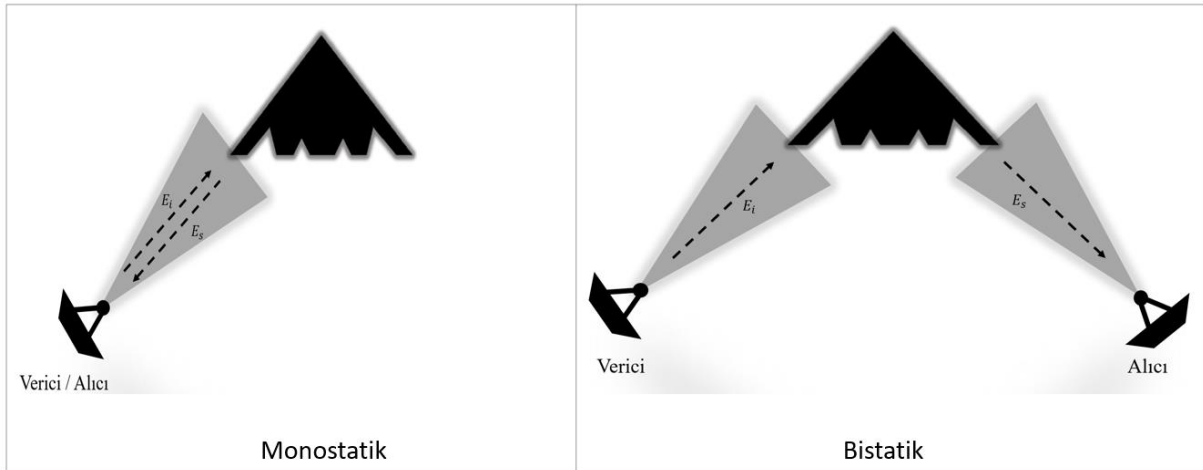
Radar Kesit Alanı

Radar kesit alanı (RCS) yansıtılan EM dalganın ne kadarının radara geri döndüğünün karakterize eden bir ölçüdür. IEEE tanımına göre RCS bir radar hedefinin yansıtıcılık gücünü gösterir. Genellikle σ sembolüyle gösterilir ve metrekare (m^2) cinsinden ifade edilir. RCS, bir hedefe belirli bir yönden gelen düzlemsel dalganın hedef tarafından belirli bir yöne saçılan gücünün, gelen dalganın hedef üzerindeki güç yoğunluğuna oranının 4π katı olarak tanımlanır. Bu oran, saçılan gücün ölçüldüğü nokta hedeften sonsuz uzaklığa yaklaştıkça alınan limit değerdir. RCS ifadesi denklem 25’te olduğu gibi ifade edilir. (Eugene Knott, 2004; The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020)

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \left(\frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right) \quad (25)$$

E^s hedef yönünden saçılan $\vec{E}$, E^i hedefe gelen $\vec{E}$, R hedef ve alıcı arasındaki mesafeyi temsil eder. Ayrıca Verici ve alıcının hedefe göre konumu ve açısı, hedefin geometrisi, hedefteki malzemenin elektromanyetik özellikleri, Frekans ve dalga boyu, hedef ve alıcının polarizasyonu hedefin RCS değerini etkileyen parametrelerdir. Bu parametreler saçılan alanın

genliğini ve fazını etkileyerek saçılma karakteristğini değiştiriler dolayısıyla RCS değerinde değişimlere yol açarlar.



Şekil 10. Monostatik ve Bistatik RCS konfigürasyonlarının şematik gösterimi.

RCS analizlerinde monostatik ve bistatik olmak üzere iki çeşit konfigürasyon vardır. Bu konfigürasyonları temel olarak alıcı ve verici sistemlerin durumları belirler. Monostatik durumda alıcı ve verici radar sistemleri aynı konumdadır. Vericiden gönderilen elektromanyetik dalga aynı anten üzerinde algılanır. Bistatik durumda ise alıcı ve verici radar sistemleri farklı noktalardadır bu nedenle vericiden gönderilen elektromanyetik dalga farklı bir doğrultudan algılanır. Şekil 10'da verici ve alıcı konumlarına göre farklılık gösteren monostatik ve bistatik konfigürasyonlarının şematik gösterimi verilmiştir (Eugene Knott, 2004; Mark A. Richards, 2010).

Radar Kesit Alanı Azaltma

Radar kesit alanı azaltmak için dört temel teknik bulunmaktadır:

- Şekillendirme
- Radar soğurucu malzemeler
- Aktif iptal etme
- Pasif iptal etme

Şekillendirme

Hedefin yüzeylerinden ve kenarlarından yayılan elektromanyetik dalganın başka yönlerde saçılması şekillendirmenin en temel amacıdır. Fakat yüzeyinin radara doğrudan baktığı ve yansımanın güçlü olduğu bazı yönler her zaman bulunur. Bundan dolayı, yüzeyinin tüm yönlerde düşük RCS'e sahip olması mümkün değildir. Bu aynı zamanda F-35, F-22 ve B-2 Spirit gibi düşük RCS'li (Stealth) uçaklar içinde geçerlidir. Bu uçaklardaki yüzey ve kenar

geometrileri, radardan gönderilen elektromanyetik dalgaları kaynağa geri yansıtmak yerine farklı yönlerde saçacak biçimde tasarlanmıştır. Şekillendirmenin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için hedef geometrisi üzerinde düşük RCS değerlerine sahip açılal bölgelerin bulunması gereklidir. Günümüzde mevcut RCS azaltma yaklaşımlarının büyük bir kısmı ise monostatik konfigürasyonlar üzerine odaklanmaktadır. Bu yöntem geometrik bir düzenlemeye dayandığı için ekstra bir malzeme veya elektronik siteme ihtiyaç duymaz ve geniş bantlı etki sağlar. Fakat çoğu durumda aerodinamik ve yapısal gereksinimler açısından çelişerek mühendislik açısından çok maliyetli ve önemli tasarım kısıtlamalarına sebep olmaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde şekillendirme ile RCS azaltma, aerodinamik ve yapısal arasında önemli bir denge gerektirmektedir(Eugene Knott, 2004; Mark A. Richards, 2010).

Radar soğurucu malzemeler

Radar soğurucu malzemeler radardan gönderilen elektromanyetik dalgayı geri yansıtmak yerine soğurarak RCS azaltma işlemini gerçekleştirirler. Bu malzemelerin temel çalışma prensibi, gelen elektromanyetik dalga enerjisinin elektriksel veya manyetik kayıplar aracılığıyla ısı enerjisine dönüştürülmesine dayanır. Bu dönüşüm mekanizması, malzemenin ϵ_r ve μ_r parametrelerine bağlıdır. Bu yöntem son derece esnek olduğu için mevcut platformlara sonradan kaplama şeklinde eklenebilir. Şekillendirme tekniğı ile RCS azaltmanın zor olduğu bölgelerde (Köşe ve birleşim noktaları) çözüm olarak kullanılabilir. Öte yandan bu malzemeler hacimli ve kırılğan olduğu için operasyonel ortamlarda kullanımı zordur(Eugene Knott, 2004).

Pasif iptal etme

Pasif iptal etme yöntemi bir tür empedans yükleme olarak bilinir. Radar'dan gönderilen elektromanyetik dalğanın genlik fazını ayarlayarak gelen dalgayı pasif olarak bozarak fazı ters şekilde yansıtmaya prensibine dayanır. Bu yöntem güç kaynağı ve karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duymaz. Ayrıca mevcut geometri üzerinde kolayca uygulanabilir niteliktedir. Bunun yanı sıra geliş açısına, dar frekans bandına sahip olması gibi dezavantajları vardır(Eugene Knott, 2004).

Aktif iptal etme

Aktif iptal etme, pasif iptal etmenin daha gelişmiş bir türüdür. Bu yöntemde hedefe gelen elektromanyetik dalğanın fazı, frekansı ve yönü elektronik sistemler vasıtasıyla algılanır ve bu bilgilere göre yansımanın farklı algılanıp manipüle edileceğı bir elektromanyetik dalga aynı elektronik sistem tarafından geri yansıtılır. Bu sistem şekillendirme ve radar soğurucu malzemelerin etkili olmadığı bölgelerde ve uygun algoritma ve elektronik sistemlerde geniş

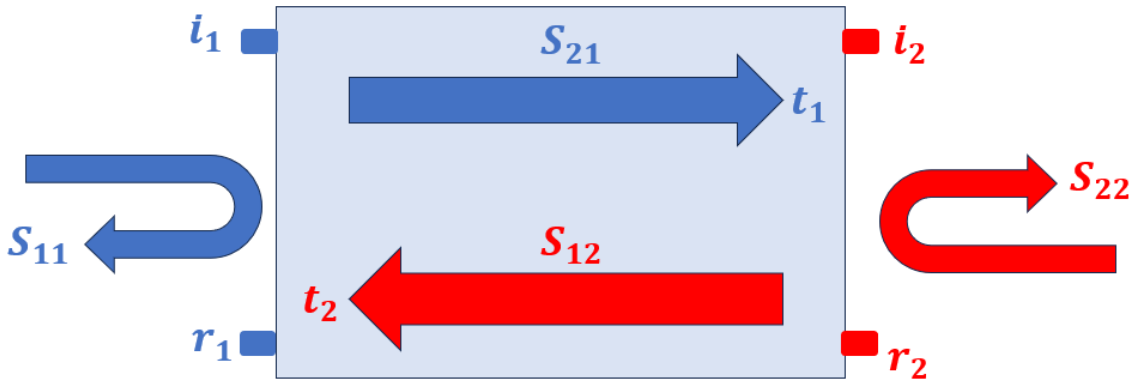
bant olarak çalıştırılabilir. Elektronik sistemlerin uyarlanabilirliği sayesinde farklı radar bantları etkin bir şekilde yanıt verebilir. Bunun dışında sistem karmaşıklığı ve donanım ihtiyaçları nedeniyle maliyetlidir. Sistem arızalanması ya da elektronik sistemlerin faz zamanlaması gibi hataları nedeniyle RCS azaltma yerine artırma riski taşır(Eugene Knott, 2004).



MATERYAL ve METOT

S- Parametreleri

Mikrodalga mühendisliği alanında, yüksek frekanslarda çalışan sistemlerin gerilim ve akım değişkenlerinin doğrudan ölçülmesi veya karakterize edilmesi elektromanyetik dalgaların iletim hattı boyunca yayılması, saçılması ve yansıması sebebiyle pratik değildir. Çünkü bu frekanslarda sistemi ölçüp karakterize edecek olan empedans ve admitans matrisleri ve bunlara bağlı gerilim ve akım değerleri soyut hale gelecektir. Bu bağlamda sistemin davranışlarını elektromanyetik dalga cinsinden tanımlamak daha uygun olacaktır. Saçılma parametreleri (Scattering Parameters veya kısaca S-parametreleri) bu ihtiyaca yanıt veren bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir. S-parametreleri, bir yapıya gelen ve yansıyan elektromanyetik dalgalar arasındaki ilişkileri tanımlayarak ilgili sistemlerin ölçüm ve karakterizasyonunu uygun şekilde sağlar(Pozar, 2012).



Şekil 11. İki portlu sistem modeli ve S- parametreleri (Denisowski, 2025).

Şekil 11’de iki portlu bir devre modeli ile temsili S-parametreleri verilmiştir. i_1 : Port 1’den gelen EM dalgayı, i_2 : Port 2’den gelen EM dalgayı, r_1 : Port 1’den yansıyan EM dalgayı, r_2 : Port 2’den yansıyan EM dalgayı ifade etmektedir. Bu tanımlardan yola çıkarak S-parametreleri matrisi denklem 26’da olduğu gibi tanımlanmaktadır(Pozar, 2012).

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$r_1 = S_{11} \cdot i_1 + S_{12} \cdot i_2 \quad (27)$$

$$r_2 = S_{21} \cdot i_1 + S_{22} \cdot i_2 \quad (28)$$

Bu denklemlerden yola çıkarak S_{11} , S_{22} , S_{12} ve S_{21} ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir(Tutar, 2021).

$$S_{11} = \frac{r1}{i1} \Big|_{i2=0}, \quad S_{22} = \frac{r2}{i2} \Big|_{i1=0} \quad (29)$$

$$S_{12} = \frac{r1}{i2} \Big|_{i1=0}, \quad S_{21} = \frac{r2}{i1} \Big|_{i2=0} \quad (30)$$

S_{11} ve S_{22} ifadeleri yansıma katsayılarını S_{12} ve S_{21} ifadeleri ise iletim katsayılarını temsil etmektedir(Denisowski, 2025; Pozar, 2012). S- parametreleri özetle;

S_{11} : Port 1'den gelip port 1'e geri yansıyan EM dalgayı temsil eder.

S_{12} : Port 2'den gelip port 1'e iletilen EM dalgayı temsil eder.

S_{21} : Port 1'den gelip port 2'ye iletilen EM dalgayı temsil eder.

S_{22} : Port 2'den gelip port 2'ye geri yansıyan EM dalgayı temsil eder.

Polarizasyon Elipsi ve Eksenel Oran

Bir elektromanyetik dalganın uzayda zamana bağlı elektrik alan vektörünün zamanla uzayda izlediği eğri polarizasyon elipsi olarak tanımlanır. Polarizasyon elipsi ifadesinin matematiksel elde etmek için $\beta z=0$ ve φ faz sabiti olmak üzere elektrik alan ifadelerinin x ve y bileşenleri aşağıda ki gibi ifade edilir.

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t) \quad (31)$$

$$E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - \varphi) \quad (32)$$

Denklem (31) ve denklem (32)'de E_1 ve E_2 sırasıyla elektrik alan vektörü ifadesinin x ve y bileşenlerinin genliğini temsil etmektedir.

$$\frac{E_x(t)}{E_1(t)} = \cos \omega t \quad (33)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \cos(\omega t - \varphi) \quad (34)$$

Denklem (31) ve denklem (32) sağ tarafında yer alan kosinüs ifadeleri yalnız bırakıldığında, denklem (33) ve denklem (34) elde edilir.

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \cos(\omega t - \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi \quad (35)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi + \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} \sin \varphi \quad (36)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} - \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi = \sqrt{1 - \frac{E_x^2}{E_1^2}} \sin \varphi \quad (37)$$

Denklem (37)'in karesi alınır ve gerekli işlemler yapılırsa denklem (37) aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\left(\frac{E_y(t)}{E_2} - \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi \right)^2 = \left(1 - \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \right) \sin^2 \varphi \quad (38)$$

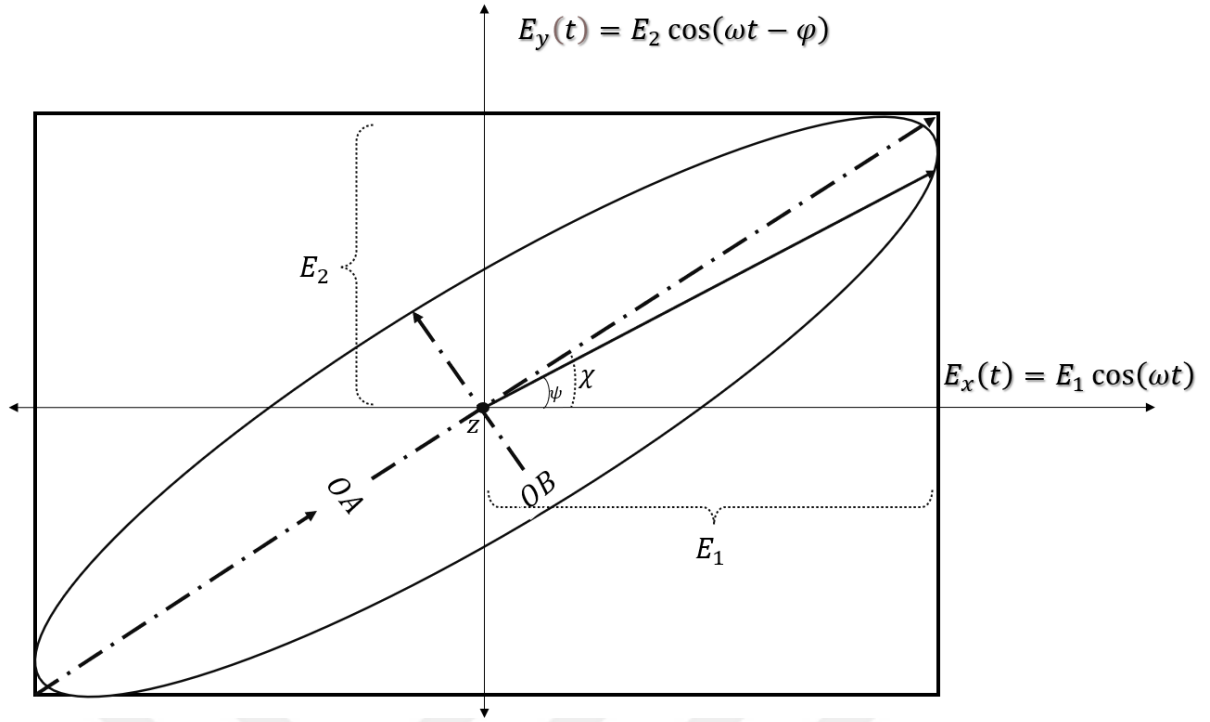
$$\frac{E_y(t)^2}{E_2^2} + \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \cos^2 \varphi - 2 \frac{E_y(t)}{E_2} \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi = \sin^2 \varphi - \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \sin^2 \varphi \quad (39)$$

$$\left(\frac{E_y(t)}{E_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x(t)}{E_1} \frac{E_y(t)}{E_2} \right) \cos \varphi + \left(\frac{E_x(t)}{E_1} \right)^2 = \sin^2 \varphi \quad (40)$$

$\sin^2 \chi + \cos^2 \chi = 1$ bağıntısı kullanılarak gerekli düzenlemeler yapıldığında denklem (40) elde edilir. Bu denklem, polarizasyon elipsi olarak adlandırılır. Şekil 12'de bu denkleme karşılık gelen grafik gösterilmiştir. Polarizasyon durumlarını açıklamak için kullanılan bu grafikte İki açı değeri bulunur: Bunlardan ilki eliptikliğin derecesini gösteren eliptiklik açısıdır χ ($\chi, -45 \leq \chi \leq 45^\circ$) ve elipsin yönelmesini gösteren, yönelme açısı ψ ($\psi, 0 \leq \psi \leq 90^\circ$) olarak ifade edilir (Collett, 1968; Schaefer et al., 2007; Tutar, 2021).

$$\tan 2\psi = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 - E_2^2} \cos \varphi \quad (41)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 + E_2^2} \sin \varphi \quad (42)$$



Şekil 12. Polarizasyon elipsi, büyük ve küçük eksen

Eksenel oran (AR), polarizasyon elipsinin büyük ve küçük eksenlerinin oranı olarak tanımlanır ve dalganın polarizasyon durumuna ilişkin bilgi sağlar. Lineer polarizasyonda elips daralır ve eksenel oran sonsuza yaklaşır. Dairesel polarizasyonda ise literatürde genellikle 3 dB ve altındaki değerler daireysel polarizasyon olarak kabul edilir; 0 dB değeri ise tam daireysel polarizasyona karşılık gelir. Eksenel oran ifadesi denklem (43)’de verilmiştir (Balanis, 2011; Rauf et al., 2025).

$$AR = \frac{OA}{OB}, \quad 0 \text{ dB} \leq AR \leq \infty \quad (43)$$

Stoke’s Parametreleri

Stoke’s parametreleri, ışığın ve elektromanyetik dalganın polarizasyon durumlarını tanımlamak için kullanılan dört temel büyüklüktür. Bu parametreler, elektromanyetik dalganın genlikleri ve faz farkı hakkında bilgi verir. Stoke’s parametrelerinin matematiksel olarak elde edebilmek için polarizasyon elipsi denklemi kullanılır. Polarizasyon elipsi ifadesin sınırlamalarından biri zamana bağlı ifadeler barındırdığı için ölçülemez ve gözlemlenemez olmasıdır. Bu sebeble sınırlamanın önüne geçmek için denklem (44)’de verilmiş olan ortalama zaman denklemi kullanılması gerekmektedir (Collett, 1968; Schaefer et al., 2007).

$$\langle E_i(t) \rangle \langle E_j(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t) E_j(t) dt \quad i, j = x, y. \quad (44)$$

Zaman denklemi kullanılıp gerekli düzenlemelerden sonra ;

$$\left(\frac{E_1^2 + E_2^2}{S_0} \right)^2 - \left(\frac{E_1^2 - E_2^2}{S_1} \right)^2 - \left(\frac{2E_1E_2 \cos \varphi}{S_2} \right)^2 = \left(\frac{2E_1E_2 \sin \varphi}{S_3} \right)^2 \quad (45)$$

Denklem (45) elde edilir. Stoke's parametreleri bu denklemden çıkarılacaktır.

$$S_0 = E_1^2 + E_2^2 \quad (46)$$

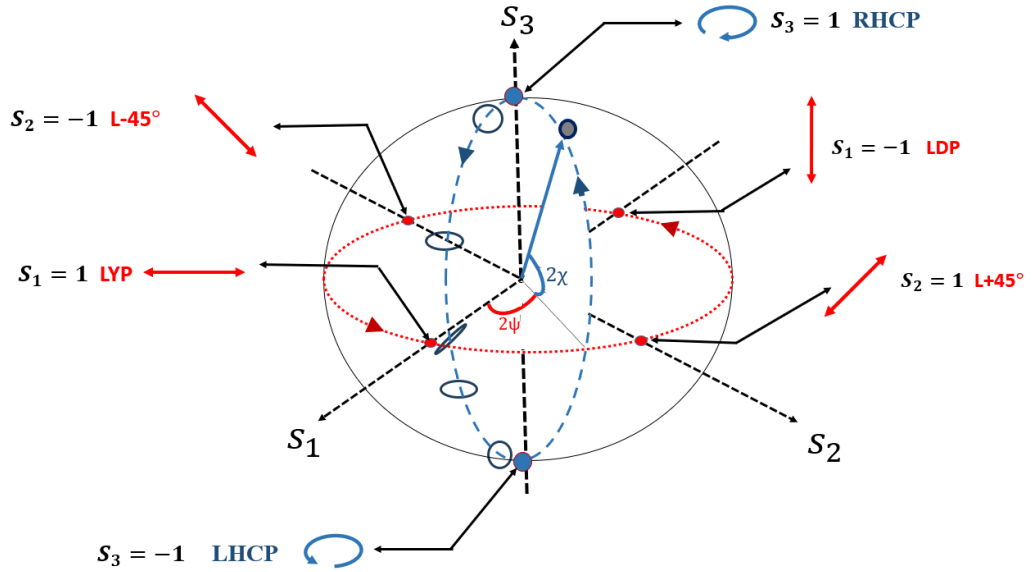
$$S_1 = E_1^2 - E_2^2 \quad (47)$$

$$S_2 = 2E_1E_2 \cos \varphi \quad (48)$$

$$S_3 = 2E_1E_2 \sin \varphi \quad (49)$$

Denklemler (46),(47), (48),(49) Stoke's parametreleridir.

Denklem (46)'de verilen S_0 Stoke's parametresi toplam yayılma alanının yoğunluğunu, Denklem (47)'de verilen S_1 yatay polarizasyon ve dikey polarizasyonu, Denklem (48)'de verilen S_2 linear $\pm 45^\circ$ polarizasyonunu ve Denklem (49)'da verilen S_3 dairesele polarizasyonu ve çeşitlerini (sağ elli ve sol elli) temsil etmektedir. (Collett, 1968; Schaefer et al., 2007)



Şekil 13. Poincare küresi üzerinde Stoke's parametrelerinin gösterilmesi (Tutar, 2021).

Şekil 13'de Poincare küresi verilmiştir. Poincare küresi, birim küre üzerinde noktalar polarizasyon elipsi ve Stoke's parametreleri yerleştirilerek elektromanyetik dalgaların tüm

polarizasyon durumlarını temsil eder. Bu küre üzerindeki kuzey kutbu sağ elli dairesel polarizasyonu güney kutbu ise sol elli dairesel polarizasyonu temsil eder, şekilden görüleceği üzere bu değişimi eliptiklik (χ) parametresinin değişimi neden olur, ekvator çizgisi ise yönelme açısı (ψ) değişimiyle lineer polarizasyonu (yatay ve dikey) temsil etmektedir.

$$S_{LYP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{LDP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (50)$$

$$S_{L+45} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{L-45} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (51)$$

$$S_{RHCP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad S_{LHCP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (52)$$

Denklemler (50), (51), (52) 'de sırasıyla Stoke's parametreleri ve polarizasyon durumları matris olarak ifade edilmiştir. Denklem (50)'de Lineer yatay (LYP) ve lineer dikey (LDP) polarizasyon durumu, Denklem (51)'de Lineer ± 45 (L+45, L-45) polarizasyon durumu, Denklem (52)'de ise sağ elli (RHCP) ve sol elli (LHCP) dairesel polarizasyon durumu Stoke's parametreleri cinsinden ifade edilmiştir (Schaefer et al., 2007; Tutar, 2021).

Elipitiklik

Elipitik değeri elektromanyetik dalganın dairesel polarizasyonu hakkında bilgi verir ve Stoke's parametrelerinden elde edilmiştir. Denklem (50)'de gösterildiği gibi, ilgili parametre Stoke's bileşenleri aracılığıyla hesaplanmakta, S_0 ve S_3 söz konusu denklemde bu ilişki matris formunda sunulmaktadır.

$$Elipitiklik = \frac{S_3}{S_0} \quad (53)$$

Denklem (51)'de eliptiklik değerinin formülü verilmiştir. Bu parametre kullanılan eğrilerde +1'e ulaşan eğriler RHCP, -1'e ulaşan eğriler ise LHCP polarizasyon durumunun olduğu anlamına gelmektedir (Ozturk et al., 2023).

Polarizasyon Dönüşüm Oranı

Polarizasyon Dönüşüm Oranı (PCR), lineer polarizasyon dönüşümünün verimliliğini ölçen bir parametredir. LYP ve LDP polarizasyon dönüşümleri, literatürde x-polarizasyondan

y-polarizasyona veya y-polarizasyondan x-polarizasyona olarak tanımlanmaktadır. Bu dönüşümler genellikle lineer polarizasyondan lineer polarizasyona dönüşüm (LP-LP) veya çapraz polarizasyon dönüşümü olarak tanımlanır. PCR parametresini hesap etmek için eş polarizasyon yansıma katsayıları ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılar (R_{xy} , R_{yx}) kullanılır(Ozturk & Corapsiz, 2022a).

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_x^r \\ \vec{E}_y^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_x^i \\ \vec{E}_y^i \end{bmatrix} \quad (54)$$

Jones matrisi tarafından tanımlanan gelen ve yansıyan elektromanyetik dalga ifadelerinin davranışları denklem (54)'de gösterilmiştir. Bu denklemde $\vec{E}_x^i$ x polarizasyonda gelen dalgayı, $\vec{E}_y^i$ y polarizasyonda gelen dalgayı, $\vec{E}_x^r$ x polarizasyonda yansımayı, $\vec{E}_y^r$ y polarizasyonda yansımayı temsil etmektedir. Ayrıca R_{xx} ve R_{yy} eş polarizasyon yansıma katsayılarını, R_{xy} ve R_{yx} çapraz polarizasyon yansıma katsayılarını temsil eder.

$$R_{xx} = \frac{\vec{E}_x^r}{\vec{E}_x^i} \quad (55)$$

$$R_{xy} = \frac{\vec{E}_x^r}{\vec{E}_y^i} \quad (56)$$

$$R_{yx} = \frac{\vec{E}_y^r}{\vec{E}_x^i} \quad (57)$$

$$R_{yy} = \frac{\vec{E}_y^r}{\vec{E}_y^i} \quad (58)$$

$$PCR = 100 \times \frac{R_{yx}^2}{R_{yx}^2 + R_{xx}^2} = 100 \times \frac{R_{xy}^2}{R_{xy}^2 + R_{yy}^2} \quad (59)$$

Denklemler (55), (56), (57), (58) 'de indis olarak kullanılan i ifadesi gelen dalgayı r ifadesi yansıyan dalgayı x ve y ise bunların polarizasyonlarını temsil etmektedir. Eş ve çapraz yansıma katsayılarında ise temsili olarak R_{ij} şeklinde gösterilirse i yansıyan dalganın polarizasyonunu j ise gelen dalganın polarizasyonunu temsil eder.

Denklem (59)'de eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayıları kullanılarak hesaplanan yüzde PCR parametresinin denklemi verilmiştir (Tutar, 2021; Tutar & Ozturk, 2022).

Matematiksel Analiz

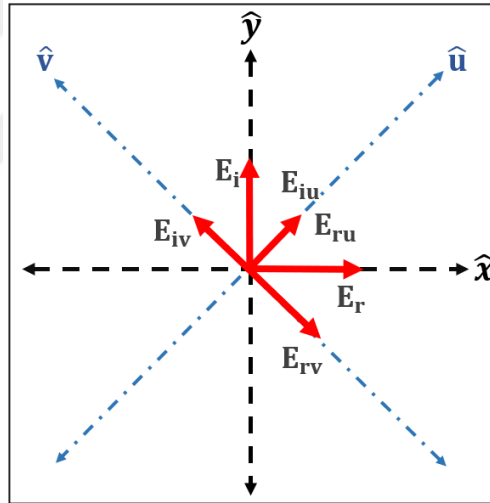
Polarizasyon dönüştürücü mekanizmasının daha iyi anlaşılması için temsili polarizasyon dönüştürücü birim hücre Şekil 14’de olduğu gibi u - v bileşenlerine ayrılmıştır.

Birim hücre üzerine gelen dalganın y - polarizasyonlu gelip x polarizasyonla yansıdığını varsayalım. u - v bileşenlerine ayrıldıktan sonra, gelen ve yansıyan elektrik alan ifadeleri matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}_i = E_{iu}\hat{u} + E_{iv}\hat{v} \quad (60)$$

$$\vec{E}_r = E_{ru}\hat{u} + E_{rv}\hat{v} = r_{uu}E_{iu}\hat{u} + r_{vv}E_{iv}\hat{v} \quad (61)$$

Burada $\vec{E}_i$ gelen elektrik alanı, $\vec{E}_r$ yansıyan elektrik alan ifadesini, E_{iu} ifadesi gelen dalganın u vektöründeki bileşeni E_{iv} ise gelen dalganın v vektöründeki bileşenini göstermektedir. Benzer şekilde, E_{ru} ve E_{rv} sırasıyla u - v eksenleri yönündeki yansıyan dalga bileşenini, E_{iu} ve E_{iv} u - v eksenleri yönündeki gelen dalga bileşenlerini temsil etmektedir.



Şekil 14. Temsili polarizasyon dönüştürücü birim hücre ve u - v eksenleri.

Ayrıca r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri u - v eksenlerindeki yansıma katsayılarını temsil etmektedir. Denklemler (60), (61)’de görüleceği üzere y - polarize olarak gelen dalganın x polarize olarak yansıması için E_{iu} bileşeni aynı doğrultu ve genlikte, E_{iv} bileşeni ise aynı genlikte fakat zıt yönde yansıması gerekmektedir. Buna göre, $|r_{uu}| = |r_{vv}| \cong 1$ ve $\Delta\varphi = \varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pm 180^\circ$ şartlarında LP-LP dönüşümü, aynı genlik şartı ve $\Delta\varphi = \varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pm 90^\circ$ olduğunda ise LP-CP dönüşümü gerçekleşecektir(B. Kamal et al., 2021; Ozturk et al., 2023).

Eş ve çapraz yansıma katsayılarını matematiksel olarak elde etmek için, denklem (59)’de $r_{uu} = r_{vv} \cdot e^{-j\Delta\varphi}$ bağıntısını yerine yazıp denklemi tekrar ifade edersek.

$$\vec{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\hat{u} + \hat{v} \cdot e^{-j\Delta\varphi}) \cdot r_u \vec{E}_{iy} \quad (62)$$

$$E_u(t) = E_0 \cos \omega t \quad (63)$$

$$E_v(t) = E_0 \cos(\omega t - \Delta\varphi) \quad (64)$$

Denklem (62) elde edilecektir. Bu durumda, yansıyan dalga bileşenleri arasındaki faz farkı $\Delta\varphi$ ile temsil edilir. Bu fark yansıyan elektrik alan vektörünün u - v düzlemindeki ilişkisini tanımlayarak polarizasyon durumunu belirler.

Denklem (63) ve denklem (64)'de faz farkının etkisini incelemek için denklem (62)'de verilen yansıma ifadesi u - v bileşenlerine ayrılmıştır. Her iki bileşen için E_0 genliği ifade etmektedir. Bu bileşenlerin zamandan bağımsız hale gelmesi için faz farkı ortadan kaldırılır ve E_u ve E_v arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir.

$$E_u^2 - 2E_u E_v \cos(\Delta\varphi) + E_v^2 = \frac{1}{2} \cdot |E_y|^2 \cdot \sin^2(\Delta\varphi) \quad (65)$$

Denklem (65) yansıyan elektrik alan vektörünün izlediği yolu tanımlar ve polarizasyonun durumunu belirleyen geometrik bağlantı bu ifadeyle gösterilir. Bu denklem ile yansıyan elektrik alanın tekrar x - y koordinat sistemine döndürmek için $E_y = (E_u + E_v) \cos(45)$ ve $E_x = (E_u - E_v) \sin(45)$ bağıntılarını kullanılırsa;

$$\frac{E_x^2}{|E_{iy}|^2 (1 - \cos \Delta\varphi)/2} + \frac{E_y^2}{|E_{iy}|^2 (1 + \cos \Delta\varphi)/2} = 1 \quad (66)$$

Denklem (66) vasıtasıyla yansıyan dalga için x ve y bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$|E_{rx}| = |E_x|_{E_y=0} = |E_{iy}| \sqrt{(1 - \cos \Delta\varphi)/2} \quad (67)$$

$$|E_{ry}| = |E_y|_{E_x=0} = |E_{iy}| \sqrt{(1 + \cos \Delta\varphi)/2} \quad (68)$$

Denklem (67) ve denklem (68)'den yola çıkarak eş ve çapraz yansıma katsayıları matematiksel olarak elde edilir.

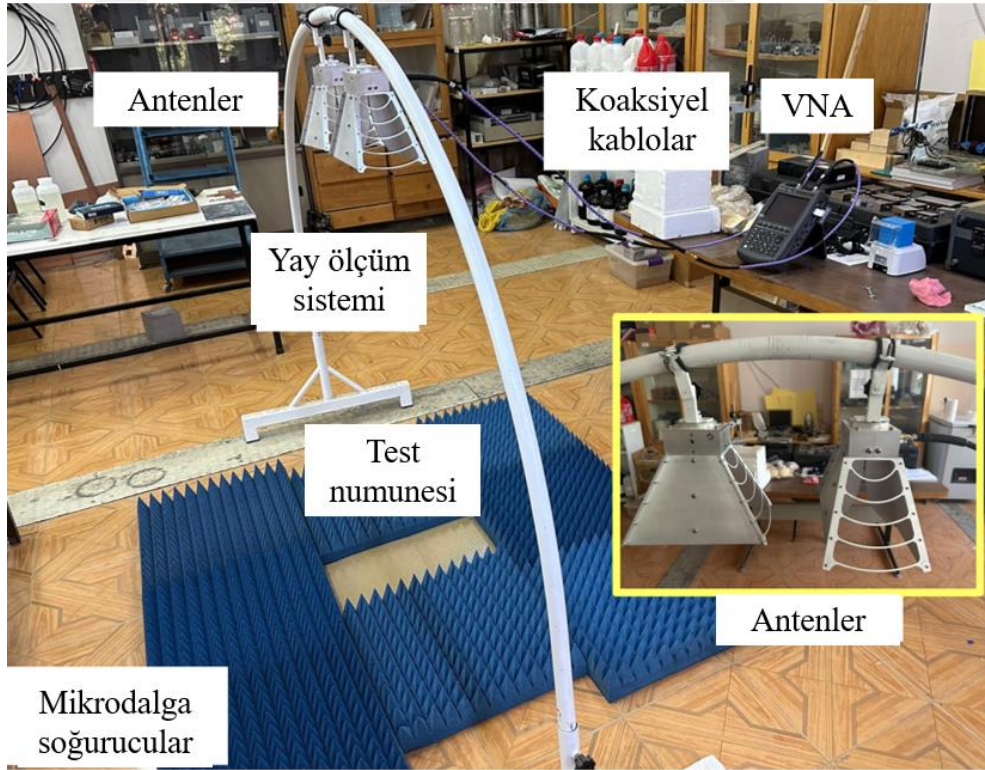
$$\frac{|E_{rx}|}{|E_{iy}|} = R_{xy} = R_{yx} = \sqrt{(1 - \cos \Delta\varphi)/2} \quad (69)$$

$$\frac{|E_{ry}|}{|E_{iy}|} = R_{yy} = R_{xx} = \sqrt{(1 + \cos \Delta\varphi)/2} \quad (70)$$

Denklem (69) ve denklem (70)'de eş ve çapraz yansıma katsayılarının matematiksel ifadesi verilmiştir. Yansıma katsayıları $\Delta\varphi$ kullanılarak hesap edilebilir (Babar Kamal et al., 2021; B. Q. Lin et al., 2016).

Serbest Uzak Ölçüm Düzenegi

Serbest uzak ölçümleri, Gaziantep Üniversitesi Mikrodalga ve Antenler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sistemi, 20 kHz ile 26,5 GHz arasındaki frekanslarda saçılma parametrelerini ölçebilen Keysight Technologies marka N9918A model vektör ağ analizörü (VNA) içerir. R_{xx} ve R_{xy} bileşenlerini ölçmek için iki geniş bantlı anten (Pasternack PE9888-11) çift yönlü olarak yerleştirilmiştir. Bu antenler 20,4 cm yüksekliğinde ve 16 cm genişliğinde olup, 11 dB nominal kazançla, 1,5 VSWR giriş uyum değerine sahiptir ve 1-18 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. VNA ile antenler arasında yaklaşık 120 cm uzunluğundaki koaksiyel kablolar vardır.



Şekil 15. Serbest Uzak ölçüm düzenegi.

Anten konfigürasyonları. Eş-polarizasyon testlerinde verici ve alıcı antenler aynı doğrultuda yerleştirilirken çapraz-polarizasyon ölçümleri için şekil 15'te olduğu gibi alıcı anten

90° döndürölmüş, verici anten ise orijinal konumunda bırakılmıştır 1–18 GHz aralığında yaklaşık –40 dB zayıflatma verimliliğine sahip piramidal mikrodalga soğurucular, kırınım etkilerini bastırmak için kullanılmıştır.



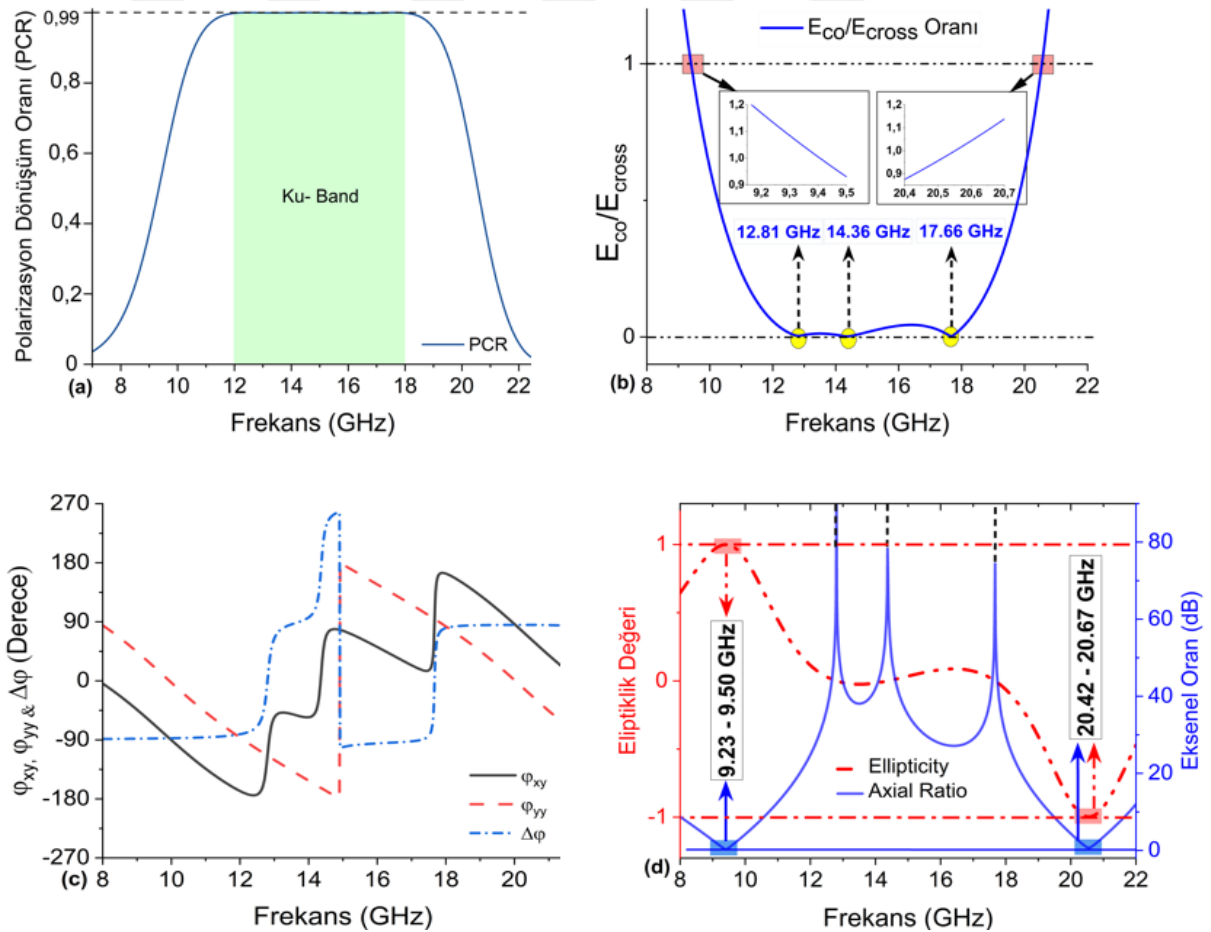
ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde tez kapsamında yapılan polarizasyon dönüştürücü uygulamalarının CST Microwave Studio ve Ansys HFSS Simülasyon programları ile yapılan yansıma katsayısı simülasyon sonuçları sunulmuştur. Birim hücrelerin arka yüzeyinde bir bakır topraklama düzlemi bulunduğundan, elektrik alanının teğetsel bileşeni sıfır hesap edilecek şekilde sınır koşulları ayarlanmıştır ($E_t = 0$). Bu koşul, simülasyonda hesaplama kaynaklarının kullanımını ve simülasyon süresinin azalmasını sağlamıştır. CST Microwave Studio'da 'Frequency Domain Solver' kullanılmış ve xz ile yz düzlemlerine 'Unit Cell' sınır koşulları atanmıştır. Ansys HFSS yazılımında ise çözücü olarak 'HFSS' kullanılmış ve sınır koşulları 'Lattice Pair' olarak belirlenmiştir. Her iki simülasyon platformunda da birim hücrelerin uyarılması ve saçılma parametrelerinin elde edilmesi amacıyla, birim hücrelerin ön yüzeyine uygun sınır koşullarıyla birlikte 'Floquet port' tanımlanmıştır. Bu çift platformlu simülasyon yaklaşımı, önerilen tasarımın farklı sayısal çözücüler arasında doğruluğunu ve tutarlılığını ortaya koymaktadır. Elde edilen yansıma sonuçlarından yola çıkarak Matlab programı kullanılarak polarizasyon dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca, polarizasyon dönüştürücü yapıların yansıma katsayılarına ait eşdeğer devre parametrelerinin optimizasyonu Keysight ADS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, söz konusu yapılardan seçilen yapılar üretilmiş ve serbest uzay ölçümleriyle deneysel olarak doğrulanmıştır. Tüm polarizasyon dönüştürücülerin birim hücreleri, farklı kodlama düzenleriyle yeniden dizilerek RCS azalma performansları analiz edilmiştir. Bu kapsamda, 0° , 15° , 30° ve 45° geliş açıları için, monostatik ve bistatik konfigürasyonlarda; düz plaka, 90° açılı dihedral plaka ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka geometrileri üzerinde, aynı boyutlardaki PEC plakalarla karşılaştırmalı RCS azalma analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir yapı için, her bir geliş açısındaki monostatik RCS değerinde en yüksek RCS azalmasının sağlandığı frekanslar belirlenmiş ve bu frekansa karşılık gelen uzak alan ışıma örüntüleri ile bistatik RCS azalma performansları detaylı olarak incelenmiştir.

X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 16'da görülmektedir. Hem pusula şeklindeki geometriye sahip üst rezonatör hem de birim hücrenin arka yüzeyi, $t=35\mu\text{m}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Orta katmandaki F4B malzemesi, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,65(1-j0,01)$ 'dir.

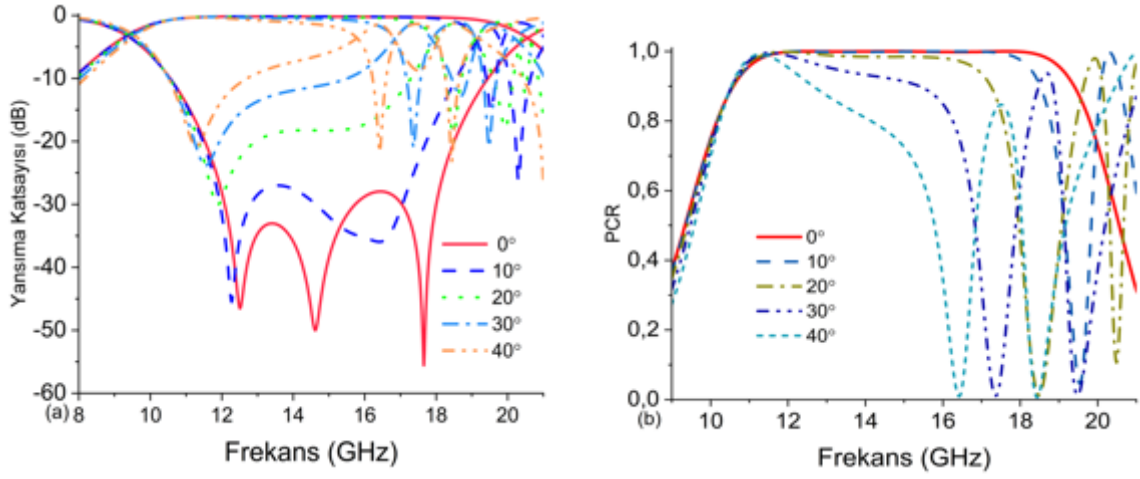
14,36 GHz ve 17,66 GHz'de sırasıyla -49,15 dB, -52,54 dB ve -53,67 dB'lik yansıma katsayılarıyla üç rezonans noktası gözlenmiştir. Bu rezonans frekanslarında, polarizasyon dönüşüm oranı (PCR) neredeyse %100'e yaklaşmaktadır. Şekil 17(a)'da x-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Aynı frekans bandında, eş-polarize yansıma katsayısı R_{xx} -27,39 dB'ye düşerken; çapraz-polarize katsayı R_{yx} , -0,32 dB'ye ulaşmaktadır. Bu değerler, x'ten y polarizasyonuna polarizasyon dönüşümünü doğrulamaktadır. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansıma değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını, yani x ve y polarize edilmiş gelen bir EM dalgasını sırasıyla y ve x polarize edilmiş olarak yansıtacağını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansıma katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 18. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri.

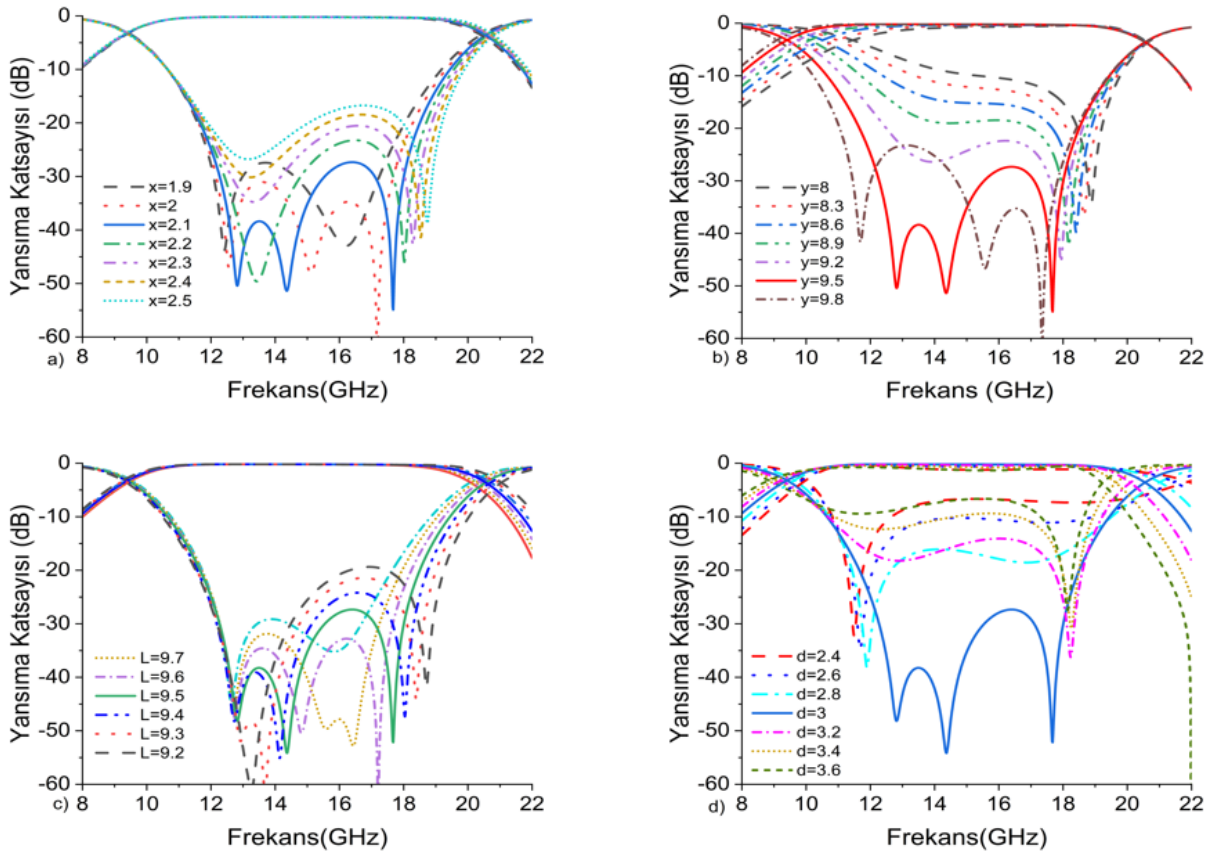
Şekil 18(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 11,55-18,47 GHz frekans bandında %99'u

aşmakta, Ku- bandını tamamen kapsamaktadır. Şekil 18(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 17’de gösterilen 12,81 GHz, 14,36 GHz ve 17,66 GHz rezonans frekanslarının, Şekil 18(b)’de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktalara karşılık geldiği görülmektedir. Bu noktalar ayrıca sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 18(d)’de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenini eliptikliği, sağ y eksenini ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri, grafikte görüldüğü üzere 9,23–9,50 GHz frekans bandında +1 seviyesine ulaşmakta olup, bu frekans aralığında RHCP dönüşümü gerçekleşmektedir. Ayrıca 20,42–20,67 GHz frekans aralığında -1 değerine ulaşmakta, bu bantta ise LHCP dönüşümü gözlenmektedir. Şekil 18(d)’de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 9,23–9,50 GHz ve 20,42–20,67 GHz frekans bantlarında 0 dB’ye ulaşarak, bu bantlarda yüksek verimli LP–CP dönüşümünün gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde gözlenen yükselme noktalarının sırasıyla 12,81 GHz, 14,36 GHz ve 17,66 GHz rezonans frekanslarıyla örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, söz konusu frekansların rezonans noktaları olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 18(b)’de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı hem de Şekil 17’de yer alan yansıma katsayıları incelendiğinde, 9,23–9,50 GHz ve 20,42–20,67 GHz bantlarında eş ve çapraz yansıma katsayısı değerlerinin neredeyse eşit olduğu görülmektedir. Aynı frekans aralıklarında, Şekil 18(c)’de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ ’nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansıma katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



Şekil 19. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi.

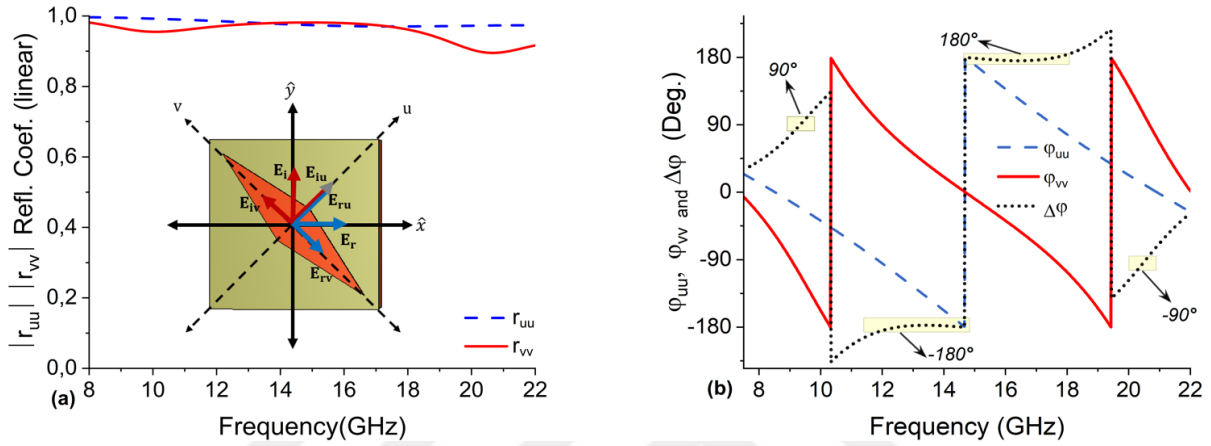
Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açısındaki yansıma katsayıları performansı Şekil 19(a) ve Şekil 19(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 19(a) ve Şekil 19(b)'de 0° ile 50° arasındaki yansıma katsayıları ve PCR değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, polarizasyon dönüştürücünün 50° eğik geliş açısındaki PCR performansı değerlendirilmiş ve %70, %80 ve %90 eşik değerleri için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; PCR %90 için 10,55–12,64 GHz ($\Delta f = 2,09$ GHz), 20,47–21,36 GHz ($\Delta f = 0,89$ GHz) ve 22,31–22,80 GHz ($\Delta f = 0,49$ GHz) bantlarında dönüşüm elde edilmiştir. PCR %80 eşğinde bantlar 10,24–14,14 GHz ($\Delta f = 3,90$ GHz), 17,26–17,73 GHz ($\Delta f = 0,48$ GHz), 20,05–21,45 GHz ($\Delta f = 1,41$ GHz) ve 22,21–22,93 GHz ($\Delta f = 0,72$ GHz) olarak gözlemlenmiş. PCR %70 seviyesinde ise bantlar daha da genişleyerek 10,02–15,17 GHz ($\Delta f = 5,15$ GHz), 17,07–17,89 GHz ($\Delta f = 0,82$ GHz), 19,69–21,51 GHz ($\Delta f = 1,82$ GHz) ve 22,16–23,07 GHz ($\Delta f = 0,91$ GHz) değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 20. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $x=1,9-2,5$ mm (b) $y=8-9,8$ mm (c) $L=9,7-9,2$ mm (d) $h=2,4-3,6$ mm.

Şekil 20’de önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin yansım katsayıları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Dikkate alınan parametreler, Şekil 16’da etiketlenen pusula şeklindeki yama yapısının genişlik (x) ve uzunluğu (y), birim hücre genişliği (L) ve dielektrik tabaka kalınlığıdır (d). Buradaki temel amaç, geniş bant genişliği ve yüksek PCR oranının birlikte sağlandığı maksimum verim koşulunun elde edilmesi hedeflenir. Şekil 20(a), x parametresinin 1,9–2,5 mm aralığında değişimini ve bu değişime karşılık gelen yansım katsayısının frekansa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Sonuçlar, x parametresi arttıkça bant genişliğinin genişlediğini; ancak eş-polarizasyon yansım katsayısının da arttığını ve bunun sonucunda PCR oranının azalacağını göstermektedir. Her ne kadar $x = 1,9$ mm, 2,0 mm ve 2,2 mm değerlerinde daha yüksek PCR oranları elde edilebilse de, bu değerlerde bant genişliğinde azalma gözlenmektedir. Ayrıca, x parametresi aralığında çapraz-polarizasyon yansım katsayısında önemli bir değişim gözlenmemektedir. Şekil 20(b), y parametresinin 8–9,8 mm aralığında frekansa bağlı değişimini göstermektedir. y parametresi arttıkça, hem bant genişliği hem de PCR değerleri başlangıçta artmaktadır; ancak $y = 9,5$ mm’nin üzerine çıkıldığında, eş-polarizasyon yansım katsayısındaki artış nedeniyle PCR değeri azalmaktadır, buna rağmen bant genişliği artmaya devam etmektedir. Şekil 20(c), birim hücre genişliği olan L parametresinin 9,2–9,7 mm

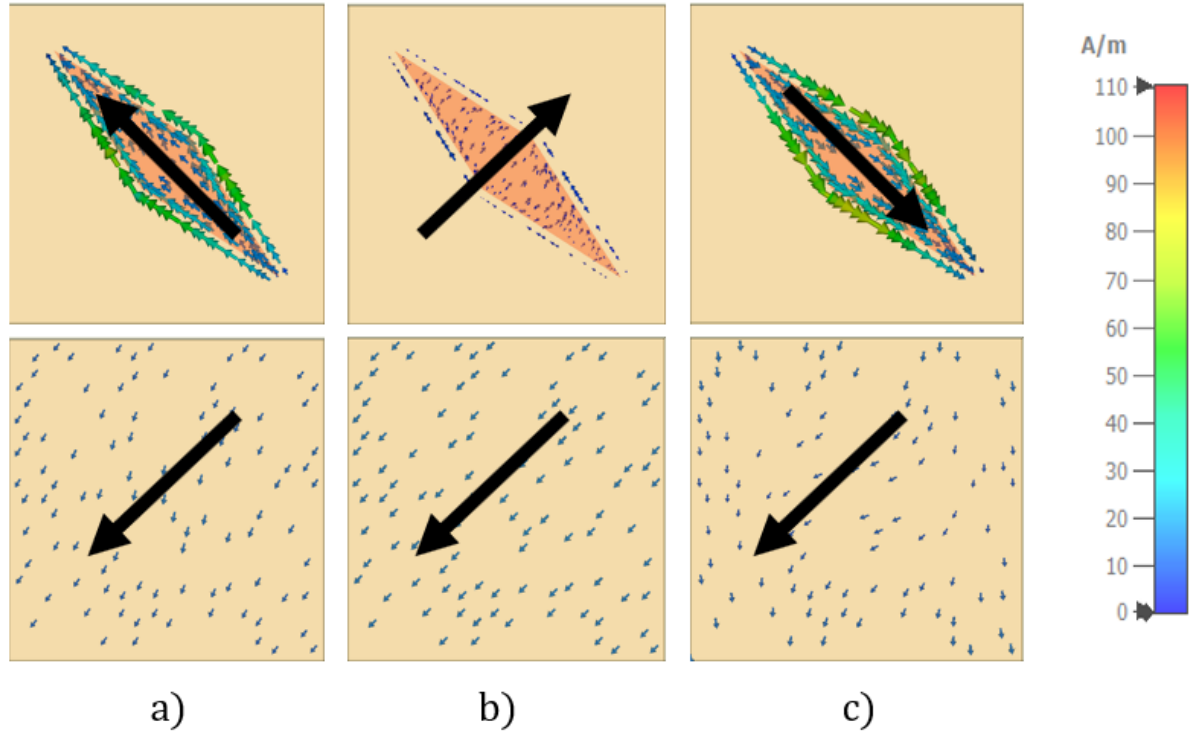
aralığında frekansa bağlı değişimini incelemektedir. Eş-polarizasyon yansıma katsayısının daha düşük olduğu parametreler daha dar bant genişlikleri üretirken, daha geniş bant genişlikleri sağlayan parametreler ise daha düşük PCR verimliliği sunmaktadır. Bu aralıkta çapraz-polarizasyon yansıma katsayısı büyük ölçüde sabit kalmaktadır. Hem bant genişliği hem de PCR verimliliği göz önünde bulundurulduğunda, $L = 9,5$ mm en uygun nokta olarak belirlenmiştir. Şekil 20(d), dielektrik tabaka kalınlığı olan d parametresinin 2,4–3,6 mm aralığında frekansa bağlı değişimini analiz etmektedir. Grafikler, $d = 3$ mm dielektrik tabaka kalınlığının bant genişliği açısından en uygun performansı sağladığını açıkça göstermektedir.



Şekil 21. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için u – v eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) φ_{uu} , φ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\varphi$ faz farkı.

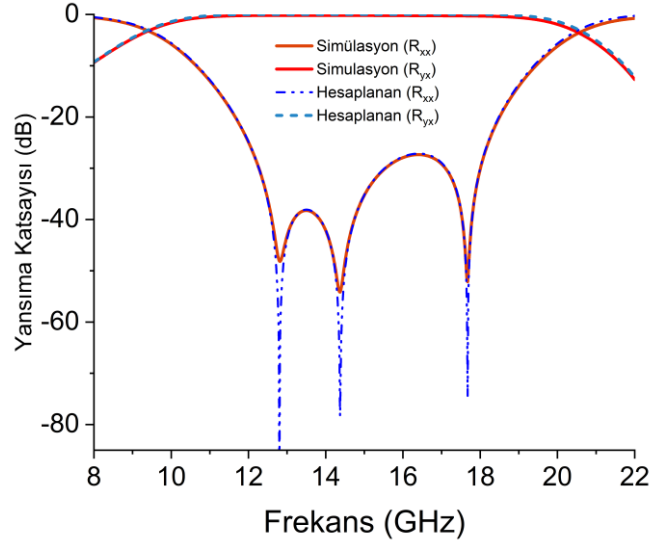
Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 21’de gösterildiği üzere yapı u – v koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 21’de tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; φ_{uu} , φ_{vv} ve $\Delta\varphi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 21(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1’e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 22(b)’de LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 11,55–18,47 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP–LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 17’te verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 12,81 GHz, 14,36 GHz ve 17,66 GHz’de rezonans frekanslarında, y -polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x -polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 21(b)’de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP–CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 18 (b)’de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 21 (b)’deki faz farkı grafiğinde, 9,23–9,50 GHz ve 20,42–

20,67 GHz bantlarında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu $\pm 90^\circ$ lik faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



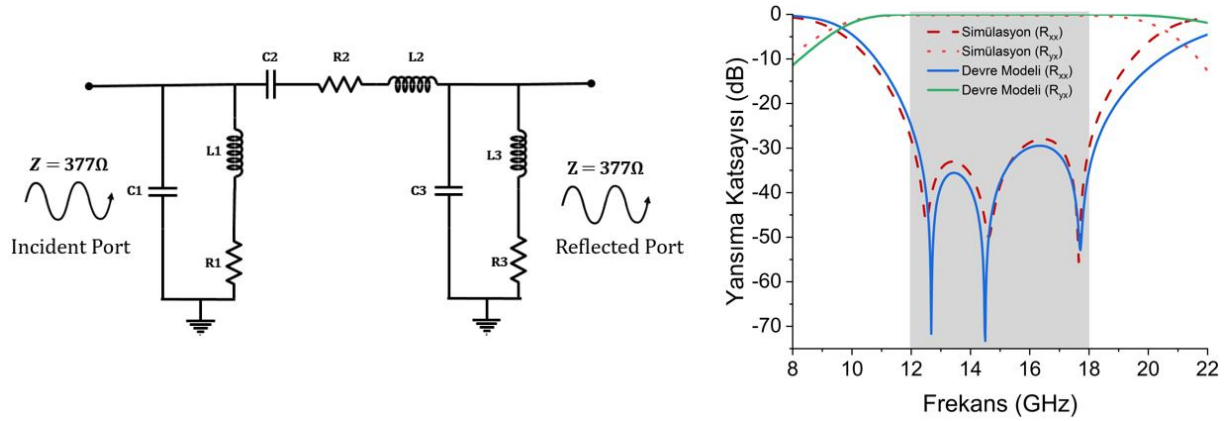
Şekil 22. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 12,81 GHz, (b) 14,36 GHz, (c) 17,66 GHz.

Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları üç farklı rezonans frekansında (12,81 GHz, 14,36 GHz ve 17,66 GHz) analiz edilmiştir. Şekil 22’de rezonatör ve alt metal katmandaki yüzey akım dağılımları verilmiştir. Üstte rezonatöre, altta ise alt metal katmana ait akım dağılımları gösterilmekte olup, her rezonans frekansında yüzey akımının yönü belirtilmiştir Şekil 22(a)’da rezonatör ve alt metal katmandaki yüzey akımlarının paralel yönelimi nedeniyle elektriksel rezonans oluşmuştur. Buna karşılık, Şekil 22(b) ve (c)’de her iki katmandaki yüzey akımlarının paralel olmaması manyetik rezonansın oluşumuna neden olmuştur.



Şekil 23. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları.

Şekil 23’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u–v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

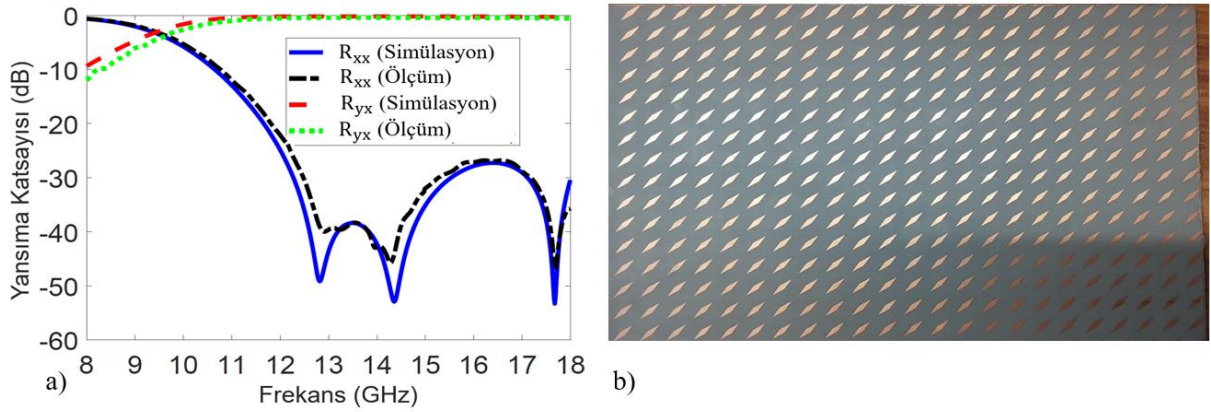


Şekil 24. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.

Şekil 24’te, ADS programı kullanılarak elde edilen eşdeğer RLC devresi ile bu modele karşılık hesaplanan yansıma katsayıları ve simülasyon sonuçları birlikte sunulmuştur. Model, metayüzeyin elektromanyetik tepkisini temsil eden üç direnç ($R1-R3$), üç indüktör ($L1-L3$) ve üç kapasitörden ($C1-C3$) oluşmaktadır. Devre elemanlarının değerleri, yansıma katsayısı verilerine dayanarak çıkarılmış ve simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

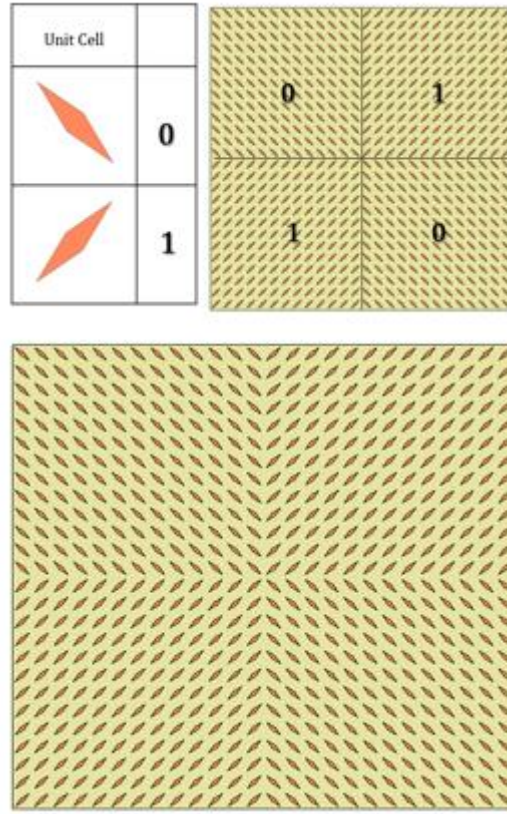
Tablo 1. Eşdeğer Devre RLC Parametreleri

Devre Elemanı	Değer
R1	29,5548
R2	mΩ
R3	1,43127
	mΩ
	88,4305
	mΩ
L1	3,2233 nH
L2	8,6178 nH
L3	3,2106 nH
C1	0,0358 pF
C2	0,0133 pF
C3	0,0360 pF

**Şekil 25.** Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 16 x 23 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey.

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü yapısının doğruluğu üretilerek deneysel olarak değerlendirilmiştir. Geleneksel fotolitografi temelli PCB üretim yöntemi kullanılarak, simülasyon sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, uygun boyutlarda bir numune üretilmiştir. Üretilen numune, 16 x 23 birim hücreden oluşmaktadır ve toplam boyutu 170 x 220 mm²'dir. Dielektrik tabaka 3 mm kalınlığında, bakır iletken katmanlar 35 µm kalınlığında ve her birim hücrenin kenar uzunluğu 9,5 mm'dir. Dielektrik tabaka, $\tan \delta = 0,01$ ve $\epsilon_r = 2,65$ olan bir F4-B malzemesidir. Ölçüm sonucunda elde edilen R_{xx} ve R_{yx} değerlerinin simülasyon ve ölçüm karşılaştırması Şekil 25(a)'da verilmiştir. Ölçülen R_{xx} ve R_{yx} tepkilerinin, simülasyon sonuçlarıyla uyum içinde olduğu ve önerilen dönüştürücünün eş polarize ve çapraz polarize yansıma özelliklerini doğruladığı görülmektedir. Simülasyonu gerçekleştirilen ve ölçülen R_{xx} ve R_{yx} arasında yalnızca küçük tutarsızlıklar bulunmaktadır ve bunlar çoğunlukla üretim toleranslarından ve antenlerin küçük hizalama hataları ve aralarındaki küçük açılı farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

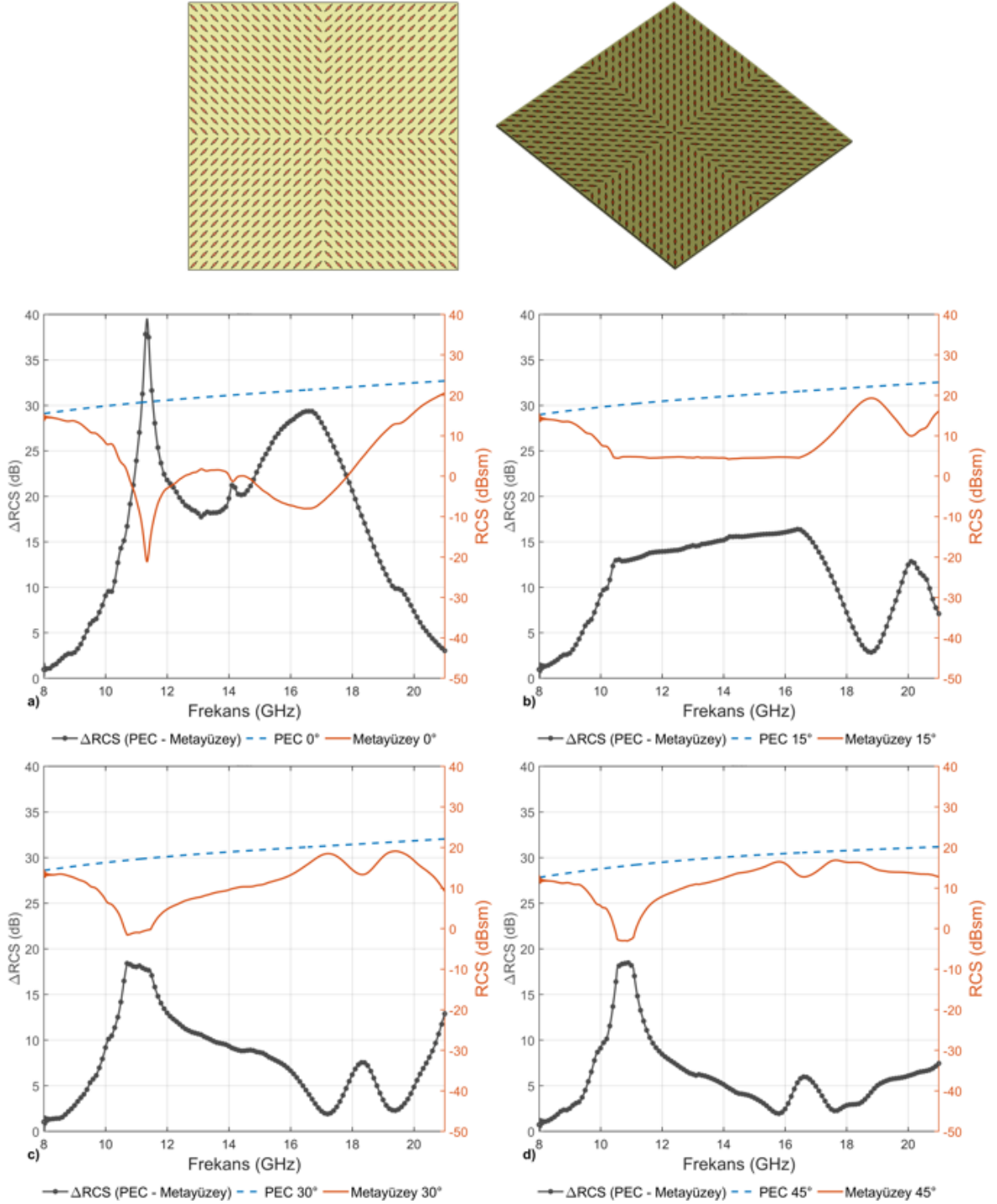


Şekil 26. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 26, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB değerinde azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant

genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah dairesel çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

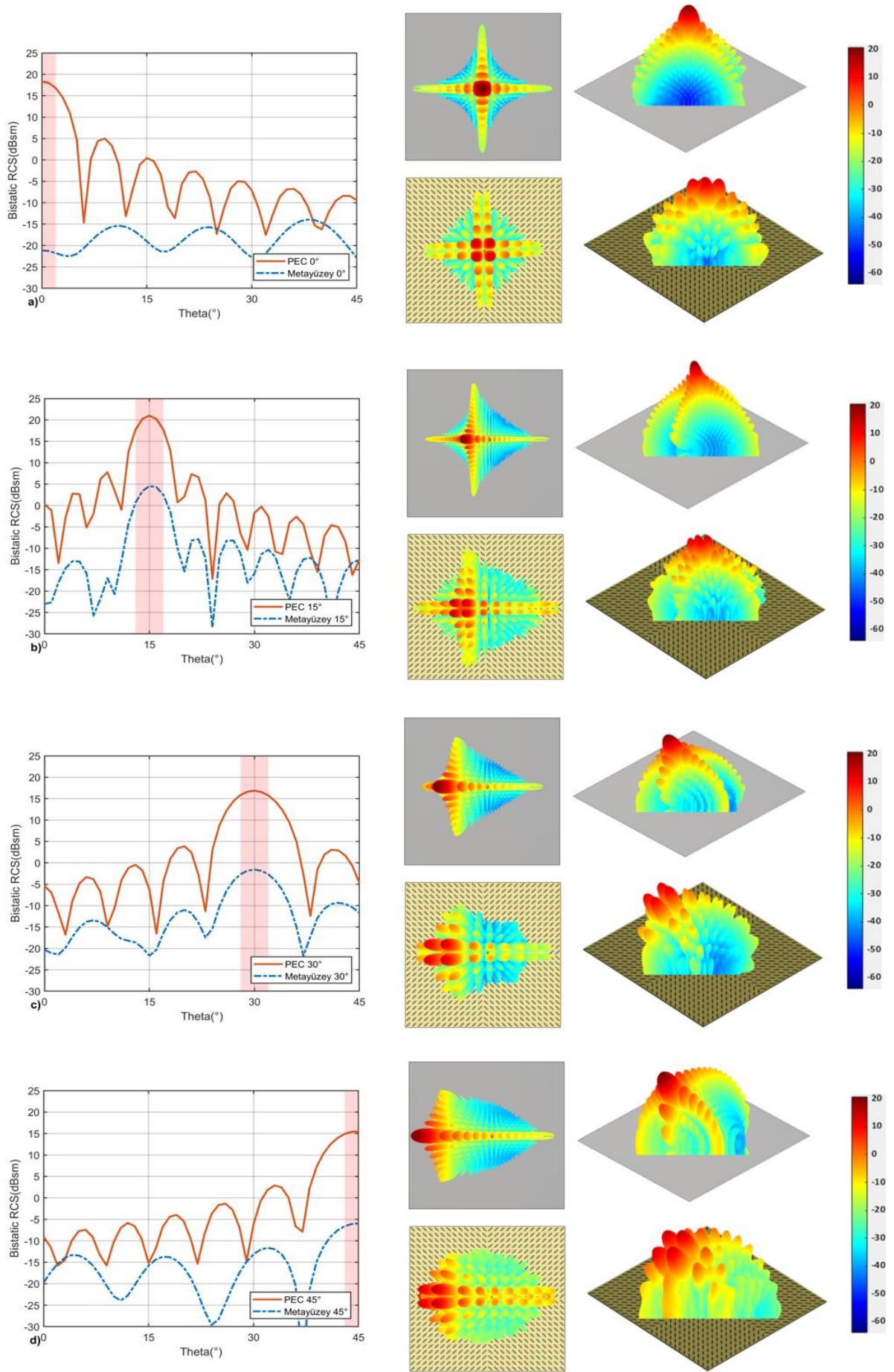
Düz Plaka



Şekil 27. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları.

