

**KODLANMIŞ METAMALZEME İLE RADAR
SOĞURUCU MALZEME TASARIMI**

**RADAR ABSORBING MATERIAL DESIGN WITH
CODING METAMATERIAL**

FAHRETTİN TURAL

PROF. DR BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans TEZİ olarak hazırlanmıştır.

*Œehit Ömer Halisdemir, Œehit Burhan Kaplan ve Tüm Œehitlerimize
ithafen...*

İyi ki varsın EREN...

ÖZET

KODLANMIŞ METAMALZEME İLE RADAR SOĞURUCU MALZEME TASARIMI

Fahrettin TURAL

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Temmuz 2023, 202 sayfa

Bir nesnenin/hedefin tespit, teşhis ve takibini yapan RADAR sistemlerinin askeri ve sivil alanda her geçen gün önemi artmaktadır. RADAR sistemlerinin performansını belirleyen önemli parametrelerden birisi de nesnenin/hedefin RADAR kesit alanıdır (RKA). Özellikle askeri alanlarda, hedefin tespit, teşhis veya takip edilebilirliğini azaltmak amacıyla RADAR kesit alanı azaltım teknikleri uygulanır. RADAR kesit alanı azaltım tekniklerinden birisi de RADAR soğurucu malzeme kullanmaktır. Öte yandan, elektromanyetik ölçümlerde ve anten parametrelerinin iyileştirilmesinde de RADAR soğurucu malzemeler kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, RADAR soğurucu malzeme tasarımında yeni bir yöntem olan, temeli elektromanyetik dalganın farklı faz tepkileri ile yönlendirilmesine dayanan, kodlanmış metamalzeme ile RADAR soğurucu malzeme tasarımı hakkında bilgiler verilmiştir.

Öncelikle RADAR ve RADAR kesit alanı, RADAR soğurucu yapılar hakkında genel bilgiler ve metamalzeme, kodlanmış metamalzeme hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra uzak alan saçılma formülleri çıkarılmış ve parçacık sürü optimizasyon algoritması MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Geniş frekans aralığında, polarizasyon bağımsız, açısal kararlı ve 2 farklı faz tepkisine sahip birim hücre tasarımları elde edilmiştir. Elde edilen birim hücreler ve optimizasyon algoritması ile kodlanmış metamalzeme tasarlanmıştır. C – X – Ku frekans bantlarını kapsayacak şekilde tasarlanan kodlanmış metamalzemenin, RADAR kesit alanı azaltım değerleri, MATLAB ve CST tam-dalga benzetim çalışmaları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Kodlanmış metamalzemenin üretimi yapılarak ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarlanan kodlanmış metamalzeme ile normal geliş açısında, yatay ve dikey polarizasyon bağımsız, en az 7 dB mono-statik RADAR kesit alanı azaltımı 5.2 – 15.8 GHz arasında, bi-statik RADAR kesit alanı azaltımı 5.4 – 15.6 GHz arasında gerçekleşmiştir. Ayrıca eğik gelen elektromanyetik dalga durumları incelenmiş ve bant genişliği bir miktar daralmak kaydıyla 45°'ye kadar RADAR kesit alanı azaltımı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: RADAR, RADAR Kesit Alanı, RKA, Metamalzeme, Kodlanmış Metamalzeme, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Birim Hücre

ABSTRACT

RADAR ABSORBING MATERIAL DESIGN WITH CODING METAMATERIAL

Fahrettin TURAL

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

July 2023, 202 pages

The importance of the RADAR systems that detect, identify and track an object/target is increasing day by day in military and civilian fields. One of the most important parameters of RADAR system performance is RADAR cross sectional (RCS) area of an object/target. Especially in military fields, RADAR cross section reduction techniques are applied to reduce the detection, identification and trackability of the target. One of the RADAR cross section reduction techniques is the use of RADAR absorbing materials. On the other hand, RADAR absorbing materials are also used for electromagnetic measurements and to improve antenna parameters.

Within the scope of this thesis, information about RADAR absorbing material design with coding metamaterials, which is a new method in RADAR absorbing material design, based on the manipulation of the electromagnetic wave with different phase responses,

was given. Firstly, general information about RADAR and RADAR cross section, RADAR absorbing structures and metamaterials, coding metamaterials were given. After that, the far field scattering formulas were derived, and particle swarm optimization algorithm was implemented in MATLAB environment. Unit cell designs that have wide frequency range, polarization independent, angularly stable and 2 different phase responses have been obtained. The coding metamaterials were designed with obtained unit cells and optimization algorithms. The designed coding metamaterial that cover C – X – Ku frequency bands, RADAR cross section values were compared with MATLAB and CST full-wave simulation results and shared. The coding metamaterial was fabricated; so that, the measurement and simulation results were compared. With the designed coding metamaterial, at normal incidence angle, horizontal and vertical polarization independent, at least 7 dB mono-static RADAR cross section reduction was achieved in between 5.2 and 15.8 GHz and bi-static RADAR cross section reduction was achieved in between 5.4 and 15.6 GHz. In addition, the case of oblique incidence electromagnetic wave was investigated and RADAR cross section reduction up to 45° was achieved with narrowing the bandwidth slightly.

Keywords: RADAR, RADAR Cross Section, RCS, Metamaterial, Coding Metamaterial, Particle Swarm Optimization, Unit Cell

TEŞEKKÜR

Gerek lisans öğrenimim gerekse de yüksek lisans öğrenimim esnasında bilgisi, tecrübesi ve öğretmenliği ile bana yol gösteren, kritik anlarda çözüm önerileri ile tezin başarıyla tamamlanmasını sağlayan değerli tez danışmanım sayın Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR' a çok teşekkür ederim.

Savunma sınavında yer alan, farklı bakış açıları ile konuya yaklaşım tez çalışmasının daha iyi noktalara gelmesinde katkıları bulunan değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN' e, Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜLER' e, Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ' a ve Prof. Dr. Berkan DÜLEK' e çok teşekkür ederim.

Bu zamana kadar eğitimim ve öğrenimimde emeği geçen, ülkeme ve insanlığa faydalı işler yapmamda yol gösteren Zeliha BULMUŞ, Bülent IŞIK, Dinçer GÖKÇEN ve tüm öğretmenlerime teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimimde ve çalışma hayatımda gerekli destekleri sağlayan Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş.' ye, değerli yöneticilerime, çalışma arkadaşlarıma ve şefim, ağabeyim Çağlayan DURLU' ya çok teşekkür ederim.

Buralara gelmemde büyük emeği olan, kritik kararlarımda yol gösteren, aklen ve fikren gelişmemi sağlayan öncelikle büyükbabama sonrasında dedeme, anneanneme, babaanneme, teyzeme, akrabalarıma ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Doğduğum andan itibaren beni kollayıp büyüten, zor anlarımda yanımda olan, beni maddi ve manevi olarak destekleyen, desteklerini kelimelerle ifade edemediğim anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxv
SÖZLÜK DİZİNİ.....	xxviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	4
2. RADAR SOĞURMADA KULLANILAN YÖNTEMLER VE METAMALZEME.....	12
2.1. RADAR ve RADAR Kesit Alanı.....	12
2.2. Şekillendirme	14
2.3. RADAR Soğurucu Yapılar.....	15
2.3.1. Kademeli Geçişli Empedans Eşlemeli Yapılar	16
2.3.2. Rezonans Yapılar	18
2.3.4. Manyetik Malzemeler	19
2.4. Metamalzeme	20
2.4.1. Kodlanmış Metamalzeme.....	23
3. MODELLEME VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	32
3.1. Uzak Alan Saçılma Örüntüsü.....	32
3.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması	62
4. TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI	68
4.1. Birim Hücre Tasarımı.....	68
4.1.1. Tek Katmanlı Birim Hücre Tasarımı	69
4.1.2. İki Katmanlı Birim Hücre Tasarımı	93

4.2. Kodlanmış Metamalzeme Tasarımı	114
4.2.1. Numerik Yöntemlerle Karşılaştırma.....	116
5. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	146
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	154
7. KAYNAKLAR	157
8. ÖZGEÇMİŞ	161

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Mono-statik RADAR üzerinde gönderilen ve alınan elektromanyetik dalga ..	12
Şekil 2.2 Bi-statik RADAR üzerinde gönderilen ve alınan elektromanyetik dalga.....	13
Şekil 2.3 RADAR kesit alanı azaltılmış TUSAŞ Milli Muharip Uçak [41] (a) ve ROKETSAN SOM füzesi [42] (b).....	14
Şekil 2.4 RADAR kesit alanı azaltılmış ilk savaş uçağı F-117 Nighthawk [43]	15
Şekil 2.5 Piramit soğurucu yapısı [47]	17
Şekil 2.6 Adım geçişli ve düzgün geçişli soğurucu yapısının empedans değişimi grafiğı	17
Şekil 2.7 Dallenbach Katman Soğurucu yapısı	18
Şekil 2.8 Salisbury Ekran yapısı	19
Şekil 2.9 Jaumann Katman yapısı	19
Şekil 2.10 Manyetik malzeme [50]	20
Şekil 2.11 Elektriksel ve manyetik geçirgenliğe göre dalga ve malzeme özellikleri [3]	23
Şekil 2.13 Birim hücrelerin kalınlık bilgileri	27
Şekil 2.14 TE 0° geliş açısı yansıma katsayısı genlik karşılaştırması grafiğı	27
Şekil 2.15 TE 0° geliş açısı yansıma katsayısı faz karşılaştırması grafiğı	28
Şekil 2.16 Birim Hücre 1 ve Birim Hücre 2 ile kaplanan yüzey	28
Şekil 2.17 Mükemmel elektrik iletken ile kaplanan yüzey	29
Şekil 2.18 Küresel koordinat sistemi açı ve vektör yönelimleri	29
Şekil 2.19 Phi= 90° kesit düzlemde 6 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu	30
Şekil 2.20 Phi= 90° kesit düzlemde 6 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu ve mono-statik RKA değerleri	30
Şekil 2.21 Phi= 90° kesit düzlemde 10 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu	31
Şekil 2.22 Phi= 90° kesit düzlemde 10 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu ve mono-statik RKA değerleri	31
Şekil 3.1 Kodlanmış metamalzeme ve küresel koordinat sistemi	33
Şekil 3.2 Kodlanmış metamalzeme üzerinde akım indüklenmesi.....	34
Şekil 3.3 Kodlanmış metamalzeme yüzeyi x-y düzlemi kesiti	35

Şekil 3.4 Uzak alan matrisi ve birim dairenin u ve v ile bağıntısı	39
Şekil 3.5 Uzak alan matrisi ve birim dairenin periyot ile bağıntısı	39
Şekil 3.6 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 5x5 kodlanmış metamateryal	40
Şekil 3.7 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 5x10 kodlanmış metamateryal	40
Şekil 3.8 Örnek 1 kodlanmış metamateryal	41
Şekil 3.9 Örnek 1 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü	42
Şekil 3.10 Örnek 1 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	42
Şekil 3.11 Altair FEKO programında elde edilen desibel cinsinden örnek 1 3B elektrik alan örüntüsü.....	43
Şekil 3.12 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 1 3B elektrik alan örüntüsü	43
Şekil 3.13 Örnek 1 3B elektrik alan karşılaştırması	43
Şekil 3.14 Örnek 2 kodlanmış metamateryal	44
Şekil 3.15 Örnek 2 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü	45
Şekil 3.16 Örnek 2 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	45
Şekil 3.17 Altair FEKO programında elde edilen örnek 2 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü.....	46
Şekil 3.18 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 2 3B elektrik alan örüntüsü	46
Şekil 3.19 Örnek 2 3B elektrik alan karşılaştırması	46
Şekil 3.20 Örnek 3 kodlanmış metamateryal	47
Şekil 3.21 Örnek 3 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü	48
Şekil 3.22 Örnek 3 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	48
Şekil 3.23 Altair FEKO programında elde edilen örnek 3 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü.....	49
Şekil 3.24 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 3 3B elektrik alan örüntüsü	49
Şekil 3.25 Örnek 3 3B elektrik alan karşılaştırması	49
Şekil 3.26 Örnek 4 kodlanmış metamateryal	50
Şekil 3.27 Örnek 4 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü	51
Şekil 3.28 Örnek 4 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	51
Şekil 3.29 Altair FEKO programında elde edilen örnek 4 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü.....	52

Şekil 3.30 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 4 3B elektrik alan örüntüsü.....	52
Şekil 3.31 Örnek 4 3B elektrik alan karşılaştırması.....	52
Şekil 3.32 Örnek 5 kodlanmış metalmalzeme.....	53
Şekil 3.33 Örnek 5 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü.....	54
Şekil 3.34 Örnek 5 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	54
Şekil 3.35 Altair FEKO programında elde edilen örnek 5 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	55
Şekil 3.36 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 5 3B elektrik alan örüntüsü.....	55
Şekil 3.37 Örnek 5 3B elektrik alan karşılaştırması.....	55
Şekil 3.38 Örnek 6 kodlanmış metalmalzeme.....	56
Şekil 3.39 Örnek 6 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü.....	57
Şekil 3.40 Örnek 6 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	57
Şekil 3.41 Altair FEKO programında elde edilen örnek 6 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	58
Şekil 3.42 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 6 3B elektrik alan örüntüsü.....	58
Şekil 3.43 Örnek 6 3B elektrik alan karşılaştırması.....	58
Şekil 3.44 Örnek 7 kodlanmış metalmalzeme.....	59
Şekil 3.45 Örnek 7 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü.....	60
Şekil 3.46 Örnek 7 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	60
Şekil 3.47 Altair FEKO programında elde edilen örnek 7 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü	61
Şekil 3.48 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 7 3B elektrik alan örüntüsü.....	61
Şekil 3.49 Örnek 7 3B elektrik alan karşılaştırması.....	61
Şekil 3.50 Parçacık sürü optimizasyon algoritması genel akış şeması	63
Şekil 3.51 r_1 ve r_2 katsayılarının tekdüze dağılım ile üretilmesi ve optimizasyon sonucu elde edilen RKA azaltımı	66
Şekil 3.52 r_1 ve r_2 katsayılarının normal dağılım ile üretilmesi ve optimizasyon sonucu elde edilen RKA azaltımı	66
Şekil 3.53 Parçacık sürü optimizasyon algoritması genişletilmiş akış şeması.....	67

Şekil 4.1 Düzgün sekizgen şekilli birim hücre 3B görüntüsü.....	69
Şekil 4.2 Düzgün sekizgen şekilli birim hücre ve değişken bilgileri.....	70
Şekil 4.3 Düzgün sekizgen açı ve uzunluk bilgileri.....	70
Şekil 4.4 Üst tabakada metal şablon bulunmayan birim hücre ve değişken bilgileri	71
Şekil 4.5 p değerine göre birim hücre değişimi	73
Şekil 4.6 U_d değerine göre birim hücre değişimi.....	73
Şekil 4.7 U_i değerine göre birim hücre değişimi	73
Şekil 4.8 Yansıma katsayısı faz tepkisi fark grafiği	74
Şekil 4.9 Yansıma katsayısı faz tepkisinin fazın 360° 'de tekrarından bağımsız gösterimi	74
Şekil 4.10 Yansıma katsayısı faz tepkisinin fazın 360° 'de tekrarından dolayı -180° ile 180° arasında gösterimi	75
Şekil 4.11 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği.....	75
Şekil 4.12 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	76
Şekil 4.13 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	76
Şekil 4.14 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği.....	77
Şekil 4.15 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği	77

Şekil 4.16 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	78
Şekil 4.17 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	79
Şekil 4.18 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	79
Şekil 4.19 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	80
Şekil 4.20 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği	80
Şekil 4.21 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	81
Şekil 4.22 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	82
Şekil 4.23 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	82

Şekil 4.24 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	83
Şekil 4.25 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	83
Şekil 4.26 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği.....	84
Şekil 4.27 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği.....	85
Şekil 4.28 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	85
Şekil 4.29 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	86
Şekil 4.30 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği	86
Şekil 4.31 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği.....	87

Şekil 4.32 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	88
Şekil 4.33 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	88
Şekil 4.34 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	89
Şekil 4.35 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	89
Şekil 4.36 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	90
Şekil 4.37 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	91
Şekil 4.38 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği	91
Şekil 4.39 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği	92

Şekil 4.40 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği	92
Şekil 4.42 İki katmanlı birim hücre yapıları Z-Y düzlemi 2B görüntüsü ve katmanlar arası mesafe	94
Şekil 4.43 Katmanlar arası mesafeye göre İKBH2 için birim hücre 2B görüntüsü.....	94
Şekil 4.46 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği	96
Şekil 4.47 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği	96
Şekil 4.48 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği	97
Şekil 4.49 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği	97
Şekil 4.50 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz farkı grafiği grafiği.....	98
Şekil 4.51 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH1 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	98
Şekil 4.52 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH1 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	99
Şekil 4.53 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği.....	100

Şekil 4.54 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği	100
Şekil 4.55 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği	101
Şekil 4.56 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği	101
Şekil 4.57 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği	102
Şekil 4.58 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği	102
Şekil 4.59 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği grafiği	103
Şekil 4.60 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH1 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	103
Şekil 4.61 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH1 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği.....	104
Şekil 4.62 İKBH0 ve İKBH2 için nihai birim hücre yapılandırması	105
Şekil 4.63 Örnek bal peteği yapısı [68]	105
Şekil 4.64 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansıma katsayısı genlik tepkisi grafiği	106
Şekil 4.65 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansıma katsayısı faz tepkisi grafiği.....	106

Şekil 4.66 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği	107
Şekil 4.67 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği	107
Şekil 4.68 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği	108
Şekil 4.69 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği	108
Şekil 4.70 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği	109
Şekil 4.71 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği	109
Şekil 4.72 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi fark grafiği.....	110
Şekil 4.73 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi fark grafiği.....	110
Şekil 4.74 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 4 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	111
Şekil 4.75 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 6 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	111
Şekil 4.76 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 8 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	112

Şekil 4.77 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 10 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	112
Şekil 4.78 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 12 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	113
Şekil 4.79 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 14 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	113
Şekil 4.80 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 16 GHz' de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği	114
Şekil 4.81 Optimizasyon algoritması parametreleri baz alınarak farklı denemelere göre en düşük RKA azaltımı değerleri	116
Şekil 4.82 MATLAB ortamında kodlanmış metamalzeme ve birim hücre dağılımları	117
Şekil 4.83 CST programında kodlanmış metamalzeme ve birim hücre dağılımları	117
Şekil 4.84 Birim hücre tasarımı (solda) ve benzetim esnasında oluşan birim hücreler (sağda)	118
Şekil 4.85 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 10x10 kodlanmış metamalzeme	119
Şekil 4.86 Kodlanmış metamalzeme ve 6 GHz dikey polarizasyon normal geliş açısında CST Studio Suite programında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü	120
Şekil 4.87 Kodlanmış metamalzeme ve 6 GHz dikey polarizasyon normal (0°,0°) geliş açısında CST programında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsünün MATLAB ortamında grafiklendirilmesi	121
Şekil 4.88 Kodlanmış metamalzemenin 4 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	122
Şekil 4.89 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	122
Şekil 4.90 Kodlanmış metamalzemenin 6 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	122

Şekil 4.91 Kodlanmış metamalzemenin 7 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	123
Şekil 4.92 Kodlanmış metamalzemenin 8 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	123
Şekil 4.93 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	123
Şekil 4.94 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	124
Şekil 4.95 Kodlanmış metamalzemenin 11 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	124
Şekil 4.96 Kodlanmış metamalzemenin 12 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	124
Şekil 4.97 Kodlanmış metamalzemenin 13 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	125
Şekil 4.98 Kodlanmış metamalzemenin 14 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	125
Şekil 4.99 Kodlanmış metamalzemenin 15 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	125
Şekil 4.102 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	127
Şekil 4.103 Kodlanmış metamalzemenin 6 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü	127

Şekil 4.104 Kodlanmış metamalzemenin 7 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	127
Şekil 4.105 Kodlanmış metamalzemenin 8 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	128
Şekil 4.106 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	128
Şekil 4.107 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	128
Şekil 4.108 Kodlanmış metamalzemenin 11 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	129
Şekil 4.109 Kodlanmış metamalzemenin 12 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	129
Şekil 4.110 Kodlanmış metamalzemenin 13 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	129
Şekil 4.111 Kodlanmış metamalzemenin 14 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	130
Şekil 4.112 Kodlanmış metamalzemenin 15 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	130
Şekil 4.113 Kodlanmış metamalzemenin 16 GHz ($0^{\circ},0^{\circ}$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	130
Şekil 4.117 Kodlanmış metamalzeme bi-statik RKA azaltımı MATLAB ve CST programında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve -10 dB referans çizgisi	133

Şekil 4.118 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü	134
Şekil 4.121 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz (45°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü	135
Şekil 4.122 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz (45°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında FEKO ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü.....	135
Şekil 4.123 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz (45°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında CST ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü	135
Şekil 4.124 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 143° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	136
Şekil 4.125 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 133° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	137
Şekil 4.126 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 123° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü.....	137
Şekil 4.127 (45°,0°) geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalganın kodlanmış metamalzeme ile MATLAB ve CST ortamında elde edilen değerlerin en düşük bi-statik RKA azaltım değerleri.....	138
Şekil 4.128 (45°,90°) geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalganın kodlanmış metamalzeme ile MATLAB ve CST ortamında elde edilen en düşük bi-statik RKA azaltım değerleri.....	138
Şekil 4.129 Kodlanmış metamalzemenin dikey polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -7 dB referans çizgisi	139
Şekil 4.130 Kodlanmış metamalzemenin dikey polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -10 dB referans çizgisi	139

Şekil 4.131 Kodlanmış metamalzemenin yatay polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -7 dB referans çizgisi	140
Şekil 4.132 Kodlanmış metamalzemenin yatay polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -10 dB referans çizgisi	140
Şekil 4.133 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	141
Şekil 4.134 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücrenin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü.....	141
Şekil 4.135 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	142
Şekil 4.136 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 4 süper birim hücrenin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü.....	142
Şekil 4.137 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 4 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	143
Şekil 4.138 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	144
Şekil 4.139 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 5 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	144
Şekil 4.140 Kodlanmış metamalzemenin 15 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü	145

Şekil 4.141 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 15 GHz (0°,0°) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü.....	145
Şekil 5.1 Plastik vida, somun ve pul	146
Şekil 5.2 Üretimi yapılan kodlanmış metamalzeme bölümleri ve örnek delik açılan kısım	147
Şekil 5.3 Kodlanmış metamalzeme bölümleri ve delik açılan kısımlarla birlikte bağlantı elemanları temsili üstten (solda) ve yandan (sağda) görünüşü	147
Şekil 5.4 Kodlanmış metamalzeme alt katmanın lehimlenmeden önce (solda) ve lehimlendikten sonra (sağda) alttan görünümü.....	148
Şekil 5.5 Kodlanmış metamalzeme üst katmanın CST ortamı (solda) ve üretiminin (sağda) üstten görünümü.....	148
Şekil 5.6 Kodlanmış metamalzeme alt ve üst katmanın birleştirilmesi amacıyla kullanılan plastik vida bölgeleri.....	149
Şekil 5.7 Kodlanmış metamalzeme yandan görünümü	149
Şekil 5.8 Üretilen numunenin elektromanyetik yansımaya/iletim ölçüm düzeneği.....	150
Şekil 5.9 Test kurulum düzeneğinde elektromanyetik dalganın yayılımı	150
Şekil 5.10 Elektromanyetik dalgaların Test Altındaki Malzeme üzerinde oluşan odaklama bölgesi ve yarıçapı	151
Çizelge 5.1 Aydınlatılan bölgenin frekansa bağlı yarıçap ve en küçük malzeme boyutları için gerekli yarıçap ve çap değerleri	152
Şekil 5.11 Kırpılan kodlanmış metamalzemenin 6 GHz ve 12 GHz için boyutları.....	152
Şekil 5.12 Kodlanmış metamalzemenin kırılması ile elde edilen CST tam-dalga benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	153

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında şimdiki konum, sonraki hız ve sonraki konum tablosu	65
Çizelge 4.1 RO4725JXR alttaş kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları	72
Çizelge 4.2 FR-4 alttaş kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları	72
Çizelge 4.3 Optimizasyon algoritması parametre karşılaştırmaları	115

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P_r	Alınan (alıcı anten tarafında) Güç
P_t	İletilen (verici anten tarafında) Güç
σ	RADAR Kesit Alanı
(θ, ϕ)	Küresel Koordinat Sistemi Açılımları (Theta,Phi)
$G_t(\theta_t, \phi_t)$	Açıya Bağlı Verici Anten Kazancı
$G_r(\theta_r, \phi_r)$	Açıya Bağlı Alıcı Anten Kazancı
λ	Dalga boyu
R_1	Verici Anten ile Hedef Arasındaki Uzaklık
R_2	Alıcı Anten ile Hedef Arasındaki Uzaklık
\hat{p}_t	İletilen Dalganın Polarizasyon Birim Vektörü
\hat{p}_r	Alınan Dalganın Polarizasyon Birim Vektörü
R	Hedef ile Gözlem Noktası Arasındaki Mesafe
W_s	Hedeften Saçılan Güç Yoğunluğu
W_i	Hedefe İletilen Güç Yoğunluğu
E_s	Hedeften Saçılan Elektrik Alan
E_i	Hedefe İletilen Elektrik Alan
H_s	Hedeften Saçılan Manyetik Alan
H_i	Hedefe İletilen Manyetik Alan
Z_0	Boş-Uzay Empedansı
μ_0	Boş-Uzay Manyetik Geçirgenliği
ϵ_0	Boş-Uzay Elektriksel Geçirgenliği
Γ	Yansıma Katsayısı
Z_L	Yük (Hedef) Empedansı

μ_r	Göreceli (Bağıl) Manyetik Geçirgenlik
ϵ_r	Göreceli (Bağıl) Elektriksel Geçirgenlik
$Z_{eşleme}$	Eşleme Katmanı Empedansı
∇	Nabla (Del) Operatörü
$\nabla \times$	Rotasyon (Curl) Operatörü
$\nabla \cdot$	Iraksama (Divergence) Operatörü
$\vec{E}(x, y, z; t)$	Zamana ve Konuma Bağlı Elektrik Alan Şiddeti Vektörü
$\vec{H}(x, y, z; t)$	Zamana ve Konuma Bağlı Manyetik Alan Şiddeti Vektörü
$\vec{D}(x, y, z; t)$	Zamana ve Konuma Bağlı Elektrik Akı Yoğunluğu Vektörü
$\vec{B}(x, y, z; t)$	Zamana ve Konuma Bağlı Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
$\vec{J}(x, y, z; t)$	Zamana ve Konuma Bağlı Hacimsel Akım Yoğunluğu Vektörü
ρ_v	Hacimsel Yük Yoğunluğu
k	Dalga Numarası
\vec{k}	Dalga Numarası Vektörü
w	Açısal Frekans
\vec{S}	Poynting Vektör
(r, θ, ϕ)	Gözlem Noktası ile Kodlanmış Metamalzeme Arası Uzaklık Ve Açısı
E_{xa}	Yarık Üzerindeki x-yönlü Elektrik Alan
E_{ya}	Yarık Üzerindeki y-yönlü Elektrik Alan
N	Birim Hücre Sayısı
p	Periyot
\hat{a}_θ	Theta Yönünde Birim Vektör
\hat{a}_ϕ	Phi Yönünde Birim Vektör
\hat{a}_x	x-yönünde Birim Vektör

A	Birim Hücre Yansıma Katsayısı Genliği
$\varphi(m, n)$	(m,n) Koordinatlı Birim Hücre Yansıma Katsayısı Faz Değeri
x_n	n. Parçacığın Konumu
v_n	n. Parçacığın Hızı
p_e^n	n. Parçacık için Şimdiye Kadar Elde Edilen En İyi Değer
g_e^n	Tüm Parçacıklar İçerisinde Elde Edilen En İyi Değer
w_e	Eylemsizlik Ağırlık Katsayısı

Kısaltmalar

RADAR	Radyo Tespit Etme ve Mesafe Belirleme
RKA	RADAR Kesit Alanı
RSM	RADAR Soğurucu Malzeme
ÇSHÇKY	Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
EM	Elektromanyetik
ENZ	Epsilon Sıfıra Yakın
FPGA	Alan Programlanabilir Kapı Dizisi
GA	Genetik Algoritma
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
TE	Enine Elektrik Alan
TM	Enine Manyetik Alan
PSA	Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması
dBsm	Desibel Metre-Kare
RL-GO	Işın Fırlatma – Geometrik Yöntemi
IE	İntegral Denklemi
VV	Dikey-Dikey
HH	Yatay-Yatay

SÖZLÜK DİZİNİ

Türkçe

İngilizce

Radyo Tespit ve Mesafe Belirleme

Radio Detection and Ranging (RADAR)

RADAR Kesit Alanı

RADAR Cross Sectional Area (RCS)

RADAR Soğurucu Malzeme

RADAR Absorbing Material (RAM)

Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi

Multilevel Fast Multipole Method
(MLFMM)

Ağ

Mesh

Hesaplama Açısından Pahalı/Maliyetli

Computationally Expensive

Kodlanmış

Coding

Metamalzeme

Metamaterial

Ters Besleme

Reverse Biasing

Tam-Dalga

Full-Wave

Metayüzey

Metasurface

Ayrıklaştırma

Discretization

Epsilon Sıfıra Yakın

Epsilon Near Zero (ENZ)

Etkin

Effective

Bit Durumu

State

Mono-statik

Mono-static

Bi-statik

Bi-static

Alan Programlanabilir Kapı Dizisi

Field Programmable Gate Array (FPGA)

Ayrık Fourier Dönüşümü

Discrete Fourier Transform (DFT)

Ters Ayrık Fourier Dönüşümü

Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)

Genetik Algoritma

Genetic Algorithm

Ters Hızlı Fourier Dönüşümü

Inverse Fast Fourier Transform

Evrişim Kuramı

Convolution Theorem

Saçılan Örüntü	Scattering Pattern
Enine Elektrik Alan	Transverse Electric (TE)
Enine Manyetik Alan	Transverse Magnetic (TM)
Eğik	Oblique
Yama Anten	Patch Antenna
RKA Azaltımı	RCS Reduction (RCSR)
Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması	Particle Swarm Optimization Algorithm (PSA)
Ayrık Su Döngüsü Algoritması	Discrete Water Cycle Algorithm
Dalga Biçimi Üretici	Waveform Generator
Manyetik Geçirgenlik	Permeability
Elektriksel Geçirgenlik	Permittivity
Çift Negatif	Double Negative (DNG)
Elektromanyetik Bant Aralığı	Electromagnetic Band Gap (EBG)
Mükemmel Elektrik İletken	Perfect Electric Conductor (PEC)
Birim Hücre	Unit Cell
Dikey Polarizasyon	Vertical Polarization (V-Pol)
Yatay Polarizasyon	Horizontal Polarization (H-Pol)
Desibel Metre-Kare	Decibel Meter-Square
Yayılan Alanın Yaklaşık Değerlendirmesi	Asymptotic Evaluation of Radiated Field
Açıklık Anten	Aperture Antennas
Durağan Fazlar Yöntemi	Method of Stationary Phase
Dalga Numarası	Wave-number
Işın Fırlatma – Geometrik Yöntemi	Ray Launching – Geometrical Optics
İntegral Denklemi	Integral Equation
Full-wave	Tam-dalga
Eylemsizlik Ağırlığı	Inertia Weight

Tekdüze Dağılımı

Uniform Distribution

Normal (Gauss) Dağılım

Normal (Gauss) Distribution

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Finite Element Method (FEM)

Alttaş

Substrate

Uzak Alan Saçılma Örüntüsü

Far Field Scattering Pattern

Artakalan Hata

Residual Error

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca uzak mesafelerden haberleşme daima önemini korumuştur. İlk başlarda duman ile başlayan, daha sonra posta güvercini ve ulak ile devam eden haberleşme ihtiyacı, 1840'lara doğru ilk telgraf sisteminin [1], 1895'li yıllarda ise kablosuz radyo haberleşmesinin [2] icadına yönlendirmiştir.

Kablosuz haberleşme temel anlamda bir verici, bir ortam ve bir alıcıdan oluşur. Bilgi ya da işaret iletimi elektromanyetik dalgalar ile verici sisteminden alıcı sistemine iletilir. Elektromanyetik dalga oluşumu teorik anlamda 4 ana denklem ile ifade edilebilir. Bu denklemler, Michael Faraday, Andre-Marie Ampere, Johann Carl Friedrich Gauss, Charles Augustin de Coulomb, Heinrich Lenz, Alessandro Volta, Heinrich Hertz gibi isimlerin katkıları ve James Clark Maxwell'in düzeltme terimi ile son halini almıştır [3].

Elektromanyetik dalga oluşum mekanizmasının anlaşılması, uygulama alanlarının sadece haberleşme sistemleri ile sınırlı kalmasını sağlamadı. 1903 yılında Alman fizikçi Christian Hulsmeyer sisli havada gemilerin çarpışmasını önlemek için basit bir gemi tespit cihazı geliştirdi. Böylece elektromanyetik dalga yardımıyla tespit sistemleri günlük hayatta kullanılmaya başlandı. 1930 yılında Lawrence A. Hyland, Albert H. Taylor uçakları tespit etmek amacıyla geliştirdikleri sistemin patentini aldılar. 1935'lere kadar elektromanyetik dalgalar yardımıyla hedef tespiti yapılması amacıyla gemilere, hava araçlarına entegre edilme denemeleri yapıldı. 1939 yılında Robert Watson Watt'ın girişimleri ile İngiltere'de radyo dalgaları ile yön bulma istasyonları savunma amacıyla kullanılmaya başlandı ve RADAR sistemleri tarihteki yerini almış oldu. A.B.D. Deniz Kuvvetleri tarafından türetilen RADAR kelimesi, İngilizce' de *Radio Detection and Ranging* kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. RADAR sistemleri, radyo dalgaları kullanarak hedef tespiti, teşhisi ve takibi sağlayabildiği gibi hava durumu tahmini ve yer yüzü şekillerinin çıkarılması durumunda da kullanılmaktadır [4, 5].

Bir RADAR sisteminin hedefi tespit, teşhis ve takip yapabilmesi için en önemli parametrelerden bir tanesi de hedefin radar kesit alanıdır (RKA). RKA, alıcı tarafta gerçek hedef tarafından saçılan güç yoğunluğuna, her yöne dağıldığında, eşit miktarda bir yoğunluk oluşturan güç miktarını tutan hayali bir alandır [3]. RKA, RADAR sisteminin alabileceği güç yoğunluğunu, dolayısıyla RADAR sisteminin performansını

etkilemektedir. Küçük RKA' ya sahip hedefler, daha kısa menzilden, büyük RKA' ya sahip hedefler daha uzun menzilden tespit edilmektedir. Bu yüzden RKA azaltımı özellikle askeri alanlarda kritik önem arz etmektedir.