Şekil 27, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 27(a)'da 0° geliş açısı için metayüzeyin en yüksek RCS azalması 11,35 GHz frekansında 39,5 dB olarak elde edilmiştir. Ayrıca, 10 dB eşikinde 10,26–19,33 GHz arasında 9,07 GHz, 5 dB eşikinde 9,38–20,44 GHz arasında 11,06 GHz ve 3 dB eşikinde 9,04–21,01 GHz arasında

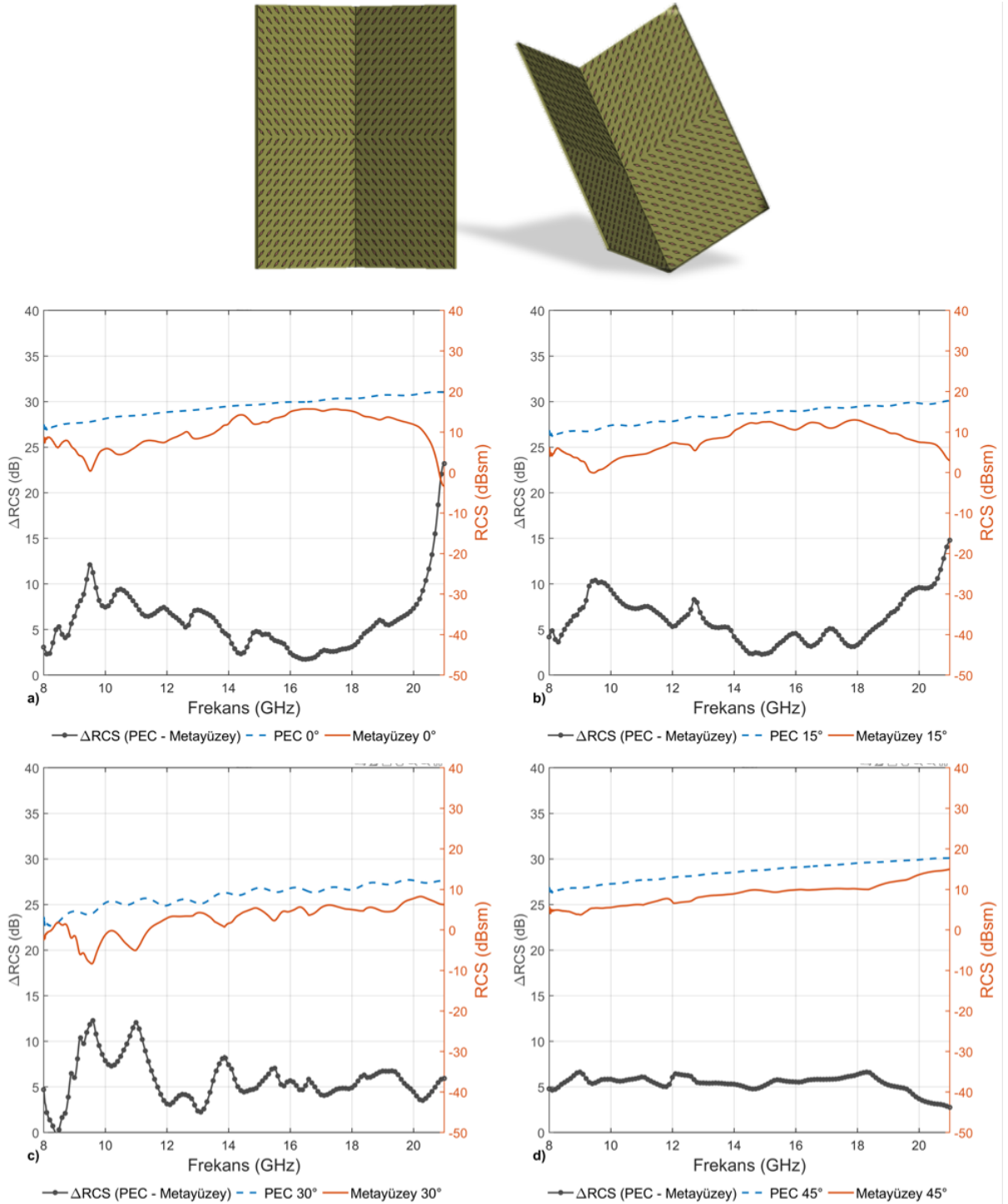
11,97 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 27(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 16,45 GHz frekansında 16,4 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,22–17,66 GHz (7,44 GHz) ve 19,75–20,69 GHz (0,940 GHz), 5 dB eşğinde 9,40–18,28 GHz (8,88 GHz) ve 19,22–21,39 GHz (2,17 GHz) ve 3 dB eşğinde 9,07–18,67 GHz (9,60 GHz) ve 18,90–21,81 GHz (2,91 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 27(c)'de 30° geliş açısı için en yüksek azalma 10,70 GHz frekansında 18,4 dB olarak gerçekleşmiştir, Bununla birlikte, 10 dB eşğinde 10,09–13,43 GHz (3,34 GHz) ve 20,74–21,68 GHz (0,94 GHz) 5 dB eşğinde 9,46–16,39 GHz (6,93 GHz), 17,84 – 18,79 GHz (0,95 GHz) ve 20,03–22,00 GHz (1,97 GHz) ve 3 dB eşğinde 9,04–16,80 GHz (7,76 GHz), 17,56 – 19,07 GHz (1,51 GHz) ve 19,69 – 22,00GHz (2,31 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 27(d)'de 45° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,87 GHz frekansında 18,6 dB değerine ulaşmıştır, Aynı açı için 10 dB eşğinde 10,19–11,64 GHz arasında 1,45 GHz, 5 dB eşğinde 9,56–14,06 GHz (4,50 GHz), 16,35 – 16,98 GHz (0,630 GHz) 19,00 – 22,00 GHz (3,00 GHz) ve 3 dB eşğinde 9,15–15,33 GHz (6,18 GHz), 16,10 – 17,36 GHz (1,26 GHz) 18,36 – 22,00 GHz (3,64 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 28. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 11,35 GHz, (b) 16,45 GHz, (c) 10,70 GHz ve (d) 10,87 GHz

Şekil 28, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 28(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 11,35 GHz frekansında PEC yüzeyi için RCS değeri 18,36 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -21,1 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 39,46 dB değerinde bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 28(b)'de $\theta = 15^\circ$ için 16,45 GHz'deki PEC yüzeyi için RCS değeri 20,99 dBsm ve metayüzey için RCS değeri 4,54 dBsm olup, Bu geliş açısı için 16,44 dB değerinde bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 28(c)'de $\theta = 30^\circ$ için 10,7 GHz frekansında PEC yüzeyi için RCS değeri 16,84 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -1,57dBsm olup, Bu geliş açısı için 18,41 dB değerinde bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 28(d)'de $\theta = 45^\circ$ için 10,87 GHz frekansında PEC yüzeyi için RCS değeri 15,5 dBsm, metayüzey için ise -5,94 dBsm olup, Bu geliş açısı için 21,45 dB değerinde bistatik RCS azalması sağlanmıştır.

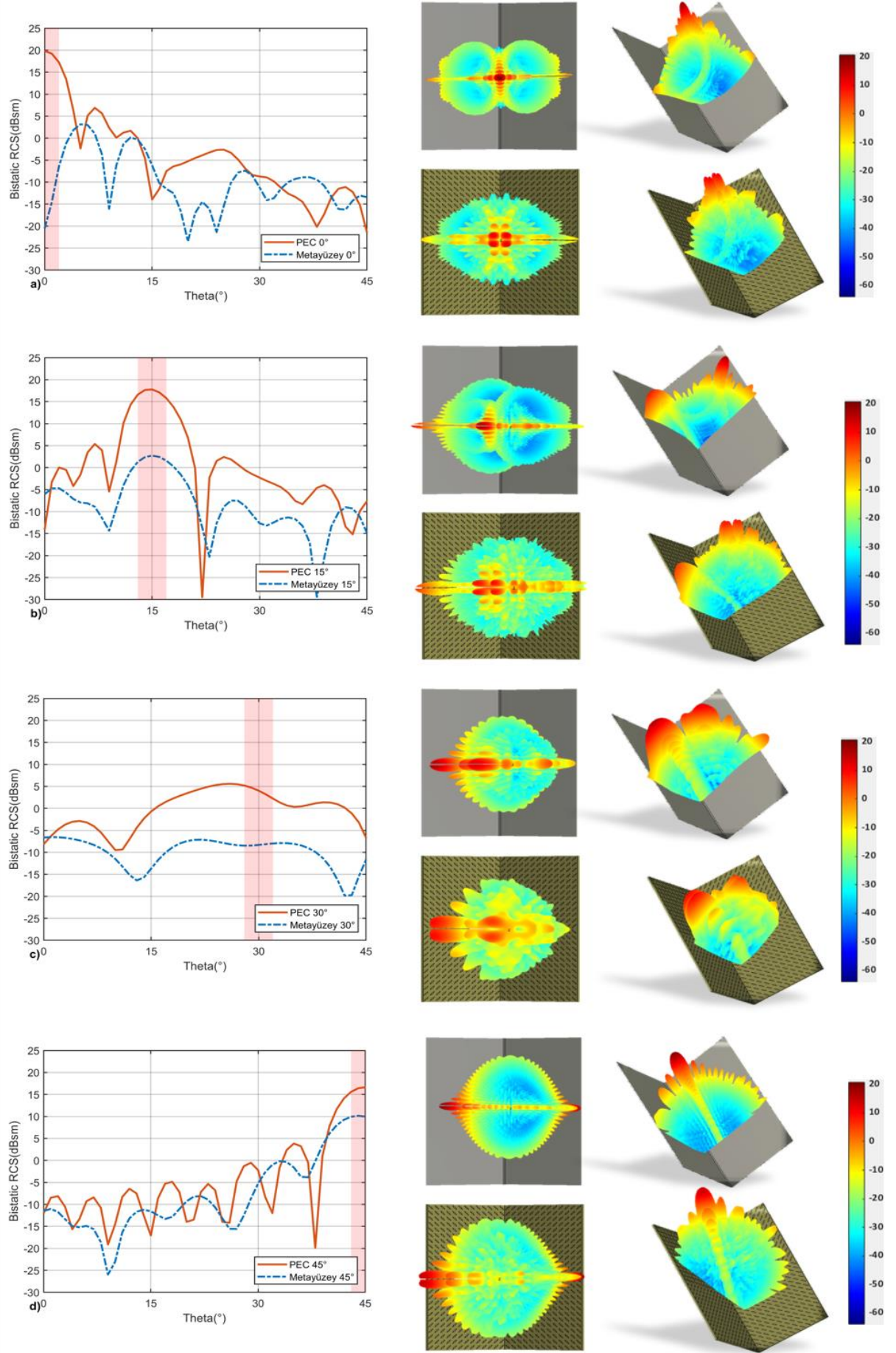
Dihedral Plaka



Şekil 29. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 29, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 29 (a) 'da $\theta = 0^\circ$ geliş açısı için, maksimum RCS azalması 21,53 GHz'de 40,36 dB olarak elde edildi. Bu geliş açısı için, 10 dB eşliğinde, 9,38-9,67 GHz aralığında 0,29 GHz ve 20,37-21,99 GHz aralığında 1,62 GHz bant genişlikleri gözlemlendi. 5 dB eşliğinde ise

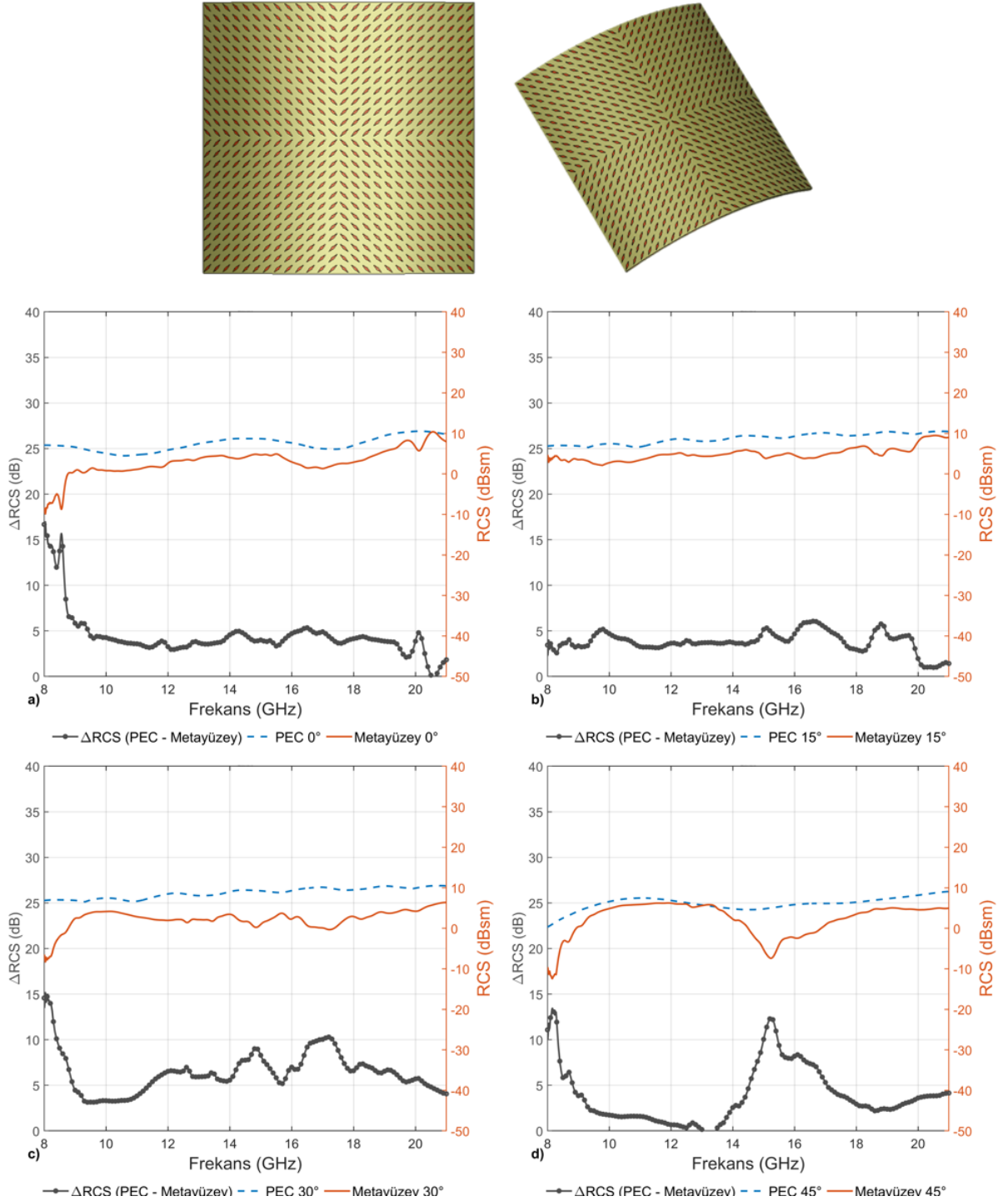
8,41-8,53 GHz (0,12 GHz), 8,86-13,77 GHz (4,91 GHz) ve 18,59-21,99 GHz (3,40 GHz) bantları elde edildi. 3 dB eşiğinde, 8,27–14,17 GHz (5,90 GHz), 14,60–15,89 GHz (1,29 GHz) ve 17,93–22,00 GHz (4,07 GHz) bant genişliklerine ulaşılmıştır. Şekil 29 (b)'de $\theta = 15^\circ$ geliş açısı için, en yüksek azalma 21,09 GHz'de 15,04 dB değerinde gözlenmiştir. 10 dB eşiğinde ise 9,34–9,83 GHz (0,49 GHz) ve 20,50–21,62 GHz (1,12 GHz) bantlarına ulaşılmıştır. 5 dB eşiğinde, bant genişlikleri 8,50–13,88 GHz (5,38 GHz) ve 18,50–22,00 GHz (3,50 GHz) aralıklarında hesaplanmıştır. 3 dB eşiğinde ise, bant genişlikleri 8,00–14,31 GHz (6,31 GHz) ve 15,33–22,00 GHz (6,67 GHz) aralıklarında hesaplanmıştır. Şekil 29 (c)'de $\theta = 30^\circ$ geliş açısı için en yüksek RCS azalması 9,58 GHz'de 12,34 dB olarak gerçekleşti. 10 dB eşiğinde 9,33–9,75 GHz (0,42 GHz) ve 10,74–11,21 GHz (0,47 GHz) bantları elde edildi. 5 dB eşiğinde 8,84–11,69 GHz (2,85 GHz), 13,45–14,30 GHz (0,87 GHz), 14,94–16,22 GHz (1,28 GHz), 16,48–16,79 GHz (0,31 GHz), 18,04–19,83 GHz (1,79 GHz) ve 20,71–21,48 GHz (0,77 GHz) bant genişlikleri sağlandı. 3 dB eşiğinde, 8,77–12,90 GHz (4,13 GHz) ve 13,26–21,89 GHz (8,63 GHz) aralıklarında daha geniş bant azalmaları gözlemlenmiştir. Şekil 29 (d)'de $\theta = 45^\circ$ geliş açısı için, maksimum azalma 18,36 GHz'de 6,65 dB olmuştur. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması gerçekleşmemiştir. 5 dB eşiğinde, 8,34–14,34 GHz (6,00 GHz) ve 14,90–19,29 GHz (4,39 GHz) bant genişliklerine ulaşılmıştır. 3 dB eşiğinde, 8,00-20,81 GHz aralığında 12,81 GHz değerinde bir bant elde edildi



Şekil 30. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 21,53 GHz, (b) 21,09 GHz, (c) 9,58 GHz ve (d) 18,36 GHz

Şekil 30, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 30(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 21,53 GHz'deki bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 19,83 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -20,53 dBsm olup, aralarında 40,36 dB değerinde bistatik RCS azalması saptanmıştır. Şekil 30(b)'de 21,09 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri $\theta = 15^\circ$ için sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 17,77 dBsm ve metayüzey için RCS değeri 2,74 dBsm olup, bu açı için 15,03 dB değerinde bistatik RCS azalması bulunmaktadır. Şekil 30(c)'de 9,58 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri $\theta = 30^\circ$ için sunulmuştur. PEC yüzeyi için RCS değeri 4,03 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -8,31 dBsm olup, 12,34 dB değerinde bistatik RCS azalması gözlenmiştir. Şekil 30(d)'de 18,36 GHz frekansındaki $\theta = 45^\circ$ 'deki bistatik RCS değerlerini sunmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 16,63 dBsm ve metayüzey için RCS değeri 9,96 dBsm olup, 6,67 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir.

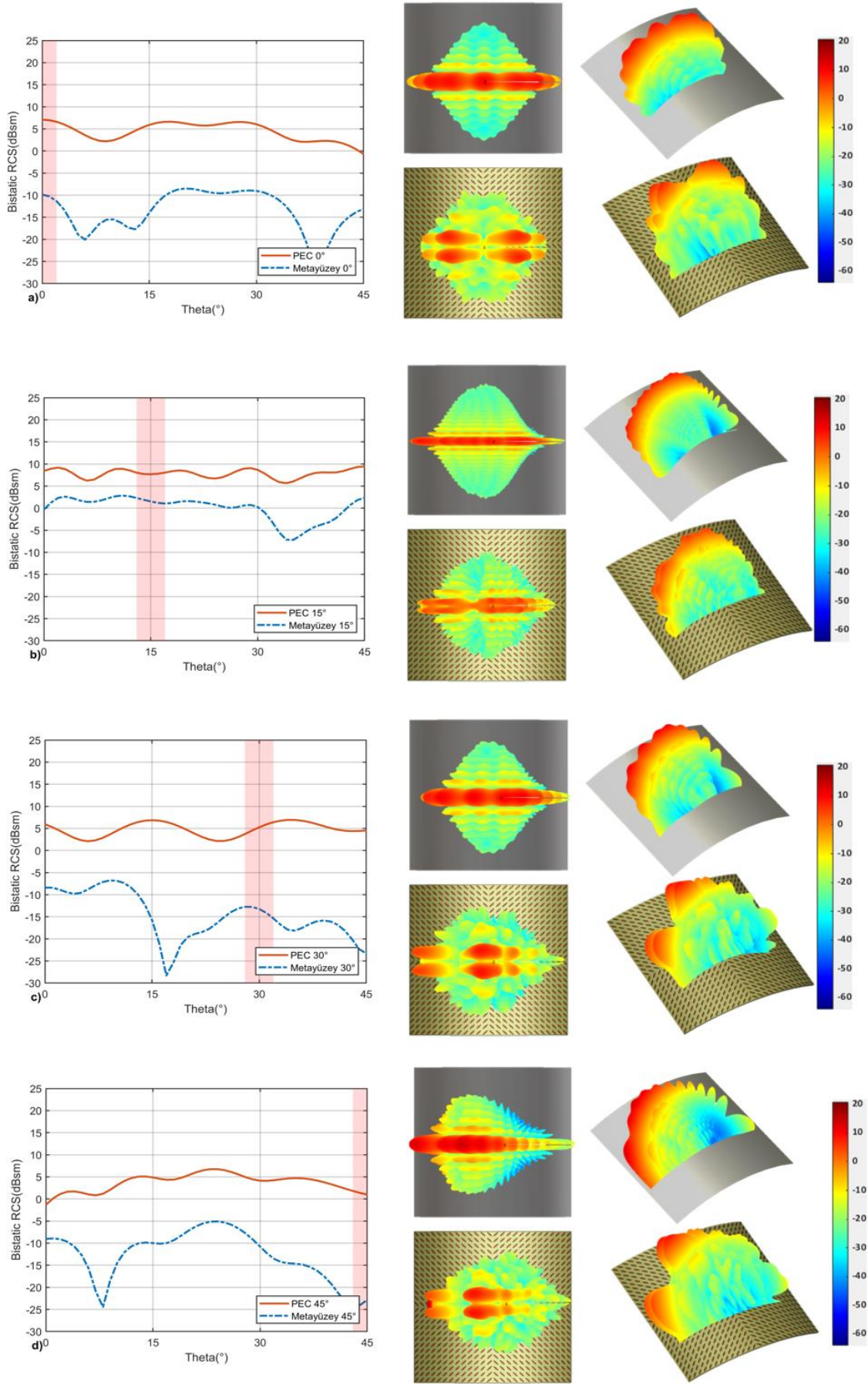
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 31. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 31, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 31(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 8,04 GHz frekansında 16,96 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşikinde 8,00–8,66 GHz aralığında 0,66 GHz bant genişliği gözlenmiştir. 5 dB eşikinde 8,00–9,42 GHz (1,42 GHz)

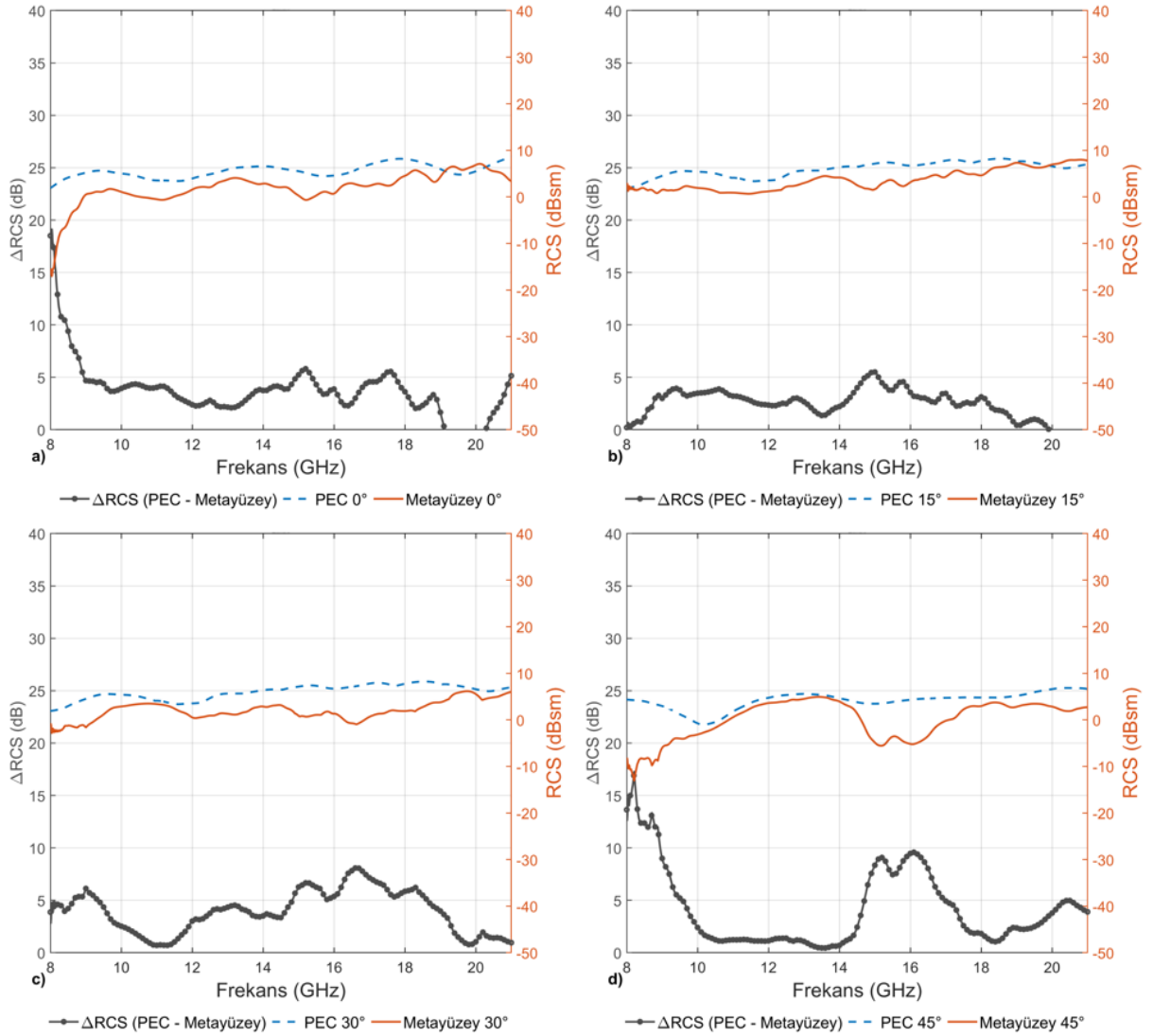
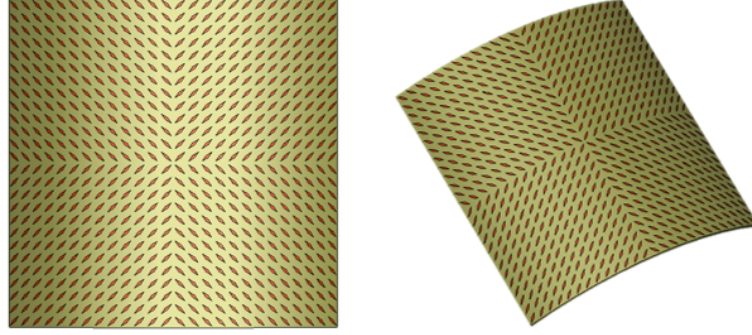
ve 16,26–16,64 GHz (0,38 GHz) bantları oluşmuştur. 3 dB eşiğinde ise 8,00–12,08 GHz (4,08 GHz), 12,26–19,50 GHz (7,24 GHz), 19,93–20,27 GHz (0,34 GHz) ve 21,84–22,00 GHz (0,16 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 31(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 16,64 GHz frekansında 6,07 dB olarak gözlenmiştir bunun bir sonucu olarak 10 dB eşik değerinde monostatik RCS azalması gerçekleşmemiştir. 5 dB eşiğinde 9,68–9,86 GHz (0,18 GHz), 14,98–15,2 GHz (0,22 GHz), 16,07–17,14 GHz (1,07 GHz) ve 18,60–18,94 GHz (0,34 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 8,36–17,94 GHz (9,58 GHz) ve 18,34–19,90 GHz (1,56 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 31(c)'de 30° geliş açısı için maksimum azalma 8,04 GHz frekansında 15,16 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 8,00–8,40 GHz (0,40 GHz) ve 16,91–17,31 GHz (0,40 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB eşiğinde 8,00–8,93 GHz (0,93 GHz) ve 11,40–20,39 GHz (8,99 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşiğinde ise 8,00–22,00 GHz aralığında 14,00 GHz değerinde oldukça geniş bir bant elde edilmiştir. Şekil 31(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 8,16 GHz frekansında 13,45 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 8,00–8,33 GHz (0,33 GHz) ve 15,00–15,45 GHz (0,45 GHz) bantları oluşmuştur. 5 dB eşiğinde 8,00–8,82 GHz (0,82 GHz) ve 14,54–17,05 GHz (2,51 GHz) aralıklarında bant genişlikleri elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 8,00–9,24 GHz (1,24 GHz), 14,29–17,97 GHz (3,68 GHz) ve 19,56–22,00 GHz (2,44 GHz) bantları hesaplanmıştır.



Şekil 32. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,04 GHz, (b) 16,64 GHz, (c) 8,04 GHz ve (d) 8,16 GHz

Şekil 32, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 32(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 8,04 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 7,08 dBsm, metayüzey için RCS değeri -9,88 dBsm olup bistatik RCS azalma değeri 16,96 dB'dir. Şekil 32(b)'de $\theta = 15^\circ$ için 16,64 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 7,67 dBsm, metayüzey için RCS değeri 1,52 dBsm olup bistatik RCS azalma değeri 6,15 dB'dir. Şekil 32(c)'de $\theta = 30^\circ$ için 8,04 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 5,26 dBsm, metayüzey için -13,23 dBsm olup bistatik RCS azalma değeri 18,49 dB'dir. Şekil 32(d)'de $\theta = 45^\circ$ için 8,16 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 1,01 dBsm, metayüzey için -22,83 dBsm olup bistatik RCS azalma değeri 23,84 dB'dir.

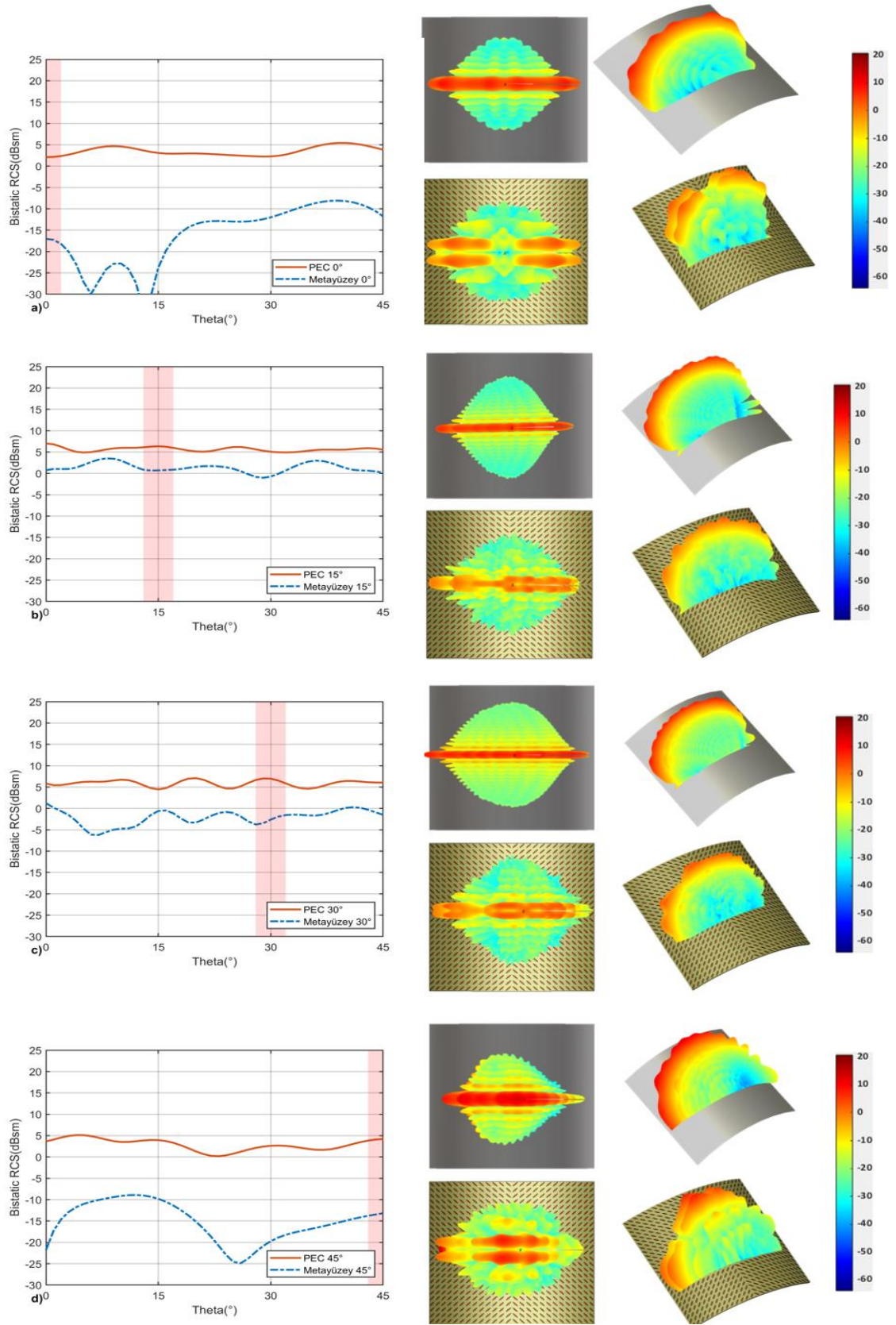
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 33. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 33, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 33(a)'da $\theta = 0^\circ$ geliş açısı için, 8,04 GHz frekansında maksimum RCS azalması 19,13 dB olarak elde edildi. Bu geliş açısı için, 10 dB eşik değerinde,

8,00-8,45 GHz aralığında 0,45 GHz bant genişliği gözlemlendi. 5 dB eşik değerinde ise 8,00-8,94 GHz (0,94 GHz), 14,94-15,37 GHz (0,43 GHz), 17,37-17,73 GHz (0,36 GHz) ve 20,99-21,35 GHz (0,36 GHz) bantları hesaplanmıştır. 3 dB eşik değerinde, 8,00–11,63 GHz (3,63 GHz), 13,57–16,14 GHz (2,57 GHz), 16,60–18,11 GHz (1,51 GHz) ve 20,76–22,00 GHz (1,24 GHz) bant genişliklerine ulaşılmıştır. Şekil 33(b)'de $\theta = 15^\circ$ geliş açısı için, maksimum azalma 5,59 dB değeriyle 14,95 GHz'de gözlemlenmiştir, bu bağlamda değerlendirildiğinde belirlenen 10 dB eşik değeri için monostatik RCS azalması sağlanmamıştır. 5 dB eşik değerinde, 14,72–15,10 GHz frekans aralığında 0,38 GHz bant genişliği gözlemlendi. 3 dB eşik değerinde, 9,01–11,30 GHz (2,29 GHz), 14,28–16,42 GHz (2,14 GHz), 16,82–17,11 GHz (0,29 GHz), 17,94–18,08 GHz (0,14 GHz) ve 21,65–22,00 GHz (0,35 GHz) bant genişlikleri elde edildi. Şekil 33(c)'de $\theta = 30^\circ$ geliş açısı için, maksimum RCS azalması 16,64 GHz'de 8,19 dB oldu. Bu nedenle bu 10 dB eşik değeri için monostatik RCS azalması gözlenmemiştir. 5 dB eşik değerinde, 8,66–9,34 GHz (0,68 GHz) ve 14,83–18,63 GHz (3,80 GHz) aralıklarında bant genişlikleri elde edildi. 3 dB eşik değerinde, bant genişlikleri 8,02–9,75 GHz (1,73 GHz) ve 12,00–19,25 GHz (7,25 GHz) olarak hesaplandı. Şekil 33(d)'de $\theta = 45^\circ$ geliş açısı için, maksimum azalma 8,21 GHz'de 17,27 dB oldu. 10 dB eşik değerinde, 8,00-8,94 GHz aralığında 0,94 GHz bant genişliği elde edildi. 5 dB eşik değerinde, 8,00-9,56 GHz (1,56 GHz) ve 14,71-16,97 GHz (2,26 GHz) bantları gözlemlendi. 3 dB eşik değerinde ise 8,00-9,89 GHz (1,89 GHz), 14,56-17,43 GHz (2,87 GHz) ve 19,75-21,32 GHz (1,57 GHz) bant genişlikleri elde edildi.



Şekil 34. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,04 GHz, (b) 14,95 GHz, (c) 16,64 GHz ve (d) 8,21 GHz

Şekil 34, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışınma

örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 34(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 8,04 GHz'de bistatik RCS değerleri sunulmaktadır. PEC yüzeyi için RCS değeri 2,09 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -17,04 dBsm olup, 19,13 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 34(b)'de 14,95 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri $\theta = 15^\circ$ için sunulmuştur. PEC yüzeyi için RCS değeri 6,35 dBsm ve metayüzey için RCS değeri 0,70 dBsm olup, 5,64 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 34(c)'de 16,64 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri $\theta = 30^\circ$ için sunulmuştur. PEC yüzeyi için RCS değeri 6,98 dBsm ve metayüzey için RCS değeri -2,62 dBsm olup, 9,59 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 34(d)'de 8,21 GHz frekansındaki bistatik RCS değerleri $\theta = 45^\circ$ için sunulmuştur. PEC yüzeyi için RCS değeri 4,21 dBsm, metayüzey için ise -13,19 dBsm olup, aralarında 17,40 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir.

Karşılaştırma

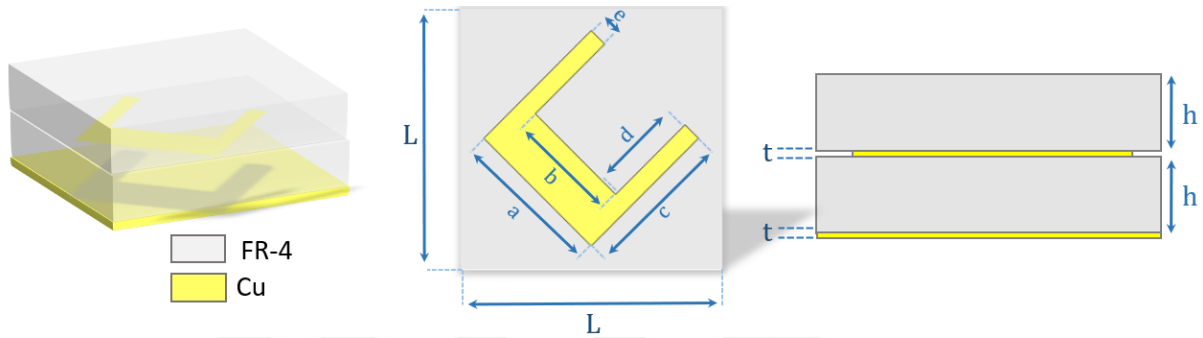
Tablo 2. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X, Ku ve K Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Açı	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Khan et al., 2025)	12,16–12,81 (LP–LP) 15,28–15,66 (LP–LP) 17,94–18,73 (LP–LP) 10,90–11,90 (LP–CP) 15,84–17,63 (LP–CP) 13,12–15,08 (LP–CP) 19,11–21,00 (LP–CP)	45°	1,52 (0,055 λ) RO3003	90%	Pol.Dön.
(Ozturk & Corapsiz, 2022b)	12,05–17,9 (LP–LP) 11,30–11,50 (LP–CP)	45°	1,2 (0,045 λ) FR–4	90%	Pol.Dön.
(Alahmed Albasry et al., 2025)	8,2–12 (LP–LP) 13,85–18 (LP–CP)	40°	1,5 (0,041 λ) FR–4	90%	Pol.Dön. /Monostatik RCS
(Kaya et al., 2025b)	6,41–6,77 (LP–LP) 10,68–12,16 (LP–LP) 18,09–19,04 (LP–LP) 7,37–9,41 (LP–CP) 13,79–16,77 (LP–CP)	40°	1,6 (0,034 λ) FR–4	90%	Pol.Dön. /Monostatik RCS
(Corapsiz, 2023)	8,32–17,55 (LP–LP) 7,42–7,68 (LP–LP)	45°	2,5 (0,061 λ) FR–4	90%	Pol.Dön.
(Ren et al., 2025)	7,1–22,3 (LP–LP)	15°	3,5 (0,082 λ) F4–B	90%	Pol.Dön. /Monostatik RCS
(Abdullah et al., 2025)	7,52–12 (LP–LP) 15,4–20,16 (LP–LP) 12–15,4 (LP–CP)	45°	2,0 (0,05 λ) F4–B	98%	Pol.Dön.
Önerilen Çalışma	11,55–18,47 (LP–LP) 9,23–9,50 (LP–CP) 20,42–20,67 (LP–CP)	40°	3,0 (0,09 λ) F4–B	99%	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, 0°,15°,30°,45° açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilerde

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, X, Ku ve K bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma, Tablo 2'te şu faktörlere göre özetlenmiştir: Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, geliş açısı, dielektrik tabaka kalınlığı ve dielektrik tabaka malzemesi, verimlilik ile Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı. Bu çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen çalışma, %99'luk yüksek bir PCR oranıyla 11,55-18,47 GHz aralığında LP-LP dönüşümü ve 9,23-9,50 GHz ve 20,42-20,67 GHz aralıklarında LP-CP dönüşümü sağlamakta ve ayrıca monostatik ve bistatik RCS'nin azaltılmasını incelemiştir. Ek olarak, önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışma, farklı hedef geometrilerini (düz plaka, 90° açılı dihedral ve 200 mm ve 300 mm yarıçaplı silindirik) çeşitli geliş açıları (0°, 15°, 30°, 45°) altında değerlendirerek RCS analizini çoklu saçılma senaryolarına genişletmekte ve böylece metayüzeyin performansının daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamaktadır. Önerilen tasarım, (Khan et al., 2025), (Ozturk & Corapsiz, 2022b), (Alahmed Albasry et al., 2025) ve (Kaya et al., 2025b) çalışmalarından daha geniş bir LP-LP bant genişliği sunmaktadır. LP-CP bant genişliği açısından, (Ozturk & Corapsiz, 2022b) ve (Corapsiz, 2023)'de referans verilen çalışmalardan daha geniş bir aralığı kapsamaktadır. Tasarım ayrıca, yalnızca LP-LP dönüşümünü içeren (Ren et al., 2025)'e kıyasla çok işlevlilik göstermektedir; önerilen çalışma ise hem LP-LP hem de LP-CP dönüşümünü desteklemektedir. Geliş açısı açısından, önerilen yapı (Ren et al., 2025)'dekinden daha geniş bir açı aralığında değerlendirilmiştir. PCR değerleri açısından, karşılaştırılan tüm çalışmalardan daha yüksek bir orana ulaşmıştır. İşlevsellik açısından, yalnızca polarizasyon dönüşümüne odaklanan (Corapsiz, 2023; Khan et al., 2025; Ozturk & Corapsiz, 2022b) ve (Abdullah et al., 2025)'nin aksine, bu çalışma aynı zamanda RCS azaltmasında hedeflemektedir. (Alahmed Albasry et al., 2025), (Kaya et al., 2025b) ve (Ren et al., 2025), dönüşüm işlevselliğinin yanı sıra RCS azalmasında ele alsa da, yalnızca monostatik RCS'ye odaklanırken, sunulan tasarım hem monostatik hem de bistatik RCS azalma performansını incelemektedir. Genel olarak, daha önce bildirilen tüm çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen metayüzey, neredeyse %99'luk yüksek bir PCR'yi aynı anda elde etmesi ve birden fazla geometri ve geliş açısı boyunca sistematik bir RCS azalma analizi sağlamasıyla öne çıkmaktadır.

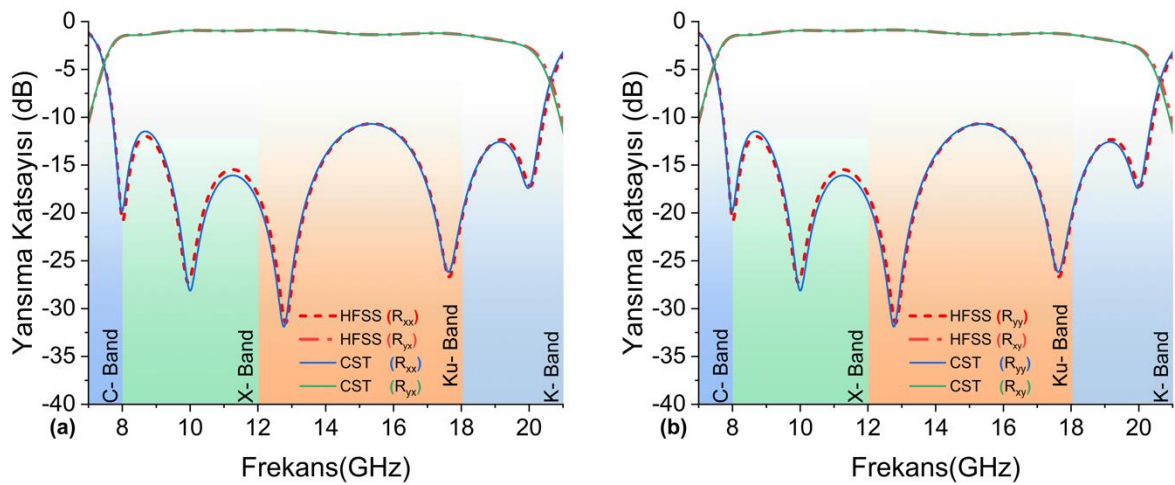
C-, X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Çok Katmanlı Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 35'te görülmektedir. Rezonatör hem de birim hücrenin arka yüzeyi, $t=35\mu\text{m}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Rezonatör üstünde ve rezonatör ile arka metalik yüzey arasında dielektrik tabaka olarak FR-4 malzemesi kullanılmıştır; bu malzemenin dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3(1-j0,025)$ 'dir.



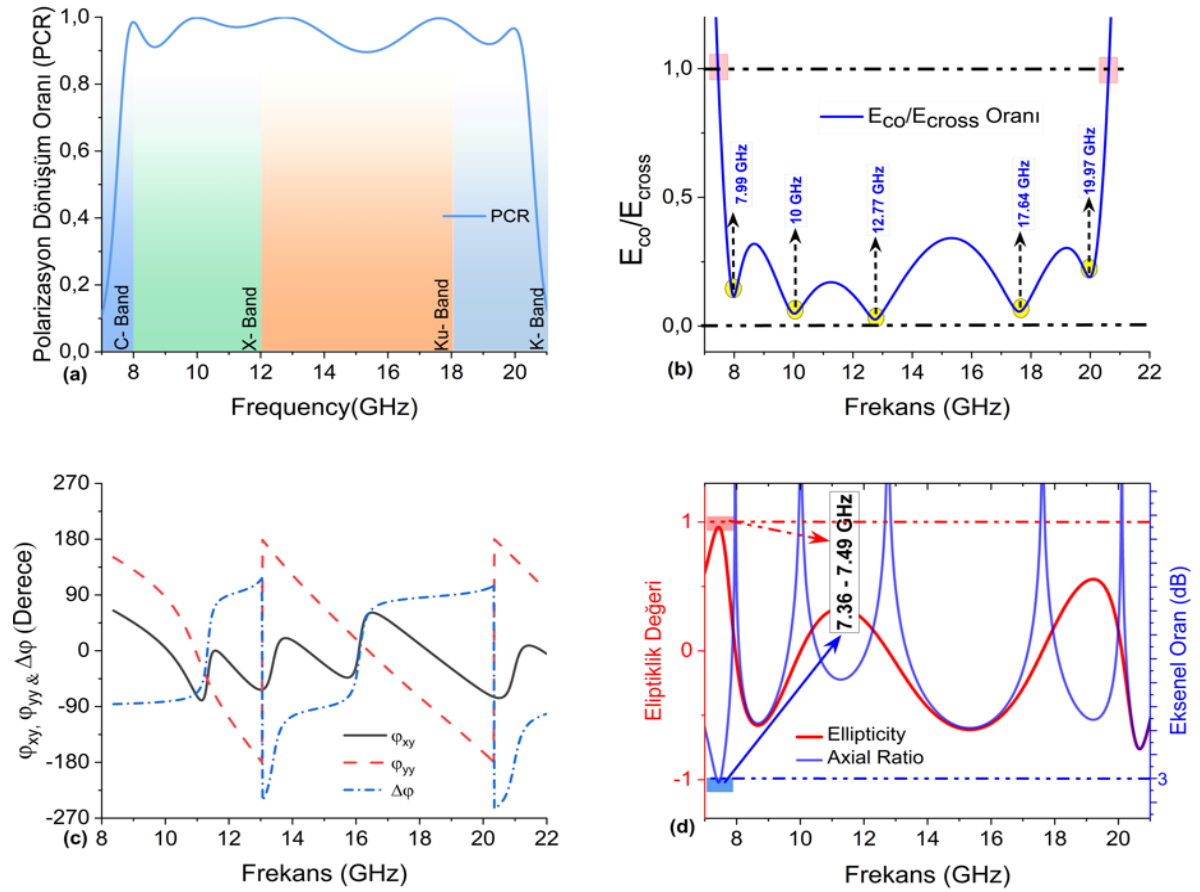
Şekil 35. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi

Maksimum bant genişliği ve yüksek PCR verimliliği elde edebilmek amacıyla birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 35'te gösterildiği üzere $L = 6,95$ mm, $a = c = 4$ mm, $b=3$ mm, $d = 2,59$ mm, $e = 0,5$ mm ve $h=1,6$ mm olarak belirlenmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi, elektromanyetik dalgaların ters yönde yansımaları sağlayarak yapının yansımada çalışmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 36. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansımaya katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.

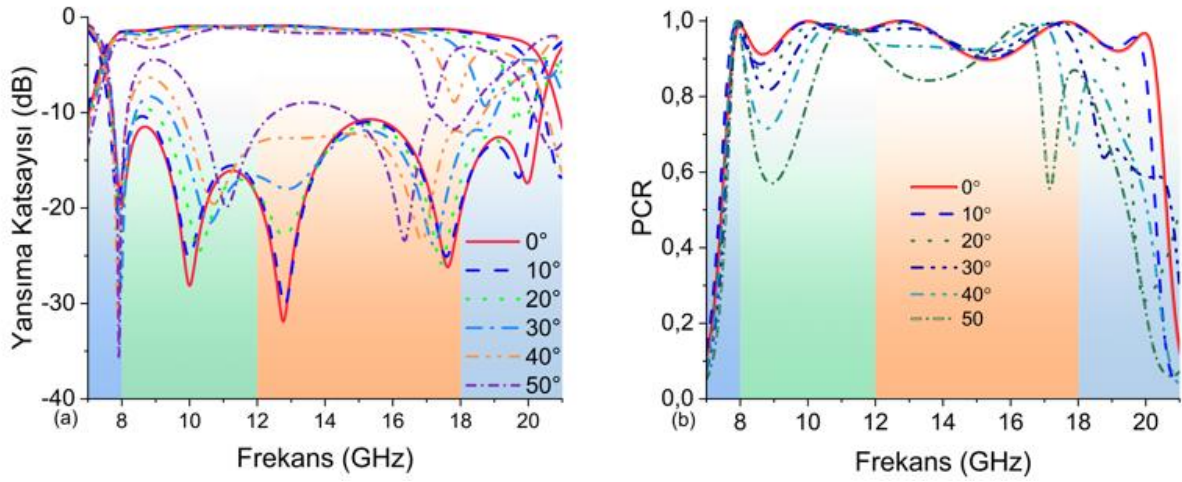
Şekil 36(a) ve 36(b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 36(a)'da normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansıma katsayısı R_{xx} , 7,74-20,26 GHz bant genişliği içinde maksimum -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansıma katsayısı R_{yx} , etkin bant içinde minimum -1,37 dB değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, x-polarize dalganın yansıma sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü göstermektedir. Ayrıca, 7,99 GHz, 10 GHz, 12,77 GHz, 17,64 GHz ve 19,97 GHz'de sırasıyla -20,21 dB, -28,12 dB, -31,84 dB, -27,56 dB ve -17,61 dB'lik yansıma katsayılarıyla beş rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 36(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Eş-polarize yansıma katsayısı R_{yy} , 7,74-20,26 GHz frekans bandında -10 dB'ye düşerken; çapraz-polarize katsayı R_{xy} , -1,37 dB 'ye ulaşmaktadır. Bu değerler, y'den x polarizasyonuna polarizasyon dönüşümünü doğrulamaktadır. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansıma değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu durum, söz konusu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını ve x ile y polarize edilmiş olarak gelen elektromanyetik dalgaların sırasıyla y ve x polarizasyonlu; aynı şekilde y ve x polarize edilmiş olarak gelen dalgaların ise sırasıyla x ve y polarizasyonlu olacak biçimde yansıtıldığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansıma katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir. Bu polarizasyon dönüştürücüye ait analizlerde, birim hücre yapısının daha açık bir şekilde görülebilmesi amacıyla, en üstte yer alan dielektrik tabaka görsel sunumlarda kaldırılarak gösterilmiştir.



Şekil 37. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri

Şekil 37(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 7,74-20,26 GHz frekans bandında %89'u aşmakta, X- ve Ku- bandını tamamen kapsamaktadır. Şekil 37(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 37'de gösterilen 7,99 GHz, 10 GHz, 12,77 GHz, 17,64 GHz ve 19,97 GHz rezonans frekanslarının, Şekil 37(b)'de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktalara karşılık geldiği görülmektedir. Bu noktalar ayrıca sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 37(a)'da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse %100'e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin

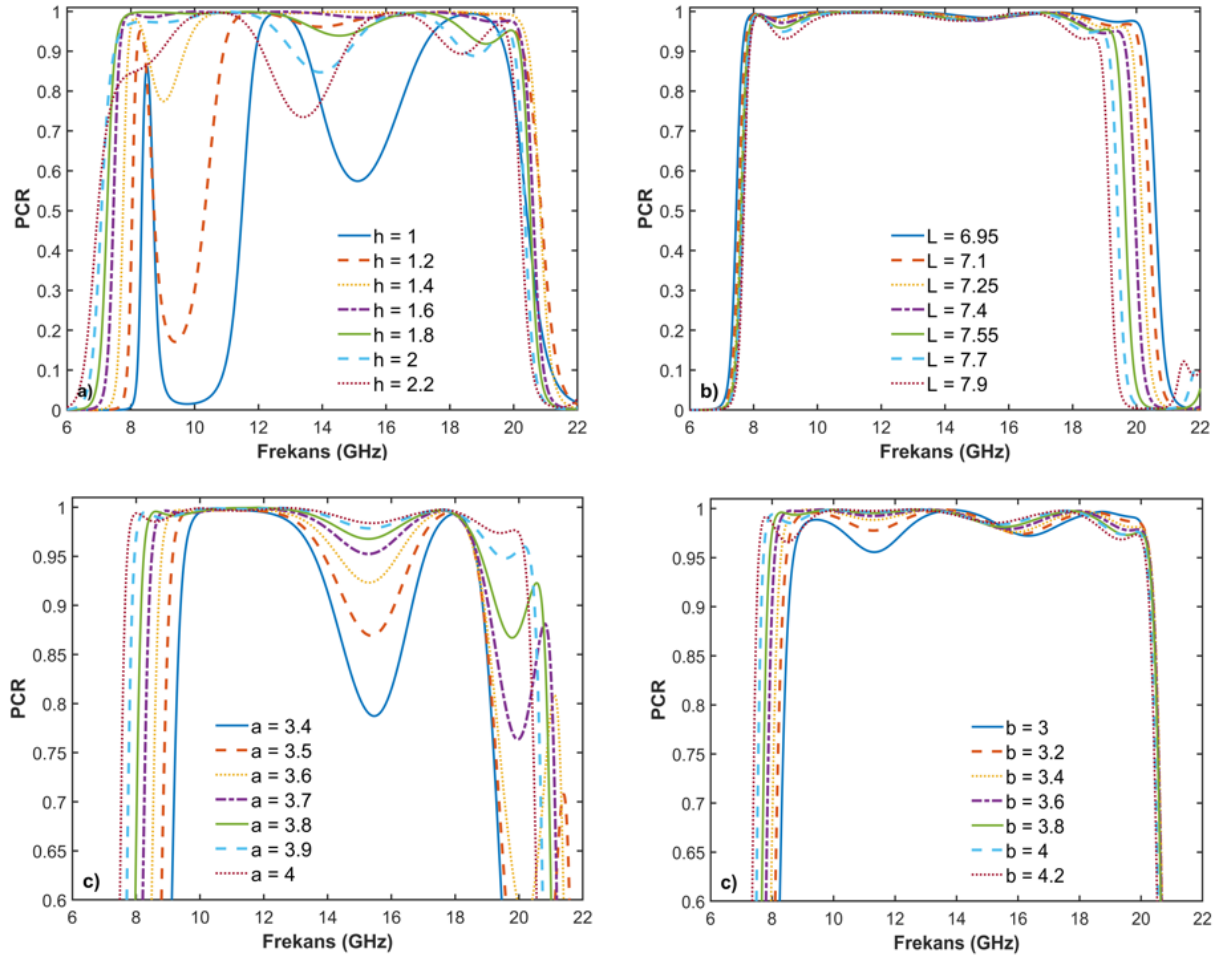
frekansa göre değişimi Şekil 37(d)'de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenini eliptikliği, sağ y eksenini ise aksel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri grafikte görüldüğü gibi, 7,36-7,49 GHz frekans bandında +1'e ulaşmaktadır; bu nedenle RHCP dönüşümü bu frekans bandında gerçekleşmektedir. Şekil 37(d)'de görüldüğü üzere, aksel oran değeri 7,36-7,49 GHz frekans bandında 3 dB'ye ulaşarak, bu bantlarda LP-CP dönüşümün gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, aksel oran eğrisinde gözlenen yükselme noktalarının sırasıyla 7,99 GHz, 10 GHz, 12,77 GHz, 17,64 GHz ve 19,97 GHz rezonans frekanslarıyla örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, söz konusu frekansların rezonans noktaları olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 37(b)'de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayılarının oranı hem de Şekil 36'da yer alan yansımaya katsayıları incelendiğinde, Şekil 37(c)'de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ 'nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansımaya katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



Şekil 38. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansımaya katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi

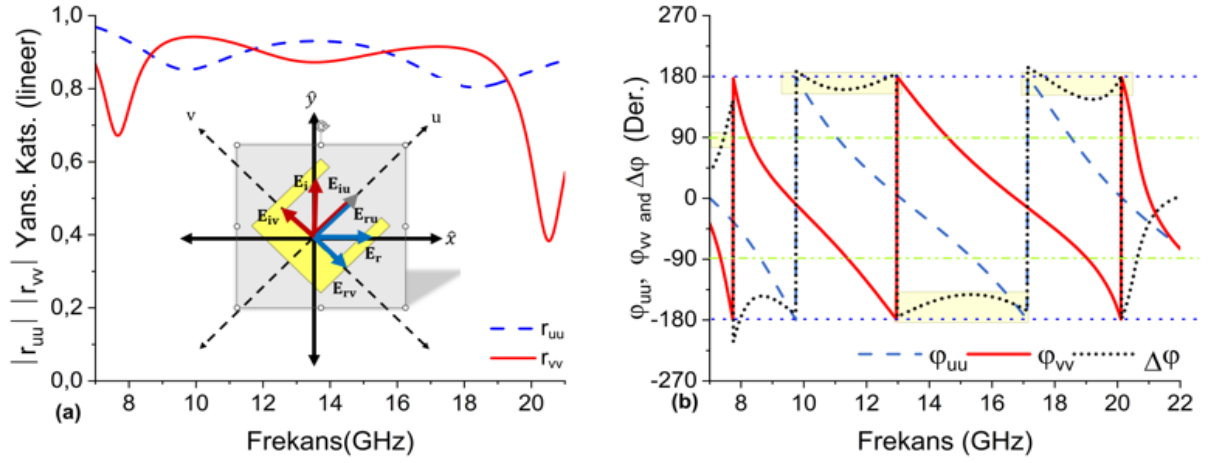
Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açılarındaki yansımaya katsayıları Şekil 38(a) ve Şekil 38(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 38 (a) ve Şekil 38(b)'de 0° ile 50° arasındaki yansımaya katsayıları ve PCR değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, polarizasyon dönüştürücünün 50° eğik geliş açısındaki PCR performansı değerlendirilmiş ve %70, %80 ve %90 eşik değerleri için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; PCR %90 için 7,78–8,10 GHz ($\Delta f = 0,32$ GHz), 10,39–12,21 GHz ($\Delta f = 1,83$ GHz), 15,09–16,77 GHz ($\Delta f = 1,68$ GHz) ve 21,94–22,00 GHz ($\Delta f = 0,06$ GHz) aralıklarında dönüşüm elde edilmiştir. PCR %80 eşliğinde bantlar 7,74–8,20 GHz ($\Delta f = 0,46$ GHz), 10,85–16,70 GHz ($\Delta f = 6,85$ GHz), 17,55–18,39 GHz ($\Delta f = 0,84$ GHz) ve 21,87–22,00 GHz ($\Delta f = 0,13$ GHz) olarak gözlemlenmiştir. PCR %70 seviyesinde ise bantlar daha da genişleyerek 7,68–8,35 GHz ($\Delta f = 0,67$ GHz), 9,72–16,98

GHz ($\Delta f = 7,27$ GHz), 17,40–18,79 GHz ($\Delta f = 1,39$ GHz) ve 21,83–22,00 GHz ($\Delta f = 0,17$ GHz) değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlardaki Δf ifadesi bant genişliklerini ifade etmektedir.



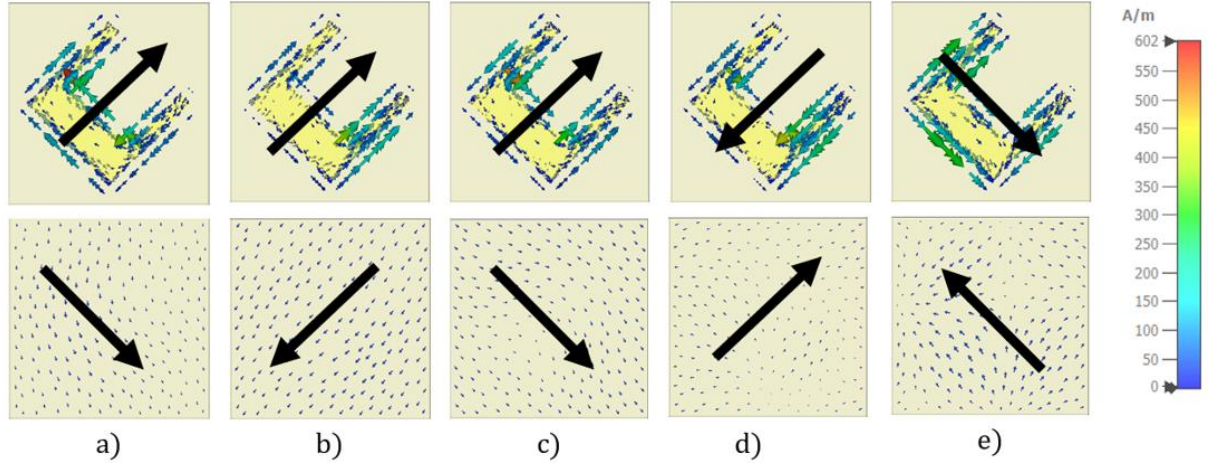
Şekil 39. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=1-2,2$ mm (b) $L=6,95-7,9$ mm (c) $a=3,4-4$ mm (d) $b=3-4,2$ mm

Şekil 39’da önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin PCR üzerindeki etkilerini göstermektedir Şekil 39’da gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; (a) ve (b) rezonatör ölçülerini, birim hücre genişliği (L) ve dielektrik tabakaların kalınlığıdır (h). Buradaki temel amaç, geniş bant genişliği ve yüksek PCR oranının birlikte sağlandığı maksimum verim koşulunun elde edilmesi hedeflenir. PCR değerinin maksimum düzeyde olabilmesi için, eş-polarizasyon yansıma katsayısının mümkün olduğunca düşük, çapraz-polarizasyon yansıma katsayısının ise olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. Bu koşullar sağlandığında, PCR en yüksek değerine ulaşır.



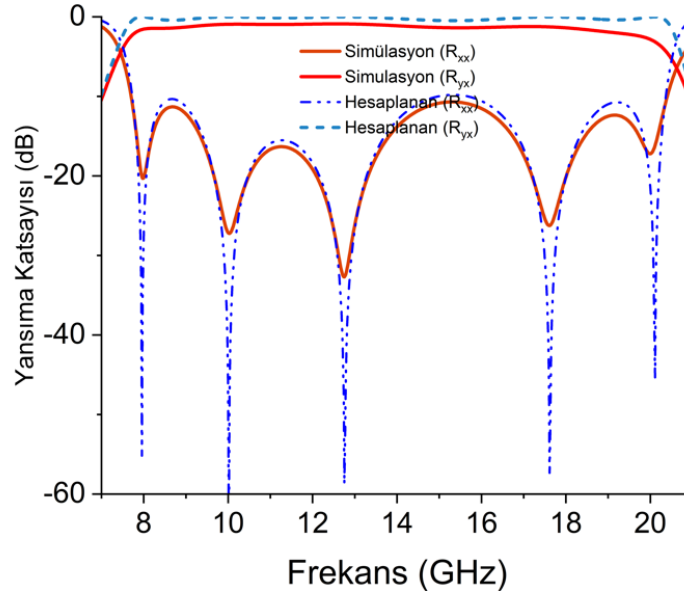
Şekil 40. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu}, r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu}, ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 40'da gösterildiği üzere yapı $u-v$ koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 40'da tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu}, ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 40(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 40(b)'de LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 7,74-20,26 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP-LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 36'da verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 7,99 GHz, 10 GHz, 12,77 GHz, 17,64 GHz ve 19,97 GHz rezonans frekanslarında, y-polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x-polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 40(b)'de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP-CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 37(b)'de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 40(b)'deki faz farkı grafiğinde, 7,36-7,49 GHz bantlarında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 41. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 7,99 GHz, (b) 10 GHz, (c) 12,77 GHz, (d) 17,64 GHz, (e) 19,97 GHz

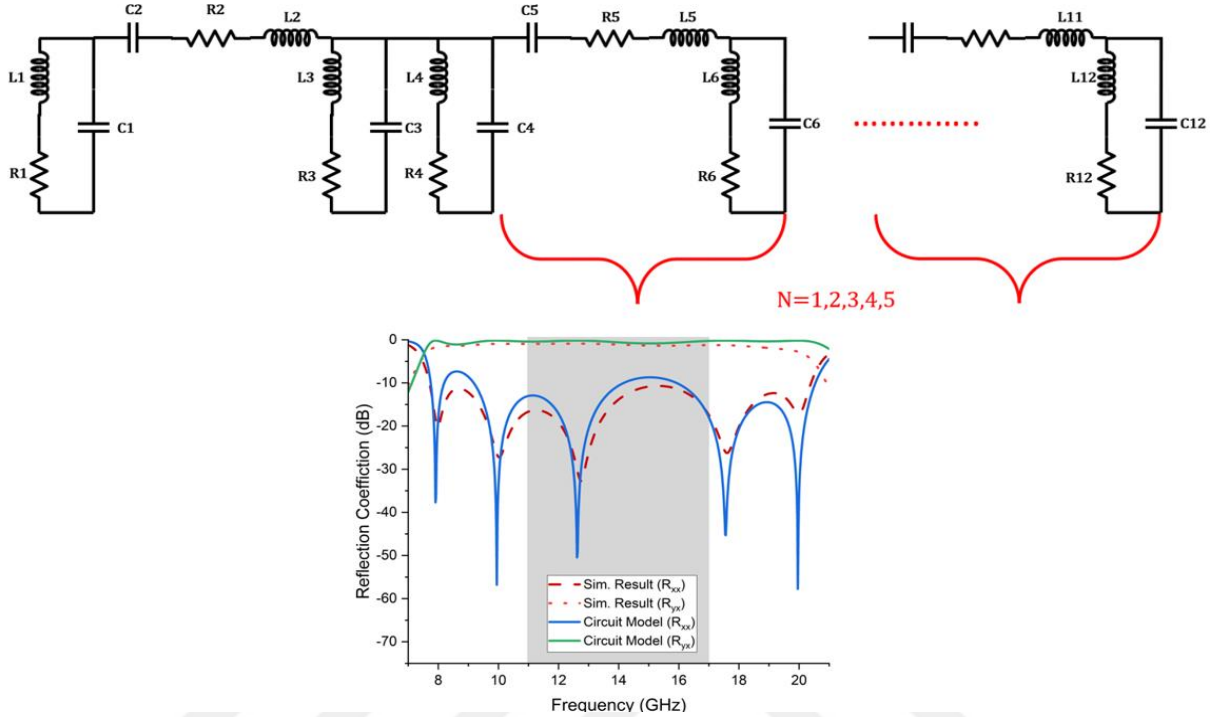
Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları beş farklı rezonans frekansında (7,99 GHz, 10 GHz, 12,77 GHz, 17,64 GHz ve 19,97 GHz) analiz edilmiştir. Rezonatör ve arka metal katmandaki akım dağılımları, Şekil 41’de her iki katman için birlikte sunulmuştur. Şekilde yer alan oklar, her bir rezonans frekansında yüzey akımlarının yönünü göstermektedir. Şekil 41(a) ve (c)’de yüzey akımlarının paralelliği nedeniyle elektriksek rezonans, Şekil 41(b), (d) ve (e)’de ise yüzey akımlarının paralel olmayan yönelimi nedeniyle manyetik rezonans oluşmuştur.



Şekil 42. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

Şekil 42’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u-v

eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

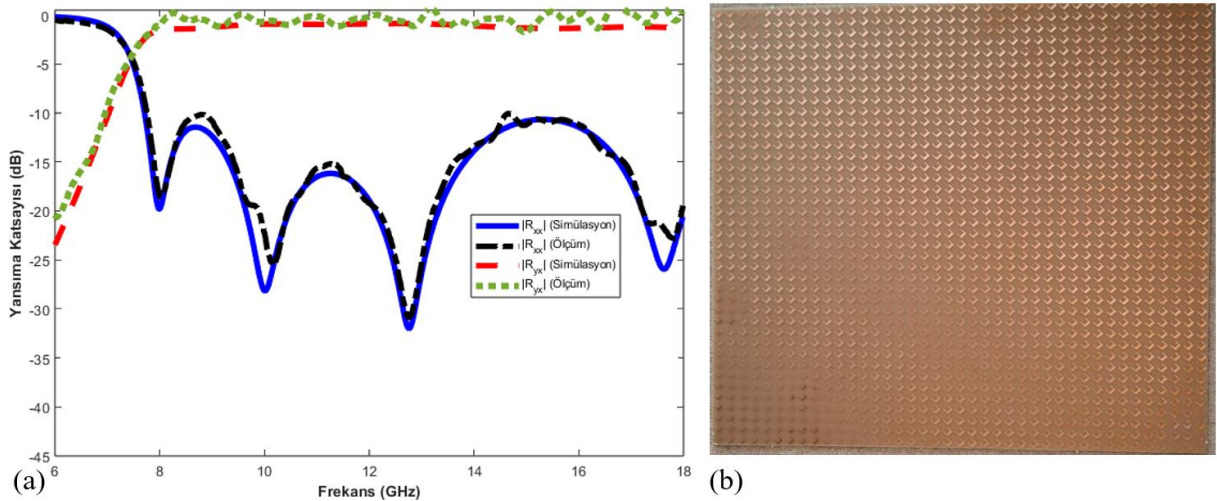


Şekil 43. Önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.

Şekil 43'te, ADS programı kullanılarak elde edilen eşdeğer RLC devresi ile bu modele karşılık hesaplanan yansıma katsayıları ve simülasyon sonuçları birlikte sunulmuştur. Model, önerilen çok katmanlı polarizasyon dönüştürücünün elektromanyetik tepkisini temsil eden direnç, kapasitör ve bobinden oluşmaktadır. Devre elemanlarının değerleri, yansıma katsayısı verilerine dayanarak çıkarılmış ve simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Eşdeğer Devre RLC Parametreleri

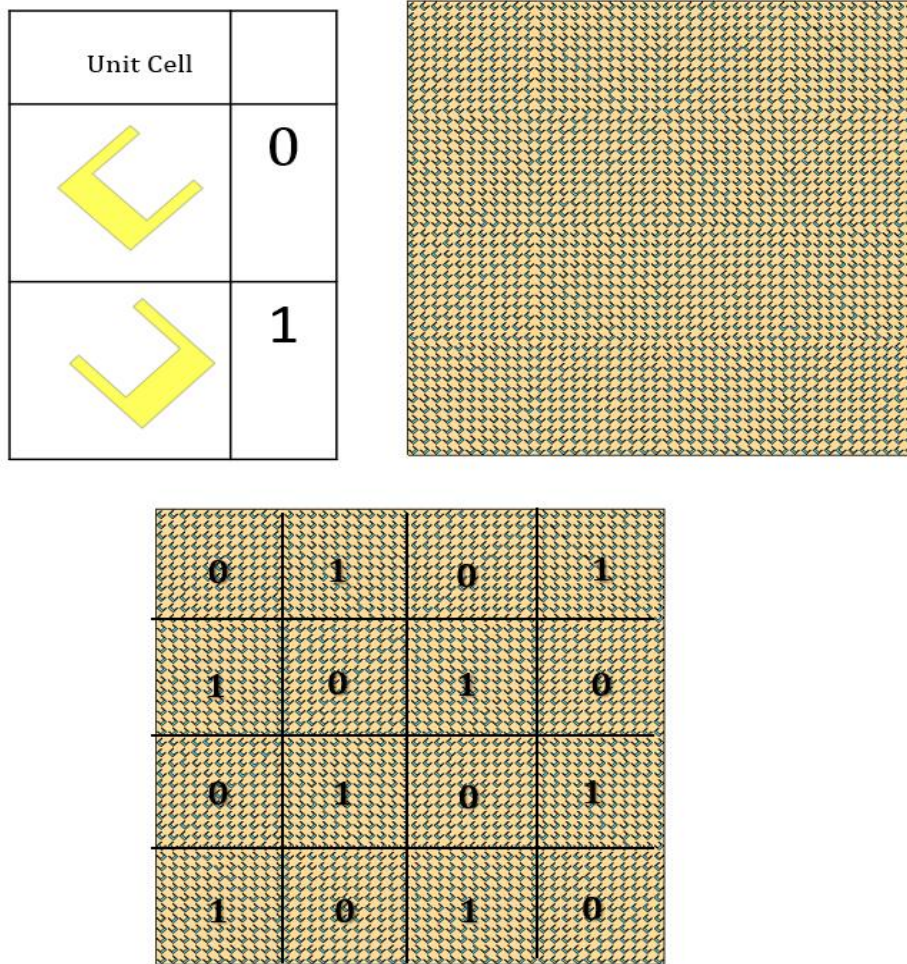
Devre Elemanı	Değer	Birim	Devre Elemanı	Değer	Birim
L1	0,0835	nH	L7	1,610	nH
R1	89,767	k Ω	R7	16,305	m Ω
C1	0,00550	pF	C7	0,0248	pF
L2	7,228	nH	L8	4,373	nH
R2	2,190	m Ω	R8	24,867	m Ω
C2	0,0362	pF	C8	0,0198	pF
L3	9,661	nH	L9	5,787	nH
R3	0,0142	m Ω	R9	42,286	m Ω
C3	0,00196	pF	C9	0,0198	pF
L4	11,333	nH	L10	30,676	nH
R4	32,525	m Ω	R10	72,890	k Ω
C4	0,0284	pF	C10	0,00270	pF
R5	0,716	m Ω	L11	2,533	nH
L5	10,361	nH	C11	0,278	pF
C5	0,0198	pF	R11	7633,85	m Ω
L6	3,729	nH	L12	25,699	nH
R6	48,459	m Ω	R12	222,883	k Ω
C6	0,0354	pF	C12	0,0000679	pF

**Şekil 44.** Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 40 x 40 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü yapının doğruluğu, deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Bu amaçla, geleneksel fotolitografi temelli PCB üretim yöntemi kullanılarak bir numune üretilmiş ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üretilen numune, 40 x 40 birim hücreden oluşmaktadır ve toplam boyutu 280 x 280 mm²'dir. Önerilen yapıda iki dielektrik katman yer almaktadır. Alt katman, metal taban yüzey ile

rezonatör arasında konumlandırılmıştır. Üst katman ise, rezonatörün üzerinde bulunan ve üzerinde metal katman içermeyen FR-4 malzemesidir. Her iki dielektrik katman 1,6 mm kalınlığında geometrik boyutları birbirine eşittir. Metal iletken katmanlar 35 μm kalınlığında ve her birim hücrenin kenar uzunluğu 6,5 mm'dir. Dielektrik tabakalar, $\tan \delta = 0,025$ ve $\epsilon_r = 4,3$ olan bir FR-4 malzemesidir. Ölçüm sonucunda elde edilen R_{xx} ve R_{yx} değerlerinin simülasyon ve ölçüm karşılaştırması Şekil 44(a)'da verilmiştir. Ölçülen R_{xx} ve R_{yx} yansıma katsayılarının simülasyon sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğu ve önerilen dönüştürücünün eş-polarize ve çapraz-polarize yansıma özelliklerini doğruladığı görülmektedir. Simüle edilen ve ölçülen R_{xx} ve R_{yx} arasında yalnızca küçük tutarsızlıklar bulunmaktadır ve bunlar çoğunlukla üretim toleranslarından ve antenlerin küçük hizalama hataları ve aralarındaki küçük açılı farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

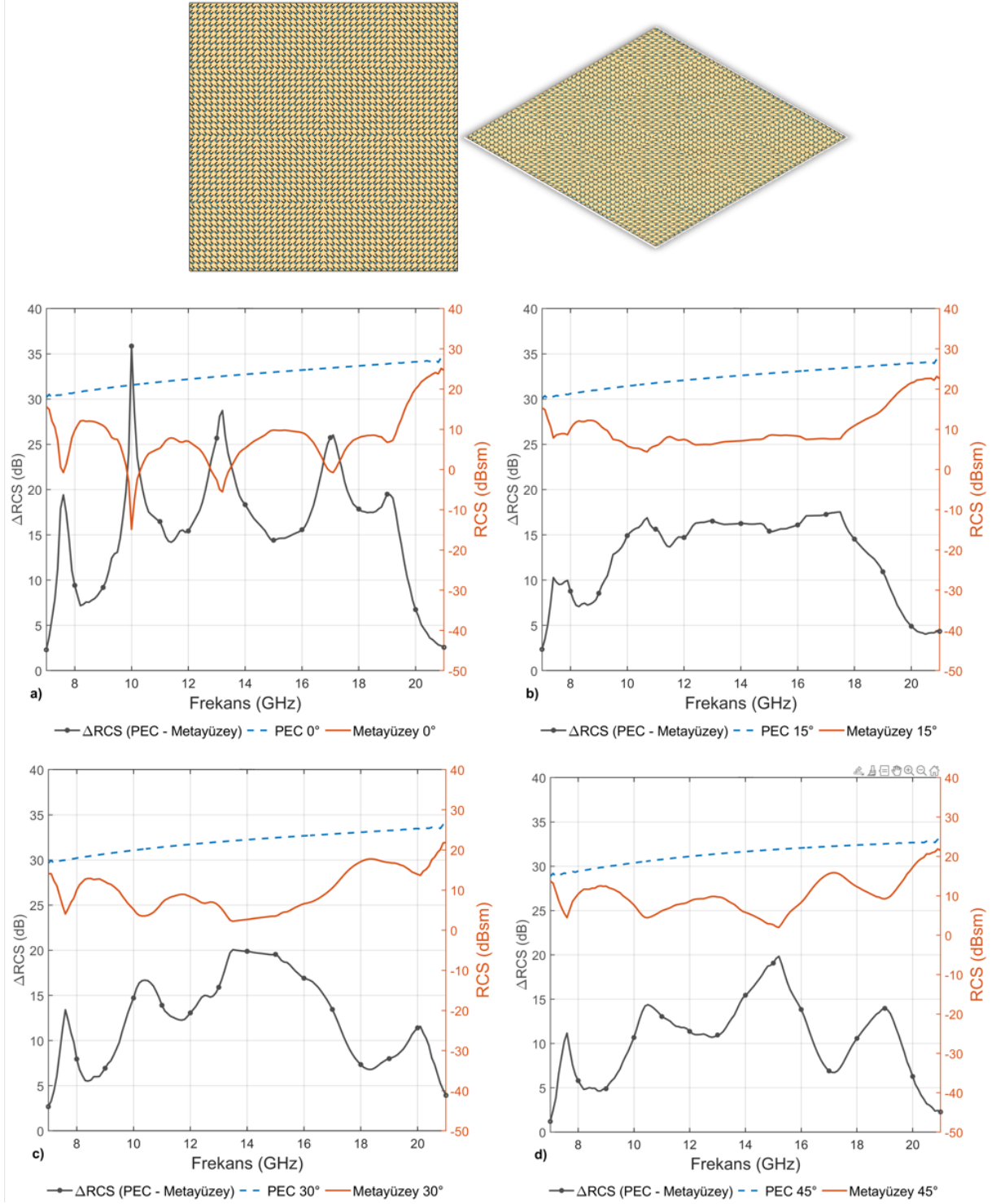


Şekil 45. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik

dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 45, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB'lik azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah dairesel çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarındaki ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır. Bu polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin RCS azaltma performans analizlerinde kullanılan görsellerde, kodlanmış birim hücrelerin ve geometrik detayların daha açık biçimde sunulabilmesi amacıyla, polarizasyon dönüştürücünün en üst dielektrik tabakası görsel olarak kaldırılmıştır.

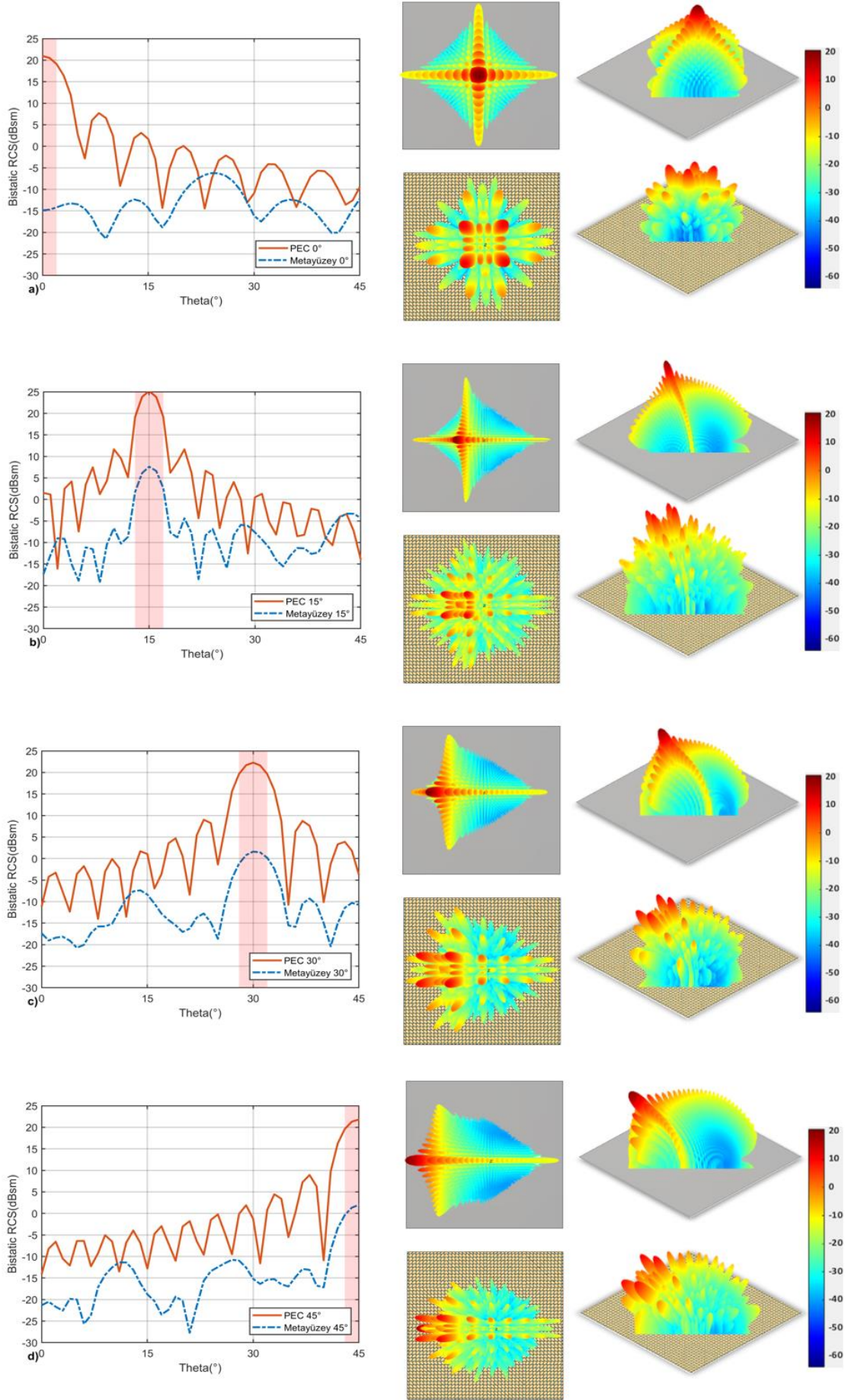
Düz plaka



Şekil 46. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 46, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 46(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,00 GHz frekansında 35,86 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 7,40–7,90 GHz (0,50 GHz) ve 9,20–

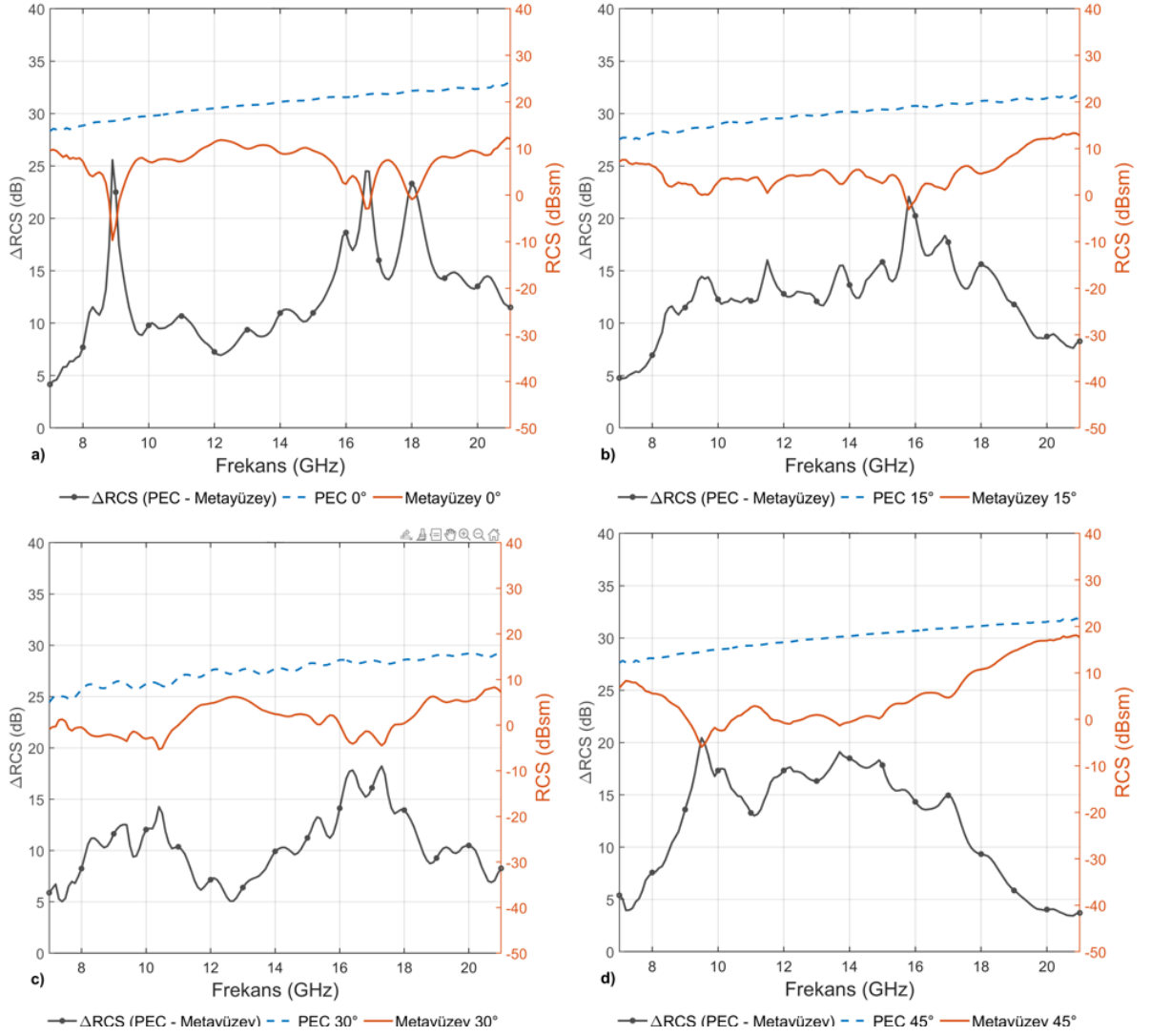
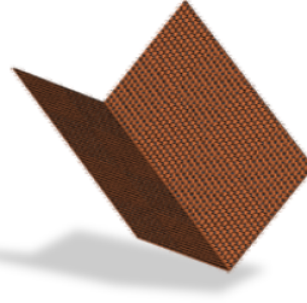
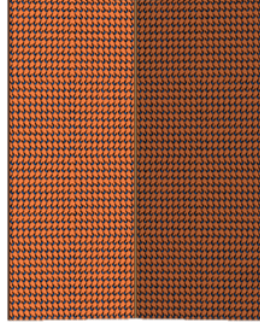
19,70 GHz (10,50 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 7,20–20,20 GHz arasında 13,00 GHz, 3 dB eşğinde ise 7,10–20,70 GHz aralığında 13,60 GHz bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 46 (b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 17,50 GHz frekansında 17,53 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 9,30 – 19,10 GHz (9,80 GHz) bant genişliği gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 7,20–19,90 GHz aralığında 12,70 GHz, 3 dB eşğinde ise 7,10–21 GHz (13,90 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 46(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 13,50 GHz frekansında 20,07 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 7,50–7,80 GHz (0,30 GHz), 9,60–17,40 GHz (7,80 GHz) ve 19,70–20,30 GHz (0,60 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB eşğinde 7,30–20,80 GHz arasında 13,50 GHz, 3 dB eşğinde ise 7,10–21,00 GHz aralığında 13,90 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 46(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 15,20 GHz frekansında 19,84 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 7,50–7,60 GHz (0,10 GHz), 10,00–16,40 GHz (6,40 GHz) ve 17,90–19,50 GHz (1,60 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 7,30–8,10 GHz (0,80 GHz), 9,10–20,10 GHz (11 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. 3 dB eşğinde ise 7,20–20,60 GHz aralığında 13,40 GHz'lik bant genişliği elde edilmiştir.



Şekil 47. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10 GHz, (b) 17,5 GHz, (c) 13,5 GHz ve (d) 15,2 GHz

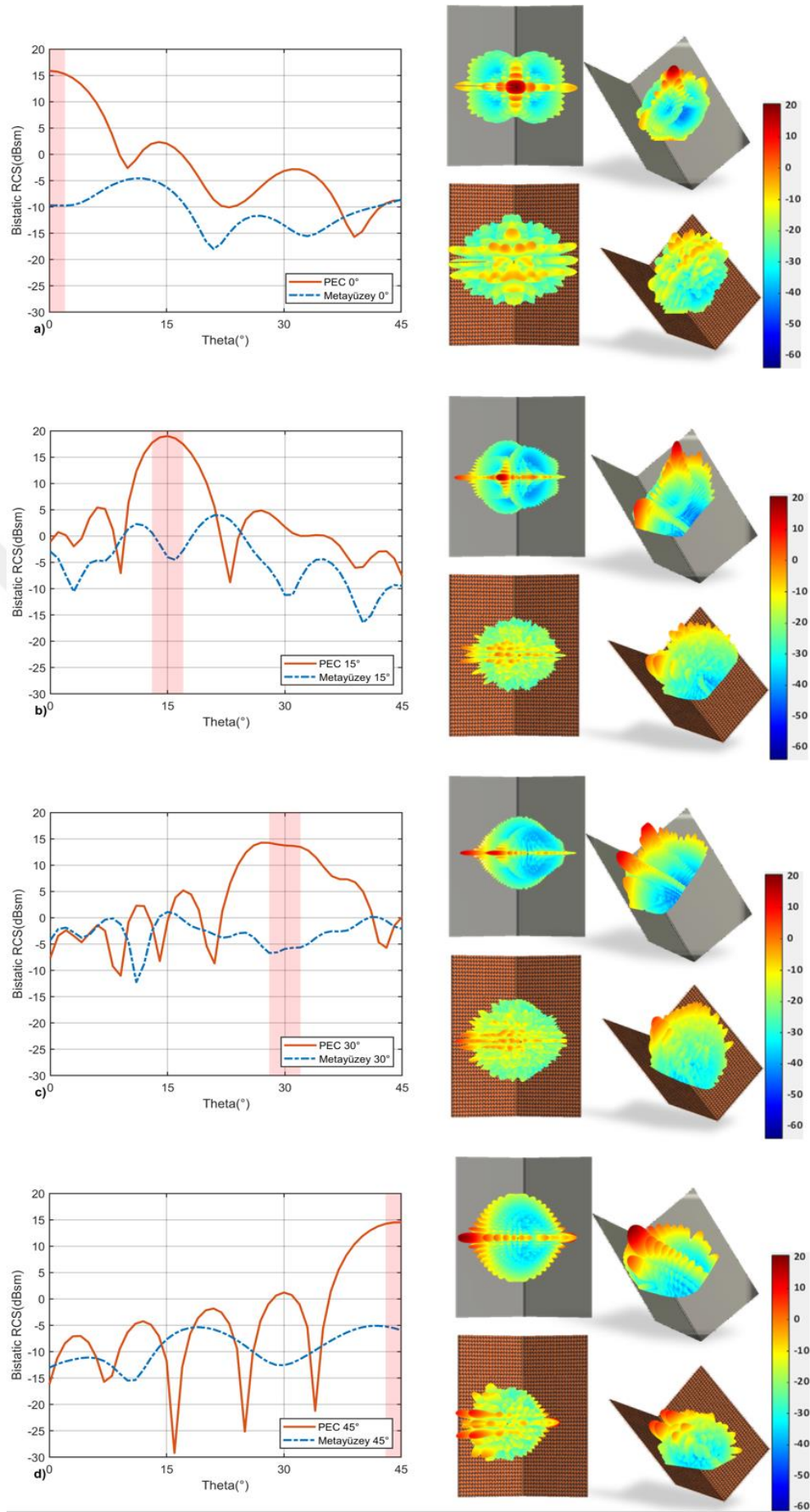
Şekil 47, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 47(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 10 GHz frekansında PEC yüzey için RCS değeri 20,98 dBsm, metayüzeyin değeri ise $-14,88$ dBsm olarak hesaplanmıştır. Bu geliş açısı için 35,86 dB'lik bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 47(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 17,5 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 25,16 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 7,61 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 17,55 dBdeğerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 47(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 13,5 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 22,28 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 1,62 dBsm'dir. 20,66 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 47(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 15,2 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 21,81 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 1,98 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 19,83 dB'lik bir azalma elde edilmiştir.

Dihedral plaka



Şekil 48. Dihedral plaka metavüzevin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 48, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 48(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 8,90 GHz frekansında 25,57 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 8,20–9,50 GHz (1,30 GHz), 10,80–11,20 GHz (0,40 GHz) ve 13,90–21,00 GHz (7,10 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 7,30–21,00 GHz arasında 13,70 GHz, 3 dB eşliğinde ise 7,00–21,00 GHz aralığında 14,00 GHz bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 48(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 15,80 GHz frekansında 22,08 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 8,40–19,30 GHz aralığında 10,90 GHz bant genişliği sağlanmıştır. 5 dB eşliğinde 7,30–21,00 GHz aralığında 13,70 GHz, 3 dB eşliğinde ise 7,00–21,00 GHz aralığında 14,00 GHz bant genişliği hesaplanmıştır. Şekil 48(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 17,30 GHz frekansında 18,22 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 8,20–9,50 GHz (1,30 GHz), 9,80–11,10 GHz (1,30 GHz), 14,10–14,40 GHz (0,30 GHz), 14,80–18,50 GHz (3,70 GHz), 19,20–19,40 GHz (0,20 GHz) ve 19,80–20,20 GHz (0,40 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB ve 3 dB eşliğinde 7,00–21,00 GHz aralığında 14,00 GHz, bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 48(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 9,50 GHz frekansında 20,46 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 8,60–17,60 GHz arasında 9,00 GHz bant genişliği gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 7,00–7,10 GHz (0,10 GHz) ve 7,60–19,30 GHz (11,70 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşliğinde ise 7,00–21,00 GHz aralığında 14,00 GHz bant genişliği hesaplanmıştır.

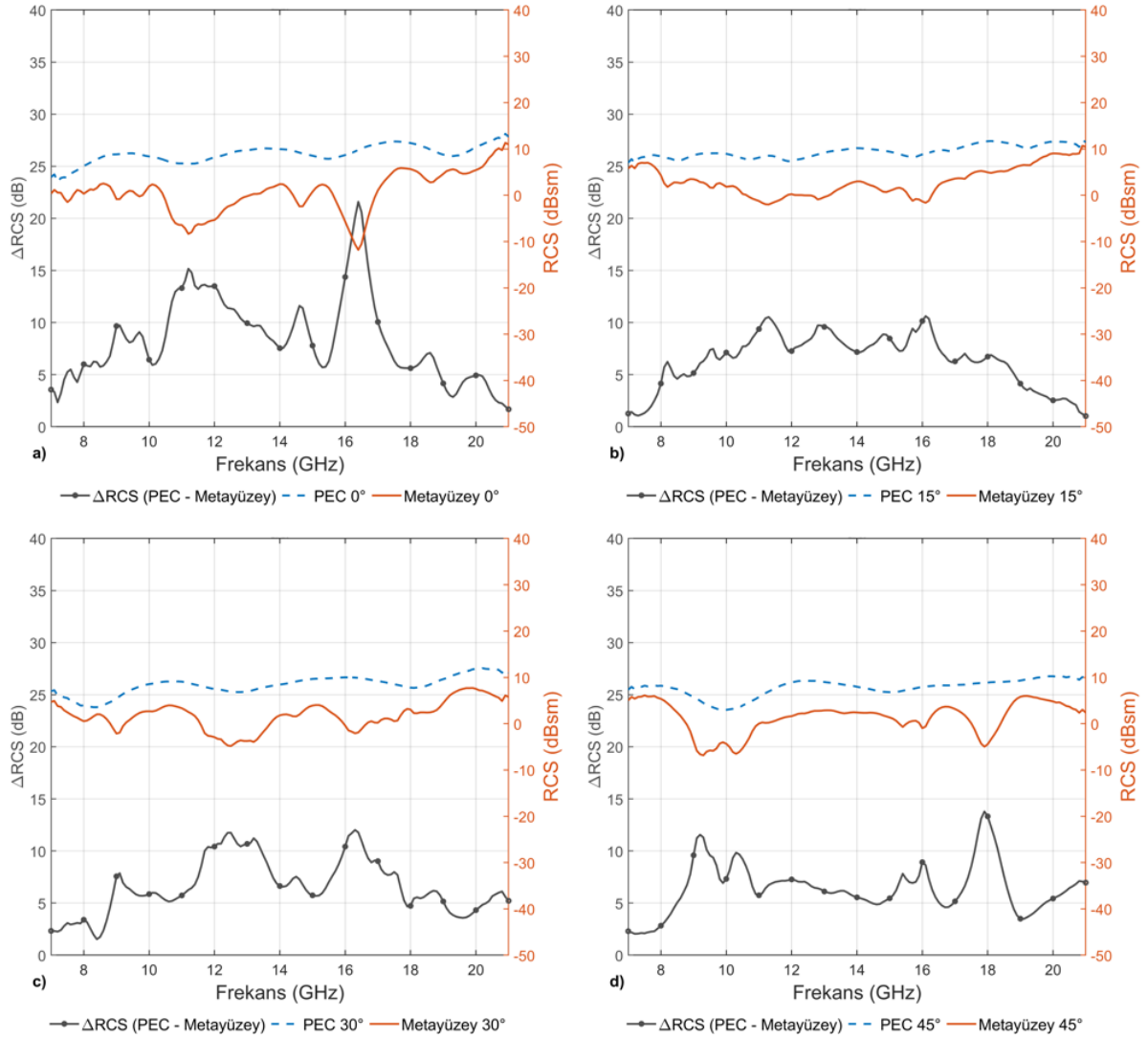
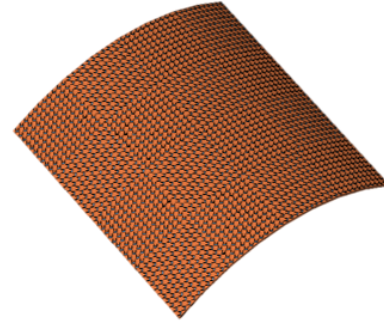
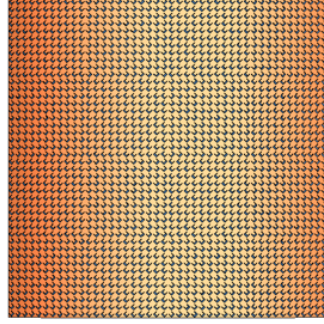


Şekil 49. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,90 GHz, (b) 15,80 GHz, (c) 17,30 GHz ve (d) 9,50 GHz

Şekil 49, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 49(a)'da $\theta = 0^\circ$ geliş açısı için, 8,90 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,87 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-9,70$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 25,57 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 49(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 15,80 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 19,01 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-4,01$ dBsm olarak elde edilmiştir dolayısıyla 23,02 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 49(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 17,30 GHz frekansında PEC yüzey için ölçülen RCS değeri 13,74 dBsm, metayüzey için $-5,92$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 19,66 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 49(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 9,50 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 14,52 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-5,93$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 20,45 dB'lik azalma elde edilmiştir.



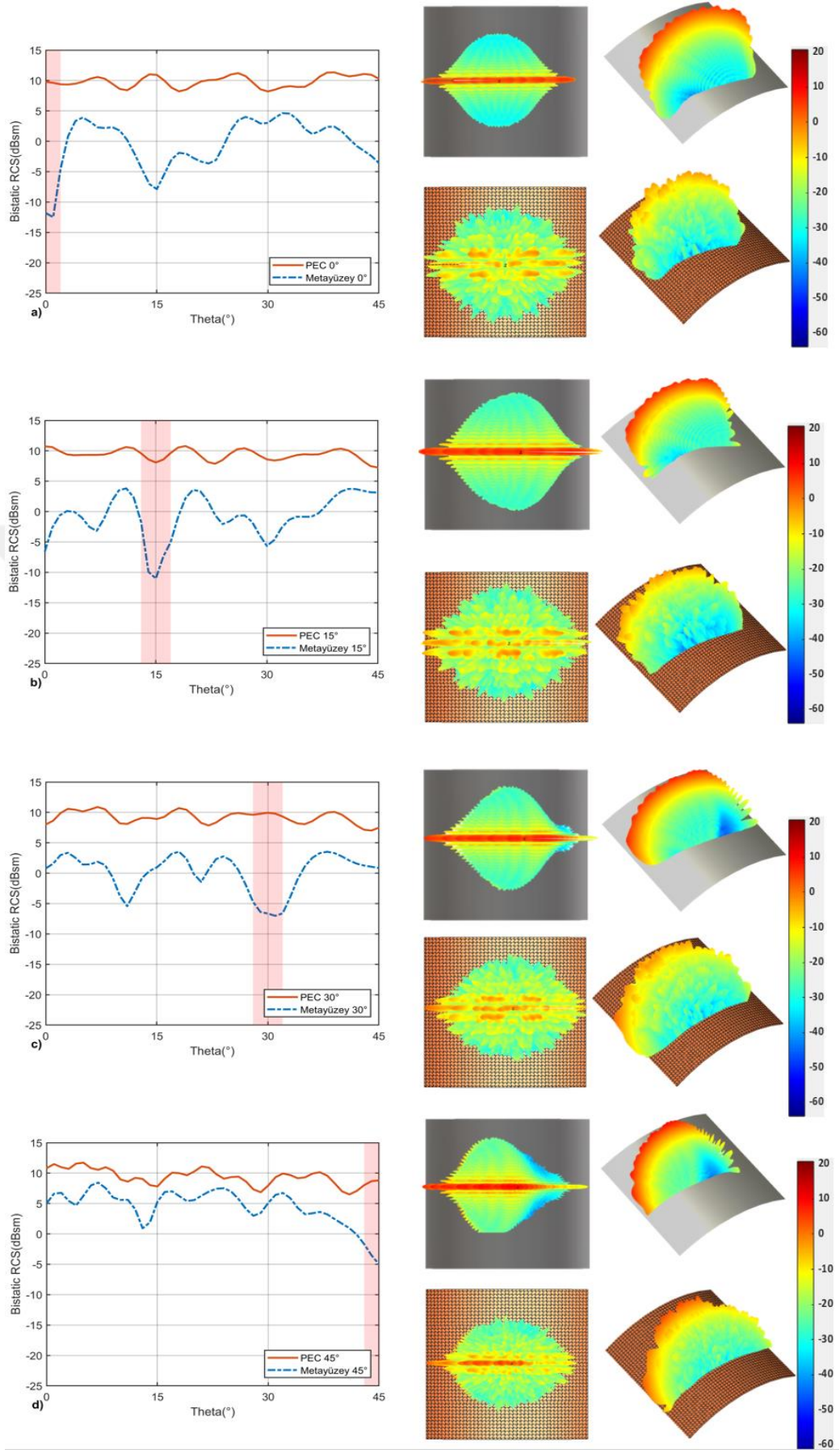
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 50. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 50, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 50(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,40 GHz frekansında 21,59 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,60–12,90 GHz (2,30 GHz), 14,50–14,80 GHz (0,30 GHz) ve 15,80–17,00 GHz (1,20 GHz) bantları

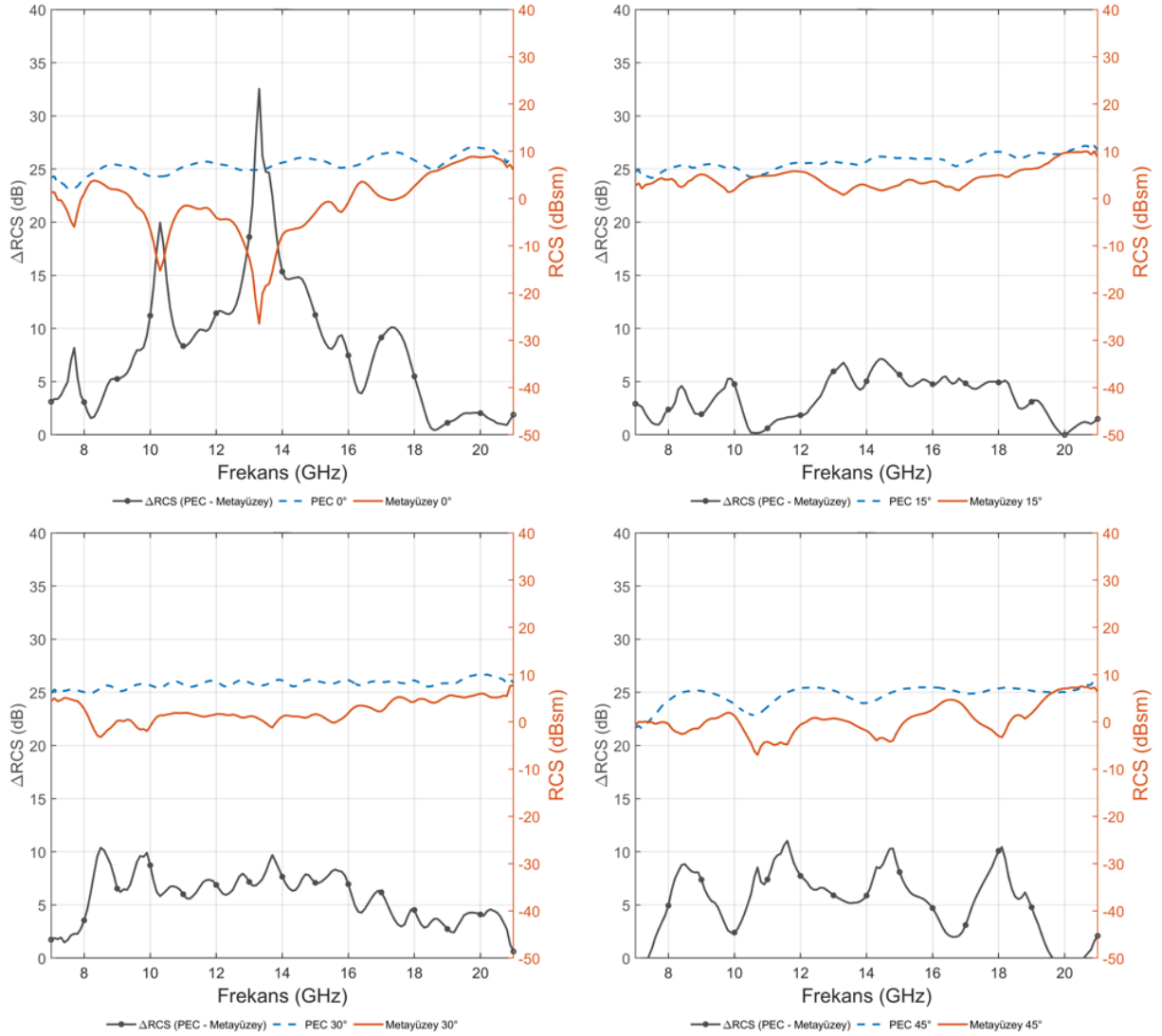
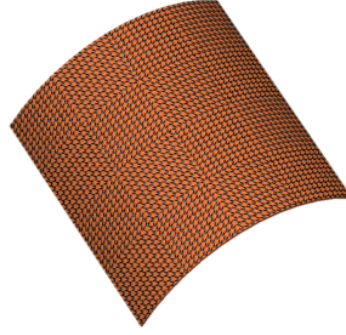
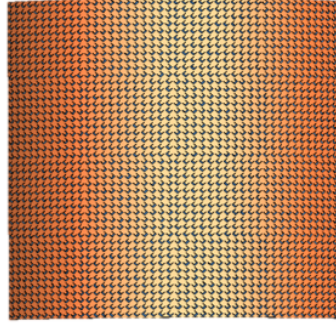
gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 7,50–7,60 GHz (0,10 GHz) ve 7,00–18,80 GHz (10,90 GHz) bantları oluşmuştur. 3 dB eşliğinde ise 7,00–7,10 GHz (0,10 GHz), 7,30–19,20 GHz (11,90 GHz) ve 19,40–20,40 GHz (1,00 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 50(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 16,10 GHz frekansında 10,62 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 11,20–11,40 GHz (0,20 GHz) ve 16,00–16,20 GHz (0,20 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB eşliğinde 8,10–8,30 GHz (0,20 GHz) ve 9,00–18,80 GHz (9,80 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşliğinde ise 7,90–19,70 GHz arasında 11,80 GHz bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 50(c) 'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,30 GHz frekansında 12,02 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 11,70–13,40 GHz (1,70 GHz) ve 16,00–16,60 GHz (0,60 GHz) bantları oluşmuştur. 5 dB eşliğinde 8,90–17,80 GHz (8,90 GHz), 18,10–19,00 GHz (0,90 GHz) ve 20,40–21,00 GHz (0,60 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 3 dB eşliğinde ise 7,70–8,10 GHz (0,40 GHz) ve 8,70–21,00 GHz (12,30 GHz) bantları hesaplanmıştır. Şekil 50(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 17,90 GHz frekansında 13,79 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 9,10–9,40 GHz (0,30 GHz) ve 17,70–18,30 GHz (0,60 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 8,50–14,40 GHz (5,90 GHz), 14,80–16,50 GHz (1,70 GHz), 17,00–18,70 GHz (1,70 GHz) ve 19,80–21,00 GHz (1,20 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşliğinde ise 8,10–21,00 GHz aralığında 12,90 GHz bant genişliği elde edilmiştir.



Şekil 51. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 16,40 GHz, (b) 16,10 GHz, (c) 16,30 GHz ve (d) 17,90 GHz

Şekil 51, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 51(a)'da $\theta = 0^\circ$ açısı için 16,40 GHz frekansında PEC yüzey için ölçülen RCS değeri 9,79 dBsm iken, metayüzeyin aynı açıdaki RCS değeri $-11,81$ dBsm'dir. Bu fark, 21,60 dB'lik RCS azalmasına karşılık gelmektedir. Şekil 51(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 16,10 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,08 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-11,02$ dBsm olarak bulunmuştur. Bu geliş açısı için 19,10 dB'lik bir azalma sağlanmıştır. Şekil 51(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 16,30 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 9,94 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri $-6,65$ dBsm'dir. Bu sonuç ile 16,59 dB'lik bir RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 51(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 17,90 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,81 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-4,99$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 13,79 dB'lik bir azalma elde edilmiştir.

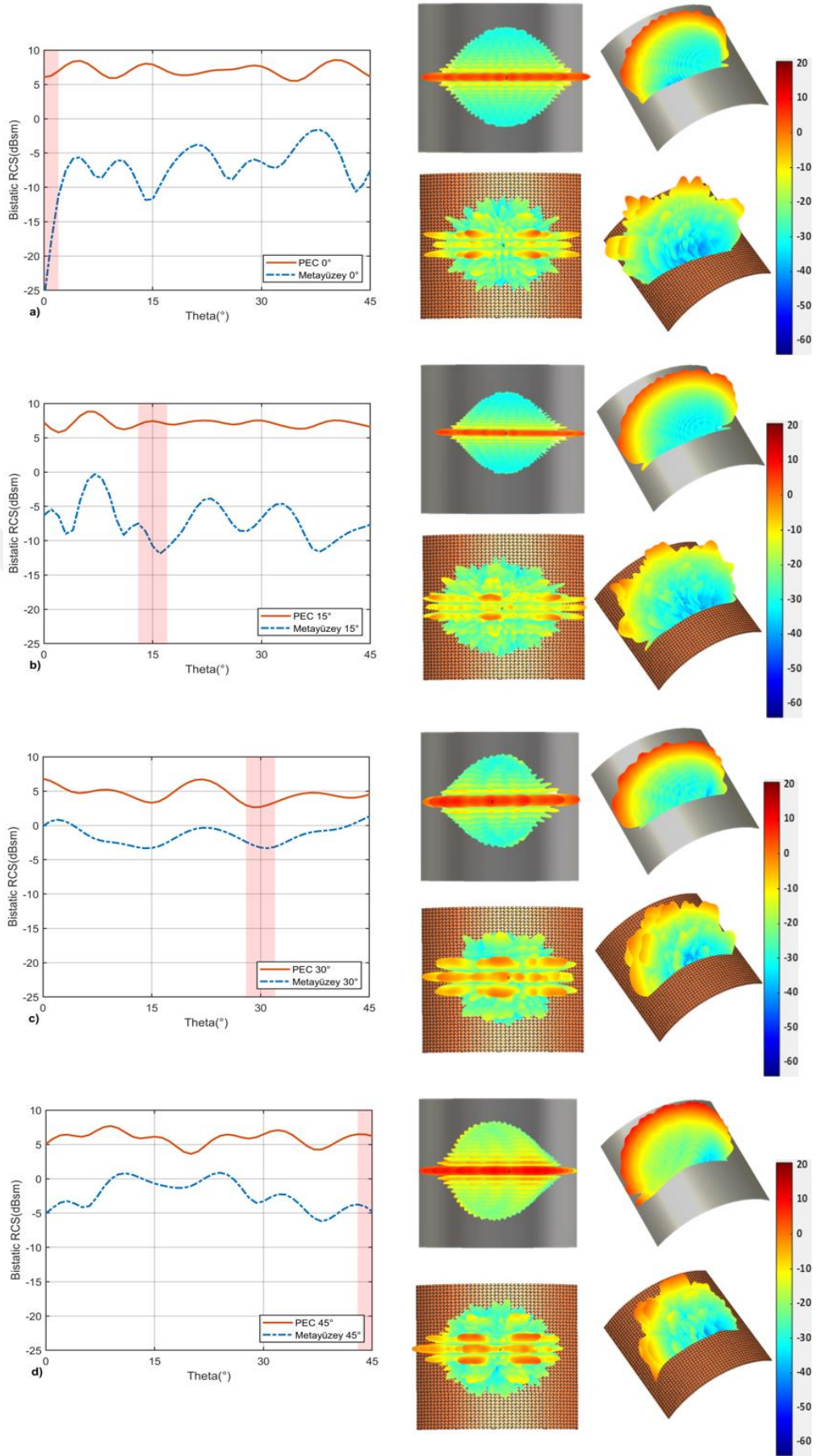
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 52. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 52, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 52(a)'da 0° geliş açısı için Maksimum RCS azalması 13,30 GHz frekansında 32,55 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 10,00–

10,70 GHz (0,70 GHz), 11,80–15,10 GHz (3,30 GHz) ve 17,30–17,40 GHz (0,10 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 7,60–7,80 GHz (0,20 GHz), 8,60–16,00 GHz (7,30 GHz) ve 16,60–18,00 GHz (1,40 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşğinde ise 7,00–8,00 GHz (1,00 GHz) ve 8,60–18,20 GHz (9,60 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 52 (b)'de 15° geliş açısı için Maksimum azalma 14,40 GHz frekansında 7,12 dB olarak gözlenmiştir dolayısıyla bu açı için 10 dB eşğinde monostatik RCS azalması sağlanmamıştır. 5 dB eşğinde 9,80–9,90 GHz (0,10 GHz), 12,80–13,60 GHz (0,80 GHz), 14,00–15,10 GHz (1,10 GHz), 15,70–15,80 GHz (0,10 GHz), 16,20–16,50 GHz (0,30 GHz), 16,80–16,90 GHz (0,10 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşğinde ise 8,20–8,60 GHz (0,40 GHz), 9,20–10,10 GHz (0,80 GHz), 12,50–18,50 GHz (6,00 GHz) ve 19,00–19,20 GHz (0,20 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. Şekil 52 (c)'de 30° geliş açısı için Maksimum RCS azalması 8,50 GHz frekansında 10,38 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 8,50–8,60 GHz (0,10 GHz) bandı gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 8,20–16,00 GHz (7,90 GHz) ve 16,60–17,10 GHz (0,50 GHz) bantları oluşmuştur. 3 dB eşğinde ise 8,00–17,50 GHz (9,50 GHz), 17,70–18,20 GHz (0,50 GHz), 18,50–18,90 GHz (0,40 GHz) ve 19,40–20,70 GHz (1,30 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, Şekil 52 (d)'de 45° geliş açısı için Maksimum azalma 11,60 GHz frekansında 11,03 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 11,50–11,60 GHz (0,10 GHz), 14,70–14,80 GHz (0,10 GHz) ve 18,00–18,10 GHz (0,10 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 8,10–9,40 GHz (1,30 GHz), 10,40–15,90 GHz (5,50 GHz) ve 17,30–18,90 GHz (1,60 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşğinde ise 7,80–9,70 GHz (1,90 GHz), 10,20–16,20 GHz (6,00 GHz) ve 17,00–19,20 GHz (2,20 GHz) bantları elde edilmiştir.



Şekil 53. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,30 GHz, (b) 14,40 GHz, (c) 8,50 GHz ve (d) 11,6 GHz

Şekil 53, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 53 (a)'da $\theta = 0^\circ$ geliş açısı için, 13,30 GHz frekansında PEC yüzey için ölçülen RCS değeri 6,04 dBsm iken, metayüzeyin aynı açıdaki RCS değeri $-26,50$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 32,54 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 53(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 14,40 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,43 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-10,79$ dBsm olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 18,22 dB'lik bir azalma sağlanmıştır. Şekil 53(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 8,50 GHz frekansında PEC yüzey için ölçülen RCS değeri 2,69 dBsm, metayüzey için $-3,23$ dBsm'dir. Bu sonuç, 5,92 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 53(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 11,60 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 6,25 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-4,78$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 11,03 dB'lik bir azalma elde edilmiştir.

Karşılaştırma

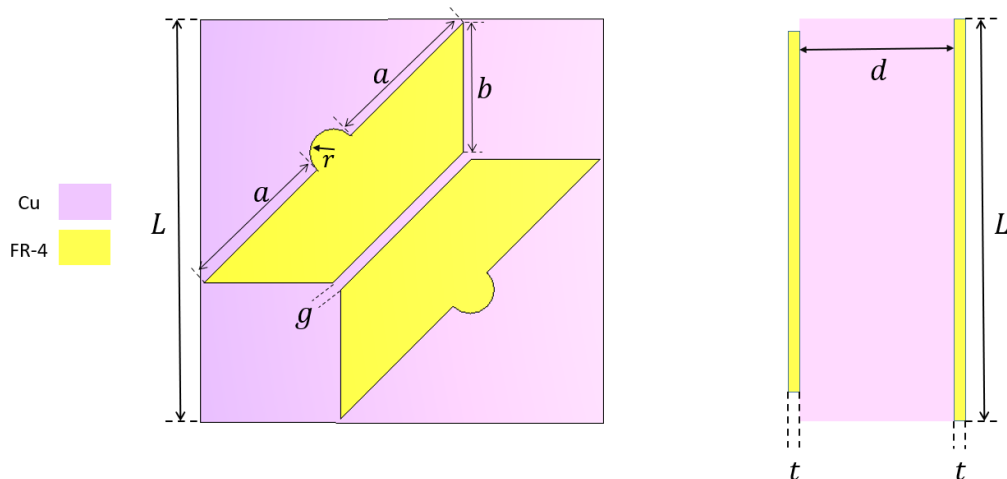
Tablo 4. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X-, Ku- ve K-Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Açı	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Zafar, Khan, Jabbar, Kazim, Ur Rehman, et al., 2025)	9,12–9,57 GHz (LP-LP) 13,08–14,07 GHz (LP-LP) 18,84–19,23 GHz (LP-LP) 8,37–8,97 GHz (LHCP) 14,50–18,66 GHz (LHCP)	45°	1,52mm RO3003	%95	Pol. Dön.
(Salimitorkamani et al., 2025)	13,4–33,5 GHz (LP-LP)	40°	1,52mm RO3003	%87	Pol. Dön.
(Khan et al., 2024)	15,97–16,85 GHz (LP-LP) 24,70–26,65 GHz (LP-LP) 34,37–35,45 GHz (LP-LP) 14,57–15,65 GHz (LHCP) 27,47–33,85 GHz (LHCP) 17,27–23,92 GHz (RHCP) 35,87–38,32 GHz (RHCP)	45°	2mm RO3003	%95	Pol. Dön.
Önerilen Çalışma	7,74–20,26 GHz (LP-LP) 7,36–7,49 GHz (RHCP)	30°	1,6mm+1,6mm (Çok katmanlı) FR-4	%89	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilerde

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, C-, X-, Ku- ve K-bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma, Tablo 4'te şu faktörlere göre özetlenmiştir: Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, geliş açısı, dielektrik tabaka kalınlığı ve dielektrik tabaka malzemesi, verimlilik ile Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı. Bu çalışmalarla karşılaştırıldığında, (Khan et al., 2024) ve (Zafar, Khan, Jabbar, Kazim, Ur Rehman, et al., 2025) yapılan çalışmalar arasında %95 PCR oranı ile en yüksek PCR oranına sahiptir. Önerilen çalışma, (Salimitorkamani et al., 2025)'nin çalışmasına ek olarak LP-CP polarizasyon dönüşümünü de desteklemektedir. Ayrıca, aynı çalışma ile karşılaştırıldığında PCR oranı açısından daha üstün performans sergilemektedir. Bununla birlikte, önerilen yapı (Khan et al., 2024) ve (Zafar, Khan, Jabbar, Kazim, Ur Rehman, et al., 2025) çalışmalarına kıyasla daha düşük geliş açılarında ve verim değerlerinde çalışsa da, bu çalışmalara göre daha geniş bantta polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmiştir. Son olarak kıyaslanan üç çalışma Fonksiyon ve RCS analiz kapsamı açısından sadece polarizasyon dönüştürücü fonksiyonu göstermiştir. Buna karşılık önerilen polarizasyon dönüştürücü farklı hedef geometrilerini (düz plaka, 90° açılı dihedral ve 200 mm ve 300 mm yarıçaplı silindirik) çeşitli geliş açıları (0°, 15°, 30°, 45°) altında değerlendirerek RCS analizini çoklu saçılma senaryolarına genişletmekte ve böylece metayüzeyin performansının daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamaktadır.

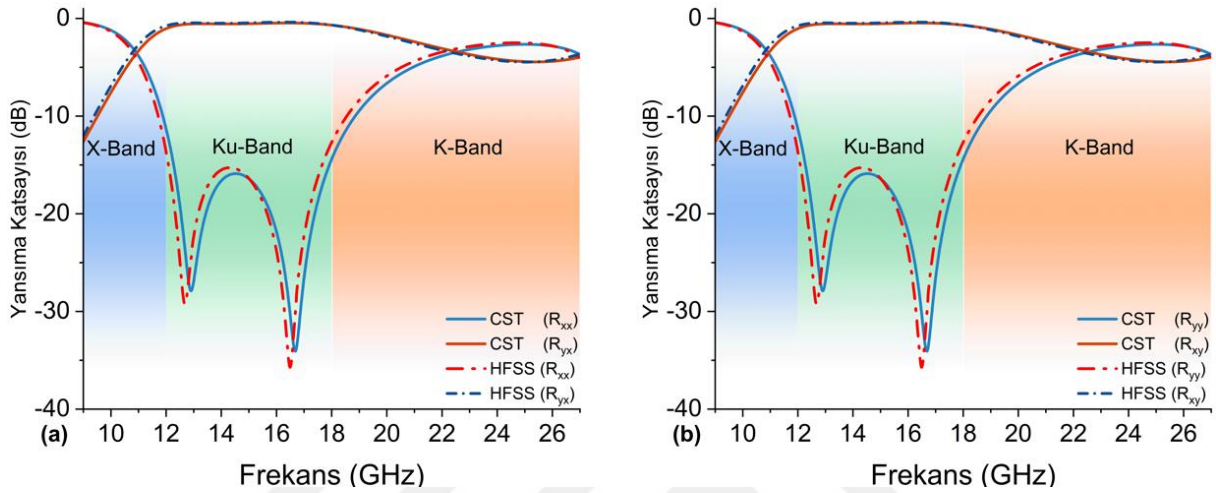
X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 54'de görülmektedir. Rezonatör hem de birim hücrenin arka yüzeyi, $t=0,035\text{mm}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$ iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Rezonatör ile arka metalik yüzey arasında dielektrik tabaka olarak FR-4 malzemesi kullanılmıştır; bu malzemenin dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3(1-j0,025)$ 'dir.



Şekil 54. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi (Ozturk et al., 2023)

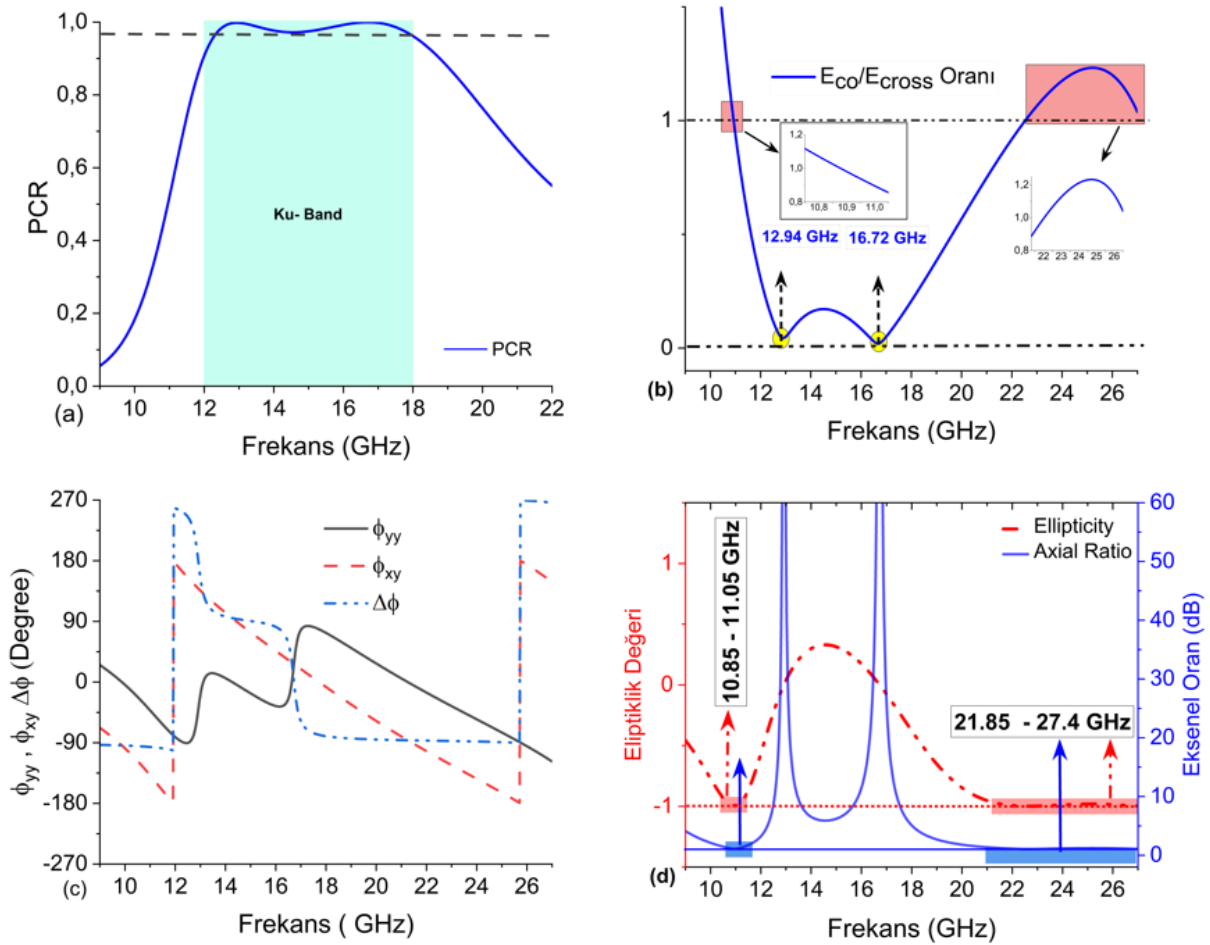
Maksimum bant genişliği ve yüksek PCR verimliliği elde edebilmek amacıyla birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 54’de gösterildiği üzere $L = 5,94$ mm, $a = 2,34$ mm, $b = 1,89$ mm, $r = 0,35$ mm, $g = 0,15$, $d=1,6$ mm olarak belirlenmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi, elektromanyetik dalgaların ters yönde yansımaları sağlayarak yapının yansımada çalışmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 55. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansım katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu

Şekil 55(a) ve 55(b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansım katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 55(a)'da normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansım katsayısı R_{xx} , 6,02–12,58 GHz’de -15 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansım katsayısı en düşük R_{yx} , -0,55 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz frekans aralıklarında her iki yansım katsayısı -4,35 ve üzeri değerdedir. Bu sonuçlar, 12,35–17,8 GHz’de x-polarize dalganın yansım sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü ve 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz frekans aralıklarında ise x polarize dalganın yansım sırasında dairesel polarizasyon dönüşümünün genlik koşulunu sağladığı görülmektedir. Ayrıca 12,94 GHz ve 16,72 GHz frekanslarında sırasıyla -28,55 dB, -33,8 dB’lik yansım katsayısıyla rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 55(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir eş polarize yansım katsayısı R_{yy} , 12,35–17,8 GHz’de -15 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansım katsayısı en düşük R_{xy} , -0,55 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz frekans aralıklarında her iki yansım katsayısı -4,35 ve üzeri değerdedir. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansım değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir.

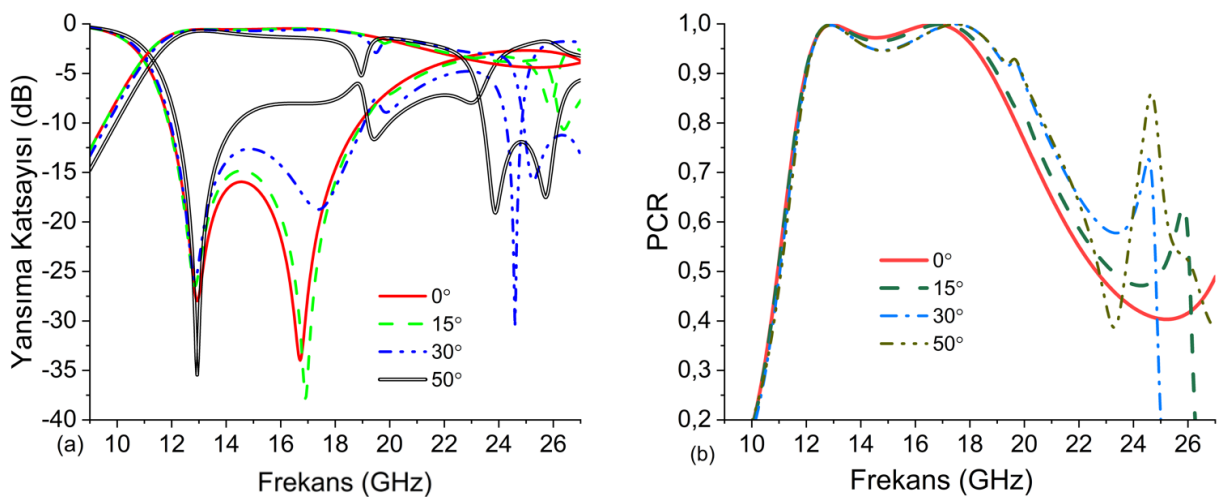
Bu durum, söz konusu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını ve x ile y polarize edilmiş olarak gelen elektromanyetik dalgaların sırasıyla y ve x polarizasyonlu; aynı şekilde y ve x polarize edilmiş olarak gelen dalgaların ise sırasıyla x ve y polarizasyonlu olacak biçimde yansıtıldığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansıma katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 56. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri

Şekil 56(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 12,35–17,8 GHz frekans bandında %97'yi aşmakta ve neredeyse Ku- bandını tamamen kapsamaktadır. Şekil 56(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan

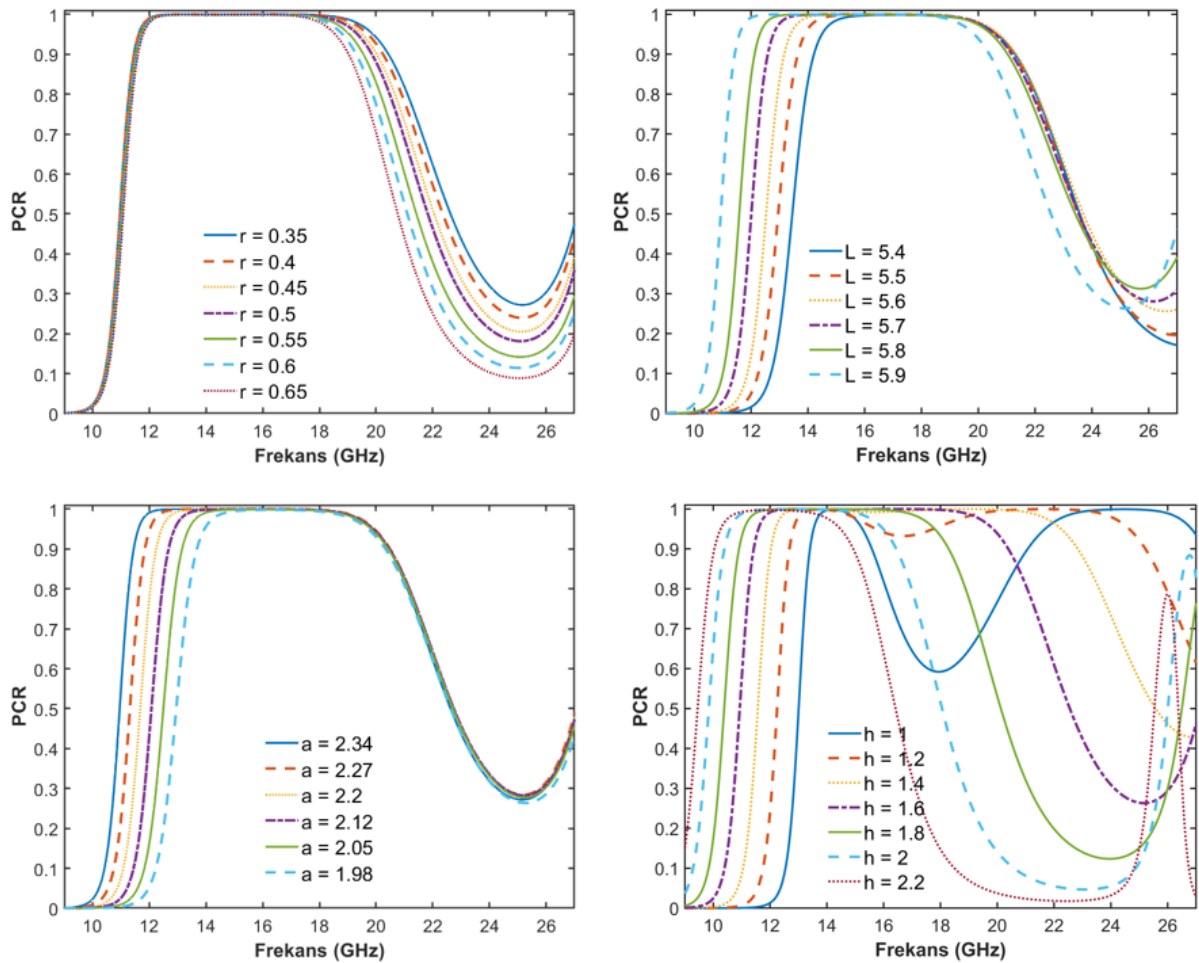
noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 54’de gösterilen 12,94 GHz ve 16,72 GHz rezonans frekanslarının, Şekil 56(b)’de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktalara karşılık geldiği görülmektedir. Bu noktalar ayrıca sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 56(a)’da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse %100’e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 56(d)’de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenini eliptikliği, sağ y eksenini ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri grafikte görüldüğü gibi, 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz frekans bantlarında -1’e ulaşmaktadır; bu nedenle LHCP dönüşümü bu frekans bantlarında gerçekleşmektedir. Şekil 56(d)’de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz frekans bandında 1,23 dB’ye ulaşarak, bu bantlarda yüksek verimli LP–CP dönüşümünün gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde gözlenen yükselme noktalarının 12,94 GHz ve 16,72 GHz rezonans frekanslarıyla örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, söz konusu frekansların rezonans noktaları olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 56(b)’de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı hem de Şekil 55’te yer alan yansıma katsayıları incelendiğinde, Şekil 56(c)’de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ ’nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansıma katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



Şekil 57. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi. (Ozturk et al., 2023)

Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açlarındaki yansıma katsayıları Şekil 56(a) ve Şekil 56(b)’de değerlendirilmiştir. Şekil 57(a) ve Şekil 57(b)’de 0° ile 50° arasındaki yansıma

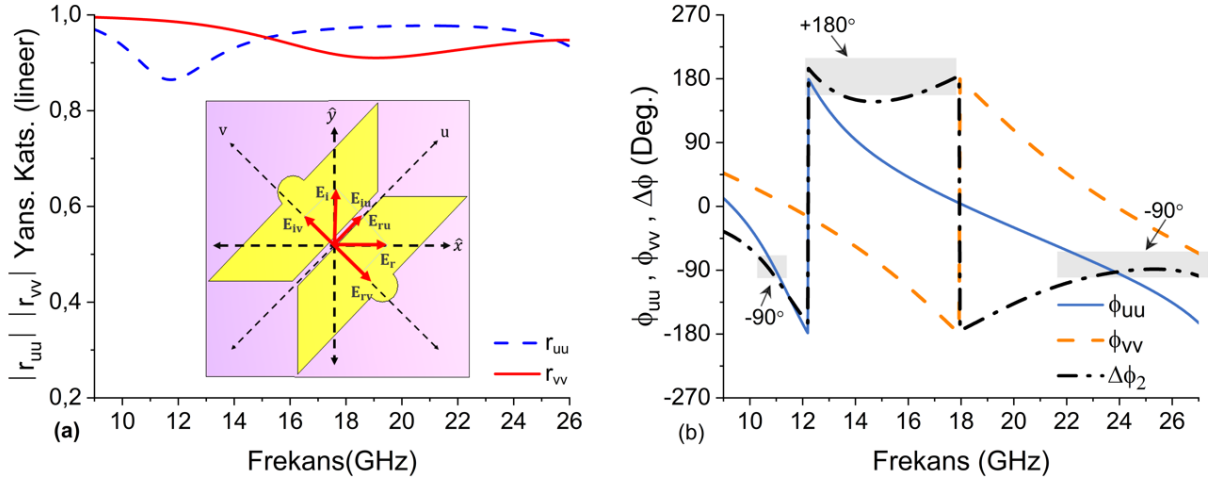
katsayıları ve PCR değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, polarizasyon dönüştürücünün 50° eğik geliş açısındaki PCR performansı değerlendirilmiş ve %70, %80 ve %90 eşik değerleri için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; PCR %90 için 12,22–20,01 GHz ($\Delta f = 8,18$ GHz), 23,63–24,06 GHz ($\Delta f = 0,43$ GHz) ve 25,61–26,14 GHz ($\Delta f = 0,53$ GHz) aralıklarında dönüşüm elde edilmiştir. PCR %80 eşliğinde bantlar 11,91–21,27 GHz ($\Delta f = 9,36$ GHz) ve 23,48–26,30 GHz ($\Delta f = 2,82$ GHz) olarak gözlemlenmiş. PCR %70 seviyesinde ise bantlar daha da genişleyerek 1,66–21,96 GHz ($\Delta f = 10,29$ GHz) ve 23,35–26,45 GHz ($\Delta f = 3,10$ GHz) değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 58. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=1$ -2,2 mm (b) $L=6,95$ -7,9 mm (c) $a=3,4$ -4 mm (d) $b=3$ -4,2 mm

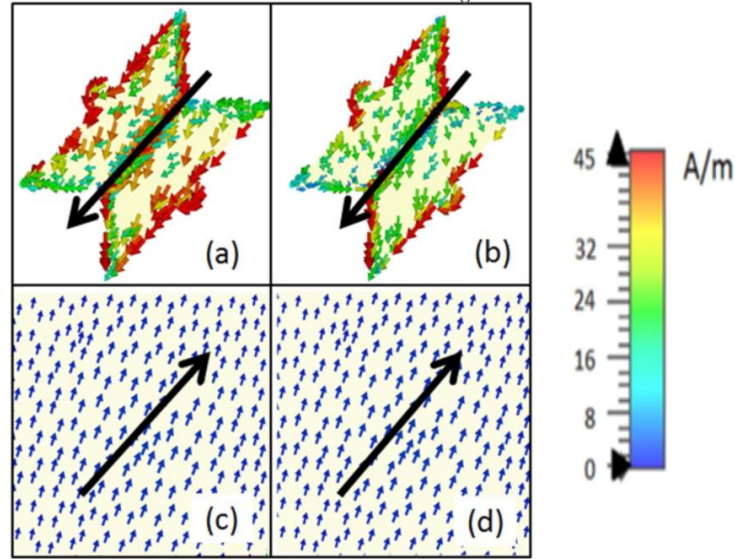
Şekil 58 önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin PCR üzerindeki etkilerini göstermektedir Şekil 58’de gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; (a) ve (b) rezonatör ölçüleri, birim hücre genişliği (L) ve dielektrik tabakaların kalınlığıdır (h). Buradaki temel amaç, geniş bant genişliği ve yüksek PCR oranının birlikte sağlandığı maksimum verim koşulunun elde edilmesi hedeflenir. PCR değerinin maksimum düzeyde olabilmesi için, eş-polarizasyon yansıma katsayısının mümkün

olduğunca düşük, çapraz-polarizasyon yansıma katsayısının ise olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. Bu koşullar sağlandığında, PCR en yüksek değerine ulaşır.



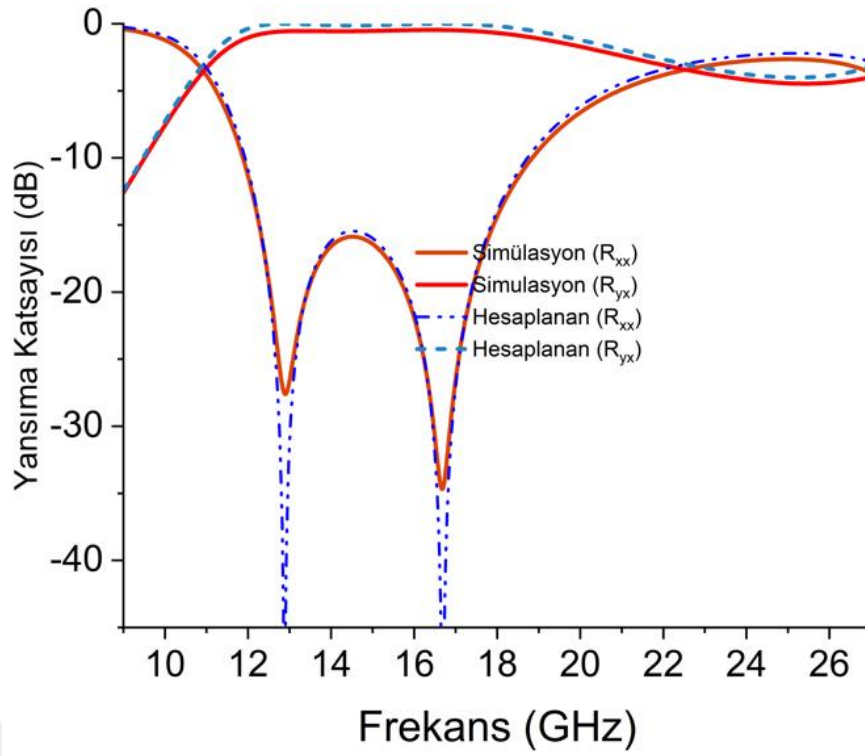
Şekil 59. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için u - v eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 59'da gösterildiği üzere yapı u - v koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 59'da tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 59(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 59(b)'de LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 12,35–17,8 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP-LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 55'te verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 12,94 GHz ve 16,72 GHz rezonans frekanslarında, y-polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x-polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 59(b)'de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP-CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 56 (b)'de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 59'daki faz farkı grafiğinde, 10,85-11,05 GHz ve 21,85-27,4 GHz bantlarında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 60. Önerilen yapının yüzey akım dağılımları: (a) rezonatör – 12,94 GHz, (b) rezonatör – 16,72 GHz, (c) metal taban – 12,94 GHz, (d) metal taban – 16,72 GHz.(Ozturk et al., 2023)

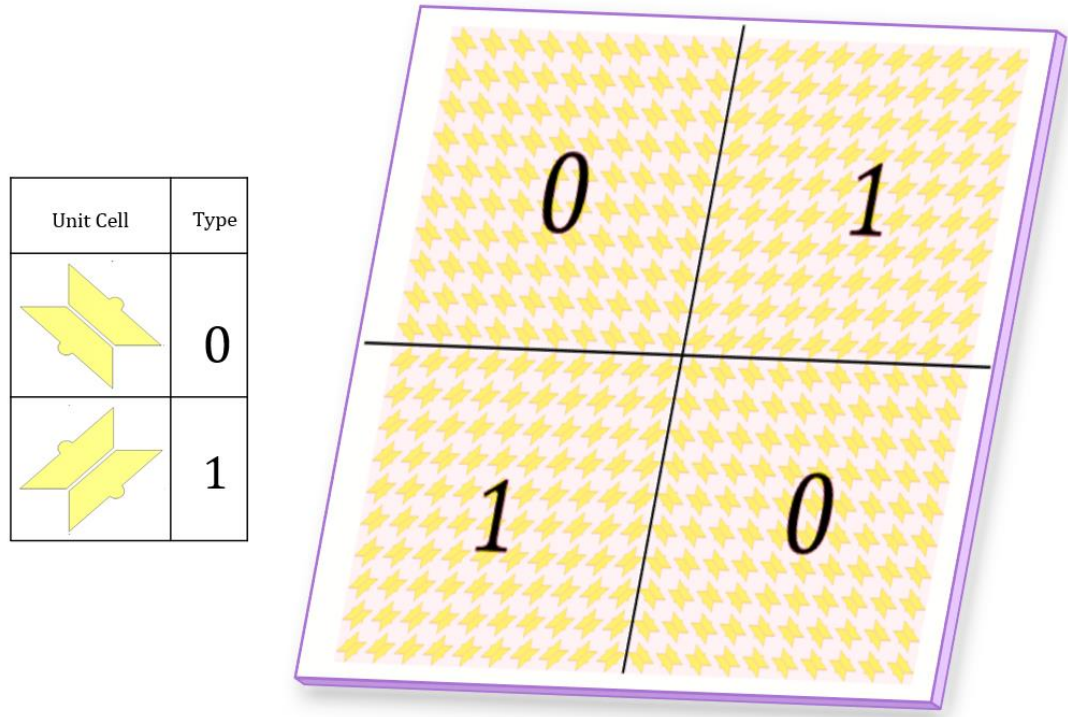
Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları iki farklı rezonans frekansında (12,94 GHz ve 16,72 GHz) analiz edilmiştir. Rezonatör ve arka metal katmandaki akım dağılımları, Şekil 60’da her iki katman için birlikte sunulmuştur. Şekilde yer alan oklar, her bir rezonans frekansında yüzey akımlarının yönünü göstermektedir. Bu akımlar, zamana bağlı olarak değişen elektrik ve manyetik polarizasyonların etkisiyle yapının iletken bölgelerinde indüklenmektedir. Üst ve alt metal katmanlardaki yüzey akımlarının paralel olmayan yönelimi nedeniyle, Şekil 60’da de görüldüğü üzere 12,94 GHz ve 16,72 GHz frekanslarında belirgin manyetik rezonanslar olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 61. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

Şekil 61’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u–v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

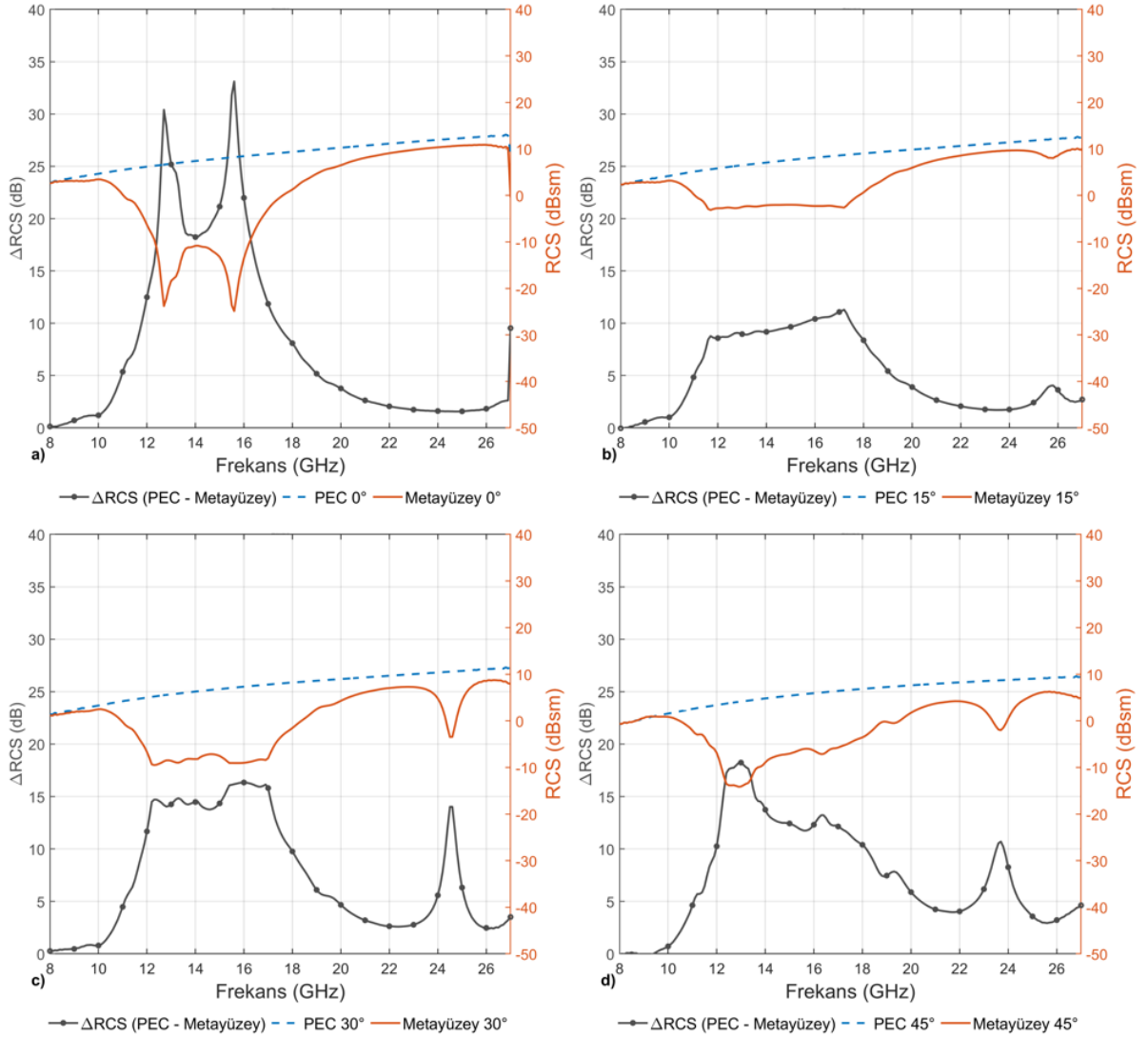
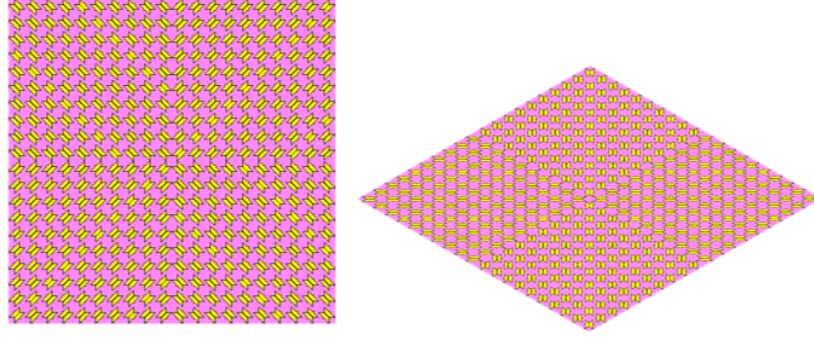


Şekil 62. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.(Ozturk et al., 2023)

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 62, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB değerinde azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır.

Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah daireli çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

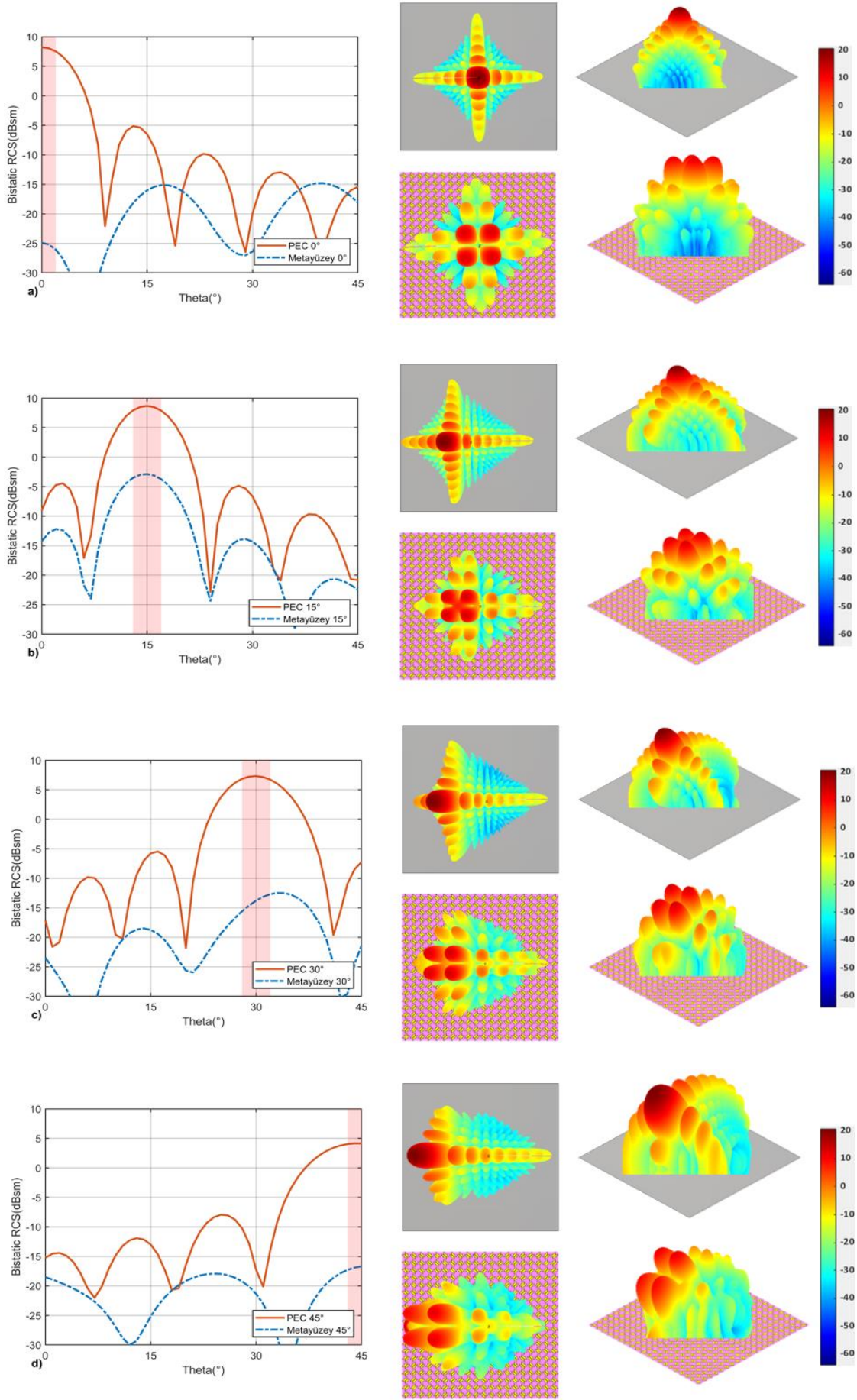
Düz plaka



Şekil 63. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 63, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 63(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 15,60 GHz frekansında 33,11 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 11,80–17,30 GHz (5,50 GHz) bant

genişliği sağlanmıştır, 5 dB eşliğinde 11,00–19,00 GHz (8,00 GHz) aralığında oldukça geniş bir bant elde edilmiştir, 3 dB eşliğinde ise 10,70–20,50 GHz (9,80 GHz) bant genişliği gözlenmiştir. Şekil 63(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 17,20 GHz frekansında 11,30 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 15,50–17,50 GHz (2,00 GHz) bant genişliği sağlanmıştır, 5 dB eşliğinde 11,10–19,10 GHz (8,00 GHz) bant genişliği elde edilmiştir, 3 dB eşliğinde ise 10,70–20,60 GHz (9,90 GHz) ve 25,30–26,20 GHz (0,90 GHz) bant genişliği gözlenmiştir. Şekil 63(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,00 GHz frekansında 16,34 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 11,90–17,90 GHz (6,00 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 11,10–19,80 GHz (8,70 GHz) aralığında geniş bantlı bir performans sağlanmıştır, 3 dB eşliğinde ise 10,80–21,20 GHz (10,40 GHz) bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 63(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 13,00 GHz frekansında 18,23 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 12,00–18,10 GHz (6,10 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 11,10–20,40 GHz (9,30 GHz) bant genişliği sağlanmıştır, 3 dB eşliğinde ise 10,80–25,30 GHz (14,50 GHz) bant genişliği elde edilmiştir.