RKA azaltım tekniklerinden bir tanesi de radar soğurucu malzemelerdir (RSM). Radar soğurucu malzemeler temel olarak saçılan elektromanyetik dalganın gücünü en aza indiren malzemelerdir. Elektromanyetik dalganın bir malzeme ile etkileşimi, gelen elektromanyetik dalganın özellikleri ile, malzemenin elektriksel parametreleri olarak ifade edilen dielektrik geçirgenliği, manyetik geçirgenliği ve iletkenliği ile de ilişkilidir. Farklı dielektrik, manyetik geçirgenlik değerlerine sahip malzemelerin özel yapılandırmaları ile bant genişliği yüksek, açısal kararlılığa sahip ve polarizasyon bağımsız RSM' ler elde edilebilir. Bununla birlikte, periyodik yapıları RSM' ler, metamalzemeler ile de aktif ve pasif olarak radar soğurması elde edilebilmektedir. Ancak özellikle askeri kullanım alanlarında bu malzemelerin tasarım, üretim ve uygulama bilgisi çoğu zaman gizli olmakta ve ihracat kısıtlarına bağlı olmaktadır [6].

Elektromanyetik olarak (elektriksel parametreler açısından) doğada bulunmayan malzemelere metamalzeme adı verilmektedir. Aynı anda dielektrik ve manyetik geçirgenliğin negatif olduğu bu malzemeler doğada bulunan malzemelere göre farklı elektromanyetik tepkiye sahiptir (örneğin, negatif kırılma indisi, geriye doğru dalga yayılımı vb.). İlk akademik çalışma olarak Sovyet fizikçi V. G. Veselago' nun *Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Sigma and Mu* adlı çalışması gösterilebilir [7]. 2000' lere doğru ise ilk deneysel uygulamalara J. B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins ve W.J. Stewart tarafından yayınlanan *Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena* [8] ve D.R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Naser ve S. Schultz tarafından yayınlanan *Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity* [9] örnek verilebilir.

Metamalzemeler, periyodik olarak birim hücrelerin yan yana getirilmesi ile oluşabileceği gibi, periyodik olmayacak şekilde birim hücrelerin yan yana getirilmesi ile de oluşabilir. Potansiyel uygulama alanları olarak; süper lens sistemleri, lazer sistemleri, güneş enerji uygulamaları, anten uygulamaları, görünmezlik uygulamaları, soğurucu uygulamaları ve hologram gibi uygulama alanları verilebilir [10]. Metamalzeme tasarımlarından birisi de kodlanmış metamalzemelerdir. Kodlanması farklı genlik ya da faz tepkilerine sahip birim

hücrelerin optimizasyona bağlı olarak ya da rasgele dizilimi ile elde edildiği anlamına gelmektedir. Uygun birim hücreler elde edildiği takdirde anormal yansıma, dağıtıcı saçılma, frekans kaydırma, harmonik yönlendirme, polarizasyon kontrolü, odaklama yapabilen, girdap şeklinde dalga oluşturabilen veya RKA azaltıcı malzemeler elde edilebilir [11]. Kodlanmış metamalzemelerin avantajlarına, tasarım aşamasında bant genişliğinin belirlenebilmesi, polarizasyon bağımlı ya da bağımsız tasarıma olanak vermesi, açısız elektromanyetik dalga gelişlerinde kararlı yapılara ulaşılabilmesi örnek olarak verilebilir.

Bu tezin amacı, kodlanmış metamalzeme tasarımı gerçekleştirerek geniş frekans aralığında (C-X-Ku), açısız olarak kararlı ve doğrusal polarizasyon bağımsız bir RADAR soğurucu malzeme tasarlamaktır. Farklı birim hücre yapısı ve yeni bir metamalzeme tasarımı en önemli çıktılar arasındadır. Ülkemizin RADAR soğurucu malzeme alanındaki yeteneklerine bir yenisini katmak, kodlanmış metamalzeme tasarımlarına dikkat çekmek, özellikle düşük görünürlüklü hava, deniz ve kara araçları tasarımında kullanılabilirliğini göstermek, literatüre yeni tasarımlarla girdi yapmak amacıyla çalışmalar yürütülmüştür.

Bu tez kapsamında, öncelikle C-X-Ku frekans bantlarını içerecek şekilde, yaklaşık olarak, yansıma katsayısı genlik değeri 1 olan ancak faz tepkileri arasında 180° faz farkı olan birim hücre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzeme olarak elektronik ekipmanlarda sıkça kullanılan düşük profil, FR-4 malzemesi ($\epsilon_r = 4.3, \tan\delta_e = 0.025$) ve RO4725JXR ($\epsilon_r = 2.64, \tan\delta_e = 0.0026$) seçilmiştir. Daha sonra parçacık sürü optimizasyon algoritması uygulanmış, algoritmanın hız parametresi üzerinde en iyi kodlanmış metamalzeme bulmak amacıyla bazı güncellemeler yapılmıştır. Optimizasyon algoritmasının hızlı çalışabilmesi, birçok farklı kodlanmış metamalzemenin uzak alan saçılma örüntüsünün elde edilmesi, kodlanmış metamalzemenin elektriksel uzunluğu ve binlerce ağ yapısı dikkate alındığında (hesaplama açısından maliyetli), benzetim çalışmalarının kısa sürmesi amacıyla, uzak alan saçılma örüntüsü denklemleri eğik gelen elektromanyetik dalgada hesaba katılarak MATLAB ortamında uygulanmış, en uygun metamalzemenin elde edilmesi amaçlanmıştır. Uzak alan saçılma formülü yardımıyla elde edilen metamalzeme daha sonra Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi (ÇSHÇKY) ile 3B elektromanyetik yazılımlarda radar kesit alanı benzetim çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra elde edilen metamalzeme üretimi yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Kodlanmış metamalzemeler ile ilgili yapılan çalışmalar **1.1. Literatür Özeti** başlığı altında verilmiştir.

1.1. Literatür Özeti

2010 yılında yayımlanan *Diffuse Reflections by Randomly Gradient Index Metamaterials* adlı çalışmada ince düzlemsel metamalzemenin rasgele dağıtılan, artan kırınım indisine göre metalik kaplama yapılarak 2B yakın alan ölçümü ile performansının karşılaştırılmış ve RKA azaltımı sağladığı belirtilmiştir. Çalışma değişen parametrelere göre kırınım indisi değişimi baz alınarak hazırlanmış [12].

2011 yılında yayımlanan *Analysis of a Gradient Index Metamaterial Blazed Diffraction Grating* adlı çalışmada, doğrusal bir şekilde artan kırınım indisinin bir kırınım ızgarası (metamalzeme) adı verilen çok katmanlı yüzey üzerindeki davranışı ve malzeme kaybı ile empedans eşlenmemesi durumundaki davranışı incelenmiş. Bu çalışma birim hücrenin parametrelerinin kademeli olarak değiştirilmesi açısından önemlidir [13].

2012 yılında *Gradient-Index Meta-Surfaces As a Bridge Linking Propagating Waves and Surface Waves* adlı çalışma, periyodik birim hücreler yardımıyla oluşturulan metamalzemenin belirli bir açıdan daha küçük gelen EM dalga durumunda yansıtıcı, daha büyük gelen EM dalga durumunda ise yüzey dalgalara çevirici bir malzeme tasarımı ile ilgilidir. Çalışmada, düzlem dalgadan yüzey dalgasına çevrim durumu neredeyse %100 verimde çalıştığından bahsedilmiştir. Deneysel sonuçlar ve tam-dalga sonuçları birbirleriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Düzlem dalgadan yüzey dalgasına çevrimin düzlemsel yüzeylerde olduğu belirtilmiştir [14].

2013 yılında yayımlanan, *A Tunable Metamaterial Absorber Using Varactor Diodes* adlı çalışmada, polarizasyon bağımsız, iki birim hücre arası diyot ile ayarlanabilen metamalzeme soğurucunun tasarımı, analizi ve ölçüm sonuçları incelenmiş. Birim hücre geniş frekans bantında ve geniş açısında incelenmiş ve iyi bir soğurucu olduğu gözlemlenmiştir. Diyotun ters besleme özelliğinden faydalanarak, birim hücrenin soğurucu frekansı ayarlanabileceği belirtilmiştir [15].

2014 yılında yayımlanan, *Wideband Radar Cross Section Reduction Using Two-Dimensional Phase Gradient Metasurfaces* adlı çalışmada, faz değişimi baz alınarak hazırlanan metayüzey tabanlı yapay yüzeyin, gelen düzlem dalgayı farklı yönlere yansıtılabildiğinden/kırabildiğinden bahsedilmiştir. Böylece 2B yapı kullanılarak geniş frekans bantında RKA azaltımı yapılabildiğinden bahsedilmiştir ve gelen dalgayı yüzey dalgasına dönüştürebildiğinden bahsedilmiştir. Metayüzey, belirli bir açının altında gelen dalgayı yansıtırken, belirli bir açının üstünde gelen dalgayı yüzey dalgasına dönüştürerek geniş frekans bantında, polarizasyon bağımsız, yüksek verimli RKA azaltımı yapabildiğinden bahsedilmiştir. Metayüzey, birim hücrenin sabit faz değişimine göre sıralandığı bir şekilde oluşturulmuş [16]. Bir diğer çalışma olan, *Digital Metamaterials* adlı çalışmada, dijital elektronikte kullanılan ayırıklaştırma yöntemi (0 ve 1 ile oluşturulan bilgi, sinyal vb.) ile elektrik/manyetik alanı oluşturan, istenilen dielektrik/manyetik geçirgenlik değeri elde edilebilen, dijital metamatizeme arasındaki bağlantı anlatılmış. Çalışmada optik uygulamalardan, dijital lenslerden, ENZ ile elektromanyetik dalga tünelleme uygulamalardan bahsedilmiştir. Öncelikle farklı dielektrik/manyetik özelliklere sahip malzemeler birim hücre olarak metamatizeme oluşturulma aşamasında kullanılmış ve saçılma sonuçları ele alınmıştır. Daha sonra bu metamatizemelerin etkin dielektrik geçirgenlik değerleri elde edilerek, saçılma sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbirini doğruladığı belirtilmiştir [17]. Bir diğer çalışma olan, *Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials* adlı çalışmada, 0° ve 180° faz tepkileri oluşturan 1 bit' lik ve 0°, 90°, 180° ve 270° faz tepkilerinde oluşan 2 bit' lik birim hücre kullanılarak RKA azaltımı yapabilen kodlanmış metamatizeme tasarımı verilmiştir. Bit durumları birim hücrenin üst metal katmanının boyutlarına göre belirlenmiştir. Farklı birim hücre dizilişleri kullanılarak (kodlanarak) farklı bi-statik RKA uzak – alan saçılması (örüntüsü) elde edilmiştir ve böylece RKA'nın ne kadar azaltıldığı gösterilmiştir. Ayrıca yeni bir birim hücre yapısı ve diyot kullanılarak ve FPGA yardımı ile kontrol ederek programlanabilir metamatizeme oluşturulmuş ve RKA azaltımı simülasyon yapılarak ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış [18].

2015 yılında, *Ultrawideband and High-Efficiency Linear Polarization Converter Based on Double V-Shaped Metasurface* adlı çalışmada, çift katmanlı V-Şekilli, doğrusal polarizasyonlu dalgayı çapraz polarizasyona çevirebilen bant genişliği yüksek bir metamatizemeden bahsedilmiştir. Geniş bant soğurmayı elde edebilmek için toplamda 4

elektromanyetik rezonans bölgesi yakalanmış. Yaklaşık olarak 12.4 GHz ile 27.96 GHz arasında, polarizasyon çevirme oranı %90 olarak verilmiş. Bu çalışmanın en önemli yanlarından bir tanesi de 0 – 40° arası eğik gelen elektromanyetik dalga açısında kararlı bir yapıya sahip olmasıdır [19].

2016 yılında yayımlanan, *Information Entropy of Coding Metasurface* adlı çalışmada, metamalzeme tasarımı, bilgi entropisi açısından incelenerek metamalzemenin uzak alan verisi ile kodlanmış yüzeyin birbirleri arasındaki analitik bağlantısı sağlanmış. Çalışmada, geometrik entropinin (kodlanmış meta yüzey) Ayrık Fourier Dönüşümü alınarak fiziksel entropi (uzak alan sonucu) elde edilmesinin yöntemi verilmiş. Böylece tasarım aşamasında kodlanmış metamalzemedeki uzak alan sonucu elde edilebileceği gösterilmiş. Bilgi entropisi yöntemi ile elde edilen uzak alan sonucu, tam-dalga simülasyon ile elde edilen uzak alan sonucu ve ölçüm sonucu verilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu vurgulanmış [20]. Bir diğer çalışma olan, *A Programmable Metasurface with Dynamic Polarization, Scattering and Focusing Control* adlı çalışmada, programlanabilir (FPGA yardımıyla) birim hücre kullanılarak dinamik (aktif) polarizasyon kontrolü, saçılma kontrolü ve hüzme yönlendirme gibi fonksiyonlar araştırılmış. Bir dikdörtgenel yama anten yapısına benzer bir tasarımla hazırlanan birim hücrede besleme yapıldığında diyot yardımıyla üstte bulunan birim hücrenin indüktans değeri ayarlanarak 1 bit' lik metayüzey oluşturulmuş. Böylece saçılan dalganın polarizasyonu değiştirilerek RKA azaltımı yapılmış. Saçılma durumu hem düzlem dalga hem de noktasal kaynak açısından incelenmiş. Böylece düzlem dalga ile RKA sonuçları araştırılırken, noktasal kaynak ile noktasal kaynak sabit iken huzme yönlendirme, huzmeyi eşit kazançlı huzmelere bölme gibi durumlar araştırılmış. Ayrıca metamalzemedeki kullanılan birim hücre sayısı arttıkça genetik algorithmada (GA)' da yavaşlama tespit edildiği için Ters Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak algoritmanın hızlandırıldığı çalışmada belirtilmiş. Benzetim sonucunda çıkan sonuçlar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmış [21]. Bir diğer çalışma olan, *Convolution Operations on Coding Metasurface to Reach Flexible and Continuous Controls of Terahertz Beams* adlı çalışmada, kodlanmış metamalzemelerin dijital kodlarla fiziksel metamalzemeler arasında bir köprü oluşturduğundan bahsedilmiş. Evrişim kuramı kullanılarak saçılan örüntüyü belirli bir açıya doğru yönlendirme çalışması yapılmış. Birim hücrenin olabildiğince sabit yansıma büyüklüğüne sahip olduğu ve kodlanmış yüzeyin iki farklı

kodlanmış yüzey matrisi ile elde edildiğinden bahsedilmiş [22]. Bir diğer çalışma olan, *An Ultra-Wideband and Polarization-Independent Metasurface for RCS Reduction*, adlı çalışmada, ultra geniş frekans bantında (6-18 GHz) ve polarizasyon bağımsız (TE ve TM) 3 bit' lik birim hücrelerden oluşan metamalzeme ile RKA azaltımı yapılmış. RKA azaltımı yansıyan dalgayı çapraz polarizasyona çevirerek sağlanmış. 8 farklı birim hücre konfigürasyonu geometrik değişiklikler ve birim hücrenin üst katmanın döndürülmesi ile elde edilmiş. Hem dik gelen elektromanyetik dalga geliş açısında hem de eğik elektromanyetik dalga geliş açılarında (30°' ye kadar) sonuçlar incelenmiş, simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiş [23]. *Combining the Absorptive and Radiative Loss in Metasurfaces for Multi-Spectral Shaping of the Electromagnetic Scattering* adlı çalışmada, birden fazla frekans bantında RKA azaltımı yapılması hedeflenmiş. Hem yama anten şeklinde birim hücre hem de halka şeklinde birim hücre kullanılarak süper birim hücre oluşturulmuş ve böylece 45°' ye kadar eğik gelen elektromanyetik dalga geliş açısında kararlı bir RKA azaltımına ulaşılmış. S-Band, X-Band ve Ku-Band bölgesinde RKA azaltımı gerçekleştirilmiş [24].

2017 yılında, *Random Combinatorial Gradient Metasurface for Broadband, Wide Angle and Polarization Independent Diffusion Scattering* adlı çalışmada, geniş frekans bantında, geniş açılı ve polarizasyon bağımsız metamalzeme tasarımı üzerine yoğunlaşmış. Çalışma birim hücrelerin faz tepkilerine göre belirli bir dizi halinde sıralanması ile metamalzeme tasarımını ve ölçümünü içermektedir. Çalışmada, metamalzemenin RKA azaltımı farklı geliş açılarında incelenip tutarlı sonuçlar elde edilmiş ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmış [25]. Bir diğer çalışma olan, *A Metasurface Composed of 3-Bit Coding Linear Polarization Conversion Elements and Its Application to RCS reduction of Patch Antenna* adlı çalışmada, 3 bit' lik kodlama yapılarak polarizasyon değiştiren metamalzeme ile radar kesit alanı azaltımı yapılmış. RKA azaltımı uygulaması bir yama antene uygulanarak yama antenin kazancı büyük oranda sabit kalırken radar kesit alanı azaltılmış. Aynı zamanda antenler üretilmiş ve simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları doğrulanmış [26]. *Broadband RCS Reduction Based on Spiral-Coded Metasurface* adlı çalışmada, geniş bant RKA azaltımına ulaşmak için öncelikle 6 farklı birim hücre yardımıyla süper birim hücreler oluşturulmuş daha sonra bu yapıların farklı dizilimleri yardımıyla 8 farklı süper hücre oluşturulup, süper hücrelerin spiral şeklinde dizilmesi ile 8 x 8' lik metamalzeme tasarımı gerçekleştirilmiş. 12.2 – 23.4

GHz bantında en az 10 dB RKA azaltımı hem simülasyon sonuçları hem de ölçüm sonuçları ile gösterilmiş. Ayrıca düzenli dizilimle spiral dizilim karşılaştırılmış. Böylelikle bu yöntem hiçbir optimizasyon metoduna gerek kalmadan geniş bantlı, polarizasyon bağımsız, eğik elektromanyetik dalga geliş açısına sahip (60° 'ye kadar) ve kolay üretilebilen özellikleri ile öne çıktığı belirtilmiş [27]. *Wide Incidence Angle-Insensitive Metamaterial Absorber for Both TE and TM Polarization Using Eight-Circular Sector* adlı çalışmada ise, eğik gelen elektromanyetik dalganın dairesel 8 eşit sektörlü birim hücre yapısı kullanılarak davranışı incelenmiş. Simetrik geometriden dolayı metalmalzemelerin normal elektromanyetik dalga geliş açısında (0°) TE ve TM polarizasyonda aynı soğurma değerleri elde edildiğinden bahsedilmiş. Ancak eğik gelen elektromanyetik dalga geliş açısında polarizasyondan dolayı farklı soğurma değerleri elde edildiğinden bahsedilmiş. Tam-dalga simülasyonu ile ölçüm sonuçları karşılaştırılmış. 70° 'ye kadar eğik gelen elektromanyetik dalga durumunda %90 oranlarında soğurma elde edilmiş [28]. *Novel Technique for Enhancing RCS Reduction Bandwidth of Checkerboard Surfaces*, adlı çalışmada ise dama tahtası görünümünde, RKA azaltımı yapan bant genişliği yüksek bir metalmalzeme tasarımından bahsedilmiş. Çalışmaya göre literatürde bulunan metalmalzemelere göre %8 oranında daha fazla bant genişliği elde edilmiş [29]. *RCS Reduction for Grazing Incidence Based on Coding Metasurface* adlı çalışmada, eğik gelen elektromanyetik dalganın RKA azaltımı üzerinde durulmuş. Birbirinden farklı faz tepkilerine sahip 2 birim hücre kullanılarak 7×7 ' lik bir metalmalzeme kullanılmış. Parçacık Sürü Algoritması kullanılarak kodlanmış metalmalzeme optimize edilmiş. 6 – 13 GHz bantında RKA azaltımı yapılan çalışmada 40° ' ye kadar varan eğik elektromanyetik dalga geliş açısında başarılı sonuçlar elde edilmiş [30].

2018 yılında, *Broadband Wide-Angle Polarization-Independent Diffusion Using Parabolic-Phase Metasurface* adlı çalışmada, parabolik faz dizilimli (merkezden dışa doğru faz tepkisi artan ya da azalan) geniş frekans bantlı, polarizasyon bağımsız RKA azaltımı yapan bir metalmalzeme üzerinde durulmuş. 6 – 18 GHz bantında 1 bit birim hücre kullanılarak oluşturulan metalmalzemelerin teorik, benzetim ve ölçüm sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu belirtilmiş. 60° ' ye kadar eğik gelen elektromanyetik dalga geliş açısında RKA azaltımı yapılabildiğinden bahsedilmiş [31]. *Meta-Dome for Broadband Radar Absorbing Structure* adlı çalışmada, 4.6 – 12 GHz bantında metalmalzeme ile metalmalzemelerin üst katmanına ayrıca dielektrik malzeme eklenerek metalmalzemelerin

çevresel şartlardan korunmasını sağlayan radar soğurucu yapı incelenmiş. Eğik açılı gelen elektromanyetik dalga durumunda 60° ye kadar sonuçlar alınmış ve tam-dalga simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış. Ayrıca metamalzeme hem üst katmanda dielektrik malzeme varken hem de dielektrik malzeme yokken sonuçları alınmış ve çalışmaya dahil edilmiş [32]. *Uneven-Layered Coding Metamaterial Tile for Ultra-Wideband RCS Reduction and Diffuse Scattering* adlı çalışmada, RKA azaltımı yapan kodlanmış metamalzemedен bahsedilmiş. Ultra geniş frekans bantında soğurma için birim hücre arasındaki faz farkı $180^\circ \mp 37^\circ$ olarak seçilmiş. Birim hücrelerle oluşturulan 14×14 lük matris 90° döndürülmesiyle 0 ve 1 durumları elde edilen daha büyük birim hücreler tasarlanmış. Normal elektromanyetik dalga geliş açısında 6.2 – 25.7 GHz arasında en az 10 dB RKA azaltımı sağlanmış. Benzetim sonuçları ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiş [33].

2019 yılında, *4-Bit Optimized Coding Metasurface for Wideband RCS Reduction* adlı çalışmada, 22.5° 'lik faz farkı oluşturan 16 birim hücre yapısı kullanılarak normal elektromanyetik geliş açısında (0°) polarizasyon bağımsız, geniş frekans bantında çalışan radar soğurucu metamalzeme tasarımı verilmiş. Tek bir parametre değiştirilerek belirlenen frekans bantında yansıma katsayısı genliği mümkün olduğunca sabit kalması, faz tepkisinin ise kademeli olarak değişmesi sağlanmış. Rastgele kodlanmış metamalzeme yüzeyi kullanılarak optimize edilen radar soğurucu malzemenin benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiş [34]. *Small-Size Broadband Coding Metasurface for RCS Reduction Based on Particle Swarm Optimization Algorithm* adlı çalışmada ise, RKA azaltımı için en uygun kodlanmış metamalzeme elde etmek üzere PSA kullanılmış. 1 bit birim hücre kullanılarak metamalzeme optimize edilmiş. Çalışmada sadece dikey polarize elektromanyetik dalga için sonuçlar verilmiş ve 15 – 35 GHz bantında en az 10 dB RKA azaltımı yakalanmış [35].

2020 yılında, *Design of An Ultra Wideband Polarization Insensitive and Wide Angle Metasurface Absorber Based on Resistive Ink* adlı çalışma, tek katmanlı, ultra geniş frekans bantlı, polarizasyon bağımsız ve geniş açılı metamalzeme tabanlı mürekkep ile oluşturulmuş periyodik yapı radar soğurucu yapı ile ilgilidir. Birim hücre boyutları 8.71 – 17.387 GHz frekans bantında soğurma elde edebilmek için optimize edilmiş. Normal elektromanyetik dalga geliş açısında 20 dB RKA azaltımı elde edilirken, 7 – 20 GHz

bantında 10 dB RKA azaltımı elde edilmiş. Polarizasyon bağımsız ve 50°'ye kadar eğik gelen elektromanyetik dalga için RKA azaltımı yapılabildiğinden bahsedilmiş [36].

2021 yılında, *Frequency Coding All-Dielectric Metasurface for Flexible Control of Electromagnetic Radiation* adlı çalışmada, birim hücreler yardımıyla metamalzeme kodlanması ve RKA azaltımından bahsedilmiş. Sonuçlar hem teorik hem de benzetim olarak karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiş [37].

Yukarıda bahsedilen çalışmalar ve bu çalışmalarda bahsedilen atıflar incelendiğinde, şu çıkarımlara varılabilir;

- Kodlanmış metamalzeme ile ilgili çalışmalarda kullanılan birim hücre yapısı üst katman (şekil içeren metalik yapı), orta katman (dielektrik malzeme) ve alt katman (tamamıyla metal)' dan oluşmaktadır.
- Birim hücre modeli, (birim hücrenin en üst katmanı) çalışmalarda birbirinden farklıdır. Birim hücreler genel olarak iki farklı tasarım üzerinden ilerlemiştir. Pasif birim hücre tasarımlarında, faz tepkisi değişimi birim hücrenin geometrisi (veya modeli) değiştirilerek elde edilmiştir. Aktif birim hücre tasarımında ise faz tepkisi değişimi elektronik devre yardımıyla, birim hücre geometrisinde (veya modelinde) bir değişiklik yapmadan elde edilmiştir.
- Çalışmalarda çoğunlukla satır ve sütunda aynı sayıda birim hücre kullanılarak ($N \times N$), kodlanmış metamalzeme tasarımı yapılmıştır. Satır ve sütunda farklı sayıda birim hücre kullanılmış ($M \times N$) çalışmalarda mevcuttur.
- Çalışmalarda çoğunlukla polarizasyon bağımsız ve eğik gelen elektromanyetik dalga durumları incelenmiştir.
- Çalışmalarda çoğunlukla GA kullanılmış, bunun yanında Ayırık Su Döngüsü Algoritması, PSA gibi farklı algoritmalarda metamalzeme yüzey tasarımı için kullanılmıştır.

Literatür araştırması sonucunda elde edilen veriler kullanılarak tez çalışmasının kapsamı belirlenmiştir. Tezin bu aşamadan sonraki bölümleri ise şu şekilde verilebilir.

2.Bölüm' de RADAR ve RKA özelinde bilgi verilmiş ve ilgili formüller paylaşılmıştır. RKA azaltım teknikleri, RADAR soğurucu yapılar, metamalzeme ve kodlanmış metamalzeme hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

3.Bölüm' de uzak alan saçılma örüntüsü hakkında detaylı bilgi verilmiş ve MATLAB ortamında kullanılan formüller özetlenmiştir. Ayrıca bu bölümde parçacık sürü optimizasyonu çalışma yapısı verilmiş, tez kapsamında uygulanan optimizasyon yöntemi detaylıca açıklanmıştır.

4.Bölüm' de birim hücre tasarımı ile ilgili bilgi verilmiş, en iyi sonuca ulaşılan birim hücre boyutları, tek katmanlı ve iki katmanlı birim hücrelerin optimizasyon süreçlerinde elde edilen veriler sunulmuştur. Kodlanmış metamalzeme tasarımında elde edilen veriler ve RKA azaltan metamalzeme tasarımının MATLAB çıktıları ve 3B elektromanyetik yazılımlarda elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

5.Bölüm' de benzetim çalışmaları yapılan kodlanmış metamalzemenin üretimi ile ilgili bilgiler ve ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir.

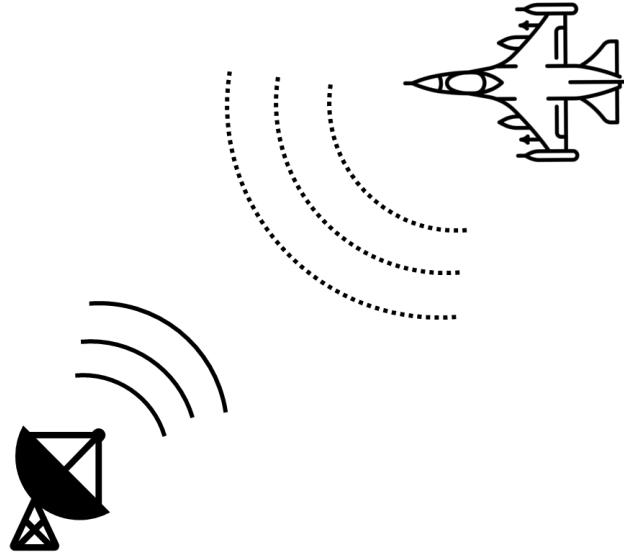
6.Bölüm' de elde edilen sonuçlar ile ilgili değerlendirmeler verilmiş, yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. RADAR SOĞURMADA KULLANILAN YÖNTEMLER VE METAMALZEME

RADAR soğurmada kullanılan yöntemler RADAR sisteminin göndermiş olduğu elektromanyetik dalganın özelliklerine ve RADAR Kesit Alanı (RKA)' na bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

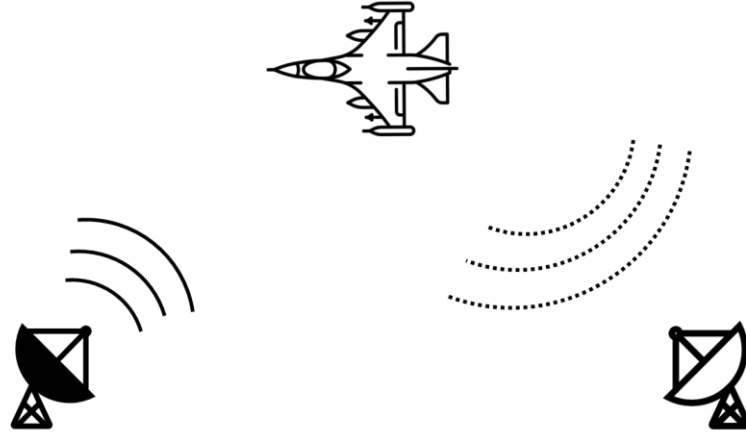
2.1. RADAR ve RADAR Kesit Alanı

RADAR bir objeden (hedeften) yansıyan elektromanyetik sinyalleri saptayan bir elektromanyetik sensör olarak tanımlanabilir. Çalışma prensibi kısaca şöyle özetlenebilir. Dalga biçimi üretici ile oluşturulan sinyal anten vasıtasıyla elektromanyetik dalgaya dönüştürülür. Oluşan elektromanyetik dalga havada yayılır ve bir hedefe çarpar. Çarpan sinyal, hedeften yansır ve yansıyan sinyal anten vasıtası ile RADAR sistemi tarafından işlenerek tespit, teşhis ve takip yapılır. Mono-statik RADAR sisteminde, aynı anten hem verici olarak hem de alıcı olarak çalışır. Şekil 2.1' de temsili görsel verilmiştir.



Şekil 2.1 Mono-statik RADAR üzerinde gönderilen ve alınan elektromanyetik dalga

Bi-statik RADAR sistemlerinde ise antenlerden bir tanesi verici, diğeri (ya da diğeri) alıcı olarak çalışır.



Şekil 2.2 Bi-statik RADAR üzerinde gönderilen ve alınan elektromanyetik dalga

RADAR menzil denklemini, bi-statik RADAR için incelediğimizde alınan güç şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_r = P_t \sigma \frac{G_t(\theta_t, \phi_t) G_r(\theta_r, \phi_r)}{4\pi} \left[\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2} \right]^2 |\hat{p}_t \cdot \hat{p}_r|^2 \quad (2.1)$$

(2.1) numaralı denklemde P_r alınan gücü, P_t verici gücü, σ radar kesit alanını, $G_t(\theta_t, \phi_t)$ açı cinsinden vericinin kazancını, $G_r(\theta_r, \phi_r)$ açı cinsinden alıcının kazancını, λ dalga boyunu, R_1 verici ile hedef arasındaki mesafeyi, R_2 alıcı ile hedef arasındaki mesafeyi, \hat{p}_t vericinin gönderdiği dalganın polarizasyon birim vektörünü, \hat{p}_r alıcının aldığı dalganın polarizasyon birim vektörünü ifade etmektedir. Mono-statik RADAR için, aynı anten sistemini kullandığından dolayı, $G_t(\theta_t, \phi_t)$ ve $G_r(\theta_r, \phi_r)$ ile R_1 ve R_2 birbirine eşittir. Mono-statik RADAR için mono-statik RKA, bi-statik RADAR için bi-statik RKA ifadesi kullanılır. RADAR kesit alanı, gelen dalganın frekansına, polarizasyonuna, hedefte bulunan malzemenin elektriksel özelliklerine ve gözlem açısı gibi pek çok parametreye bağlıdır [38-40].

(2.1) numaralı denklemde belirtildiği gibi alınan gücü belirleyen en önemli parametrelerden birisi de hedefin RADAR kesit alanıdır (RKA). RKA, alıcı tarafta gerçek hedef tarafından saçılan güç yoğunluğuna, her yöne dağıldığında, eşit miktarda bir yoğunluk oluşturan güç miktarını tutan alandır. Denklem olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{W_s}{W_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H^s|^2}{|H^i|^2} \quad (2.2)$$

(2.2) numaralı denklemde σ RADAR kesit alanını, W_s hedeften saçılan güç yoğunluğunu, W_i hedefe iletilen güç yoğunluğunu, R hedeften gözlem noktasına olan mesafeyi, E^i hedefe gelen elektrik alanı, H^i hedefe gelen manyetik alanı, E^s hedeften saçılan elektrik alanı, H^s hedeften saçılan manyetik alanı ifade etmektedir. Birimi metrekaaredir [3].

RADAR kesit alanını düşürmek amacıyla bazı yöntemler ve yapılar bulunmaktadır.

2.2. Şekillendirme

RADAR kesit alanı düşürülmek istenen hedefin, gelen elektromanyetik dalgayı belirli yönlere yönlendirmesi ve böylece mono-statik RKA özelinde belirli açılarda RKA azaltımı yapması hedeflenir. 5. nesil savaş uçakları, insansız hava aracı sistemleri, gemi platformları ve füzelerin dış yüzeyleri belirli açılarda RKA azaltımının en yüksek düzeye çıkması amacıyla şekillendirilmektedir. Böylece gelen elektromanyetik dalganın büyük çoğunluğu belirli açıya (ya da açılara) yönlendirilerek, kritik açılarda RKA azaltımı sağlanmaktadır. Şekil 2.3' te ve Şekil 2.4' te mono-statik RADAR kesit alanı azaltılması amacıyla şekillendirilen uçak ve füze örneği verilmiştir [41-43].