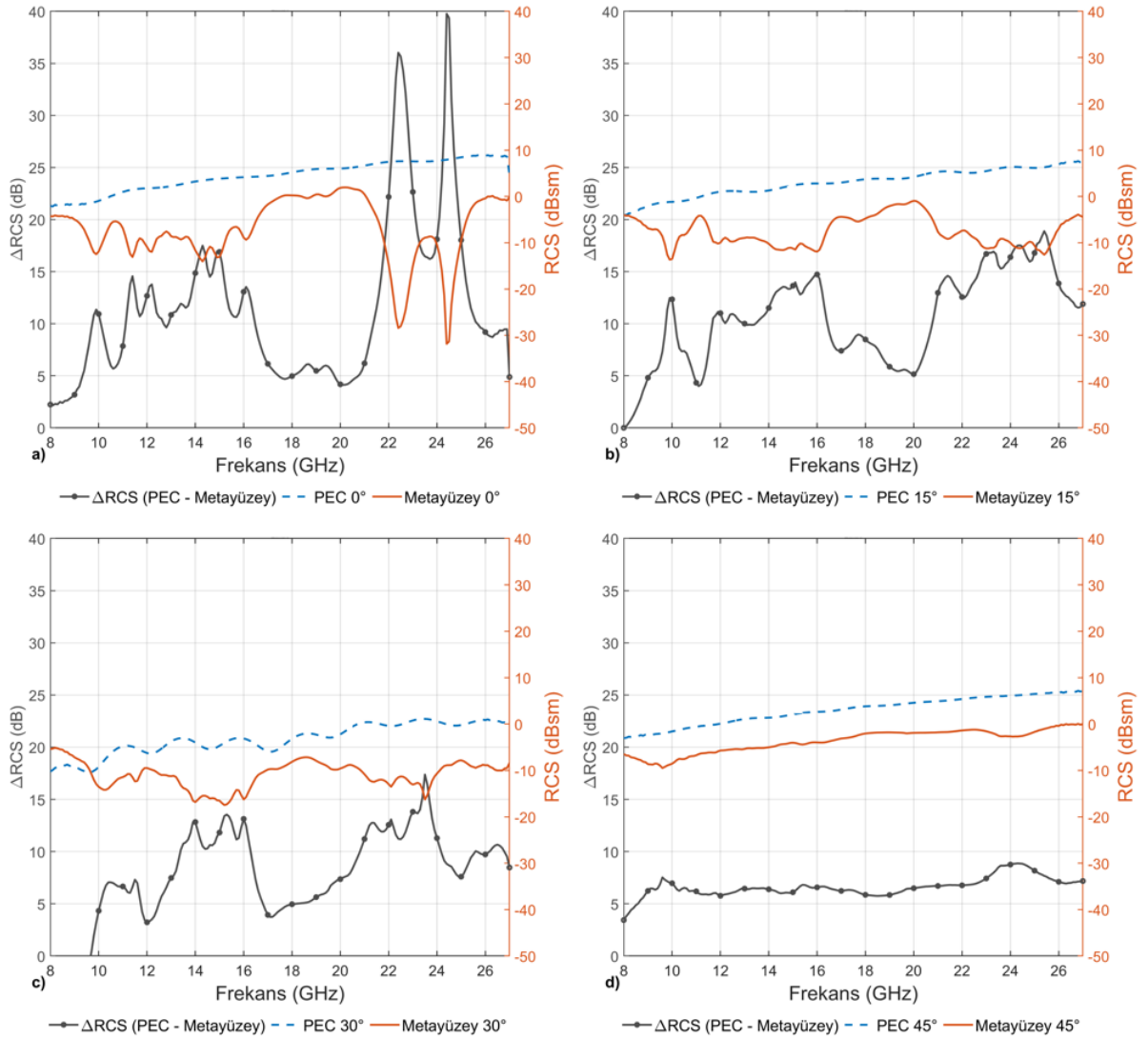
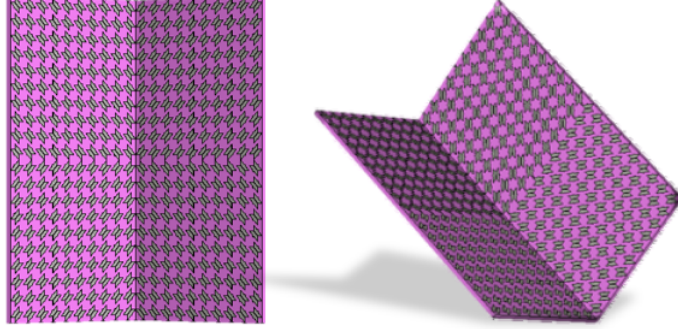


Şekil 64. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 15,60 GHz, (b) 17,2 GHz, (c) 16 GHz ve (d) 13 GHz

Şekil 64, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 64(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 15,60 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,22 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-24,90$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 33,12 dB değerinde bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 64(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 17,2 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,67 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-2,87$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 11,54 dB değerinde azalma sağlanmıştır. Şekil 64(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 16 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,32 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-13,78$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 21,10 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 64(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 13 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 4,13 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-16,67$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 20,80 dB değerinde bir azalma sağlanmıştır.



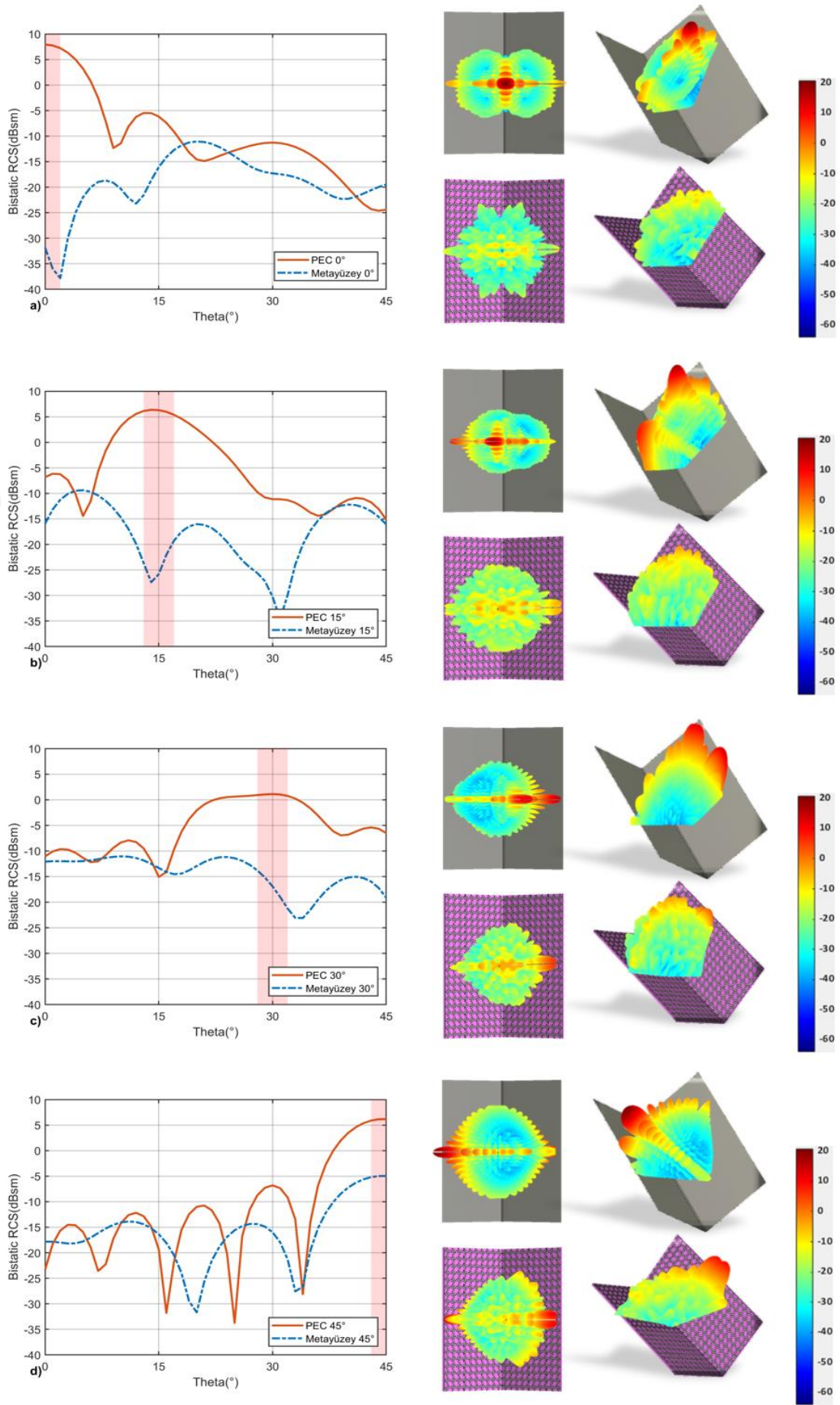
Dihedral plaka



Şekil 65. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 65, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 65(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 24,40 GHz frekansında 39,76 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 9,80–10,00 GHz (0,20 GHz),

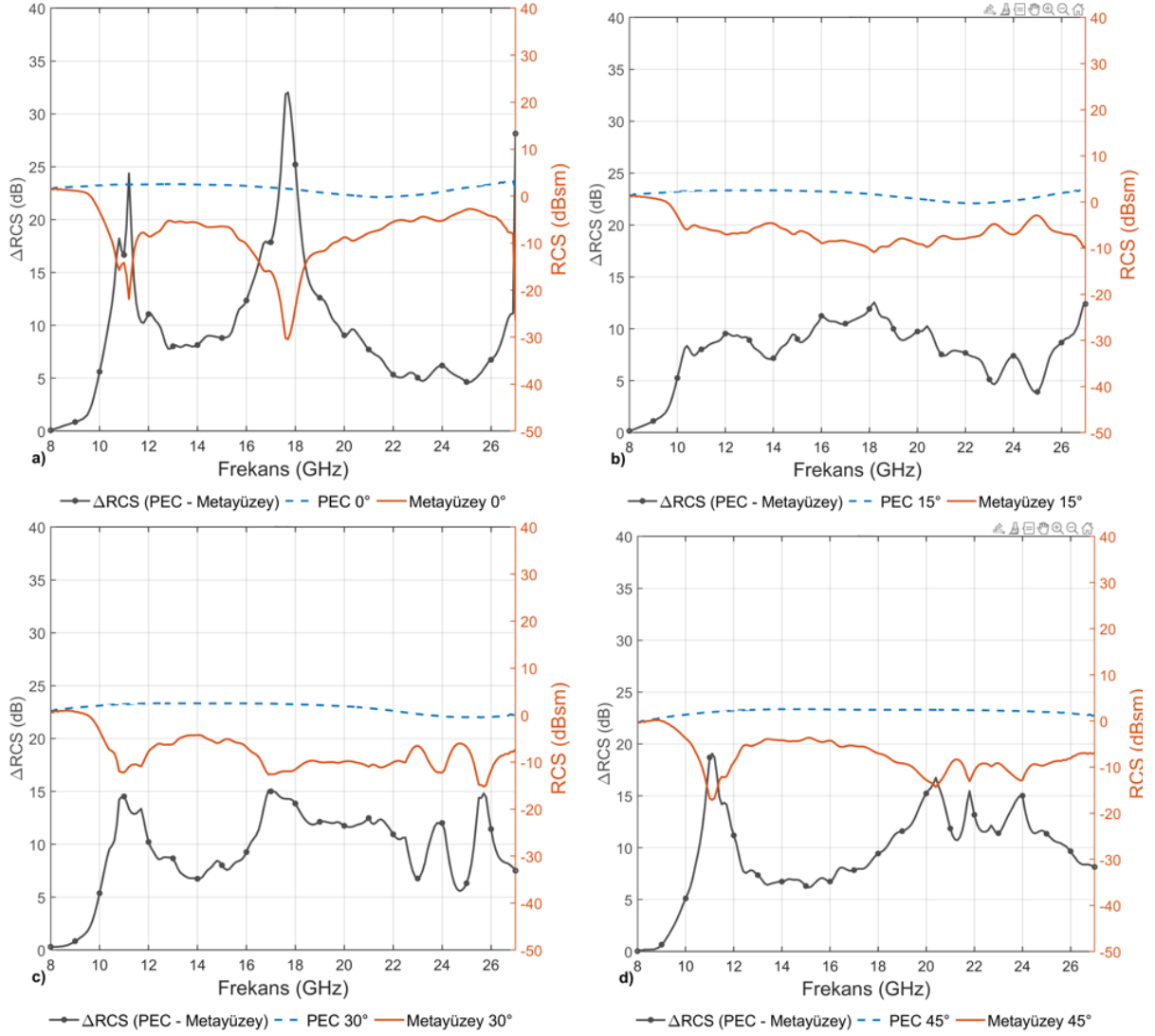
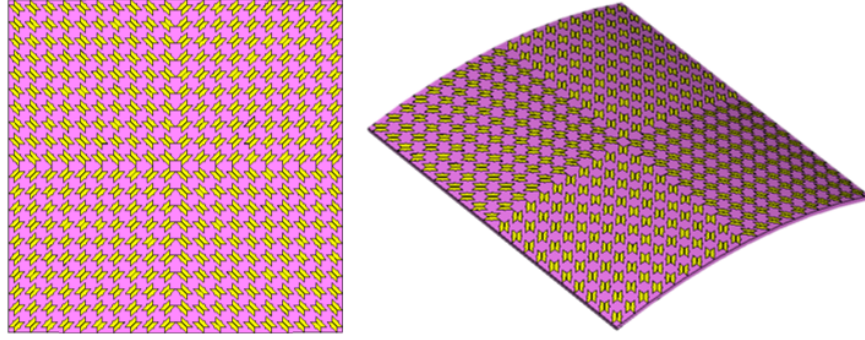
11,20–12,60 GHz (1,40 GHz), 12,90–16,40 GHz (3,50 GHz) ve 21,40–25,60 GHz (4,20 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 9,40–17,40 GHz (8,00 GHz), 18,10–19,70 GHz (1,60 GHz) ve 20,80–26,90 GHz (6,10 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşğinde ise 9,00–27,00 GHz (18,00 GHz) gibi oldukça geniş bir bant sağlanmıştır. Şekil 65(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 25,40 GHz frekansında 18,89 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 11,70–13,00 GHz (1,30 GHz), 13,50–16,40 GHz (2,90 GHz) ve 20,80–27,00 GHz (6,20 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşğinde 9,10–10,90 GHz (1,80 GHz) ve 11,40–27,00 GHz (15,60 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, 3 dB eşğinde ise 8,80–27,00 GHz (18,20 GHz) bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 65(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 23,50 GHz frekansında 17,38 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 13,40–16,20 GHz (2,80 GHz), 20,90–24,10 GHz (3,20 GHz) ve 26,20–26,70 GHz (0,50 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşğinde 10,10–11,70 GHz (1,60 GHz), 12,50–16,70 GHz (4,20 GHz) ve 18,20–27,00 GHz (8,80 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir, 3 dB eşğinde ise 9,90–27,00 GHz frekans bandında 17,10 GHz bant genişliğinde monostatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 65(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 24,30 GHz frekansında 8,87 dB olarak elde edilmiştir, bu nedenle 10 dB eşik değerinde monostatik RCS azalması gözlenmemiştir, 5 dB eşğinde 8,60–27,00 GHz (18,40 GHz), 3 dB eşğinde ise 8,00–27,00 GHz (19,00 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir.



Şekil 66. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 24,4 GHz, (b) 25,4 GHz, (c) 23,5 GHz ve (d) 24,3 GHz

Şekil 66, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 66(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 24,4 GHz frekansında, PEC yüzeyinin RCS değeri 7,92 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-31,84$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 39,76 dB değerinde bir bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 66(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 25,4 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 6,30 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-25,81$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 32,11 dB değerinde bistatik RCS azalması gözlenmiştir. Şekil 66(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 23,5 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,10 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-16,90$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 18,00 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 66(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 24,3 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 6,18 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-4,96$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 11,14 dB değerinde bir azalma görülmektedir.

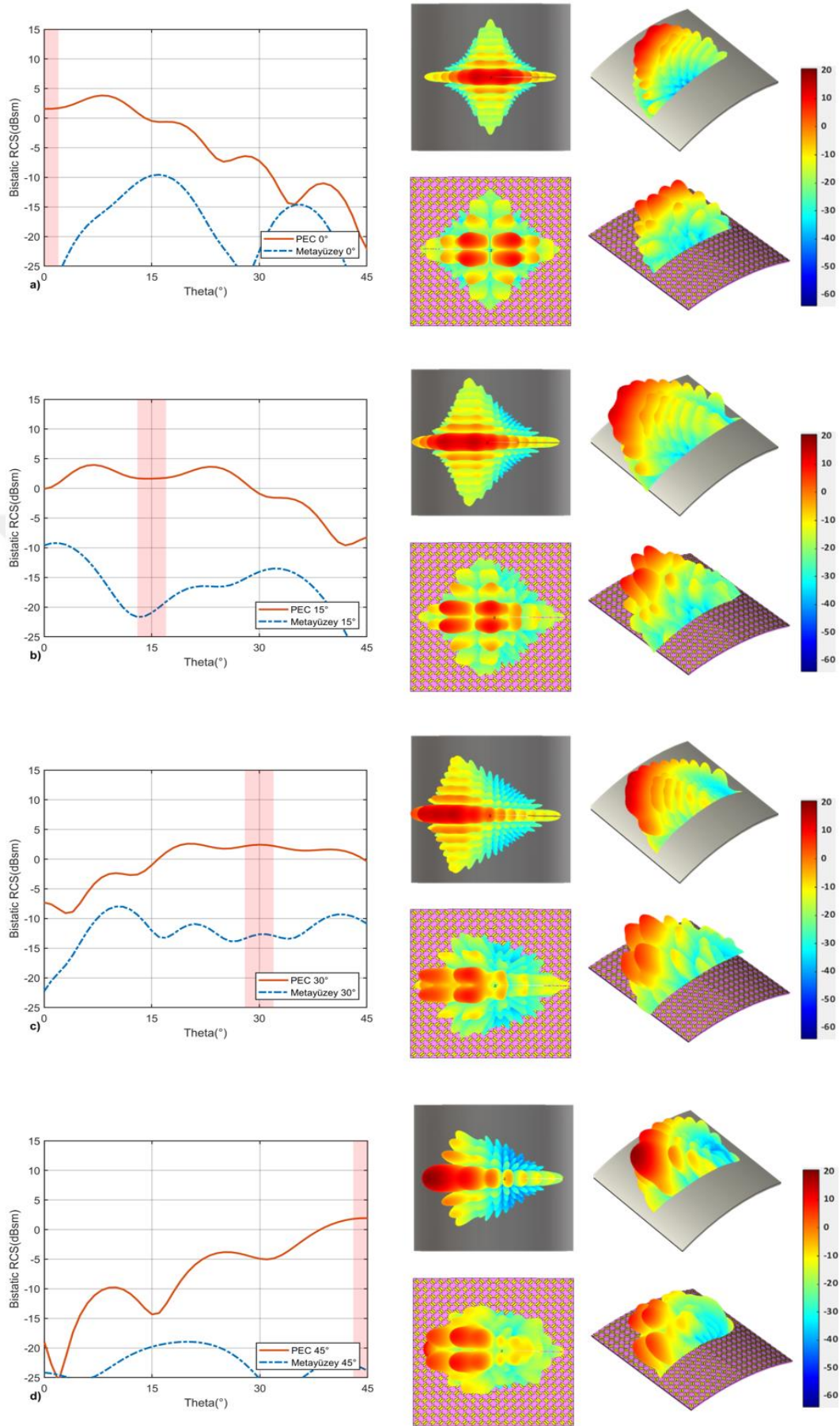
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 67. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 67, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 67(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 17,70 GHz frekansında 32,04 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,40–

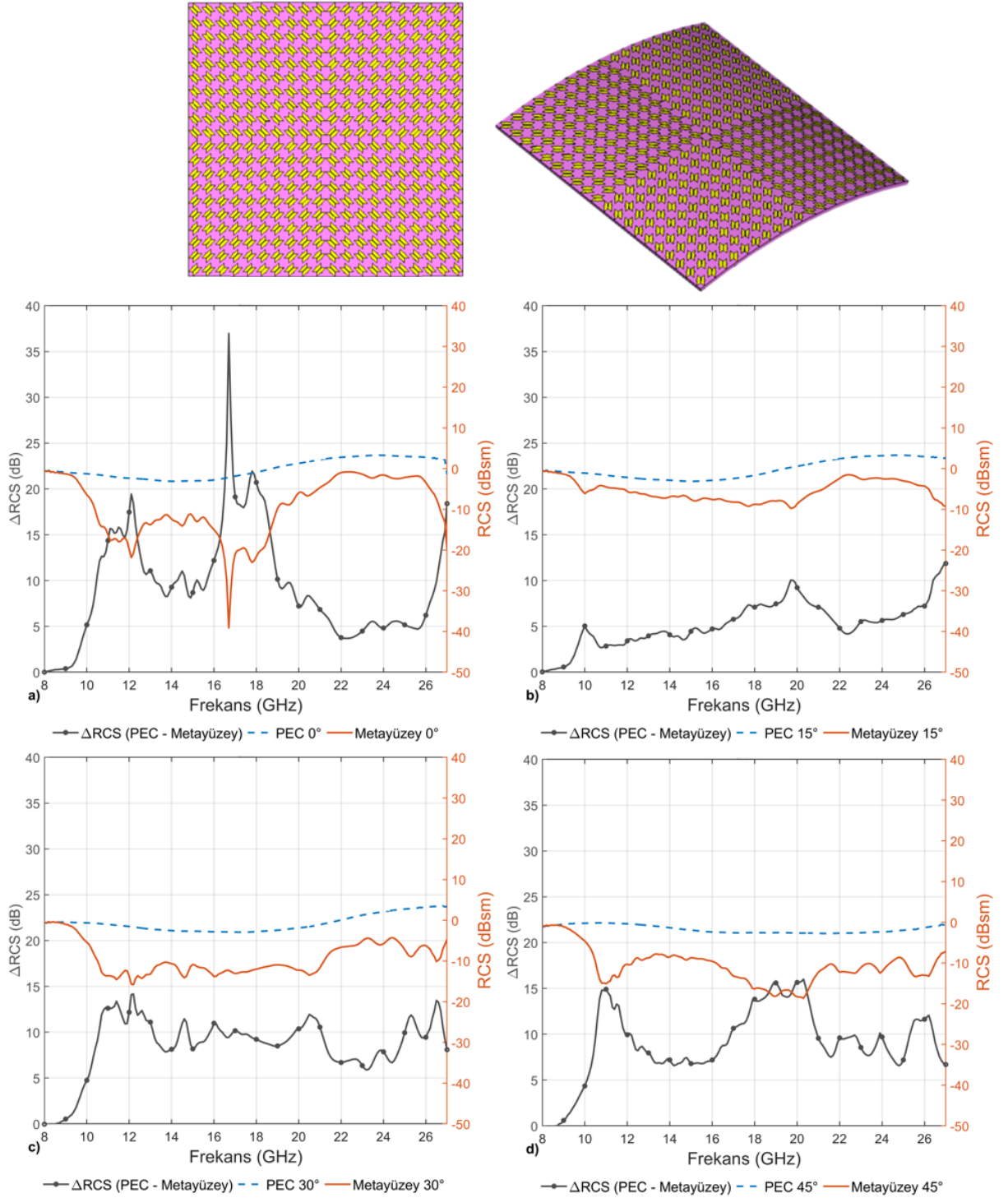
12,40 GHz (2,00 GHz), 15,50–19,70 GHz (4,20 GHz) ve 26,70–27,00 GHz (0,30 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 10,00–23,00 GHz (13,00 GHz), 23,40–24,70 GHz (1,30 GHz) ve 25,40–27,00 GHz (1,60 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 9,80–27,00 GHz (17,20 GHz) gibi geniş bir bant sağlanmıştır. Şekil 67(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 18,20 GHz frekansında 12,55 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 15,70–19,00 GHz (3,30 GHz) ve 26,70–27,00 GHz (0,30 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşiğinde 10,00–23,00 GHz (13 GHz), 23,40–24,50 GHz (1,10 GHz) ve 25,30–27,00 GHz (1,70 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 9,80–27,00 GHz (17,20 GHz) bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 67(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,90 GHz frekansında 15,09 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 10,60–12,00 GHz (1,40 GHz), 16,20–22,50 GHz (6,30 GHz), 23,50–24,10 GHz (0,60 GHz) ve 25,40–26,10 GHz (0,70 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde ise 10,00–27,00 GHz (17,00 GHz) bant genişliği sağlanmıştır, 3 dB eşiğinde de 9,80–27,00 GHz (17,20 GHz) gibi bantları elde edilmiştir. Şekil 67(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 11,10 GHz frekansında 19,08 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 10,60–12,10 GHz (1,50 GHz) ve 18,40–25,80 GHz (7,40 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 10,00–27,00 GHz (17,00 GHz), 3 dB eşiğinde ise 9,70–27,00 GHz (17,30 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir,



Şekil 68. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 17,7 GHz, (b) 18,2 GHz, (c) 16,9 GHz ve (d) 11,10 GHz

Şekil 68, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 68(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 17,7 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,56 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-30,47$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 32,03 dB değerinde bir RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 68(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 18,2 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,64 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-20,96$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 22,60 dB değerinde bistatik RCS azalma değeri gözlenmiştir. Şekil 68(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 16,90 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 2,44 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-12,66$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 15,10 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 68(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 11,10 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,93 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-23,84$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 25,77 dB değerinde bir azalma sağlanmıştır,

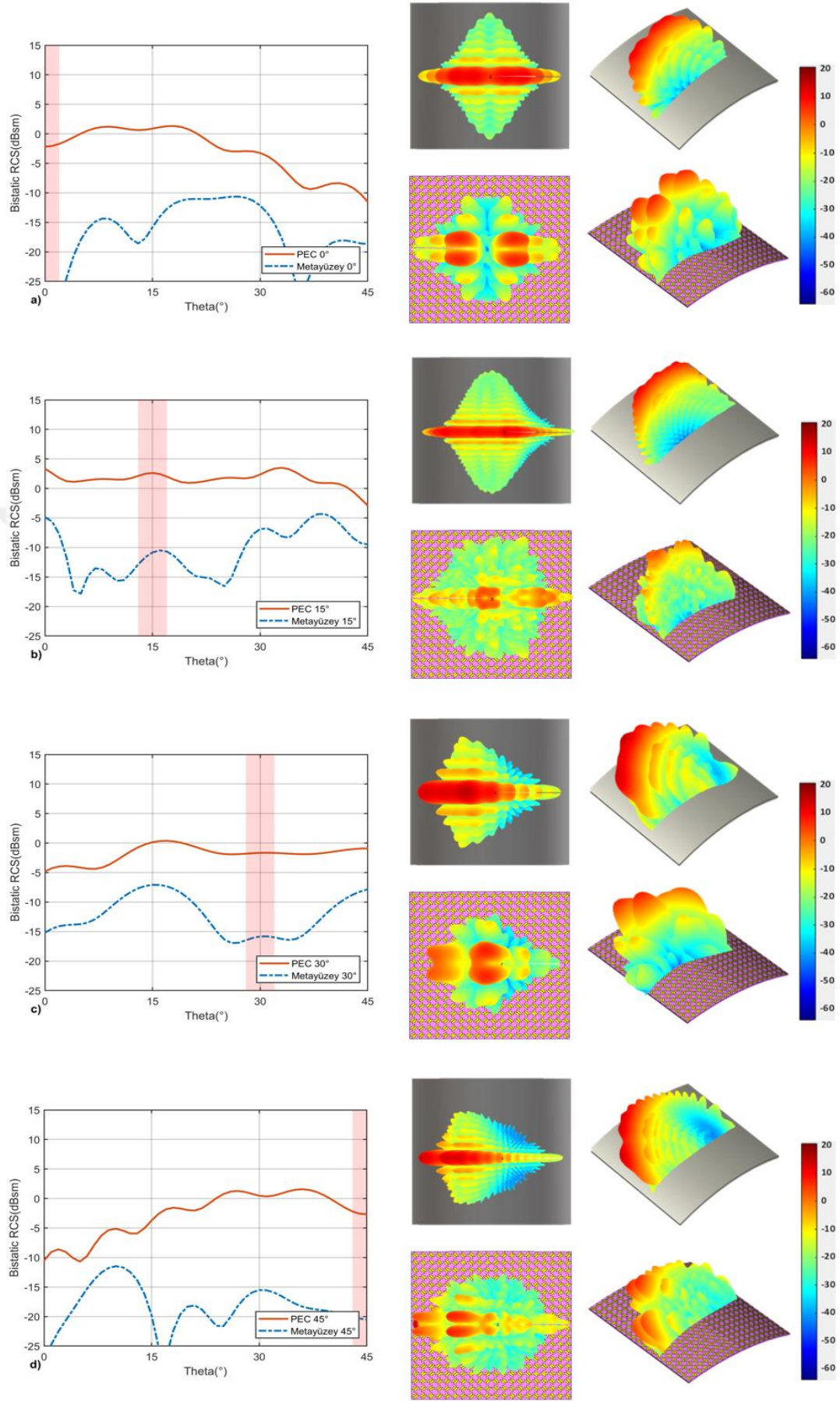
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 69. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 69, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 69(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,70 GHz frekansında 36,97 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,50–

13,10 GHz (2,60 GHz), 14,30–14,60 GHz (0,30 GHz), 15,70–19,00 GHz (3,30 GHz) ve 26,60–27,00 GHz (0,40 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–21,50 GHz (11,50 GHz), 23,20–23,70 GHz (0,50 GHz), 24,20–25,10 GHz (0,90 GHz) ve 25,80–27,00 GHz (1,20 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşğinde ise 9,80–27,00 GHz (17,20 GHz) bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 69(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 27,00 GHz frekansında 11,86 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 26,40–27,00 GHz (0,60 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşğinde 16,60–21,90 GHz (5,30 GHz) ve 22,90–27,00 GHz (4,10 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, 3 dB eşğinde ise 9,70–10,60 GHz (0,90 GHz) ve 11,90–27,00 GHz (15,10 GHz) bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 69(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 12,20 GHz frekansında 14,16 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,60–13,10 GHz (2,50 GHz), 14,40–14,70 GHz (0,30 GHz), 15,90–16,30 GHz (0,40 GHz), 16,90–17,10 GHz (0,20 GHz), 19,90–21,00 GHz (1,10 GHz), 25,10–25,60 GHz (0,50 GHz) ve 26,20–26,80 GHz (0,60 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,10–27,00 GHz (16,90 GHz), 3 dB eşğinde ise 9,70–27,00 GHz (17,30 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 69(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 20,30 GHz frekansında 16,00 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,60–11,90 GHz (1,30 GHz), 16,90–20,90 GHz (4,00 GHz) ve 25,40–26,40 GHz (1,00 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,20–27,00 GHz (16,80 GHz), 3 dB eşğinde ise 9,70–27,00 GHz (17,30 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 70. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 16,70 GHz, (b) 27 GHz, (c) 12,20 GHz ve (d) 20,30 GHz

Şekil 70, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 70(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 16,70 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri $-2,17$ dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-39,14$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 36,97 dB değerinde bir bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 70(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 27 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 2,62 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-10,83$ dBsm'dir, 13,45 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 70(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 12,20 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri $-1,66$ dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-15,82$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 14,16 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 70(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 20,30 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri $-2,67$ dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-20,51$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 17,84 dB değerinde bir bistatik RCS azalması görülmektedir,

Karşılaştırma

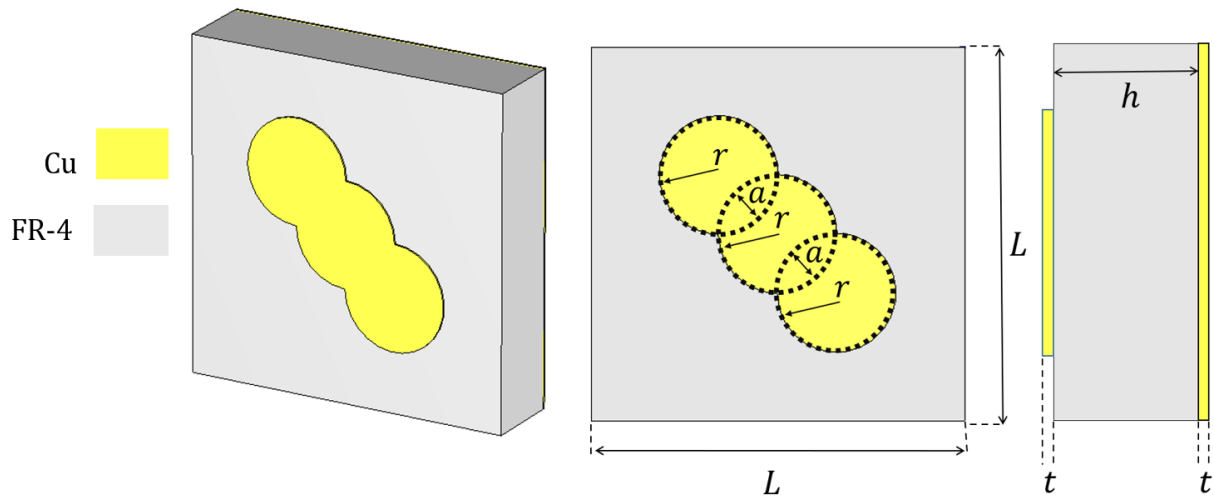
Tablo 5. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku- ve K- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Açı	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Nguyen et al., 2021)	12–18 GHz (LP–LP)	45°	1.6 mm (0.064 λ) (FR-4)	%90	Pol.Dön.
(Yang et al., 2021)	11,9–18,05 GHz (LP–LP)	45°	1.5 mm (0.059 λ) (F4-B)	%90	Pol.Dön.
(Qi Zheng et al., 2018)	9,24–17,64 GHz (LP–LP)	30°	2.0 mm (0.061 λ) (FR-4)	%90	Pol.Dön.
(B.-Q. Lin et al., 2016)	10–18,4 GHz (LP–LP)	40°	3.0 mm (0.100 λ) (F4-B)	%90	Pol.Dön.
(Zhang et al., 2017)	10,3–20,5 GHz (LP–LP)	N/A	3.0 mm (0.100 λ) (F4-B)	%90	Pol.Dön.
(Lin, Huang, Yang, et al., 2022)	7,3–28,7 GHz (LP–CP)	45°	4.4 mm (0.107 λ) (F4B-2)	%90	Pol.Dön. Monostatik ve Bistatik RCS
(Huang et al., 2017)	7,16–15,32 GHz (LP–CP)	45°	3.0 mm (0.081 λ) (F4-B)	%90	Pol.Dön.
(B. Kamal et al., 2021)	5,4–9,0 GHz (LP–LP) 14,6–16,1 GHz (LP–LP)	N/A	3.2 mm (0.057 λ) (RO4003)	%93	Pol.Dön.
(Q. Zheng et al., 2018)	6,53–12,07 GHz (LP–LP) 13,7–15,6 GHz (LP–CP)	45°	3.1 mm (0.067 λ) (FR-4)	%88	Pol.Dön.
(Zheng et al., 2020)	7,74–14,44 GHz (LP–LP) 14,95–17,35 GHz (LP–CP)	30°	3.0 mm (0.077 λ) (FR-4)	%90	Pol.Dön.
(Ozturk & Corapsiz, 2022b)	11,3–11,5 GHz (LP–CP) 12,05–17,9 GHz (LP–LP) 12,05–17,9 GHz (CP–CP)	45°	1.2 mm (0.045 λ) (FR-4)	%90	Pol.Dön.
(Zeng et al., 2020)	7,40–12,20 GHz (LP–LP) 5,71–8,47 GHz (LP–LP)	40°	1.9 mm (0.062 λ) (FR-4)	%90	Pol.Dön. Absorb.
Önerilen Çalışma	12,35–17,8 GHz (LP–LP) 10,85–11,05 GHz (LP–CP) 21,85–27,40 GHz (LP–CP)	50°	1.6 mm (0.057 λ) (FR-4)	%97	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilere

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, X-, Ku- ve K- bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma, Tablo 5'te şu faktörlere göre özetlenmiştir: Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, geliş açısı, dielektrik tabaka kalınlığı ve malzemesi, verimlilik ile Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı. Önerilen dönüştürücü tasarımının açığa bağlı performansı, karşılaştırılan tüm çalışmalardaki tasarımlarla karşılaştırıldığında, önerilen tasarımın 50°'ye kadar olan geliş açılarında %80'in üzerinde PCR değeri koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen polarizasyon dönüştürücü (Yang et al., 2021) (B.-Q. Lin et al., 2016) (Zhang et al., 2017) (Lin, Huang, Yang, et al., 2022) (Huang et al., 2017) (B. Kamal et al., 2021) çalışmalarındaki tasarımlarda kullanılan alt tabaka malzemelerine kıyasla daha ucuz ve yaygın olarak bulunan FR-4 malzemesini kullanmaktadır. Bunlara ek olarak, kıyaslanan tüm çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen tasarımın %97'nin üzerinde bir polarizasyon dönüşüm oranına sahip olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, önerilen polarizasyon dönüştürücü işlevsellik açısından incelendiğinde, farklı geometrilerdeki (düz plaka, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik) yapıların üzerinde, çeşitli geliş açıları (0°, 15°, 30° ve 45°) altında değerlendirilerek RCS analizinin çoklu saçılma senaryolarına genişletildiği görülmektedir. Bu yaklaşım, metayüzeyin performansının daha kapsamlı ve gerçekçi biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

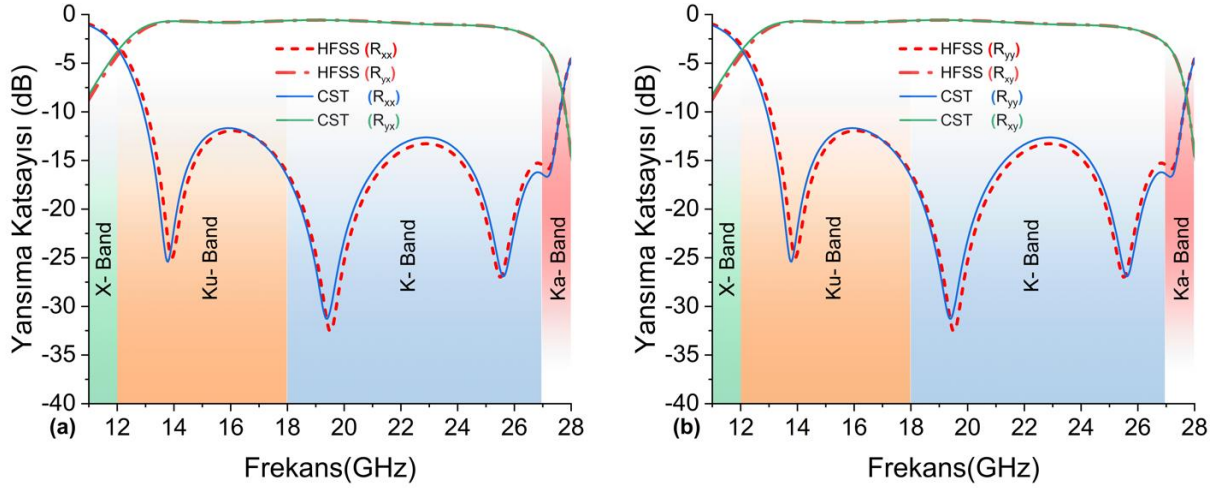
X-, Ku-, K- ve Ka-Bant Uygulamaları için Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 71'de görülmektedir. Rezonatör ve birim hücrenin arka yüzeyi, $t=0,035\text{mm}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Orta katmandaki FR-4 dielektrik tabaka malzemesi, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3(1-j0,025)$ 'dir



Şekil 71. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi

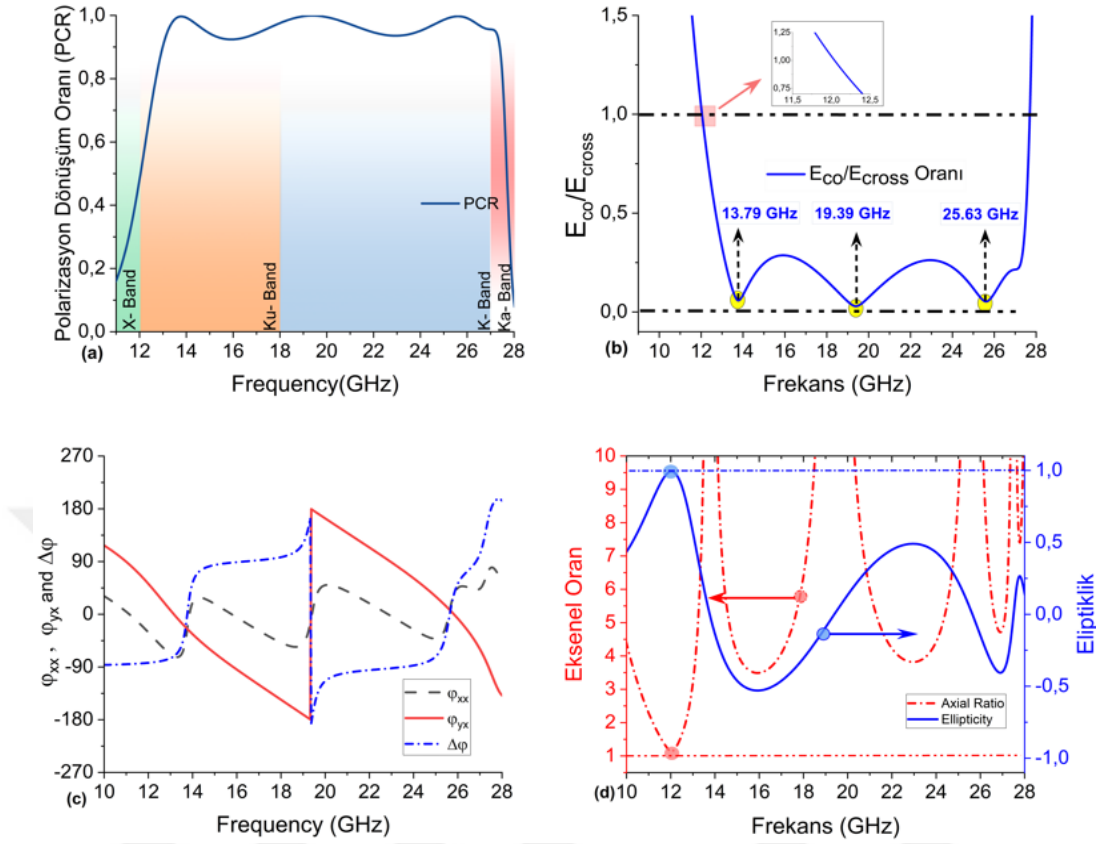
Maksimum bant genişliği ve yüksek PCR verimliliği elde edebilmek amacıyla birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 71’de gösterildiği üzere $L = 6,60$ mm, $r = 1,05$ mm, $a = 1,05$ mm ve $h = 1,6$ mm olarak belirlenmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi, elektromanyetik dalgaların ters yönde yansımaları sağlayarak yapının yansıma modunda çalışmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 72. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu

Şekil 72(a) ve 72(b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 72(a)'da normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansıma katsayısı R_{xx} , 13,01–27,40 GHz bant genişliğinde maksimum -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansıma katsayısı R_{yx} , etkin bant içinde minimum değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, x-polarize dalga için yansıma sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü göstermektedir. Ayrıca, 13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz’de sırasıyla -25,65 dB, -31,63 dB ve -27,53 dB’lik yansıma katsayılarıyla üç rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 72(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Eş polarize yansıma katsayısı R_{yy} , 13,01–27,40 GHz frekans bandında -10 dB’ye düşerken; çapraz-polarize katsayısı R_{xy} , -0,82 dB’ye ulaşmaktadır. Bu değerler, y’den x polarizasyonuna polarizasyon dönüşümünü doğrulamaktadır. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansıma değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu durum, söz konusu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını ve x ile y polarize edilmiş olarak gelen elektromanyetik dalgaların sırasıyla y ve x polarizasyonlu; aynı şekilde y ve x polarize edilmiş olarak gelen dalgaların ise sırasıyla x ve y polarizasyonlu olacak biçimde yansıtıldığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansıma katsayıları ve

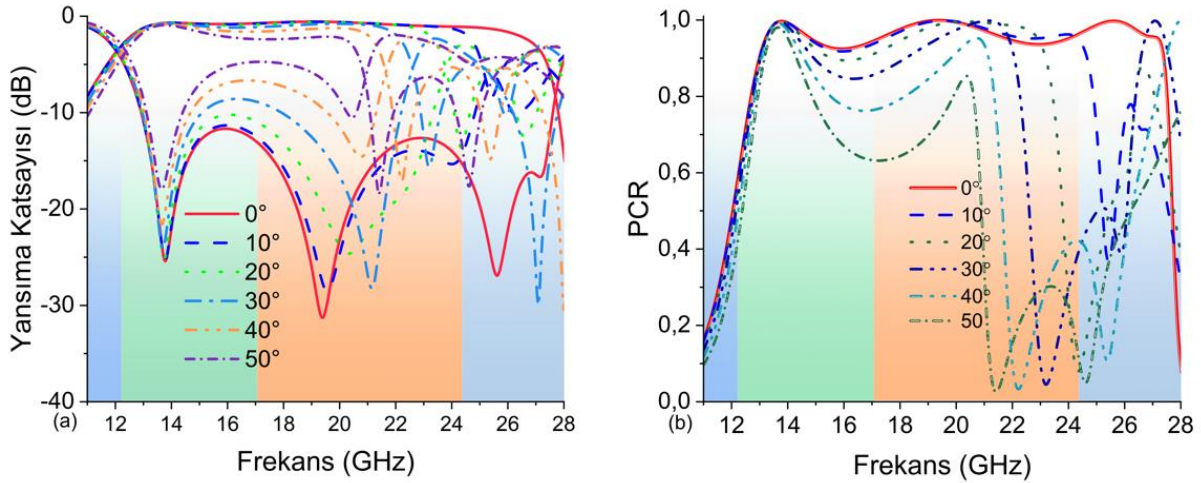
rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 73. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri

Şekil 73(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 13,01–27,40 GHz frekans bandında %90'u aşmakta, Ku- bandını tamamen kapsamaktadır. Şekil 73(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 72'de gösterilen 13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz rezonans frekanslarının, Şekil 73(b)'de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktalara karşılık geldiği görülmektedir. Bu noktalar ayrıca sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 73(a)'da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse

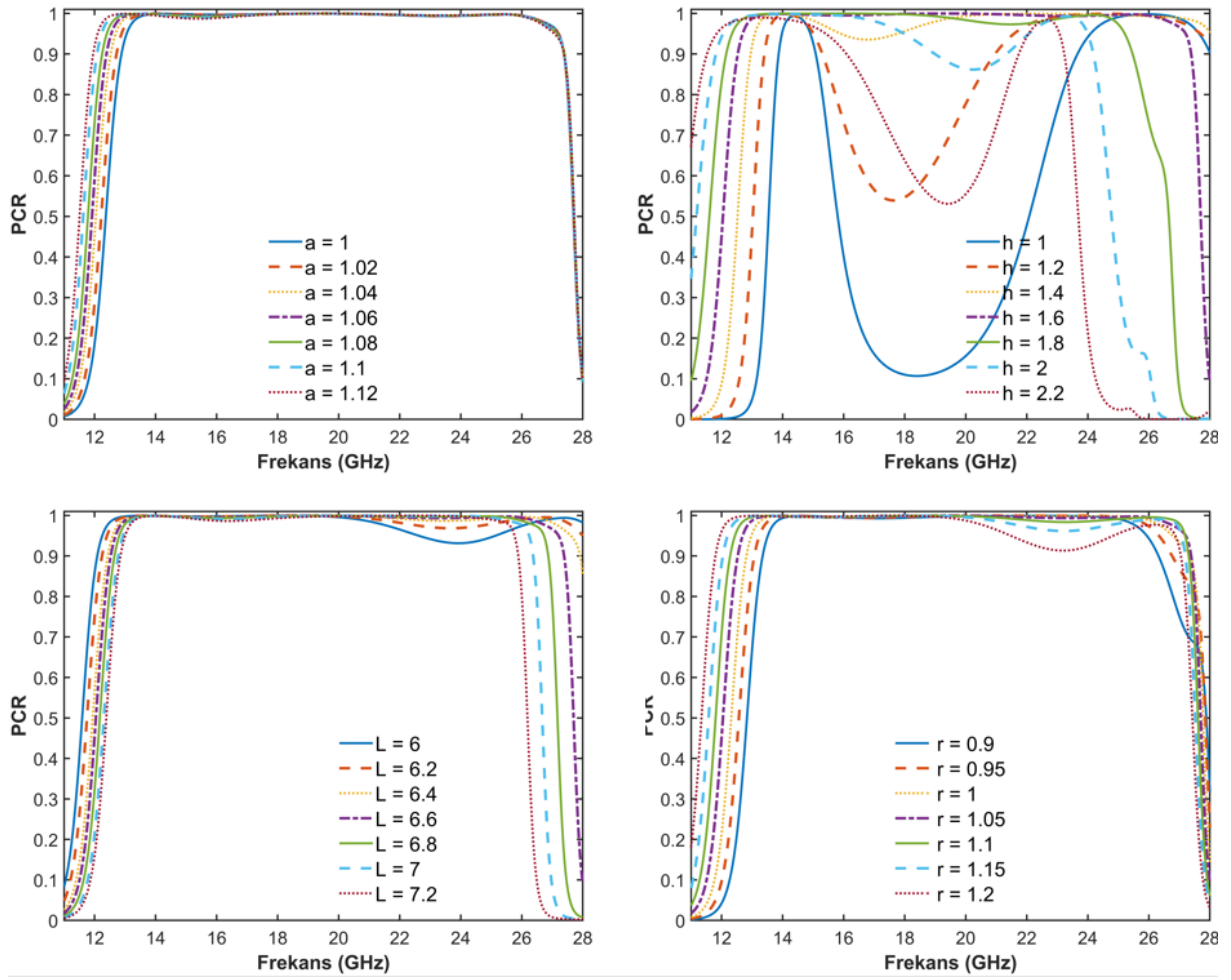
%100'e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 73(d)'de verilmiştir. Grafiğin sağ y eksenini eliptikliği, sol y eksenini ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri grafikte görüldüğü gibi, 11,88-12,19 GHz frekans bandında +1'e ulaşmaktadır; bu nedenle RHCP dönüşümü bu frekans bandında gerçekleşmektedir. Şekil 73(d)'de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 11,88-12,19 GHz frekans bandında 1 dB'ye ulaşarak, bu bantlarda LP-CP dönüşümünün gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde gözlenen yükselme noktalarının sırasıyla 13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz rezonans frekanslarıyla örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, söz konusu frekansların rezonans noktaları olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 73(b)'de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansımaya katsayılarının oranı hem de Şekil 72'de yer alan yansımaya katsayıları incelendiğinde, Şekil 73(c)'de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ 'nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansımaya katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



Şekil 74. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansımaya katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi

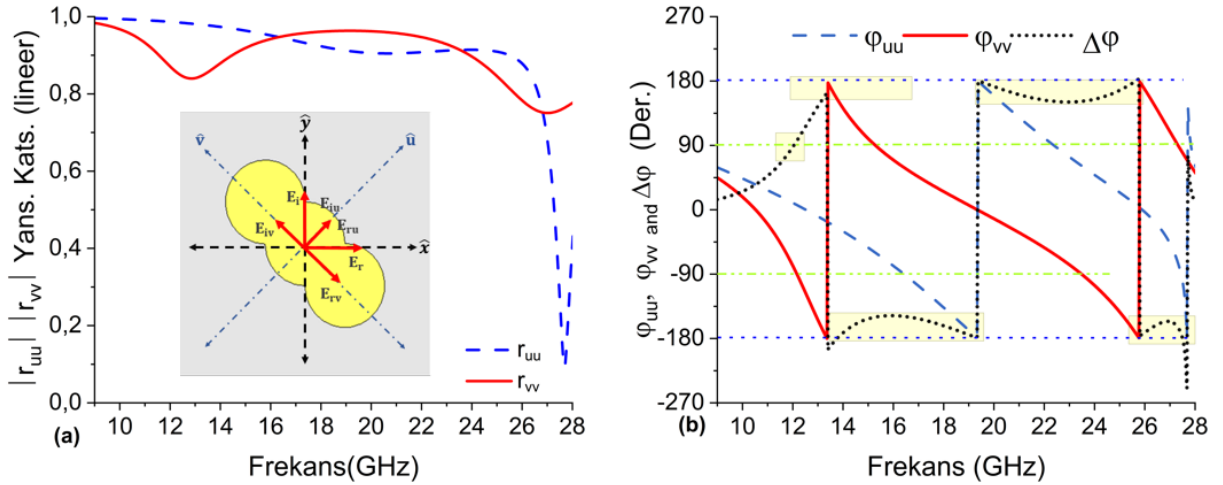
Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açısındaki yansımaya katsayıları Şekil 74(a) ve Şekil 74(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 74(a) ve Şekil 74(b)'de 0° ile 50° arasındaki yansımaya katsayıları ve PCR değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, polarizasyon dönüştürücünün 50° eğik geliş açısındaki PCR performansı değerlendirilmiş ve %70, %80 ve %90 eşik değerleri için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; Özellikle PCR %90 için 13,21–14,30 GHz ($\Delta f = 1,09$ GHz) ve 28,46–29,47 GHz ($\Delta f = 1,01$ GHz) aralıklarında dönüşüm elde edilmiştir. PCR %80 eşliğinde bantlar 12,93–14,85 GHz ($\Delta f = 1,91$ GHz), 19,92–20,62 GHz ($\Delta f = 0,70$ GHz) ve 28,18–29,51 GHz ($\Delta f = 1,33$ GHz) olarak genişlemiştir. PCR %70 seviyesinde ise bantlar daha da genişleyerek 12,78–15,63 GHz ($\Delta f = 2,85$ GHz), 19,06–

20,73 GHz ($\Delta f = 1,68$ GHz) ve 27,64–29,59 GHz ($\Delta f = 1,95$ GHz) değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlardaki Δf ifadesi bant genişliklerini ifade etmektedir.



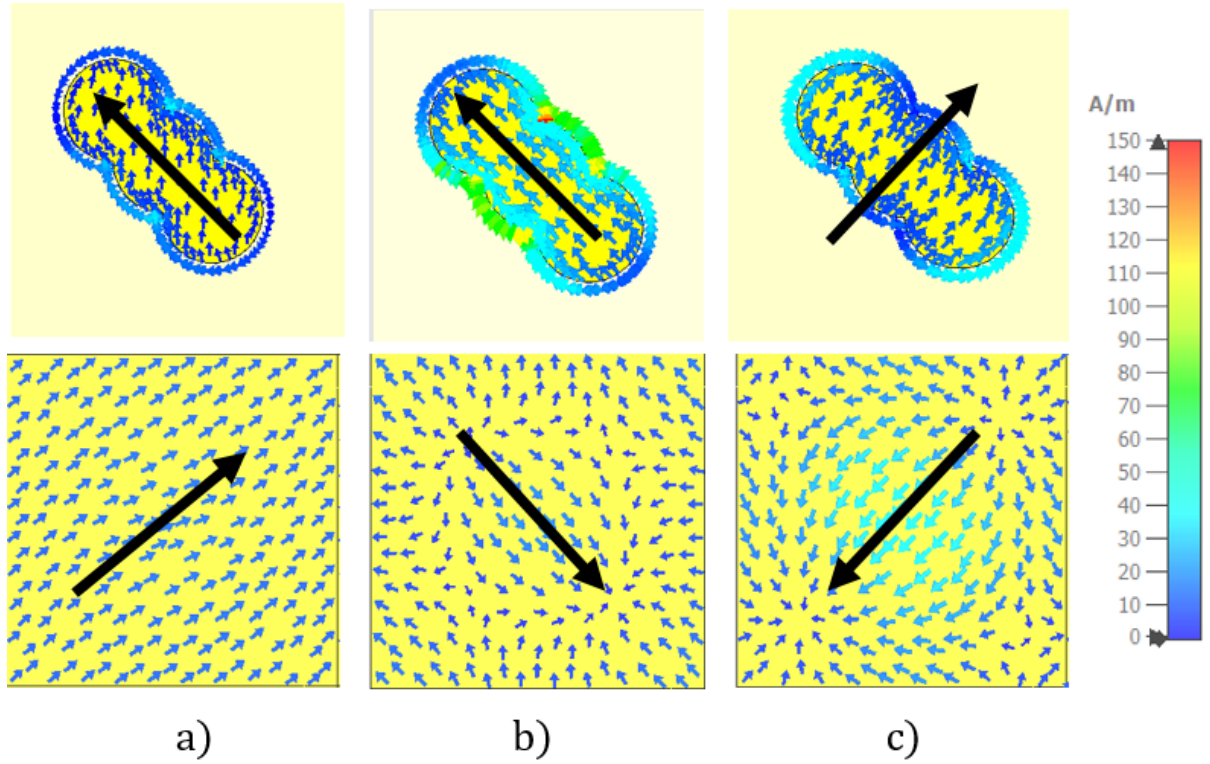
Şekil 75. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $a=1-1,12$ mm (b) $h=1-2,2$ mm (c) $L=6-7,2$ mm (d) $r=0,9-1,2$ mm

Şekil 75'te önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin PCR üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 75'te gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; rezonatörü oluşturan çemberler arasındaki mesafeyi (a), dielektrik tabaka kalınlığıdır (h), birim hücre genişliği (L) ve rezonatörü oluşturan çemberlerin yarıçapını (r), Buradaki temel amaç, geniş bant genişliği ve yüksek PCR oranının birlikte sağlandığı maksimum verim koşulunun elde edilmesi hedeflenir. PCR değerinin maksimum düzeyde olabilmesi için, eş-polarizasyon yansıma katsayısının mümkün olduğunca düşük, çapraz-polarizasyon yansıma katsayısının ise olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. Bu koşullar sağlandığında, PCR en yüksek değerine ulaşır.



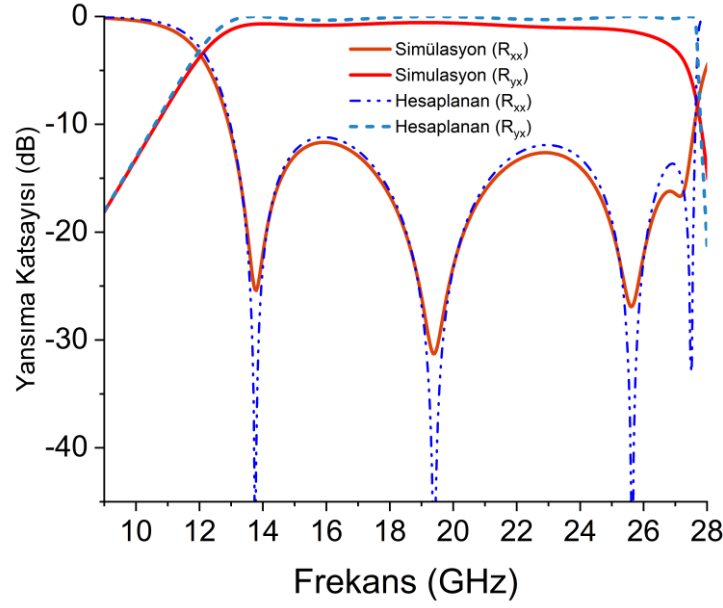
Şekil 76. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 76'da gösterildiği üzere yapı $u-v$ koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 76'da tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 76(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 76(b)'de LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekans 13,01–27,40 GHz aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP-LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 72'de verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz rezonans frekanslarında, y -polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x -polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 76(b)'de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP-CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 73(b)'de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 76'daki faz farkı grafiğinde, 11,88-12,19 GHz bandında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu $\pm 90^\circ$ 'lik faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



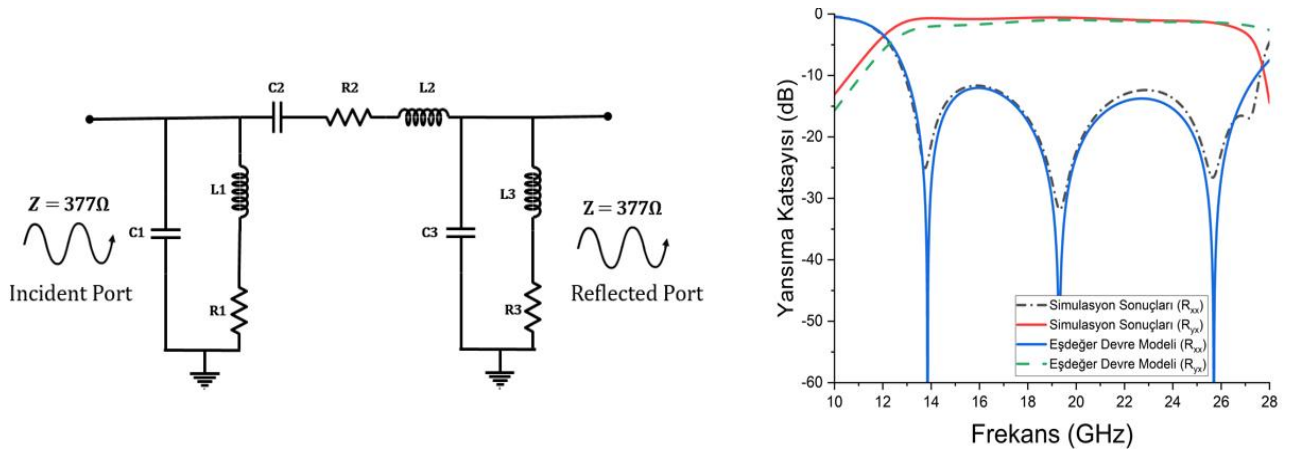
Şekil 77. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 13,79 GHz, (b) 19,39 GHz, (c) 25,63 GHz.

Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları üç farklı rezonans frekansında (13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz) analiz edilmiştir. Şekil 77’de rezonatör ve alt metal katmandaki yüzey akım dağılımları verilmiştir. Üstte rezonatöre, altta ise alt metal katmana ait akım dağılımları gösterilmekte olup, her rezonans frekansında yüzey akımının yönü belirtilmiştir. Üst ve alt metal katmanlardaki yüzey akımlarının paralel olmayan yönelimi nedeniyle, Şekil 77’de de görüldüğü üzere 13,79 GHz, 19,39 GHz ve 25,63 GHz frekanslarında belirgin manyetik rezonanslar oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 78. Önerilen polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

Şekil 78’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u-v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.



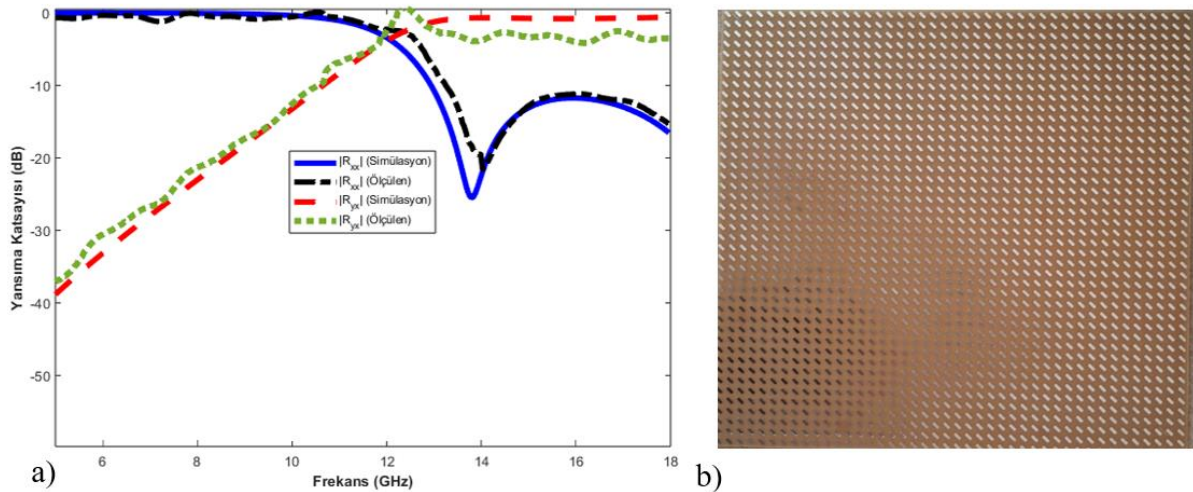
Şekil 79. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları

Şekil 79’da, ADS programı kullanılarak elde edilen eşdeğer RLC devresi ile bu modele karşılık hesaplanan yansıma katsayıları ve simülasyon sonuçları birlikte sunulmuştur. Model, metayüzeyin elektromanyetik tepkisini temsil eden üç direnç (R_1 – R_3), üç indüktör (L_1 – L_3) ve üç kapasitörden (C_1 – C_3) oluşmaktadır. Devre elemanlarının değerleri, yansıma katsayısı

verilerine dayanarak çıkarılmış ve simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Önerilen polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre RLC parametreleri

Devre Elemanı	Değer
R1	1,3094 Ω
R2	39,896 Ω
R3	8,792 Ω
L1	1,844 nH
L2	4,786 nH
L3	1,427 nH
C1	1,427 pF
C2	0,0151 pF
C3	0,038 pF

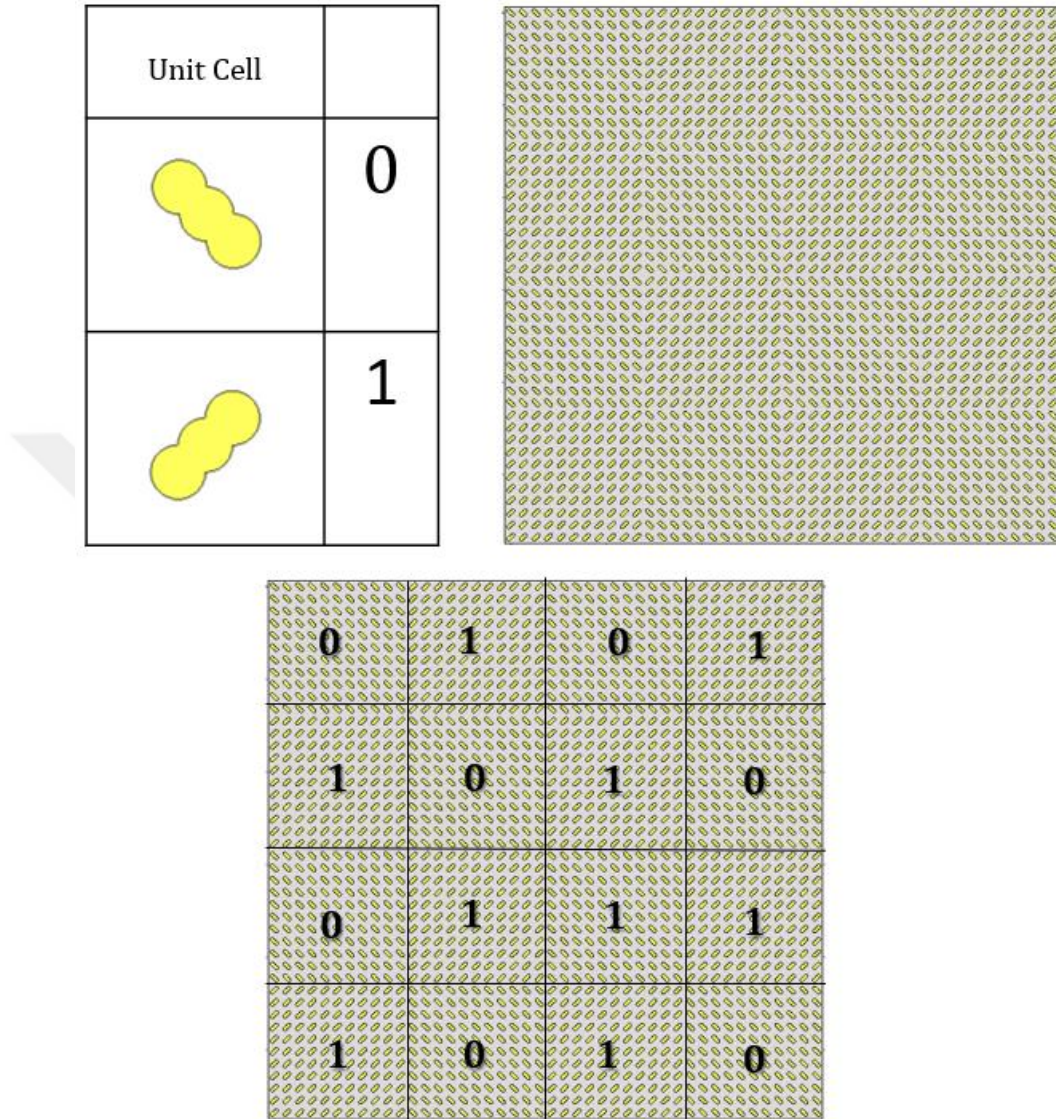


Şekil 80. Önerilen polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 43 x 43 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü yapının doğruluğu, deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Bu amaçla, geleneksel fotolitografi temelli PCB üretim yöntemi kullanılarak bir numune üretilmiş ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üretilen numune, 43 x 43 birim hücreden oluşmaktadır ve toplam boyutu 285 x 285 mm²'dir. Dielektrik tabaka 1,6 mm kalınlığında, bakır iletken katmanlar 35 μ m kalınlığında ve her birim hücrenin kenar uzunluğu 6,6 mm'dir. Dielektrik tabaka, $\tan \delta = 0,025$ ve $\epsilon_r = 4,3$ olan bir FR-4 malzemesidir. Ölçüm sonucunda elde edilen R_{xx} ve R_{yx} değerlerinin simülasyon ve ölçüm karşılaştırması Şekil 80(a)'da verilmiştir. Ölçülen R_{xx} ve R_{yx} tepkilerinin, simülasyon sonuçlarıyla uyum içinde olduğu ve önerilen dönüştürücünün eş polarize ve çapraz polarize yansıma özelliklerini doğruladığı görülmektedir. Simülasyonu gerçekleştirilen ve ölçülen R_{xx} ve R_{yx} arasında yalnızca küçük tutarsızlıklar bulunmaktadır ve bunlar çoğunlukla üretim

toleranslarından ve antenlerin küçük hizalama hataları ve aralarındaki küçük açılı farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

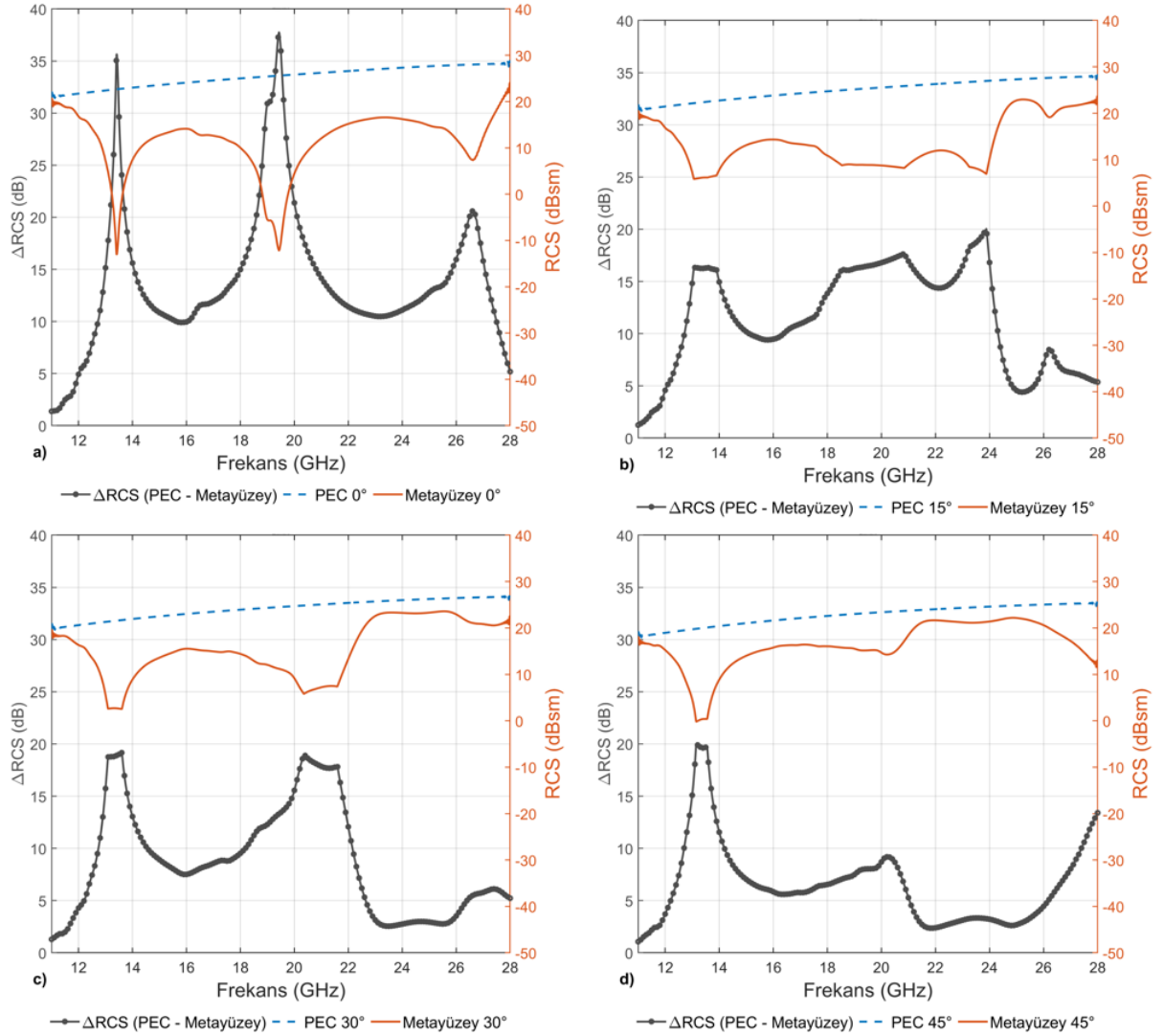
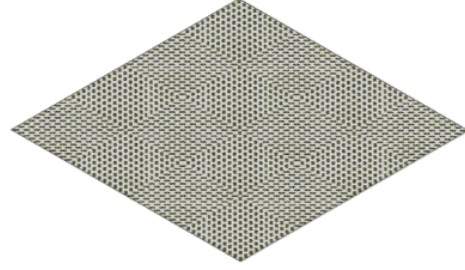
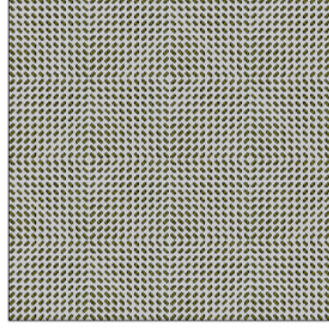


Şekil 81. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 81, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her

bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB'lik azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünümü ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah dairesel çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

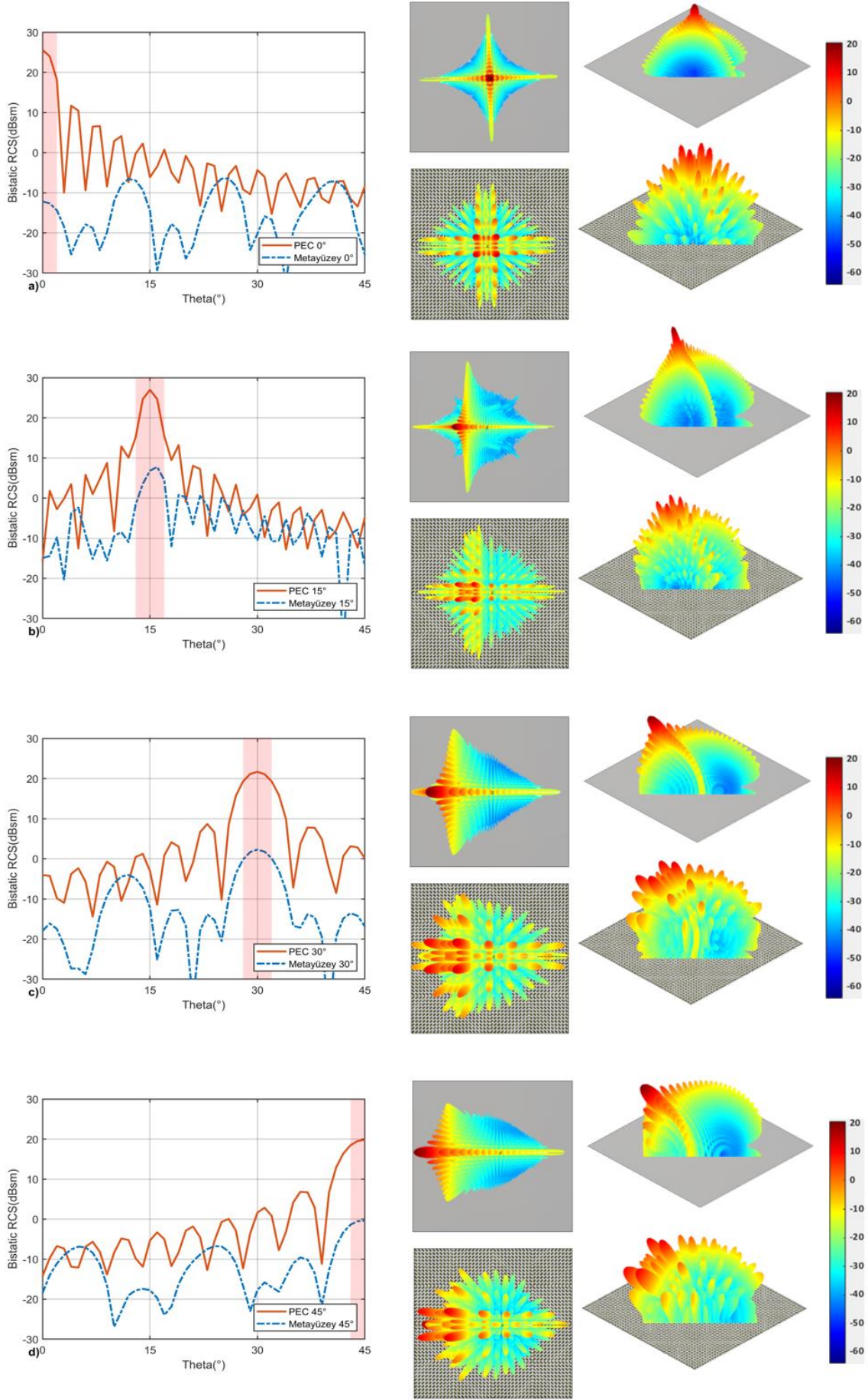
Düz plaka



Şekil 82. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 82, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 82(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 19,43 GHz frekansında 37,76 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 12,73–15,62 GHz (2,89 GHz) ve 16,05–27,49 GHz (11,44 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 12,01–28,00 GHz arasında

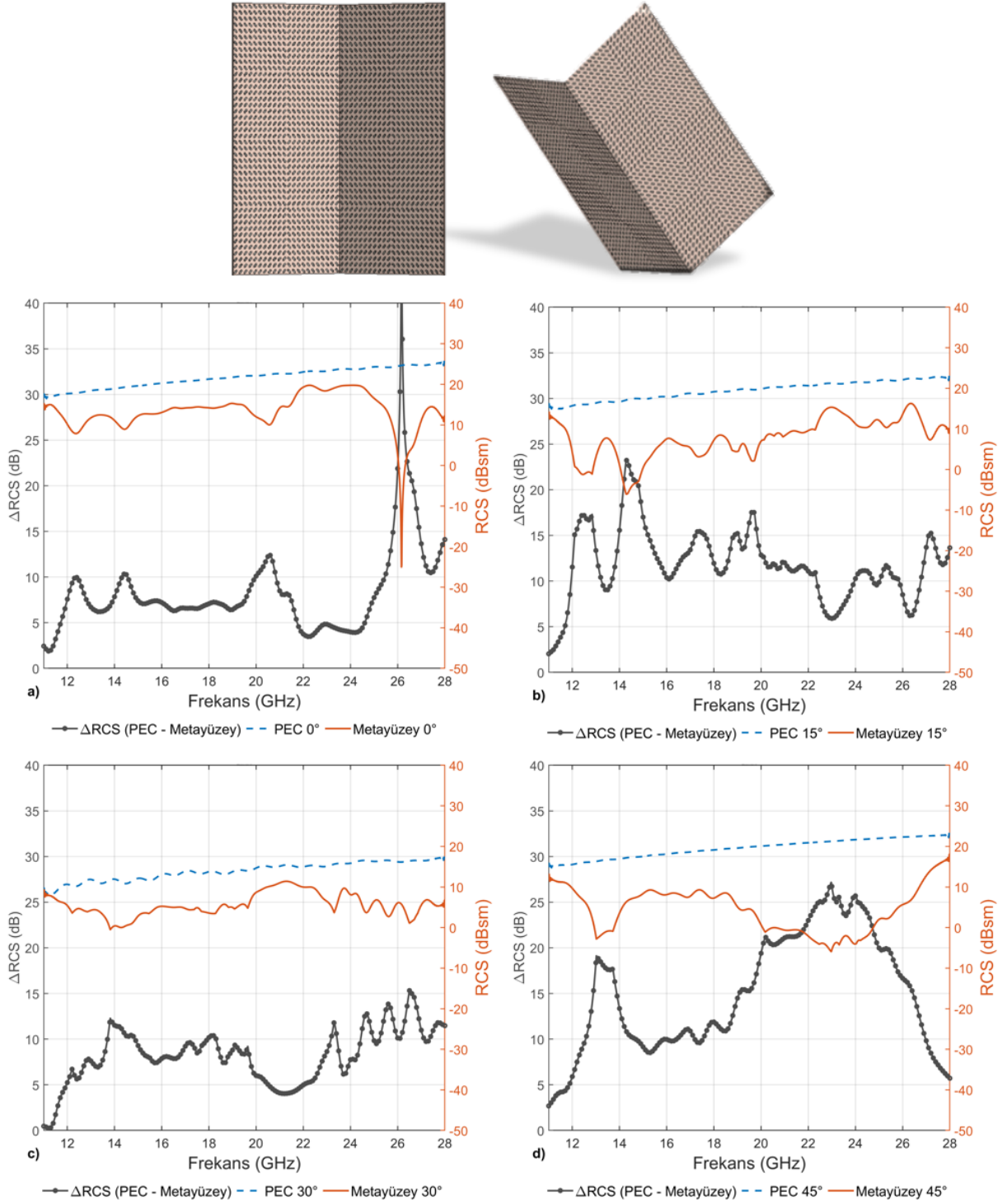
15,99 GHz, 3 dB eşiğinde ise 11,76–28,00 GHz aralığında 16,24 GHz bant genişliği sağlanmıştır. şekil 82(b)’de 15° geliş açısı için maksimum azalma 23,88 GHz frekansında 20,40 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 12,72–15,10 GHz (2,38 GHz) ve 16,39–24,31 GHz (7,92 GHz) bantları oluşmuştur. 5 dB eşiğinde 12,08–24,83 GHz (12,75 GHz) ve 25,65–28,00 GHz (2,35 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 11,78–28,00 GHz aralığında 16,22 GHz bant genişliği gözlenmiştir. şekil 82(c)’de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 13,60 GHz frekansında 19,16 dB olarak gerđekleřmiřtir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 12,74–14,55 GHz (1,81 GHz) ve 18,19–22,15 GHz (3,96 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 12,21–22,64 GHz (10,43 GHz) ve 26,40–28,00 GHz (1,60 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 11,74–23,04 GHz (11,30 GHz) ve 25,80–28,00 GHz (2,20 GHz) bantları sağlanmıştır. şekil 82(d)’de 45° geliş açısı için maksimum azalma 13,15 GHz frekansında 20,00 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 12,70–14,19 GHz (1,49 GHz) ve 27,40–28,00 GHz (0,60 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 12,21–21,03 GHz (8,82 GHz) ve 26,18–28,00 GHz (1,82 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşiğinde ise 11,89–21,40 GHz (9,51 GHz), 22,85–24,29 GHz (1,44 GHz) ve 25,30–28,00 GHz (2,70 GHz) bantları elde edilmiştir.