(a)



(b)

Şekil 2.3 RADAR kesit alanı azaltılmış TUSAŞ Milli Muharip Uçak [41] (a) ve ROKETSAN SOM füzesi [42] (b)



Şekil 2.4 RADAR kesit alanı azaltılmış ilk savaş uçağı F-117 Nighthawk [43]

2.3. RADAR Soğurucu Yapılar

RADAR kesit alanı düşürülmek istenen platformlar, RADAR soğurucu yapılar ile kaplanarak gelen elektromanyetik dalganın büyük çoğunluğunu soğurarak ya da daha az yansıtarak RKA azaltımında önemli rol oynamaktadır.

Gelen elektromanyetik dalgayı kaynak, havayı ya da ortamı iletim hattı ve hedefin üzerinde bulunan yapıları yük olarak sınıflandırdığımızda, devre kuramına benzer olacak şekilde, RKA' nın en aza düşürülmesi için dolayısıyla geri yansımanın en aza indirilmesi için güç transferinin maksimum olması gerekir [44]. Güç transferinin maksimum olabilmesi için iletim hattının (kaynağın empedansının sıfır olduğu varsayıldığında) empedansının yük empedansına eşit olması gerekir. Dolayısıyla, RKA' nın en düşük seviyeye gelebilmesi için, havanın empedans değeri ile hedefin empedans değerinin aynı olması gerekir. Havanın empedansı denklem (2.3)' de verilmiştir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

μ_0 boş uzay manyetik geçirgenliğini, ϵ_0 ise boş uzayın elektriksel geçirgenliğini ifade etmektedir. Değerleri sırasıyla, 1.2566×10^{-6} Henry/metre [45], 8.8542×10^{-12} Farad/metre [46]' dir. İletim hattı modelinde Γ yansıma katsayısını denklem (2.4) ile ifade edilebilir.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.4)$$

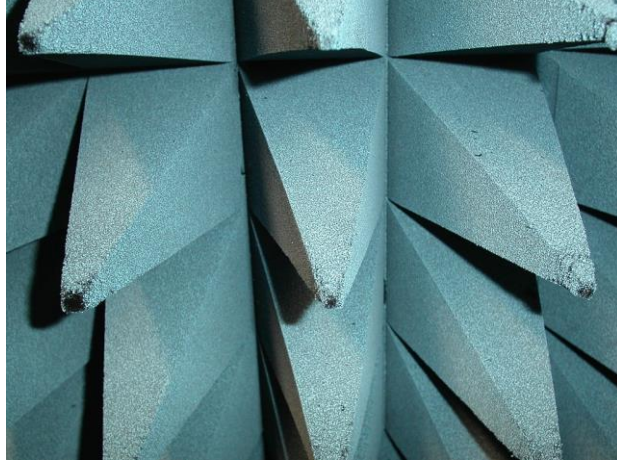
Z_L hedefin karakteristik empedansıdır ve denklem (2.5)' te verilmiştir. μ_r hedefin göreceli (bağıl) manyetik geçirgenliğini, ϵ_r ise hedefin göreceli (bağıl) elektriksel geçirgenliğini ifade etmektedir.

$$Z_L = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad (2.5)$$

Dolayısıyla RADAR soğurucu yapılarda, amaç ilgilenilen frekans bantı için Z_L ' i Z_0 ' a yaklaştırmaktır.

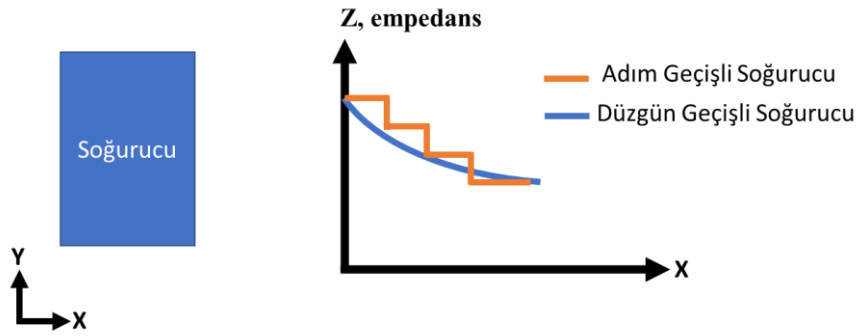
2.3.1. Kademeli Geçişli Empedans Eşlemeli Yapılar

Kademeli geçişli empedans eşlemeli yapılar, empedans değişiminin kademeli olduğu böylece RKA' nın azaltılmaya çalışıldığı yapılardır. Piramit tipinde soğurucular, piramit geometrik şekilde olup, gelen elektromanyetik dalganın bu yapıda soğurulmasını amaçlar. Şekil 2.5' te görseli verilmiştir [6, 47].



Şekil 2.5 Piramit soğurucu yapısı [47]

Konik yüklemeli soğurucular, konik yapıda olup kademeli şekilde empedansın arttığı bu sayede soğurmanın sağlandığı yapılardır. Şekil 2.6' da soğurucu yapısına göre empedans değişimi verilmiştir. Soğurucunun yapısına göre adımlı geçiş ya da düzgün geçişli yapı olabilir. Şekil 2.6' da, adımlı geçiş için 4 farklı empedansa sahip soğurucu kullanılmıştır [6].



Şekil 2.6 Adım geçişli ve düzgün geçişli soğurucu yapısının empedans değişimi grafiği

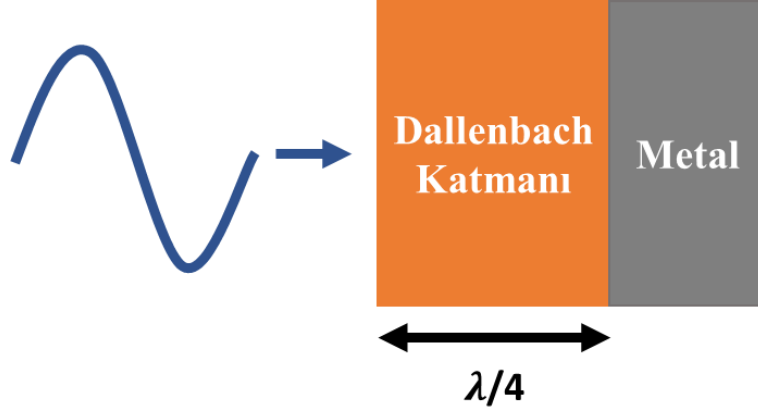
Eşleme katmanlı soğurucular ise, hava ile hedefin empedansı arasında ilgilenilen frekansa göre empedans değerinin iletim hattı modeline benzer şekilde oluşturulduğu soğuruculardır. Eşleme katmanının empedans değeri, denklem (2.6)' da verildiği gibi olmalıdır [6].

$$Z_{eşleme} = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (2.6)$$

2.3.2. Rezonans Yapılar

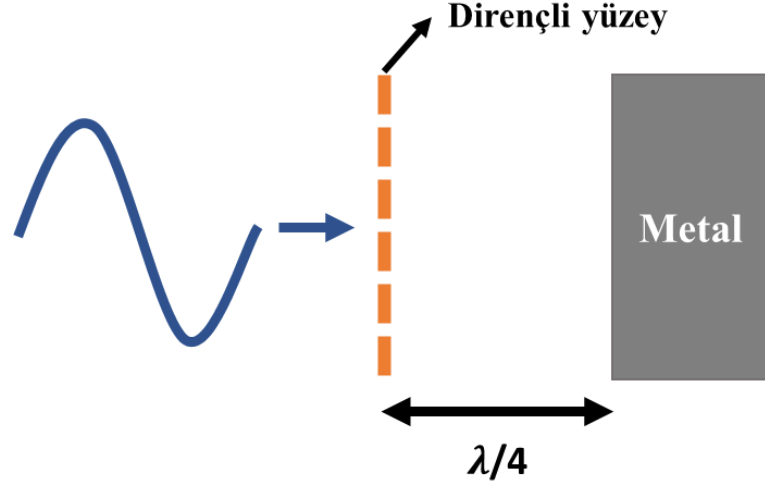
Rezonans yapılar, yüzeylerden yansıyan elektromanyetik dalganın fazlarının sönümlenmesini sağlayacak şekilde katmanların konumlandırılması prensibine dayanır. Bu yapılarda en alt katman metalik özelliktedir. Rezonans yapılar ayrıca çeyrek dalga boyu soğurucular da denir. Bu yapılar arasında Dallenbach Katman Soğurucu, Salisbury Ekranı ve Jaumann Katmanı örnek olarak verilebilir [6].

Dallenbach Katman Soğurucu, genellikle en alt katmanda metalik, üst katmanda ise $\lambda/4$ kalınlığında kayıplı bir malzeme konumlandırılması ile elde edilir. Kayıplı malzemenin elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerinin ilgilene frekansa göre ayarlanması gerekir. Şekil 2.7’ de Dallenbach Katman Soğurucu yapısı verilmiştir [6].



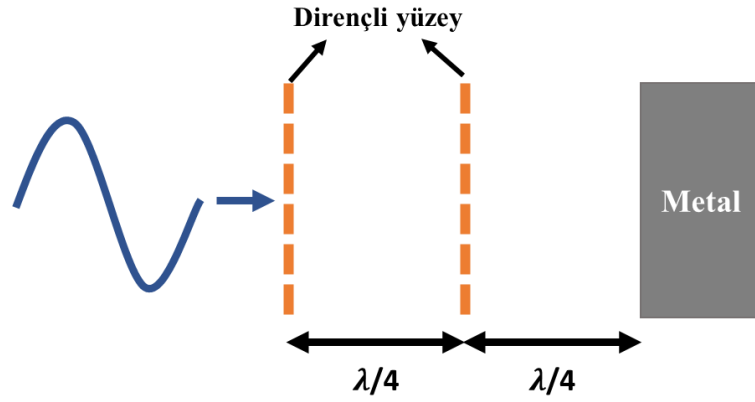
Şekil 2.7 Dallenbach Katman Soğurucu yapısı

Salisbury Ekranı, Dallenbach Katman Soğurucu yapısına benzer olacak şekilde alt katmanda metalik bir yapı bulundurur. Ancak kayıplı katman yerine Salisbury Ekran yapısında metalik yapı ile arasında $\lambda/4$ mesafe olacak şekilde yerleştirilen dirençli bir yüzey, bu yüzey ile metalik yapı arasında ise hava bulunur. Amaç faz sönümlenmesi yaparak geri yansımayı en aza indirmektir. Şekil 2.8’ de Salisbury Ekranı verilmiştir [6, 48].



Şekil 2.8 Salisbury Ekran yapısı

Jaumann Katmanı, Salisbury Ekranı yapısına benzer olacak şekilde bant genişliğini artırmak amacıyla katman yapısı artırılması ile elde edilir. Birden fazla kullanılan dirençli yüzey yapısı ile soğurulmak istenilen frekans sayısı artırılır, böylece bant genişliği artışı sağlanabilir. Şekil 2.9’ da Jaumann Katmanı yapısı verilmiştir [6, 49].

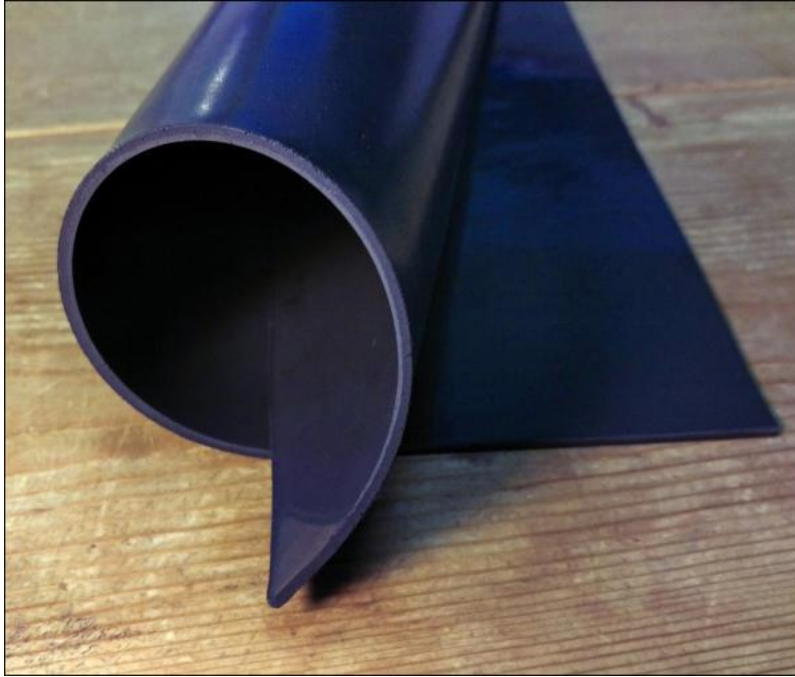


Şekil 2.9 Jaumann Katman yapısı

2.3.4. Manyetik Malzemeler

Manyetik malzemeler, içerisinde bulunan parçacıklar (demir vb.) yardımıyla gelen elektromanyetik dalganın malzeme içerisinde çoklu yansımaları ve bu sayede dalganın sönümlenmesini sağlayan malzemelerdir. İçerisinde bulunan parçacık boyutlarına göre ve malzeme kalınlığına göre soğurma sağlanır. Göreceli manyetik geçirgenlikleri 1’ den

farklı olduğu için bu şekilde isimlendirilirler. Şekil 2.10' da örnek bir manyetik malzeme tabanlı soğurucu verilmiştir [6, 50].



Şekil 2.10 Manyetik malzeme [50]

2.4. Metamalzeme

Terim olarak malzeme ötesi anlamına gelen metamalzeme, elektromanyetikte, elektriksel parametreler bakımından (göreceli elektriksel geçirgenlik ve göreceli manyetik geçirgenlik) doğada bulunmayan malzemelere denir. İlk çalışmalar 19. yy' ın sonlarını gösterse de ilk akademik çalışma V.G. Veselago' nun *Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Sigma and Mu* adlı çalışması gösterilir [7]. Veselago bu çalışmada aynı anda göreceli elektrik ve manyetik geçirgenliklerin negatif olduğu ortamda elektromanyetik dalgaların yayılımı üzerine çalışmıştır. Bu yüzden metamalzemeler Çift Negatif olarak da adlandırılabilir. 2000' lere doğru ise ilk deneysel uygulamalar yapılmaya başlanmıştır [8, 9].

Maxwell denklemleri diferansiyel formatta zaman bağımlı olarak denklem (2.7), (2.8), (2.9) ve (2.10)' da belirtildiği gibi yazılabilir [3, 51].

$$\nabla \times \vec{E}(x, y, z; t) = -\frac{\partial \vec{B}(x, y, z; t)}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{H}(x, y, z; t) = \vec{J}(x, y, z; t) + \frac{\partial \vec{D}(x, y, z; t)}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(x, y, z; t) = \rho_v \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(x, y, z; t) = 0 \quad (2.10)$$

Denklemlerde verilen \vec{E} elektrik alan şiddetini (birimi V/m), \vec{H} manyetik alan şiddetini (birimi H/m), \vec{D} elektrik akı yoğunluğunu (birimi Coulomb/m²), \vec{B} manyetik akı yoğunluğunu (birimi Weber/m² ya da Tesla), \vec{J} hacimsel elektrik akım yoğunluğunu (birimi Ampere/m²), ρ_v hacimsel yük yoğunluğunu (birimi Coulomb/m³) ifade etmektedir.

Denklem (2.7), (2.8), (2.9) ve (2.10) frekans uzayında $e^{j\omega t}$ ve x, y, z terimini saklı tutmak kaydıyla denklem (2.11), (2.12), (2.13) ve (2.14)' te belirtildiği gibi yazılabilir.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega \vec{D} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.14)$$

Boş uzayda elektrik alan şiddeti ile elektrik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasında denklem (2.15) ve (2.16)' da verilen bağıntı bulunmaktadır.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.15)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.16)$$

ϵ_0 boş uzay elektriksel geçirgenliği, μ_0 ise boş uzay manyetik geçirgenliği ifade etmektedir. Homojen, izotropik ve doğrusal bir ortamda bu bağıntı denklem (2.17) ve (2.18)' de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.17)$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (2.18)$$

Ortamda yayılan düzlem bir dalga için dalga denklemleri çözüldüğünde (kaynaktan çok uzakta olduğu durum için) Maxwell denklemleri denklem (2.19) ve denklem (2.20) gibi yazılabilir [3, 51].

$$\vec{k} \times \vec{E} = w \mu_r \mu_0 \vec{H} = w \mu \vec{H} \quad (2.19)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -w \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = -w \epsilon \vec{E} \quad (2.20)$$

Denklem (2.19) ve (2.20)' de belirtilen μ ve ϵ ifadeleri her iki değerinde pozitif olduğu durumları göstermektedir. Metamalzeme ortamında bu iki ifade negatif olacağı için Maxwell denklemleri denklem (2.21) ve (2.22) olarak yazılabilir [3, 7, 51].

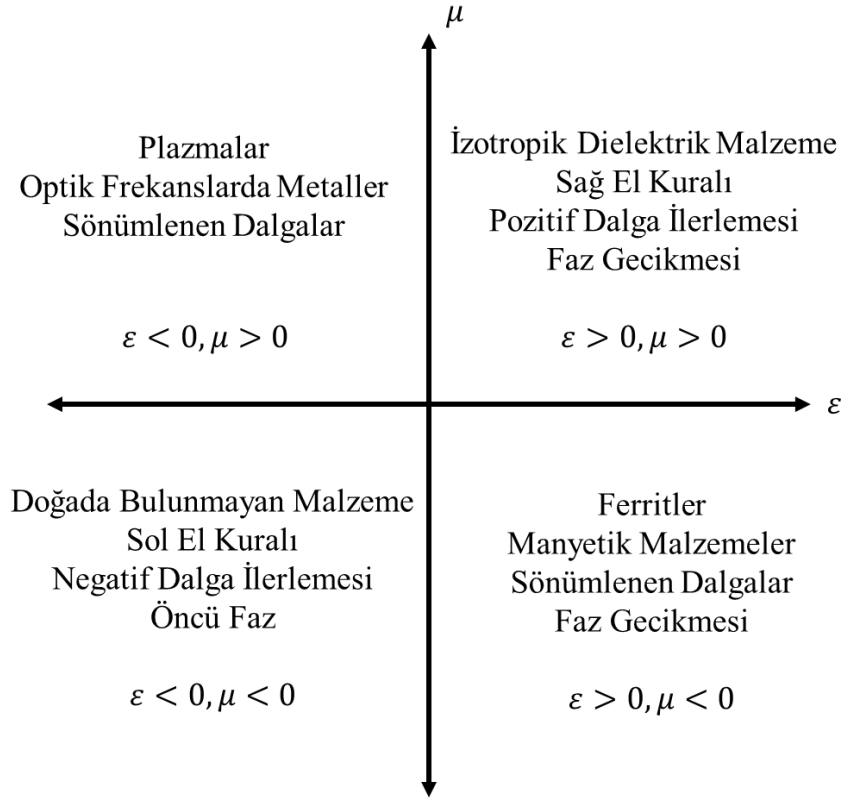
$$\vec{k} \times \vec{E} = -w \mu \vec{H} \quad (2.21)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = w \epsilon \vec{E} \quad (2.22)$$

Güç aktarımı, bir diğer ifade ile Poynting vektörü ise denklem (2.23)' deki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)' de de verildiği üzere güç aktarımı her iki parametrenin (μ ve ϵ) pozitif veya negatif olduğu durumda aynı yönde iken, dalga ilerlemesi μ ve ϵ pozitif olduğu durumda aynı yönlü (sağ el kuralı), μ ve ϵ negatif olduğu durumda zıt yönlü (sol el kuralı) olacaktır. Şekil 2.11' de bu durum özetlenmiştir.



Şekil 2.11 Elektriksel ve manyetik geçirgenliğe göre dalga ve malzeme özellikleri [3]

Metamalzemeler ile ilgili olarak birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Süperlens ve hiperlens uygulamaları [52], THz frekanslarında lazer ve hologram uygulamaları [53], enerji hasadı uygulamaları [54], anten ve akıllı yüzey uygulamaları [55, 56], görünmezlik ve yeniden şekillendirme uygulamaları [57-59] ve soğurucu uygulamaları [15, 16, 20, 22, 24, 26, 30, 33, 34, 60] gibi pek çok çalışma bulunmaktadır.

2.4.1. Kodlanmış Metamalzeme

Kodlanmış metamalzemeler, farklı genlik ya da faz tepkilerine sahip birim hücrelerin bir araya gelmesiyle oluşan elektromanyetik dalgayı soğurabilen, anormal hüzme yönlendirme yapabilen, polarizasyon değiştirebilen, odaklama yapabilen, frekans

kaydırabilen yapılardır. Elektromanyetik bant-aralığı olarak da isimlendirilir. Periyodik olarak birim hücrelerin bir araya getirilmesi ile oluştuğu gibi, periyodik olmayacak şekilde birim hücrelerin bir araya getirilmesi ile de oluşabilmektedir.

Bu tez kapsamında kodlanmış metamalzemelerin RKA azaltıcı olarak kullanımı hakkında bilgi verilecektir. RKA azaltımı, kodlanmış metamalzemenin RKA' sının aynı boyutlara sahip metalik bir yüzey RKA' sına oranının desibel (dB) cinsinden değeri olarak tanımlanabilir [61].

$$RKA \text{ Azaltımı} = 10 \log_{10} \left[\frac{\lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right]}{\lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|E^i|^2}{|E^i|^2} \right]} \right] \quad (2.24)$$

$$RKA \text{ Azaltımı} = 10 \log_{10} \left[\frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right] \quad (2.25)$$

Denklem (2.25) kodlanmış metamalzeme için, aynı oranda (yüzey alanı olarak oran alındığında) 2 farklı faz tepkisine sahip birim hücre kullanıldığı varsayıldığında, denklem (2.26)' ya yaklaştırılabilir.

$$RKA \text{ Azaltımı} = 10 \log_{10} \left[\frac{A_1 e^{j\phi_1} + A_2 e^{j\phi_2}}{2} \right]^2 \quad (2.26)$$

Denklem (2.26)' da verilen A_1 ve A_2 birim hücrelerin yansıma katsayısı genliklerini, ϕ_1 ve ϕ_2 ise birim hücrelerin yansıma katsayısı fazlarını belirtmektedir. İki birim hücrenin kodlanmış metamalzemedeki kapladıkları yüzey alanı yaklaşık olarak birbirlerinin aynısı ise toplam yansıma katsayısı, bu iki birim hücrenin aritmetik ortalamasının yansıma katsayısı olarak ifade edilebilir.

Denklem (2.26)' da $A_1 = A_2 = 1$ olarak alınıp sadeleştirmeye devam edilirse ve logaritma içerisinde sadece gerçek değer (sanal değerden arınmış) olması gerektiğinden hareketle ilerlenirse denklem (2.31) elde edilir.

$$\left| \frac{e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2}}{2} \right| = \left| \frac{\cos\phi_1 + j\sin\phi_1 + \cos\phi_2 + j\sin\phi_2}{2} \right| \quad (2.27)$$

$$= \left| \frac{\cos\phi_1 + \cos\phi_2 + j(\sin\phi_1 + \sin\phi_2)}{2} \right| \quad (2.28)$$

$$= \frac{\sqrt{(\cos\phi_1 + \cos\phi_2)^2 + (\sin\phi_1 + \sin\phi_2)^2}}{2} \quad (2.29)$$

$$= \frac{\sqrt{\cos^2\phi_1 + \cos^2\phi_2 + \sin^2\phi_1 + \sin^2\phi_2 + 2\cos\phi_1\cos\phi_2 + 2\sin\phi_1\sin\phi_2}}{2} \quad (2.30)$$

$$= \frac{\sqrt{1 + 1 + 2(\cos(\phi_1 - \phi_2))}}{2} \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)' i denklem (2.26)' da yer değiştirilirse denklem (2.33) elde edilir.

$$RKA \text{ Azaltımı} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{2 + 2(\cos(\phi_1 - \phi_2))}}{2} \right]^2 \quad (2.32)$$

$$= 10 \log_{10} \frac{1 + (\cos(\phi_1 - \phi_2))}{2} \quad (2.33)$$

Dolayısıyla, denklem (2.33) kullanılarak, gerekli olan birim hücreler arasındaki faz farkı bulunabilir. Örneğin -10 dB ve -20 dB RKA azaltımı için gerekli olan birim hücreler arasındaki faz farkı, sırasıyla, denklem (2.37) ve (2.41)' de verilmiştir. Denklem (2.37) ve (2.41)' e göre, en az 10 dB RKA azaltımı için iki birim hücre arasındaki faz farkının 143° ile 217° ya da -143° ile -217° (kosinüs fonksiyonu çift fonksiyon olduğu için) arasında olması, en az 20 dB RKA azaltımı için iki birim hücre arasındaki faz farkının 168° ile 192° ya da -168° ile -192° arasında olması gerekmektedir.

$$10 \log_{10} \frac{1 + (\cos(\phi_1 - \phi_2))}{2} = -10 \quad (2.34)$$

$$\left| \frac{1 + (\cos(\phi_1 - \phi_2))}{2} \right| = 0.1 \quad (2.35)$$

$$\cos(\phi_1 - \phi_2) = -0.8 \quad (2.36)$$

$$143^\circ (-143^\circ) = \phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi = 217^\circ (-217^\circ) \quad (2.37)$$

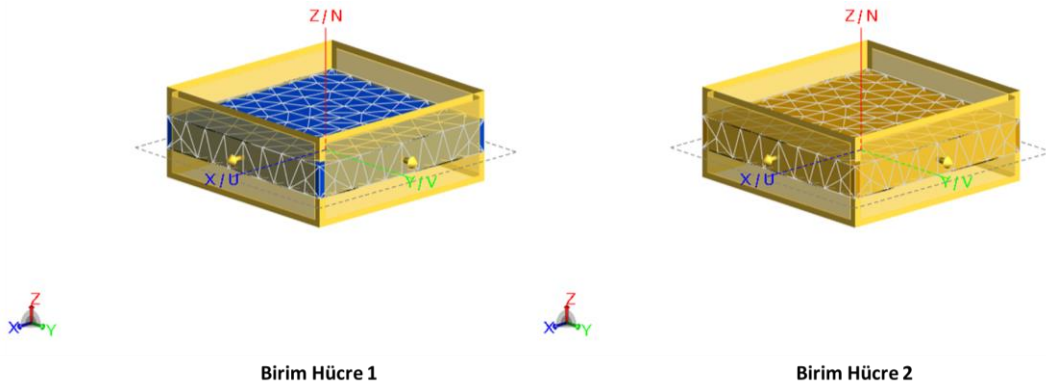
$$10 \log_{10} \frac{1 + (\cos(\phi_1 - \phi_2))}{2} = -20 \quad (2.38)$$

$$\left| \frac{1 + (\cos(\phi_1 - \phi_2))}{2} \right| = 0.01 \quad (2.39)$$

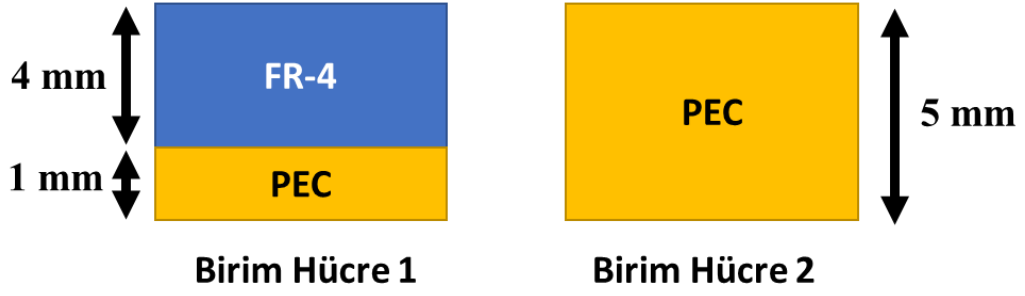
$$\cos(\phi_1 - \phi_2) = -0.98 \quad (2.40)$$

$$168^\circ (-168^\circ) = \phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi = 192^\circ (-192^\circ) \quad (2.41)$$

Denklemlerden elde edilen gerekli olan faz farkı değerlerinin doğrulanması amacıyla, 2 farklı birim hücrenin faz tepkisi incelenmiş ve Altair FEKO programında benzetim yapılmıştır. Birim Hücre 1 alt katman mükemmel elektrik iletken (PEC), üst katman FR-4 malzemesi ($\epsilon_r = 4.3, \tan\delta_e = 0.025$), Birim Hücre 2 ise tamamıyla mükemmel elektrik iletken olarak seçilmiştir. Birim hücre yapılandırmasının Altair FEKO programında modellenmesi ve kullanılan kalınlık bilgileri, sırasıyla, Şekil 2.12 ve Şekil 2.13' te verilmiştir.

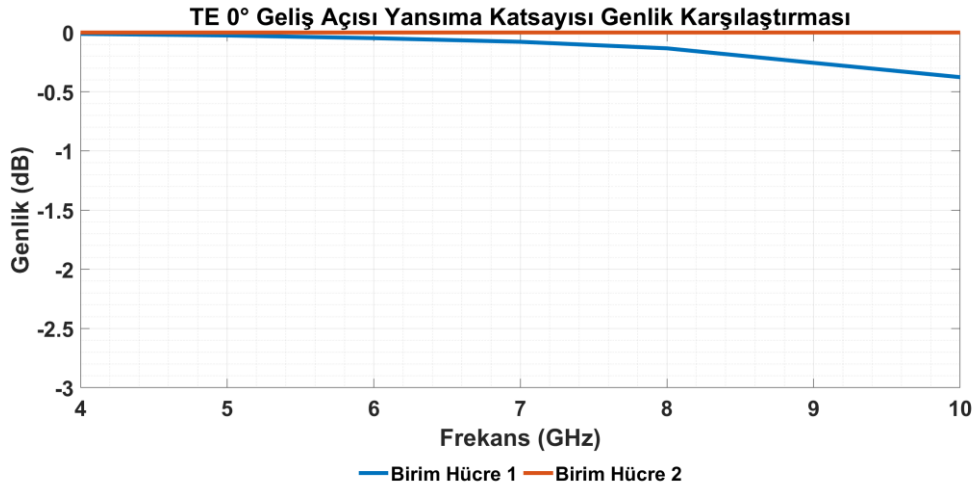


Şekil 2.12 Birim hücre modellenmesi

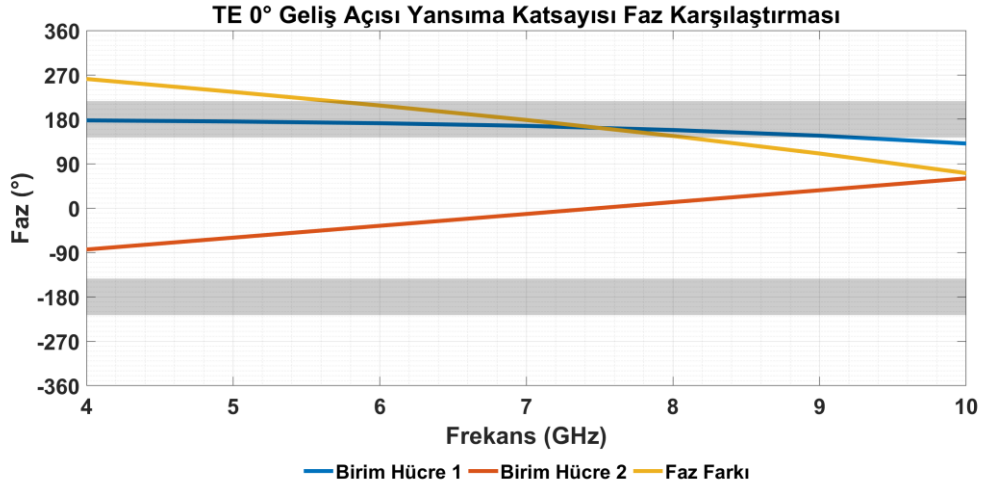


Şekil 2.13 Birim hücrelerin kalınlık bilgileri

Birim hücrelerin 4 – 10 GHz arasındaki enine elektrik alan polarizasyonu (TE) için 0° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik ve faz tepkisi, sırasıyla, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’ te verilmiştir. Genlik değerinin mümkün olduğunca 0 dB’ ye yakın (doğrusal değer 1’ e yakın) olması, faz tepkisinin ise en az 10 dB RKA azaltımı için $\pm 143^\circ$ ve $\pm 217^\circ$ arasında olması hedeflenmiştir. Faz tepkisi grafiğinde gri alanlar $\pm 143^\circ$ ve $\pm 217^\circ$ arasında göstermektedir. Aynı geometrik boyutlarda denklem (2.37)’ nin doğrulanması amacıyla benzetim çalışmaları 6 GHz ve 10 GHz’ de yapılmıştır.

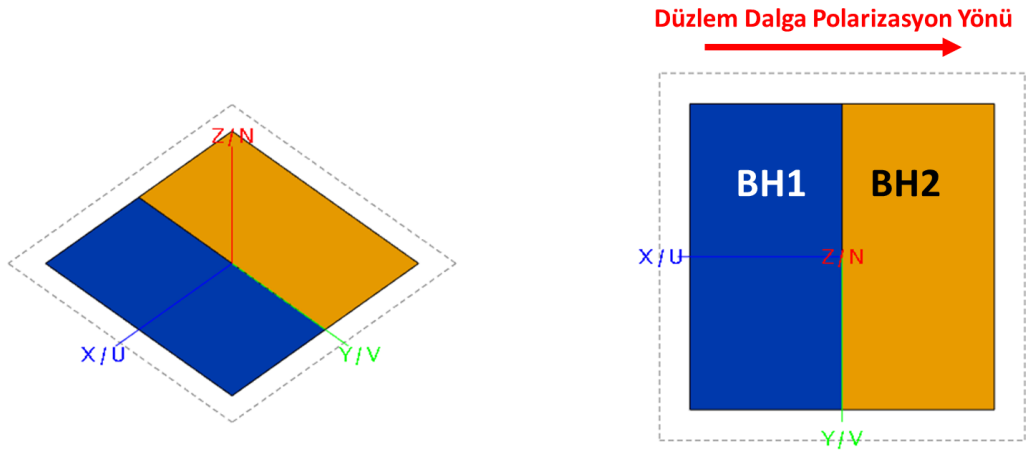


Şekil 2.14 TE 0° geliş açısı yansımaya katsayısı genlik karşılaştırması grafiği

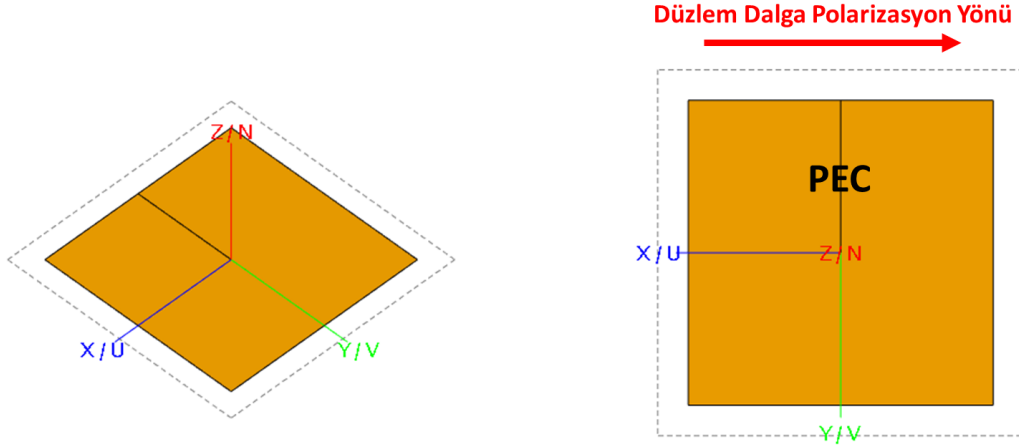


Şekil 2.15 TE 0° geliş açısı yansıma katsayısı faz karşılaştırması grafiği

Benzetim çalışmalarında toplam yüzey alanının yarısı Birim Hücre 1 genlik ve faz tepkisi ile diğer yarısı Birim Hücre 2 genlik ve faz tepkisi ile kaplanmıştır. Düzlem dalga polarizasyon yönü +X olacak şekilde dikey polarizasyon seçilmiştir. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17' de programda kullanılan modellemeler verilmiştir.

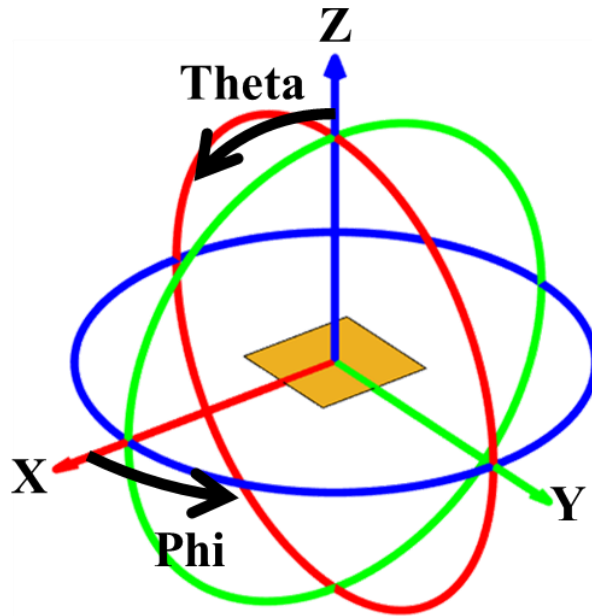


Şekil 2.16 Birim Hücre 1 ve Birim Hücre 2 ile kaplanan yüzey



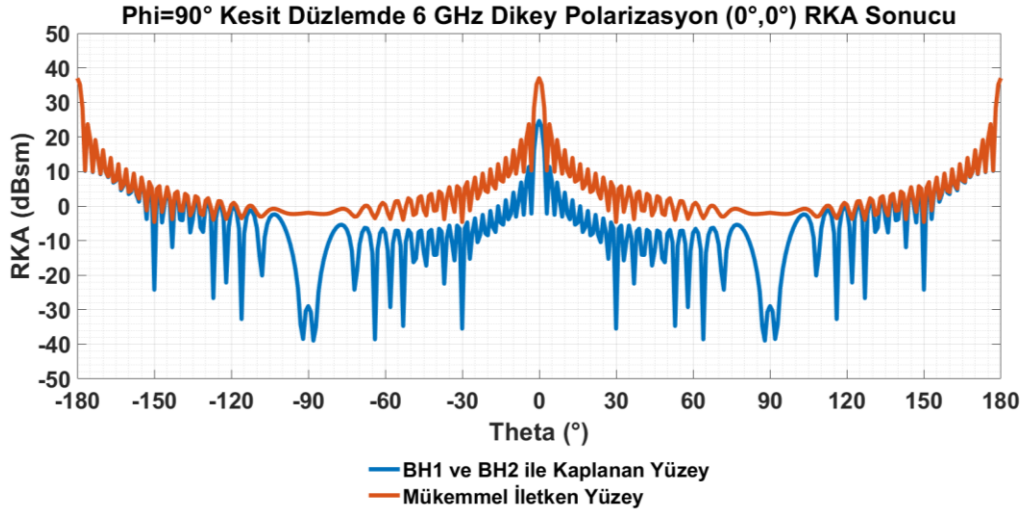
Şekil 2.17 Mükemmel elektrik iletken ile kaplanan yüzey

Benzetim çalışmalarında baz alınan koordinat sistemi küresel koordinat sistemidir. Küresel koordinat sisteminin açı ve vektör yönelimleri Şekil 2.18 'de verilmiştir. Theta (θ) açısı +Z ekseninden başlayıp X-Y düzlemine doğru hareket eden açıdır. Phi (ϕ) açısı ise +X ekseninden başlayıp Y-Z düzlemine doğru hareket eden açıdır. Sonuçlar Phi=90° (Y-Z düzlemi) kesit düzleminde incelenmiştir.

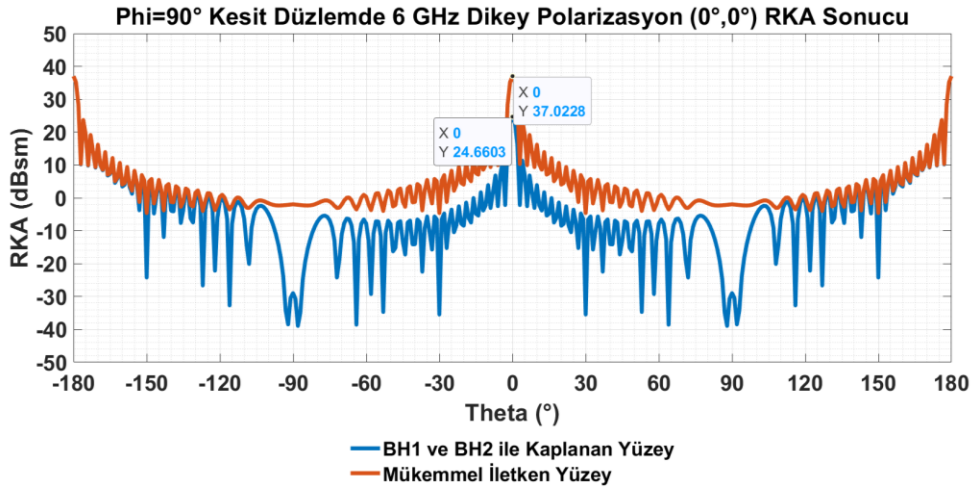


Şekil 2.18 Küresel koordinat sistemi açı ve vektör yönelimleri

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 incelendiğinde 6 GHz’ de birim hücreler arası faz farkı 208° dir. Denklem (2.26)’ da faz farkını uyguladığımızda, elde edilmesi gereken RKA azaltımı yaklaşık olarak -12.3 dB’ dir. Şekil 2.19 ve Şekil 2.20 ‘de $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde Birim Hücre 1 (BH1) ve Birim Hücre 2 (BH2) ile kaplanan yüzey ile tamamıyla mükemmel iletkenden oluşan yüzeyin RKA değerleri dBsm olarak verilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda, gerçekleşen mono-statik RKA azaltımı -12.3 dB’ dir.



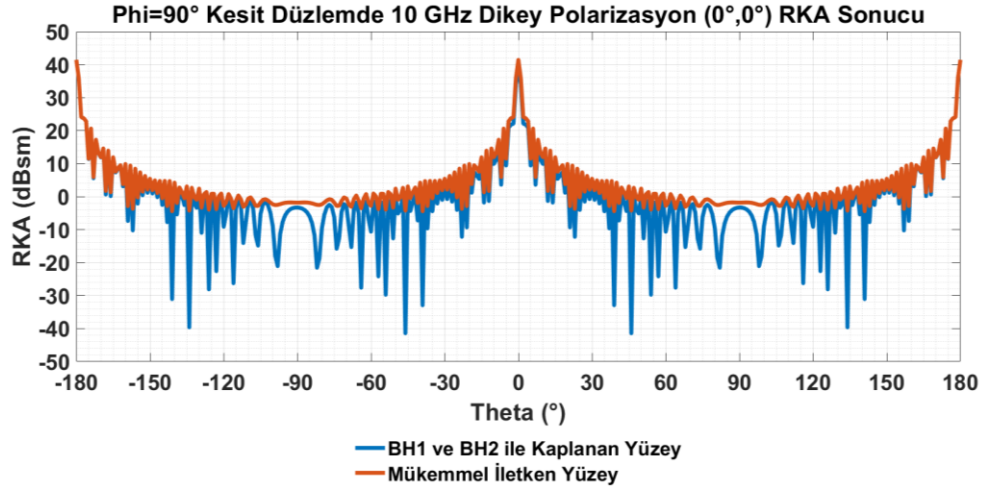
Şekil 2.19 $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde 6 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ,0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu



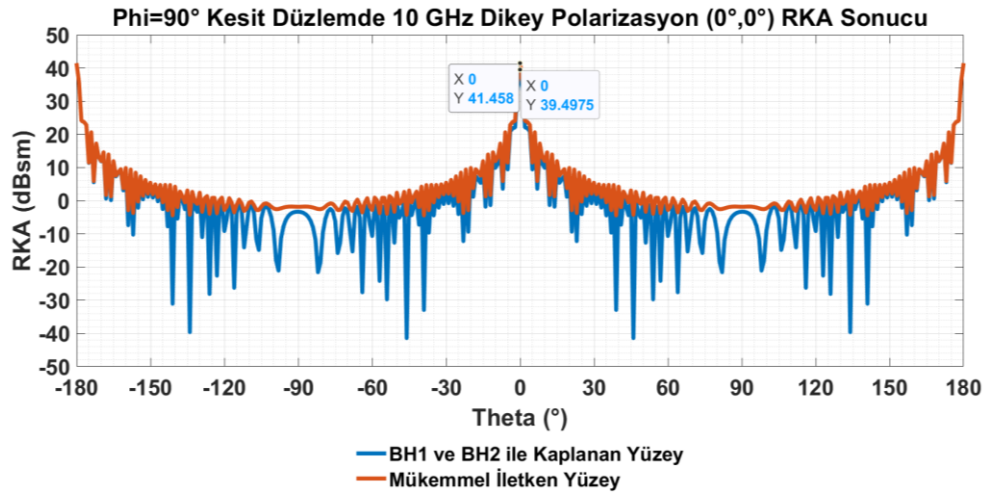
Şekil 2.20 $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde 6 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ,0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu ve mono-statik RKA değerleri

Benzer şekilde, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’ i incelediğimizde 10 GHz’ de birim hücreler arası faz farkı 71° dir. Denklem (2.26)’ da faz farkını uyguladığımızda, elde edilmesi

gereken RKA azaltımı yaklaşık olarak -1.8 dB' dir. Şekil 2.21 ve Şekil 2.22' de $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde Birim Hücre 1 (BH1) ve Birim Hücre 2 (BH2) ile kaplanan yüzey ile tamamıyla mükemmel iletkenden oluşan yüzeyin RKA değerleri dBsm olarak verilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda, gerçekleşen mono-statik RKA azaltımı -2 dB' dir.



Şekil 2.21 $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde 10 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ,0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu



Şekil 2.22 $\Phi=90^\circ$ kesit düzleminde 10 GHz Dikey Polarizasyon ($0^\circ,0^\circ$) geliş açısında RKA sonucu ve mono-statik RKA değerleri

Sonuçlar incelendiğinde analitik çözümler ile benzetim sonuçları (nümerik çözümler) arasında yüksek doğruluk oranı dikkat çekmektedir. Bu noktadan hareketle RKA azaltımı için birim hücre tasarımında faz farkının denklem (2.37)' de belirtilen aralıkta kalması önem arz etmektedir.

3. MODELLEME VE OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

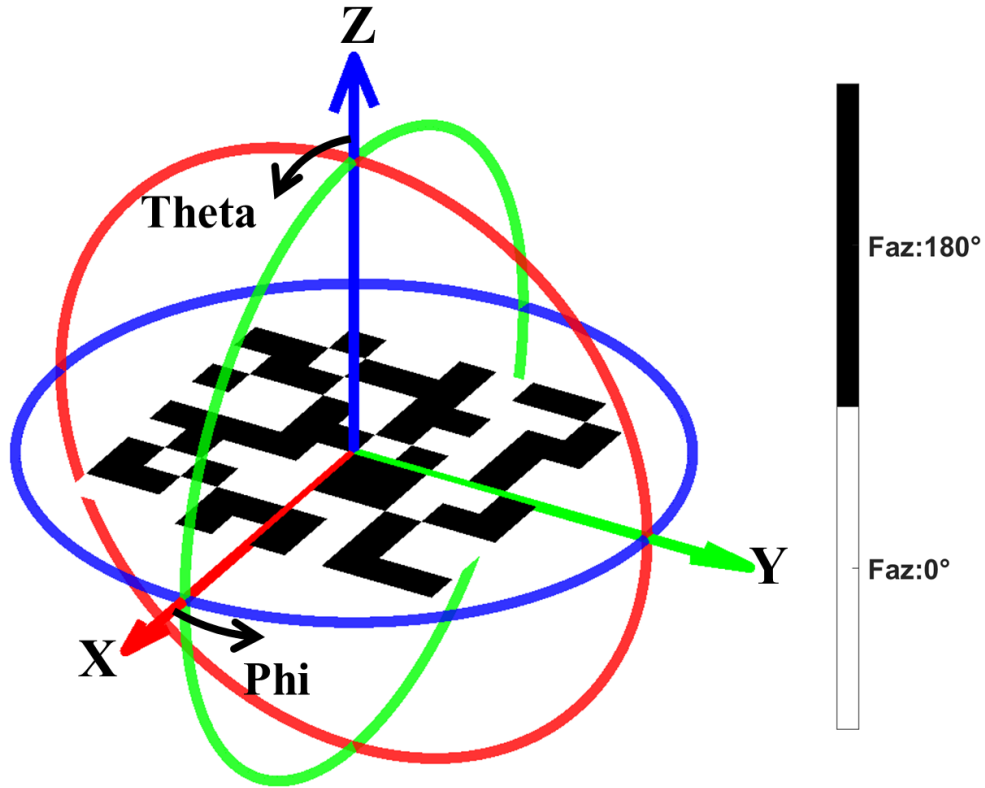
Bölüm 2.4.1. Kodlanmış Metamalzeme' de belirtilen kodlanmış metamalzeme yaklaşımı baz alınarak, en yüksek düzeyde mono-statik ve bi-statik RKA azaltımı sağlamak amacıyla optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Bu bölümde tez çalışmasının iki temel başlığı üzerinde durulacaktır. Öncelikle uzak alan saçılma örüntüsü özelinde yapılan çalışmalardan bahsedilecek, daha sonra optimizasyon algoritması olarak seçilen parçacık sürü optimizasyon algoritmasının kullanımı ve tez kapsamında algoritmada yapılan değişikliklerden bahsedilecektir.

Kodlanmış metamalzeme yapısı gereği birim hücrelerin bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Birim hücrelerin farklı faz tepkilerine göre bir araya getirilmesi gereken bu yapıda, en az iki farklı faz tepkisine sahip birim hücre bulunması gerekmektedir. Elektromanyetik çalışmalarda, ortamda bulunan saçıcının elektriksel uzunluğu elektromanyetik dalganın saçıcı ile etkileşimini belirleyen önemli parametrelerden biridir. Kodlanmış metamalzemenin, C-X-Ku frekans bantlarında etkileşiminin sağlanabilmesi için, satır ve sütunda kullanılan birim hücre sayısının dalga boyuna göre belirli bir sayıda olması gerekmektedir. Dolayısıyla, tam-dalga benzetim çalışmalarında, birim hücre sayısı arttıkça bilinmeyen sayısı (ağ sayısı) artmakta ve en uygun yapıya ulaşmak çok yüksek kaynak ve zaman ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Kaynak ihtiyacını en aza indirmek ve kısa zamanda kodlanmış metamalzemenin uzak alan saçılma örüntüsünü elde edebilmek (bir diğer ifade ile hesaplama pahalılığını/maliyetini azaltmak) amacıyla yayılan alanın yaklaşık değerlendirilmesi yöntemi kullanılmıştır [20, 22, 39]. Elde edilen sonuç, parçacık sürü optimizasyon algoritmasında kullanılarak en uygun kodlanmış metamalzeme çözümüne gidilmiştir.

3.1. Uzak Alan Saçılma Örüntüsü

Açıklık antenlerin uzak alan örüntülerini bulmak amacıyla, durağan fazlar yönteminin kullanıldığı bu yöntemde, açıklık üzerinde bulunan akımın Fourier dönüşümü kullanılarak uzak alan sonucu yüksek doğruluk oranı ile hesaplanabilmektedir. Uzak alanda elektrik alan formülü yaklaşık olarak yazılırsa denklem (3.1) elde edilir [39].

Denklemden verilen N ifadesi satır ve sütunda bulunan birim hücre sayısını, p ise birim hücre periyodunu belirtmektedir.



Şekil 3.1 Kodlanmış metamateryale ve küresel koordinat sistemi

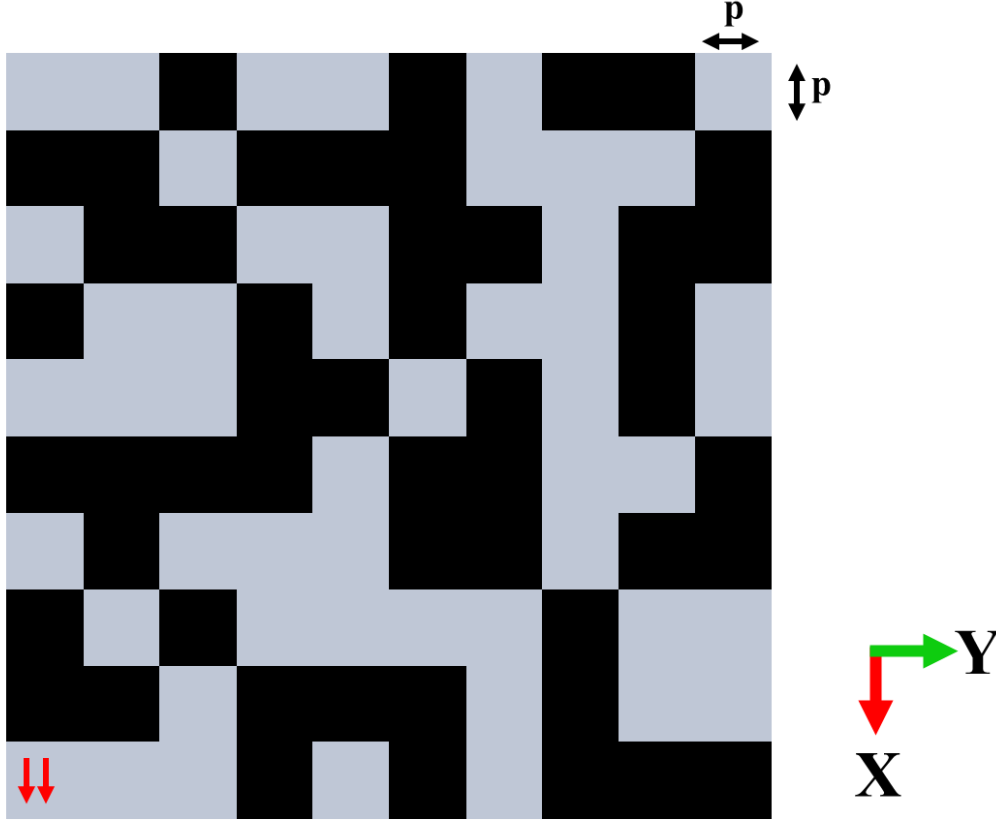
$$\vec{E}(r, \theta, \phi) \cong j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} [\hat{a}_\theta (f_x \cos\phi + f_y \sin\phi) + \hat{a}_\phi \cos\theta (-f_x \sin\phi + f_y \cos\phi)] \quad (3.1)$$

$$f_x = \int_{-Np/2}^{Np/2} \int_{-Np/2}^{Np/2} E_{xa}(x, y, z = 0) e^{jk(x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi)} dx dy \quad (3.2)$$

$$f_y = \int_{-Np/2}^{Np/2} \int_{-Np/2}^{Np/2} E_{ya}(x, y, z = 0) e^{jk(x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi)} dx dy \quad (3.3)$$

Açıklık üzerinde x-yönlü akım için f_x , y-yönlü akım için ise f_y kullanılır. k dalga numarasını, (r, θ, ϕ) gözlem noktası ile kodlanmış metamateryale arası uzaklık ve küresel açıları (θ :Theta, ϕ :Phi), N birim hücre sayısını, p periyot uzunluğunu, \hat{a}_θ theta yönünde

birim vektörü ve \hat{a}_ϕ phi yönünde birim vektörü belirtmektedir. İlgili formüller incelendiğinde denklem (3.2) ve (3.3) 2B Ters Ayrık Fourier Dönüşümü ile hesaplanabilir [20, 22]. Şekil 3.2’ de bulunan birim hücreler üzerinde x yönlü akım indüklendiği varsayıldığında ilgili yakın alan elektrik alan değeri denklem (3.4)’ te belirtildiği gibi yazılabilir.



Şekil 3.2 Kodlanmış metamalzeme üzerinde akım indüklenmesi

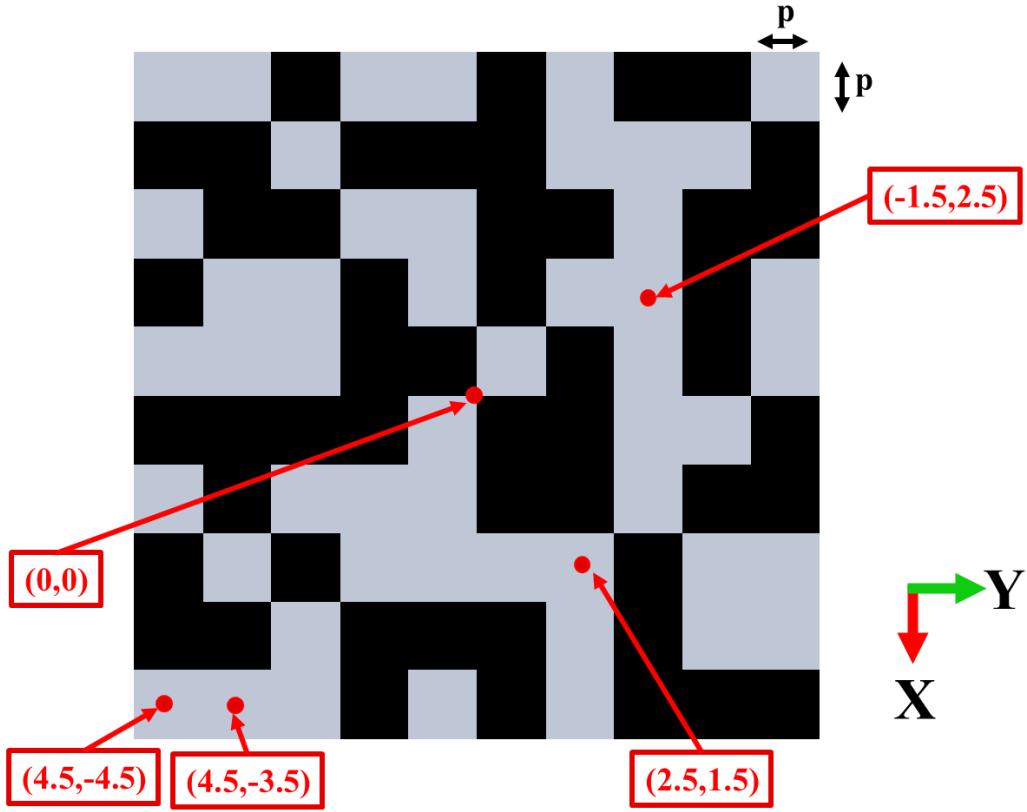
$$\vec{E}(x, y) = \hat{a}_x E(x, y) \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)’ de, yakın alanda bulunan elektrik alan kodlanmış metamalzeme’ de bulunan toplam yakın alan elektrik alanı ifade etmektedir. N tane satır N tane sütun içeren bir kodlanmış metamalzeme için (N*N’ lik kodlanmış metamalzeme için), yakın alan elektrik alan ifadesi her birim hücre için denklem (3.5)’ deki gibi yazılabilir.

$$E(x, y) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{m,n}(x', y') \quad (3.5)$$

$$E_{m,n}(x', y') = Ae^{j\varphi(m,n)} \quad (3.6)$$

$E_{m,n}(x', y')$ ifadesi (m, n) numaralı birim hücre üzerinde bulunan (x', y') koordinatlı yakın alan elektrik alanı ifade etmektedir. Şekil 3.3' de 10×10 ' luk bir kodlanmış metamatlamzeme için örnek (x', y') koordinatları verilmiştir. Denklem (3.6)' da verilen formülde A genliği, $\varphi(m, n)$ ise fazı belirtmektedir. Formülü daha basit incelemek amacıyla genlik bütün birim hücreler için 1 alınmıştır.



Şekil 3.3 Kodlanmış metamatlamzeme yüzeyi x-y düzlemi kesiti

(x', y') koordinatı ile (x, y) koordinatı arasında denklem (3.7) ve (3.8) de belirtildiği gibi bağlantı kurulabilir.

$$x' = x - mp + \frac{(N-1)p}{2} \quad (3.7)$$

$$y' = y - np + \frac{(N-1)p}{2} \quad (3.8)$$

Denklem (3.2)' de f_x ile $P(u, v)$, $\sin\theta\cos\phi$ ile u ve $\sin\theta\sin\phi$ ile v parametre değişikliği yapıldığında ve denklem (3.6), (3.7), (3.8) ilgili kısımlar ile değiştirildiğinde denklem (3.9) elde edilir.

$$P(u, v) = \int_{-p/2}^{p/2} \int_{-p/2}^{p/2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi(m,n)} e^{jk(u(x'+mp-\frac{(N-1)p}{2})+v(y'+np-\frac{(N-1)p}{2}))} dx' dy' \quad (3.9)$$

Denklem (3.9) üzerinde toplam sembolleri dışarı alındığında denklem (3.10) elde edilir.

$$P(u, v) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi(m,n)} e^{jkump} e^{-jkup\frac{(N-1)}{2}} e^{jkvnp} e^{-jkvp\frac{(N-1)}{2}} \int_{-p/2}^{p/2} \int_{-p/2}^{p/2} e^{jk(ux'+vy')} dx' dy' \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) üzerinde gerekli sadeleştirmeler ve düzenlemeler yapıldığında denklem (3.11) elde edilir.

$$P(u, v) = e^{-jk\frac{(N-1)}{2}p(u+v)} p^2 \operatorname{sinc}\left(\frac{kup}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{kvp}{2}\right) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi(m,n)} e^{jk(ump+vnv)} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)' de bulunan toplam sembolü içerisindeki ifade 2B Ters Ayrık Fourier Dönüşümü ile elde edilebilir. Bir $F(m, n)$ fonksiyonu için 2B Ters Ayrık Fourier Dönüşümü denklem (3.12)' de verilmiştir.

$$f(s, t) = IDFT[F(m, n)] = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} F(m, n) e^{j\frac{2ms\pi+2nt\pi}{N}} \quad (3.12)$$

u ve v değişkenleri s ve t ' nin olduğu denklem (3.13) ve (3.14) olarak değişken değiştirilirse elde edilen matris u ve v ' nin ayrık koordinat değerleri ile ifade edilebilir. s ve t satır ve sütunda bulunan birim hücreyi ifade etmektedir.

$$u = \frac{2\pi}{Npk} s, \quad s = -\frac{N-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N-1}{2} \quad (3.13)$$

$$v = \frac{2\pi}{Npk} t, \quad t = -\frac{N-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N-1}{2} \quad (3.14)$$

Dolayısıyla uzak alan elektrik alan değeri denklem (3.15) ile elde edilebilir.

$$\begin{aligned} & P\left(\frac{2\pi}{Npk} s, \frac{2\pi}{Npk} t\right) \\ &= e^{-j\pi\frac{(N-1)}{N}(s+t)} p^2 \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi s}{N}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi t}{N}\right) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi(m,n)} e^{j2\pi\frac{(ms+nt)}{N}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Denklem (3.1) sadece normal geliş açısı ile ($0^\circ, 0^\circ$) gelen elektromanyetik dalga için uzak alan saçılma örüntüsünü hesaplamada kullanılır. Ancak eğik gelen elektromanyetik dalga için denklem (3.1)' de bulunan $\sin\theta\cos\phi$ ifadesi $\sin\theta\cos\phi - \sin\theta_{inc}\cos\phi_{inc}$ ile ve $\sin\theta\sin\phi$ ifadesi $\sin\theta\sin\phi - \sin\theta_{inc}\sin\phi_{inc}$ ile değiştirildiğinde uzak alan elektrik alan formülü eğik gelen elektromanyetik dalga için de kullanılabilir [3, 30]. θ_{inc} ve ϕ_{inc} gelen elektromanyetik dalganın küresel koordinat sistemindeki açılarını belirtmektedir.

Elektrik alanın theta ve phi bileşenleri cinsinden değerleri denklem (3.16) ve denklem (3.17) şeklinde yazılabilir.

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) \cong j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} P(u, v) \cos\phi \quad (3.16)$$

$$E_{\phi}(r, \theta, \phi) \cong -j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} P(u, v) \cos\theta \sin\phi \quad (3.17)$$

2B Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kodlanmış metalmazemeye uygulandıktan sonra elde edilen matris u-v koordinatlarına göre elde edilen değerlerdir. Dolayısıyla, matrisin u-v düzleminde $\theta - \phi$ açılara dönüştürülmesi gerekmektedir. Fonksiyonun birebir olabilmesi için u-v düzleminde bulunan değerlerin görünür bölge de olması gerekir. Bu koşulun sağlanabilmesi için ise denklem (3.18) ve denklem (3.19)' un sağlanması gerekmektedir.

$$-1 \leq u, v \leq 1 \quad (3.18)$$

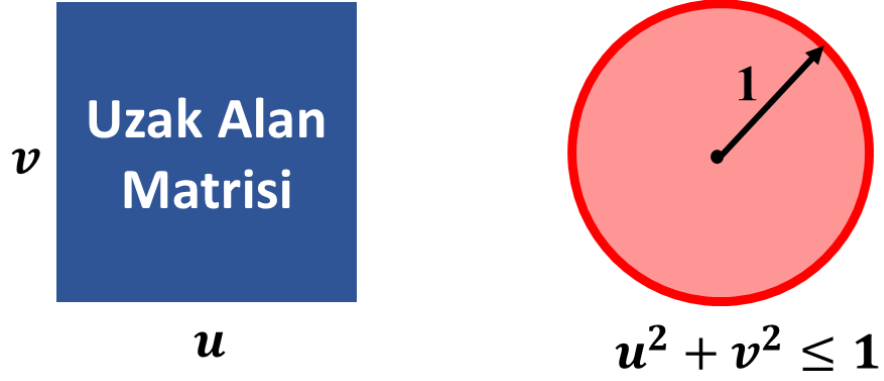
$$u^2 + v^2 \leq 1 \quad (3.19)$$

Aynı zamanda denklem (3.13) ve (3.14) incelendiğinde ve sadeleştirmeler uygulandığında, u ve v değerlerinin denklem (3.20)' de belirtilen aralıkta olması gerekmektedir.

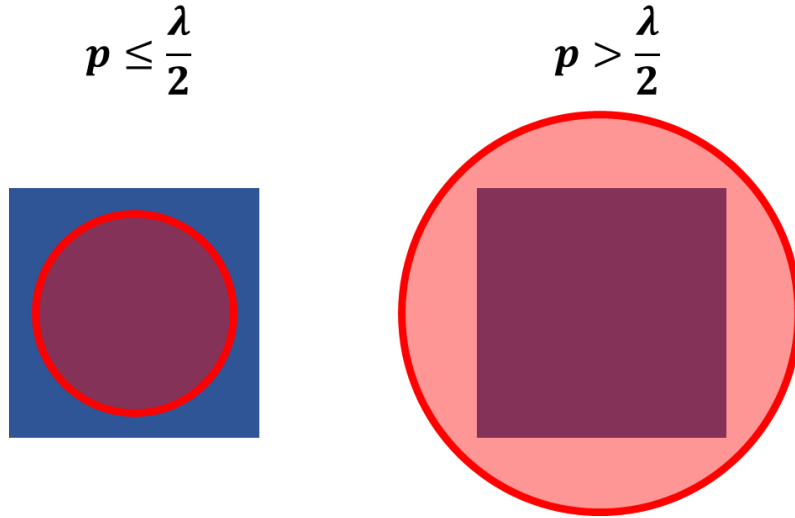
$$-\frac{\lambda}{2p} < u, v < \frac{\lambda}{2p} \quad (3.20)$$

Dolayısıyla birebir dönüşümün ya da diğer bir ifade ile haritalandırmanın sağlanabilmesi için, p ile belirtilen birim hücre periyodunun $\frac{\lambda}{2}$, den küçük veya eşit olması gerekmektedir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' te görsel üzerinde bu durum özetlenmiştir. p periyodu $\frac{\lambda}{2}$, den küçük veya eşit olduğu durumda haritalandırmanın yapıldığı birim daire

(birim daire içerisindeki her bir u ve v değeri θ - ϕ ikilisine dönüştürme işlemi) matrisin içerisinde kalmakta ve tüm değerleri içermektedir. Ancak, p periyodu $\frac{\lambda}{2}$ den büyük ise haritalandırmanın yapıldığı birim daire matristen daha büyük olmakta ve bilinmeyen değerlerinde dönüşmesi gerekmekte, dolayısıyla haritalandırma işlemi doğru sonuç içermemektedir. Dolayısıyla, çalışmalar bu kısıt dikkate alınarak ilerlemiştir.