Şekil 83. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 19,43 GHz, (b) 23,88 GHz, (c) 13,60 GHz ve (d) 13,15 GHz

Şekil 83, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 83(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 19,43 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 25,60 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -12,16 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 37,76 dB'lik bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 83(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 23,88 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 26,96 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 6,81 dBsm'dir. 15° geliş açısı için 20,15 dB'lik bir RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 83(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 13,60 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 21,68 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 2,30 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 19,39 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 83(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 13,15 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 19,82 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -0,41 dBsm'dir. Bu açı için 20,23 dB'lik azalma elde edilmiştir.

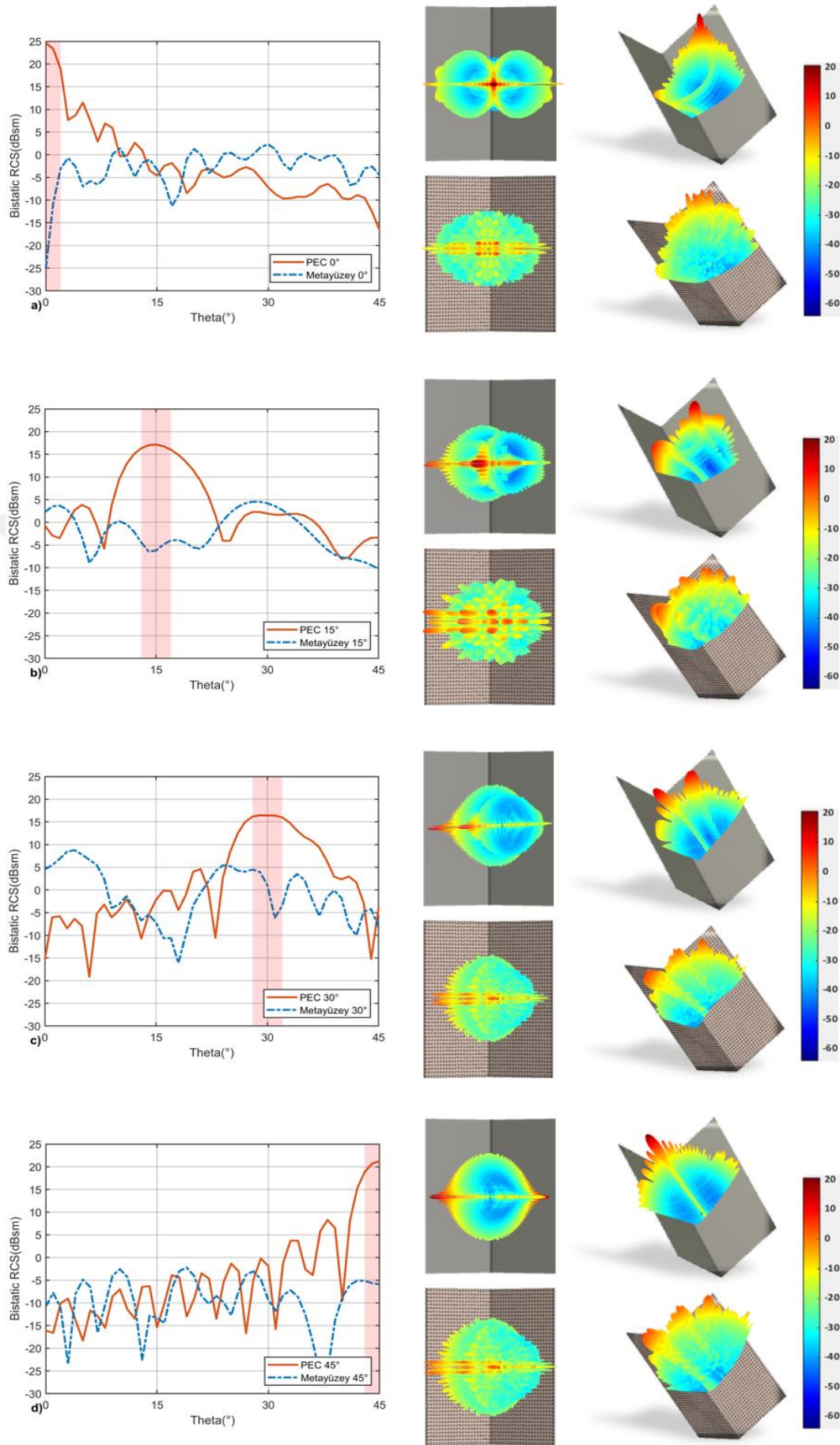
Dihedral plaka



Şekil 84. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 84, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 84(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 26,16 GHz frekansında 49,67 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 14,32–14,55 GHz (0,23

GHz), 19,98–20,84 GHz (0,86 GHz) ve 25,46–28,00 GHz (2,54 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 11,72–21,74 GHz (10,02 GHz) ve 24,61–28,00 GHz (3,39 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşiğinde ise 11,48–28,00 GHz arasında 16,52 GHz bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 84(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 14,29 GHz frekansında 23,23 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 11,96–13,23 GHz (1,27 GHz), 13,68–22,35 GHz (8,67 GHz), 23,96–24,74 GHz (0,78 GHz) ve 26,77–28,00 GHz (1,23 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 5 dB eşiğinde 11,69–28,00 GHz aralığında 16,31 GHz, 3 dB eşiğinde ise 11,34–28,00 GHz aralığında 16,66 GHz bant genişliği elde edilmiştir. Şekil 84(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 26,50 GHz frekansında 15,32 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 13,71–14,87 GHz (1,16 GHz), 17,95–18,30 GHz (0,35 GHz), 23,18–23,43 GHz (0,25 GHz), 24,44–24,97 GHz (0,53 GHz), 25,24–27,12 GHz (1,88 GHz) ve 27,35–28,00 GHz (0,65 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 11,97–20,51 GHz (8,54 GHz) ve 22,02–28,00 GHz (5,98 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 11,63–28,00 GHz aralığında 16,37 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 84(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 22,97 GHz frekansında 27,17 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 12,57–14,67 GHz (2,10 GHz), 16,43–17,18 GHz (0,75 GHz) ve 17,54–26,97 GHz (9,43 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 11,87–28,00 GHz aralığında 16,13 GHz, 3 dB eşiğinde ise 11,10–28,00 GHz aralığında 16,90 GHz bant genişliği elde edilmiştir.

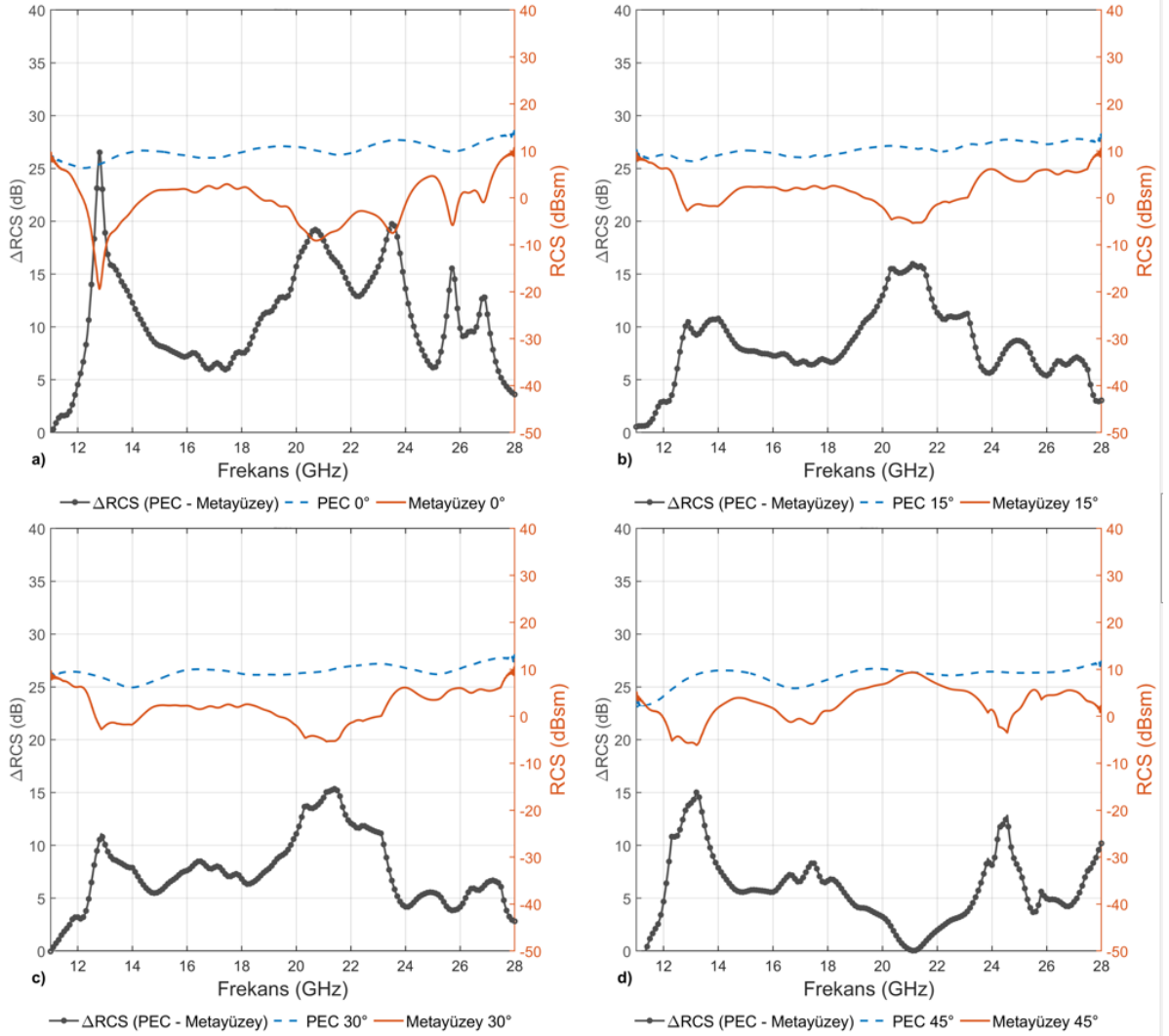
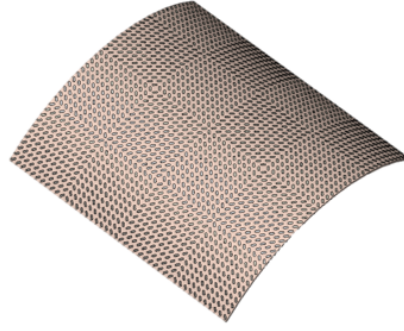
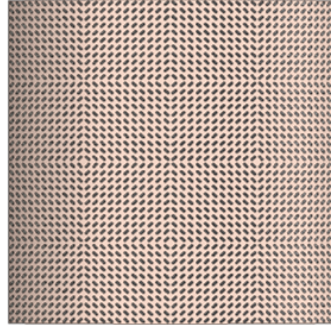


Şekil 85. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 26,16 GHz, (b) 14,29 GHz, (c) 26,50 GHz ve (d) 22,97 GHz

Şekil 85, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 85(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 26,16 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 24,64 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -25,03 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 49,67 dB'lik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 85(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 14,29 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 17,13 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -6,21 dBsm'dir. 23,34 dB RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 85(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 26,50 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 16,41 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 1,07 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 15,34 dB'lik bir azalma sağlanmıştır. Şekil 85(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 22,97 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 21,24 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -5,93 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 27,17 dB'lik bir azalma görülmektedir.



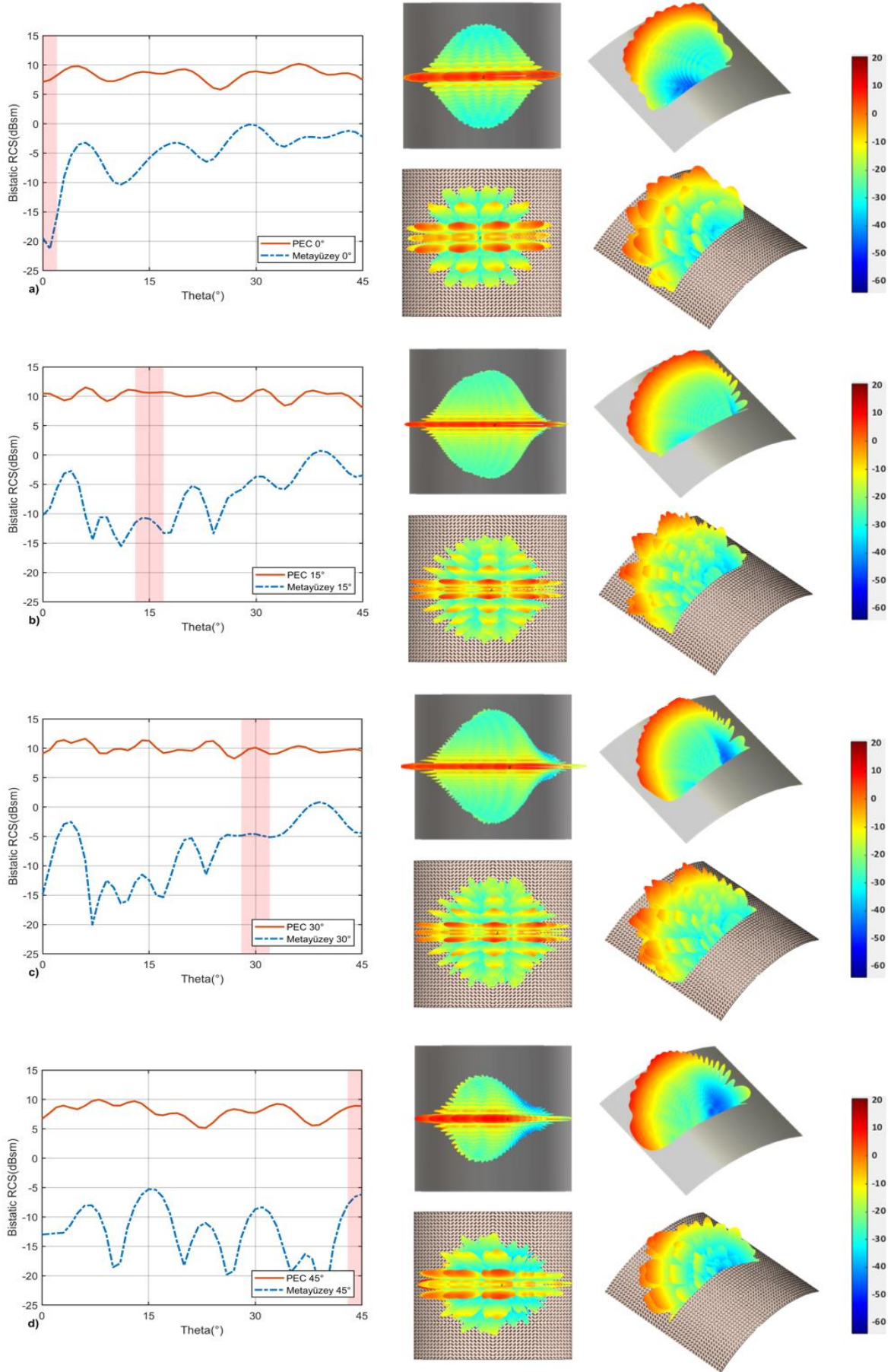
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 86. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 86, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 86(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 12,79 GHz frekansında 26,56 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 12,38–14,45 GHz (2,07 GHz), 18,56–24,30 GHz (5,74 GHz), 25,46–25,99 GHz (0,53 GHz) ve 26,61–

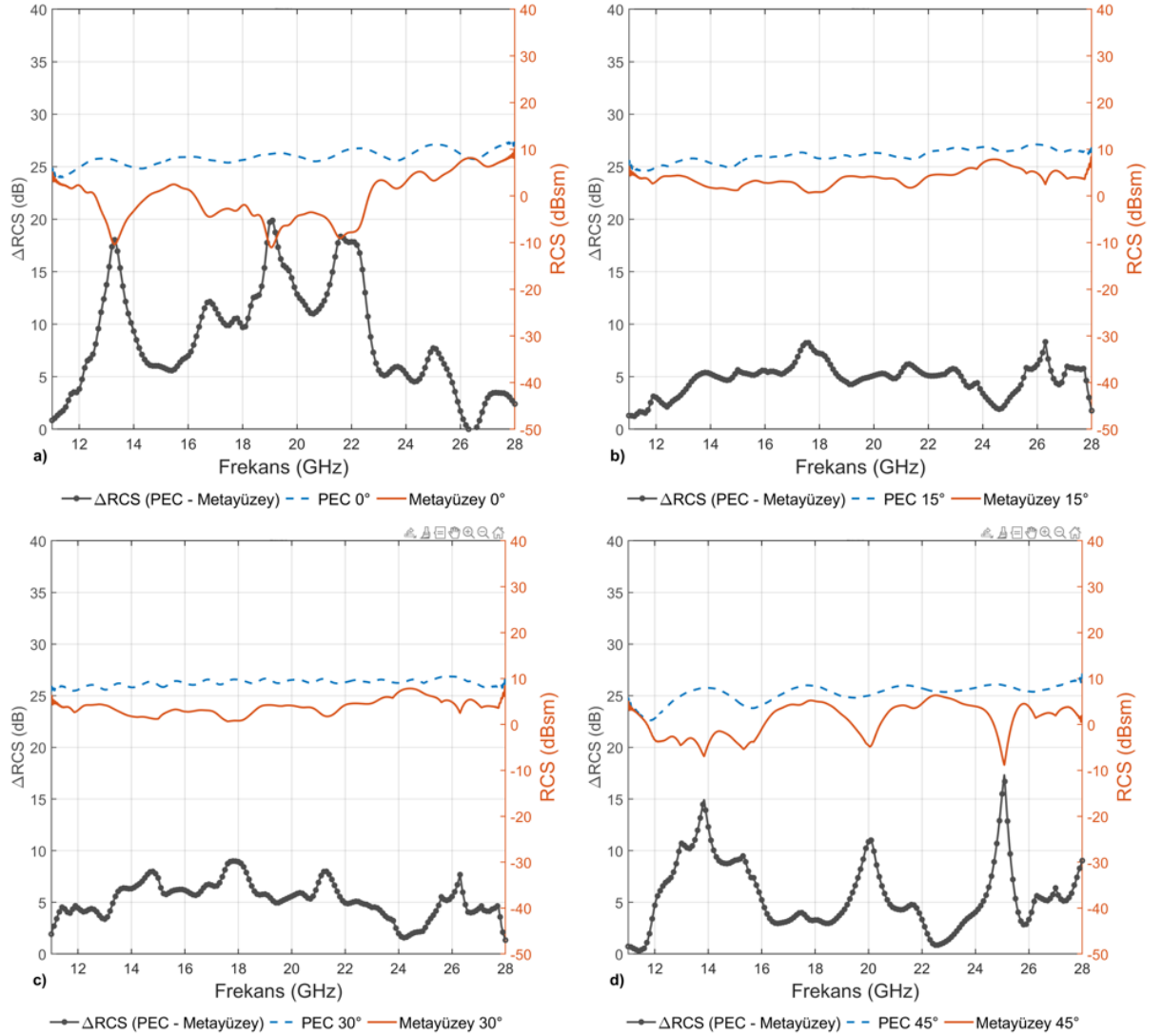
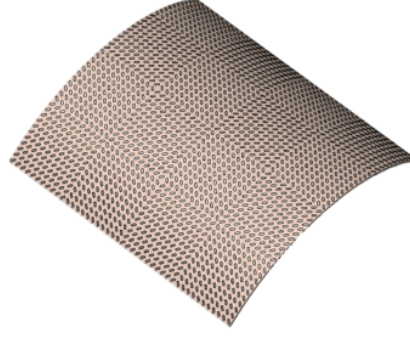
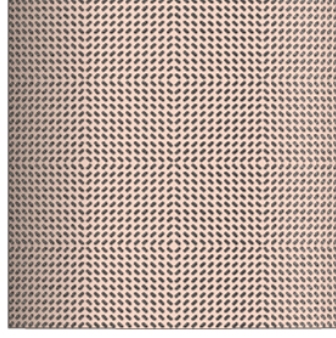
27,06 GHz (0,45 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 12,05–27,53 GHz aralığında 15,48 GHz, 3 dB eşliğinde ise 11,84–28,00 GHz aralığında 16,16 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 86(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 21,10 GHz frekansında 15,97 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 12,80–12,97 GHz (0,17 GHz), 13,47–14,22 GHz (0,75 GHz) ve 19,22–23,23 GHz (4,01 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB eşliğinde 12,44–27,56 GHz aralığında 15,12 GHz bant genişliği sağlanmıştır. 3 dB eşliğinde ise 12,20–27,80 GHz (15,60 GHz) bantları gözlenmiştir. Şekil 86(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 21,43 GHz frekansında 15,38 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 12,76–13,00 GHz (0,24 GHz) ve 19,80–23,20 GHz (3,40 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 12,41–23,73 GHz (11,32 GHz), 24,45–25,31 GHz (0,86 GHz) ve 26,20–27,57 GHz (1,37 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşliğinde ise 11,80–27,88 GHz aralığında 16,08 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 86(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 13,21 GHz frekansında 15,03 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 12,27–13,67 GHz (1,40 GHz) ve 24,18–24,68 GHz (0,50 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 12,03–18,75 GHz (6,72 GHz), 23,39–25,28 GHz (1,89 GHz), 25,76–25,97 GHz (0,21 GHz) ve 27,11–28,00 GHz (0,89 GHz) bantları sağlanmıştır. 3 dB eşliğinde ise 11,86–20,12 GHz (8,26 GHz) ve 22,58–28,00 GHz (5,42 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 87. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 12,79 GHz, (b) 21,10 GHz, (c) 21,43 GHz ve (d) 13,21 GHz

Şekil 87, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 87(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 12,79 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,13 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -19,43 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 26,56 dB'lik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 87(b) $\theta = 15^\circ$ için, 21,10 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 10,60 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -10,86 dBsm'dir, dolayısıyla 21,46 dB RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 87(c) $\theta = 30^\circ$ açısı için, 21,43 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 10,11 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -4,60 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 14,71 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 87(d) $\theta = 45^\circ$ için, 13,21 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,89 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -6,14 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 15,03 dB'lik bir azalma görülmektedir.

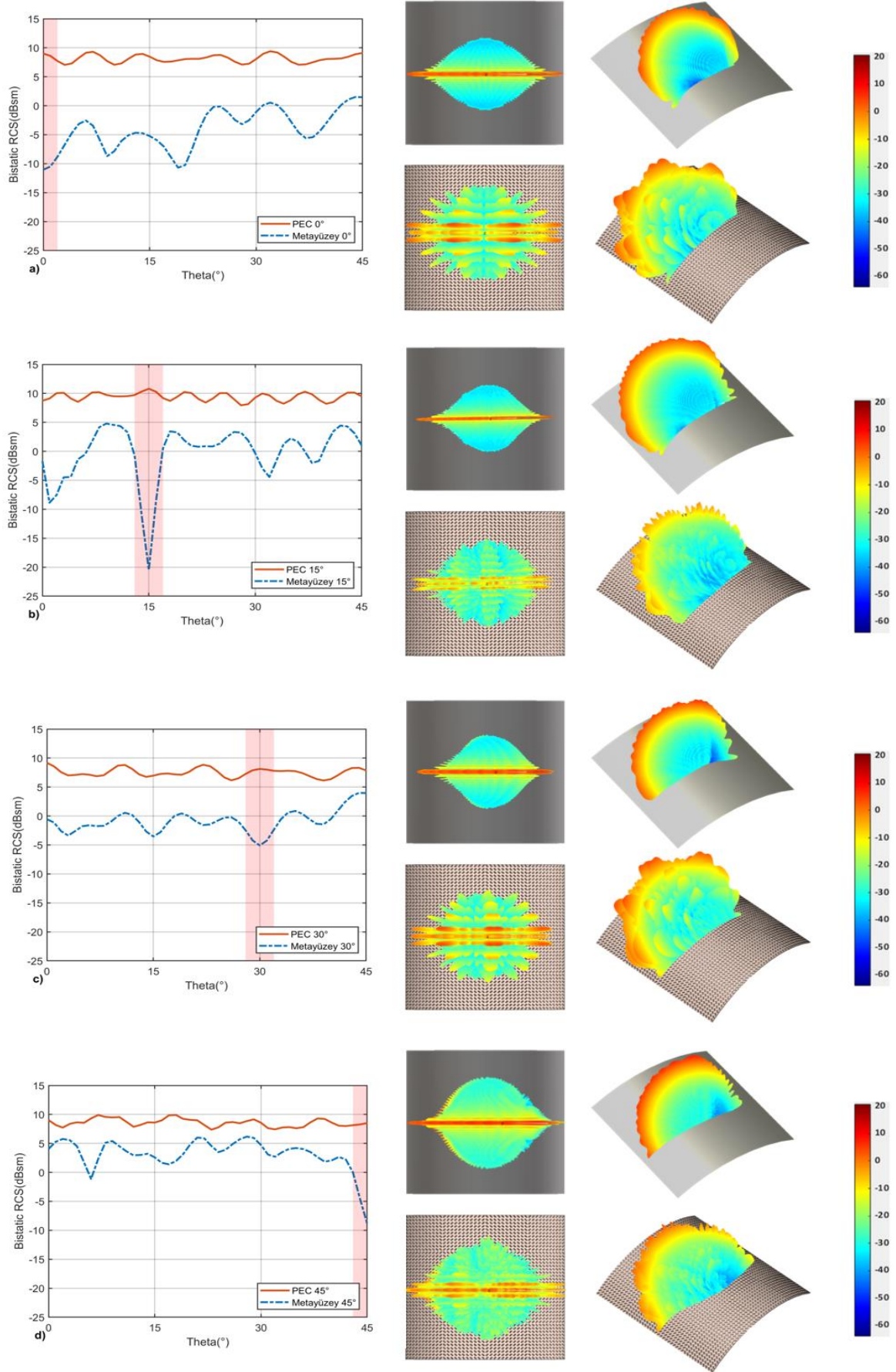
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 88. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 88, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 88(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 19,06 GHz frekansında 20,04 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 12,73–13,91 GHz (1,18 GHz), 16,43–17,34 GHz (0,91 GHz), 17,56–17,92 GHz (0,36 GHz) ve 18,14–

22,63 GHz (4,49 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 12,13–24,07 GHz (11,94 GHz) ve 24,56–25,62 GHz (1,06 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşğinde ise 11,64–25,86 GHz (14,22 GHz) ve 27,01–27,82 GHz (0,81 GHz) bantları elde edilmiştir. Şekil 88(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 26,30 GHz frekansında 8,32 dB olarak gözlenmiştir, bu nedenle 10 dB eşğinde etkin azalma sağlamamıştır. 5 dB eşğinde 13,48–14,23 GHz (0,75 GHz), 14,83–18,70 GHz (3,87 GHz), 19,87–20,57 GHz (0,70 GHz), 20,89–23,21 GHz (2,32 GHz), 25,52–26,57 GHz (1,05 GHz) ve 26,98–27,77 GHz (0,79 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşğinde ise 11,86–12,01 GHz (0,15 GHz), 12,80–24,12 GHz (11,32 GHz) ve 25,00–27,90 GHz (2,90 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 88(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 17,81 GHz frekansında 9,00 dB olarak gerçekleşmiştir, bu bağlamda bu açı için 10 dB eşğinde RCS azalması oluşmamıştır. 5 dB eşğinde 13,32–19,36 GHz (6,04 GHz), 19,54–21,96 GHz (2,42 GHz), 22,28–22,55 GHz (0,27 GHz) ve 25,54–26,47 GHz (0,93 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşğinde ise 11,16–23,82 GHz (12,66 GHz) ve 25,09–27,83 GHz (2,74 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 88(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 25,08 GHz frekansında 17,32 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 12,91–14,20 GHz (1,29 GHz), 19,88–20,19 GHz (0,31 GHz) ve 24,77–25,28 GHz (0,51 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 12,03–16,03 GHz (4,00 GHz), 19,25–20,74 GHz (1,49 GHz), 24,28–25,52 GHz (1,24 GHz) ve 26,20–28,00 GHz (1,80 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. 3 dB eşğinde ise 11,88–16,48 GHz (4,60 GHz), 16,72–18,34 GHz (1,62 GHz), 18,57–22,04 GHz (3,47 GHz), 23,54–25,73 GHz (2,19 GHz) ve 25,94–28,00 GHz (2,06 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 89. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 19,06 GHz, (b) 26,30 GHz, (c) 17,81 GHz ve (d) 25,08 GHz

Şekil 89, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 89(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 19,06 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,99 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-11,04$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 20,04 dB'lik bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 89(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 26,30 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 10,80 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-20,49$ dBsm'dir. 31,29 dB değerinde RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 89(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısı için, 17,81 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,13 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-5,08$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 13,21 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 89(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 25,08 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,50 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-8,82$ dBsm'dir. Bu geliş açısında 17,32 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir.

Karşılaştırma

Tablo 7. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku-, K- ve Ka-Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

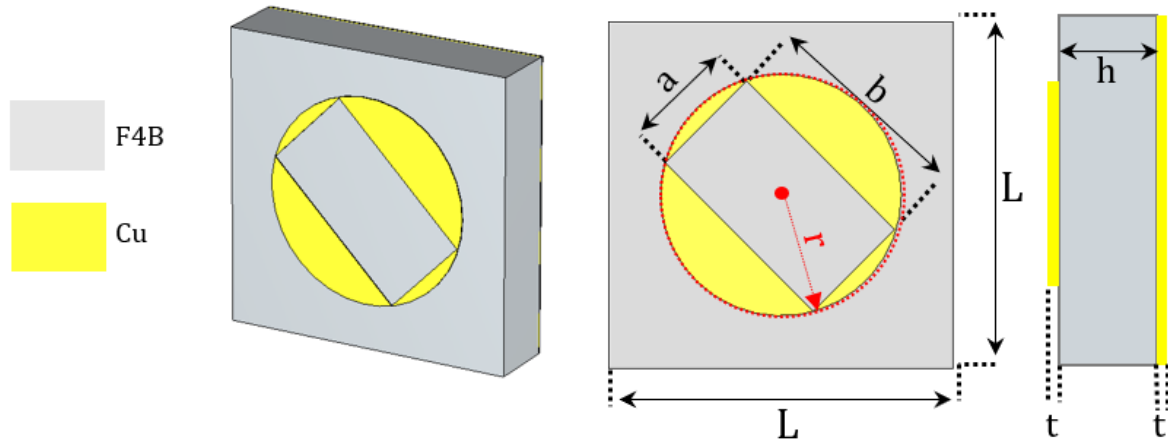
Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Alahmed Albasry et al., 2025)	8,2–12 (LP-LP) 13,85–18 (LP-CP)	1,5 mm FR-4	%90	Pol.Dön. /Monostatik RCS
(Ahmad et al., 2022)	13–26 GHz (LP-LP)	1,6 mm FR-4	%90	Pol. Dön
(Arslan Madak et al., 2024)	12,57–19,30 GHz (LP-LP) 11,52–11,84 GHz (RHCP) 19,83–20,01 GHz (LHCP)	1,6 mm FR-4	%90	Pol. Dön
(Zhou et al., 2025)	13,43–21,36 GHz (LP-LP)	2.5 mm F4B	%90	Pol. Dön
Önerilen Çalışma	13,01–27,40 GHz (LP-LP) 11,88–12,19 GHz (RHCP)	1,6 mm FR-4	%90	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilerde

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, X-, Ku-, K- ve Ka bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılan çalışmalar, Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, dielektrik tabaka kalınlığı ve malzemesi, verimlilik ile fonksiyon ve RCS analiz kapsamı parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Tablo7'de

sunulan karşılaştırma tablosuna göre, (Zhou et al., 2025) çalışması dışındaki karşılaştırılan çalışmaların çoğu FR-4 dielektrik tabaka malzemesi kullanmış ve %90 PCR değeri elde etmiştir. 1,5 mm kalınlığında bir FR-4 alt tabaka kullanılarak, (Alahmed Albasry et al., 2025) tarafından sunulan yapı iki farklı bantta (8,2–12 GHz LP-LP ve 13,85–18 GHz LP-CP) çalışmaktadır. Çalışmanın benzer verimliliğe rağmen sadece monostatik RCS analizi gerçekleştirilmiştir. (Ahmad et al., 2022), (Arslan Madak et al., 2024) ve (Zhou et al., 2025) çalışmalarında önerilen çalışmaya kıyasla yakın bant genişliği ve verimliliğinde LP-LP dönüşümü elde etmesine rağmen fonksiyon RCS analiz kapsamı parametresinde sadece polarizasyon dönüşümü analiz edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücü, Tablo 7’de bulunan çalışmalar ile benzer verimlilik değerleri sağlarken, çalışma bant genişliği ve fonksiyon RCS analiz kapsamında önemli bir iyileştirme sağlamaktadır.

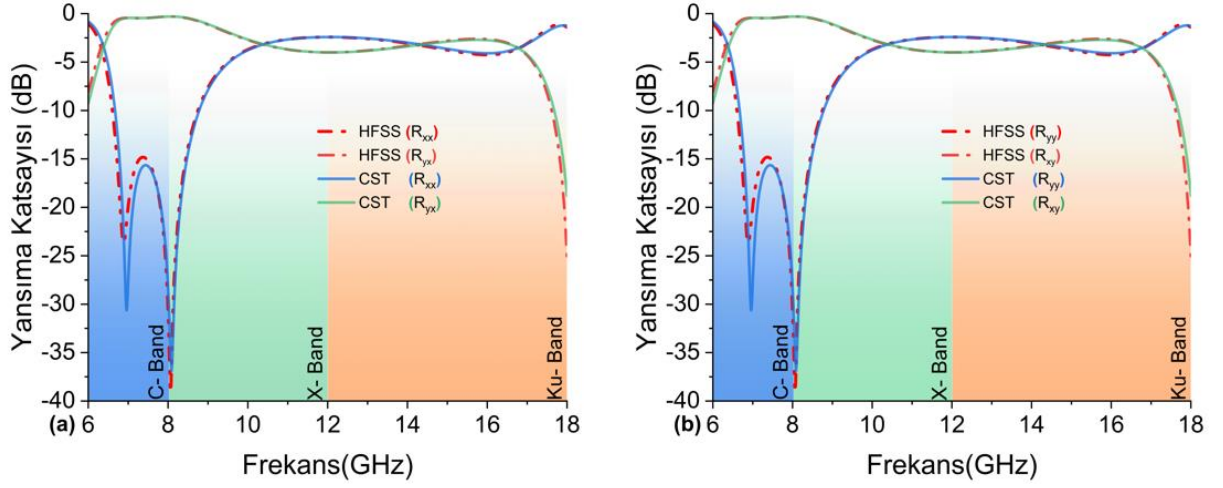
C-, X- ve Ku- Bant Uygulamaları için Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 16’da görülmektedir. Rezonatör hem de birim hücrenin arka yüzeyi, $t=0,035\text{mm}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$ iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Rezonatör ile arka metalik yüzey arasında dielektrik tabaka olarak F4B malzemesi kullanılmıştır; bu malzemenin dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,65(1-j0,01)$ ’dir.



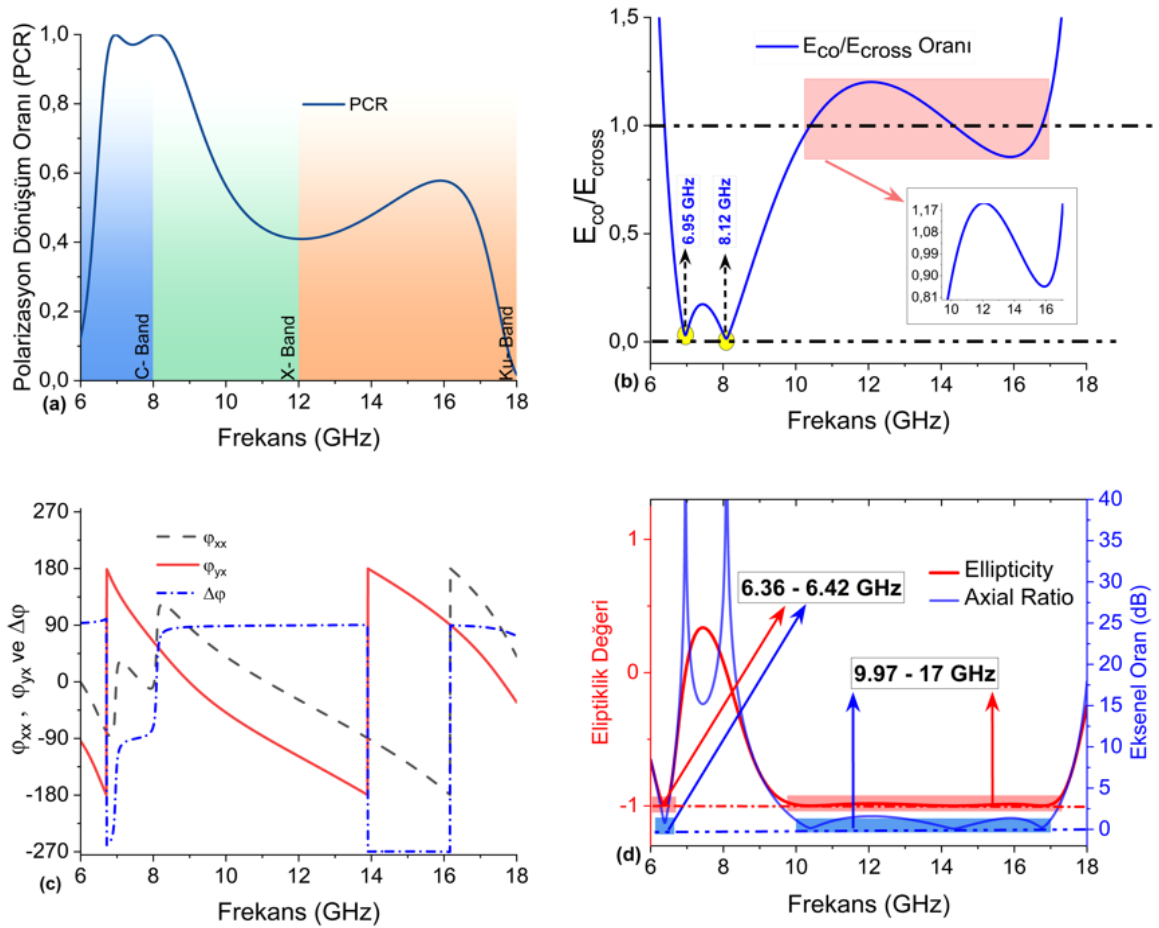
Şekil 90. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi

Maksimum bant genişliği ve yüksek eliptiklik ve eksenel oran verimliliği elde etmek için birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 90’da gösterildiği gibi $L = 12,69 \text{ mm}$, $a = 4,25 \text{ mm}$, $b = 7,71 \text{ mm}$, $r = 4,43$ ve $h = 3 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi sayesinde, gelen dalgalar ters yönde yansılır ve polarizasyon dönüştürücünün yansıma modunda çalışmasına olanak tanır.



Şekil 91. Önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansıma katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu

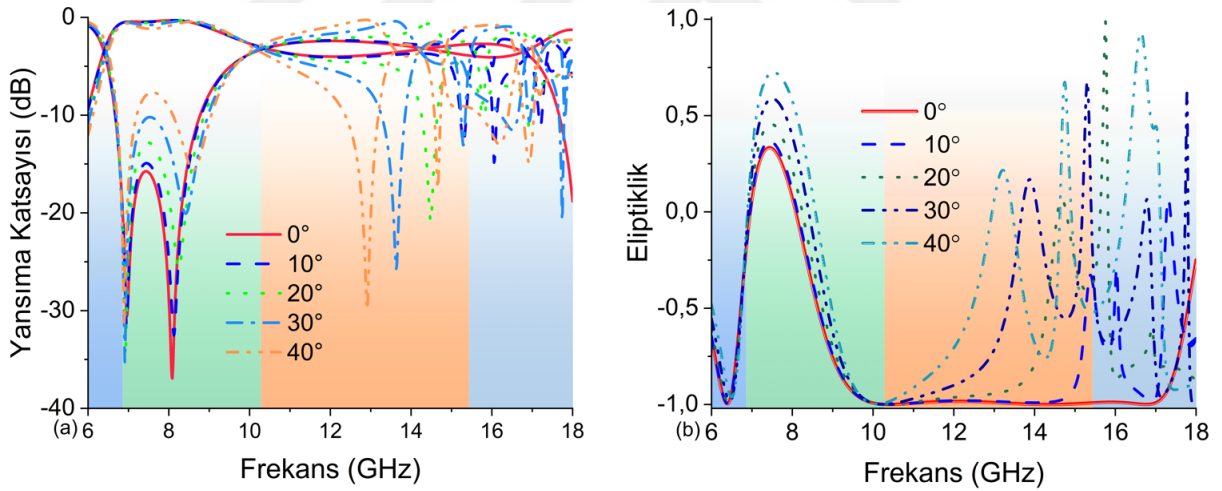
Şekil 91(a) ve 91(b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 91(a)'da normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansıma katsayısı R_{xx} , 6,7-8,75 GHz'de -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansıma katsayısı en düşük R_{yx} , -0,45 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 9,97–17 GHz ve 6,36-6,42 GHz aralığında her iki yansıma katsayısı -4,01 dB ve üzeri değerdedir. Bu sonuçlar, 6,66–8,78 GHz'de x-polarize dalganın yansıma sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü ve 9,97–17 GHz ile 6,36-6,42 GHz'de frekans aralığında ise x polarize dalganın yansıma sırasında dairesel polarizasyon genlik koşulunu sağladığı görülmektedir dönüştüğünü göstermektedir. Ayrıca 6,95 GHz'de ve 8,12 GHz'de sırasıyla -30,62 dB ve -36,01 dB'lik yansıma katsayısıyla rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 91(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Eş polarize yansıma katsayısı R_{yy} , 6,66–8,78 GHz'de -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansıma katsayısı en düşük R_{xy} , -0,45 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 9,97–17 GHz ve 6,36-6,42 GHz aralığında her iki yansıma katsayısı -4,01 dB ve üzeri değerdedir. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansıma değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansıma katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 92. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve ekstenel oran değerleri.

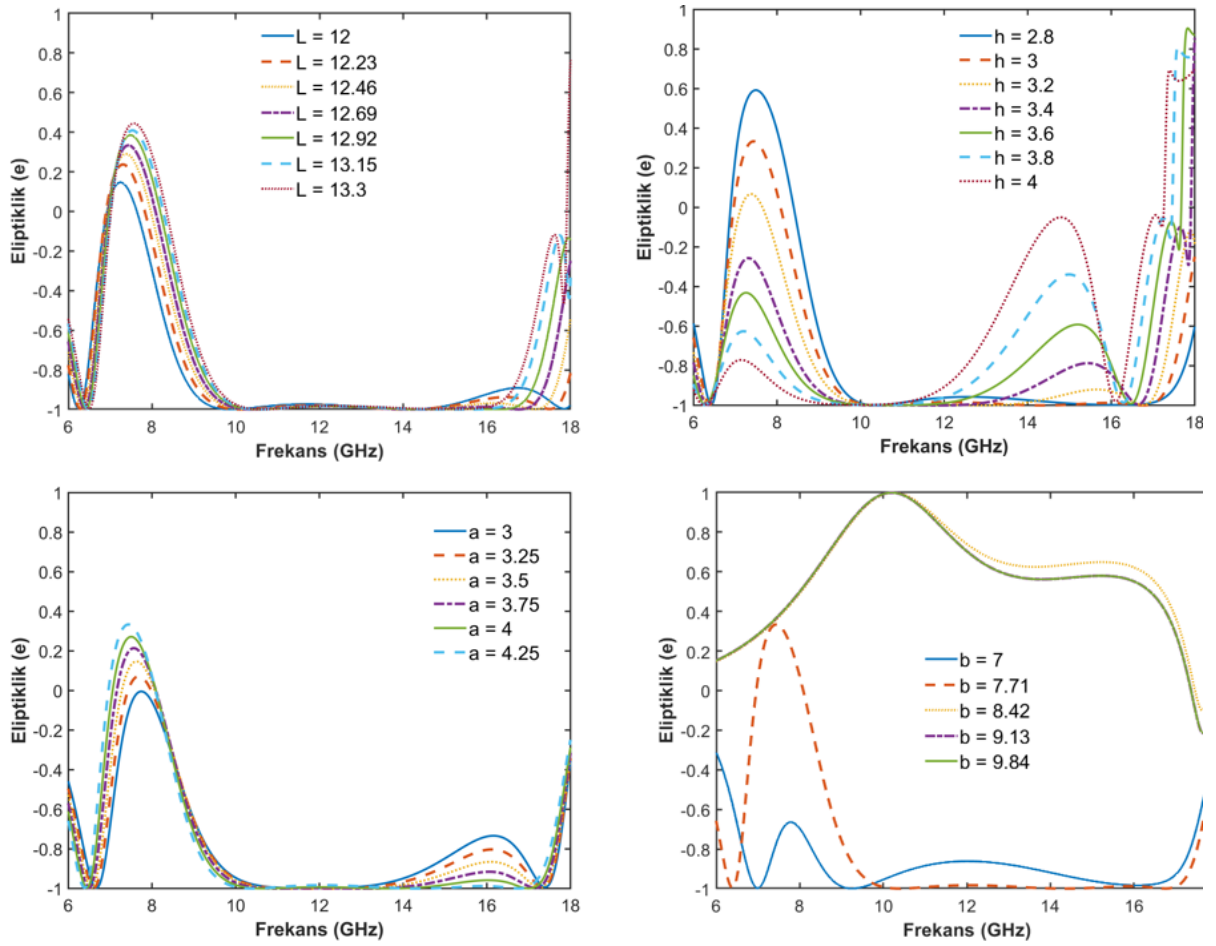
Şekil 92(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 6,7-8,75 GHz frekans bandında %90 'u aşmaktadır. Şekil 92(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 91'de gösterilen 6,95 GHz ve 8,12 GHz'de rezonans frekanslarının, Şekil 92(b)'de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktaya karşılık geldiği görülmektedir. Bu nokta, sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 92(a)'da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse %100'e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, 9,97–17 GHz

ve 6,36-6,42 GHz frekans bantlarında grafiğin yaklaşık 1 değerinde seyrettiği görülmektedir. Bu bölgeler kırmızı saydam alanla gösterilmiş olup, eş ve çapraz yansıma katsayılarının birbirine yakın değerlere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 92(d)'de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenini eliptikliği, sağ y eksenini ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri grafikte görüldüğü gibi, 9,97–17 GHz ve 6,36-6,42 GHz frekans bandında -1'e ulaşmaktadır; bu nedenle sırasıyla LHCP dönüşümü bu frekans bantlarında gerçekleşmektedir. Şekil 92(d)'de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 9,97–17 GHz ve 6,36-6,42 GHz frekans bantlarında 1,20 dB ve altındaki değerlere ulaşarak, bu bantlarda yüksek verimli LP-CP dönüşümün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde 6,95 GHz ve 8,12 GHz'e karşılık gelen frekans noktasının, bu banttaki maksimum değeri temsil ettiği görülmektedir. Bu durum, söz konusu noktanın rezonans frekansı olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 91(b)'de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı hem de Şekil 91'de yer alan yansıma katsayıları incelendiğinde, Şekil 92(c)'de gösterilen faz farkı $\Delta\phi$ 'nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansıma katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



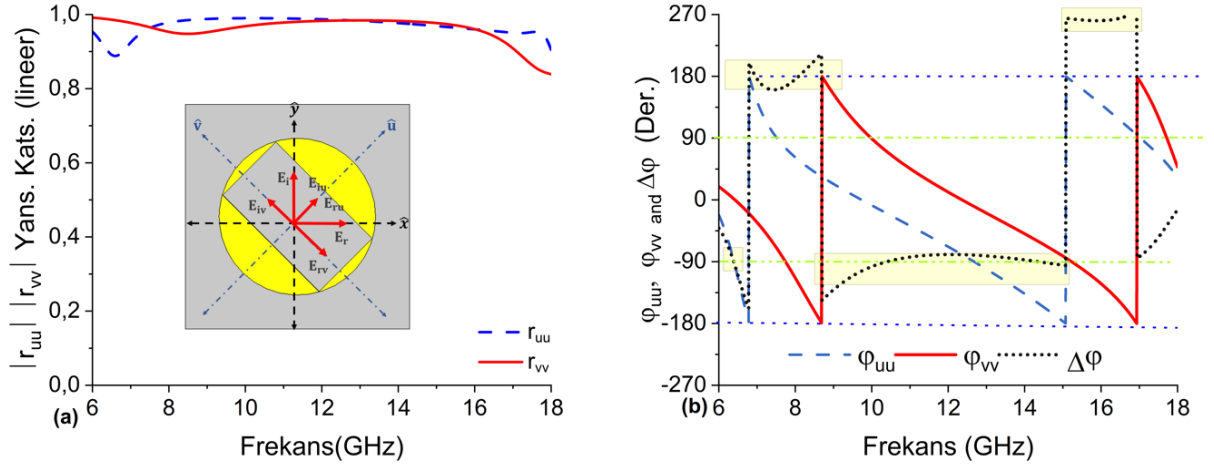
Şekil 93. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) Eliptiklik değerlerinin açısal değişimi

Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açısındaki yansıma katsayıları Şekil 93(a) ve Şekil 93(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 93 (a) ve Şekil 93(b)'de 0° ile 40° arasındaki yansıma katsayıları ve eliptiklik değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar, polarizasyon dönüştürücünün 9,89–10,31 GHz frekans bandında, 40° eğik geliş açısında LP-CP polarizasyon dönüşümü özelliğini devam ettirmektedir.



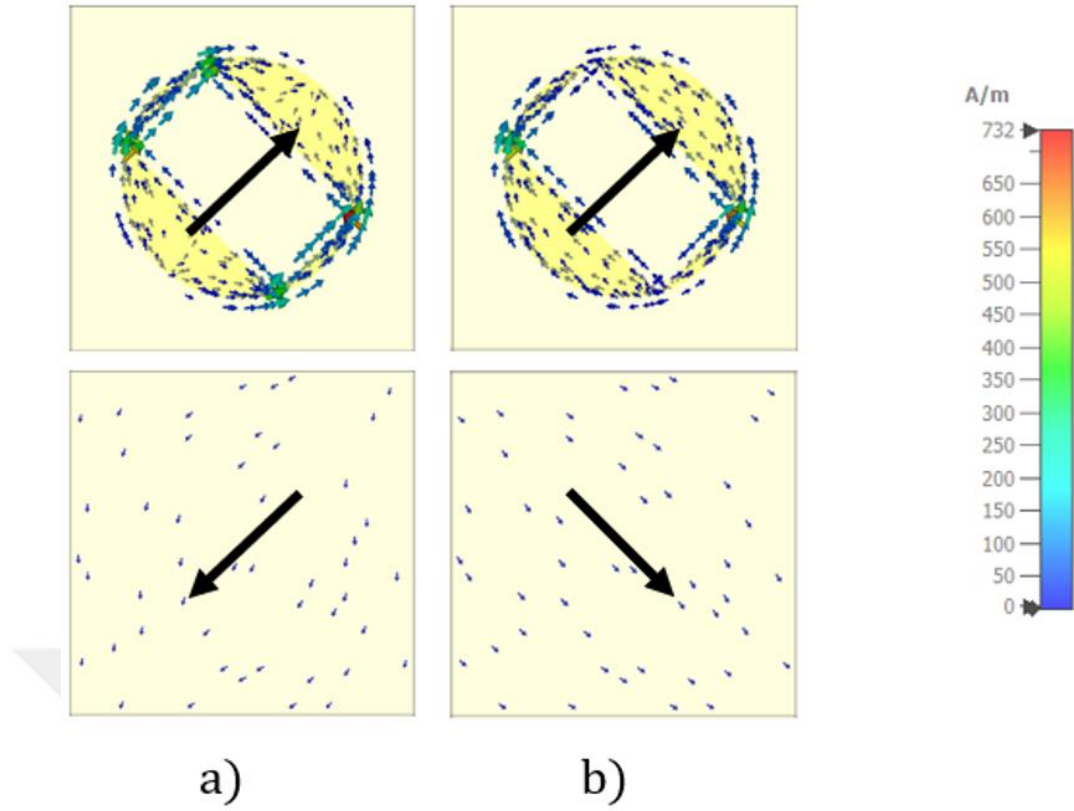
Şekil 94. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre eliptiklik değerleri: (a) $L=12-13,3$ mm (b) $h=2,8-4$ mm (c) $a=3-4,25$ mm (d) $b=7-9,84$ mm

Şekil 94’de önerilen polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin eliptiklik üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 94’de gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; (a) ve (b) rezonatörde bulunan dikdörtgen şeklin uzun ve kısa kenarı, dielektrik tabaka kalınlığı (h), birim hücre genişliği (L) ve rezonatörü oluşturan çemberin yarıçapını (r), Buradaki temel amaç, geniş bantta eliptiklik ve eksenel oran değerlerinin dairesel polarizasyon koşullarını sağlayacak şekilde elde edilmesidir. Dairesel polarizasyon dönüşümünün gerçekleşebilmesi için, eş-polarizasyon ve çapraz-polarizasyon yansıma katsayılarının genliklerinin birbirine yakın ve mümkün olduğunca yüksek olması hedeflenir. Bu koşullar en ideal şekilde uygun faz farkı ile sağlandığında, eliptiklik değeri tam +1 ve -1 değerinin üzerinde, eksenel oran ise 0 dB değerindedir.



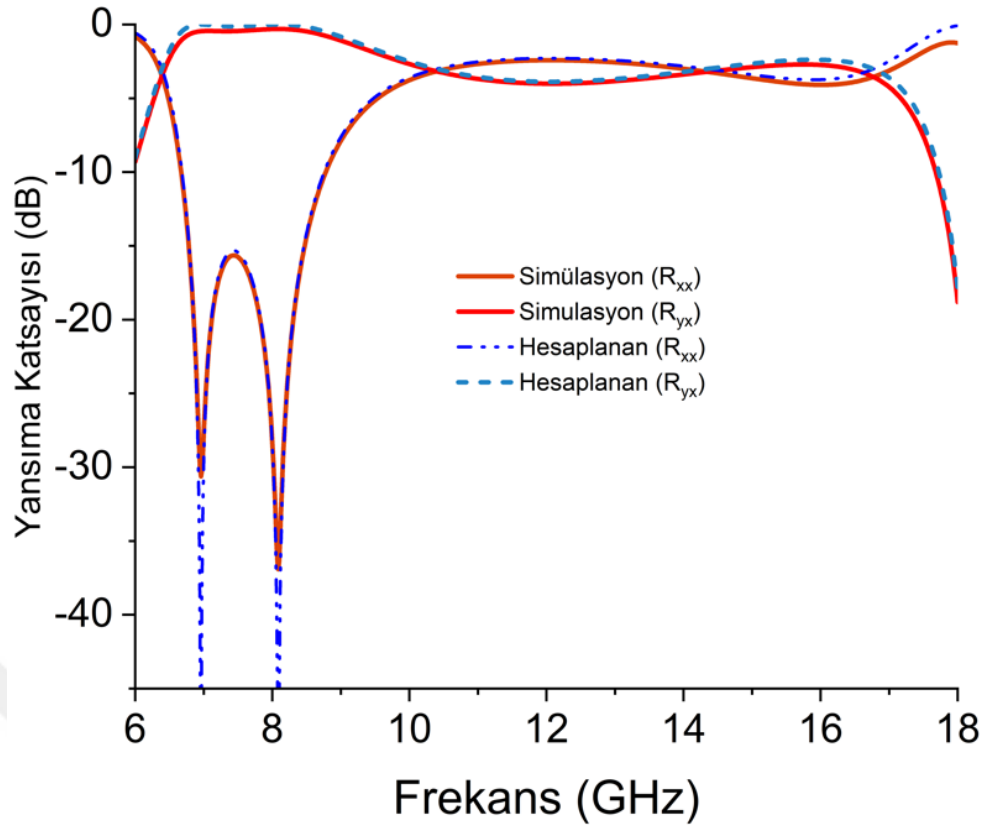
Şekil 95. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 95'te gösterildiği üzere yapı $u-v$ koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 95'te tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 95(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 95 (b)'de LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 6,7-8,75 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP-LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 91'te verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 6,95 GHz'de ve 8,12 GHz'de rezonans frekanslarında, y-polarizasyonlu gelen dalga'nın neredeyse tamamen x-polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 95(b)'de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP-CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 92 (b)'de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 95 (b)'deki faz farkı grafiğinde, 9,97-17 GHz ve 6,36-6,42 GHz frekans bantlarında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu $\pm 90^\circ$ 'lik faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 96. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 6,95 GHz, (b) 8,12 GHz

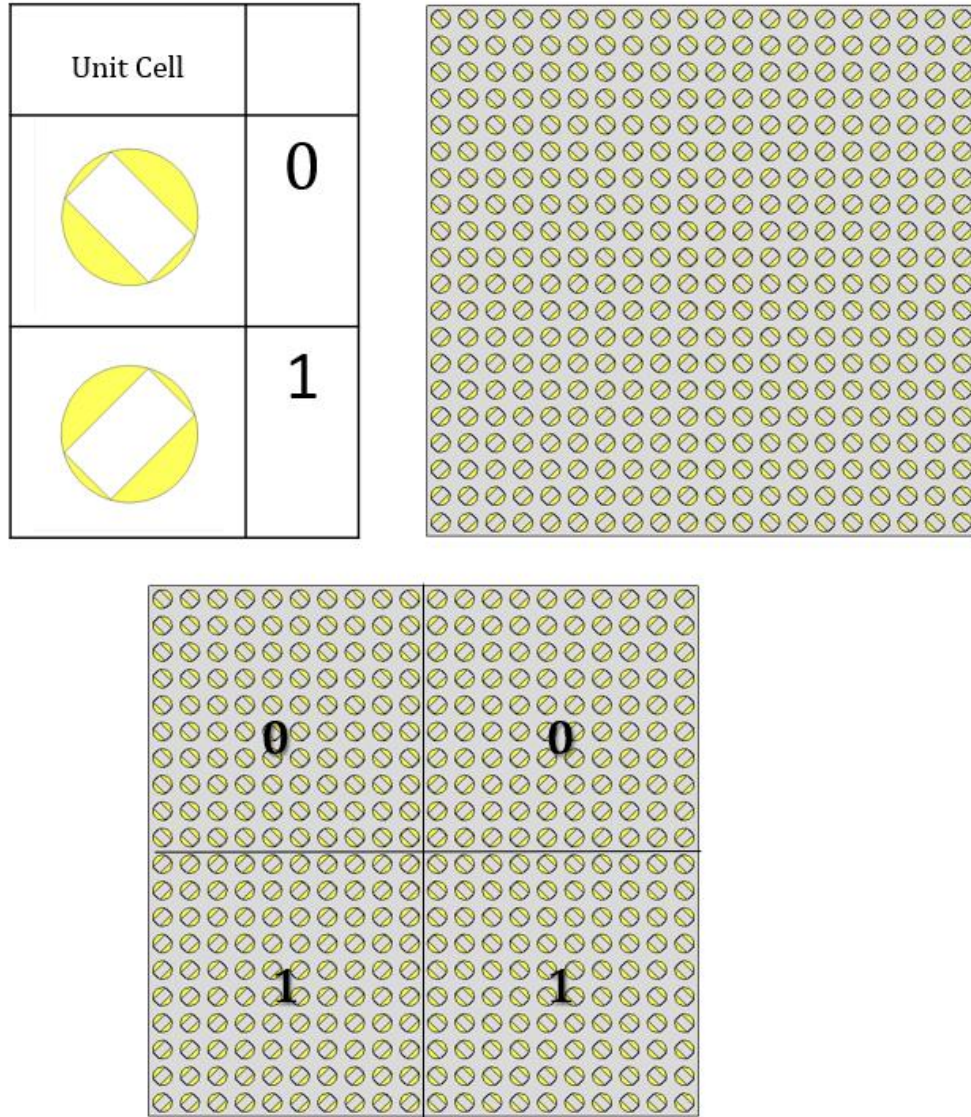
Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları üç farklı rezonans frekansında (6,95 GHz ve 8,12GHz) analiz edilmiştir. Şekil 96’da rezonatör ve alt metal katmandaki yüzey akım dağılımları verilmiştir. Üstte rezonatöre, altta ise alt metal katmana ait akım dağılımları gösterilmekte olup, her rezonans frekansında yüzey akımının yönü belirtilmiştir. Rezonatör ve alt metal katmanlardaki yüzey akımlarının paralel olmayan yönelimi nedeniyle, Şekil 96(a)’da manyetik rezonans meydana gelmiştir. Şekil 96(b)’de ise rezonatör ve alt metal katmandaki paralel yönelim nedeniyle elektriksel rezonans meydana gelmiştir.



Şekil 97. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

Şekil 97’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u–v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

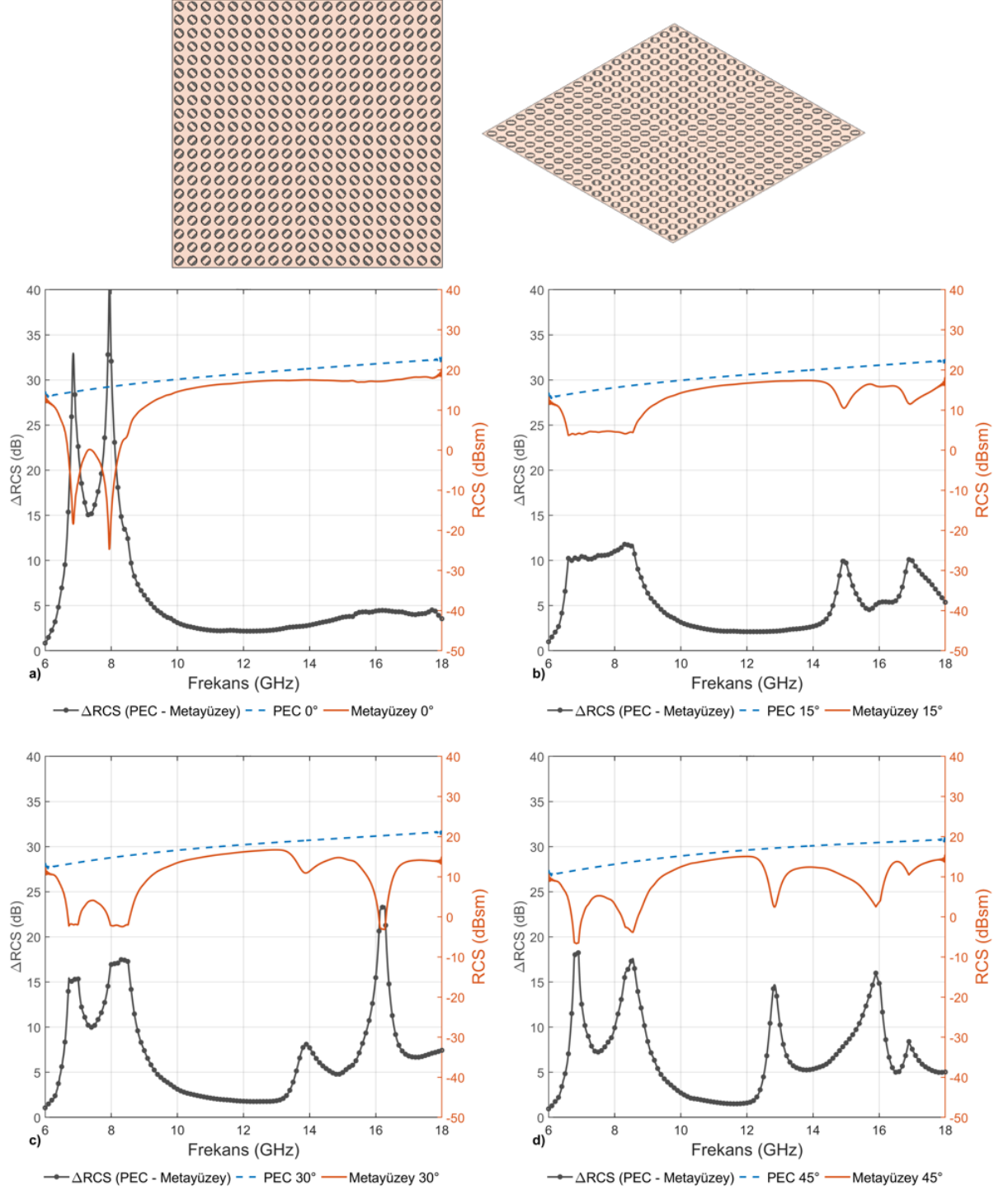


Şekil 98. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 21, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın

en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB’lik azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah daireli çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

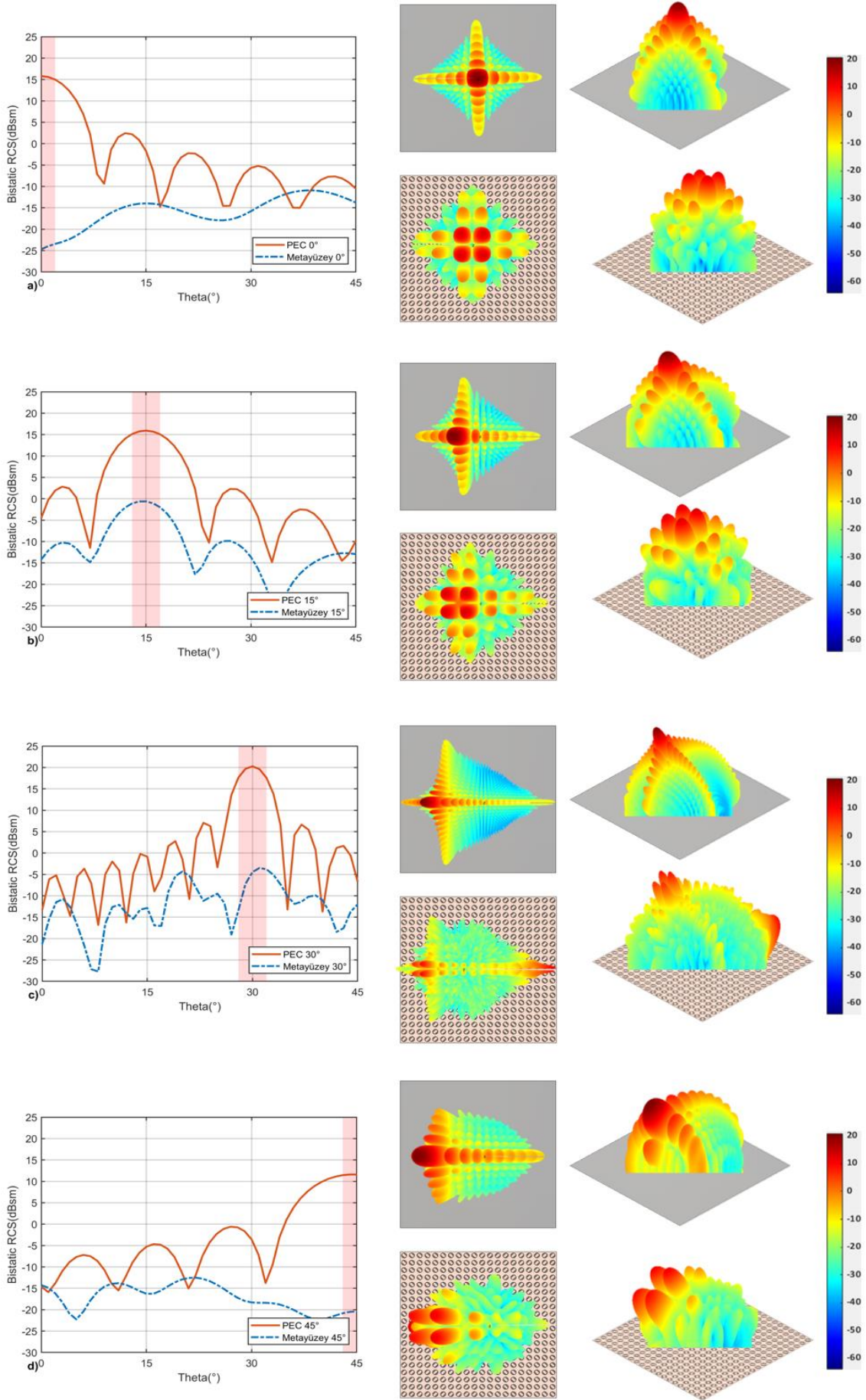
Düz plaka



Şekil 99. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 99, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 99(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 7,94 GHz frekansında 40,49 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,62–8,58 GHz (1,96 GHz) bant genişliği gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 6,41–9,24 GHz (2,83 GHz), 3 dB eşliğinde ise 6,29–10,07

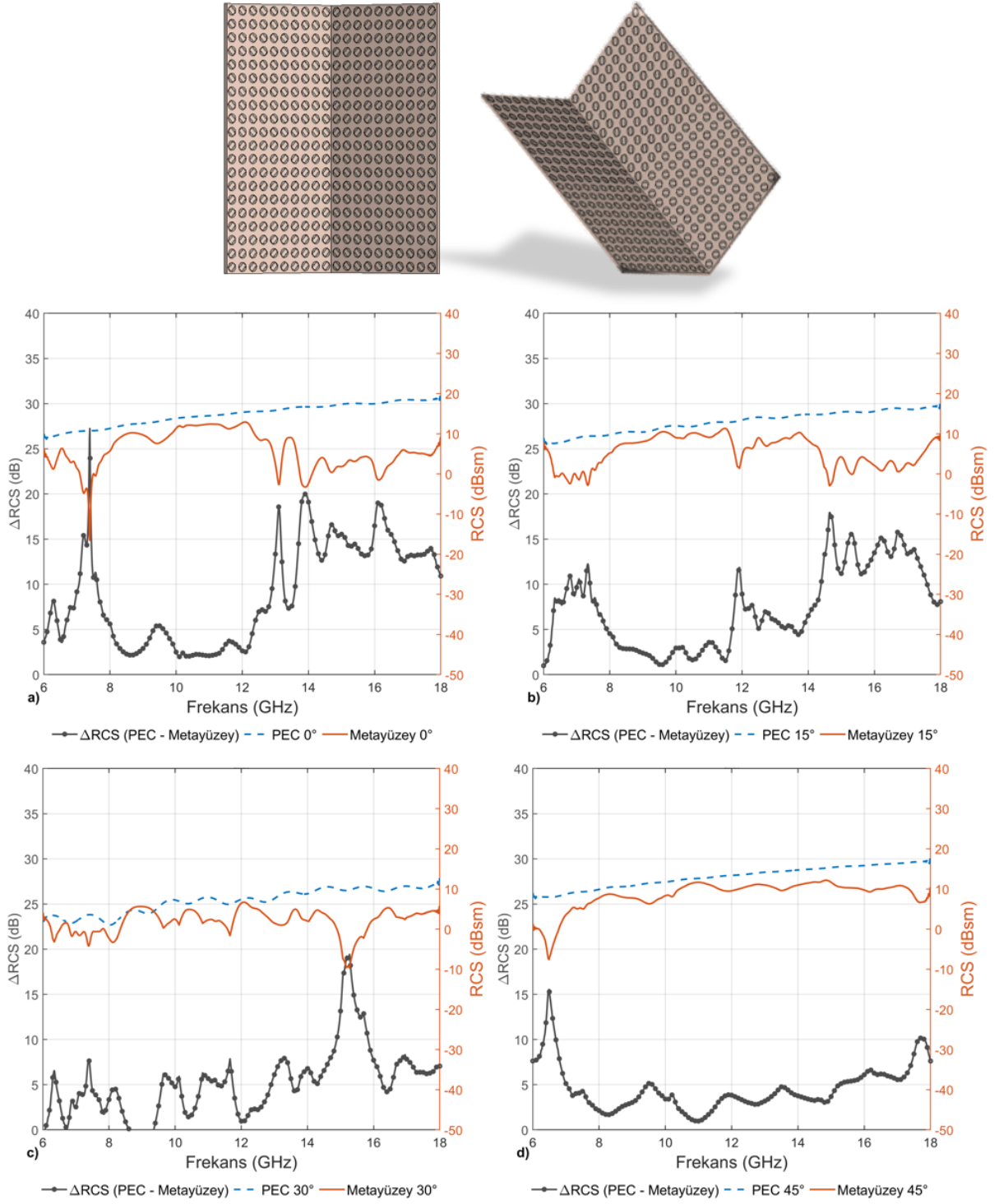
GHz (3,78 GHz) ve 14,21–18,00 GHz (3,79 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 99(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 8,33 GHz frekansında 11,85 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,73–8,63 GHz (1,90 GHz) ve 16,89–16,99 GHz (0,10 GHz) bantları elde edilmiştir. 5 dB eşliğinde 6,45–9,29 GHz (2,84 GHz), 14,61–15,51 GHz (0,90 GHz) ve 15,88–18,00 GHz (2,12 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,34–10,09 GHz (3,75 GHz) ve 14,23–18,00 GHz (3,77 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 99(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 16,27 GHz frekansında 23,41 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,64–7,39 GHz (0,75 GHz), 7,43–8,77 GHz (1,34 GHz) ve 15,76–16,55 GHz (0,79 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 6,48–9,34 GHz (2,86 GHz), 13,59–14,66 GHz (1,07 GHz) ve 15,02–18,00 GHz (2,98 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,36–10,06 GHz (3,70 GHz) ve 13,40–18,00 GHz (4,60 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 99(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 6,84 GHz frekansında 18,29 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,68–7,10 GHz (0,42 GHz), 8,01–8,90 GHz (0,89 GHz), 12,69–13,00 GHz (0,31 GHz) ve 15,35–16,14 GHz (0,79 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 6,52–9,35 GHz (2,83 GHz), 12,53–16,50 GHz (3,97 GHz) ve 16,58–17,71 GHz (1,13 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,38–9,89 GHz (3,51 GHz) ve 12,40–18,00 GHz (5,60 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 100. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 7,94 GHz, (b) 8,33 GHz, (c) 16,27 GHz ve (d) 6,84 GHz

Şekil 100, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 100(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 7,94 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,79 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -24,70 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 40,49 dB değerinde RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 100(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 8,33 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,93 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -0,62 dBsm'dir. Bu geliş açısında 16,55 dB değerinde azalma sağlanmıştır. Şekil 100(c) 'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 16,27 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 20,27 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -4,46 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 24,73 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 100(d) 'de $\theta = 45^\circ$ geliş açısı için, 6,84 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 11,60 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -20,40 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 32,00 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir.