Şekil 3.4 Uzak alan matrisi ve birim dairenin u ve v ile bağıntısı

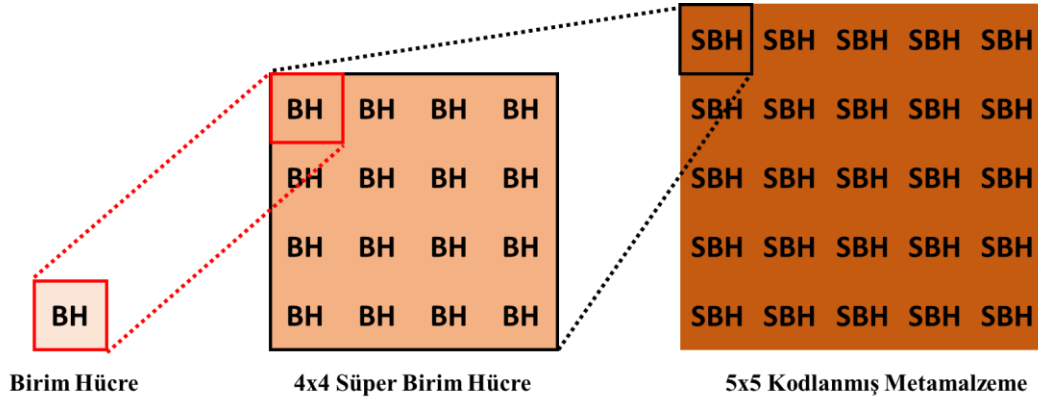


Şekil 3.5 Uzak alan matrisi ve birim dairenin periyot ile bağıntısı

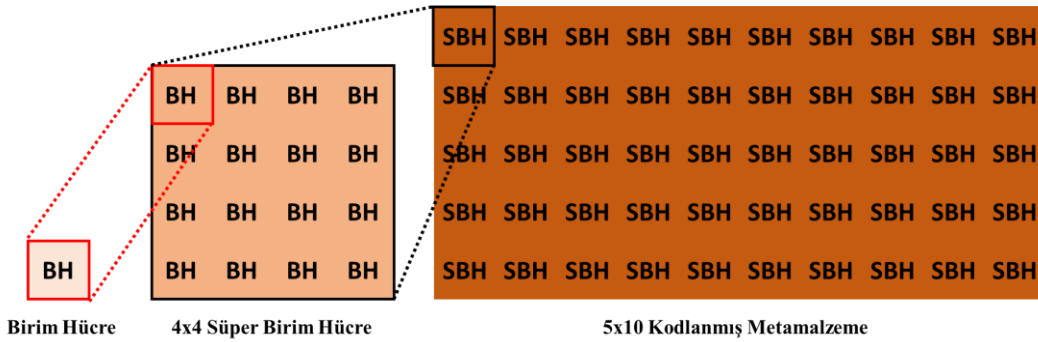
Yapılan çalışmaların doğrulanması amacıyla kodlanmış metalmalzemeler MATLAB ortamında, Altair FEKO programında RL-GO yöntemi ile ve CST programında IE çözücü (bir diğer ifade ile tam-dalga çözücü) ile benzetimleri yapılmıştır.

Örneklere, 2.4.1. Kodlanmış Metalmalzeme başlığında verilen Birim Hücre 1 ve Birim Hücre 2 olarak adlandırılan birim hücreler kullanılmıştır. p periyodu 10 mm olarak

seçilmiştir. 4 satır 4 sütundan oluşan 4x4 süper birim hücre oluşturulmuştur. Örnek 1, 2, 3 ve 4' te 5 tane satırda, 5 tane sütunda olacak şekilde toplamda 25 süper birim hücre ile, örnek 5, 6 ve 7' de ise 10 tane satırda 5 tane sütunda olacak şekilde toplamda 50 süper birim hücre ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3.6' da birim hücre, süper birim hücre ve 5x5 kodlanmış metamazeme oluşumu, Şekil 3.7' de birim hücre, süper birim hücre ve 5x10 kodlanmış metamazeme oluşumu verilmiştir.



Şekil 3.6 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 5x5 kodlanmış metamazeme

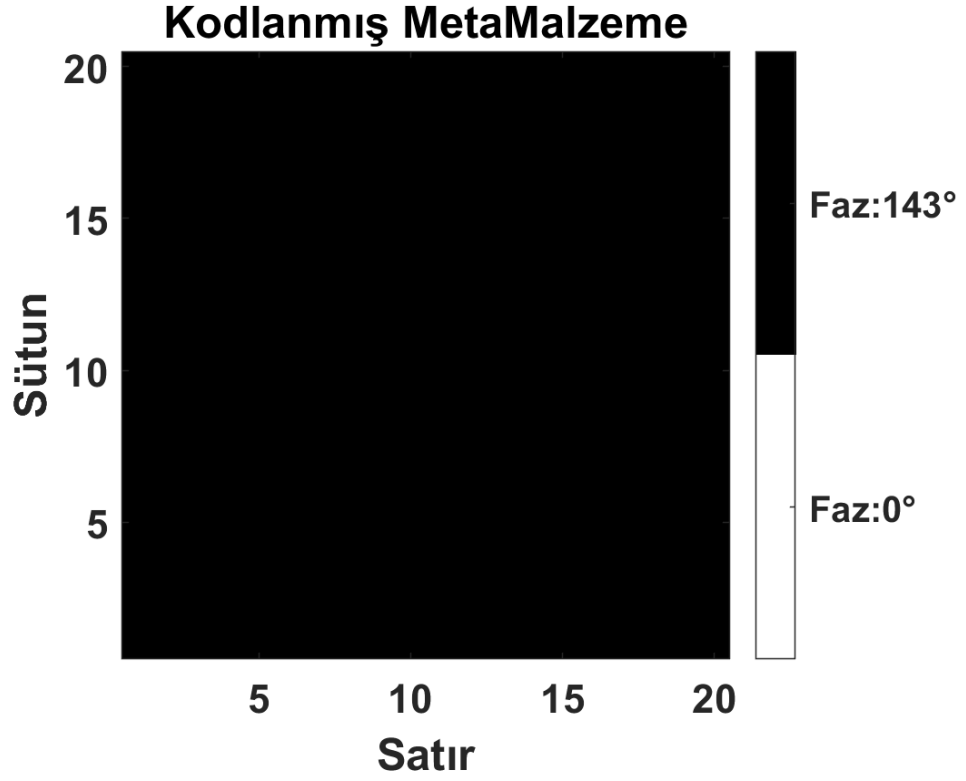


Şekil 3.7 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 5x10 kodlanmış metamazeme

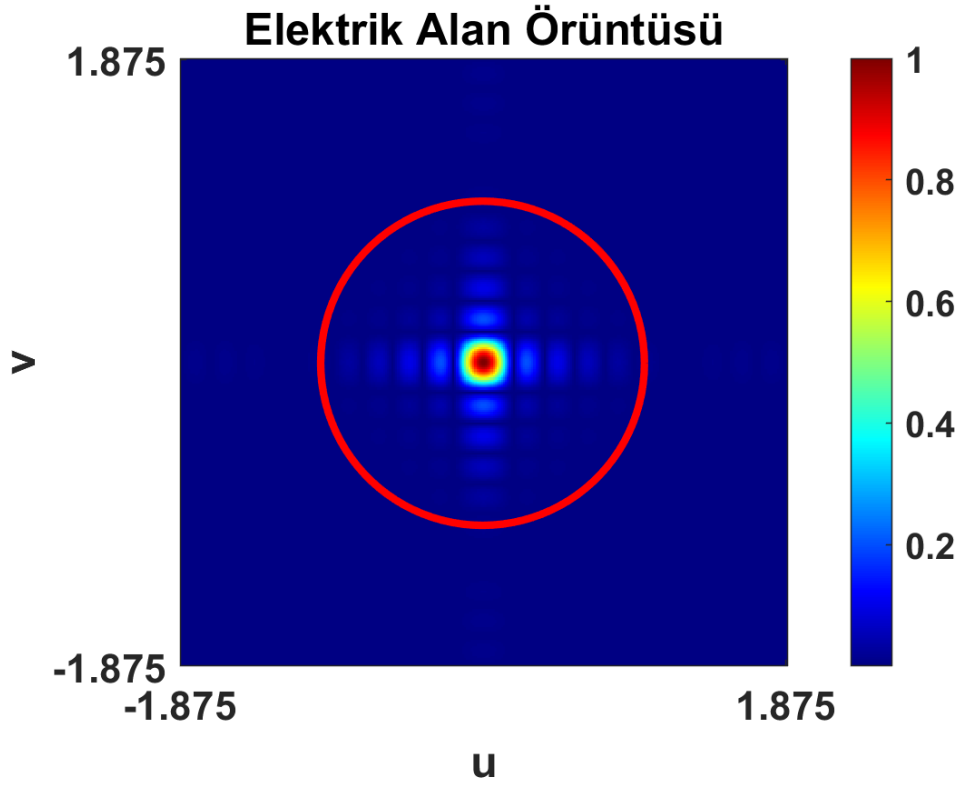
Şekil 2.14 ve Şekil 2.15' te yansıma katsayısı genlik ve faz tepkileri verilen birim hücrelerin, benzetim çalışmaları 8 GHz' de gerçekleştirilmiştir. Dikey polarizasyonda örnek 1, 2, 3, 4 ve 5 için ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı ile gelen düzlem dalgada, örnek 6 için ($30^\circ, 0^\circ$) geliş açısı ile gelen düzlem dalgada, örnek 7 için ($30^\circ, 90^\circ$) geliş açısı ile gelen düzlem dalgada kodlanmış metamazemelerin davranışları incelenmiştir.

- **Örnek 1**

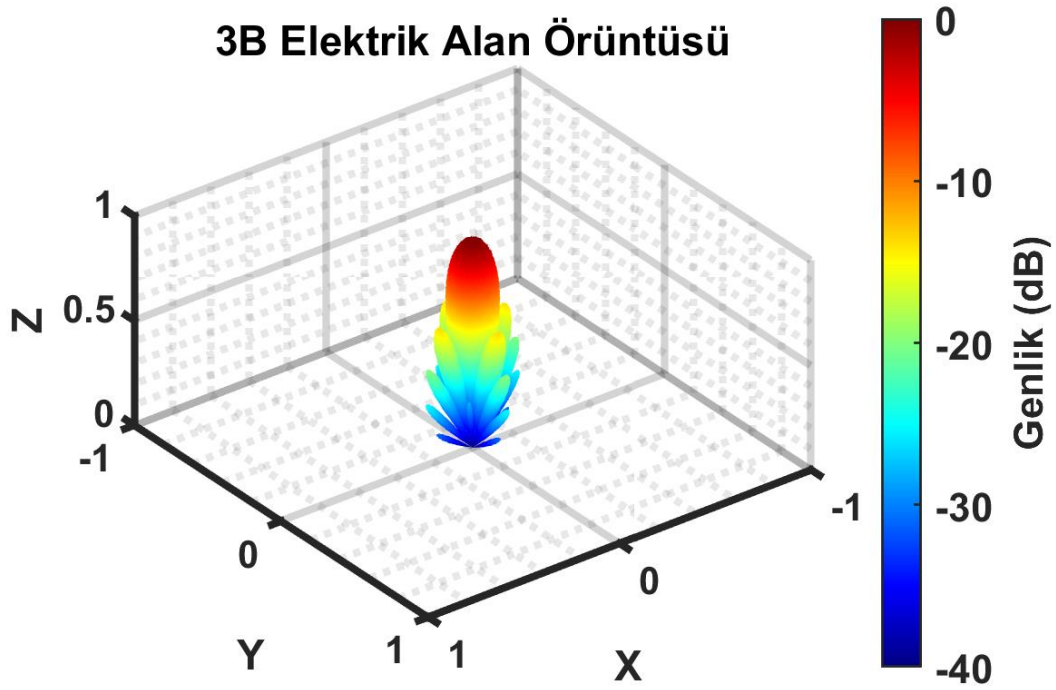
Kodlanmış metamatizeme Şekil 3.8’ de verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.9’ da, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.10’ da verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.11’ de, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.12’ de verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.13’ te verilmiştir.



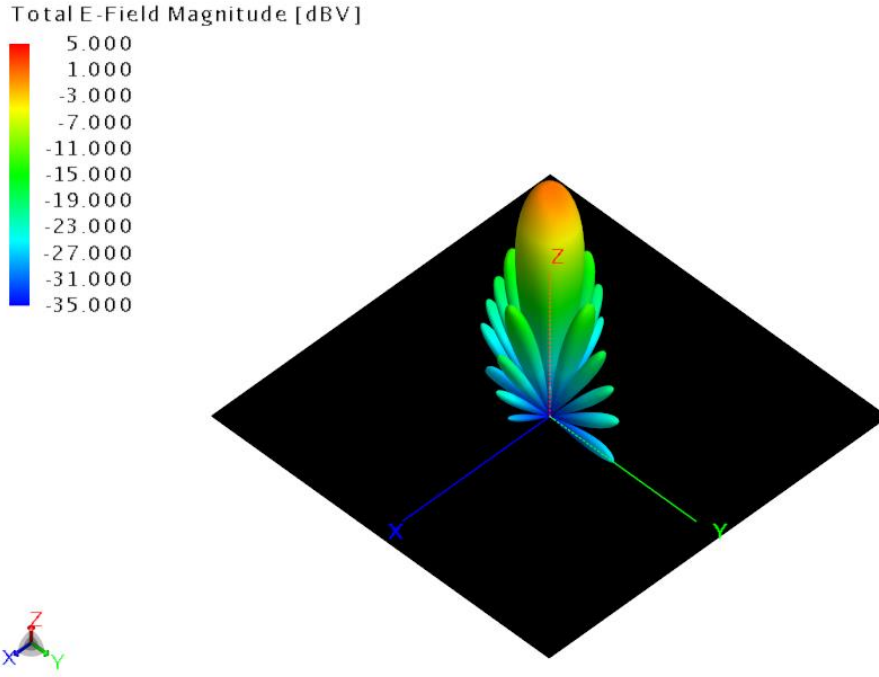
Şekil 3.8 Örnek 1 kodlanmış metamatizeme



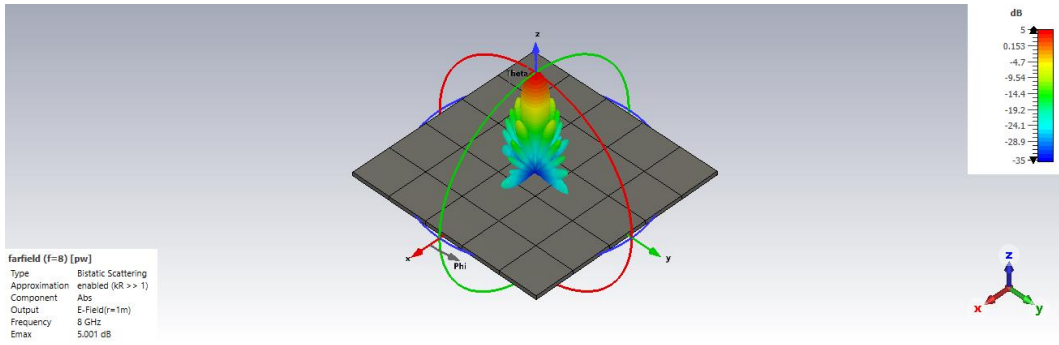
Şekil 3.9 Örnek 1 u - v düzlemi elektrik alan örüntüsü



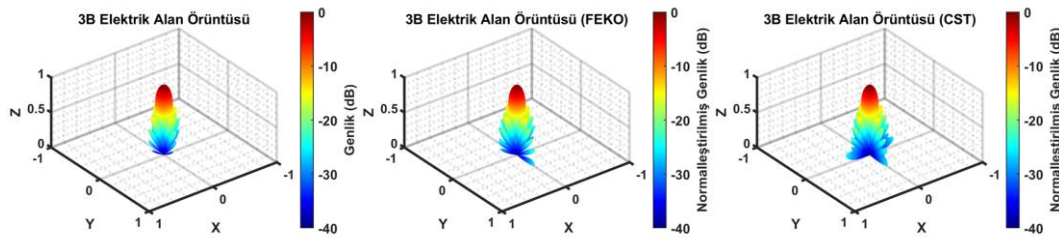
Şekil 3.10 Örnek 1 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.11 Altair FEKO programında elde edilen desibel cinsinden örnek 1 3B elektrik alan örüntüsü



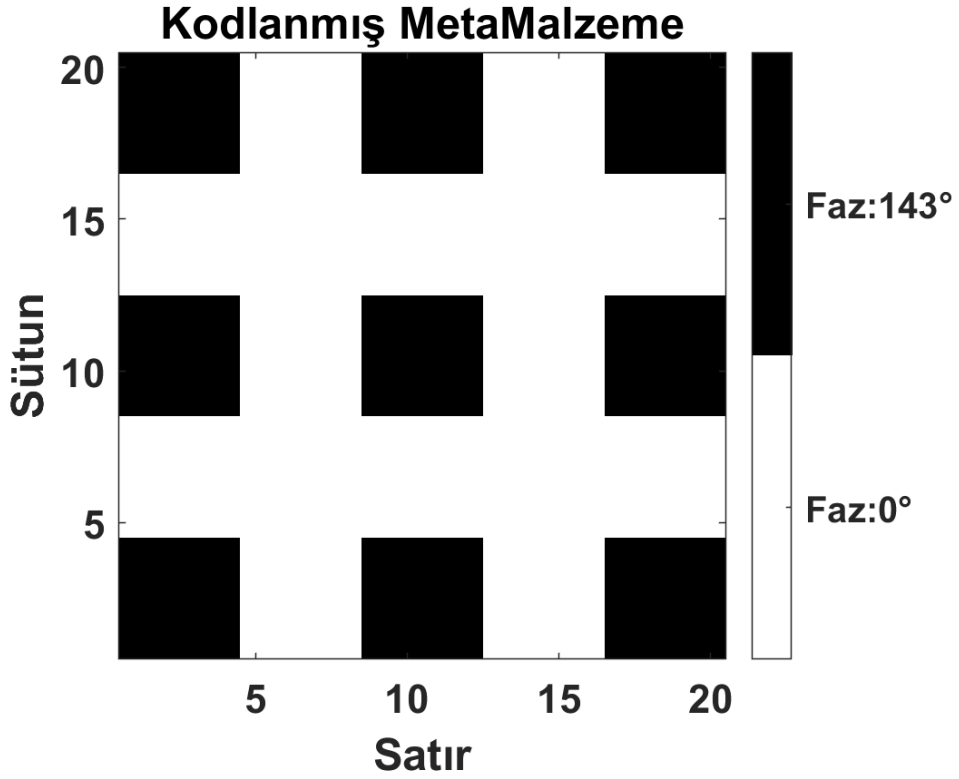
Şekil 3.12 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 1 3B elektrik alan örüntüsü



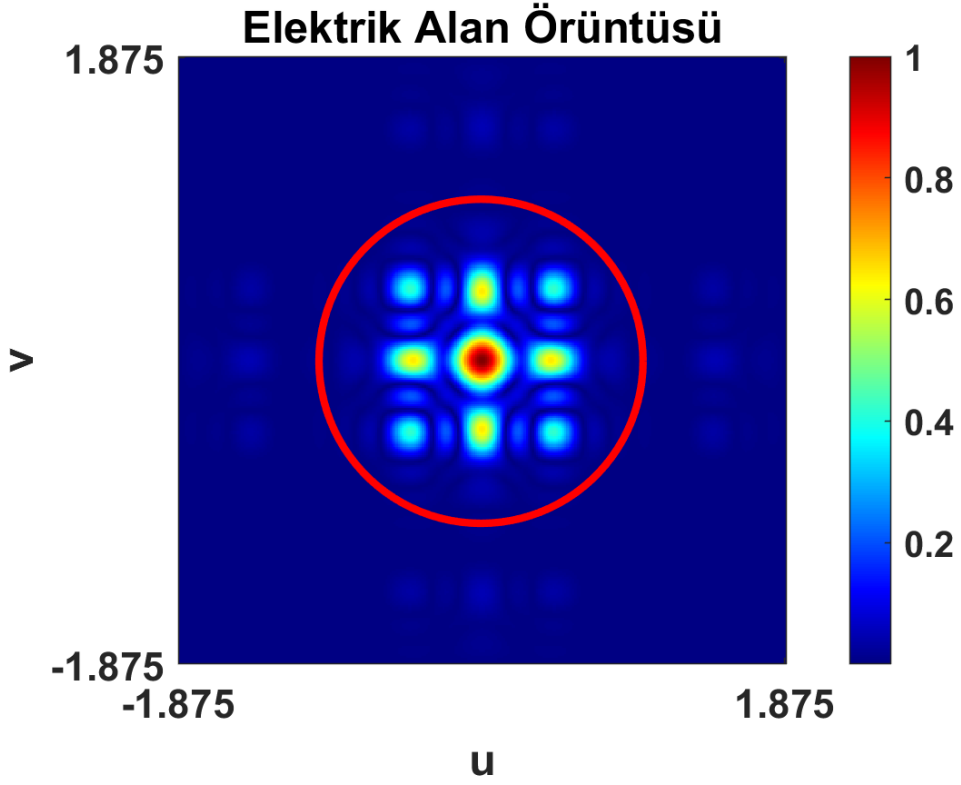
Şekil 3.13 Örnek 1 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 2**

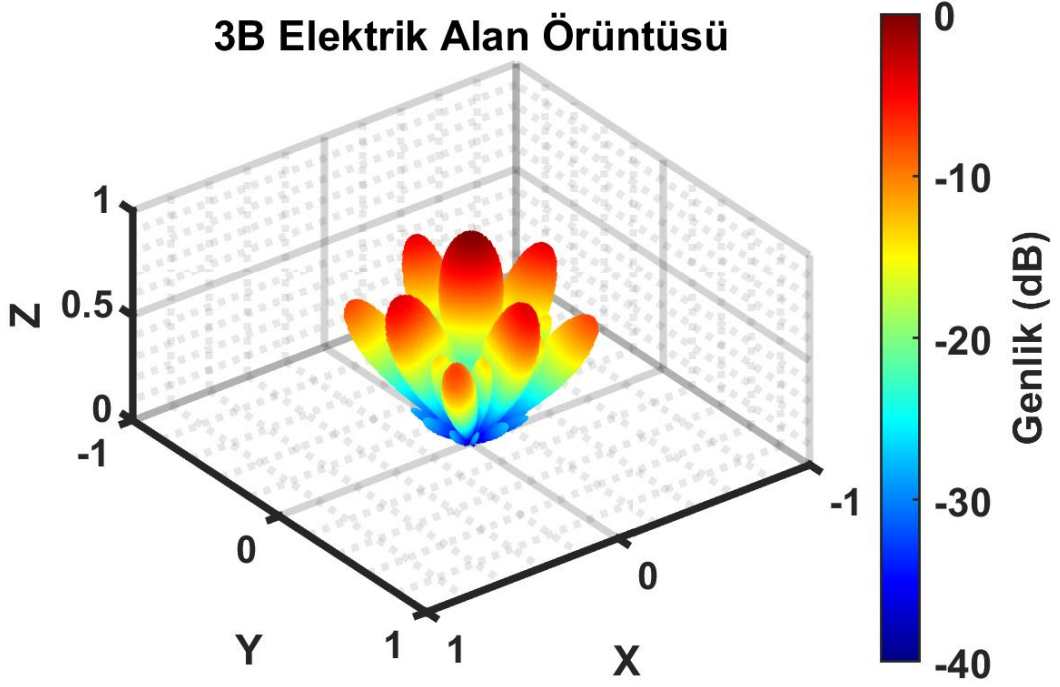
Kodlanmış metamatizeme Şekil 3.14' te verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.15' te, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.16' da verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.17' de, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.18' de verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.19' da verilmiştir.



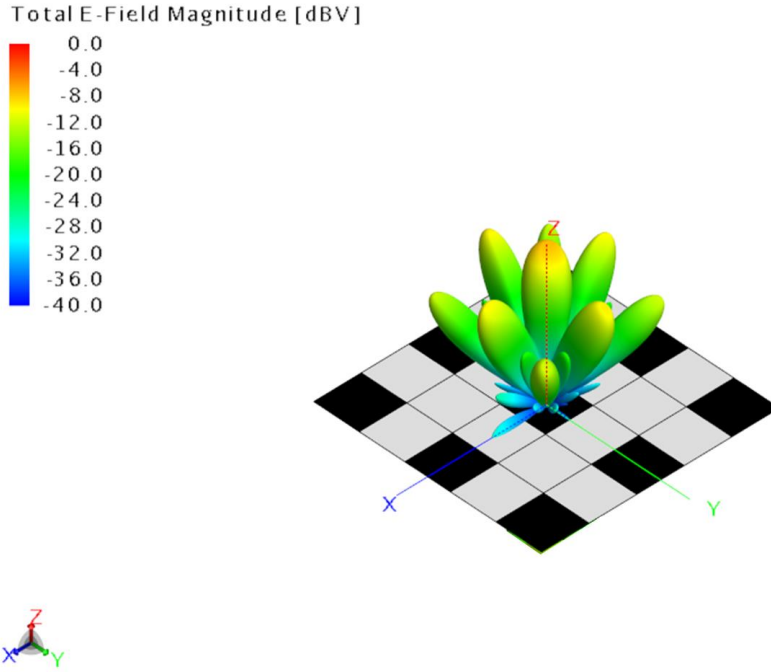
Şekil 3.14 Örnek 2 kodlanmış metamatizeme



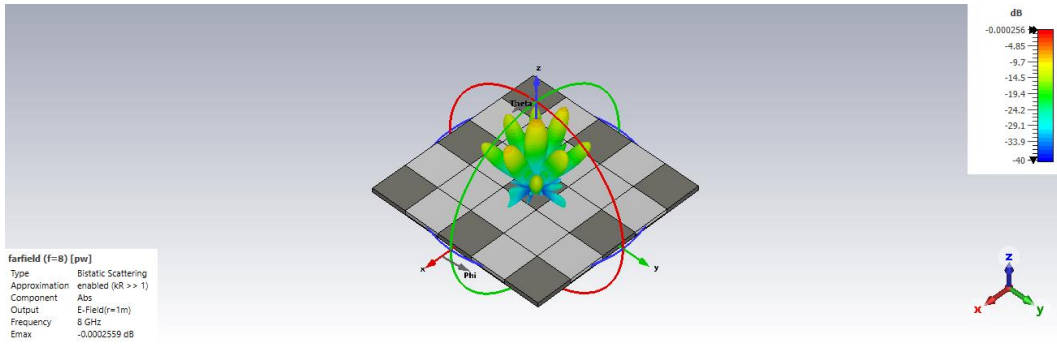
Şekil 3.15 Örnek 2 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



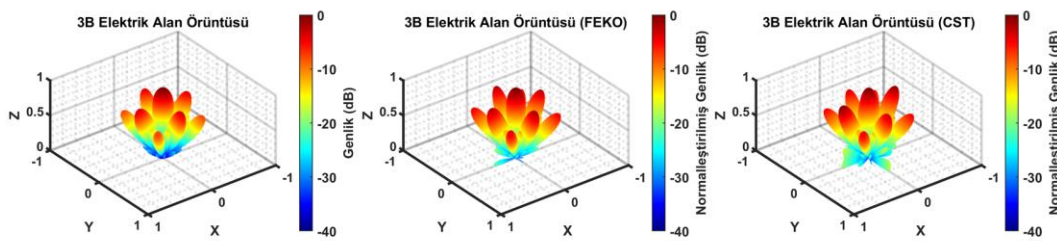
Şekil 3.16 Örnek 2 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.17 Altair FEKO programında elde edilen örnek 2 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



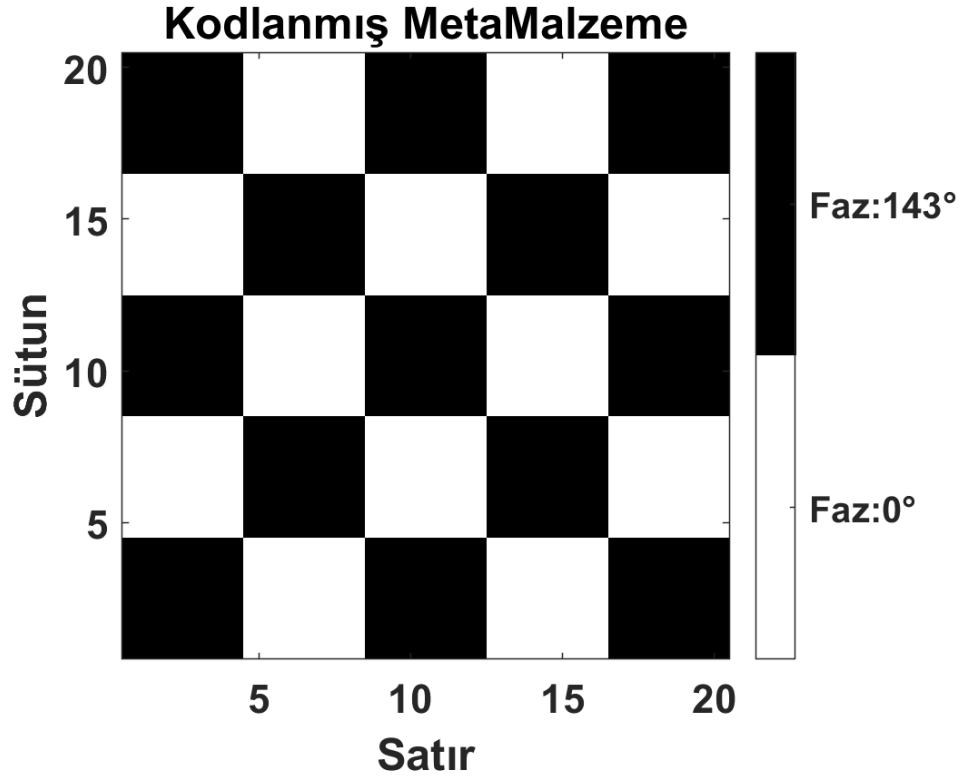
Şekil 3.18 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 2 3B elektrik alan örüntüsü



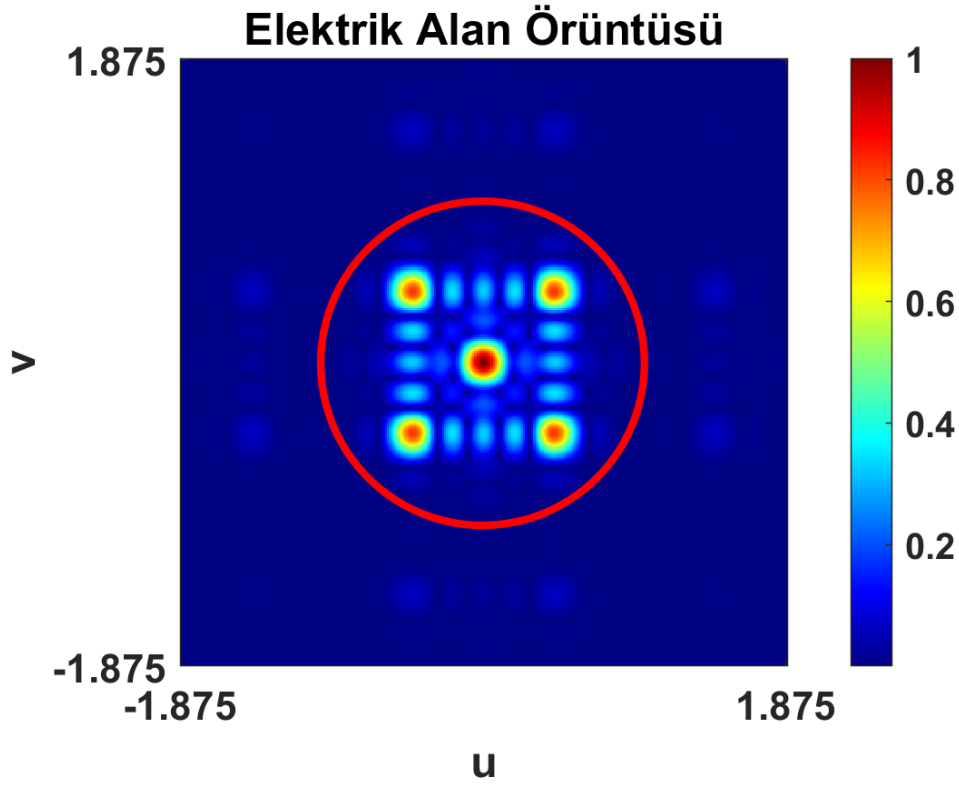
Şekil 3.19 Örnek 2 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 3**

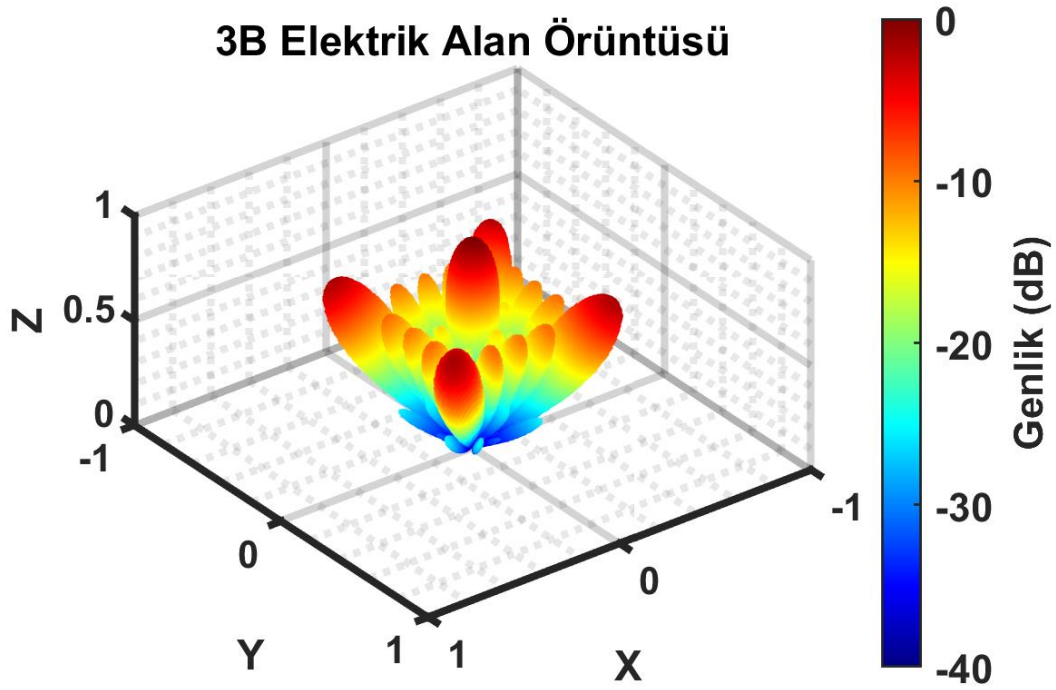
Kodlanmış metamatizeme Şekil 3.20' de verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.21' de, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.22' de verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.23' te, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.24' te verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.25' te verilmiştir.