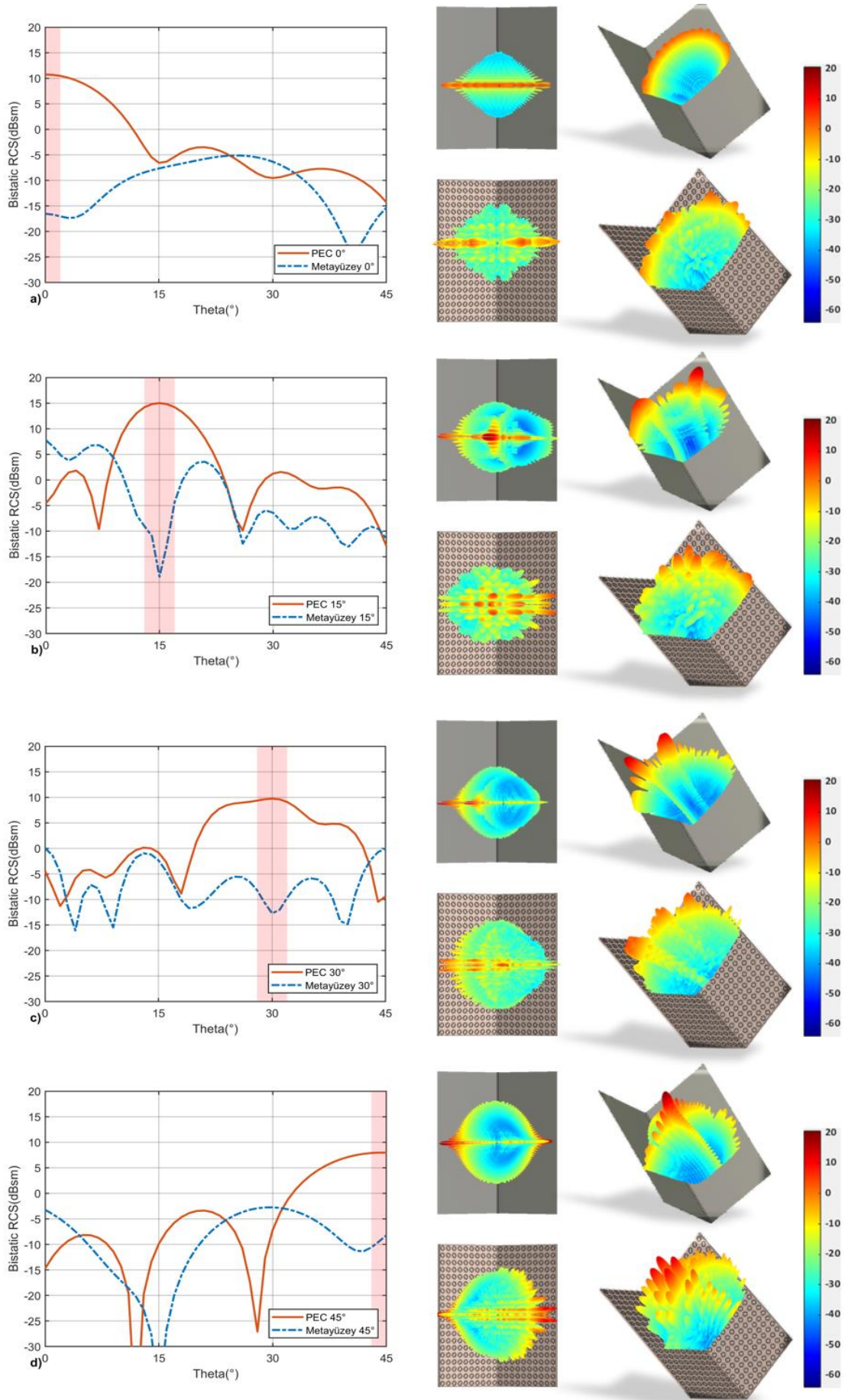
Dihedral plaka



Şekil 101. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 101, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 101(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 7,39 GHz frekansında 27,25 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 7,07–7,61 GHz (0,54 GHz),

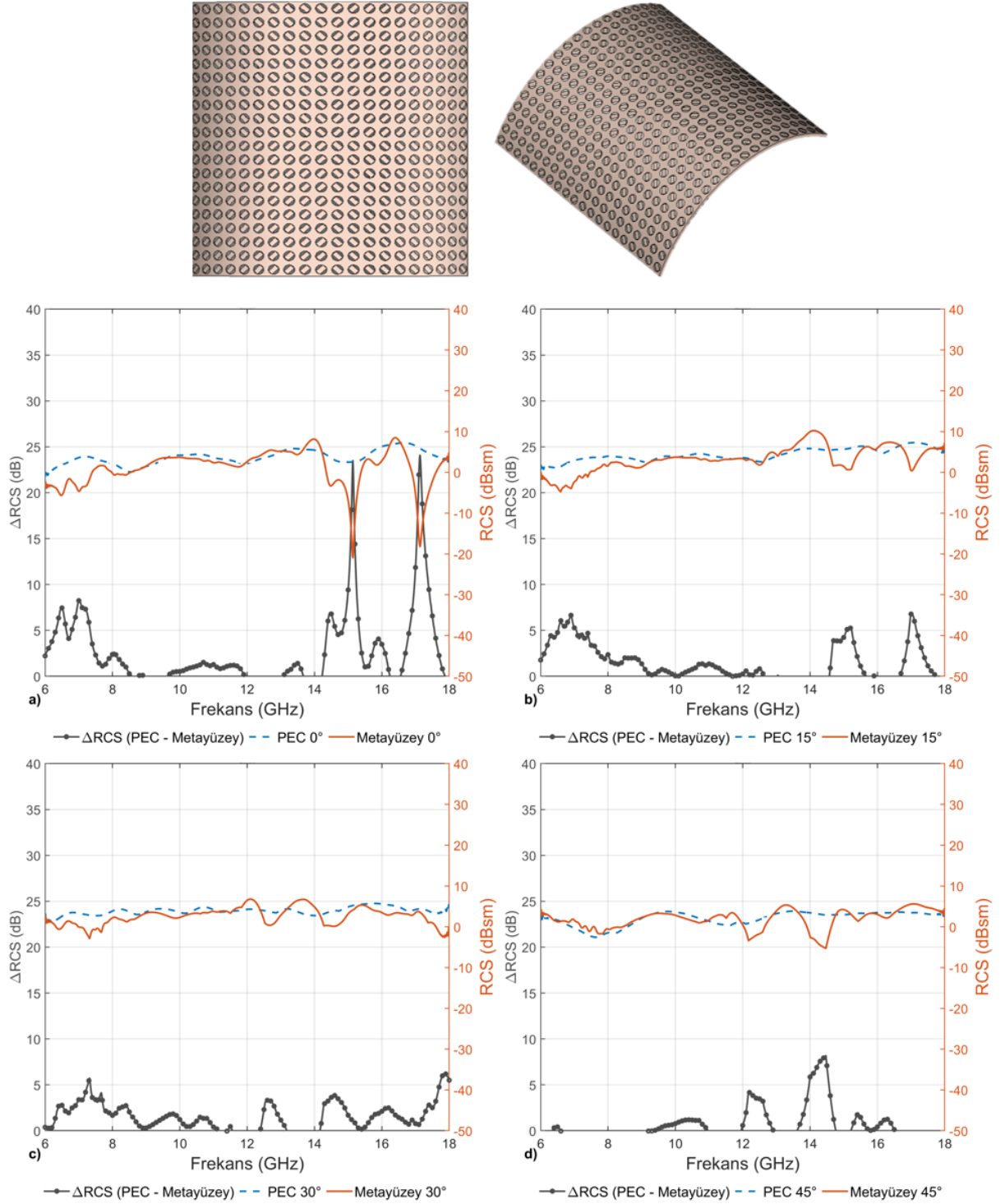
12,92–13,24 GHz (0,32 GHz) ve 13,61–18,00 GHz (4,39 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 6,12–6,44 GHz (0,32 GHz), 6,64–8,05 GHz (1,41 GHz), 9,32–9,61 GHz (0,29 GHz) ve 12,33–18,00 GHz (5,67 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,00–8,27 GHz (2,27 GHz), 9,03–9,94 GHz (0,91 GHz), 11,44–11,90 GHz (0,46 GHz) ve 12,20–18,00 GHz (5,80 GHz) bantları sağlanmıştır. Şekil 101(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 14,64 GHz frekansında 17,94 dB olarak gözlenmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,74–6,85 GHz (0,11 GHz), 7,02–7,11 GHz (0,09 GHz), 7,26–7,40 GHz (0,14 GHz), 11,83–11,97 GHz (0,14 GHz) ve 14,39–17,59 GHz (3,20 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. 5 dB eşliğinde 6,26–7,91 GHz (1,65 GHz), 11,70–13,54 GHz (1,84 GHz) ve 13,83–18,00 GHz (4,17 GHz) bantları sağlanmıştır. 3 dB eşliğinde ise 6,20–8,30 GHz (2,10 GHz), 10,86–11,20 GHz (0,34 GHz) ve 11,62–18,00 GHz (6,38 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 101(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 15,27 GHz frekansında 19,42 dB olarak gerçekleşmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 14,89–15,83 GHz (0,94 GHz) bant genişliği elde edilmiştir. 5 dB eşliğinde 6,29–6,40 GHz (0,11 GHz), 7,31–7,47 GHz (0,16 GHz), 9,60–9,92 GHz (0,32 GHz), 10,05–10,15 GHz (0,10 GHz), 10,78–11,29 GHz (0,51 GHz), 11,45–11,74 GHz (0,29 GHz), 12,90–13,53 GHz (0,63 GHz), 13,75–16,27 GHz (2,52 GHz) ve 16,55–18,00 GHz (1,45 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,24–6,51 GHz (0,27 GHz), 6,86–6,91 GHz (0,05 GHz), 7,04–7,73 GHz (0,69 GHz), 7,97–8,33 GHz (0,36 GHz), 9,52–10,23 GHz (0,71 GHz), 10,66–11,82 GHz (1,16 GHz) ve 12,69–18,00 GHz (5,31 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 101 (d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 6,49 GHz frekansında 15,54 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,34–6,69 GHz (0,35 GHz) ve 17,64–17,82 GHz (0,18 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşliğinde 6,00–7,02 GHz (1,02 GHz), 9,46–9,60 GHz (0,14 GHz) ve 15,26–18,00 GHz (2,74 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşliğinde ise 6,00–7,70 GHz (1,70 GHz), 8,99–10,30 GHz (1,31 GHz), 11,59–12,52 GHz (0,93 GHz) ve 12,90–18,00 GHz (5,10 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 102. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 7,39 GHz, (b) 14,64 GHz, (c) 15,27 GHz ve (d) 6,49 GHz

Şekil 102, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 102(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 7,39 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 10,73 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-16,52$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 27,25 dB değerinde RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 102(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 14,64 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,00 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-18,89$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 33,89 dB değerinde azalma sağlanmıştır. Şekil 102(c) 'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 15,27 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 9,74 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-12,72$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 22,46 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 102(d) 'de $\theta = 45^\circ$ için, 6,49 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,97 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-8,19$ dBsm'dir, dolayısıyla 16,16 dB değerinde azalma elde edilmiştir.

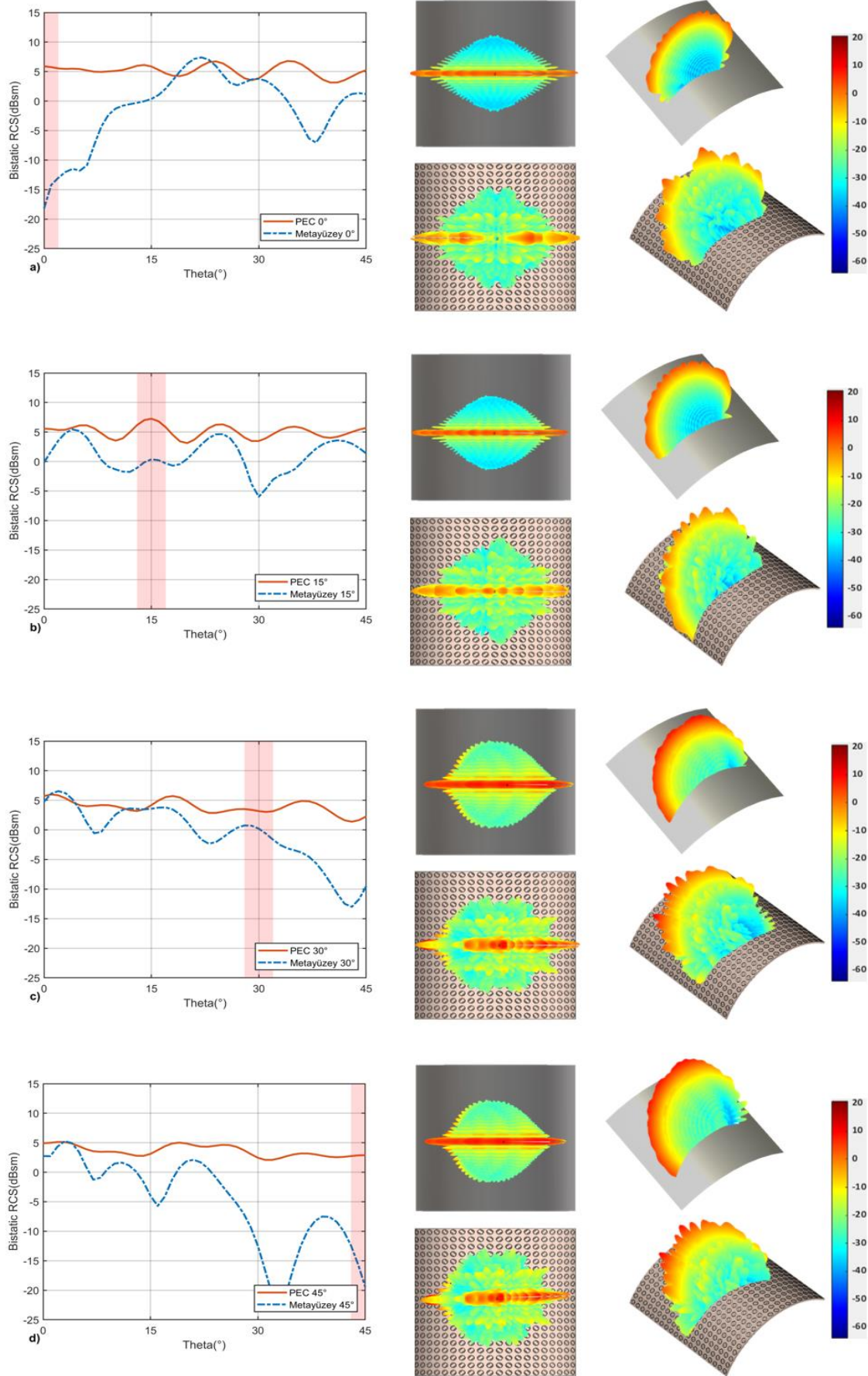
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 103. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 103, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 103(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 17,13 GHz frekansında 24,09 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşikinde

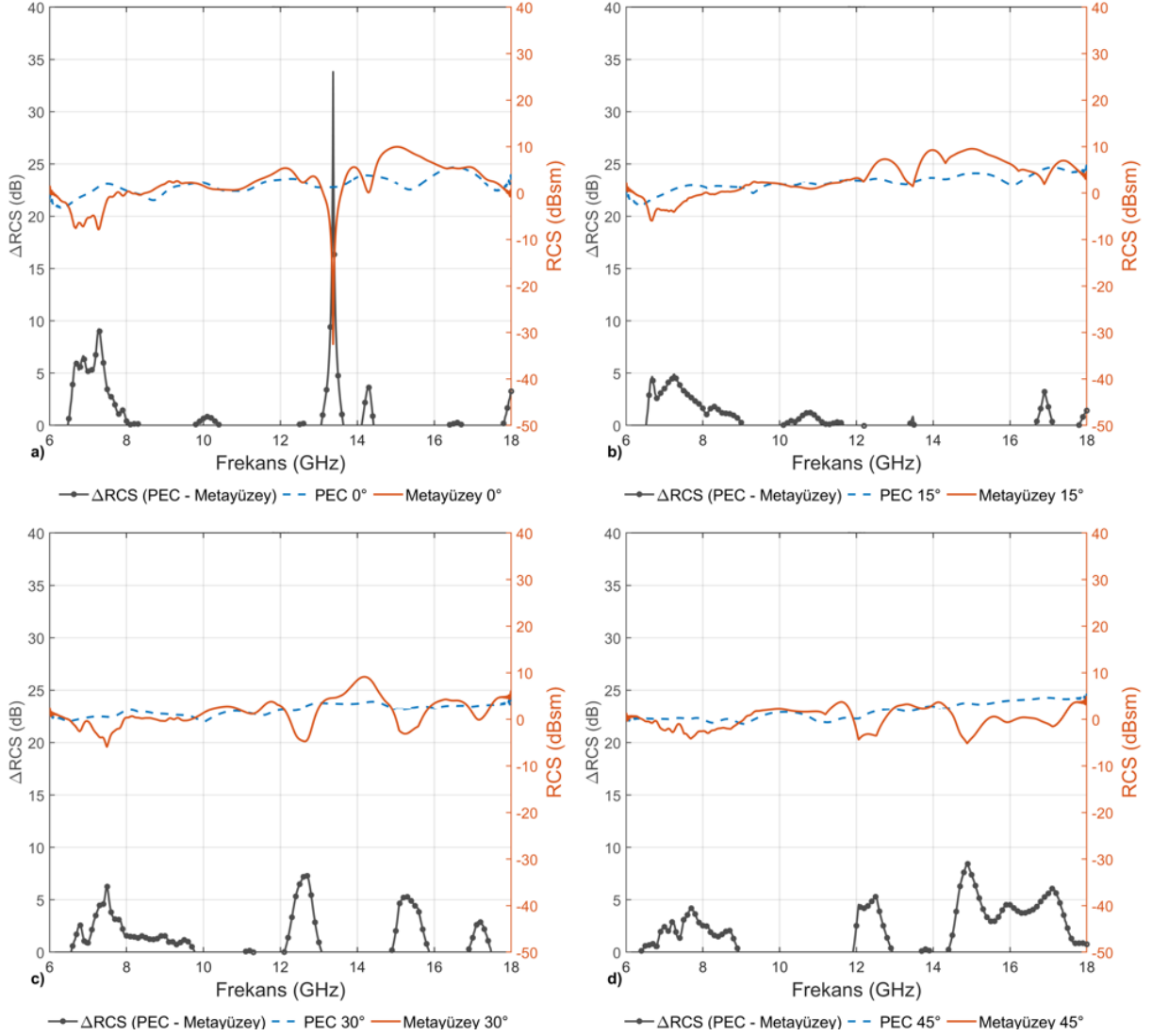
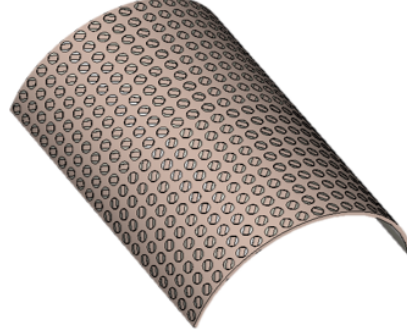
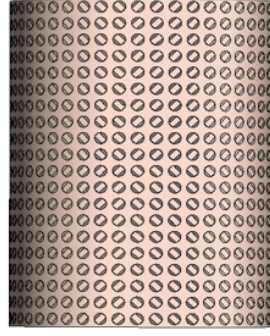
15,02–15,24 GHz (0,22 GHz) ve 16,98–17,38 GHz (0,40 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 6,33–6,63 GHz (0,30 GHz), 6,80–7,33 GHz (0,53 GHz), 14,37–14,63 GHz (0,26 GHz), 14,83–15,32 GHz (0,49 GHz) ve 16,82–17,56 GHz (0,74 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 6,09–7,43 GHz (1,34 GHz), 14,32–15,38 GHz (1,06 GHz), 15,76–16,05 GHz (0,29 GHz) ve 16,73–17,65 GHz (0,92 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 103(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 17,02 GHz frekansında 6,88 dB olarak gözlenmiştir bu bağlamda 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması gerçekleşmemiştir. 5 dB eşiğinde 6,53–7,05 GHz (0,52 GHz), 15,09–15,23 GHz (0,14 GHz) ve 16,95–17,16 GHz (0,21 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşiğinde ise 6,17–7,64 GHz (1,47 GHz), 14,66–15,33 GHz (0,67 GHz) ve 16,87–17,31 GHz (0,44 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 103(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 17,87 GHz frekansında 6,28 dB olarak gerçekleşmiştir, dolayısıyla 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması sağlanamamıştır. 5 dB eşiğinde 7,27–7,34 GHz (0,07 GHz) ve 17,72–18,00 GHz (0,28 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. 3 dB eşiğinde ise 6,95–7,71 GHz (0,76 GHz), 12,53–12,75 GHz (0,22 GHz), 14,33–14,81 GHz (0,48 GHz) ve 17,59–18,00 GHz (0,41 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 103(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 14,47 GHz frekansında 8,17 dB olarak elde edilmiştir, bu bağlamda değerlendirildiğinde 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması olmamıştır. 5 dB eşiğinde yalnızca 13,98–14,56 GHz (0,58 GHz) aralığında bant elde edilmiştir. 3 dB eşiğinde ise 12,14–12,61 GHz (0,47 GHz) ve 13,89–14,62 GHz (0,73 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 104. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 17,13 GHz, (b) 17,02 GHz, (c) 17,87 GHz ve (d) 14,47 GHz

Şekil 104, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 104(a) $\theta = 0^\circ$ için, 17,13 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,89 dBSm, metayüzeyin RCS değeri ise -18,19 dBSm'dir. Bu geliş açısı için 24,08 dB'lik bir bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 104(b) $\theta = 15^\circ$ için, 17,02 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,25 dBSm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 0,37 dBSm'dir. Bu geliş açısı için 6,88 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 104(c) $\theta = 30^\circ$ açısında, 17,87 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 3,17 dBSm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 0,21 dBSm'dir. Bu geliş açısı için 2,96 dB' değerinde daha sınırlı bir RCS azalması gözlenmiştir. Şekil 104(d) $\theta = 45^\circ$ için, 14,47 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 2,89 dBSm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise -19,43 dBSm'dir. Bu geliş açısı için 22,32 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir.

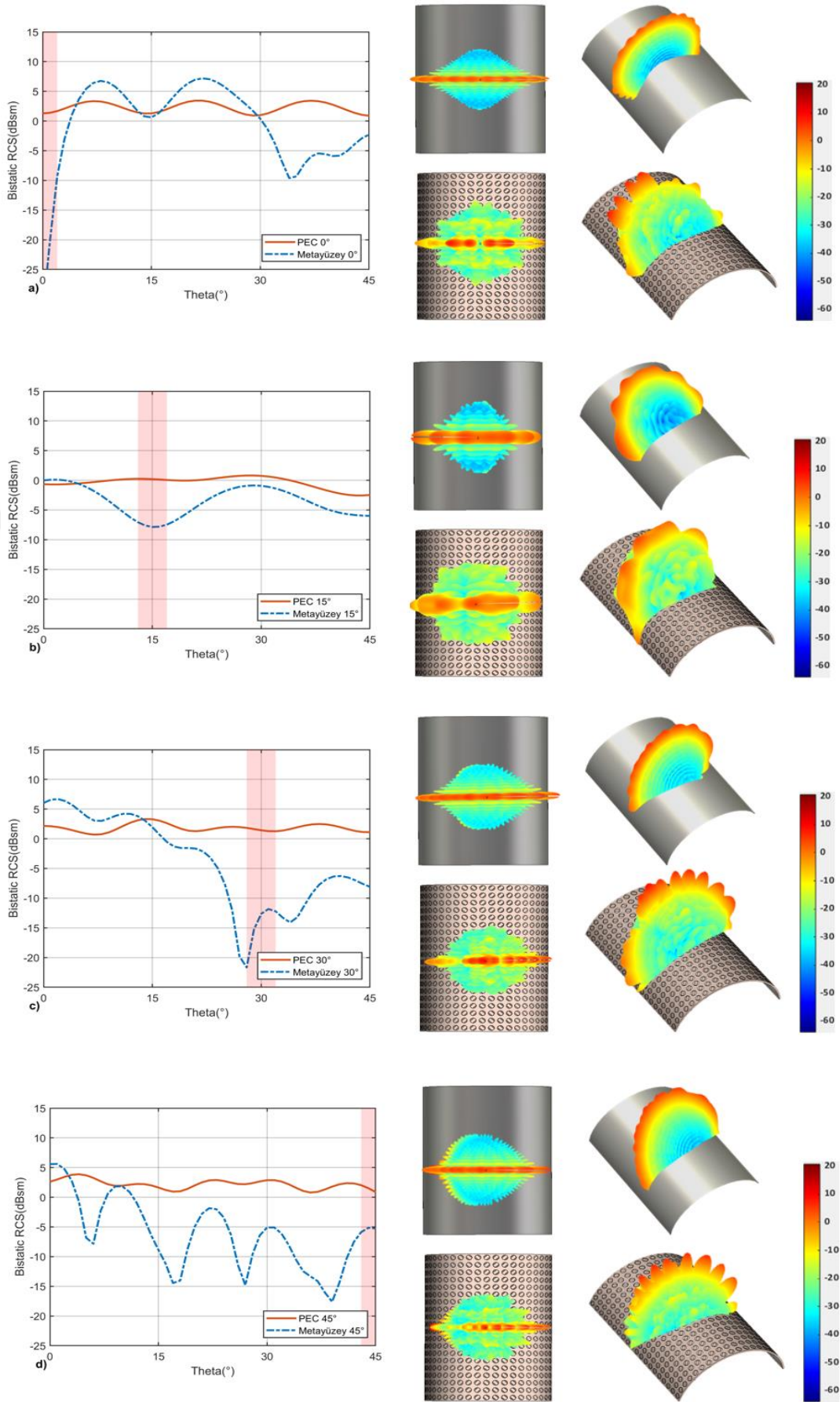
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 105. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 105, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 105(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 13,37 GHz frekansında 33,81 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşikinde

13,31–13,43 GHz (0,12 GHz) bant genişliği gözlenmiştir. 5 dB eşğinde 6,63–7,43 GHz (0,80 GHz) ve 13,25–13,49 GHz (0,24 GHz) bantları elde edilmiştir. 3 dB eşğinde ise 6,58–7,53 GHz (0,95 GHz), 13,19–13,53 GHz (0,34 GHz) ve 14,24–14,33 GHz (0,09 GHz) bantları sağlanmıştır. Şekil 105(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 7,25 GHz frekansında 4,88 dB olarak gözlenmiştir bu bağlamda bu açı ve geometri için 10 dB ve 5dB eşik değerlerinde monostatik RCS azalması gözlenmemiştir. 3 dB eşğinde ise 6,61–6,75 GHz (0,14 GHz) ve 6,89–7,59 GHz (0,70 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 105(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 12,66 GHz frekansında 7,42 dB olarak gerçekleşmiştir, bu yüzden 10 dB eşğinde monostatik RCS azalması sağlanamamıştır. 5 dB eşğinde 7,43–7,54 GHz (0,11 GHz), 12,39–12,81 GHz (0,42 GHz) ve 15,16–15,37 GHz (0,21 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşğinde ise 7,16–7,84 GHz (0,68 GHz), 12,29–12,89 GHz (0,60 GHz) ve 15,04–15,64 GHz (0,60 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 105(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 14,88 GHz frekansında 8,55 dB olarak elde edilmiştir bu nedenle 10 dB eşğinde monostatik RCS azalması gözlemlenmemiştir. 5 dB eşğinde 12,43–12,53 GHz (0,10 GHz), 14,65–15,21 GHz (0,56 GHz) ve 16,84–17,27 GHz (0,43 GHz) bantları gözlenmiştir. 3 dB eşğinde ise 7,50–7,87 GHz (0,37 GHz), 12,02–12,66 GHz (0,64 GHz), 14,57–15,47 GHz (0,90 GHz) ve 15,62–17,43 GHz (1,81 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 106. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,37 GHz, (b) 7,25 GHz, (c) 12,66 GHz ve (d) 14,88 GHz

Şekil 106, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 106(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 13,37 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,28 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-32,53$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 33,81 dB değerinde bistatik RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 106(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 7,25 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 0,20 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-7,86$ dBsm'dir. Bu geliş açısında 8,06 dB değerinde bistatik RCS azalması gözlemlenmiştir. Şekil 106(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 12,66 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 1,43 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-12,64$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 14,07 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 106(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 14,88 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 0,88 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-5,26$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 6,14 dB'lik bir azalma sağlanmıştır.

Karşılaştırma

Tablo 8. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X- ve Ku- Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Dairesel Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

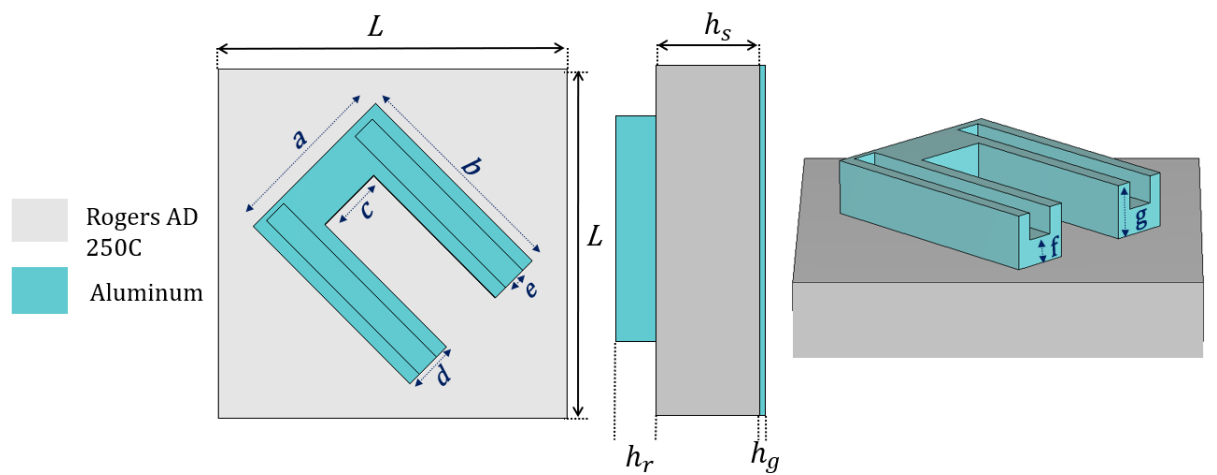
Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Lin et al., 2020)	5,8 – 20,4 GHz (LP-CP)	3 mm+ 4,3mm (Çok katmanlı) F4B	$AR \leq 1,15$ dB	Pol.Dön.
(Zaker & Jolani, 2024)	6,12 – 21,42 GHz (LP-CP)	1,55 mm+1,25 mm+0,4 mm (Çok katmanlı) RT/duroid 5880	$AR \leq 1,7$ dB	Pol.Dön.
(Hayat et al., 2024)	15.41 – 25.23 GHz (LP-CP)	1,6 mm FR-4	$AR \leq 3$ dB	Pol.Dön.
Önerilen Çalışma	9,97–17 GHz (LHCP) 6,36-6,42 GHz (LHCP) 6,7-8,75 GHz (LP-LP)	3 mm F4B	$AR \leq 1,6$ dB	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilerde

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, C-, X- ve Ku-bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılan çalışmalar, Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, dielektrik tabaka kalınlığı ve malzemesi, verimlilik ile fonksiyon ve RCS analiz kapsamı parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Önerilen

çalışma verimlilik açısından değerlendirildiğinde (Hayat et al., 2024) ve (Zaker & Jolani, 2024) daha verimli LP-CP dönüşümü sağlamaktadır. (Lin et al., 2020) kıyaslandığında ise daha verimli bir AR değeri olmasına karşın önerilen çalışmanın aksine sadece LP-CP dönüşümü yapmaktadır. 5,8–20,4 GHz bandında (Lin et al., 2020) tarafından önerilen 3 mm ve 4,3 mm kalınlıklarında iki F4B katmanından oluşan bu yapı, $AR < 1,15$ dB değeriyle yüksek bir verimlilik sergilemiştir. Ancak, yaklaşık 7,3 mm toplam kalınlığa sahip olması ve çok katmanlı tasarımı nedeniyle üretim açısından önerilen çalışmaya kıyasla daha karmaşık bir süreç sahiptir. (Lin et al., 2020), (Zaker & Jolani, 2024) ve (Hayat et al., 2024) çalışmalarında önerilen çalışmaya kıyasla fonksiyon RCS analiz kapsamı parametresinde sadece polarizasyon dönüşümü analiz edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen metayüzey tabanlı polarizasyon dönüştürücü, (Hayat et al., 2024) çalışması dışında Tablo 8’de bulunan çalışmalar ile benzer verimlilik değerleri sağlarken, fonksiyon RCS analiz kapsamı parametresinde sadece polarizasyon dönüştürücü fonksiyonu mevcuttur bunların aksine önerilen çalışma detaylı RCS azalma performans değerlendirmesi sunarak önemli bir iyileştirme sağlamaktadır.

C-, X-, ve Ku-Bant Uygulamaları için 3D Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

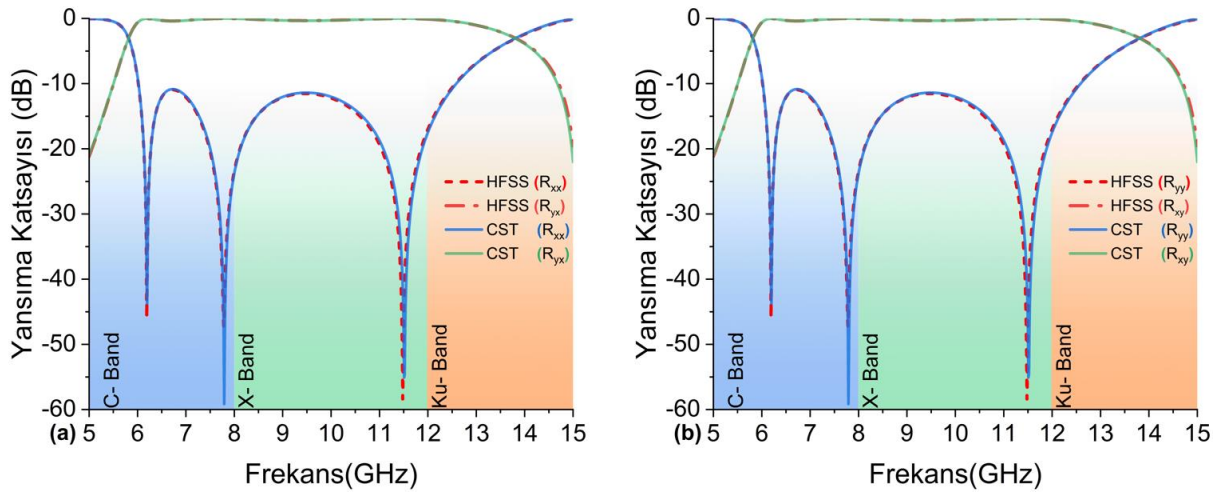
Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 107’de görülmektedir. 3D rezonatör hem de birim hücrenin arka yüzeyi, $t=0,035$ mm kalınlığında $\sigma = 3,56 \times 10^7$ S/m iletkenliğe sahip alüminyum malzemeden oluşmaktadır. 3D Rezonatör ve metal taban arasında dielektrik tabaka olarak Rogers AD 250C malzemesi kullanılmıştır, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2,2(1-j0,0013)$ ’dir.



Şekil 107. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücrenin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi

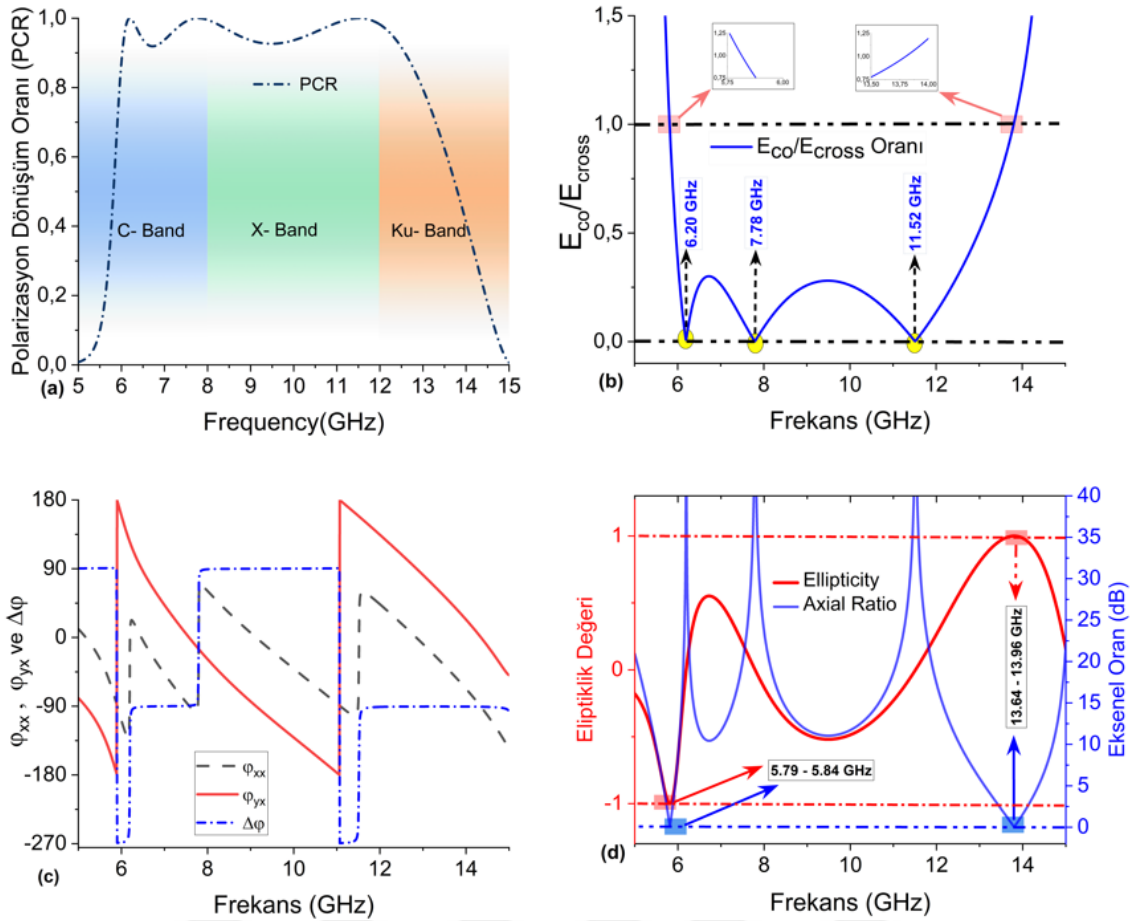
Maksimum bant genişliği ve yüksek PCR verimliliği elde edebilmek amacıyla birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 107’de gösterildiği üzere $L = 14,20$ mm, $a = 7$ mm, $b=3$ mm, $c = 2,80$ mm, $d = 2,10$, $e=1$ mm, $h_r=2,04$ mm, $h_g=0,04$ mm ve $h_s=2,80$ mm olarak

belirlenmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi, elektromanyetik dalgaların ters yönde yansımalarını sağlayarak yapının yansımada çalışmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 108. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansım katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.

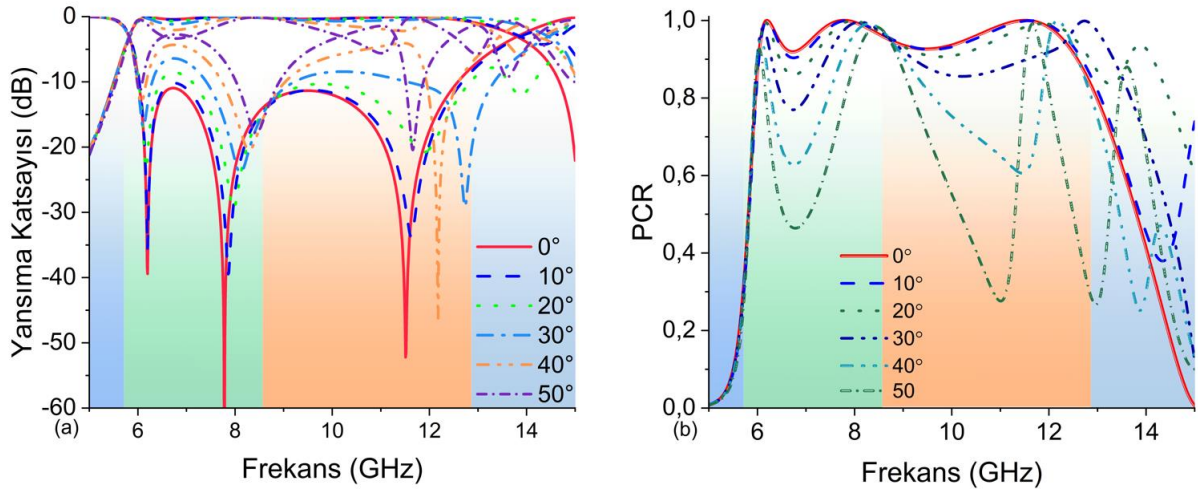
Şekil 108(a) ve 108(b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansım katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 108(a)'da, normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansım katsayısı R_{xx} , 6,02–12,58 GHz bant genişliği içinde maksimum -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansım katsayısı R_{yx} , etkin bant içinde minimum -0,4 dB değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, x-polarize dalganın yansım sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü göstermektedir. Ayrıca, 6,2 GHz, 7,78 GHz ve 11,52 GHz'de sırasıyla -41,23 dB, -59,19 dB ve -54,38 dB'lik yansım katsayılarıyla üç rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 108(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir eş-polarize yansım katsayısı R_{yy} -10 dB'ye düşerken; çapraz-polarize katsayı R_{xy} , -0,4 dB 'ye ulaşmaktadır. Bu değerler, y'den x polarizasyonuna polarizasyon dönüşümünü doğrulamaktadır. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansım değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu durum, söz konusu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını ve x ile y polarize edilmiş olarak gelen elektromanyetik dalgaların sırasıyla y ve x polarizasyonlu; aynı şekilde y ve x polarize edilmiş olarak gelen dalgaların ise sırasıyla x ve y polarizasyonlu olacak biçimde yansıtıldığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansım katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözümler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 109. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri

Şekil 109(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 6,02–12,58 GHz frekans bandında %90'u aşmakta, X- bandını tamamen kapsamaktadır. Şekil 109(b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalar ve en yüksek PCR değerinde LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 108'de gösterilen 6,2 GHz, 7,78 GHz ve 11,52 GHz rezonans frekanslarının, Şekil 109(b)'de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktalara karşılık geldiği görülmektedir. Bu noktalar ayrıca sarı daireler ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 109(a)'da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse %100'e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek

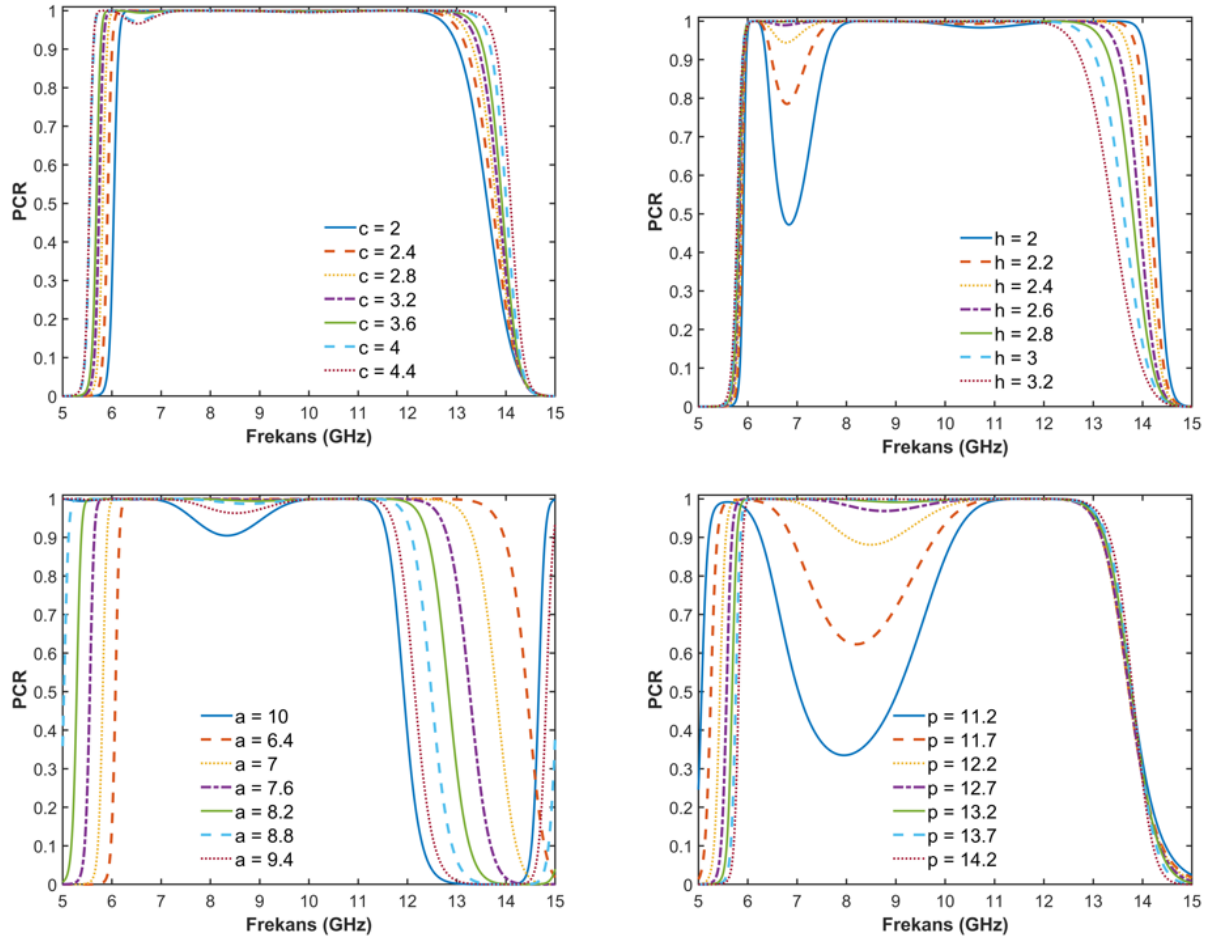
seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 109(d)'de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenini eliptikliği, sağ y eksenini ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri, grafikte görüldüğü üzere 5,79–5,84 GHz frekans bandında -1 seviyesine ulaşmakta olup, bu frekans aralığında LHCP dönüşümü gerçekleşmektedir. Ayrıca 13,64–13,96 GHz frekans aralığında $+1$ değerine ulaşmakta, bu bantta ise RHCP dönüşümü gözlenmektedir. Şekil 109(d)'de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 5,79–5,84 GHz ve 13,64–13,96 GHz frekans bantlarında 0 dB'ye ulaşarak, bu bantlarda LP–CP dönüşümün gerçekleştiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde gözlenen yükselme noktalarının sırasıyla 6,2 GHz, 7,78 GHz ve 11,52 GHz rezonans frekanslarıyla örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, söz konusu frekansların rezonans noktaları olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 109(b)'de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı hem de Şekil 108'de yer alan yansıma katsayıları incelendiğinde, Şekil 109(c)'de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ 'nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansıma katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



Şekil 110. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) PCR değerlerinin açısal değişimi

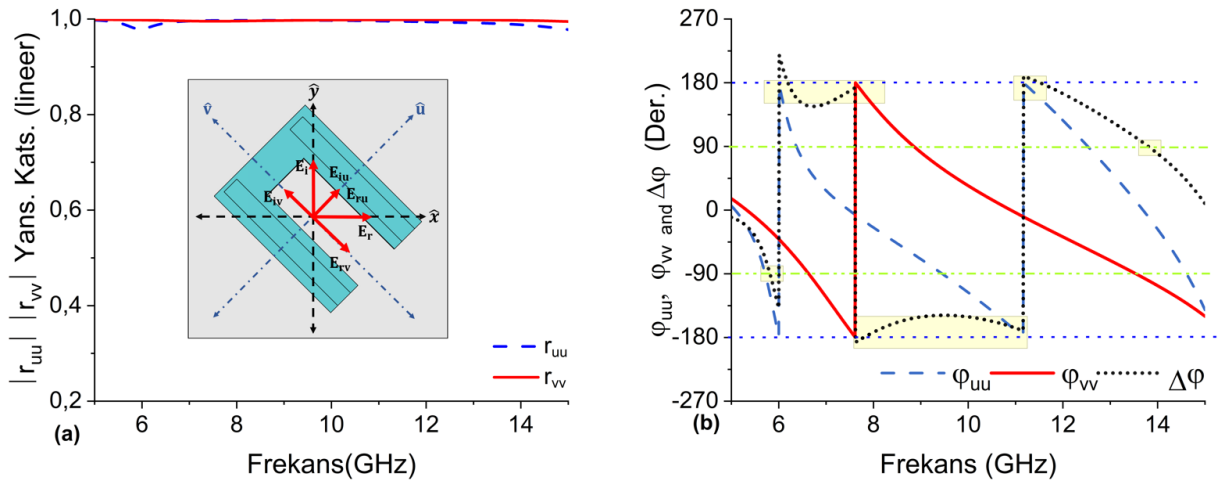
Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açılarındaki yansıma katsayıları Şekil 109(a) ve Şekil 109(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 110(a) ve Şekil 110(b)'de 0° ile 50° arasındaki yansıma katsayıları ve PCR değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, polarizasyon dönüştürücünün 50° eğik geliş açısındaki PCR performansı değerlendirilmiş ve %70, %80 ve %90 eşik değerleri için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; PCR %90 için 5,99–6,09 GHz ($\Delta f = 0,10$ GHz), 8,03–8,90 GHz ($\Delta f = 0,87$ GHz) ve 11,52–11,87 GHz ($\Delta f = 0,35$ GHz) aralıklarında dönüşüm elde edilmiştir. PCR %80 eşliğinde bantlar 5,94–6,17 GHz ($\Delta f = 0,23$ GHz), 7,80–9,21 GHz ($\Delta f = 1,41$ GHz), 11,45–12,02 GHz ($\Delta f = 0,57$

GHz) ve 13,45–13,81 GHz ($\Delta f = 0,36$ GHz) olarak gözlemlenmiştir. PCR %70 seviyesinde ise 5,90–6,25 GHz ($\Delta f = 0,35$ GHz), 7,60–9,51 GHz ($\Delta f = 1,91$ GHz), 11,40–12,18 GHz ($\Delta f = 0,78$ GHz) ve 13,37–13,94 GHz ($\Delta f = 0,57$ GHz) değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlardaki Δf ifadesi bant genişliklerini ifade etmektedir.



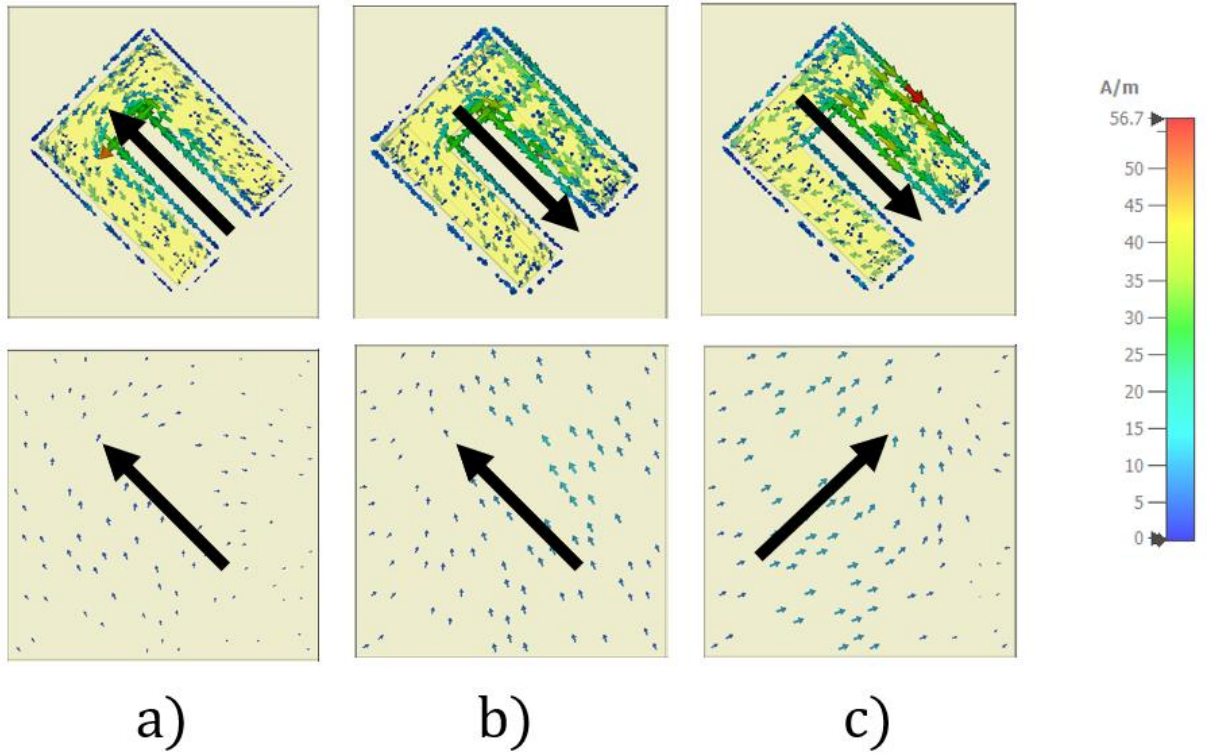
Şekil 111. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre PCR değerleri: (a) $h=2-4,4$ mm (b) $L=2-3,2$ mm (c) $a=9,4-10$ mm (d) $L=11,2-14,2$ mm

Şekil 111’de Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin PCR üzerindeki etkilerini göstermektedir Şekil 111’de gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; 3D rezonatörün ölçülerinden (a) ve (b), birim hücre genişliği (L) ve dielektrik tabakaların kalınlığıdır (h). Buradaki temel amaç, geniş bant genişliği ve yüksek PCR oranının birlikte sağlandığı maksimum verim koşulunun elde edilmesi hedeflenir. PCR değerinin maksimum düzeyde olabilmesi için, eş-polarizasyon yansımaya katsayısının mümkün olduğunca düşük, çapraz-polarizasyon yansımaya katsayısının ise olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. Bu koşullar sağlandığında, PCR en yüksek değerine ulaşır.



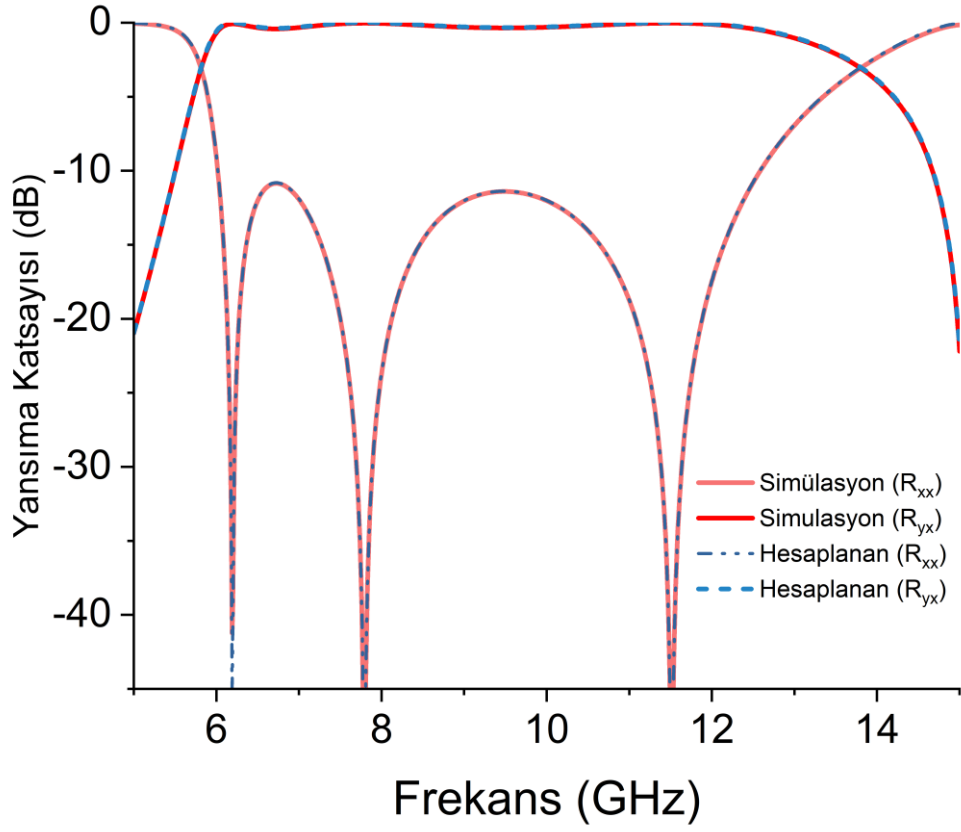
Şekil 112. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 112’de gösterildiği üzere yapı $u-v$ koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 112’de tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 112(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1’e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 112(b)’de LP–LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 6,02–12,58 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP–LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 108’de verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 6,2 GHz, 7,78 GHz ve 11,52 GHz rezonans frekanslarında, y -polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x -polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 112(b)’de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP–CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 109 (b)’de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 112 (b)’deki faz farkı grafiğinde, 5,79–5,84 GHz ve 13,64–13,96 GHz bantlarında yaklaşık $\pm 90^\circ$ farkı gözlemlenmektedir. Bu faz farkı, LP–CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



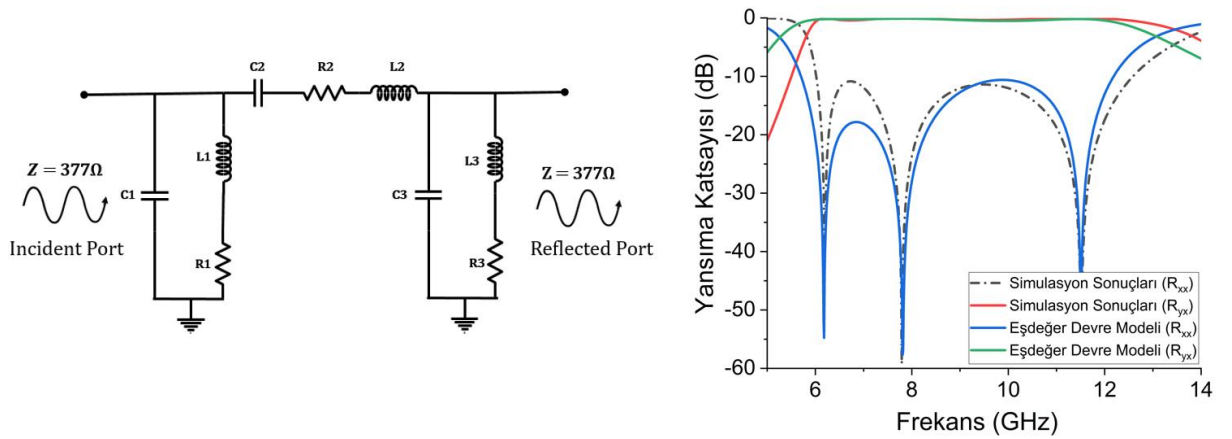
Şekil 113. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücü birim hücre için yüzey akım dağılımları: (a) 7,99 GHz, (b) 10 GHz, (c) 12,77 GHz, (d) 17,64 GHz, (e) 19,97 GHz.

Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları üç farklı rezonans frekansında (6,2 GHz, 7,78 GHz ve 11,52 GHz) analiz edilmiştir. Rezonatör ve arka metal katmandaki akım dağılımları, Şekil 113’de her iki katman için birlikte sunulmuştur. Şekilde yer alan oklar, her bir rezonans frekansında yüzey akımlarının yönünü göstermektedir. Şekil 113(a)’da yüzey akımlarının paralel yönelimi nedeniyle elektriksel rezonans, Şekil 113(b) ve (c)’de ise paralel olmayan yönelim nedeniyle manyetik rezonans meydana gelmiştir.



Şekil 114. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

Şekil 114’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u–v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.



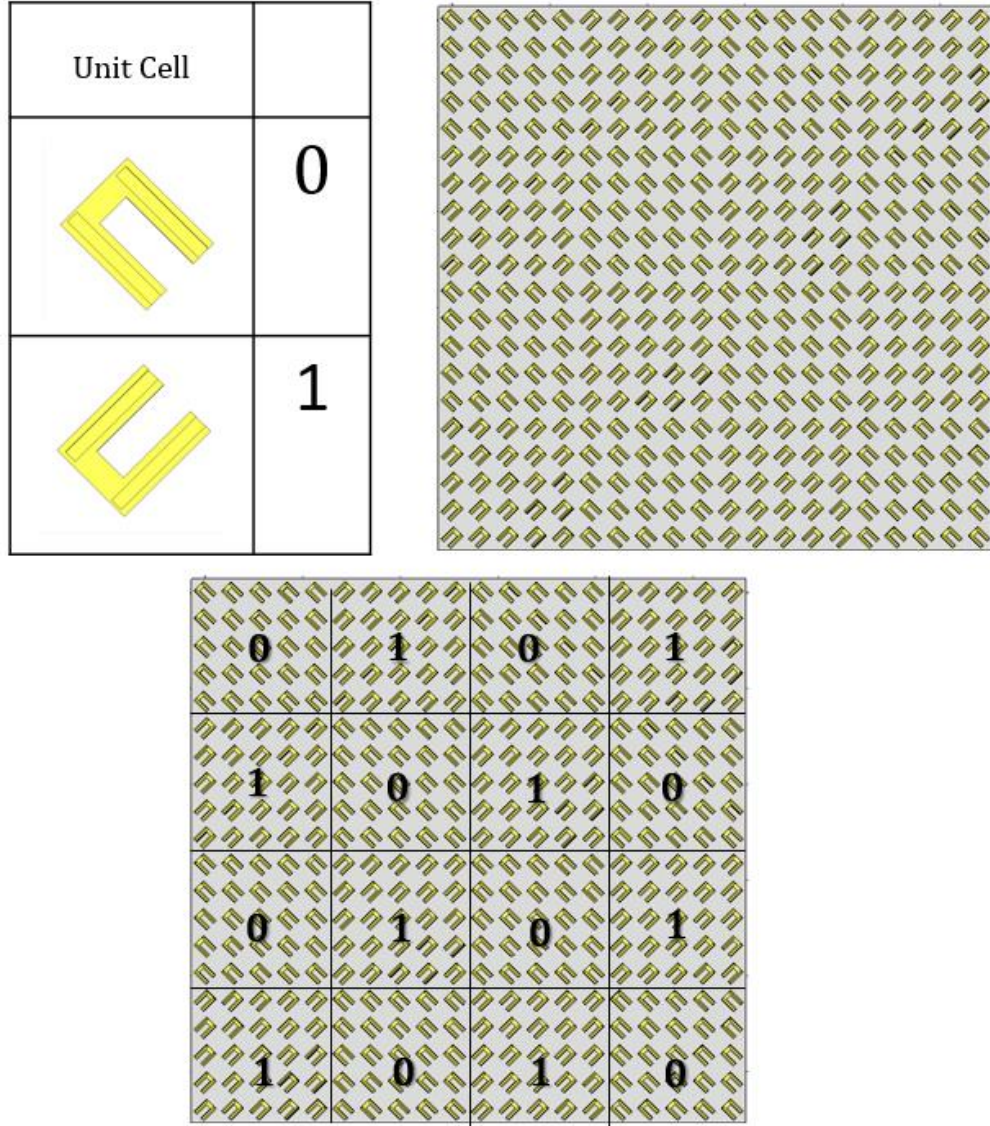
Şekil 115. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücüye ait eşdeğer devre modeli ve yansıma katsayıları.

Şekil 115'te, ADS programı kullanılarak elde edilen eşdeğer RLC devresi ile bu modele karşılık hesaplanan yansıma katsayıları ve simülasyon sonuçları birlikte sunulmuştur. Model, önerilen 3D polarizasyon dönüştürücünün elektromanyetik tepkisini temsil eden direnç, kapasitör ve bobinden oluşmaktadır. Devre elemanlarının değerleri, yansıma katsayısı verilerine dayanarak çıkarılmış ve simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Elde edilen eşdeğer devre parametreleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Önerilen 3D polarizasyon dönüştürücüye ait Eşdeğer Devre RLC Parametreleri

Devre Elemanı	Değer
R1	0,3094 Ω
R2	39,896 Ω
R3	8,792 Ω
L1	1,844 nH
L2	4,786 nH
L3	1,427 nH
C1	1,427 pF
C2	0,0151 pF
C3	0,038 pF

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

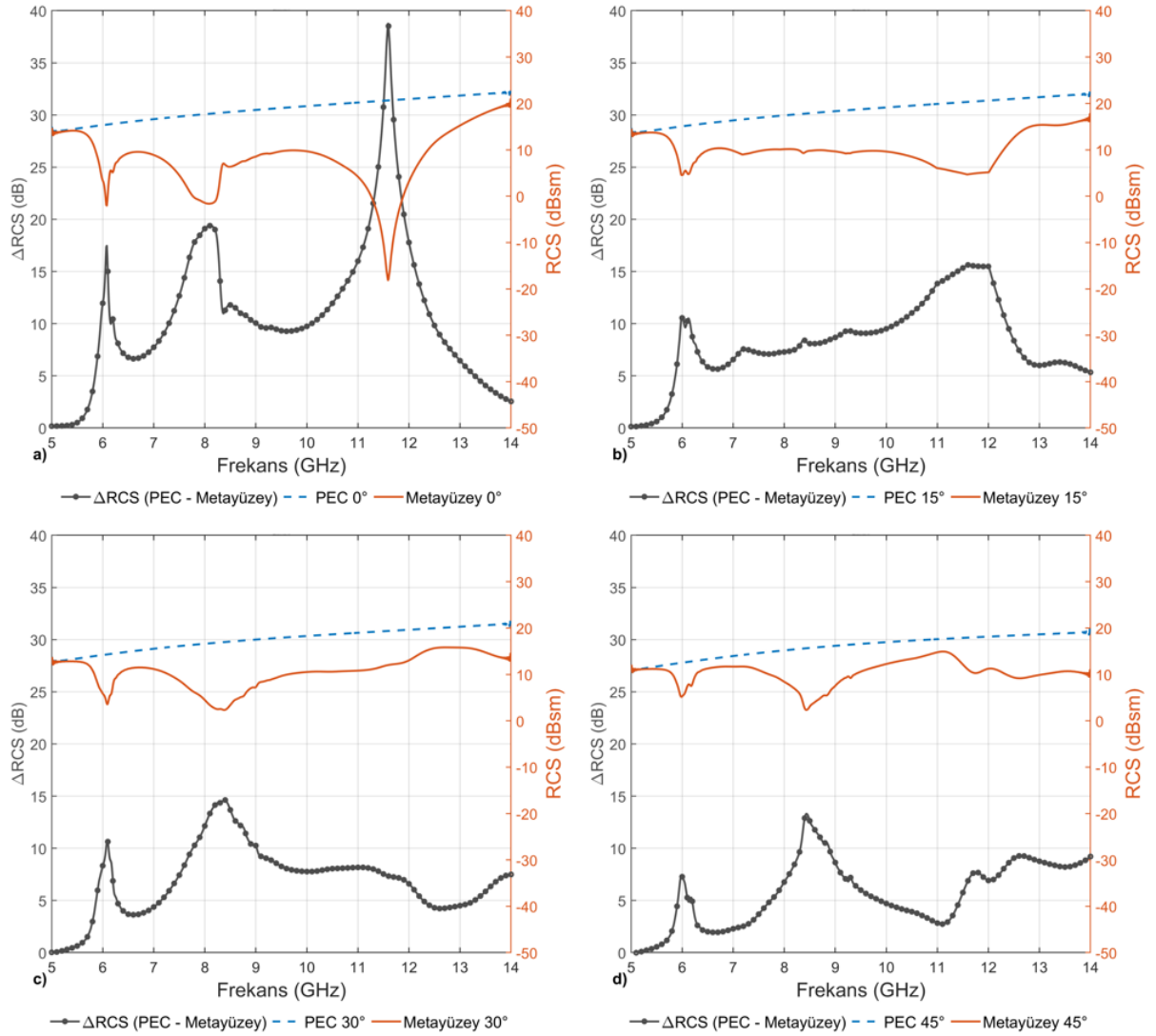
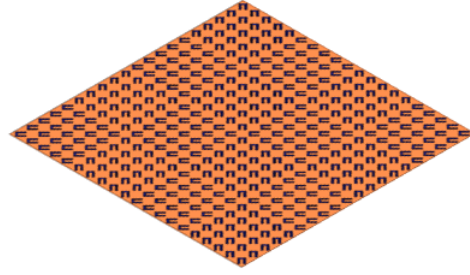


Şekil 116. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi,

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 116 yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın

en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışılma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB değerinde azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır, Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah dairesel çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir, Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışılma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir, $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır, Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

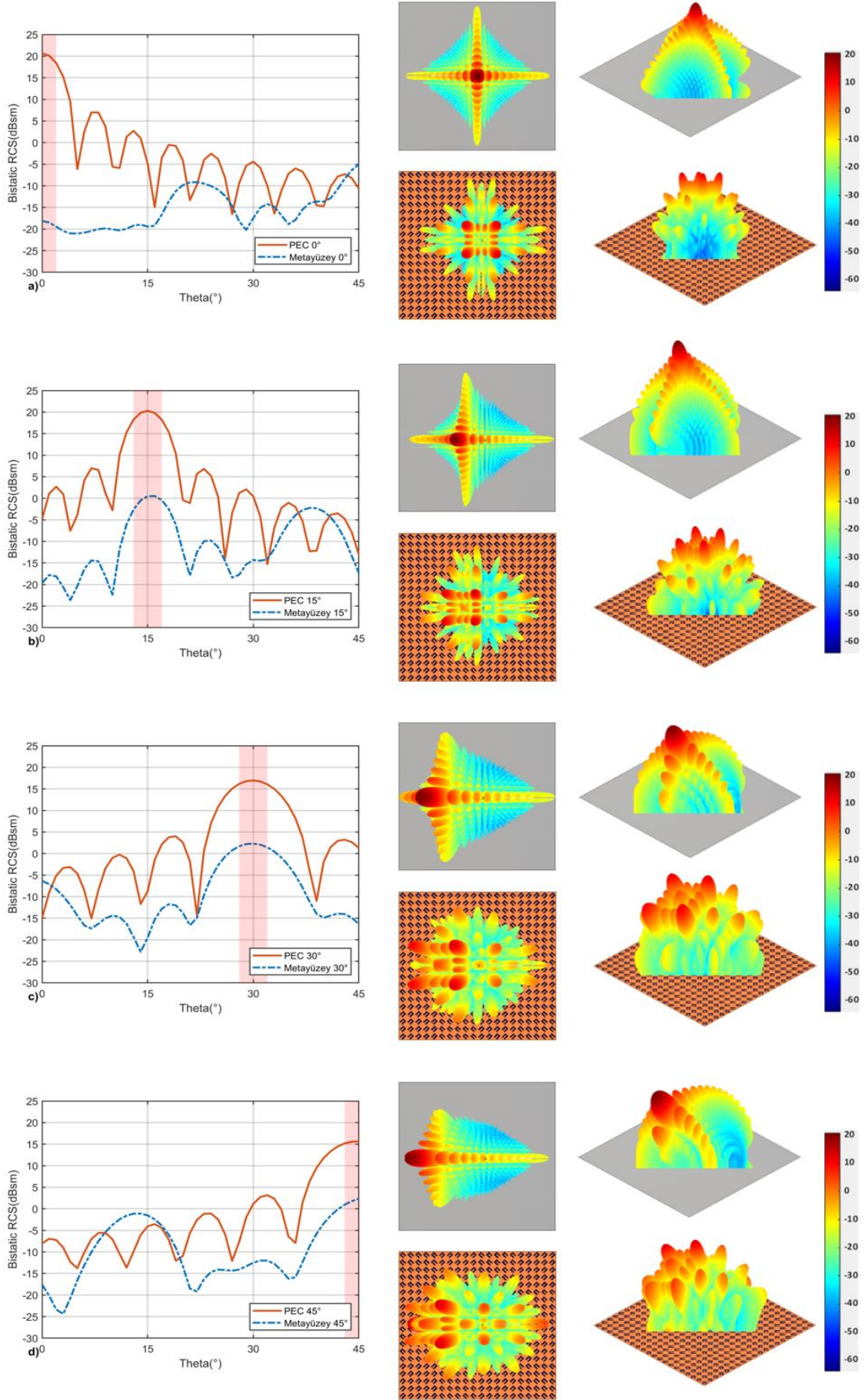
Düz plaka



Şekil 117. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 117, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 117(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 11,59 GHz frekansında 38,76 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 5,96–6,15 GHz

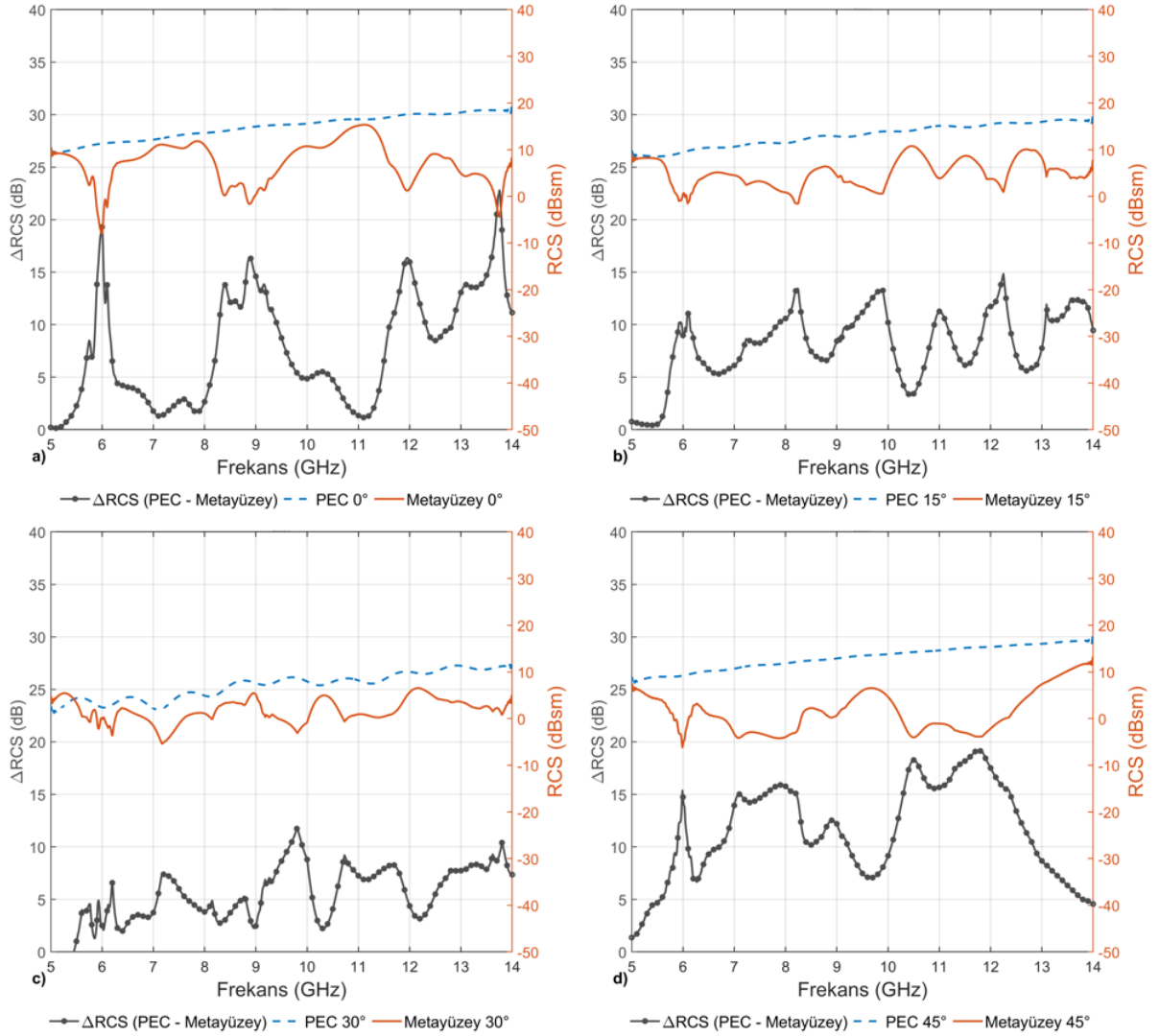
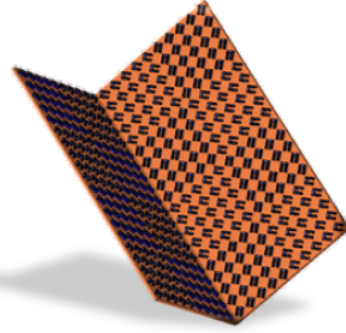
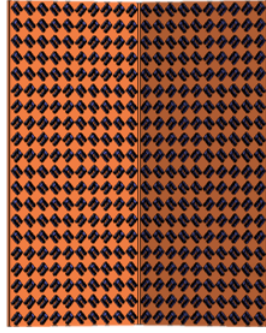
(0,19 GHz), 7,30–9,01 GHz (1,71 GHz) ve 10,10–12,48 GHz (2,38 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 5,86–13,28 GHz aralığında 7,42 GHz bant genişliği, 3 dB eşliğinde ise 5,78–13,81 GHz aralığında 8,03 GHz bant genişliği elde edilmiştir, Şekil 117(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 11,59 GHz frekansında 15,64 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,09–6,15 GHz (0,06 GHz) ve 10,21–12,36 GHz (2,15 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşliğinde 5,87–14,00 GHz aralığında 8,13 GHz bant genişliği, 3 dB eşliğinde ise 5,79–14,00 GHz aralığında 8,21 GHz bant genişliği gözlenmiştir, Şekil 117(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 8,38 GHz frekansında 14,65 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 6,07–6,11 GHz (0,04 GHz) ve 7,77–9,01 GHz (1,24 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 5,88–6,27 GHz (0,39 GHz), 7,15–12,27 GHz (5,12 GHz) ve 13,29–14,00 GHz (0,71 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşliğinde ise 5,81–14,00 GHz aralığında 8,19 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 117(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 8,44 GHz frekansında 13,30 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 8,32–8,88 GHz (0,56 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 5,92–6,11 GHz (0,19 GHz), 7,74–9,86 GHz (2,12 GHz) ve 11,44–14,00 GHz (2,56 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşliğinde ise 5,85–6,27 GHz (0,42 GHz), 7,37–10,92 GHz (3,55 GHz) ve 11,22–14,00 GHz (2,78 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 118. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 11,59 GHz, (b) 11,59 GHz, (c) 8,38 GHz ve (d) 8,44 GHz

Şekil 118, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 118(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 11,59 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 20,64 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -18,12 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 38,76 dB değerinde bir RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 118(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 11,59 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 20,32 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise 0,50 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 19,82 dB değerinde azalma elde edilmiştir. Şekil 118(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 8,38 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 16,97 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise 2,32 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 14,65 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 118(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 8,44 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,64 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise 2,33 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 13,31 dB değerinde bu bistatik RCS azalma elde edilmiştir.