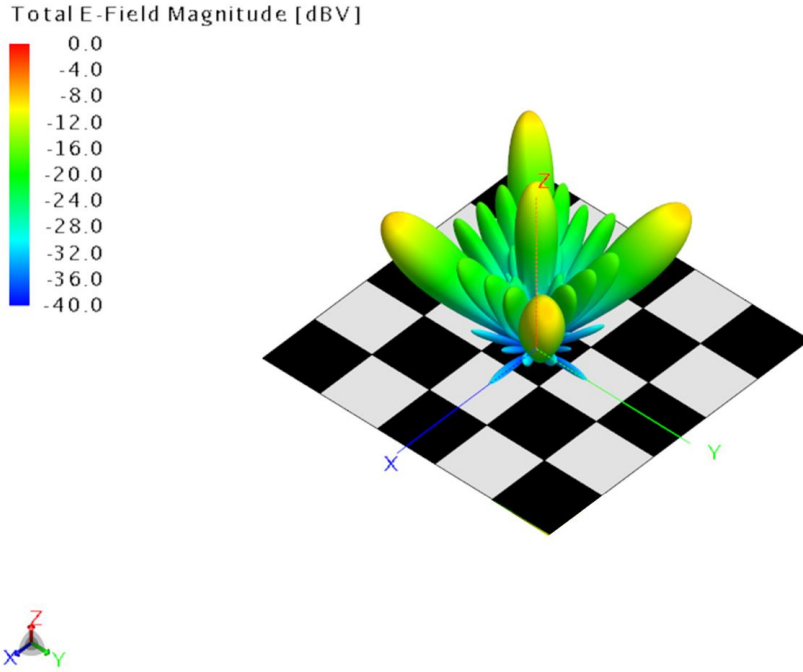
Şekil 3.20 Örnek 3 kodlanmış metamatizeme



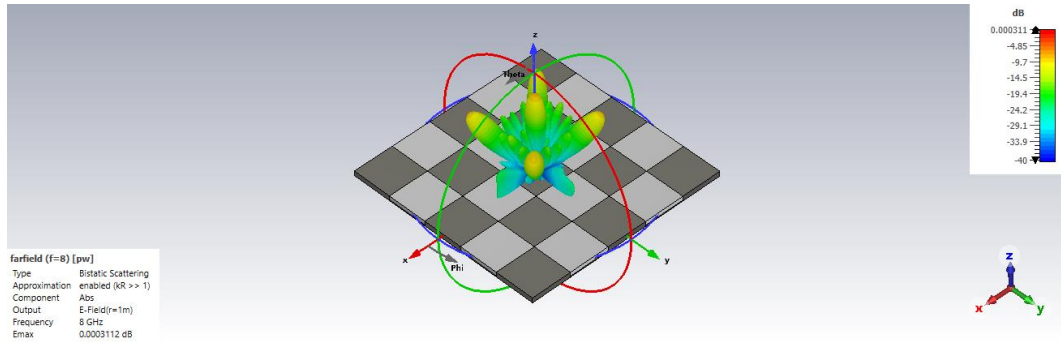
Şekil 3.21 Örnek 3 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



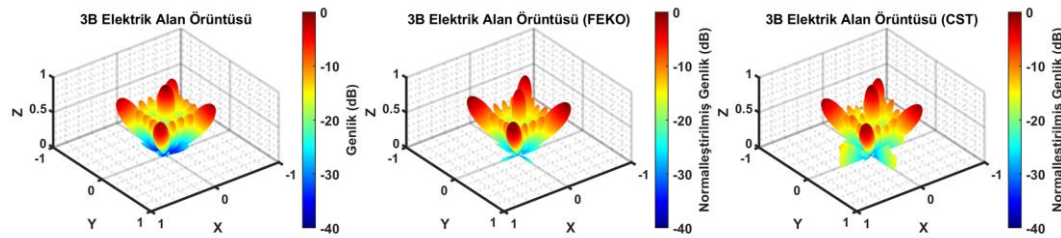
Şekil 3.22 Örnek 3 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.23 Altair FEKO programında elde edilen örnek 3 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



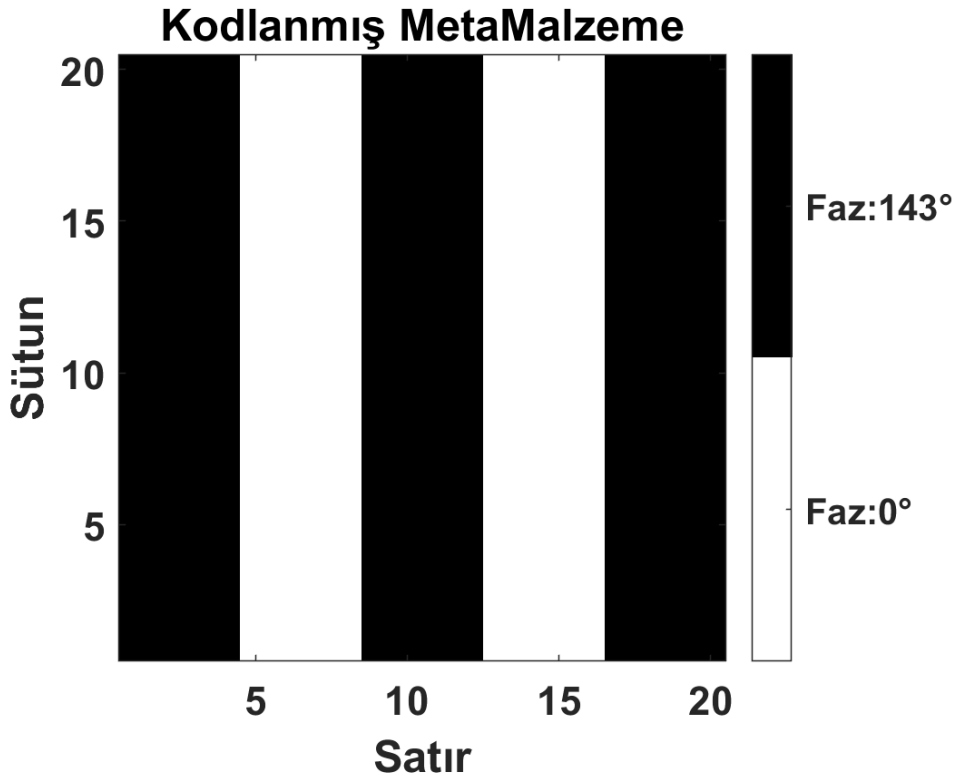
Şekil 3.24 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 3 3B elektrik alan örüntüsü



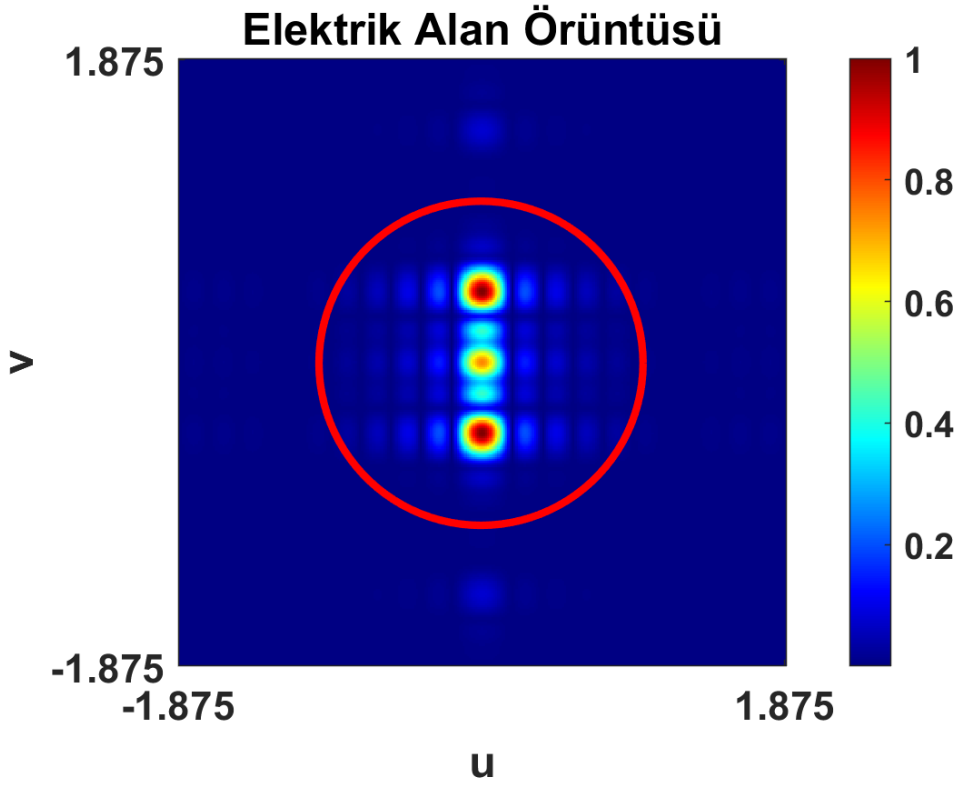
Şekil 3.25 Örnek 3 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 4**

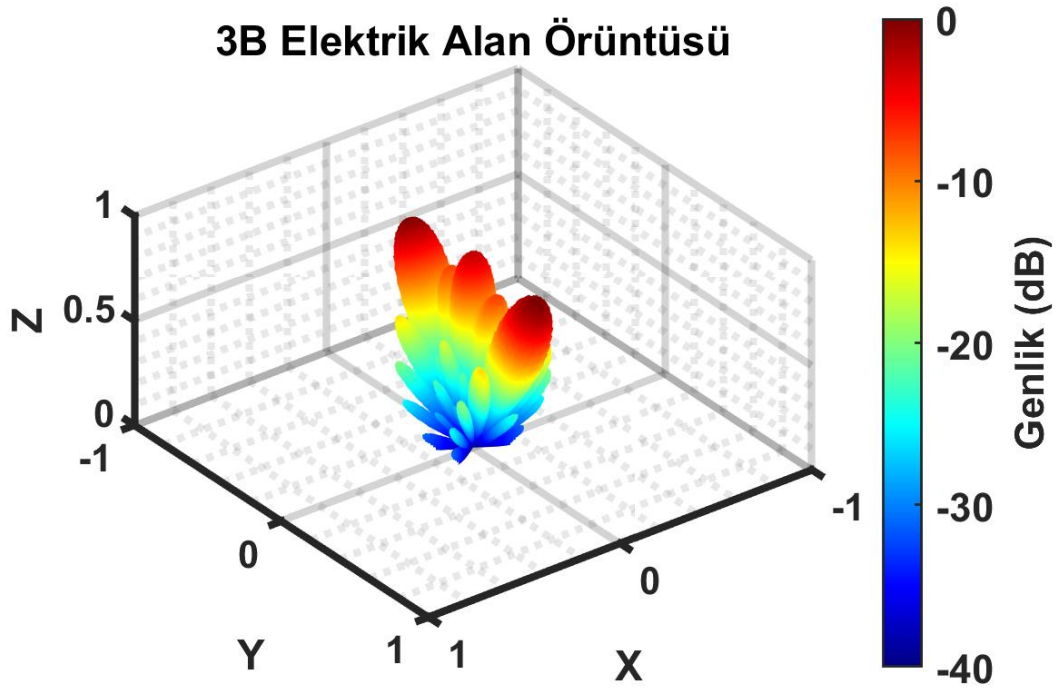
Kodlanmış metamalzeme Şekil 3.26' da verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.27' de, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.28' de verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.29' da, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.30' da verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.31' de verilmiştir.



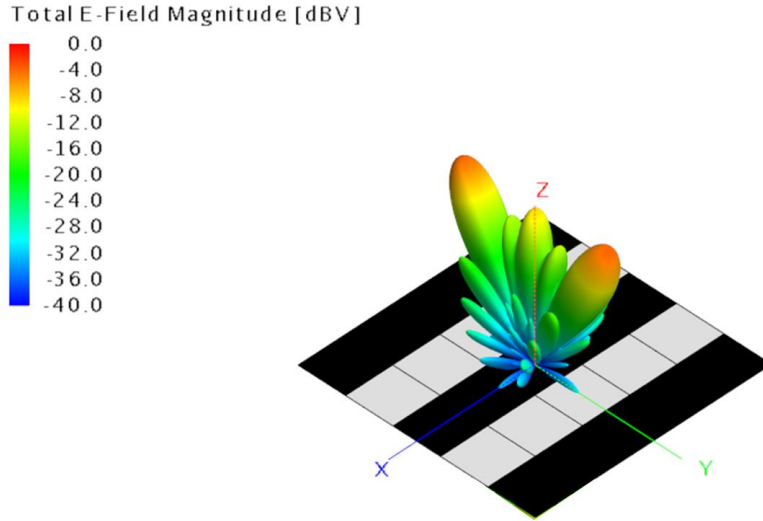
Şekil 3.26 Örnek 4 kodlanmış metamalzeme



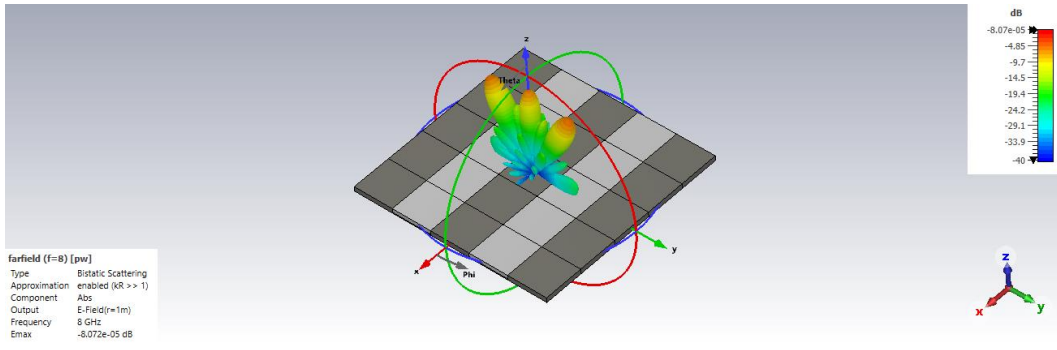
Şekil 3.27 Örnek 4 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



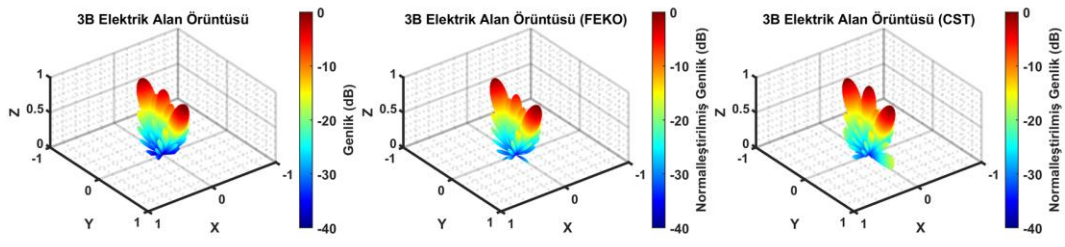
Şekil 3.28 Örnek 4 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.29 Altair FEKO programında elde edilen örnek 4 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



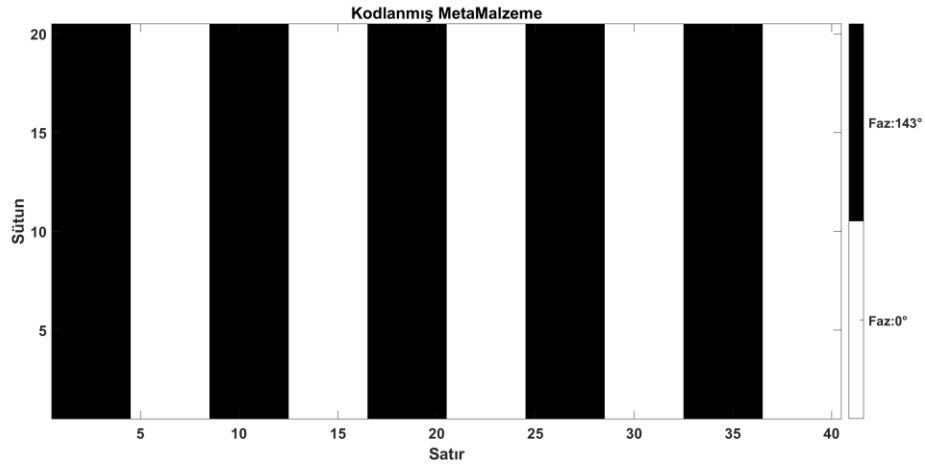
Şekil 3.30 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 4 3B elektrik alan örüntüsü



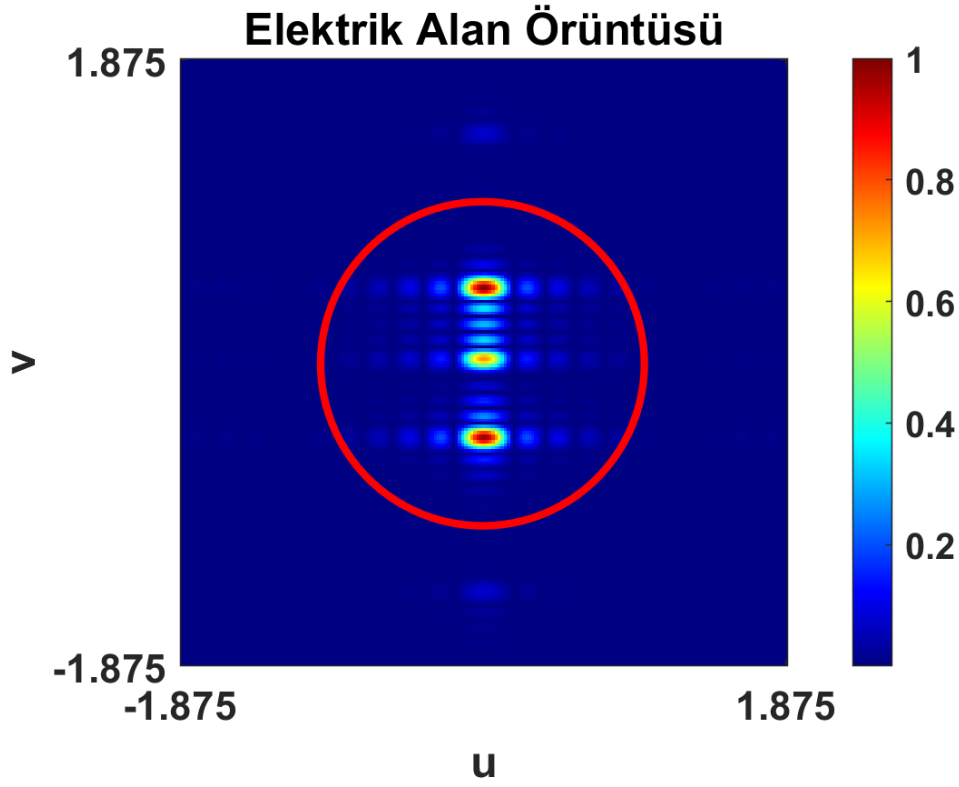
Şekil 3.31 Örnek 4 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 5**

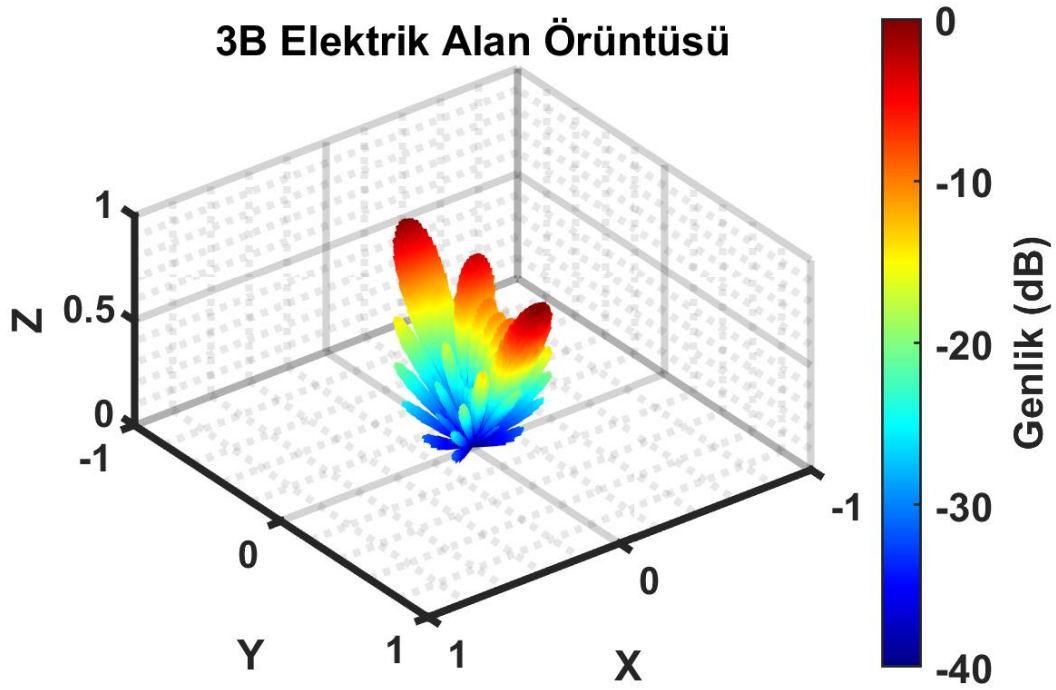
Kodlanmış metamalzeme Şekil 3.32’ de verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.33’ te, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.34’ te verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.35’ te, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.36’ da verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.37’ de verilmiştir.



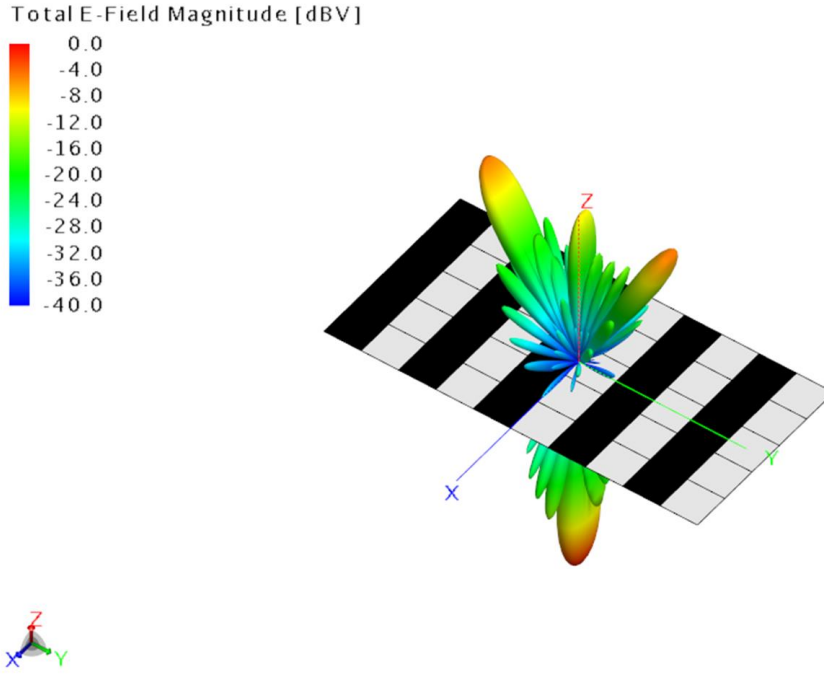
Şekil 3.32 Örnek 5 kodlanmış metamalzeme



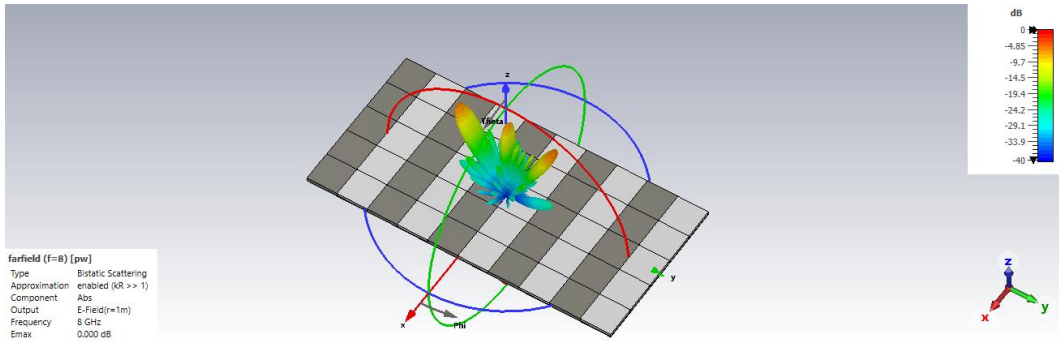
Şekil 3.33 Örnek 5 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



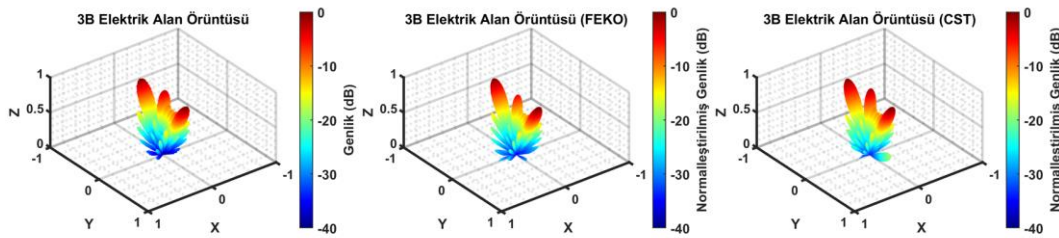
Şekil 3.34 Örnek 5 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.35 Altair FEKO programında elde edilen örnek 5 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



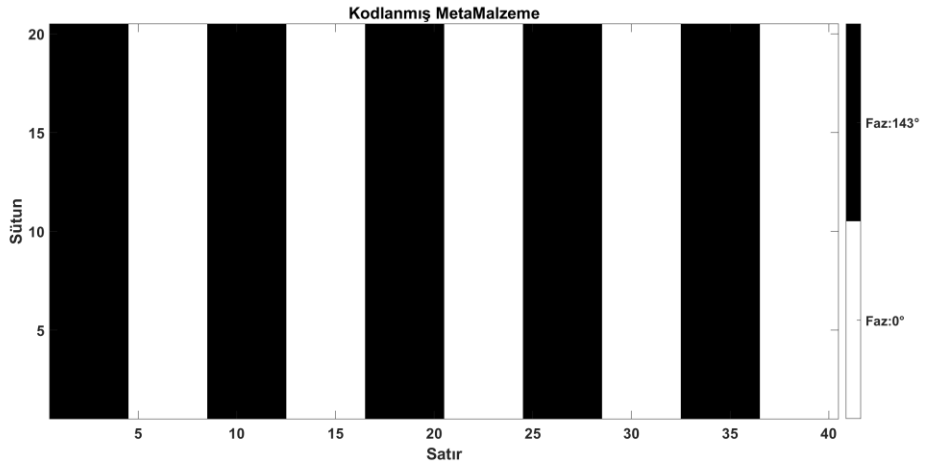
Şekil 3.36 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 5 3B elektrik alan örüntüsü



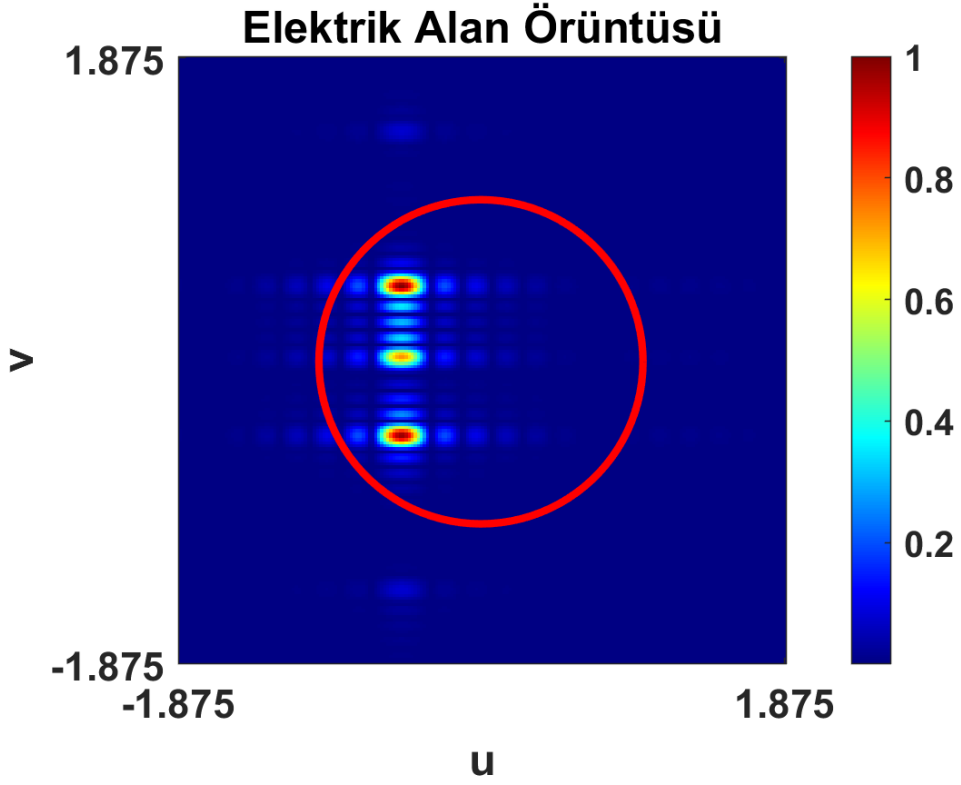
Şekil 3.37 Örnek 5 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 6**

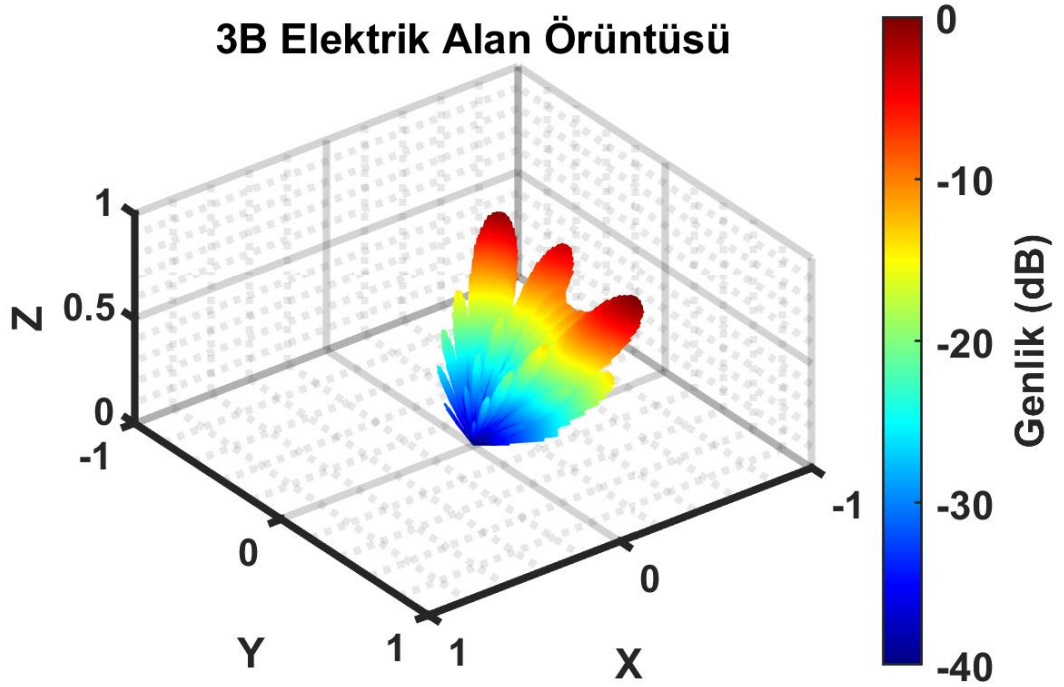
Kodlanmış metamalzeme Şekil 3.38’ de verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.39’ da, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.40’ ta verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.41’ de, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.42’ de verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.43’ te verilmiştir.



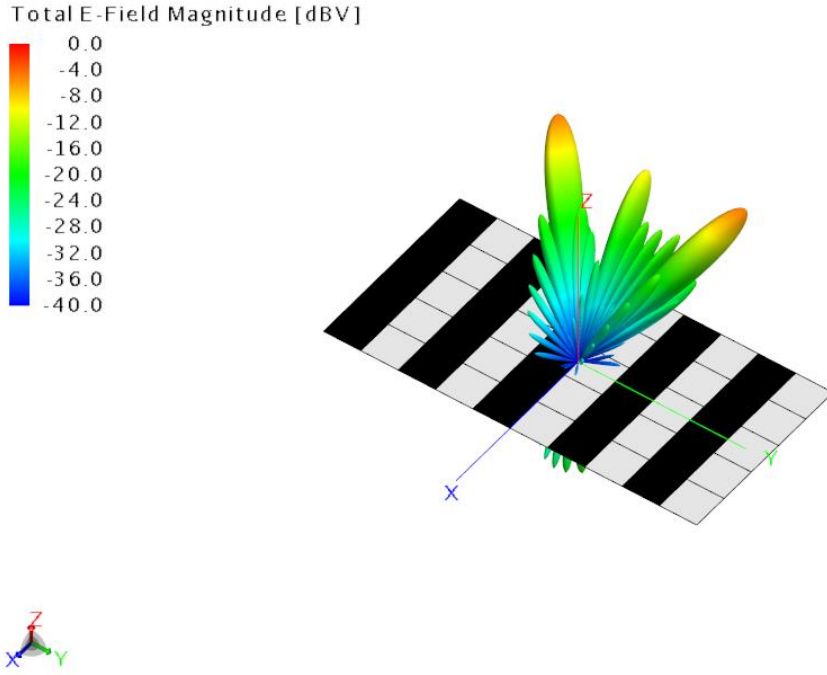
Şekil 3.38 Örnek 6 kodlanmış metamalzeme



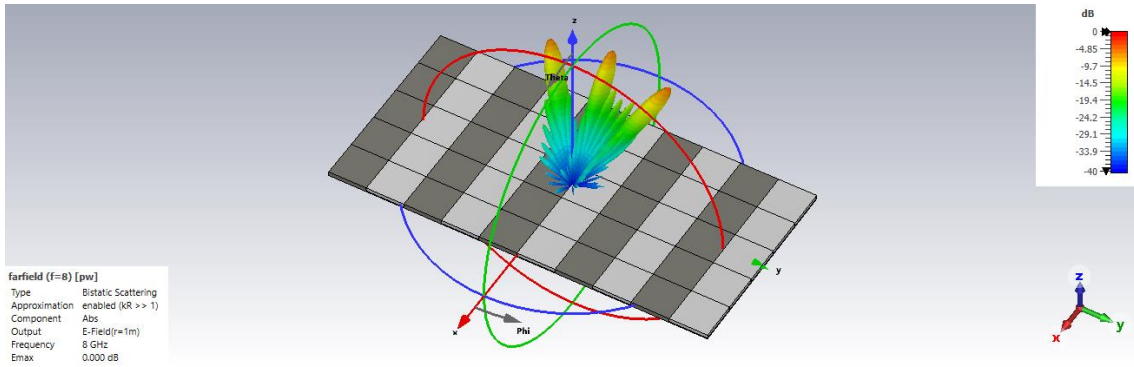
Şekil 3.39 Örnek 6 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



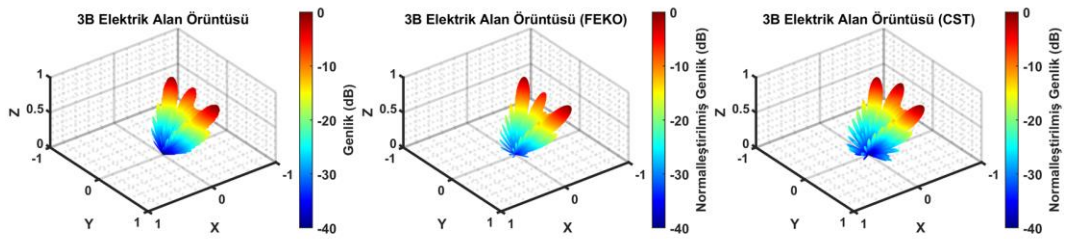
Şekil 3.40 Örnek 6 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.41 Altair FEKO programında elde edilen örnek 6 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



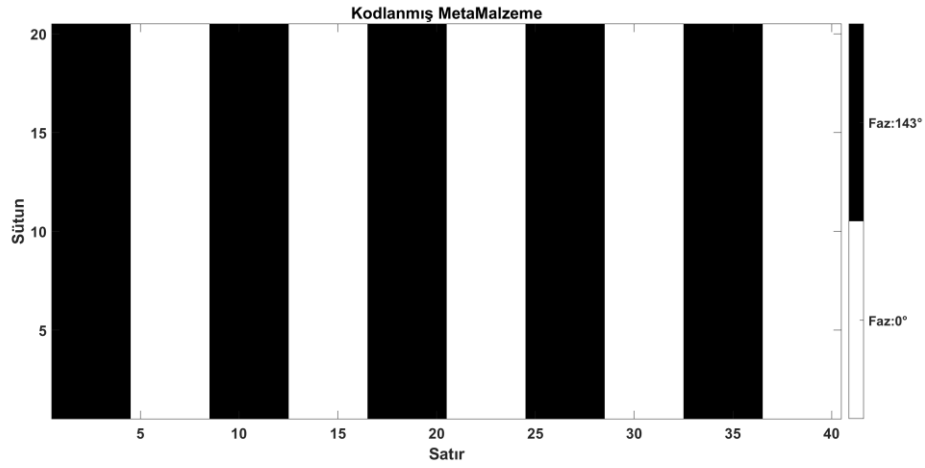
Şekil 3.42 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 6 3B elektrik alan örüntüsü



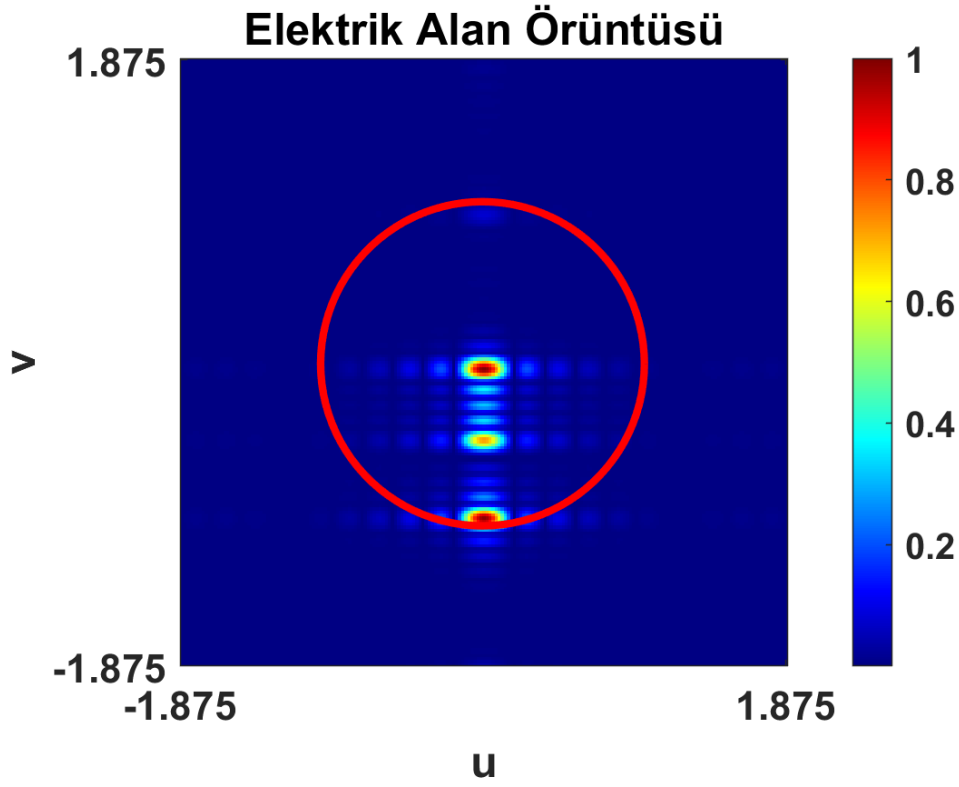
Şekil 3.43 Örnek 6 3B elektrik alan karşılaştırması

- **Örnek 7**

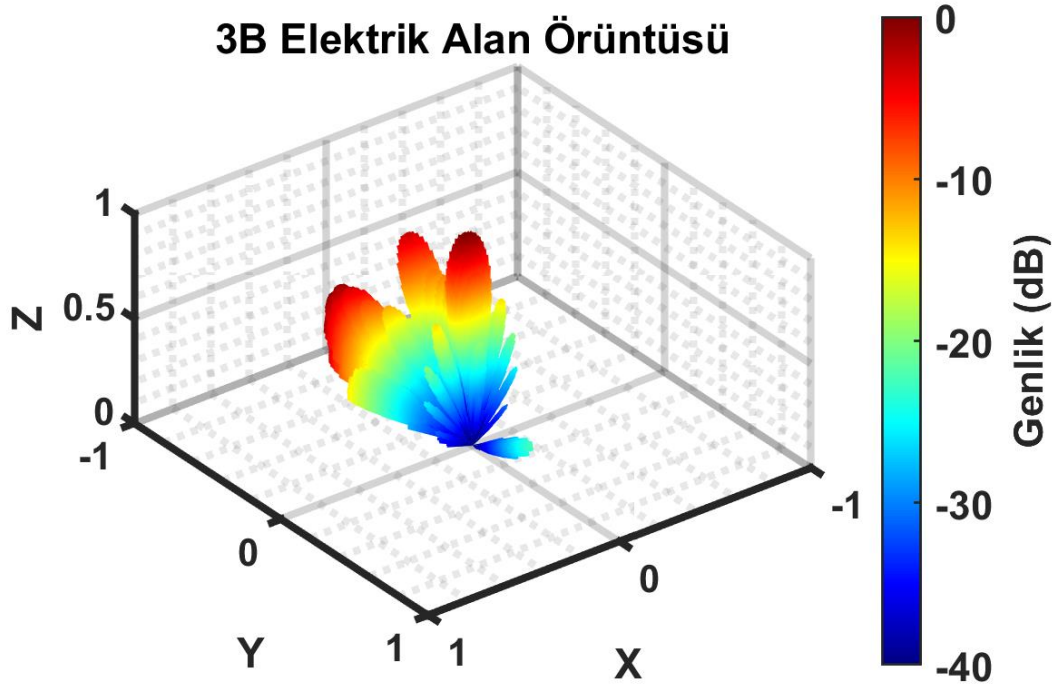
Kodlanmış metamateryel Şekil 3.44’ te verilmiştir. MATLAB programında elde edilen $u - v$ düzleminde elektrik alan örüntüsü ve birim daire Şekil 3.45’ te, $\theta - \phi$ açısına göre elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.46’ da verilmiştir. Altair FEKO programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.47’ de, CST programında elde edilen 3B elektrik alan grafiği Şekil 3.48’ de verilmiştir. 3 programdan elde edilen elektrik alan verileri karşılaştırmanın daha rahat yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.49’ da verilmiştir.



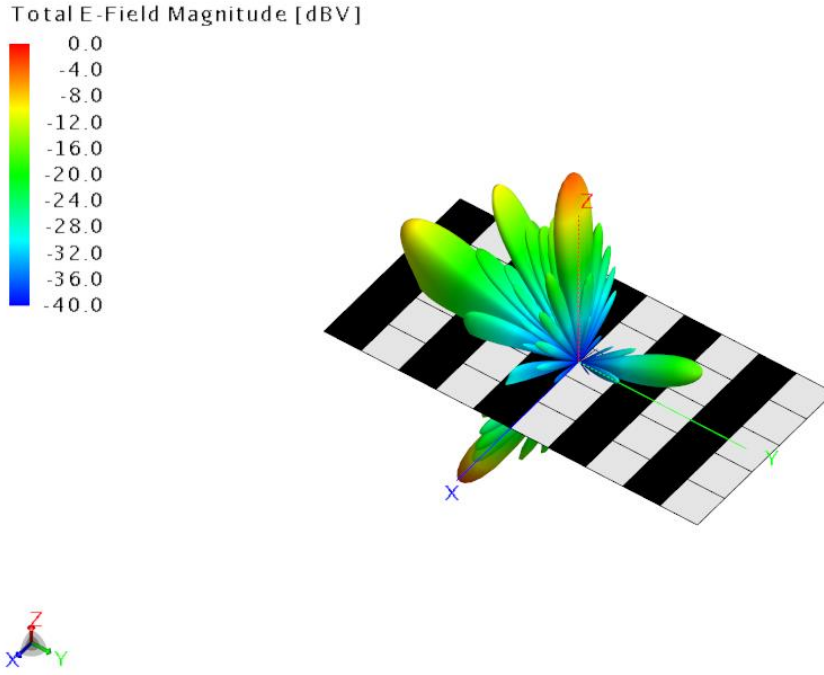
Şekil 3.44 Örnek 7 kodlanmış metamateryel



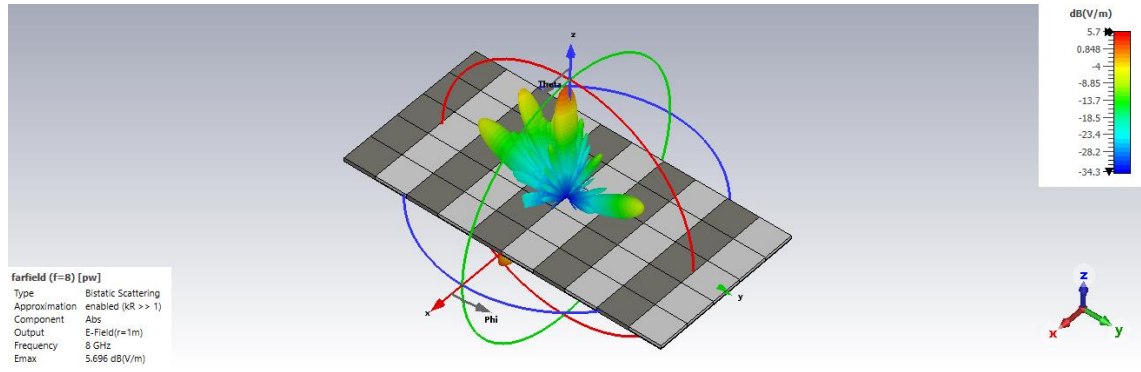
Şekil 3.45 Örnek 7 u-v düzlemi elektrik alan örüntüsü



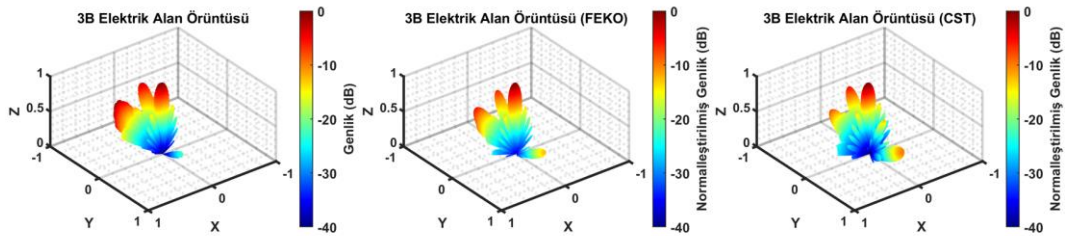
Şekil 3.46 Örnek 7 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.47 Altair FEKO programında elde edilen örnek 7 desibel cinsinden 3B elektrik alan örüntüsü



Şekil 3.48 CST programında elde edilen desibel cinsinden örnek 7 3B elektrik alan örüntüsü



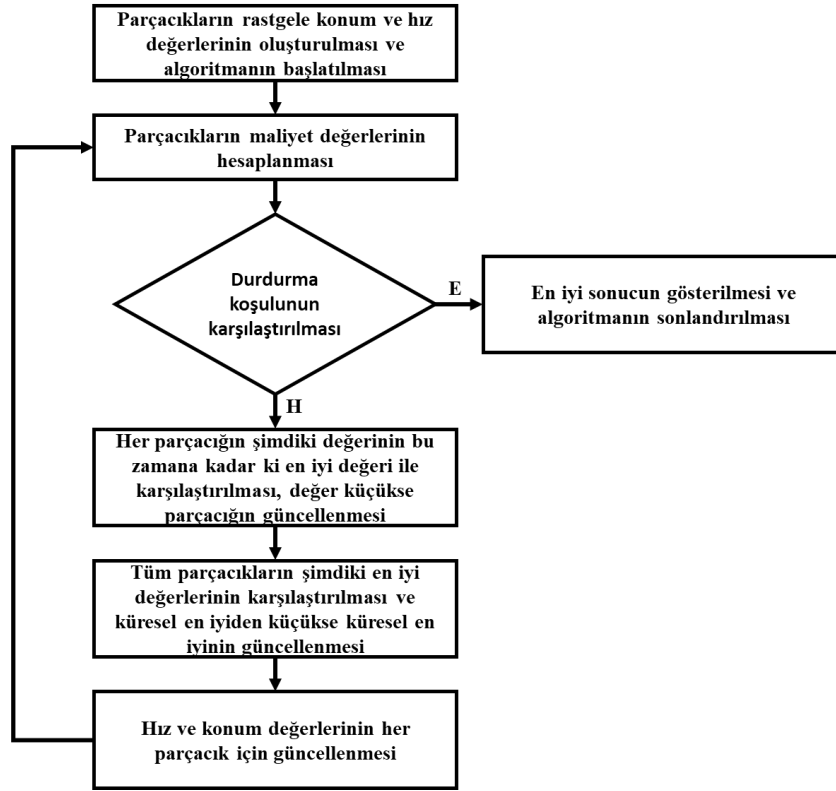
Şekil 3.49 Örnek 7 3B elektrik alan karşılaştırması

Örnek 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 incelendiğinde, nümerik elektromanyetik programlar ile elde edilen uzak alan saçılma örüntülerinin MATLAB ortamında belirtilen formüller ile elde edilen uzak alan saçılma örüntüleri ile benzerlikleri doğrulanmıştır. Kodlanmış metanalzeme için en uygun RKA azaltıcı yapının bulunabilmesi amacıyla, uzak alan saçılma formülleri optimizasyon çalışmalarında maliyet fonksiyonunun oluşturulmasında ve kontrolünde kullanılmıştır.

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

Parçacık sürü optimizasyon algoritması doğada bulunan kuş, balık gibi sürü halinde hareket eden canlılardan esinlenen, sürülerin sosyal davranışlarını ve hareketlerini matematiksel olarak modellenmesi ile ortaya çıkan bir algoritmadır. Algoritma parçacık adı verilen bireylerin sahip oldukları konum ve hız vektörleri baz alınarak, en uygun sonuca ulaşılmasını hedefler. 1995 yılında James Kennedy ve Russel Eberhart tarafından geliştirilmiştir [62, 63].

Algoritmada amaç, birden fazla parçacığın kısıtları verilen optimizasyon uzayında birbirleriyle haberleşerek problemi en uygun sonuca ulaştırmaktır. Bu yüzden her parçacık optimizasyon uzayında en iyi sonucu bulabilecek bir adaydır. Her bir parçacık konum ve hız olarak adlandırılan iki temel parametreye sahiptir. Konum, parçacığın optimizasyon uzayındaki yerini bir diğer ifade ile ilgili parçacık için çözümü ifade ederken hız ise parçacığın hareketinin yön ve büyüklük açısından değeridir. Algoritmanın genel akış şeması Şekil 3.50' de verilmiştir [62].



Şekil 3.50 Parçacık sürü optimizasyon algoritması genel akış şeması

Şekil 3.50’ de verildiği üzere, algoritma, sürüdeki parçacıkların rastgele konum ve hız değerlerinin oluşturulması ile başlar. Böylelikle, her bir parçacık maliyet fonksiyonuna girdi olarak kullanılır ve maliyet değeri hesaplanır. Maliyet değeri durdurma koşulunu sağlarsa en iyi sonuç gösterilir ve algoritma sonlandırılır. Maliyet değeri durdurma koşulunu sağlamazsa, parçacıkların şimdiki değerinin bu zamana kadar elde edilen en iyi değer ile karşılaştırılması ve değer küçük olması durumunda parçacığın değerinin (konum ve hız bilgisinin) güncellenmesi ile algoritma devam eder. Daha sonra, tüm parçacıklar kendi aralarında karşılaştırılır ve maliyet değeri en iyi olan parçacığın konum ve hız bilgisi seçilir, bu değer daha önceki değerden iyi ise küresel en iyi olarak atanır, değilse küresel en iyi değiştirilmeden algoritma devam eder. Bunların sonucunda, hız ve konum değerleri her parçacık için güncellenir ve maliyet değeri hesaplanması adımına geri dönerek algoritma devam eder.

Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında her parçacık bir hafızaya sahiptir. Hafızasında, şu anki konumunu, hızını, bu zamana kadar ulaşabildiği en iyi maliyet değerini ve konumunu bulundurur. Hafızadaki bu değerler bir sonraki durum için konum ve hız değerlerinin güncellenmesinde ve maliyet değerinin hesaplanmasında kullanılır.

J. Kennedy ve R. Eberhart tarafından önerilen, parçacığın hızının ve konumunun güncellenmesi için geliştirilen matematiksel modelleme denklem (3.21) ve (3.22)' de verilmiştir.

$$v_n(t + 1) = v_n(t) + c_1 r_1 (p_e^n(t) - x_n(t)) + c_2 r_2 (g_e^n(t) - x_n(t)) \quad (3.21)$$

$$x_n(t + 1) = x_n(t) + v_n(t + 1) \quad (3.22)$$

Denklem (3.21) ve (3.22)' de t şu anki durumu $t + 1$ ise bir sonraki durumu ifade etmektedir. x_n ve v_n , sırasıyla, n. parçacığın konumunu ve hızını belirtmektedir. p_e^n n. parçacık için şimdiye kadar elde edilen en iyi değeri, g_e^n ise tüm parçacıklar içerisinde elde edilen en iyi değeri, c_1 ve c_2 belirli katsayıları, r_1 ve r_2 ise rastgele katsayıları ifade etmektedir. $v_n(t)$ parçacığın önceki hızını belirtirken, $p_e^n(t) - x_n(t)$ ifadesi parçacığın bu zamana kadar elde ettiği en iyi duruma göre konumunu, $g_e^n(t) - x_n(t)$ ifadesi ise tüm parçacıklar içerisinde bu zamana kadar elde edilen en iyi duruma göre konumunu gösterir.

Denklem (3.21)' da bulunan hız ifadesi üzerinde kontrol sağlamak ve optimizasyon değerlerinde daha etkin sonuçlar elde etmek amacıyla 1998 yılında R. Eberhart ve Y. Shi tarafından w_e eylemsizlik ağırlığı denkleme eklenmiş ve denklem (3.23)'de verildiği gibi son halini almıştır [64].

$$v_n(t + 1) = w_e v_n(t) + c_1 r_1 (p_e^n(t) - x_n(t)) + c_2 r_2 (g_e^n(t) - x_n(t)) \quad (3.23)$$

Tez kapsamında kullanılan parçacık sürü optimizasyon algoritması ikili sistemde kullanılacak şekilde J. Kennedy ve R. Eberhart tarafından yayınlanan *A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm*, ve F. Afshinmanesh, Alireza Marandi, A. Rahimi-Kian tarafından yayınlanan *A Novel Binary Particle Swarm Optimization Method Using Artificial Immune System* adlı çalışmalar dikkate alınarak güncellenmiştir [65, 66]. Böylece kodlanmış metamatlamede bulunan faz tepkileri ile ikili sistem arasında bağıntı kurulmuş ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. J. Kennedy ve R. Eberhart tarafından

önerilen yöntemde sonraki durum için konum güncellemesi hız ifadesinin sigmoid fonksiyonu içerisinde kullanılması ve rastgele üretilen bir sayının bu fonksiyondan küçük ya da büyük eşit olmasıyla kullanılabilceği belirtilmiştir [65]. Kodlanmış metamatizeme üzerinde bulunan her birim hücrenin hız ile arasındaki bağlantı Çizelge 3.1’ de verildiği gibi ifade edilebilir.

Çizelge 3.1 Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında şimdiki konum, sonraki hız ve sonraki konum tablosu

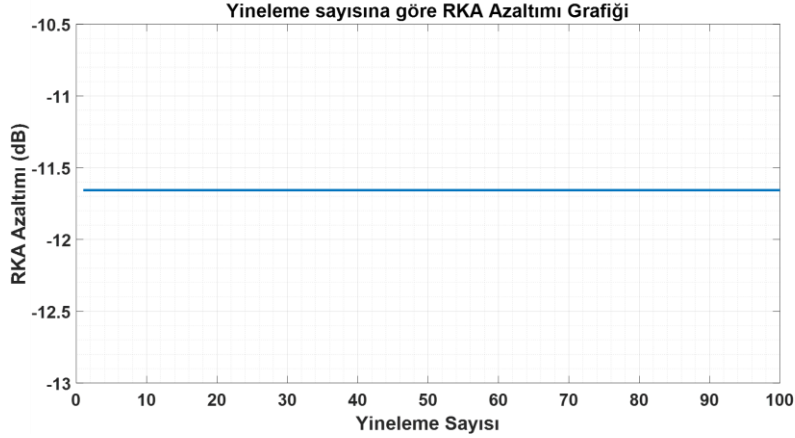
Konum – $x_n(t)$	Hız – $v_n(t + 1)$	Konum – $x_n(t + 1)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Çizelge 3.1’ de verilen değerler incelendiğinde denklem (3.22) ifadesi denklem (3.24)’ de verildiği gibi XOR kapısı ile ifade edilebilir.

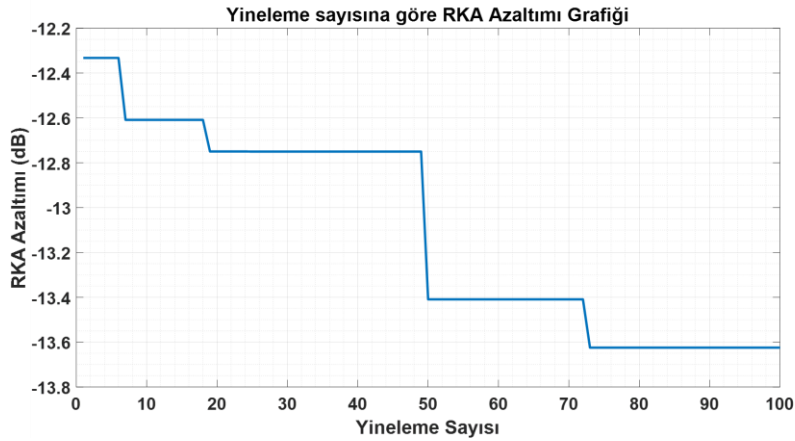
$$x_n(t + 1) = x_n(t) \oplus v_n(t + 1) \quad (3.24)$$

Kodlanmış metamatizeme üzerinde bulunan herhangi bir birim hücre 0 (0° faz tepkisi) durumunda ise hız 0 olduğunda birim hücrenin durumu değişmeyecek, hız 1 olduğunda birim hücrenin durumu 1 (180° faz tepkisi) olacaktır. Öte yandan, kodlanmış metamatizeme üzerinde bulunan herhangi bir birim hücre 1 (180° faz tepkisi) durumunda ise hız 0 olduğunda birim hücrenin durumu değişmeyecek, hız 1 olduğunda birim hücrenin durumu 0 (0° faz tepkisi) olacaktır. Dolayısıyla konum güncelleme denklemi XOR kapısı ile ifade edilebilir. Denklem (3.23)’ de verilen hız ifadesinin ise 0 ya da 1 arasında olabilmesi amacıyla değerin 0 veya 1 ile sınırlandırılması gerekmektedir. Bu amaçla tüm denklem (3.23)’ de verildiği gibi uygulanmış, çıkan sonuç önce en yakın tamsayıya yuvarlanmış daha sonra ise hız sınırları ile 0 ya da 1 değeri alması sağlanmıştır. Denklem (3.23)’ de verilen r_1 ve r_2 katsayıları rastgele üretilen sayılardır. Bu sayıların her birim hücre için üretimi sırasında tekdüze dağılım yerine normal dağılım

kullanılmıştır. Periyodun 10 mm olduğu 4x4 boyutunda süper birim hücre kullanılarak oluşturulan 5x5 kodlanmış metamalzeme üzerinde, 10 adet parçacık ve 100 yineleme sayısı (durum) ile tekdüze dağılım ve normal dağılım kullanıldığında elde edilen en yüksek RKA azaltım grafiği sırasıyla Şekil 3.51 ve Şekil 3.52’ de verilmiştir. RKA azaltımı değerleri, kodlanmış metamalzeme ile elde edilen değerlerin aynı boyutlarda mükemmel elektrik iletken ile elde edilen en yüksek değere oranının desibel cinsinden karşılığıdır.



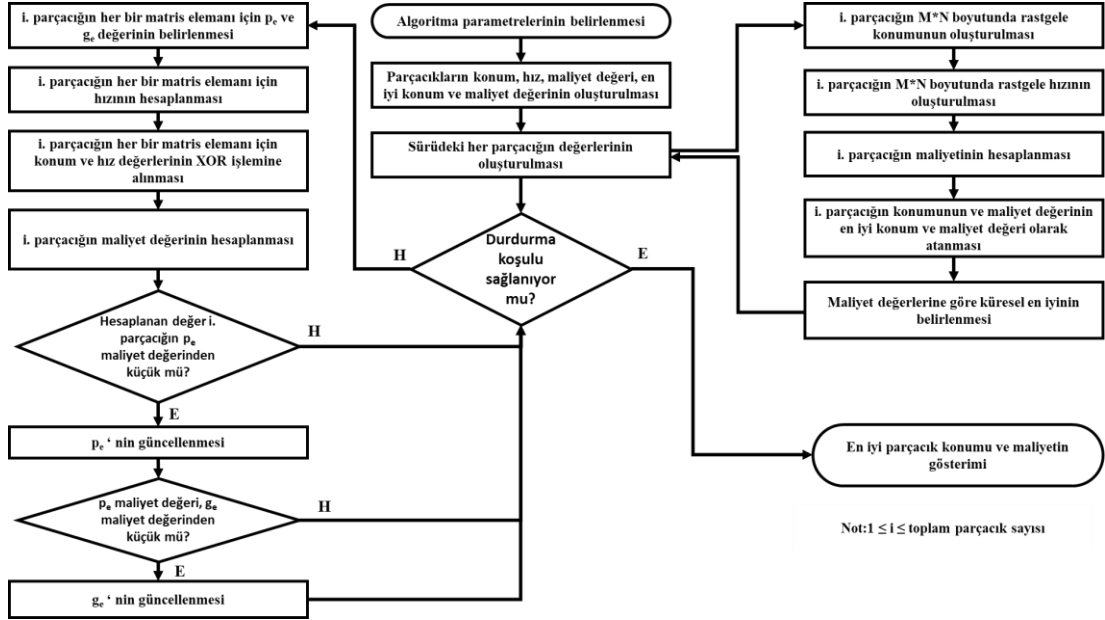
Şekil 3.51 r_1 ve r_2 katsayılarının tekdüze dağılım ile üretilmesi ve optimizasyon sonucu elde edilen RKA azaltımı



Şekil 3.52 r_1 ve r_2 katsayılarının normal dağılım ile üretilmesi ve optimizasyon sonucu elde edilen RKA azaltımı

Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 incelendiğinde normal dağılım ile elde edilen en düşük bi-statik RKA azaltımı tekdüze dağılım ile elde edilen en düşük bi-statik RKA azaltımına göre daha iyidir. Dolayısıyla, tez çalışmasında denklem (3.23)’ de verilen r_1 ve r_2 katsayıları normal dağılım ile elde edilmiştir.

Yukarıda verilen değerlendirmeler göz önüne alınarak optimizasyon kodu MATLAB ortamında oluşturulmuş ve kodlanmış metalmalzeme tasarımı yapılmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu genişletilmiş akış şeması Şekil 3.53’ te verilmiştir.



Şekil 3.53 Parçacık sürü optimizasyon algoritması genişletilmiş akış şeması

4. TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

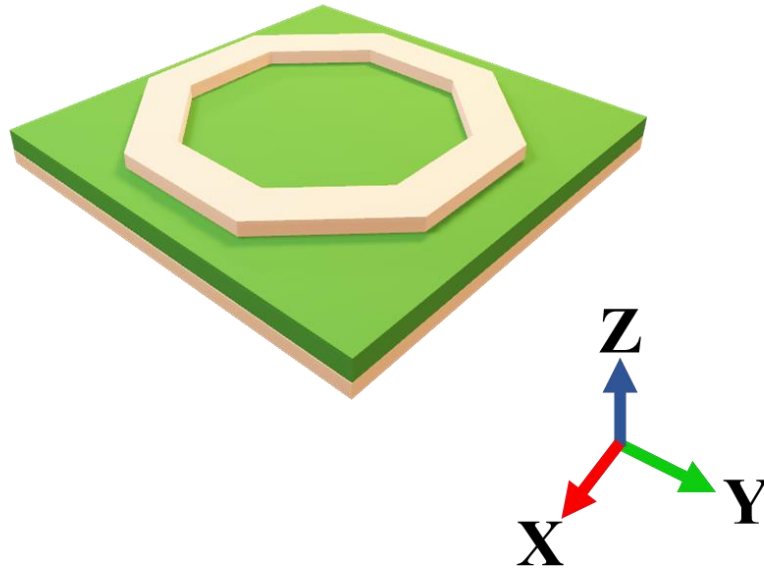
Bu bölümde tez çalışmasını şekillendirecek olan birim hücre ve kodlanmış metamalzeme tasarımı üzerinde durulmuş hem birim hücre tasarımının hem de kodlanmış metamalzemenin benzetim sonuçları paylaşılmıştır. Birim hücre tasarımında, literatürde bulunan yayınlar incelenmiş ve daha önce kodlanmış metamalzeme tasarımı bulunmayan ve C – X – Ku frekans bantlarında kullanılmayan birim hücre yapısı seçilmiştir [12-37]. Birim hücre, CST Studio Suite programı kullanılarak Floquet Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile tasarlanmıştır. Benzer benzetim çalışmaları Altair FEKO ve ANSYS HFSS programları ile de yapılabilir.

Kodlanmış metamalzeme tasarımında, optimizasyon algoritmasının farklı parametreleri için benzetimler yapılmış ve bu parametrelerin en düşük RKA' ya sahip kodlanmış metamalzeme tasarımına olan etkisi incelenmiştir. En uygun sonuçlardan bir tanesi seçilmiş ve MATLAB ortamında hesaplanan değerler ve CST Studio Suite yazılımında gerçekleştirilen tam-dalga benzetim sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

4.1. Birim Hücre Tasarımı

Kodlanmış metamalzeme tasarımının en önemli adımlarından birisi farklı faz tepkilerine sahip birim hücre tasarımıdır. Birim hücreler arası faz farkı ve yansıma katsayısı genlik değerleri kodlanmış metamalzemenin tepkisini doğrudan etkileyen iki kritik parametredir. 10 dB RKA azaltımı için faz farkının denklem (2.37)' de verildiği gibi 143° (-143°) ve 217° (-217°) arasında olması, 20 dB RKA azaltımı için faz farkının denklem (2.41)' de verildiği gibi 168° (-168°) ve 192° (-192°) arasında olması gerekmektedir. Bu koşullar yansıma katsayısı genlik değerinin 1 (ya da 0 dB) olması durumunda geçerlidir. Örneğin, yansıma katsayısı genlik değeri 0.5 (ya da -6 dB) olması, 10 dB RKA azaltımı için faz farkı değerlerinin 127° (-127°) ve 233° (-233°) arasında olmasına olanak tanır. Bu tez çalışması kapsamında birim hücre tasarımında amaç yansıma katsayısı genlik değerinin 1 (ya da 0 dB)' e, yansıma katsayısı faz farkı değerinin 180° ' ye yaklaştırılmasıdır.

Birim hücre tasarımında iki farklı malzeme (alttaş) ile ilerlenmiştir. Rogers Corporation firmasına ait RO4725JXR ($\epsilon_r = 2.64, \tan\delta_e = 0.0026$) alttaşı ve FR-4 ($\epsilon_r = 4.3, \tan\delta_e = 0.025$) alttaşı ile benzetim çalışmaları yapılmıştır [67]. Şekil 4.1’ de verilen düzgün sekizgen şekilli birim hücre tasarımının 2 – 18 GHz aralığında önce 0° ile gelen elektromanyetik dalgada sonrasında ise $15^\circ, 30^\circ$ ve 45° ile gelen elektromanyetik dalgada yansıma katsayıları incelenmiştir. RO4725JXR ile düşük ve kararlı dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip bir alttaş ile düşük profilli, düşük maliyetli ancak göreceli olarak yüksek dielektrik geçirgenlik değerine sahip FR-4 malzemesinin faz tepkileri incelenmiştir.