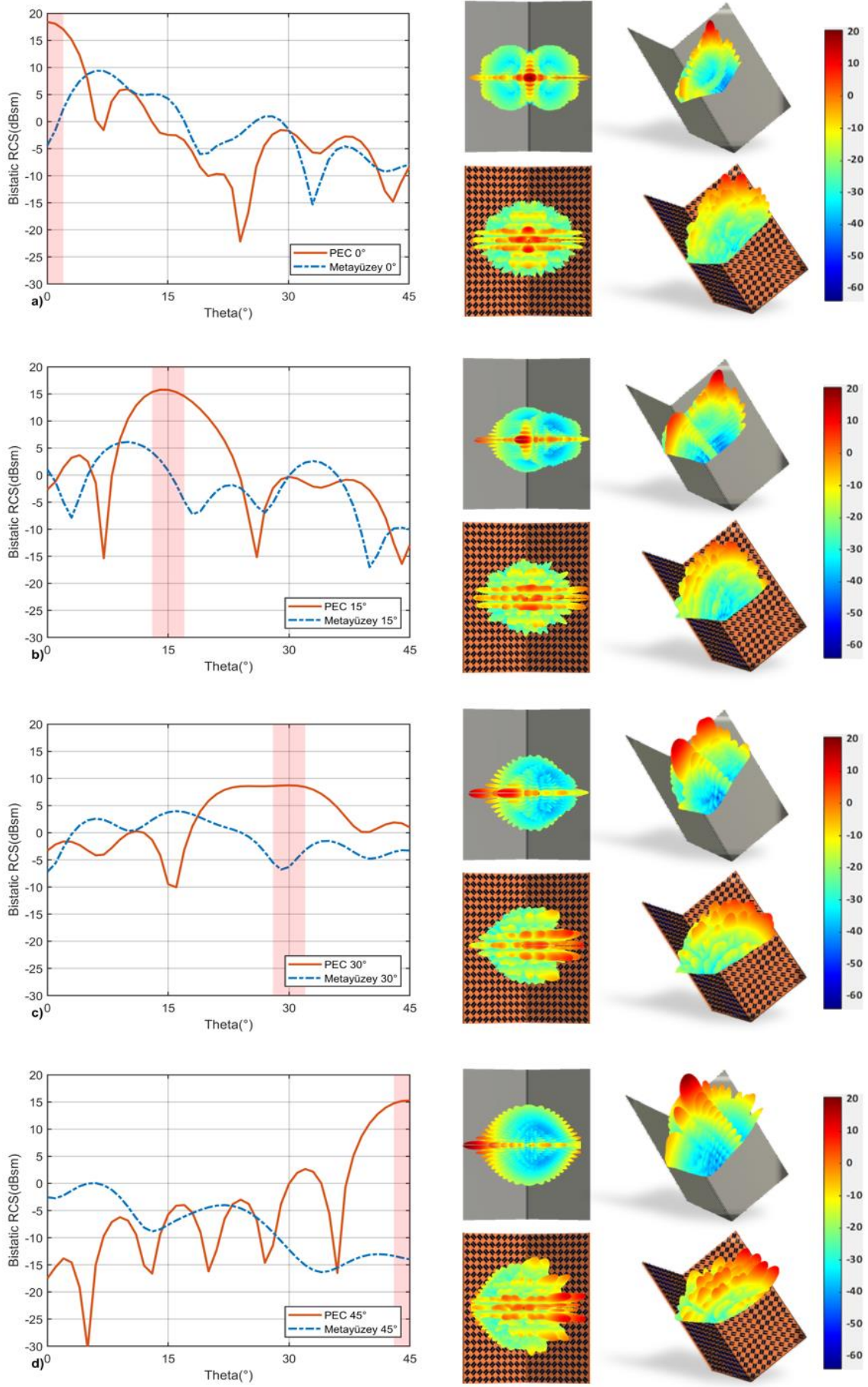
Dihedral plaka



Şekil 119. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 119, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 119(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 13,75 GHz frekansında 22,80 dB olarak elde edilmiştir. Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 5,87–6,13 GHz (0,26 GHz), 8,29–9,41 GHz (1,12 GHz), 11,62–12,31 GHz (0,69 GHz) ve 12,83–14,00 GHz

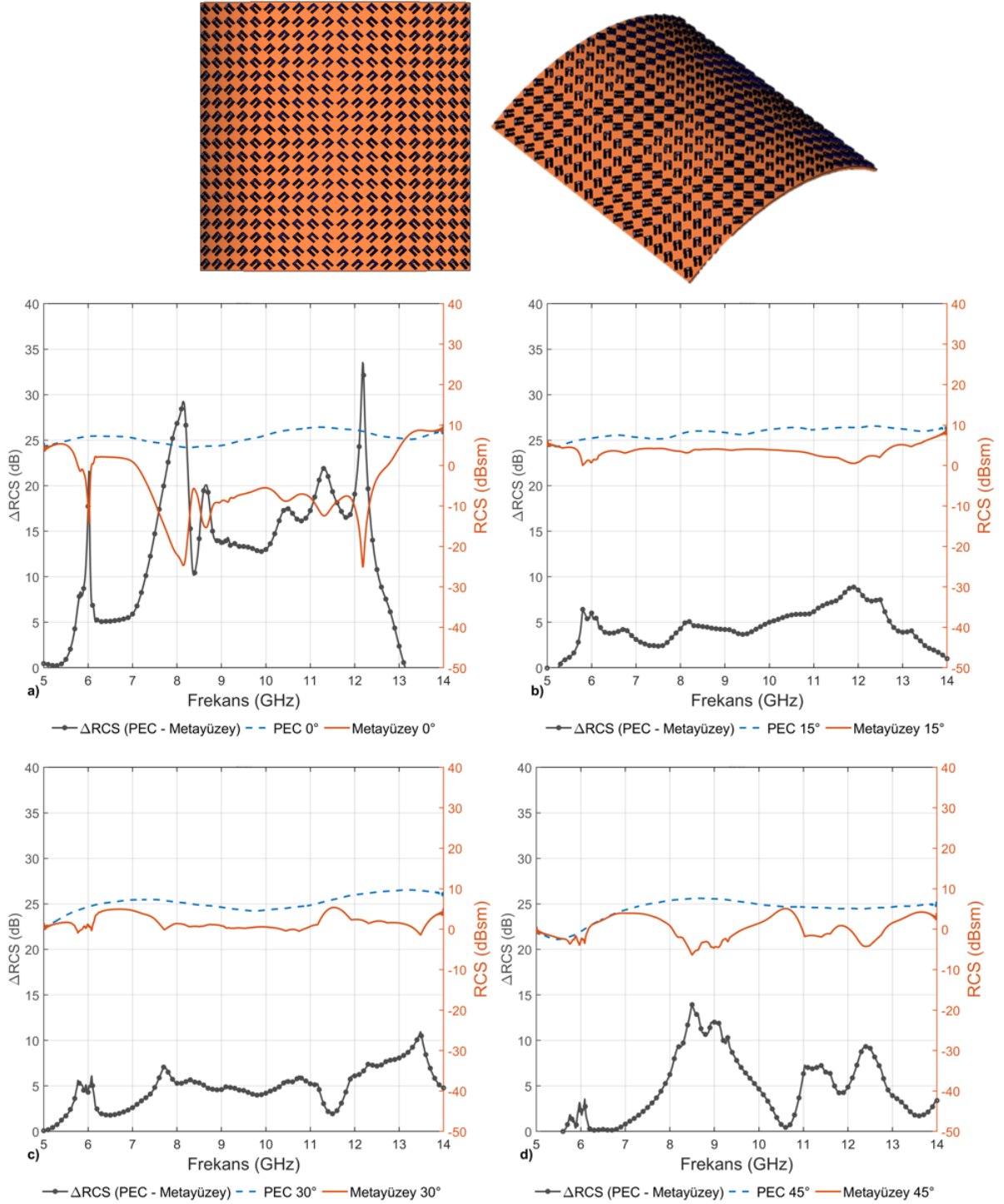
(1,17 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 5,65–6,25 GHz (0,60 GHz), 8,14–9,88 GHz (1,74 GHz), 10,08–10,45 GHz (0,37 GHz) ve 11,46–14,00 GHz (2,54 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,56–6,84 GHz (1,28 GHz), 8,03–10,69 GHz (2,66 GHz) ve 11,37–14,00 GHz (2,63 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 119(b) 15° geliş açısı için maksimum azalma 12,25 GHz frekansında 14,83 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 5,92–5,97 GHz (0,05 GHz), 6,08–6,13 GHz (0,05 GHz), 7,85–8,34 GHz (0,49 GHz), 9,31–10,00 GHz (0,69 GHz), 10,91–11,14 GHz (0,23 GHz), 11,87–12,36 GHz (0,49 GHz) ve 13,07–13,97 GHz (0,90 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 5,74–10,24 GHz (4,50 GHz) ve 10,65–14,00 GHz (3,35 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, 3 dB eşiğinde ise 5,69–14,00 GHz arasında 8,31 GHz değerinde geniş bir bant elde edilmiştir. Şekil 119(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 9,81 GHz frekansında 11,86 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 9,66–9,91 GHz (0,25 GHz) ve 13,79–13,82 GHz (0,03 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşiğinde 7,08–7,66 GHz (0,58 GHz), 8,74–8,80 GHz (0,06 GHz), 9,11–10,10 GHz (0,99 GHz), 10,55–11,95 GHz (1,40 GHz) ve 12,46–14,00 GHz (1,54 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,58–5,79 GHz (0,21 GHz), 6,07–6,27 GHz (0,20 GHz), 6,54–8,23 GHz (1,69 GHz), 8,40–8,89 GHz (0,49 GHz), 9,03–10,19 GHz (1,16 GHz) ve 10,44–14,00 GHz (3,56 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 119(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 11,77 GHz frekansında 19,14 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 5,89–6,09 GHz (0,20 GHz), 6,71–9,22 GHz (2,51 GHz) ve 10,06–12,84 GHz (2,78 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 5,59–13,79 GHz aralığında 8,20 GHz bant genişliği sağlanmıştır, 3 dB eşiğinde ise 5,25–14,00 GHz aralığında 8,75 GHz bant genişliği elde edilmiştir.



Şekil 120. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 13,75 GHz, (b) 12,25 GHz, (c) 9,81 GHz ve (d) 11,77 GHz

Şekil 120, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 120(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 13,75 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 18,40 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-4,40$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 22,80 dB değerinde bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 120(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 12,25 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,75 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise 0,81 dBsm'dir, 14,94 dB değerinde bu azalma, metayüzeyin eğik açılarda da geri saçılım bastırma özelliğini sürdürdüğünü göstermektedir. Şekil 120(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 9,81 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,72 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-6,31$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 15,04 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 120(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 11,77 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 15,27 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-14,00$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 29,27 dB değerinde bistatik RCS azalması görülmektedir.

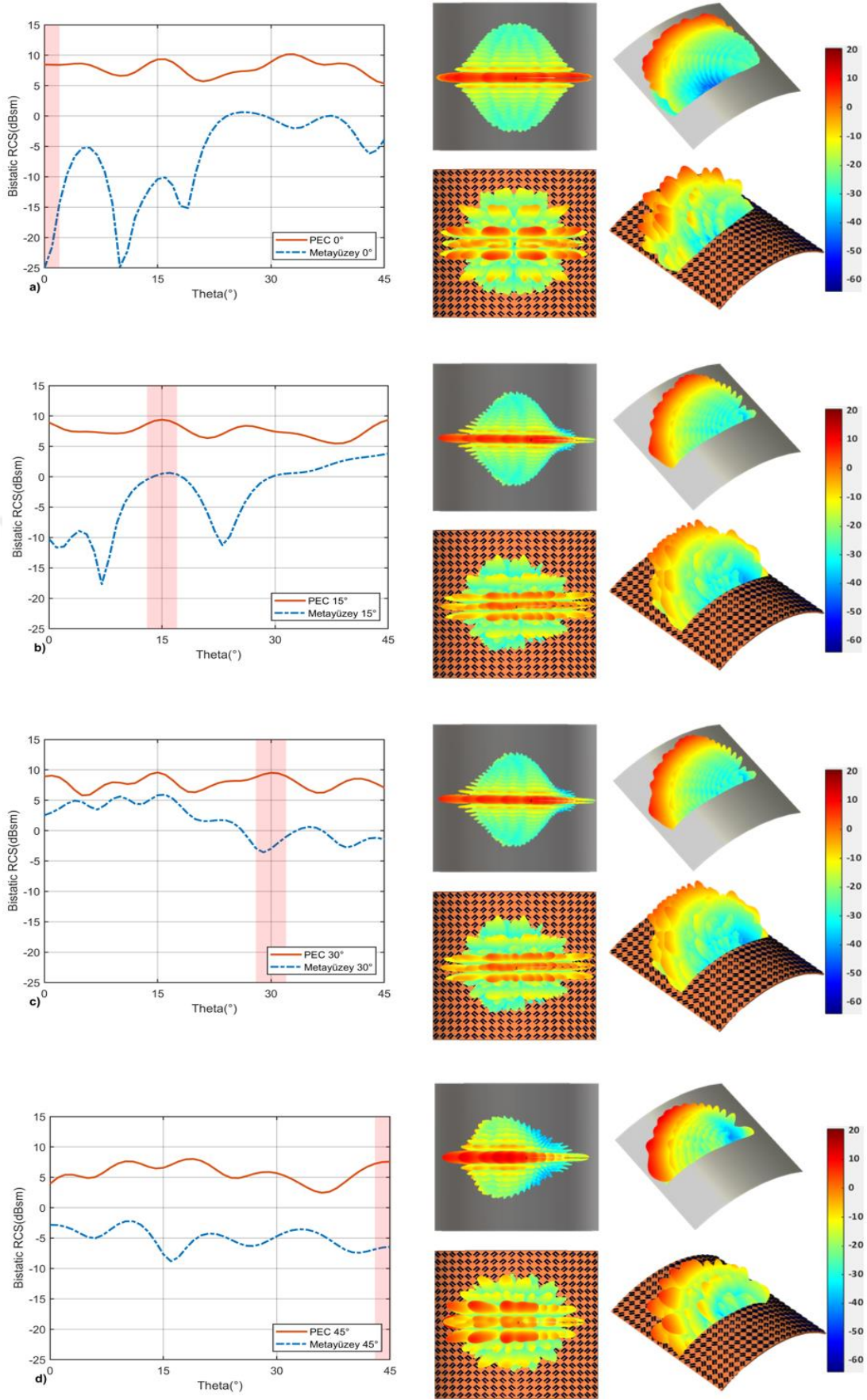
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 121. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 121, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır, Şekil 121(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 12,18 GHz frekansında 33,52 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 5,94–6,05 GHz (0,11 GHz) ve 7,30–12,53 GHz (5,23 GHz) bantları gözlenmiştir. 5 dB eşiğinde 5,73–

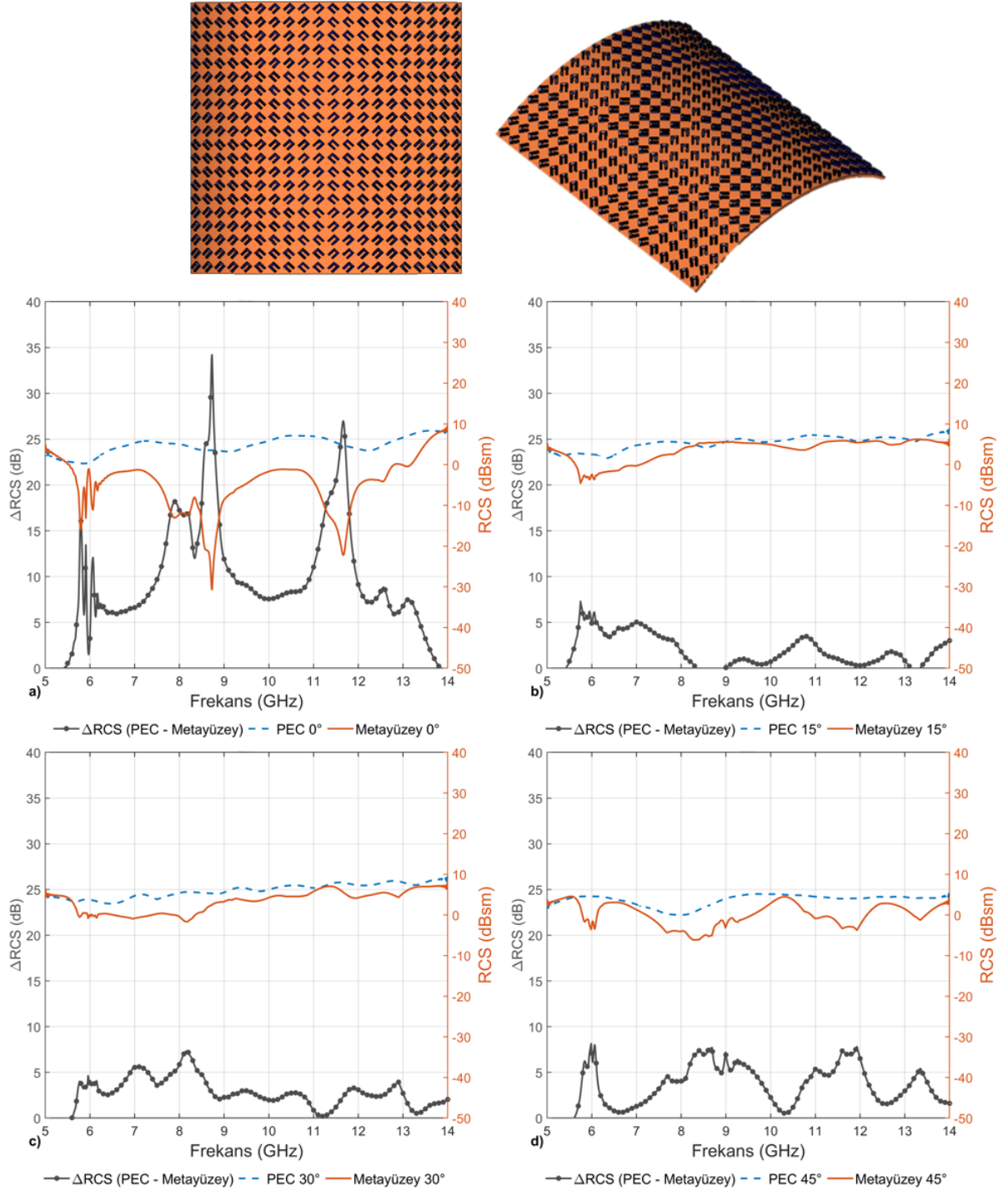
12,86 GHz aralığında 7,13 GHz, 3 dB eşiğinde ise 5,66–12,96 GHz aralığında 7,30 GHz bant genişliği sağlanmıştır. Şekil 121(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 11,91 GHz frekansında 8,88 dB olarak gözlenmiştir, Sonuç olarak bu açı için 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalma olmamıştır, 5 dB eşiğinde 5,78–6,14 GHz (0,36 GHz), 8,12–8,21 GHz (0,09 GHz) ve 10,00–12,71 GHz (2,71 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, 3 dB eşiğinde ise 5,71–7,03 GHz (1,32 GHz) ve 7,75–13,38 GHz (5,63 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 121(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 13,48 GHz frekansında 10,94 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 13,40–13,52 GHz frekans aralığında 0,12 GHz bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde ise 5,76–5,87 GHz (0,11 GHz), 7,52–8,62 GHz (1,10 GHz), 10,33–11,17 GHz (0,84 GHz) ve 11,85–13,92 GHz (2,07 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,66–6,15 GHz (0,49 GHz), 7,11–11,30 GHz (4,19 GHz) ve 11,70–14,00 GHz (2,30 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 121(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 8,50 GHz frekansında 13,93 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 8,32–9,19 GHz (0,87 GHz) ve 9,28–9,31 GHz (0,03 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 7,87–9,94 GHz (2,07 GHz), 10,96–11,69 GHz (0,73 GHz) ve 12,02–12,85 GHz (0,83 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 7,58–10,24 GHz (2,66 GHz), 10,87–13,24 GHz (2,37 GHz) ve 13,94–14,00 GHz (0,06 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır.



Şekil 122. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 12,18 GHz, (b) 11,91 GHz, (c) 13,48 GHz ve (d) 8,50 GHz

Şekil 122, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir, Şekil 122(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 12,18 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 8,45 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -25,07 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 33,52 dB değerinde bir bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 122(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 11,91 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 9,38 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise 0,51 dBsm'dir. Bu geliş açısı için 8,87 dB değerinde bistatik RCS azalması gözlenmiştir. Şekil 122(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 13,48 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 9,51 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -2,99 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 12,50 dB değerinde bistatik RCS azalma elde edilmiştir. Şekil 122(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 8,50 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 7,57 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise -6,43 dBsm'dir, Bu geliş açısı için 14,00 dB değerinde bir azalma sağlanmıştır.

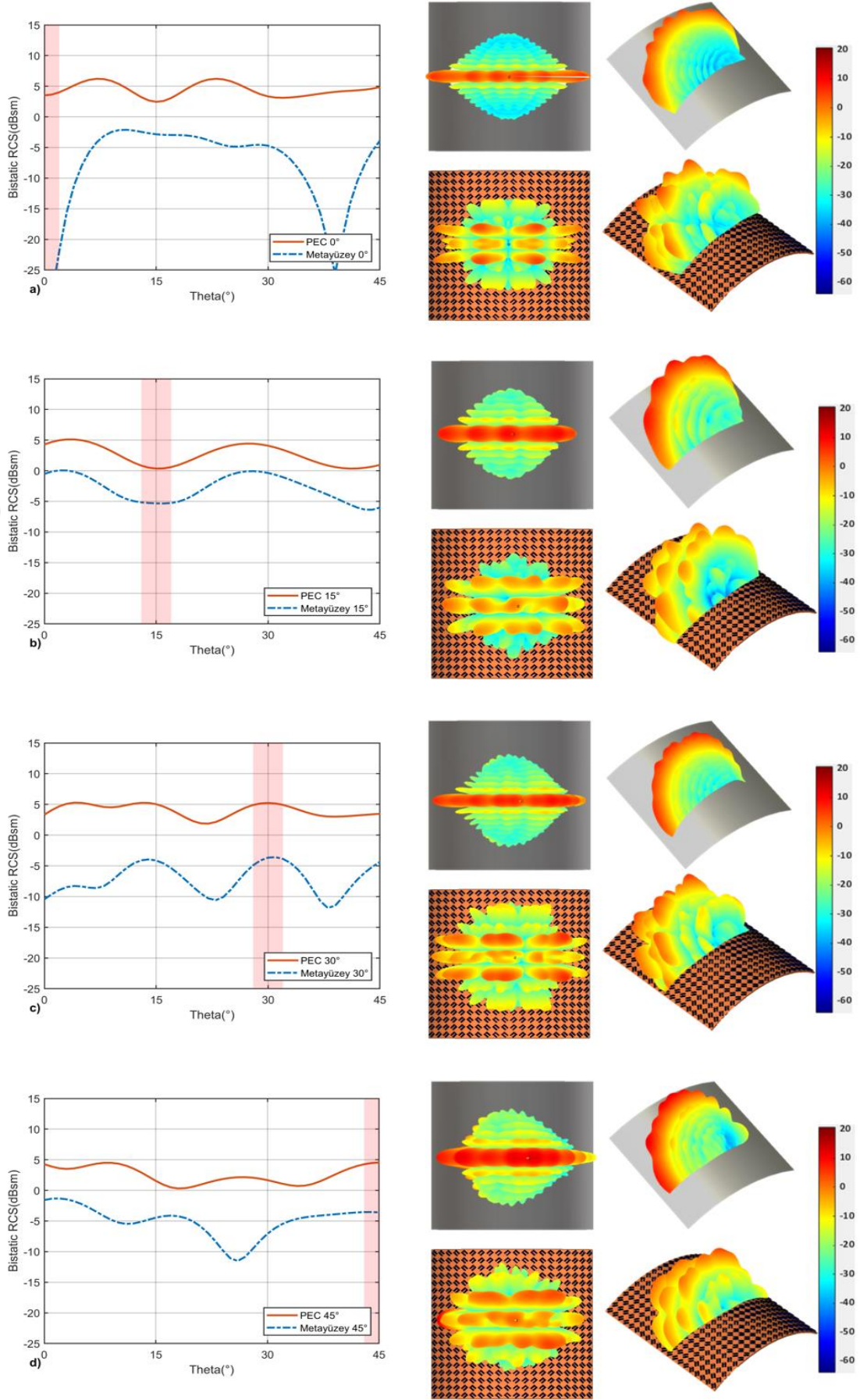
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 123. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 123, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 123(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 8,73 GHz frekansında 34,21 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 7,53–9,21 GHz (1,68 GHz) ve 10,93–11,95 GHz (1,02 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 5,71–

5,93 GHz (0,22 GHz) ve 6,02–13,37 GHz (7,35 GHz) bantları, 3 dB eşiğinde ise 5,66–5,94 GHz (0,28 GHz) ve 6,00–13,52 GHz (7,52 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 123(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 5,75 GHz frekansında 7,30 dB olarak gözlenmiştir be sebeple bu açı için 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması oluşmamıştır, 5 dB eşiğinde 5,72–5,99 GHz (0,27 GHz) ve 6,02–6,09 GHz (0,07 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,65–7,84 GHz (2,19 GHz) ve 10,61–10,93 GHz (0,32 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 123(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 8,17 GHz frekansında 7,33 dB olarak gerçekleşmiştir bu bağlamda değerlendirildiğinde 10 dB eşik değerinde monostatik RCS azalması olmamıştır, 5 dB eşiğinde 6,91–7,29 GHz (0,38 GHz) ve 7,86–8,43 GHz (0,57 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,73–6,19 GHz (0,46 GHz), 6,59–8,69 GHz (2,10 GHz), 9,44–9,48 GHz (0,04 GHz), 11,78–12,02 GHz (0,24 GHz) ve 12,69–12,97 GHz (0,28 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir. Şekil 123(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 5,99 GHz frekansında 8,15 dB olarak elde edilmiştir bu nedenle 10 dB eşik değerinde monostatik RCS azalması gözlemlenmemiştir, 5 dB eşiğinde 5,81–6,11 GHz (0,30 GHz), 8,15–8,87 GHz (0,72 GHz), 8,92–9,61 GHz (0,69 GHz), 10,96–11,12 GHz (0,16 GHz), 11,39–12,09 GHz (0,70 GHz) ve 13,29–13,39 GHz (0,10 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 5,76–6,16 GHz (0,40 GHz), 7,47–9,90 GHz (2,43 GHz), 10,68–12,26 GHz (1,58 GHz) ve 13,01–13,59 GHz (0,58 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 124. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 8,73 GHz, (b) 5,75 GHz, (c) 8,17 GHz ve (d) 5,99 GHz

Şekil 124, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 124(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 8,73 GHz frekansında, PEC yüzeyinin RCS değeri 3,51 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-30,70$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 34,21 dB değerinde bistatik RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 124(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 5,75 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 0,35 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-5,33$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 5,68 dB değerinde bistatik RCS azalması gerçekleşmiştir. Şekil 124(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 8,17 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,24 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-3,67$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 8,90 dB değerinde bir azalma elde edilmiştir. Şekil 124(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 5,99 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 4,55 dBsm, metayüzeyin RCS değeri ise $-3,59$ dBsm'dir, Bu geliş açısı için 8,15 dB değerinde bir azalma görülmektedir.

Karşılaştırma

Tablo 10. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen C-, X-, ve Ku-Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey tabanlı 3D Polarizasyon Dönüştürücüler ile Karşılaştırılması

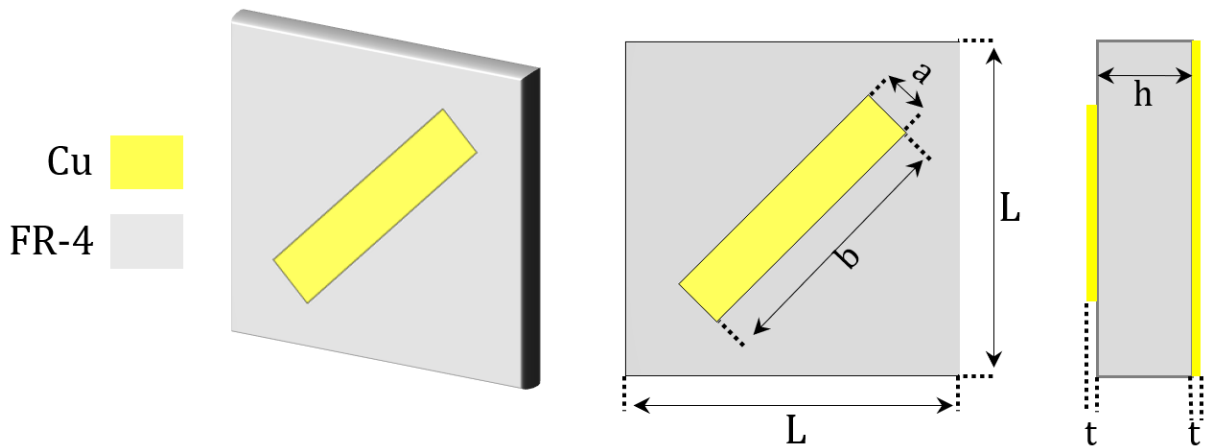
Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Dielektrik Tabaka ve Rezonatör Malzemesi / Tabaka Kalınlığı	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Deng et al., 2022)	10.42–16.72 GHz (LP-LP)	1,6 mm Gümüş	%90	Pol.Dön.
(Agrahari et al., 2022)	10.15–27.6 GHz (LP-LP)	Photosensitive resin 1,2 mm FR4 ve Bakır FR-4	%90	Pol.Dön.
Önerilen Çalışma	12,35–17,8 GHz (LP-LP)	2,80 mm Aliminyum Rogers AD 250C	%90	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilere

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, C-, X- ve Ku-Bantlarında çalışan son yıllardaki 3D Polarizasyon Dönüştürücü çalışmaları ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılan çalışmalar, Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, Dielektrik Tabaka ve Rezonatör Malzemesi/Tabaka Kalınlığı, verimlilik ile fonksiyon ve RCS analiz kapsamı parametreleri açısından değerlendirilmiştir. (Agrahari et al., 2022) ve (Deng et al., 2022) çalışmaları önerilen çalışma ile aynı verimlilik değerine sahiptir. Kıyaslanan ve önerilen çalışma 3D rezonatöre sahip olduğu için kullanılan rezonatör malzemelerinin analizi, maliyet

ve üretim tekniklerinde önemli farklılıklar göstermektedir. FR-4 tabanlı dielektrik alt tabaka, (Agrahari et al., 2022) tarafından yürütülen çalışmada rezonatör yapısının temelini oluşturmuştur. Bu yapı, alt tabaka üzerinde bir çıkıntı olarak konumlandırılan ikinci bir FR-4 katmanının üzerine kaplanan bakır iletken katmandan oluşur. (Deng et al., 2022) tarafından yürütülen çalışmanın rezonatör bileşeni, gümüşten yapılmıştır. Önerilen çalışmada ise rezonatör bölümünün tasarımında alüminyum kullanılmıştır. Alüminyum, bakırdan ve gümüşten daha az maliyetli, daha hafif ve mekanik olarak işlenmesi daha kolaydır. Önerilen yapı, karşılaştırılan 3D rezonaörlü tasarımlarla karşılaştırıldığında, daha uygun maliyetli, üretimi kolay ve endüstriyel olarak uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Son olarak kıyaslanan iki çalışma Fonksiyon ve RCS analiz kapsamı açısından sadece polarizasyon dönüştürücü fonksiyonu göstermiştir. Buna karşılık önerilen polarizasyon dönüştürücü farklı hedef geometrilerini (düz plaka, 90° açılı dihedral ve 200 mm ve 300 mm yarıçaplı silindirik) çeşitli geliş açıları (0°, 15°, 30°, 45°) altında değerlendirerek RCS analizini çoklu saçılma senaryolarını genişletmekte ve böylece metayüzeyin performansının daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamaktadır.

X-, Ku- ve K-Bant Uygulamaları için Dairesel Polarizasyon Dönüştürücü Tasarımı

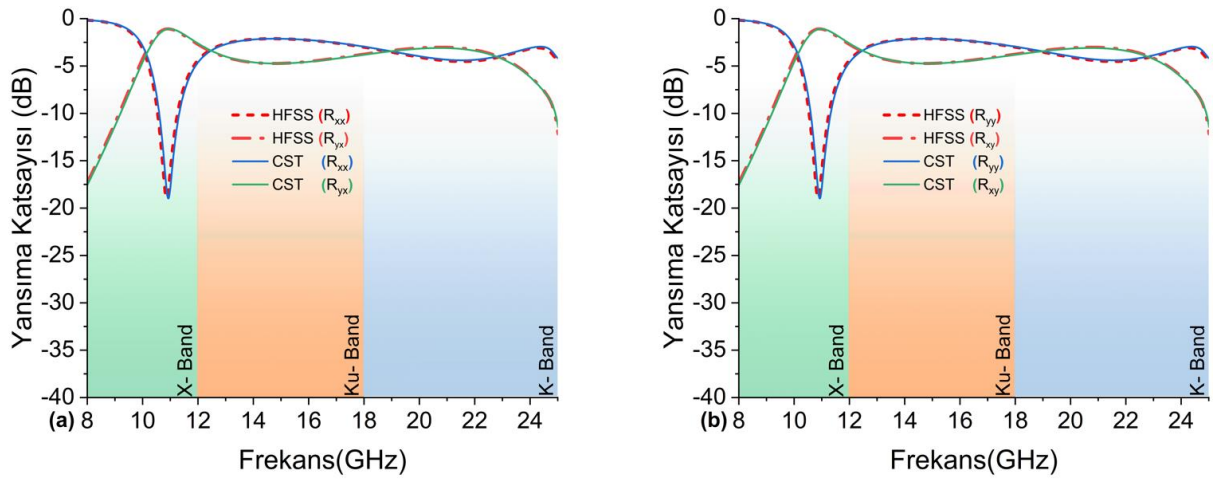
Tez kapsamında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün birim hücre yapısı, malzemeleri ve geometrik ölçüleri Şekil 125'te görülmektedir. Rezonatör ve birim hücrenin arka yüzeyi, $t=0,035\text{mm}$ kalınlığında $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m iletkenlik değerine sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Orta katmandaki FR-4 dielektrik tabaka malzemesi, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,3(1-j0,025)$ 'dir.



Şekil 125. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrelerinin ön ve yan görünüşleri ile ölçülendirilmesi

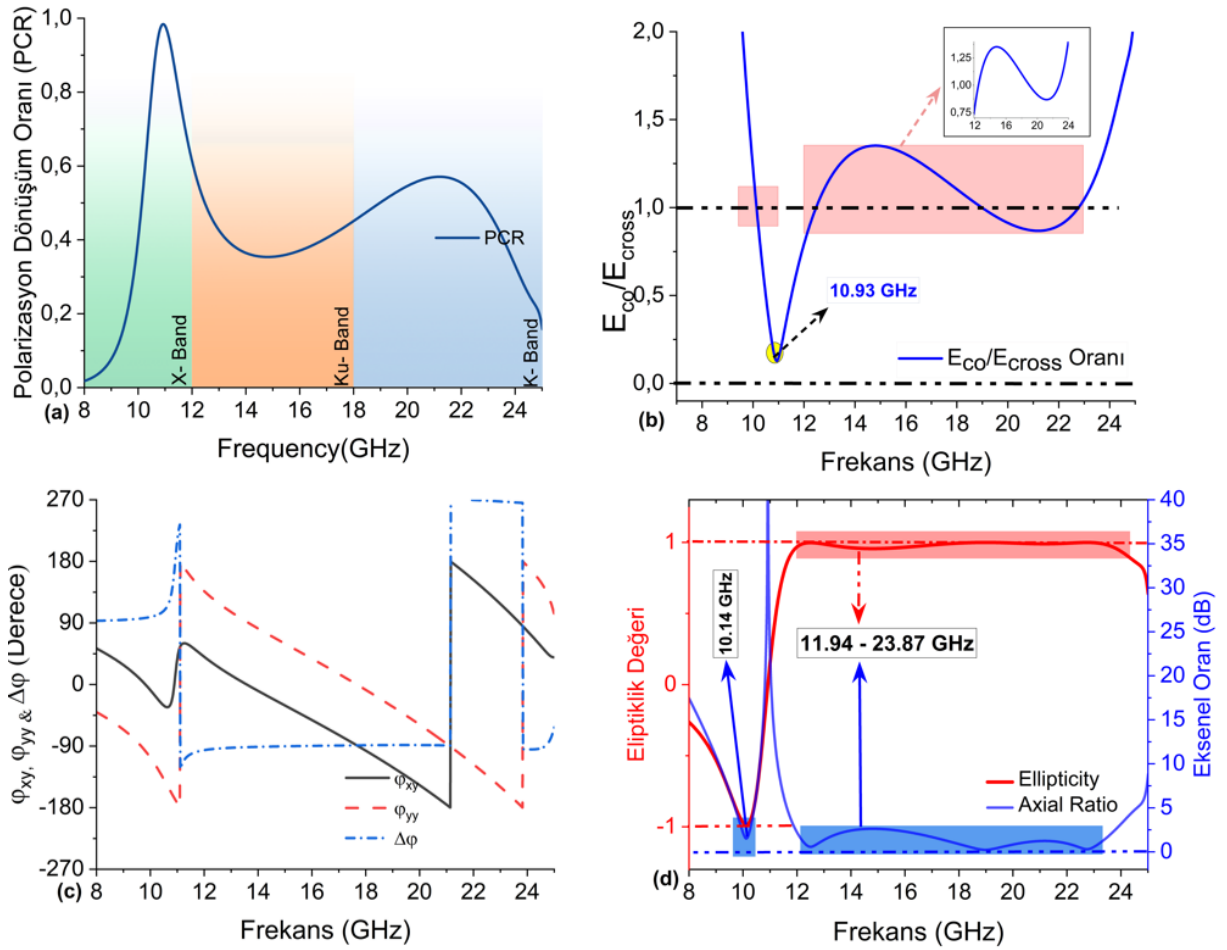
Maksimum bant genişliği ve yüksek eliptiklik ve eksenel oran verimliliği elde edebilmek amacıyla birim hücre boyutları optimize edilmiş ve Şekil 125'te gösterildiği üzere L

= 8 mm, $a = 1,28$ mm, $b = 6,40$ mm ve $h = 1,6$ mm olarak belirlenmiştir. Tasarımın metalik arka yüzeyi, elektromanyetik dalgaların ters yönde yansımalarını sağlayarak yapının yansımada çalışmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 126. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücresinin yansımada katsayıları: (a) TE modu, (b) TM modu.

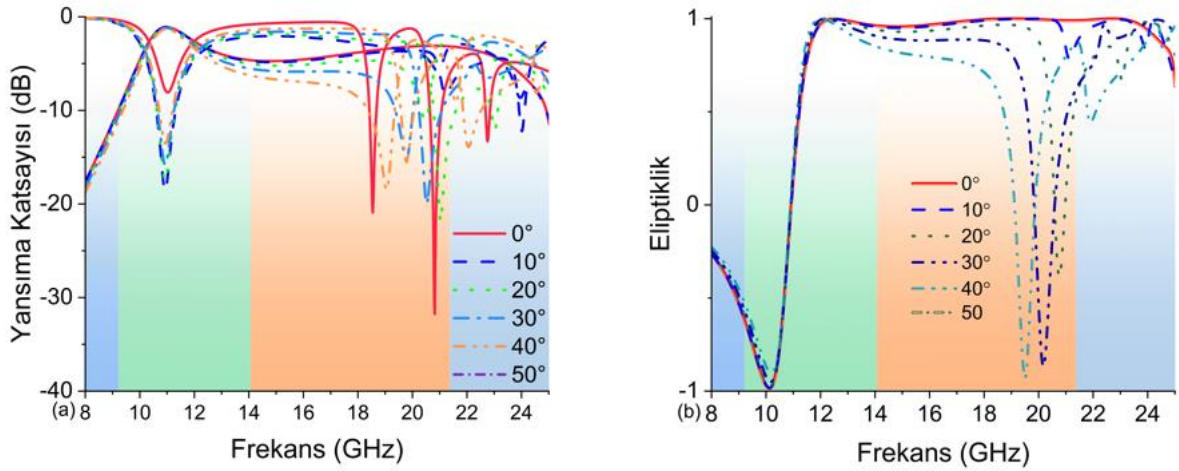
Şekil 126(a) ve 126 (b), x-polarize (TM modu) ve y-polarize (TE modu) gelen dalgalar için, yansımada katsayılarının frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 126 (a)'da normal geliş açısı altında, x-polarize dalga için eş-polarize yansımada katsayısı R_{xx} , 10,65-11,26 GHz'de -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansımada katsayısı en düşük R_{yx} , -1,05 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 11,94-23,87 GHz aralığında her iki yansımada katsayısı -4,73 ve üzeri değerdedir. Bu sonuçlar, 10,65-11,26 GHz'de x-polarize dalganın yansımada sırasında verimli bir şekilde y-polarizasyona dönüştüğünü ve 11,94–23,87 GHz frekans aralığında ise x polarize dalganın yansımada sırasında dairesel polarizasyon genlik koşulunu sağladığı görülmektedir. Ayrıca 10,93 GHz'de -18,95 dB'lik yansımada katsayısıyla rezonans noktası gözlenmiştir. Şekil 126(b)'de, y-polarize gelen dalga için benzer bir davranış gözlemlenmektedir. Eş polarize yansımada katsayısı R_{yy} , 10,65-11,26 GHz'de -10 dB değerine ulaşırken; çapraz-polarize yansımada katsayısı en düşük R_{xy} , -1,05 dB değerine ulaşmaktadır. Ayrıca 11,94-23,87 GHz aralığında her iki yansımada katsayısı -4,73 ve üzeri değerdedir. Özellikle, aynı rezonans frekansları ve yansımada değerleri elde edilmekte ve her iki polarizasyon durumunda da simetrik dönüşüm davranışı gözlenmektedir. Bu polarizasyon dönüştürücünün polarizasyondan bağımsız çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, Ansys HFSS'den elde edilen yansımada katsayıları ve rezonans davranışının CST Microwave Studio sonuçlarıyla yakından örtüştüğü ve bu durumun, farklı çözücüler arasında simülasyonların tutarlılığını ve doğruluğunu teyit ettiği belirtilmelidir.



Şekil 127. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için elde edilen sonuçlar: (a) PCR değeri, (b) yansıma katsayıları oranı, (c) yansıma katsayıları fazları ve aralarındaki fark, (d) eliptiklik ve eksenel oran değerleri

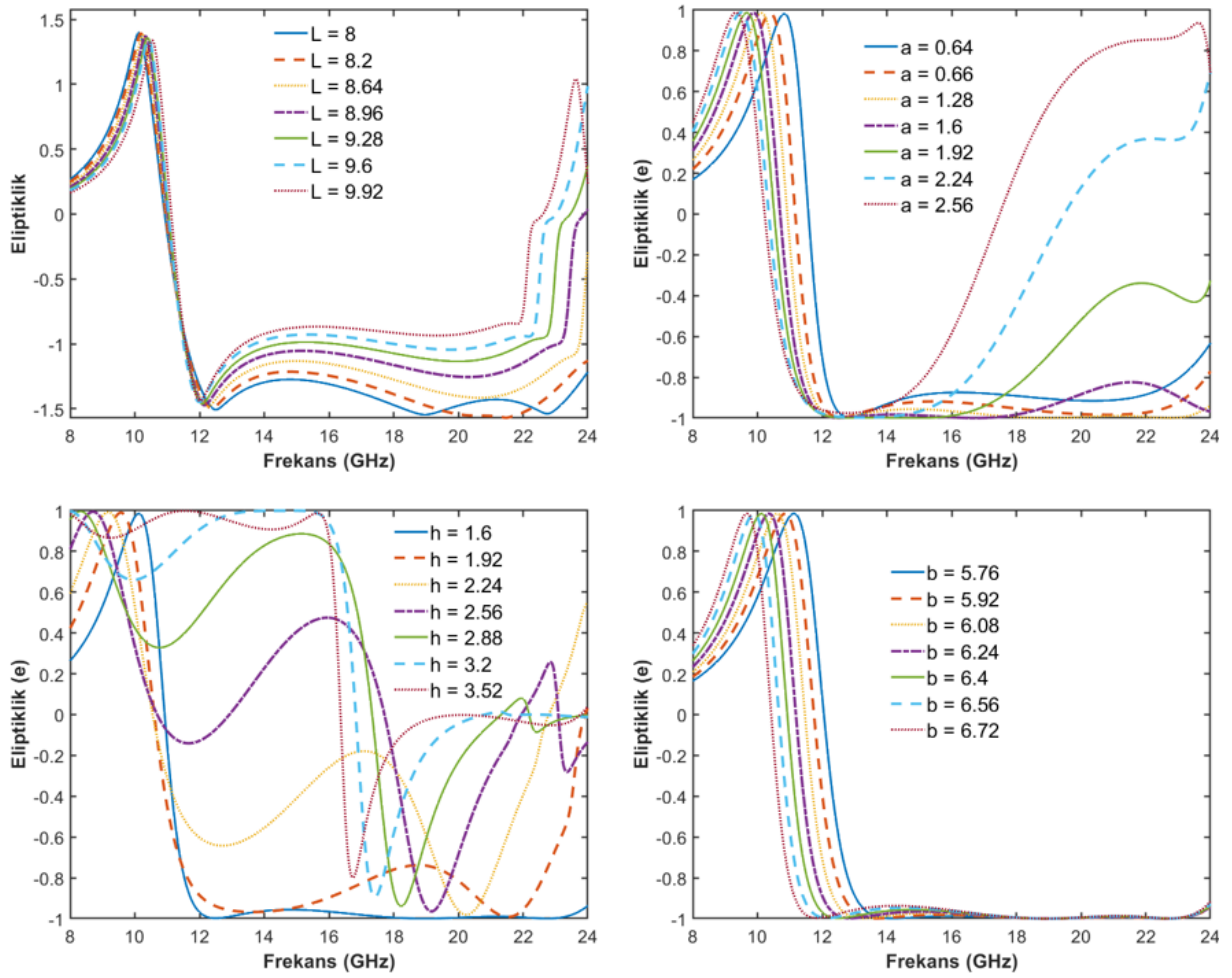
Şekil 127(a), PCR'nin frekansa göre değişimi göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere LP-LP polarizasyon dönüşüm verimliliği 10,65-11,26 GHz frekans bandında %90 'u aşmaktadır. Şekil 127 (b)'de, eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı verilmiştir. Grafikteki 1 noktası, yansıma katsayılarının genliğinin eşit olduğu noktaları temsil eder. Bu noktalar, eş ve çapraz polarizasyon katsayılarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte olup, bu durum dairesel polarizasyon dönüşümünün temel gerekliliklerinden biridir. Grafikte 0 noktasına en yakın olan noktalar ise yansıma katsayılarının en büyük genlik farkının olduğu noktalardır ve en yüksek PCR değerinde LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği frekansları temsil etmektedir. Bu bağlamda, Şekil 126'da gösterilen 10,93 GHz rezonans frekansının, Şekil 126(b)'de grafiğin neredeyse sıfıra yaklaştığı noktaya karşılık geldiği görülmektedir. Bu nokta, sarı daire ile vurgulanmıştır. Bu durum, eş ve çapraz yansıma katsayılarından birinin diğerine kıyasla oldukça küçük bir değere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, söz konusu rezonans frekanslarının Şekil 126(a)'da da görüleceği üzere bu noktalarda PCR değeri neredeyse %100'e yaklaşmaktadır ve rezonans frekanslarında PCR değerinin en yüksek seviyelere ulaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, 11,94-23,87 GHz

frekans bandında grafiğin yaklaşık 1 değerinde seyrettiği görülmektedir. Bu bölgeler kırmızı saydam alanla gösterilmiş olup, eş ve çapraz yansıma katsayılarının birbirine yakın değerlere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Eliptiklik ve eksenel oran parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 127(d)'de verilmiştir. Grafiğin sol y eksenli eliptikliği, sağ y eksenli ise eksenel oran parametresini göstermektedir. Eliptiklik değeri grafikte görüldüğü gibi, 11,94-23,87 GHz frekans bandında +1'e 10,14 GHz frekansında ise -1'e ulaşmaktadır; bu nedenle sırasıyla RHCP ve LHCP dönüşümü dönüşümü bu frekans bantlarında gerçekleşmektedir. Şekil 127(d)'de görüldüğü üzere, eksenel oran değeri 11,94-23,87 GHz ve 10,14 GHz frekans bantlarında 2,62 dB ve altındaki değerlere ulaşarak, bu bantlarda LP-CP dönüşümün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, eksenel oran eğrisinde 10,93 GHz'e karşılık gelen frekans noktasının, bu banttaki maksimum değeri temsil ettiği görülmektedir. Bu durum, söz konusu noktanın rezonans frekansı olduğunu doğrulamaktadır. Hem Şekil 127(b)'de bulunan eş ve çapraz polarizasyon yansıma katsayılarının oranı hem de Şekil 126'da yer alan yansıma katsayıları incelendiğinde, Şekil 127(c)'de gösterilen faz farkı $\Delta\varphi$ 'nin $\pi/2 \pm 2\pi k$, $k \in \mathbb{Z}$ olması, eş ve çapraz yansıma katsayılarının durumları ile birleştiğinde, polarizasyon dönüşümü için gerekli koşulun sağlandığını doğrulamaktadır.



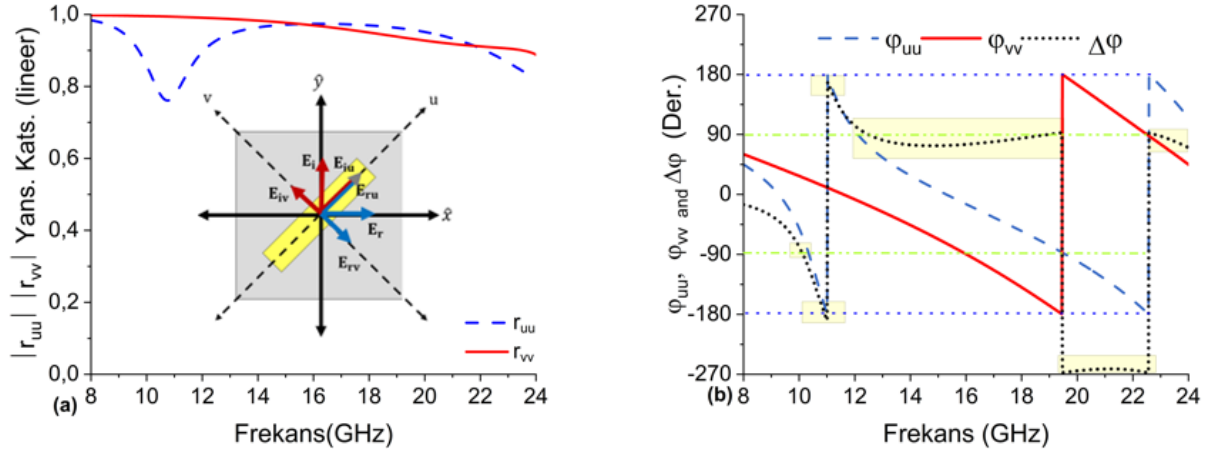
Şekil 128. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için: (a) yansıma katsayıları, (b) eliptiklik değerlerinin açısal değişimi

Polarizasyon dönüştürücünün eğik geliş açılarındaki yansıma katsayıları Şekil 128(a) ve Şekil 128(b)'de değerlendirilmiştir. Şekil 128(a) ve Şekil 128(b)'de 0° ile 50° arasındaki yansıma katsayıları ve eliptiklik değerinin frekansa göre değişimi verilmiştir. Sonuçlar, polarizasyon dönüştürücünün 11,56–12,37 GHz frekans bandında, 50° eğik geliş açısında dairesel polarizasyon dönüştürme performansını sürdürdüğü görülmektedir.



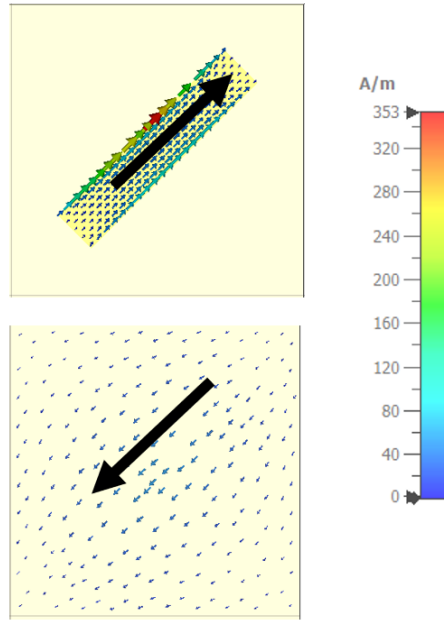
Şekil 129. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücrede farklı parametre değişimlerine göre eliptiklik değerleri: (a) $L=8-9,92$ mm (b) $a= 0,64 -2,56$ mm (c) $h=1,6-3,52$ mm (d) $b=5,76-6,72$ mm

Şekil 129’da Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin Eliptiklik üzerindeki etkilerini göstermektedir Şekil 125’te gösterilen ve birim hücre yapısında bulunan bu parametreler; rezonatörü oluşturan genişlik (a) ve rezonatörü oluşturan uzunluğu (b), birim hücre genişliği (L) ve dielektrik tabaka kalınlığıdır (h). Buradaki temel amaç, geniş bantta eliptiklik ve eksenel oran değerlerinin dairesel polarizasyon koşullarını sağlayacak şekilde elde edilmesidir. Dairesel polarizasyon dönüşümünün gerçekleşebilmesi için, eş-polarizasyon ve çapraz-polarizasyon yansımaya katsayılarının genliklerinin birbirine yakın ve mümkün olduğunca yüksek olması hedeflenir. Bu koşullar en ideal şekilde uygun faz farkı ile sağlandığında, eliptiklik değeri tam +1 ve -1 değerinin üzerinde, eksenel oran ise 0 dB değerindedir.



Şekil 130. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için $u-v$ eksenlerinde: (a) r_{uu} , r_{vv} yansıma katsayıları, (b) ϕ_{uu} , ϕ_{vv} faz bileşenleri ve $\Delta\phi$ faz farkı

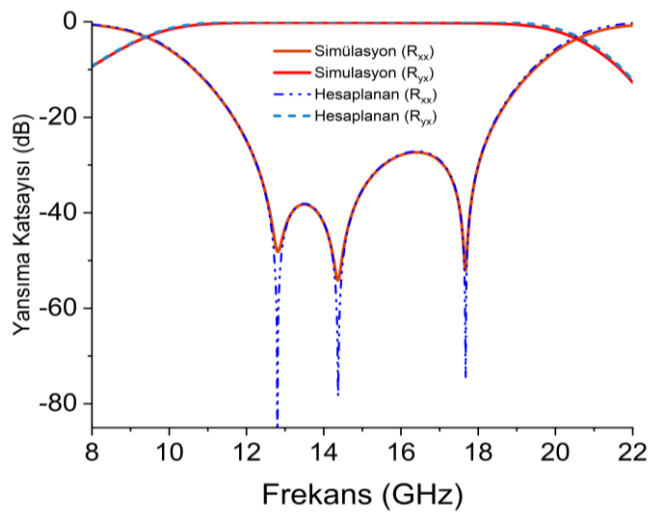
Önerilen polarizasyon dönüştürücü yapının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, Şekil 130'da gösterildiği üzere yapı $u-v$ koordinat sistemine ayrılmıştır. Buradaki u ve v birim vektörleri, polarizasyon dönüşüm mekanizmasının analizinde referans eksenleri olarak kullanılmaktadır. Şekil 130'da tanımlanan r_{uu} ve r_{vv} , sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan elektrik alan bileşenlerinin genliklerini; ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ ise sırasıyla u birim vektör fazı, v birim vektör fazını ve bu bileşenler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Şekil 130(a) incelendiğinde, $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerlerinin yaklaşık olarak 1'e eşit olduğu görülmektedir. Buna karşılık, Şekil 130(b)'de LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 10,65-11,26 GHz frekans aralığında faz farkının yaklaşık $\pm 180^\circ$ olduğu doğrulanmıştır. Bu durum, LP-LP dönüşümünün gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, Şekil 126'da verilen yansıma katsayıları grafiklerinde gözlenen 10,93 GHz rezonans frekansında, y -polarizasyonlu gelen dalganın neredeyse tamamen x -polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Bu frekanslarda Şekil 130 (b)'de faz farkının da $\pm 180^\circ$ olduğu teyit edilmiştir. Öte yandan, LP-CP dönüşümünün gerçekleştiği frekanslar, Şekil 127 (b)'de eliptiklik ve eksenel oran değerleriyle gösterilmiştir. Şekil 130 (b)'deki faz farkı grafiğinde, 11,94-23,87 GHz bandında yaklaşık $\pm 90^\circ$ faz farkı gözlemlenmektedir. Bu faz farkı, LP-CP dönüşümünün başka bir doğrulayıcı göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



a)

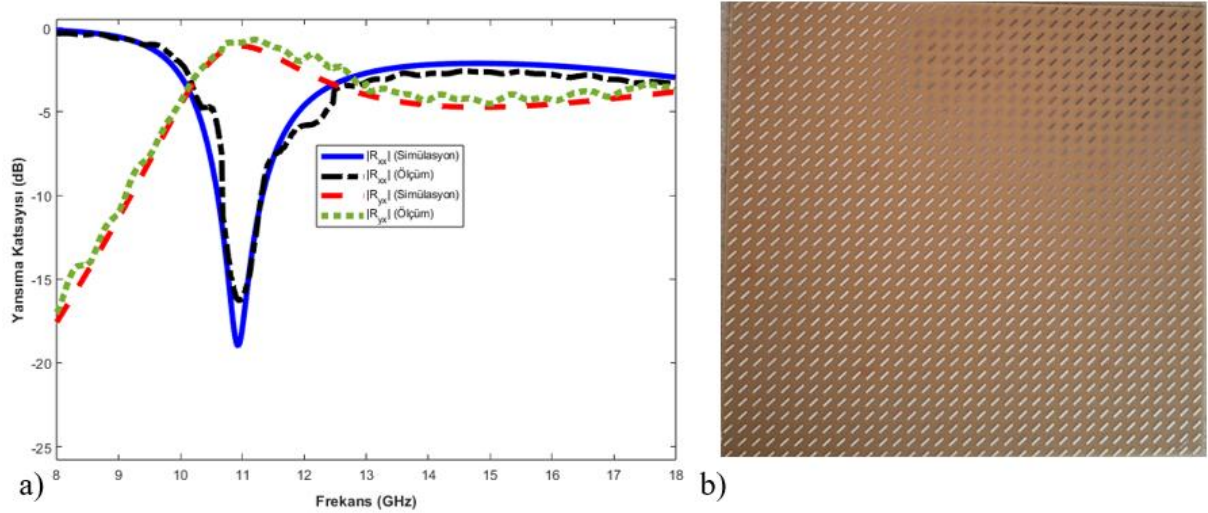
Şekil 131. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü birim hücre için 10,93 GHz frekansında yüzey akım dağılımı

Polarizasyon dönüşüm sürecinin temelinde yatan fiziksel mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, birim hücrenin metalik bölgelerindeki yüzey akımları 10,93 GHz frekansında analiz edilmiştir. Rezonatör ve arka metal katmandaki akım dağılımı, Şekil 131’de her iki katman için birlikte sunulmuştur. Şekilde yer alan oklar, rezonans frekansında yüzey akımlarının yönünü göstermektedir. Üst ve alt metal katmanlardaki yüzey akımlarının paralel olmayan yönelimi nedeniyle, Şekil 131’de de görüldüğü üzere 10,93 GHz frekanslarında belirgin manyetik rezonans oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 132. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücünün matematiksel ve simülasyon sonuçlarına ait yansıma katsayıları

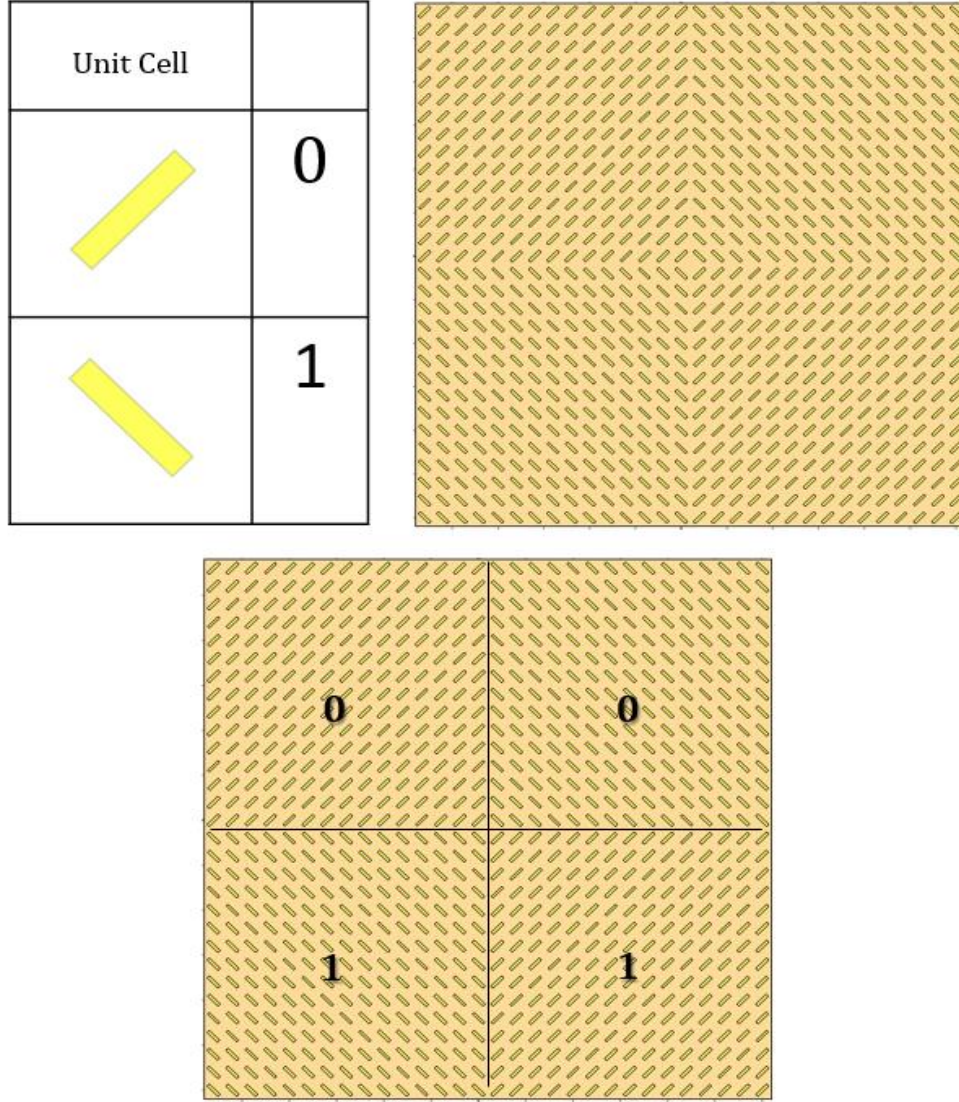
Şekil 132’de simülasyon ve matematiksel analizle elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı için, y-polarize dalga u–v eksenlerine ayrıştırılarak matematiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faz farkına ($\Delta\varphi$) bağlı olarak yansıyan alanların R_{xx} ve R_{yx} bileşenleri hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları, matematiksel analizi doğrular nitelikte olup birbirleriyle yüksek düzeyde uyum göstermektedir.



Şekil 133. Önerilen dairesel polarizasyon dönüştürücü: (a) yansıma katsayıları ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (b) 35 x 35 birim hücreden oluşan üretilmiş metayüzey

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü yapının doğruluğu, deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Bu amaçla, geleneksel fotolitografi temelli PCB üretim yöntemi kullanılarak bir numune üretilmiş ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üretilen numune, 35 x 35 birim hücreden oluşmaktadır ve toplam boyutu 280 x 280mm²'dir. Dielektrik tabaka 1,6 mm kalınlığında, bakır iletken katmanlar 35 µm kalınlığında ve her birim hücrenin kenar uzunluğu 8 mm'dir. Dielektrik tabaka, $\tan \delta = 0,025$ ve $\epsilon_r = 4,3$ olan bir FR-4 malzemesidir. Ölçüm sonucunda elde edilen R_{xx} ve R_{yx} değerlerinin simülasyon ve ölçüm karşılaştırması Şekil 133’de verilmiştir. Ölçülen R_{xx} ve R_{yx} tepkilerinin, simülasyon sonuçlarıyla uyum içinde olduğu ve önerilen dönüştürücünün eş polarize ve çapraz polarize yansıma özelliklerini doğruladığı görülmektedir. Simülasyonu gerçekleştirilen ve ölçülen R_{xx} ve R_{yx} arasında yalnızca küçük tutarsızlıklar bulunmaktadır ve bunlar çoğunlukla üretim toleranslarından ve antenlerin küçük hizalama hataları ve aralarındaki küçük açılı farklılıklarından kaynaklanmaktadır.

RCS Azaltım Performansının İncelenmesi

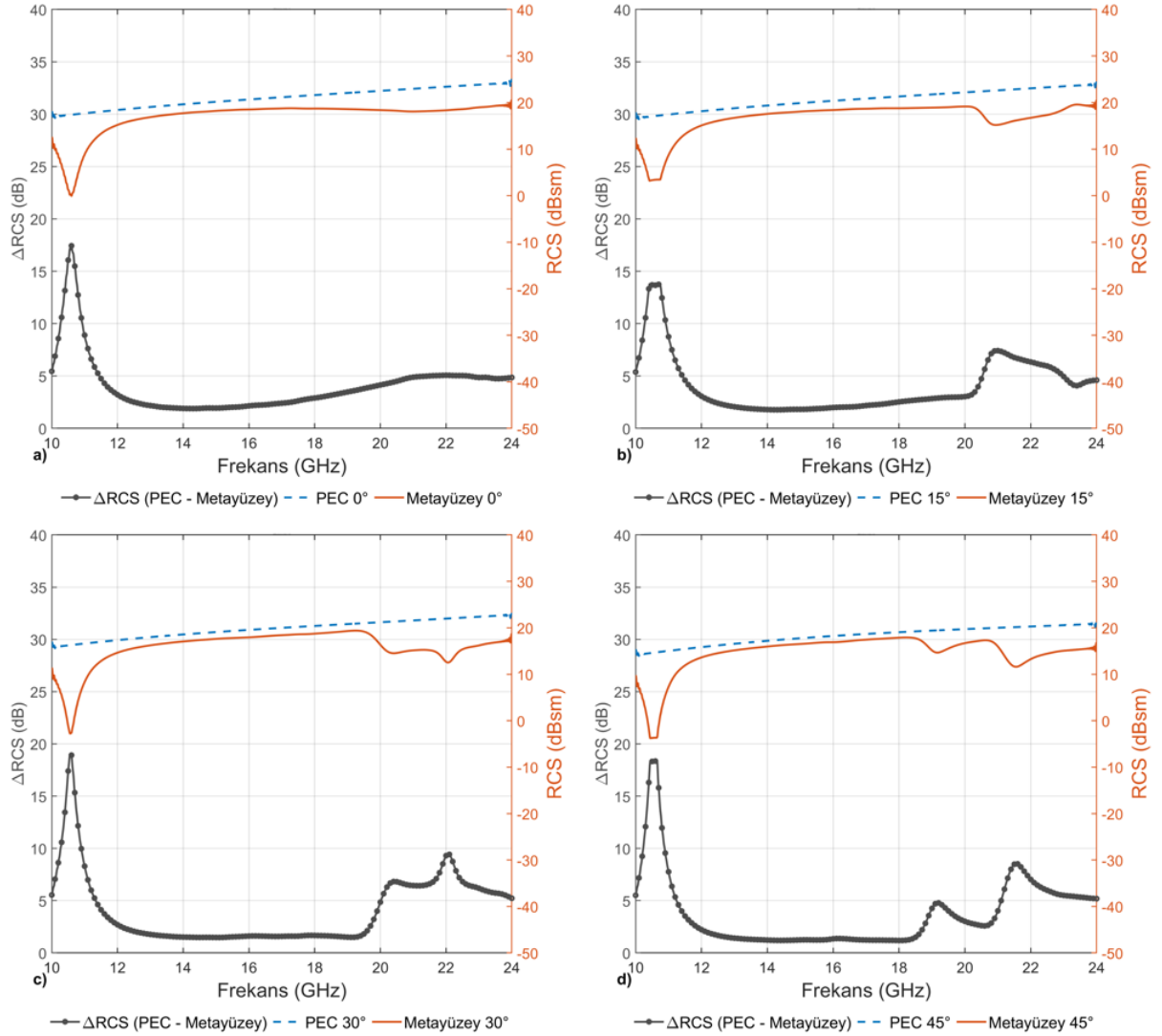
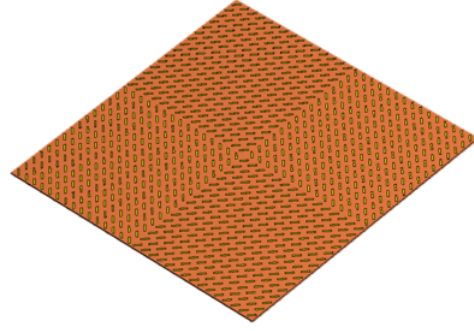
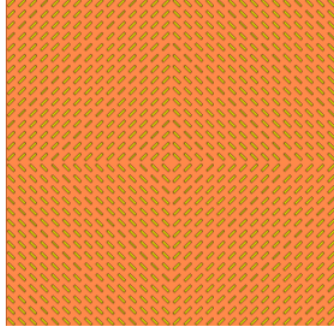


Şekil 134. Farklı yönelimlerdeki ('0' ve '1') birim hücrelerin kodlanmış dizilimi ve metayüzey yerleşimi.

Bu bölüm, metayüzeyler kullanılarak gerçekleştirilen RCS azaltma simülasyonlarının kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Bu konfigürasyon, yansıyan elektromanyetik dalgaların faz ilişkilerini değiştirmekte ve geri saçılan enerjiyi geliş yönünden uzağa yönlendirerek monostatik ve bistatik RCS değerlerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır. Şekil 134, yönlendirilmiş rezonatörler kullanılarak tasarlanmış metayüzeyin genel düzenini göstermektedir. Çalışmada, RCS azaltma performansı dört farklı geliş açısı (0° , 15° , 30° ve 45°) ve dört farklı geometrik yapı altında sistematik olarak incelenmiştir. Bu geometriler; düz, 90° açılı dihedral ve 200 mm ile 300 mm yarıçaplı silindirik plaka yapılarını içermektedir. Her bir açı için monostatik RCS, bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri, monostatik RCS'nin her bir geliş açısı için en yüksek azalmanın elde edildiği frekans noktalarında değerlendirilmiştir. Bu sayede, tasarımın

en etkili olduğu çalışma frekanslarındaki saçılma davranışı detaylı olarak incelenmiş ve PEC plaka ile karşılaştırmalı biçimde uzak alan ışıma örüntülerindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Böylece, önerilen yapının saçılma özellikleri kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, monostatik RCS değerleri 10 dB, 5 dB ve 3 dB’lik azaltma eşikleri kullanılarak nicel olarak değerlendirilmiş ve bu eşiklere karşılık gelen bant genişlikleri belirlenmiştir. Bant genişlikleri frekans aralıklarının yanında parantez içinde belirtilmiştir. Bu yaklaşım, metayüzey tasarımının frekans tepkisini ve etkin çalışma aralıklarını daha açık şekilde tanımlamaktadır. Her bir tasarım için öncelikle ilgili geometrinin ve aynı şekil ile boyuttaki PEC plakasının üst ve yan görünüşleri ile dört farklı geliş açısı için ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçları sunulmaktadır. Monostatik grafiklerde sağ eksen, PEC ve metayüzeyin monostatik RCS değerlerini göstermektedir; mavi kesikli çizgi PEC plakasını, turuncu düz çizgi ise tasarlanan metayüzeyi temsil etmektedir. Sol eksen, bu iki yapı arasındaki RCS farkını göstermekte olup, siyah daireli çizgi bu farkı yani RCS azalma miktarını ifade etmektedir. Böylece, ilgili frekans aralıklarında metayüzeyin PEC plakaya göre sağladığı RCS azalması açıkça gözlemlenebilmektedir. Bistatik RCS kısmında ise ilgili geometri ile aynı boyuttaki PEC plakasının bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır. Bu grafiklerde mavi kesikli çizgi ilgili geometrinin, turuncu düz çizgi ise referans PEC plakasının bistatik RCS değerini temsil etmektedir. $\phi = 180^\circ$ kesit düzleminde, aynı frekanslarda ve aynı θ açılarında ((a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°) elde edilen sonuçlar sırasıyla ilgili alt kısımlarda sunulmaktadır. Her kısımdaki kırmızı saydam şerit, ilgili θ açısını vurgulamaktadır.

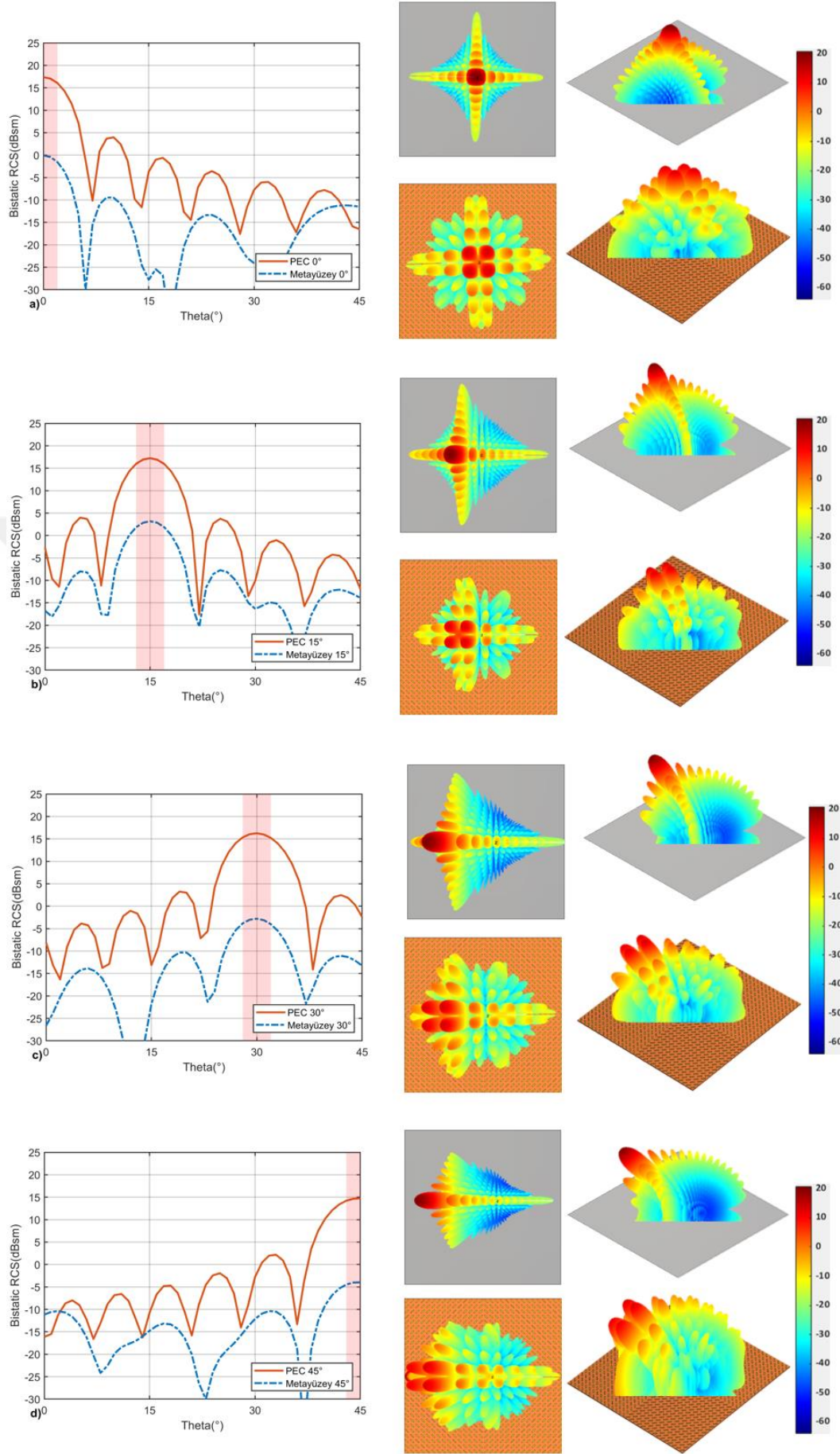
Düz plaka



Şekil 135. Düz plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı; (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 135, düz plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 135(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,60 GHz frekansında 17,43 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,27–10,93

GHz (0,66 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–11,44 GHz (1,44 GHz) ve 21,48–22,66 GHz (1,18 GHz) bantları oluşmuştur, 3 dB eşğinde ise 10,00–12,11 GHz (2,11 GHz) ve 18,22–24,00 GHz (5,78 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 135(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 10,74 GHz frekansında 13,80 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,28–10,91 GHz (0,63 GHz) bant genişliği elde edilmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–11,41 GHz (1,41 GHz) ve 20,54–22,98 GHz (2,44 GHz) bantları sağlanmıştır, 3 dB eşğinde ise 10,00–12,03 GHz (2,03 GHz) ve 19,90–24,00 GHz (4,10 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 135(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,56 GHz frekansında 19,04 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu açısı için 10 dB eşğinde 10,27–10,89 GHz (0,62 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–11,33 GHz (1,33 GHz) ve 20,02–23,98 GHz (3,98 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşğinde ise 10,00–11,85 GHz (1,85 GHz) ve 19,77–24,00 GHz (4,23 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 135(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 10,65 GHz frekansında 18,39 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,24–10,88 GHz (0,64 GHz) bant genişliği sağlanmıştır, 5 dB eşğinde 10,00–11,24 GHz (1,24 GHz) ve 21,11–24,00 GHz (2,89 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşğinde ise 10,00–11,65 GHz (1,65 GHz), 18,83–20,01 GHz (1,18 GHz) ve 20,85–24,00 GHz (3,15 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir,

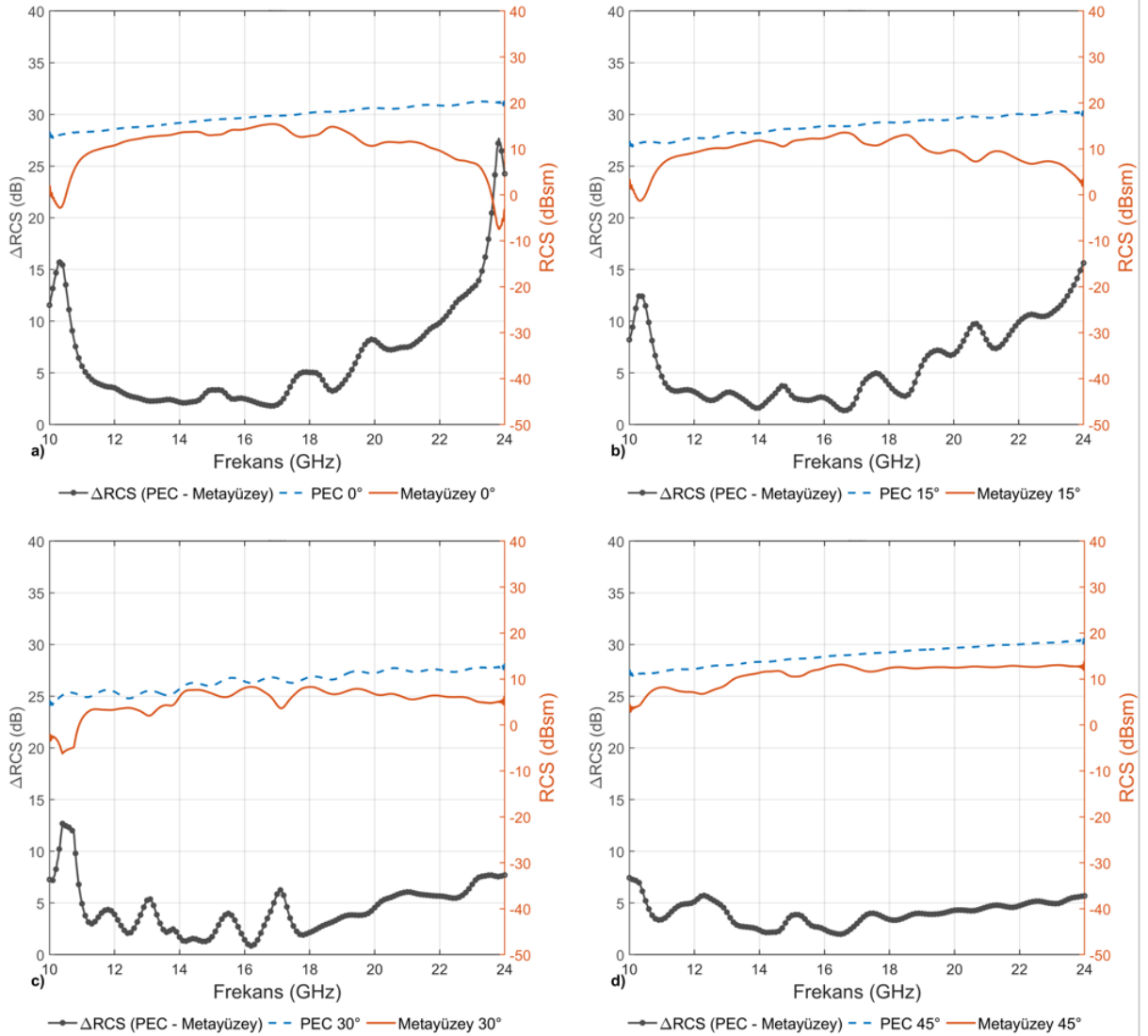
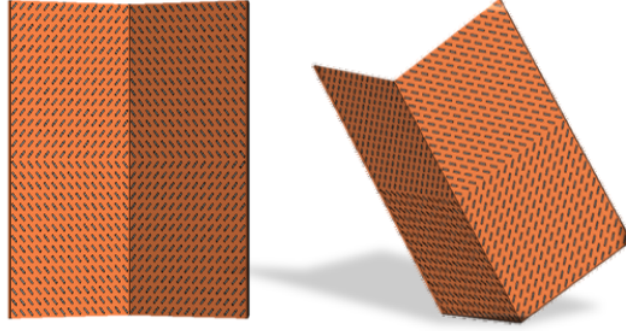


Şekil 136. Düz plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,60 GHz, (b) 10,74 GHz, (c) 10,56 GHz ve (d) 10,65 GHz

Şekil 136, düz plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 136(a)'da $\theta = 0^\circ$ için, 10,60 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 17,37 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-0,06$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 17,43 dB'lik bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 136(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 10,74 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 17,23 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 3,18 dBsm'dir. 14,05 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 136(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 10,56 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 16,26 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-2,79$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 19,05 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 136(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 10,65 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 14,75 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-3,98$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 18,73 dB'lik bu azalma elde edilmiştir.



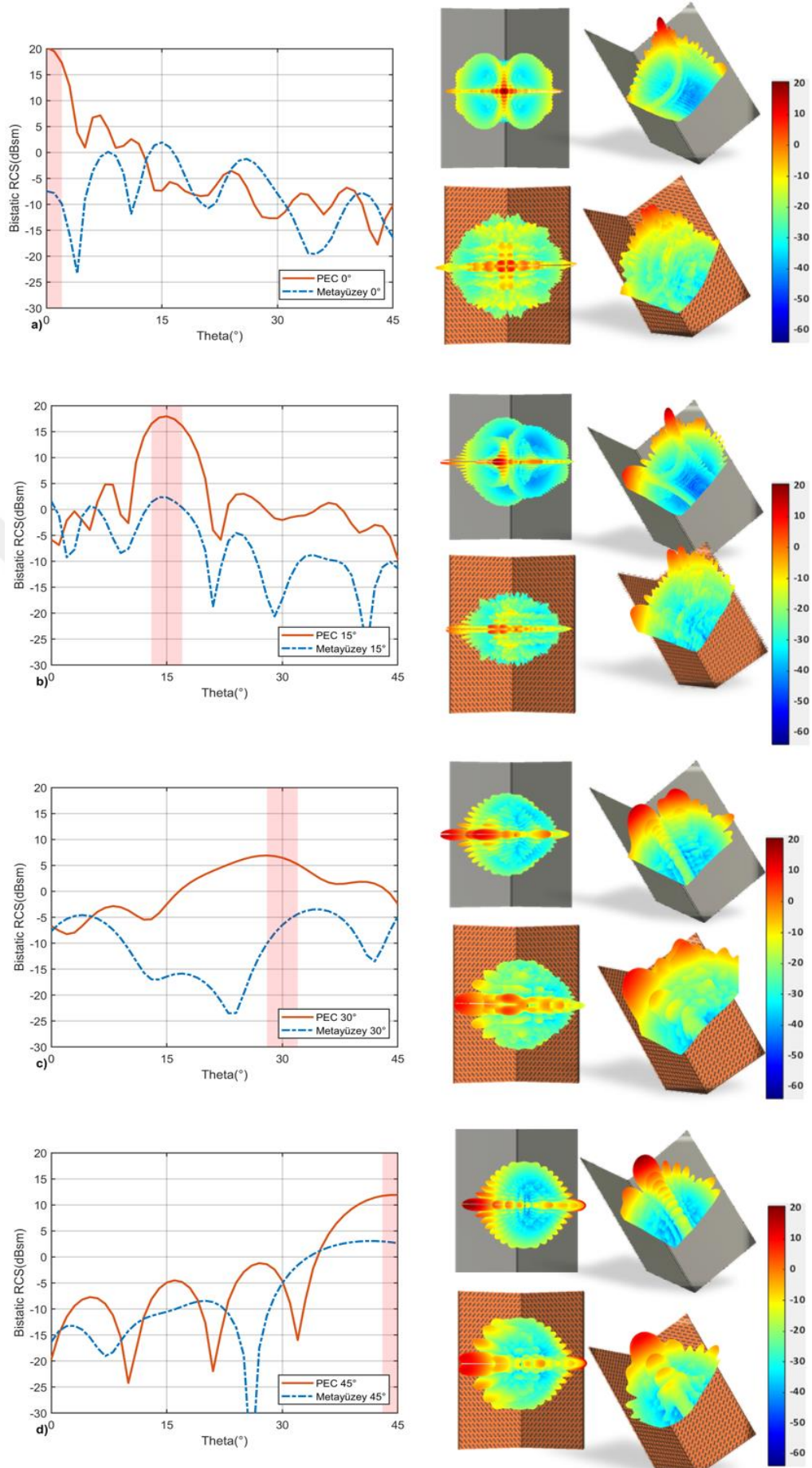
Dihedral plaka



Şekil 137. Dihedral plaka metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka için elde edilen karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 137, dihedral plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45°) elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 137(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 23,82 GHz frekansında 27,66 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,00–10,65

GHz (0,65 GHz) ve 22,06–24,00 GHz (1,94 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–11,11 GHz (1,11 GHz), 17,74–18,20 GHz (0,46 GHz) ve 19,25–24,00 GHz (4,75 GHz) bantları oluşmuştur, 3 dB eşğinde ise 10,00–12,30 GHz (2,30 GHz), 14,79–15,41 GHz (0,62 GHz) ve 17,30–24,00 GHz (6,70 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 137(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 24,00 GHz frekansında 15,63 dB olarak gözlenmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,14–10,59 GHz (0,45 GHz) ve 22,03–24,00 GHz (1,97 GHz) bantları elde edilmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–10,96 GHz (0,96 GHz) ve 18,92–24,00 GHz (5,08 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşğinde ise 10,00–12,10 GHz (2,10 GHz), 12,93–13,22 GHz (0,29 GHz), 14,50–14,96 GHz (0,46 GHz), 17,06–18,28 GHz (1,22 GHz) ve 18,64–24,00 GHz (5,36 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır. Şekil 137(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,40 GHz frekansında 12,68 dB olarak gerçekleşmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşğinde 10,30–10,79 GHz (0,49 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşğinde 10,00–10,99 GHz (0,99 GHz), 12,96–13,17 GHz (0,21 GHz), 16,90–17,26 GHz (0,36 GHz) ve 20,15–24,00 GHz (3,85 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşğinde ise 10,00–11,26 GHz (1,26 GHz), 11,32–12,16 GHz (0,84 GHz), 12,68–13,40 GHz (0,72 GHz), 15,23–15,75 GHz (0,52 GHz), 16,63–17,46 GHz (0,83 GHz) ve 18,57–24,00 GHz (5,43 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 137(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 10,01 GHz frekansında 7,45 dB olarak elde edilmiştir bu nedenle bu geliş açısı için 10 dB eşğinde monostatik RCS azalması sağlanmamıştır, 5 dB eşğinde 10,00–10,51 GHz (0,51 GHz), 11,94–12,72 GHz (0,78 GHz), 22,25–22,88 GHz (0,63 GHz) ve 23,23–24,00 GHz (0,77 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşğinde ise 10,00–13,24 GHz (3,24 GHz), 14,79–15,52 GHz (0,73 GHz) ve 17,00–24,00 GHz (7,00 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.

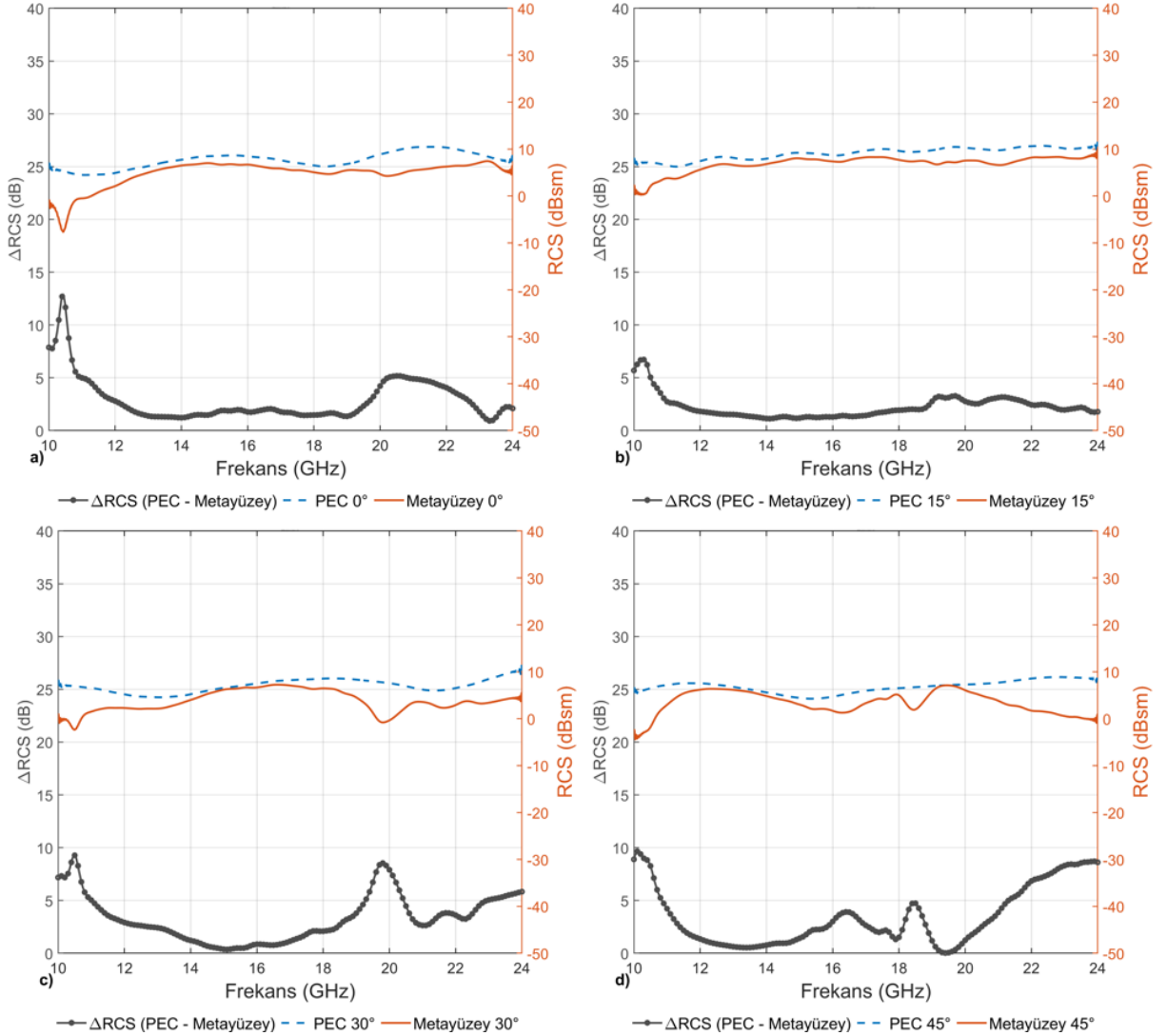
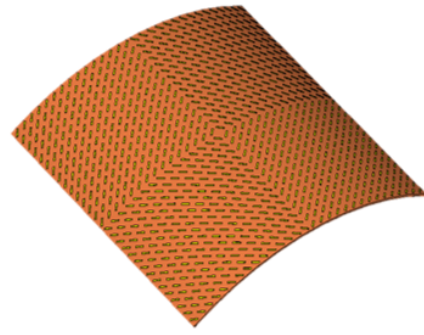
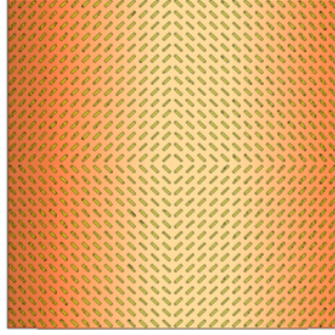


Şekil 138. Dihedral plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışıma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 23,82 GHz, (b) 24 GHz, (c) 10,40 GHz ve (d) 10,01 GHz

Şekil 138, dihedral plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 138(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 23,82 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 20,21 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-7,45$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 27,66 dB'lik bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 138(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 24 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 17,94 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 2,31 dBsm'dir. Bu açıda 15,63 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 138(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 10,40 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 6,46 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-6,49$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 12,96 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 138(d) $\theta = 45^\circ$ için, 10,01 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 11,91 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise 2,65 dBsm'dir. 9,26 dB'lik azalma elde edilmiştir.



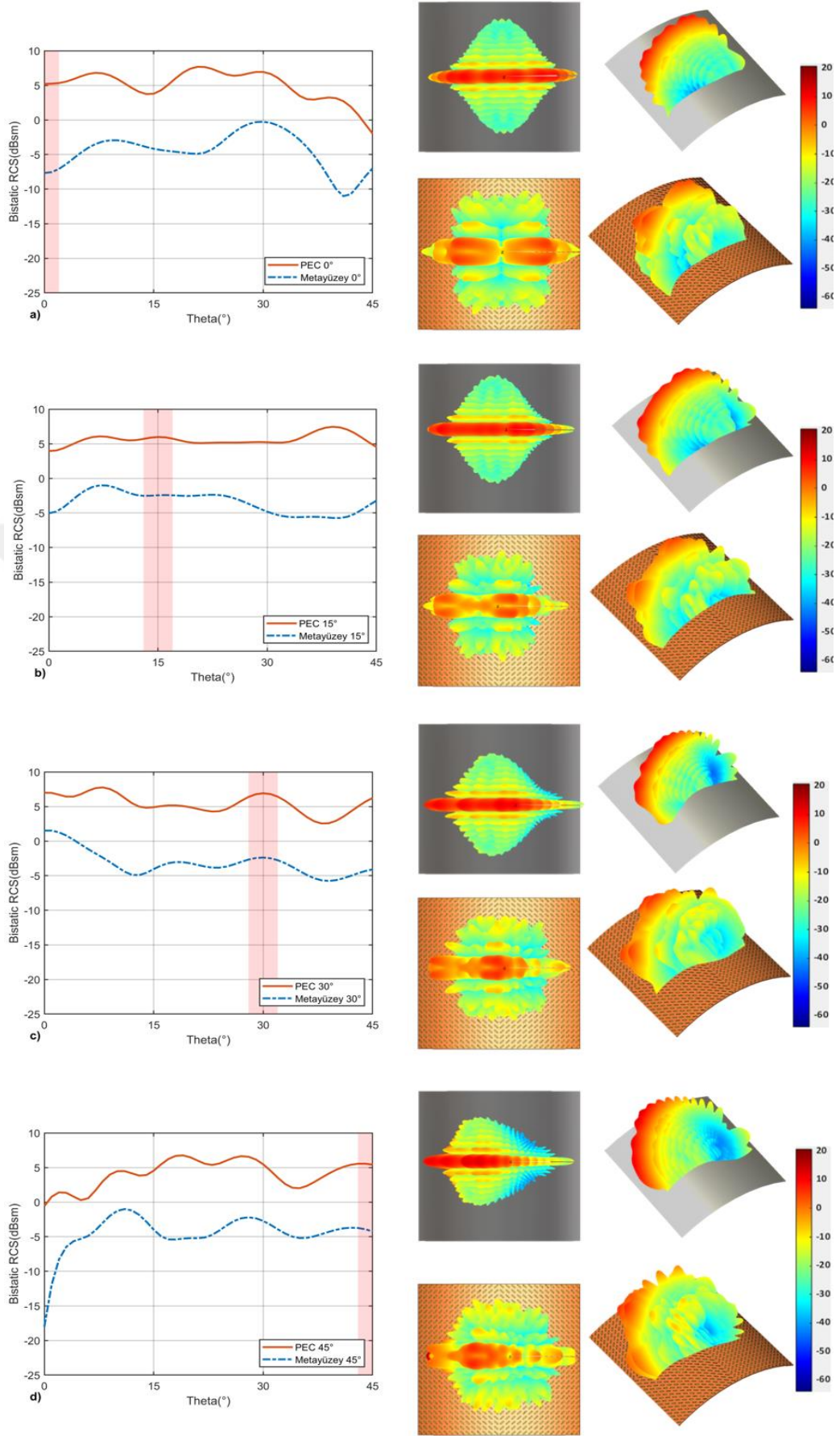
Silindirik plaka (300 mm yarıçap)



Şekil 139. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 139, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 139(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,43 GHz frekansında 12,89 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde 10,28–10,55 GHz aralığında 0,27 GHz bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşliğinde 10,00–10,98

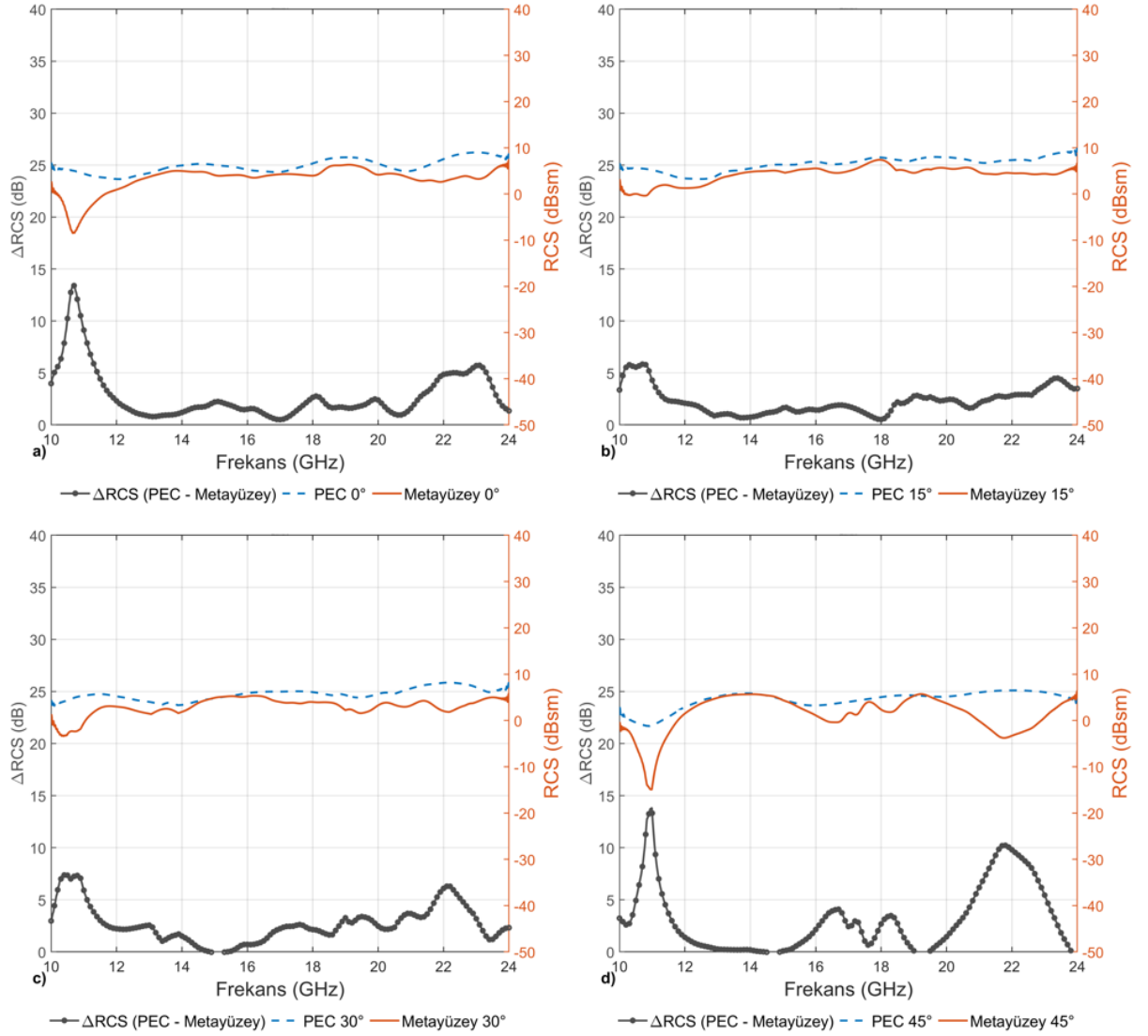
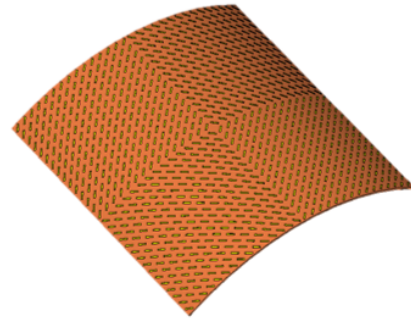
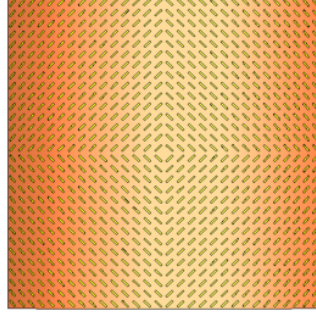
GHz (0,98 GHz) ve 20,24–20,81 GHz (0,57 GHz) bantları oluşmuştur, 3 dB eşiğinde ise 10,00–11,83 GHz (1,83 GHz) ve 19,75–22,59 GHz (2,84 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır. Şekil 139 (b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 10,27 GHz frekansında 6,75 dB olarak gözlenmiştir, dolayısıyla 10 dB eşiğinde azalma sağlanmamıştır, 5 dB eşiğinde 10,00–10,50 GHz (0,50 GHz) bant genişliği sağlanmıştır, 3 dB eşiğinde ise 10,00–10,91 GHz (0,91 GHz), 19,07–19,87 GHz (0,80 GHz) ve 20,80–21,44 GHz (0,64 GHz) bantları gözlenmiştir. Şekil 139(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,49 GHz frekansında 9,29 dB olarak gerçekleşmiştir, dolayısıyla 10 dB eşiğinde azalma sağlanmamıştır, 5 dB eşiğinde 10,00–11,00 GHz (1,00 GHz), 19,28–20,42 GHz (1,14 GHz) ve 22,95–24,00 GHz (1,05 GHz) bant genişlikleri gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 10,00–11,93 GHz (1,93 GHz), 18,61–20,76 GHz (2,15 GHz) ve 21,31–24,00 GHz (2,69 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir. Şekil 139(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 10,10 GHz frekansında 9,66 dB olarak elde edilmiştir, dolayısıyla 10 dB eşiğinde azalma bant genişliği sağlanmamıştır, 5 dB eşiğinde 10,00–10,84 GHz (0,84 GHz) ve 21,31–24,00 GHz (2,69 GHz) bantları gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 10,00–11,25 GHz (1,25 GHz), 16,00–16,85 GHz (0,85 GHz), 18,18–18,76 GHz (0,58 GHz) ve 20,70–24,00 GHz (3,30 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir.



Şekil 140. 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,43 GHz, (b) 10,27 GHz, (c) 10,49 GHz ve (d) 10,10 GHz

Şekil 140, 300 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 140(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 10,43 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,22 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-7,67$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 12,89 dB'lik bir RCS azalması elde edilmiştir. Şekil 140(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 10,27 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,98 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-2,44$ dBsm'dir. 8,43 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 140(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 10,49 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 6,92 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-2,38$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 9,29 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 140(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 10,10 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,42 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-4,24$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 9,66 dB'lik bir azalma görülmektedir.

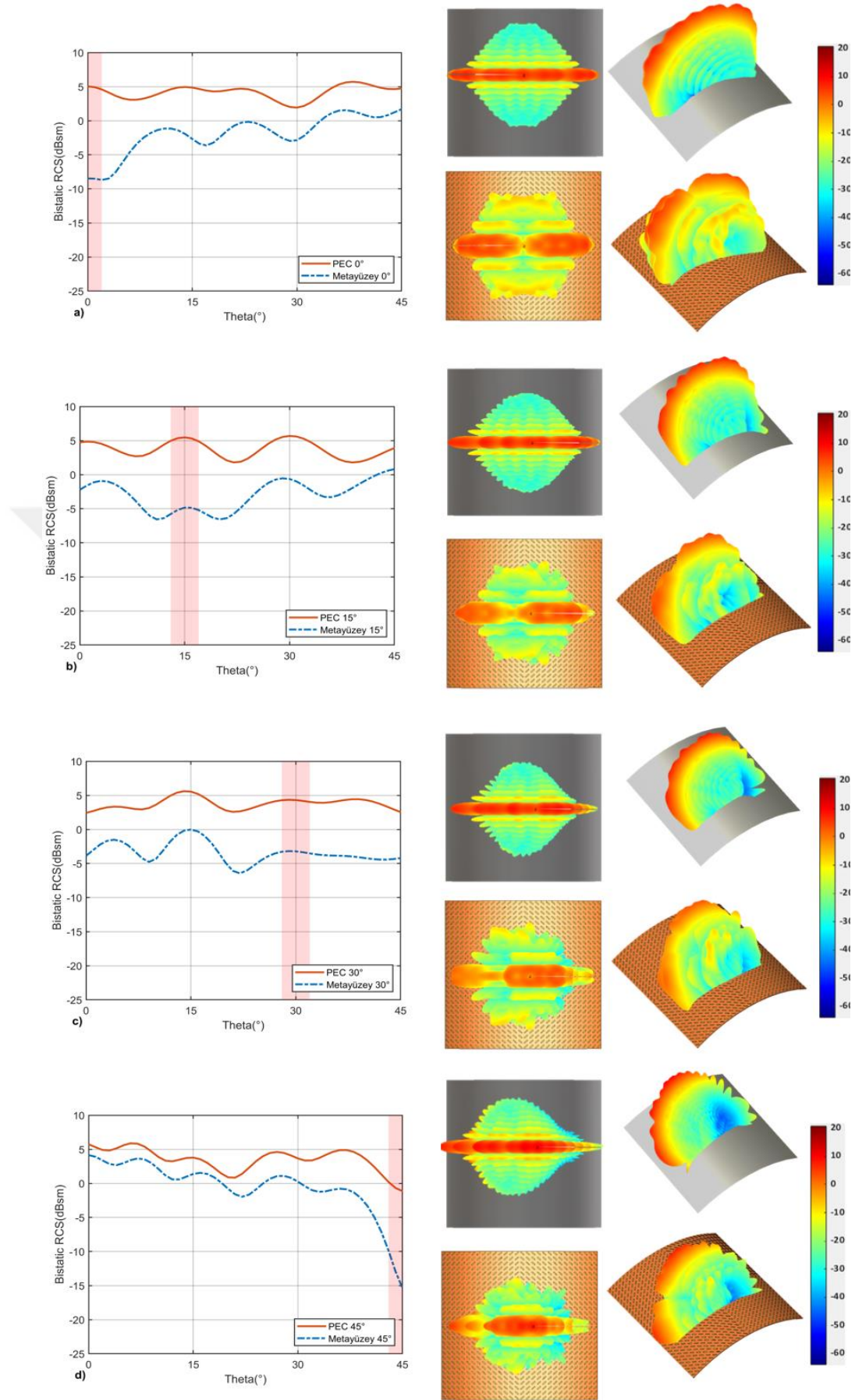
Silindirik plaka (200 mm yarıçap)



Şekil 141. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka Metayüzeyin ön ve yan görünüşleri ile aynı boyuttaki PEC plaka ile karşılaştırmalı monostatik RCS sonuçları ve iki yapı arasındaki RCS farkı: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30° ve (d) 45° geliş açıları

Şekil 141, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey geometrisinin üst ve yan görünüşlerini ve dört farklı geliş açısı için (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45° elde edilen monostatik RCS sonuçlarını sunmaktadır. Şekil 141(a)'da 0° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,66 GHz frekansında 13,51 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşliğinde

10,50–10,93 GHz aralığında 0,43 GHz bant genişliği gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 10,10–11,41 GHz (1,31 GHz), 22,28–22,43 GHz (0,15 GHz) ve 22,72–23,31 GHz (0,59 GHz) bantları oluşmuştur, 3 dB eşiğinde ise 10,00–11,78 GHz (1,78 GHz) ve 21,41–23,58 GHz (2,17 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, Şekil 141(b)'de 15° geliş açısı için maksimum azalma 10,74 GHz frekansında 5,85 dB olarak gözlenmiştir, dolayısıyla 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalması sağlanmamıştır, 5 dB eşiğinde 10,14–10,91 GHz (0,77 GHz) bant genişliği gözlenmiştir, 3 dB eşiğinde ise 10,00–11,22 GHz (1,22 GHz) ve 22,67–24,00 GHz (1,33 GHz) bantları hesaplanmıştır, Şekil 141(c)'de 30° geliş açısı için maksimum RCS azalması 10,48 GHz frekansında 7,53 dB olarak gerçekleşmiştir, bundan dolayı 10 dB eşiğinde monostatik RCS azalma sağlanmamıştır, 5 dB eşiğinde 10,14–11,09 GHz (0,95 GHz) ve 21,76–22,53 GHz (0,77 GHz) bantları elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 10,01–11,50 GHz (1,49 GHz), 18,93–19,06 GHz (0,13 GHz), 19,30–19,81 GHz (0,51 GHz) ve 20,64–23,03 GHz (2,39 GHz) bant genişlikleri sağlanmıştır, Şekil 141(d)'de 45° geliş açısı için maksimum azalma 10,98 GHz frekansında 13,81 dB olarak elde edilmiştir, Bu geliş açısı için 10 dB eşiğinde 10,77–11,07 GHz (0,30 GHz) ve 21,64–21,92 GHz (0,28 GHz) bantları gözlenmiştir, 5 dB eşiğinde 10,51–11,35 GHz (0,84 GHz) ve 20,82–23,05 GHz (2,23 GHz) bant genişlikleri elde edilmiştir, 3 dB eşiğinde ise 10,35–11,59 GHz (1,24 GHz), 16,21–16,89 GHz (0,68 GHz), 18,07–18,45 GHz (0,38 GHz) ve 20,43–23,33 GHz (2,90 GHz) bant genişlikleri hesaplanmıştır,



Şekil 142. 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile PEC plakanın bistatik RCS ve 3D uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırması; (a) 10,66 GHz, (b) 10,74 GHz, (c) 10,48 GHz ve (d) 10,98 GHz

Şekil 142, 200 mm yarıçaplı silindirik plaka metayüzey ile aynı boyuttaki bir PEC plakasının (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° theta açılarında bistatik RCS ve uzak alan ışıma örüntüleri arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Şekil 142(a)'da $\theta = 0^\circ$ için 10,66 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,04 dBsm, metayüzeyin değeri ise $-8,47$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 13,51 dB'lik bir RCS azalması sağlanmıştır. Şekil 142(b)'de $\theta = 15^\circ$ için, 10,74 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri 5,47 dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-4,84$ dBsm'dir. 10,31 dB'lik azalma elde edilmiştir. Şekil 142(c)'de $\theta = 30^\circ$ açısında, 10,48 GHz frekansında PEC yüzey için ölçülen RCS değeri 4,31 dBsm, metayüzey için $-3,22$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 7,53 dB'lik bir azalma elde edilmiştir. Şekil 142(d)'de $\theta = 45^\circ$ için, 10,98 GHz frekansında PEC yüzeyinin RCS değeri $-1,13$ dBsm, metayüzeyin bistatik RCS değeri ise $-15,38$ dBsm'dir. Bu geliş açısı için 14,25 dB'lik bir azalma elde edilmiştir.

Karşılaştırma

Tablo 11. Önerilen Tasarımın Daha Önce Bildirilen X-, Ku- ve K-Bant Frekans Aralıklarındaki Metayüzey Dairesel Polarizasyon Dönüştürücüleriyle Karşılaştırılması

Referans	Çalışma Bant Genişliği ve Polarizasyon Dönüşüm Tipi	Dielektrik Tabaka Kalınlığı ve Malzemesi	Verimlilik	Fonksiyon ve RCS Analiz Kapsamı
(Ran et al., 2019)	10,21 – 24,97 GHz (LP-CP)	2.5 mm $\epsilon_r = 2,65$	AR <3 dB	Pol.Dön.
(Gao et al., 2016)	12,4 – 21 GHz (LP-CP)	2,5 mm F4B	AR ≤ 1 dB	Pol.Dön.
(Lin, Huang, Guo, et al., 2022)	7,14 – 25,66 GHz (LP-CP)	3,35 mm+ 3,30 mm (Çok katmanlı) PTFE	AR ≤ 3 dB	Pol.Dön.
Önerilen Çalışma	11,94-23,87 GHz (RHCP) 10,65-11,26 GHz (LP-LP)	1,6 mm FR-4	AR $\leq 1,4$ dB	Pol.Dön. /Monostatik ve Bistatik RCS, $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ açılarında, Düz, Dihedral ve Silindirik geometrilere

Bu bölümde, önerilen polarizasyon dönüştürücünün performansı, X- ve Ku-Bantlarında çalışan son yıllardaki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılan çalışmalar, Çalışma bant

genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi, dielektrik tabaka kalınlığı ve malzemesi, verimlilik ile fonksiyon ve RCS analiz kapsamı parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 11’de sunulan çalışmalar verimlilik açısından kıyaslandığında (Lin, Huang, Guo, et al., 2022) ve (Ran et al., 2019) çalışmalarından daha verimlidir. (Gao et al., 2016) çalışması, verimlilik açısından daha yüksek performans gösterse de, dielektrik tabaka malzemesi bakımından önerilen çalışmada kullanılan dielektrik tabaka malzemesi kadar erişebilirliği yüksek ve maliyetsiz değildir. Çalışma bant genişliği ve polarizasyon dönüşüm tipi parametresi açısından değerlendirildiğinde ise kıyaslanan çalışmalar önerilen çalışmaların aksine sadece LP-CP dönüşümü gerçekleştirmektedir. Bunlara ek olarak kıyaslanan üç çalışma Fonksiyon ve RCS analiz kapsamı açısından sadece polarizasyon dönüştürücü fonksiyonu göstermiştir. Buna karşılık önerilen polarizasyon dönüştürücü farklı hedef geometrilerini (düz plaka, 90° açılı dihedral ve 200 mm ve 300 mm yarıçaplı silindirik) çeşitli geliş açıları (0°, 15°, 30°, 45°) altında değerlendirerek RCS analizini çoklu saçılma senaryolarına genişletmekte ve böylece metayüzeyin performansının daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında C-, X-, Ku- ve K- mikrodalga frekans bantlarında çalışan, yüksek verimlilik, geniş bant ve yüksek geliş açısı kararlılığına sahip polarizasyon dönüştürücü yapıların tasarım, analiz ve performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen polarizasyon dönüştürücü yapılar çok fonksiyonlu LP-LP ve LP-CP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleştirmektedir. Bu kapsamda yapılan analizlerde tüm polarizasyon dönüştürücü birim hücrelerin hem CST Microwave Studio hem de HFSS yazılımı ile yansıma katsayıları elde edilmiş ve elde edilen bu yansıma katsayılarından yola çıkarak PCR, eliptiklik, eksenel oran, E_{co}/E_{cross} ve $u-v$ vektör dönüşümü genlik ve faz grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca farklı geliş açısı yansıma katsayıları, birim hücre parametrelerinin farklı ölçülerde değerlendirilmesi, rezonans frekanslarındaki yüzey akım dağılımları incelenmiştir. Tasarlanan polarizasyon dönüştürücü tasarımlardan seçilen yapılar Geleneksel fotolitografi temelli PCB üretim yöntemi üretilmiş ve serbest uzay ölçümü ile doğrulanmıştır. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları birbiriyle son derece uyumludur. Bu araştırma çerçevesinde tasarlanan tüm polarizasyon dönüştürücü birim hücreler kullanılarak farklı kodlama dizilimleriyle detaylı RCS azalma analizleri yapılmıştır. Bu RCS azalma analizleri aynı boyut ve geometrik şekildeki PEC plakalar ile karşılaştırmalı olarak, 0° , 15° , 30° ve 45° geliş açılarında, düz, dihedral ve 200, 300 mm yarıçaplarında silindirik geometrik şekillerde monostatik ve bistatik RCS konfigürasyonlarında kapsamlı bir şekilde yürütülmüştür. Monostatik RCS azalma değerleri 0° , 15° , 30° ve 45° geliş açılarında 10 dB, 5 dB ve 3 dB eşik değerlerinde incelenmiştir. Bistatik RCS azalma değerleri, aynı geliş açıları için elde edilen PEC ve metayüzey yapılarına ait uzak alan ışıma örüntülerinin hem üstten hem de yandan görünüşleriyle birlikte sunulmuştur. PEC ve metayüzey saçılma davranışları arasındaki farkın daha net biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla, bistatik RCS analizleri, monostatik konfigürasyonlarda en yüksek RCS azalmasının elde edildiği frekans noktalarında gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma, PEC yüzeyinin gelen enerjiyi aynı doğrultuda geri yansıttığını, metayüzeyin ise enerjiyi farklı yönlere dağıtarak saçtığını göstermiştir. Böylece, metayüzeyin kullanımıyla RCS azalmasının temel mekanizması açık biçimde ortaya konulmuştur. Bu bölümde RCS azalma sonuçları tablolar haline sunulacaktır. Monostatik RCS azaltım için en yüksek azaltım eşik değerindeki bulunan en geniş frekans bant aralığı, bistatik RCS azalmasında ise belirlenen frekans ve geliş açısındaki bistatik RCS azalma değeri sunulacaktır. Tez kapsamında yedi adet polarizasyon dönüştürücü ve bu aygıtların RCS azalma performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Bunlardan ilki, X-, Ku- ve K- bantlarında çalışan 11,55 -18,47 GHz frekanslarında 6,92 GHz bant genişliğinde, tüm Ku- bandını kapsayacak şekilde %99 PCR değerinde LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. 9,23–9,50 GHz ve 20,42–20,67 GHz frekans bantlarında sırasıyla RHCP ve LHCP dönüşümü elde edilmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 12’de sunulmuştur.

Tablo 12. X-, Ku- ve K- Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	10,26–19,33 GHz (9,07 GHz)	Bistatik	Düz	0°	39,46 dB
		15°	10,22–17,66 GHz (7,44 GHz)			15°	16,44 dB
		30°	10,09–13,43 GHz (3,34 GHz)			30°	18,41 dB
		45°	10,19–11,64 GHz (1,45 GHz)			45°	21,45 dB
	Dihedral	0°	9,38–9,67 GHz (0,29GHz)		Dihedral	0°	40,36 dB
		15°	9,34–9,83 GHz (0,49 GHz)			15°	15,03 dB
		30°	9,33–9,75 GHz (0,42 GHz)			30°	12,34 dB
		45°	8,34–14,34 GHz (6,00 GHz)			45°	6,67 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	8,00–8,66 GHz (0,66 GHz)		Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	16,96 dB
		15°	16,07–17,14 GHz (1,07 GHz)			15°	6,15 dB
		30°	8,00–8,40 GHz (0,40 GHz)			30°	18,49 dB
		45°	15,00–15,45 GHz (0,45 GHz)			45°	23,84 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	8,00–8,45 GHz (0,45 GHz)		Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	19,13 dB
		15°	14,72–15,10 GHz 0,38 GHz			15°	5,64 dB
		30°	14,83–18,63 GHz (3,80 GHz)			30°	9,59 dB
		45°	8,00–8,94 GHz (0,94 GHz)			45°	17,40 dB

İkincisi C-, X-, Ku- ve K- bantlarında çalışan çok katmanlı 7,74-20,26 GHz frekans aralığında 12,52 GHz bant genişliğinde %89 PCR oranında LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. 7,36-7,49 GHz frekanslarında ise RHCP polarizasyon dönüşümü gerçekleşmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 13’de sunulmuştur.

Tablo 13. C-, X-, Ku- ve K- Bantlarında Çalışan Çok Katmanlı Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	9,20–19,70 GHz (10,50 GHz)	Bistatik	Düz	0°	35,86 dB
		15°	9,30 – 19,10 GHz (9,80 GHz)			15°	17,55 dB
		30°	9,60–17,40 GHz (7,80 GHz)			30°	20,66 dB
		45°	10,00–16,40 GHz (6,40 GHz)			45°	19,83 dB
	Dihedral	0°	13,90–21,00 GHz (7,10 GHz)		Dihedral	0°	25,57 dB
		15°	8,40–19,30 GHz (10,90 GHz)			15°	23,02 dB
		30°	14,80–18,50 GHz (3,70 GHz)			30°	19,66 dB
		45°	8,60–17,60 GHz (9,00 GHz)			45°	20,45 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	10,60–12,90 GHz (2,30 GHz)		Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	21,60 dB
		15°	11,20–11,40 GHz (0,20 GHz)			15°	19,10 dB
		30°	11,70–13,40 GHz (1,70 GHz)			30°	16,59 dB
		45°	17,70–18,30 GHz (0,60 GHz)			45°	13,79 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	11,80–15,10 GHz (3,30 GHz)		Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	32,54 dB
		15°	14,00–15,10 GHz (1,10 GHz)			15°	18,22 dB
		30°	8,50–8,60 GHz (0,10 GHz)			30°	5,92 dB
		45°	11,50–11,60 GHz (0,10 GHz)			45°	11,03 dB

Üçüncüsü X-, Ku- ve K- bantlarında çalışan 12,35–17,8 GHz frekans aralığında 5,45 GHz bant genişliğinde %97 PCR oranında LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. 21,85-27,4 GHz ve 10,85-11,05 GHz frekanslarında ise LHCP polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 14’de sunulmuştur.

Tablo 14. X-, Ku- ve K-Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	11,80–17,30 GHz (5,50 GHz)	Bistatik	Düz	0°	33,12 dB
		15°	15,50–17,50 GHz (2,00 GHz)			15°	11,54 dB
		30°	11,90–17,90 GHz (6,00 GHz)			30°	21,10 dB
		45°	12,00–18,10 GHz (6,10 GHz)			45°	20,80 dB
	Dihedral	0°	20,80–26,90 GHz (6,10 GHz)		Dihedral	0°	39,76 dB
		15°	20,80–27,00 GHz (6,20 GHz)			15°	32,11 dB
		30°	20,90–24,10 GHz (3,20 GHz)			30°	18,00 dB
		45°	8,60–27,00 GHz (18,40 GHz)			45°	11,14 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	15,50–19,70 GHz (4,20 GHz)		Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	32,03 dB
		15°	5,70–19,00 GHz (3,30 GHz)			15°	22,60 dB
		30°	16,20–22,50 GHz (6,30 GHz)			30°	15,10 dB
		45°	18,40–25,80 GHz (7,40 GHz)			45°	25,77 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	15,70–19,00 GHz (3,30 GHz)		Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	36,97 dB
		15°	26,40–27,00 GHz (0,60 GHz)			15°	13,45 dB
		30°	10,60–13,10 GHz (2,50 GHz)			30°	14,16 dB
		45°	16,90–20,90 GHz (4,00 GHz)			45°	17,84 dB

Dördüncüsü X-, Ku-, K- ve Ka bantlarında çalışan 13,01–27,40 GHz frekans aralığında 14,39 GHz bant genişliğinde %90 PCR oranında LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. 11,88-12,19 GHz frekans aralığında ise RHCP polarizasyon dönüşümü sağlanmıştır. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 15’te sunulmuştur.

Tablo 15. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	16,05–27,49 GHz (11,44 GHz)	Düz	0°	37,76 dB
		15°	16,39–24,31 GHz (7,92 GHz)		15°	20,15 dB
		30°	18,19–22,15 GHz (3,96 GHz)		30°	19,39 dB
		45°	12,70–14,19 GHz (1,49 GHz)		45°	20,23 dB
	Dihedral	0°	25,46–28,00 GHz (2,54 GHz)	Dihedral	0°	49,67 dB
		15°	13,68–22,35 GHz (8,67 GHz)		15°	23,34 dB
		30°	13,71–14,87 GHz (1,16 GHz)		30°	15,34 dB
		45°	17,54–26,97 GHz (9,43 GHz)		45°	27,17 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	18,56–24,30 GHz (5,74 GHz)	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	26,56 dB
		15°	19,22–23,23 GHz (4,01 GHz)		15°	21,46 dB
		30°	19,80–23,20 GHz (3,40 GHz)		30°	14,71 dB
		45°	12,27–13,67 GHz (1,40 GHz)		45°	15,03 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	18,14–22,63 GHz (4,49 GHz)	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	20,04 dB
		15°	14,83–18,70 GHz (3,87 GHz)		15°	31,29 dB
		30°	13,32–19,36 GHz (6,04 GHz)		30°	13,21 dB
		45°	12,91–14,20 GHz (1,29 GHz)		45°	17,32 dB

Beşincisi C-, X- ve Ku- bantlarında çalışan 6,7-8,75 GHz frekans aralığında 2,05 GHz bant genişliğinde LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. 9,97–17 GHz ve 6,36-6,42 GHz frekans aralıklarında LHCP dönüşümü elde edilmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 16’da sunulmuştur.

Tablo 16. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	6,62–8,58 GHz (1,96 GHz)	Düz	0°	40,49 dB
		15°	6,73–8,63 GHz (1,90 GHz)		15°	16,55 dB
		30°	7,43–8,77 GHz (1,34 GHz)		30°	24,73 dB
		45°	8,01–8,90 GHz (0,89 GHz)		45°	32,00 dB
	Dihedral	0°	13,61–18,00 GHz (4,39 GHz)	Dihedral	0°	27,25 dB
		15°	14,39–17,59 GHz (3,20 GHz)		15°	33,89 dB
		30°	14,89–15,83 GHz (0,94 GHz)		30°	22,46 dB
		45°	6,34–6,69 GHz (0,35 GHz)		45°	16,16 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	16,98–17,38 GHz (0,40 GHz)	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	24,08 dB
		15°	6,53–7,05 GHz (0,52 GHz)		15°	6,88 dB
		30°	17,72–18,00 GHz (0,28 GHz)		30°	2,96 dB
		45°	13,98–14,56 GHz (0,58 GHz)		45°	22,32 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	13,31–13,43 GHz (0,12 GHz)	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	33,81 dB
		15°	6,89–7,59 GHz (0,70 GHz)		15°	8,06 dB
		30°	12,39–12,81 GHz (0,42 GHz)		30°	14,07 dB
		45°	14,65–15,21 GHz (0,56 GHz)		45°	6,14 dB

Altıncısı C-, X-, ve Ku- bantlarında çalışan 3D rezonatöre sahip 6,02–12,58 GHz frekansında 6,56 GHz frekans bandı genişliğinde LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. Ayrıca 5,79–5,84 GHz frekans aralığında LHCP 13,64–13,96 GHz frekans aralığında ise RHCP polarizasyon dönüşümü elde edilmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 17’de sunulmuştur.

Tablo 17. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	10,10–12,48 GHz (2,38 GHz)	Bistatik	Düz	0°	38,76 dB
		15°	10,21–12,36 GHz (2,15 GHz)			15°	19,82 dB
		30°	7,77–9,01 GHz (1,24 GHz)			30°	14,65 dB
		45°	8,32–8,88 GHz (0,56 GHz)			45°	13,31 dB
	Dihedral	0°	8,29–9,41 GHz (1,12 GHz)		Dihedral	0°	22,80 dB
		15°	13,07–13,97 GHz (0,90 GHz)			15°	14,94 dB
		30°	9,66–9,91 GHz (0,25 GHz)			30°	15,04 dB
		45°	10,06–12,84 GHz (2,78 GHz)			45°	29,27 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	7,30–12,53 GHz (5,23 GHz)		Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	33,52 dB
		15°	10,00–12,71 GHz (2,71 GHz)			15°	8,87 dB
		30°	13,40–13,52 GHz (0,12GHz)			30°	12,50 dB
		45°	8,32–9,19 GHz (0,87 GHz)			45°	14,00 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	7,53–9,21 GHz (1,68 GHz)		Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	34,21 dB
		15°	5,72–5,99 GHz (0,27 GHz)			15°	5,68 dB
		30°	7,86–8,43 GHz (0,57 GHz)			30°	8,90 dB
		45°	8,15–8,87 GHz (0,72 GHz)			45°	8,15 dB

Sonuncusu ise , X-, Ku- ve K- bantlarında çalışan dairesel polarizasyon dönüştürücüdür. 11,94–23,87 GHz frekans aralığında 11,93 GHz bant genişliğinde LP-CP dönüşümü, 10,65–11,26 GHz frekans aralığında ise LP-LP dönüşümü gerçekleştirmiştir. Bu çalışma için RCS azalma performansı Tablo 18’de sunulmuştur.

Tablo 18. X-, Ku-, K- ve Ka Bantlarında Çalışan Polarizasyon Dönüştürücü RCS Azaltım Performansı

Monostatik	Düz	0°	10,27–10,93 GHz (0,66 GHz)	Bistatik	Düz	0°	17,43 dB
		15°	10,28–10,91 GHz (0,63 GHz)			15°	14,05 dB
		30°	10,27–10,89 GHz (0,62 GHz)			30°	19,05 dB
		45°	10,24–10,88 GHz (0,64 GHz)			45°	18,73 dB
	Dihedral	0°	22,06–24,00 GHz (1,94 GHz)		Dihedral	0°	27,66 dB
		15°	22,03–24,00 GHz (1,97 GHz)			15°	15,63 dB
		30°	10,30–10,79 GHz (0,49 GHz)			30°	12,96 dB
		45°	11,94–12,72 GHz (0,78 GHz)			45°	9,26 dB
	Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	10,28–10,55 GHz (0,27 GHz)		Silindirik 300 mm yarıçaplı	0°	12,89 dB
		15°	10,00–10,50 GHz (0,50 GHz)			15°	8,43 dB
		30°	19,28–20,42 GHz (1,14 GHz)			30°	9,29 dB
		45°	21,31–24,00 GHz (2,69 GHz)			45°	9,66 dB
	Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	10,50–10,93 GHz (0,43 GHz)		Silindirik 200 mm yarıçaplı	0°	13,51 dB
		15°	10,14–10,91 GHz (0,77 GHz)			15°	10,31 dB
		30°	10,14–11,09 GHz (0,95 GHz)			30°	7,53 dB
		45°	10,77–11,07 GHz (0,30 GHz)			45°	14,25 dB

Gerçekleştirilen analizlerde, 0°, 15°, 30° ve 45° geliş açıları 200 mm ve 300 mm yarıçaplı silindir, 90° açılı dihedral ve düz plaka geometrik şekillerde PEC ve metayüzey plakalar için monostatik ve bistatik RCS azalma değerleri karşılaştırılmıştır. Monostatik RCS değerlendirmelerinde, geniş bantlı LP–LP polarizasyon dönüştürücü birim hücrelerle gerçekleştirilen ve LP–LP polarizasyon dönüşümünün baskın olduğu bantlarda, farklı geliş açıları için yapılan analizlerde, monostatik RCS azalma değerlerinin yüksek eşik seviyelerinde elde edildiği görülmüştür. Buna karşın, geniş bantlı LP–CP polarizasyon dönüştürücü birim hücrelerle yapılan ve LP–CP polarizasyon dönüşümünün baskın olduğu farklı geliş açılarındaki monostatik RCS analizlerinin, LP–LP dönüşümü sağlayan yapılara kıyasla düşük eşik seviyelerinde sonuçlandığı görülmüştür. Bistatik RCS verilerinin yanı sıra, her bir konfigürasyon için PEC ve metayüzey yapılara ait uzak alan ışıma örüntülerinin ön ve yan görünüşleri de eklenmiştir. Elde edilen ışıma örüntüleri, PEC referans yüzeyinin aksine, önerilen metayüzeylerin yansıyan enerjiyi gelen dalga yönüne odaklamak yerine aksi yönlere saçtığını açıkça göstermektedir. Bu durum, saçılma davranışının tüm geometrilerde farklı kodlama düzenlerine bağlı olarak değişen saçılma desenleri ve yönleriyle ortaya çıktığını göstermektedir. Ayrıca, metayüzeylerin RCS azalma mekanizmasının, yansıyan enerjinin yeniden yönlendirilmesi ve farklı yönlere saçılması sonucunda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, LP–LP polarizasyon dönüşümünün baskın olduğu frekans bantları ve polarizasyon dönüştürücü birim hücre ile tasarlanmış metayüzeylerde, hem monostatik hem de

bistatik RCS sonuçlarında daha önemli bir saçılma etkisi gösterilmektedir. Bu nedenle, tasarlanmış metayüzeylerin, çeşitli geometrik yüzeylere uygulandığında bile tutarlı ve geniş açılı RCS azaltma işlevi gösterdiği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Abdullah, Kamal, B., Ullah, S., Ahmad, A., & Choi, D.-y. (2025). Dual-band cross-polarization and linear-to-circular polarization converting metasurface. *Results in Physics*, 73, 108222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108222>
- Agrahari, R., Kumar, P., & Kumar, V. (2022). Pixelated metasurface based wideband cross polarization converter. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 37(4), 562-574. <https://doi.org/10.1080/09205071.2022.2156819>
- Ahmad, T., Rahim, A. A., Bilal, R. M. H., Noor, A., Maab, H., Naveed, M. A., Madni, A., Ali, M. M., & Saeed, M. A. (2022). Ultrawideband Cross-Polarization Converter Using Anisotropic Reflective Metasurface. *Electronics*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/electronics11030487>
- Alahmed Albasry, F., Ozturk, G., Hasar, U. C., & Corapsiz, M. F. (2025). Ultra-Thin Metasurface Polarization Converter with Linear and Circular Polarization Features for RCS Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(8), 5463-5473. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09358-y>
- Ali, H., Malik, B. T., Riaz, L., Shafique, M. F., & Koziel, S. (2025). Multi-band frequency selective metasurface based filter for WLAN and X-band EMI shielding applications. *Scientific Reports*, 15(1), 22297.
- Amer, A. A. G., Othman, N., Bait-Suwailamn, M. M., Sapuan, S. Z., Salem, A. A. A., & Salh, A. (2025). Polarization-Insensitive, High-Efficiency Metasurface with Wide Reception Angle for Energy Harvesting Applications. *Sensors*, 25(2), 429. <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/2/429>
- Arslan Madak, S. Ş., Teber, A., & Topkaya, R. (2024). Ultra-thin Polarization Converter Using Single Layer Metasurface for X-, Ku-, and K-Band Applications. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(3), 1094-1110. <https://doi.org/10.21597/jist.1399068>
- Balanis, C. A. (2011). *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons Inc.
- Bhattacharjee, A., & Dwari, S. (2022). Design of an Anisotropic Reconfigurable Reflective Polarization Converter for Realizing Circular Polarization-Reconfigurable Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(12), 2392-2396. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2022.3194347>
- Chen, Y., Zhang, S., Tian, Y., Li, C., Huang, W., Liu, Y., Jin, Y., Fang, B., Hong, Z., & Jing, X. (2024). Focus control of wide-angle metalens based on digitally encoded metasurface. *Opto-Electronic Advances*, 7(8), 240095-240091-240095-240016.
- Collett, E. (1968). The Description of Polarization in Classical Physics. *American Journal of Physics*, 36(8), 713-725. <https://doi.org/10.1119/1.1975098>
- Corapsiz, M. F. (2023). An efficient and low-profile metasurface-based polarization converter with linear and circular polarization efficiencies for X- and Ku-Band applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 37(18), 1597-1611. <https://doi.org/10.1080/09205071.2023.2262985>
- Deng, G., Yu, Z., Yin, Z., Yang, J., & Li, Y. (2022). A miniaturized and wide-angle 3D metamaterial for reflective polarization conversion. *Optical Materials*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113017>
- Denisowski, P. (2025). *Understanding S-parameters*. Retrieved 20.10 from

- Dutta, R., Ghosh, J., Yang, Z., & Zhang, X. (2021). Multi-Band Multi-Functional Metasurface-Based Reflective Polarization Converter for Linear and Circular Polarizations. *IEEE Access*, 9, 152738-152748. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3128190>
- Eugene Knott, J. S., Michael Tuley. (2004). *Radar cross section* (2nd ed. ed.). SciTech Publishing, Inc.
- 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. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2866636>
- Gao, X., Yu, X.-Y., Cao, W.-P., Jiang, Y.-N., & Yu, X.-H. (2016). Ultra-wideband circular-polarization converter with micro-split Jerusalem-cross metasurfaces. *Chinese Physics B*, 25(12). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/12/128102>
- Hayat, B., Zhang, J., Majeed, A., Ishfaq, M., Khan, A., & Ahmad, S. (2024). A Low Profile Wideband Linear to Circular Polarization Converter Metasurface with Wide Axial Ratio and High Ellipticity. *Electronics*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/electronics13020352>
- Holloway, C. L., Kuester, E. F., Gordon, J. A., Hara, J. O., Booth, J., & Smith, D. R. (2012). An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(2), 10-35. <https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6230714>
- Huan, Z., Scarmozzino, R., Nagy, G., Steel, J., & Osgood, R. M. (2000). Realization of a compact and single-mode optical passive polarization converter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(3), 317-319. <https://doi.org/10.1109/68.826926>
- Huang, X., Chen, J., & Yang, H. (2017). High-efficiency wideband reflection polarization conversion metasurface for circularly polarized waves. *Journal of Applied Physics*, 122(4). <https://doi.org/10.1063/1.4996643>
- Kamal, B., Chen, J., Yin, Y., Ren, J., Ullah, S., & Ali, U. (2021). Design and Experimental Analysis of Dual-Band Polarization Converting Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(8), 1409-1413. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3083334>
- Kamal, B., Chen, J., Yingzeng, Y., Ren, J., Ullah, S., & Khan, W. U. R. (2021). High efficiency and ultra-wideband polarization converter based on an L-shaped metasurface. *Optical Materials Express*, 11(5). <https://doi.org/10.1364/ome.423324>
- Karuppasamy, P., Wekalao, J., & Rajakannu, A. (2025). Graphene terahertz metasurface sensor enabled by AI for rapid, high-precision sperm detection in fertility assessment. *Plasmonics*, 1-23.
- Kaya, Y., Hasar, U. C., Ozturk, H., & Ozturk, G. (2025a). Multi-functional, multi-band, low-profile, ultra-thin, and cost-effective metasurface-based polarization converter. *Measurement*, 116894.
- Kaya, Y., Hasar, U. C., Ozturk, H., & Ozturk, G. (2025b). Multi-functional, multi-band, low-profile, ultra-thin, and cost-effective metasurface-based polarization converter. *Measurement*, 248, 116894. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116894>
- Khan, H. Z., Jabbar, A., Kazim, J. U. R., Ur Rehman, M., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2024). Multi-band ultrathin reflective metasurface for linear and circular polarization conversion in Ku, K, and Ka bands. *Commun Eng*, 3(1), 124. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00266-5>

- Khan, H. Z., Jabbar, A., Kazim, J. U. R., Zafar, J., Ur-Rehman, M., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2025). Reflective Metasurface for Multi-Band Polarization Conversion for Satellite Applications in 6G Networks. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 6(1), 332-343. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2024.3514122>
- Kraus, J. D., & Carver, K. R. (1973). *Electromagnetics Second Edition*.
- Kurt, M., Ozturk, G., & Ertugrul, M. (2025). Hepta-Band Ultra-Thin Metasurface Absorber for S-, C-, X-, Ku-, and K-Band Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10140-x>
- Lin, B.-Q., Da, X.-Y., Wu, J.-L., Li, W., Fang, Y.-W., & Zhu, Z.-H. (2016). Ultra-wideband and high-efficiency cross polarization converter based on anisotropic metasurface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(10), 2402-2405. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mop.30056>
- Lin, B.-q., Huang, W.-z., Guo, J.-x., Wang, Y.-w., Ye, H.-j., & Ji, X. (2022). Ultra-wideband Linear-to-Circular and Circular-to-Linear Polarization Conversion Realized by Anisotropic Metasurface. *Plasmonics*, 17(6), 2405-2415. <https://doi.org/10.1007/s11468-022-01731-7>
- Lin, B.-q., Huang, W., Yang, Y., Guo, J., Lv, L., & Zhang, J. (2022). An ultra-wideband polarization conversion metasurface for RCS reduction. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36(5), 597-606. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1977185>
- Lin, B., Lv, L., Guo, J., Liu, Z., Ji, X., & Wu, J. (2020). An Ultra-Wideband Reflective Linear-to-Circular Polarization Converter Based on Anisotropic Metasurface. *IEEE Access*, 8, 82732-82740. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2988058>
- Lin, B. Q., Da, X. Y., Wu, J. L., Li, W., Fang, Y. W., & Zhu, Z. H. (2016). Ultra- wideband and high- efficiency cross polarization converter based on anisotropic metasurface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(10), 2402-2405. <https://doi.org/10.1002/mop.30056>
- Lin, L., Zhang, J., Li, L., Li, X.-Q., & Wang, Q. (2025). A Frequency Selective Rasorber with Ultra-wideband Switchable Transmission/Reflection and Two-sided Absorption. *Progress In Electromagnetics Research M*, 133, 1-9. <https://doi.org/10.2528/pierm24122006>
- Liu, X., Zhang, J., Li, W., Lu, R., Li, L., Xu, Z., & Zhang, A. (2017). Three-Band Polarization Converter Based on Reflective Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 924-927. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2614686>
- Liu, Y., Yang, H., Huang, X., Yu, Z., Li, S., & Yang, Y. (2021). A metamaterial polarization converter with half reflection and half transmission simultaneously. *Physics Letters A*, 389, 127101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.127101>
- Mark A. Richards, J. A. S., William A.Holm. (2010). *Principles of modern radar*. SciTech Publishing.
- Matei, A. T., Vişan, A. I., & Popescu-Pelin, G. F. (2025). Design and Processing of Metamaterials. *Crystals*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/cryst15040374>
- Maurya, V., & Singhal, S. (2024). Dual Band Terahertz Reflective Linear Cross Polarization Converter-Based Biosensor. *IEEE Sensors Journal*, 24(5), 6103-6110. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350637>

- Mellita, R. A., Karthikeyan, S., & Damodharan, P. (2022). Dual-band ultrathin polarization converter for S-band microwave transmission. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(12), 1467-1470.
- Mellita, R. A., Karthikeyan, S. S., & Damodharan, P. (2022). Dual-Band Ultrathin Polarization Converter for S-Band Microwave Transmission. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(12), 1467-1470. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2022.3180677>
- Mirza, H., Soh, P. J., Jamlos, M. F., Hossain, T. M., Ramli, M. N., Al-Hadi, A. A., Sheikh, R. A., Hassan, E. S., & Yan, S. (2018). A crossed dodecagonal deployable polarizer on textile and polydimethylsiloxane (PDMS) substrates. *Applied Physics A*, 124(2), 178. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1602-9>
- Naseri, P., Matos, S. A., Costa, J. R., Fernandes, C. A., & Fonseca, N. J. G. (2018). Dual-Band Dual-Linear-to-Circular Polarization Converter in Transmission Mode Application to \$K/Ka\$ -Band Satellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(12), 7128-7137. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2874680>
- Nguyen, T. Q. H., Nguyen, T. K. T., Nguyen, T. Q. M., Cao, T. N., Phan, H. L., Luong, N. M., Le, D. T., Bui, X. K., Truong, C. L., & Vu, D. L. (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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126773>
- Nobre, F. D. M., de Sousa, T. M. L., Campos, A. L. P. S., & da Silva, M. W. B. (2024). Multifunctional Metasurface with PIN Diode Application Featuring Absorption, Polarization Conversion, and Transmission Functions. *Micromachines*, 15(11), 1344. <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/11/1344>
- Ozturk, G., & Corapsiz, M. F. (2022a). Ultra-thin reflective linear and circular polarization converter for Ku band applications. *Optics Communications*, 516. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128268>
- Ozturk, G., & Corapsiz, M. F. (2022b). Ultra-thin reflective linear and circular polarization converter for Ku band applications. *Optics Communications*, 516, 128268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128268>
- Ozturk, G., Hasar, U. C., Ertugrul, M., Tutar, F., Corapsiz, M. F., Kurt, M., Donmez, K., Ismail, I., & Alfaqawi, M. S. S. (2023). An efficient cost effective wide-angle metasurface-based linear and circular polarization converter for X-, Ku- and K-band applications. *Optics & Laser Technology*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109404>
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1998). Low frequency plasmons in thin-wire structures. *J. Phys.: Condens. Matter*, 10, 4785–4809.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
- Popovic, Z., & Popovic, B. D. (1999). *Introductory Electromagnetics*.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. JOHN WILEY & SONS, INC. .
- Ran, Y.-z., Shi, L.-h., Wang, J.-b., Wang, S.-B., Wang, G.-M., & Liang, J.-g. (2019). Ultra-wideband linear-to-circular polarization converter with ellipse-shaped metasurfaces. *Optics Communications*, 451, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.06.049>

- Rauf, H., Kamal, B., Ullah, S., Ali, U., & Matekovits, L. (2025). Experimental Validation of a Multi-Functional Metasurface for 5G and Satellite Communication. *IEEE Access*, 13, 55476-55486. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3555129>
- Ren, X., Liu, Y., Ji, Z., Zhang, Q., & Cao, W. (2025). Ultra-Wideband Passive Polarization Conversion Metasurface for Radar Cross-Section Reduction Across C-, X-, Ku-, and K-Bands. *Micromachines*, 16(3).
- Sadiku, M. N. O. (2018). *Elements Of Electromagnetics*. Oxford University Press, .
- Sajjad, M., Kong, X., Liu, S., Ahmed, A., Ur Rahman, S., & Wang, Q. (2020). Graphene-based THz tunable ultra-wideband polarization converter. *Physics Letters A*, 384(23), 126567. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126567>
- Salimitorkamani, M., Baladi, E., Mehranpour, M., & Odabasi, H. (2025). A reflective broadband metasurface-based cross-polarization converter (CPC) for Ku and K bands. *Journal of Applied Physics*, 137(23). <https://doi.org/10.1063/5.0251865>
- Schaefer, B., Collett, E., Smyth, R., Barrett, D., & Fraher, B. (2007). Measuring the Stokes polarization parameters. *American Journal of Physics*, 75(2), 163-168. <Go to ISI>://WOS:000243958000012
- Smith, D. R. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 84(18), 4184-4187. <https://doi.org/73.20.Mf>, 41.20.Jb, 42.70.Qs
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Shelby, R., Nemat-Nasser, S. C., Kroll, N., & Schultz, S. (2001). Left-Handed Metamaterials. In *Photonic Crystals and Light Localization in the 21st Century* (pp. 351-371). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0738-2_25
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. (2020). IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures. In *Antennas and Propagation Standards Committee*. United States of America.: IEEE Antennas and Propagation Society.
- Turkmen-Kucuksari, O., & Cimen, S. (2025). Multiband terahertz converter achieving sub-1 dB axial ratio in LTC and high PCR in LTL modes. *Optical and Quantum Electronics*, 57(6), 373. <https://doi.org/10.1007/s11082-025-08307-9>
- Tutar, F. (2021). *C, X, Ku Ve K Mikrodalga Frekans Bantlarında Çalışan Metamalzeme Temelli Polarizasyon Dönüştürücü Uygulamaları* [Yüksel Lisans, ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ]. Erzurum.
- Tutar, F., & Ozturk, G. (2022). An effective metasurface-based linear and circular polarization converter for C- and X-band applications. *Optical Materials*, 128, 112355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112355>
- Vasić, B., Zografopoulos, D. C., Isić, G., Beccherelli, R., & Gajić, R. (2017). Electrically tunable terahertz polarization converter based on overcoupled metal-isolator-metal metamaterials infiltrated with liquid crystals. *Nanotechnology*, 28(12), 124002. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa5bbd>
- Veselago, V. G. (1968). THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ . *SOVIET PHYSICS USPEKHI*, 509-514.
- Wang, X., Zhang, J., Tian, Z., Xu, C., Pei, S., Li, X., Li, F., & Yun, F. (2025). Meta-grating integrated high-ellipticity and wide-band linear-to-circular polarization converter for visible light. *Optics Express*, 33(5), 10180-10197.

- Wu, P. C., Sokhoyan, R., Shirmanesh, G. K., Cheng, W. H., & Atwater, H. A. (2021). Near-infrared active metasurface for dynamic polarization conversion. *Advanced Optical Materials*, 9(16), 2100230.
- Wu, R., Dong, J., & Wang, M. (2023). Wearable Polarization Conversion Metasurface MIMO Antenna for Biomedical Applications in 5 GHz WBAN. *Biosensors*, 13(1), 73. <https://www.mdpi.com/2079-6374/13/1/73>
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153884>
- Zafar, J., Khan, H. Z., Jabbar, A., Kazim, J. u. R., Rehman, M. U., Siddiqui, A. M., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2025). Asymmetric multi-band reflective metasurface for linear and circular polarizations conversion in Ku, K, Ka, and U bands. *Scientific Reports*, 15(1), 4977.
- Zafar, J., Khan, H. Z., Jabbar, A., Kazim, J. u. R., Ur Rehman, M., Siddiqui, A. M., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2025). Multi-band reflective metasurface for efficient linear and circular polarization conversion. *Optical and Quantum Electronics*, 57(2). <https://doi.org/10.1007/s11082-025-08037-y>
- Zaker, R., & Jolani, F. (2024). Wideband design and modeling of efficient multi-resonance reflective linear-to-circular polarization converter. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 16(7), 1096-1105. <https://doi.org/10.1017/s1759078723001629>
- Zeng, L., Tian, X. L., Li, Y. P., Zhang, D., & Zhang, H. F. (2020). A Solid State Plasma Multifunctional Metamaterial and Its Application for Energy Absorbing and Cross Polarization Conversion. *IEEE Access*, 8, 205646-205656. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037648>
- Zhang, J., Yang, L., Li, L., Zhang, T., Li, H., Wang, Q., Hao, Y., Lei, M., & Bi, K. (2017). High-efficiency polarization conversion phase gradient metasurface for wideband anomalous reflection. *Journal of Applied Physics*, 122(1). <https://doi.org/10.1063/1.4991505>
- Zhang, Y., Luan, W., Yan, X., Gao, X., Zhang, S., Jin, Z., Ma, G., & Yao, J. (2022). Dual-Directional Broadband Linear-to-Linear Polarization Conversion Using Multi-layer Metamaterials. *Plasmonics*, 17(4), 1411-1418. <https://doi.org/10.1007/s11468-022-01625-8>
- Zhao, X. B., Wei, F., Hou, J. Q., Xu, L., Yang, Y., Yang, X., & Wu, N. (2021). 3-D Printed Conformal Dielectric Linear-to-Circular Polarization Converters for Cylindrical and Spherical Surfaces. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(12), 2539-2543. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3117874>
- Zhao, Y., Yang, R., Wang, Y., Zhang, W., & Tian, J. (2022). VO₂-assisted multifunctional metamaterial for polarization conversion and asymmetric transmission. *Optics Express*, 30(15), 27407-27417. <https://doi.org/10.1364/OE.462813>
- Zhen, Q., Mao, Z., Cui, J., Guo, M., Chernogor, L. F., Jin, Z., Zheng, Y., & Liu, T. (2023). RCS reduction effect based on transparent and flexible polarization conversion metasurface arrays. *Results in Physics*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106886>
- Zheng, Q., Guo, C., & Ding, J. (2018). Wideband Metasurface-Based Reflective Polarization Converter for Linear-to-Linear and Linear-to-Circular Polarization Conversion. *IEEE*

Antennas and Wireless Propagation Letters, 17(8), 1459-1463.
<https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2849352>

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. <https://doi.org/10.1017/S1759078717001477>

Zheng, Q., Guo, C., Vandenbosch, G. A. E., Yuan, P., & Ding, J. (2020). Dual-broadband highly efficient reflective multi-polarisation converter based on multi-order plasmon resonant metasurface. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 14(9), 967-972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0984>

Zhou, J., Shen, Z., & Zhang, Q. (2025). Hybrid linear and circular polarization high-efficiency metasurface-based converter for X, Ku, and Kbands. *Journal of Applied Physics*, 138(14). <https://doi.org/10.1063/5.0285688>

Zou, M., Su, M., & Yu, H. (2020). Ultra-broadband and wide-angle terahertz polarization converter based on symmetrical anchor-shaped metamaterial. *Optical Materials*, 107, 110062. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110062>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fatih TUTAR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erbil Koru Lisesi
Lisans:	Atatürk Ünivertesitesi
Yüksek Lisans	Atatürk Ünivertesitesi
Doktora	Atatürk Ünivertesitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
IEEE	