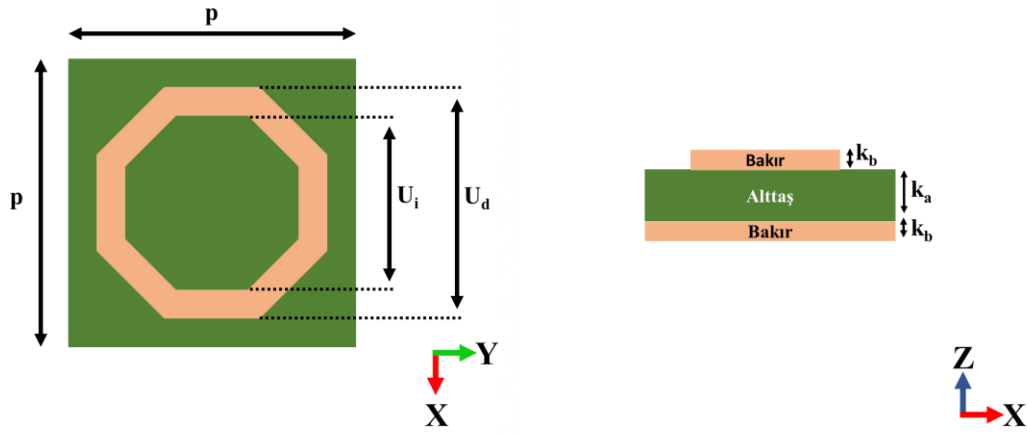


Şekil 4.1 Düzgün sekizgen şekilli birim hücre 3B görüntüsü

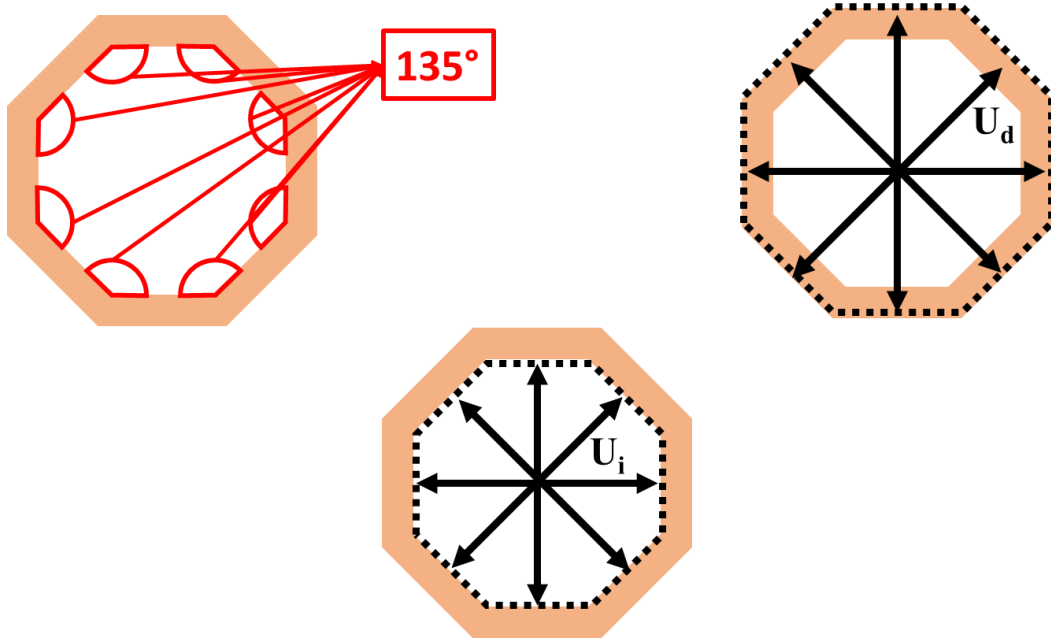
4.1.1. Tek Katmanlı Birim Hücre Tasarımı

Tek katmanlı birim hücre tasarımı Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’ de verildiği üzere üst tabakada metalden oluşan bir şablon orta tabakada alttaş adı verilen dielektrik bir malzeme ve alt tabakada alttaş ile aynı boyutlarda olan metalden oluşmaktadır. Bu kısımdan itibaren tek katmanlı birim hücre 1 (TKBH1) olarak adlandırılacaktır. p periyodu, U_d düzgün sekizgenin dıştaki karşılıklı kenarlar arasındaki uzunluğunu, U_i düzgün sekizgenin içteki karşılıklı kenarlar arasındaki uzunluğunu, k_b bakır kalınlığını ve k_a alttaş kalınlığını belirtmektedir. Amaç, geniş frekans bantında birim hücreler arası faz farkının 143° ile 217° arasında kalabilen, TE – TM polarizasyonda benzer davranışı gösteren, açısız olarak

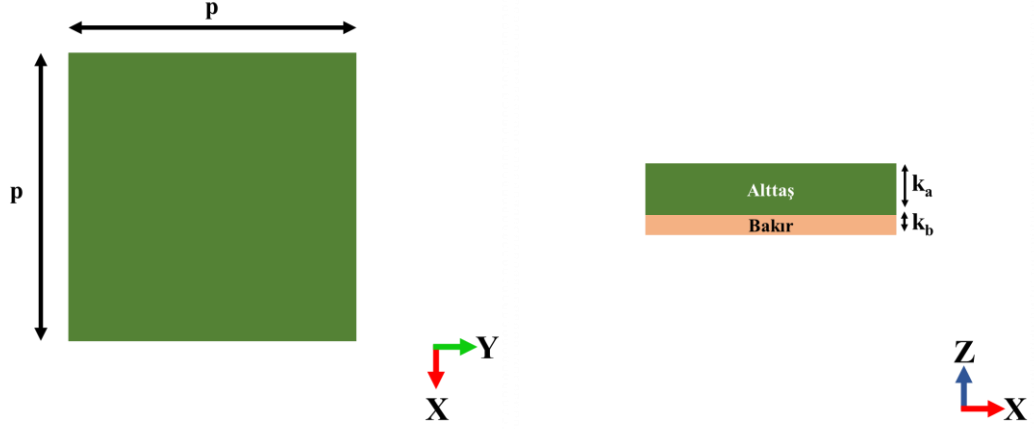
kararlı bir yapıya sahip birim hücre tasarımlarına ulaşmaktır. Düzgün sekizgen ile ilgili genel bilgiler Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’ te verilmiştir.



Şekil 4.2 Düzgün sekizgen şekilli birim hücre ve değişken bilgileri



Şekil 4.3 Düzgün sekizgen açı ve uzunluk bilgileri



Şekil 4.4 Üst tabakada metal şablon bulunmayan birim hücre ve değişken bilgileri

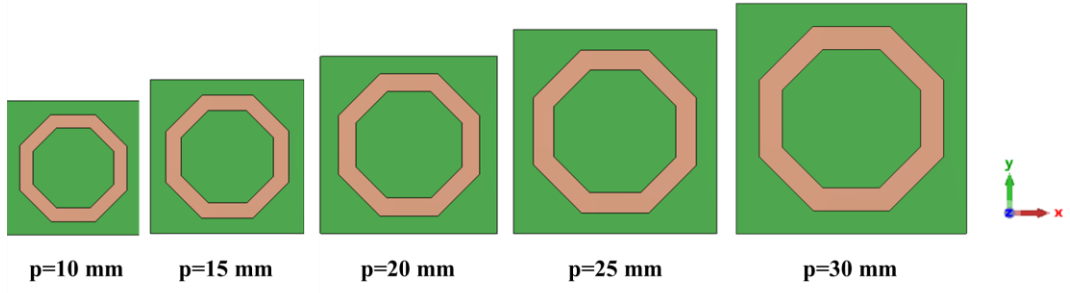
Yansımaya katsayısı faz tepkisi farkı Şekil 4.4' te verilen aynı boyutlarda üst tabakada herhangi bir metal şablon bulunmayan birim hücreye göre hesaplanmıştır. Bu kısımdan itibaren tek katmanlı birim hücre 2 (TKBH2) olarak adlandırılacaktır. Çizelge 4.1 (RO4725JXR) ve Çizelge 4.2 (FR-4)' de verilen değerlere göre düzgün sekizgen şablonlu birim hücre ile aynı p periyoduna sahip üst tabakada herhangi bir metal şablon bulunmayan birim hücrenin benzetim çalışmaları yapılmış, birim hücreler arası faz farkı hesaplanmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Benzetim çalışmaları sadece enine elektrik alan (TE) polarizasyonda normal geliş açısı (0°) için gerçekleştirilmiştir. Düzgün sekizgenin simetrik yapısından dolayı enine manyetik alan (TM) polarizasyonu için sonuçlar aynıdır. Çizelgelerde verilen değerlere göre birim hücre yapısındaki değişiklikler Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7' de görselleştirilmiştir.

Çizelge 4.1 RO4725JXR alttaş kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları

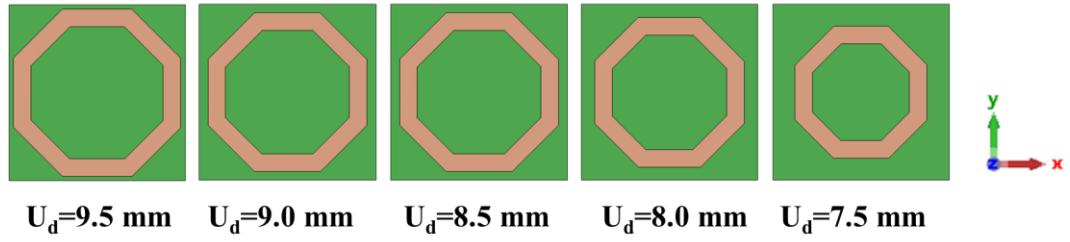
RO4725JXR Alttaş Kullanılarak Yapılan Benzetim Çalışmaları						
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			U_d	U_i	k_a	k_b
1	p	10 mm	8 mm	6 mm	1.542 mm	0.035 mm
		15 mm	12 mm	9 mm		
		20 mm	16 mm	12 mm		
		25 mm	20 mm	15 mm		
		30 mm	24 mm	18 mm		
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			p	U_i	k_a	k_b
2	U_d	9.5 mm	10 mm	7.5 mm	1.542 mm	0.035 mm
		9.0 mm		7.0 mm		
		8.5 mm		6.5 mm		
		8.0 mm		6.0 mm		
		7.5 mm		5.5 mm		
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			p	U_d	k_a	k_b
3	U_i	7.5 mm	10 mm	8.0 mm	1.542 mm	0.035 mm
		7.0 mm				
		6.5 mm				
		6.0 mm				
		5.5 mm				

Çizelge 4.2 FR-4 alttaş kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları

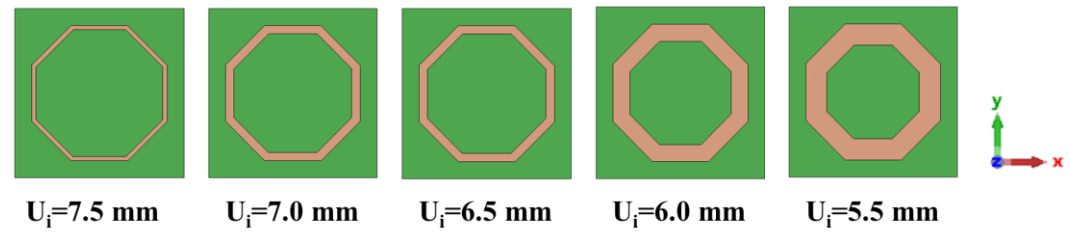
FR-4 Alttaş Kullanılarak Yapılan Benzetim Çalışmaları						
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			U_d	U_i	k_a	k_b
1	p	10 mm	8 mm	6 mm	1.6 mm	0.035 mm
		15 mm	12 mm	9 mm		
		20 mm	16 mm	12 mm		
		25 mm	20 mm	15 mm		
		30 mm	24 mm	18 mm		
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			p	U_i	k_a	k_b
2	U_d	9.5 mm	10 mm	7.5 mm	1.6 mm	0.035 mm
		9.0 mm		7.0 mm		
		8.5 mm		6.5 mm		
		8.0 mm		6.0 mm		
		7.5 mm		5.5 mm		
Karşılaştırma Grafiği	Değişken	Benzetim Yapılan Değerler	Sabit Tutulan Değişkenler ve Değerler			
			p	U_d	k_a	k_b
3	U_i	7.5 mm	10 mm	8.0 mm	1.6 mm	0.035 mm
		7.0 mm				
		6.5 mm				
		6.0 mm				
		5.5 mm				



Şekil 4.5 p değerine göre birim hücre değişimi

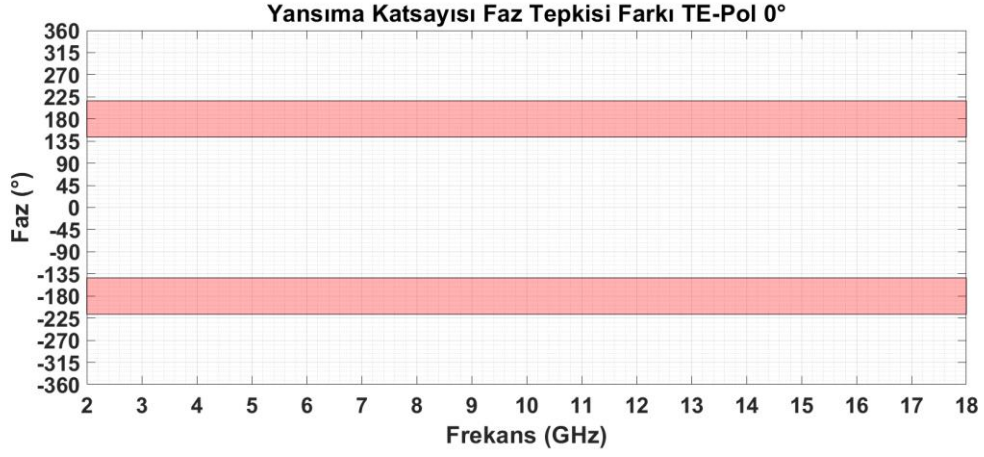


Şekil 4.6 U_d değerine göre birim hücre değişimi



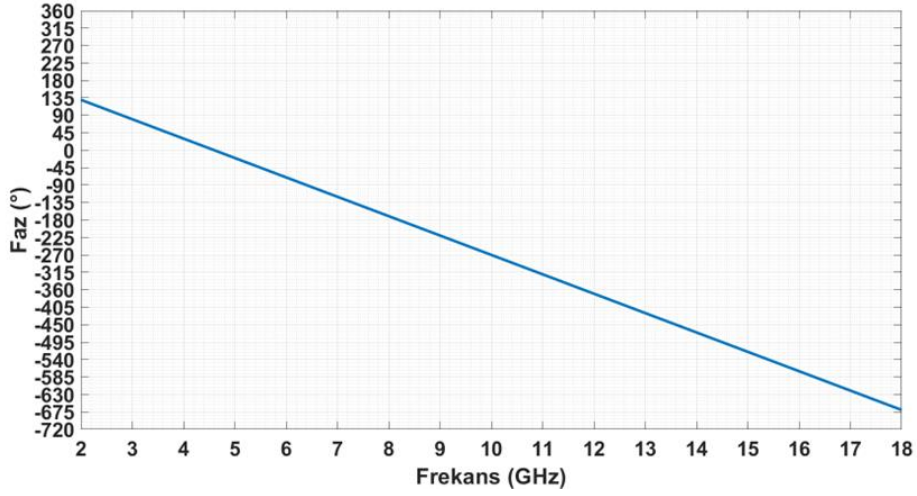
Şekil 4.7 U_i değerine göre birim hücre değişimi

RO4725JXR altaşı veya FR-4 ile tasarlanan TKBH1 ve TKBH2 birim hücrelerinin genlik tepkilerinin 0 dB' ye yakın olması, faz tepkisi farklarının ise Şekil 4.8' de verildiği gibi en az 10 dB RKA azaltımı için $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında olması (kırmızı taralı alan) tasarım hedefi olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma grafiklerinde bu husus dikkate alınmıştır.

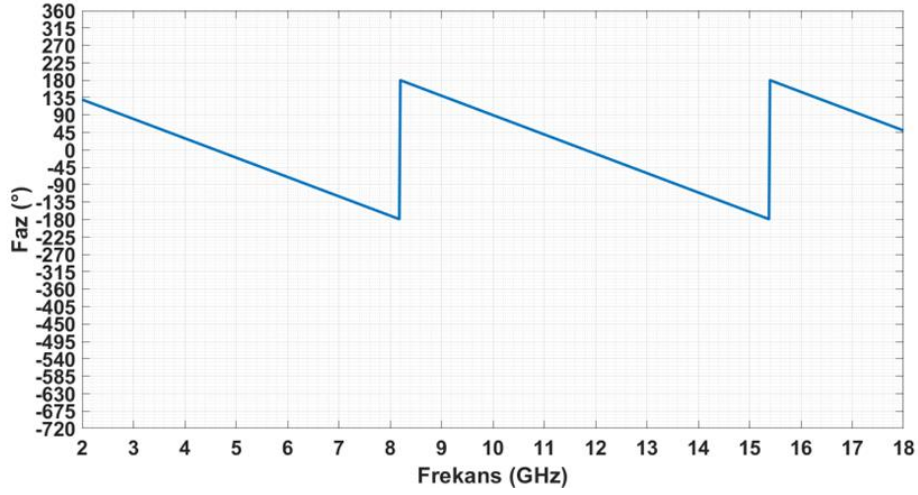


Şekil 4.8 Yansıma katsayısı faz tepkisi fark grafiği

Öte yandan yansıma katsayısı faz tepkisi grafikleri her 360° (ya da 2π)' de aynı değeri vereceği için -180° ile 180° arasında olacak şekilde, Şekil 4.9 yerine Şekil 4.10' da gösterildiği gibi verilmiştir. Her iki grafik (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10) aynı faz tepkisine sahip değerleri göstermektedir.



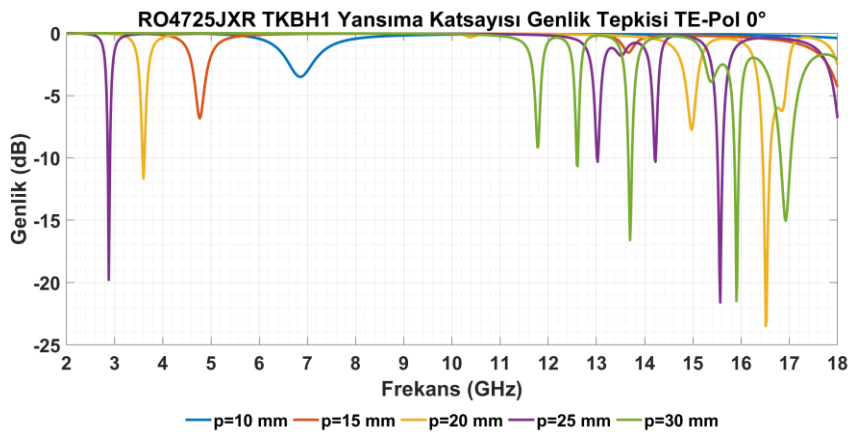
Şekil 4.9 Yansıma katsayısı faz tepkisinin fazın 360° 'de tekrarından bağımsız gösterimi



Şekil 4.10 Yansıma katsayısı faz tepkisinin fazın 360° 'de tekrarından dolayı -180° ile 180° arasında gösterimi

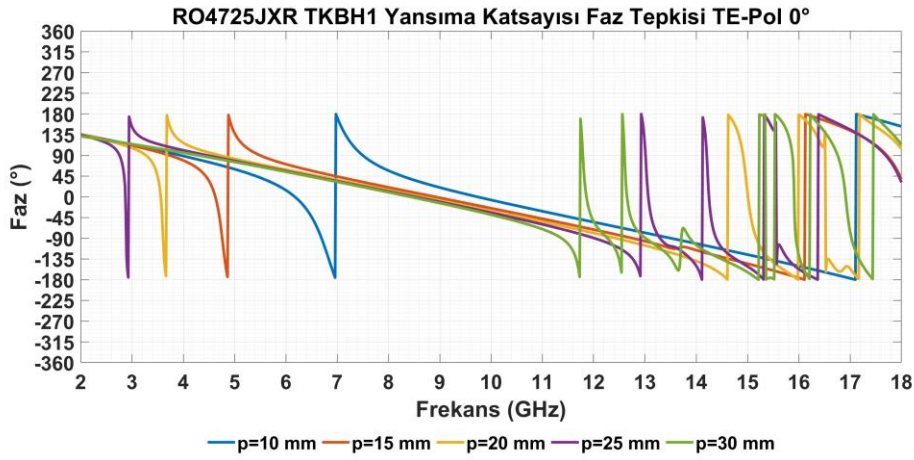
RO4725JXR alttaş ile yapılan çalışmalar Şekil 4.11 ve Şekil 4.25 arasında, FR-4 alttaş ile yapılan çalışmalar Şekil 4.26 ve Şekil 4.40 arasında verilmiştir.

RO4725JXR TKBH1 için Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de, RO4725JXR TKBH2 için Şekil 4.13 ve Şekil 4.14' de Çizelge 4.1' de verilen Karşılaştırma Grafiği 1' e ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. RO4725JXR TKBH1 ve RO4725JXR TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.15' te verilmiştir. RO4725JXR TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.

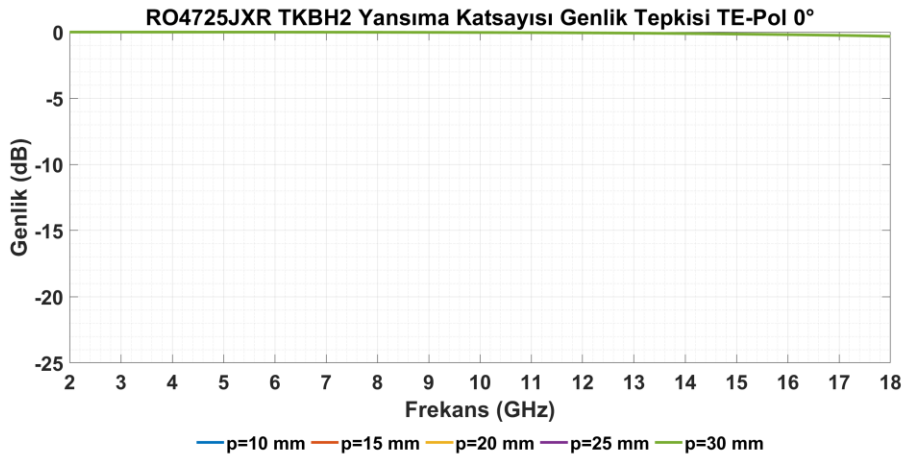


Şekil 4.11 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen

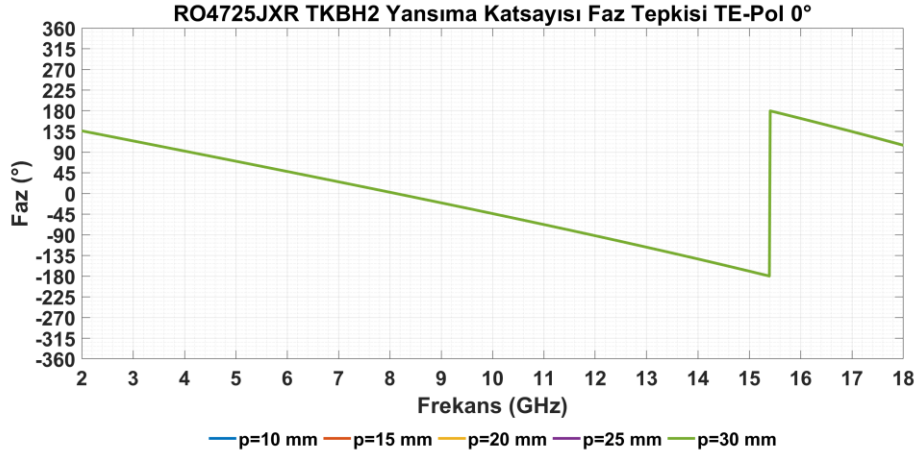
değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



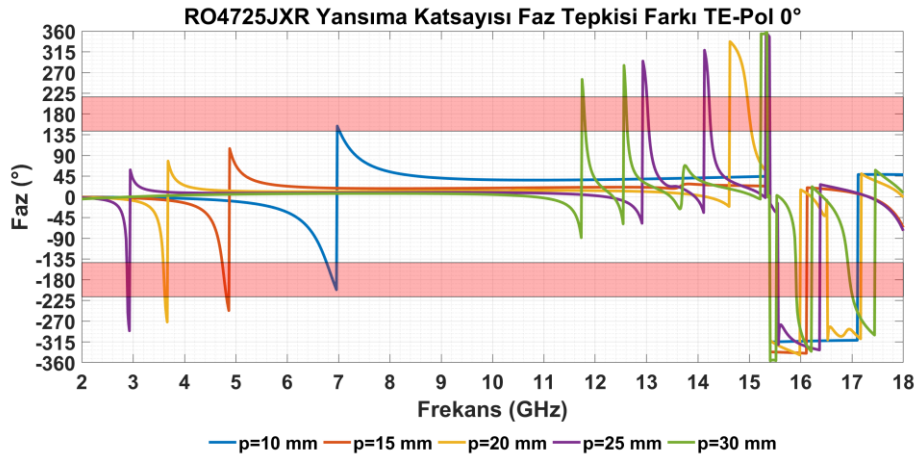
Şekil 4.12 RO4725JXR altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.13 RO4725JXR altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.14 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği

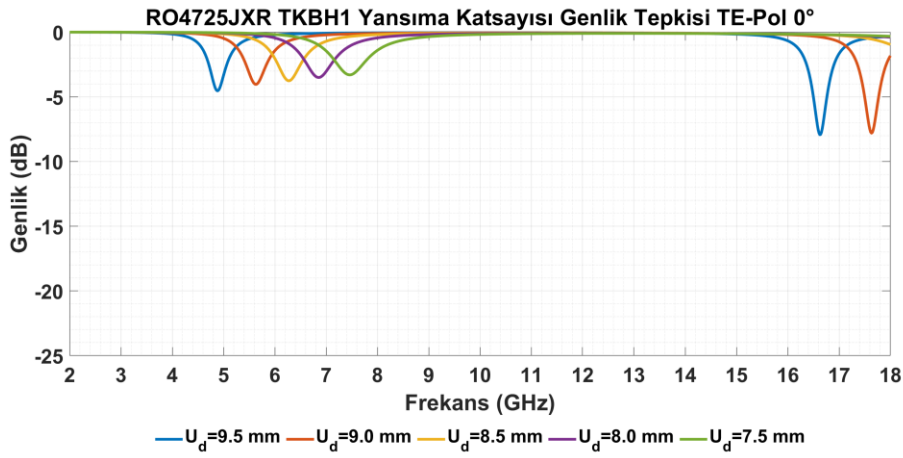


Şekil 4.15 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

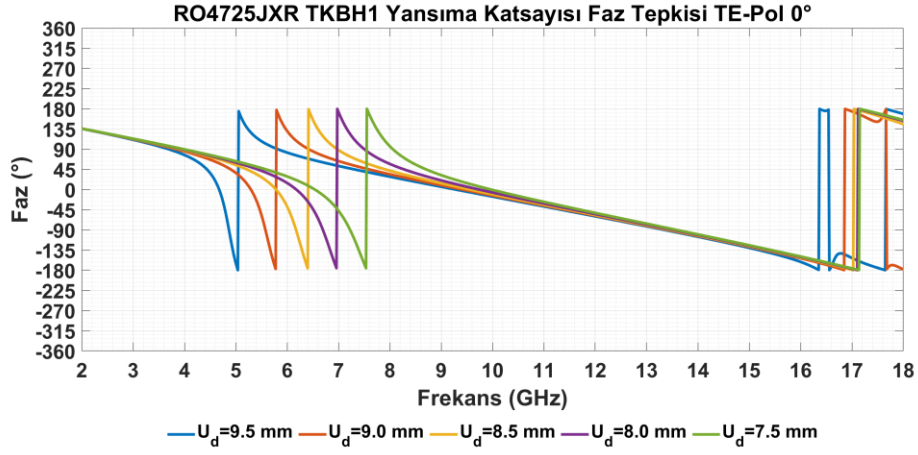
Şekil 4.11 ile Şekil 4.15’ de verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında kararlı genlik ve faz farkı tepkisinin elde edilebilmesi amacıyla p periyodunun 10 mm olması yeterlidir. Periyot arttıkça düşük frekanslarda (S – C bantı arası) faz tepkisi kontrolü yapılabilmektedir ancak yüksek frekanslarda (Ku bant) faz tepkisi ani değişimlere sahip

olduğundan kararlı bir yapı gözlenememektedir. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.15) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

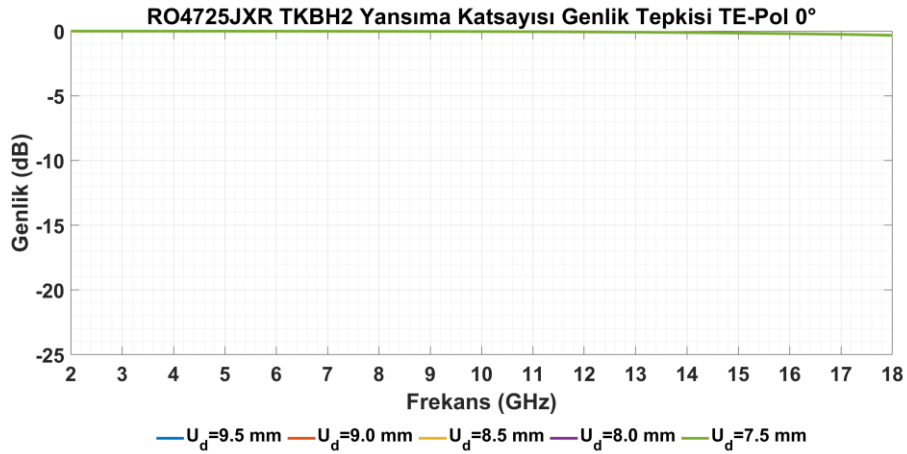
RO4725JXR TKBH1 için Şekil 4.16 ve Şekil 4.17' de, RO4725JXR TKBH2 için Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da Çizelge 4.1' de verilen Karşılaştırma Grafiği 2' ye ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. RO4725JXR TKBH1 ve RO4725JXR TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.20' de verilmiştir. RO4725JXR TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.



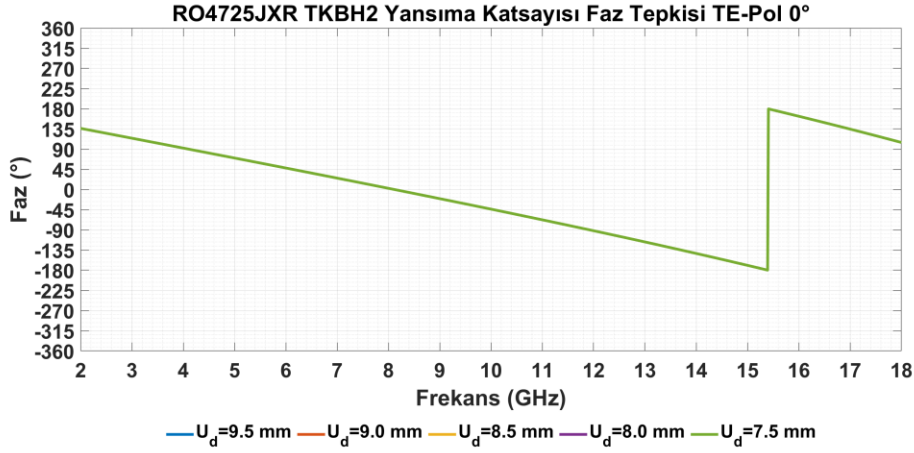
Şekil 4.16 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



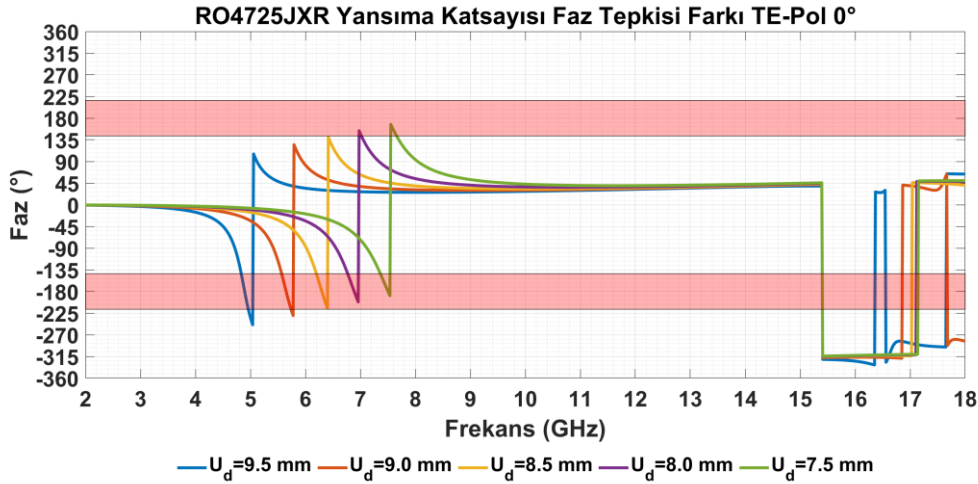
Şekil 4.17 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.18 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.19 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği

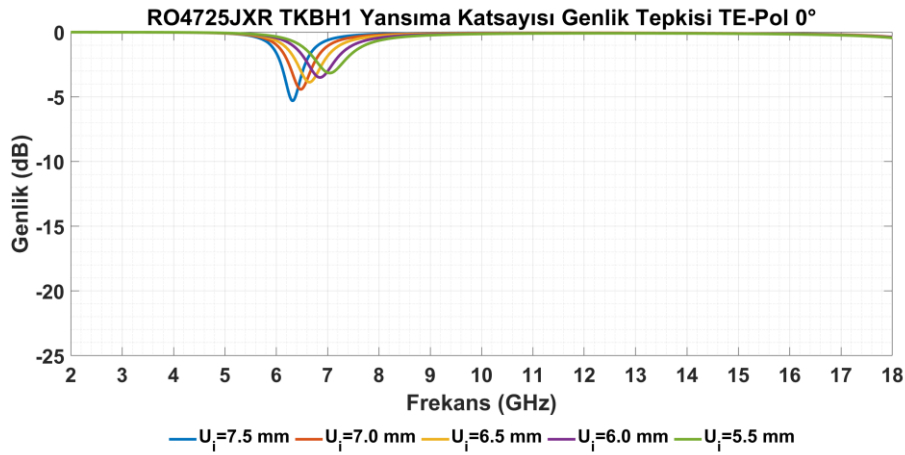


Şekil 4.20 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

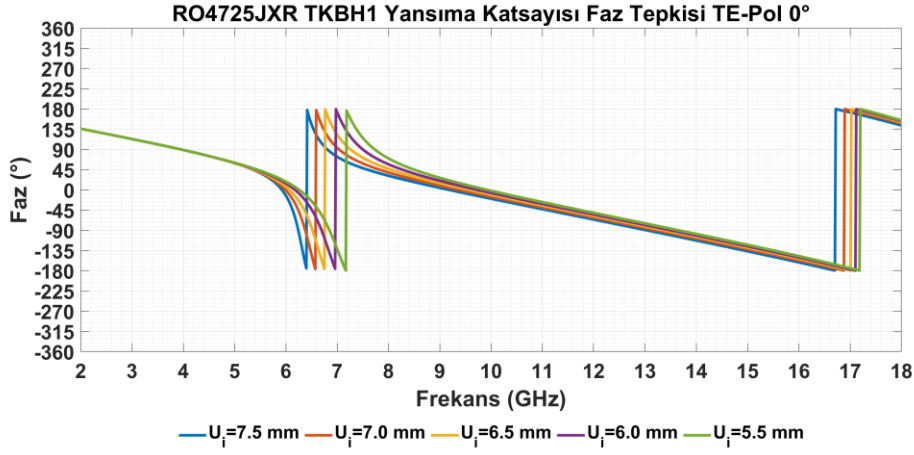
Şekil 4.16 ile Şekil 4.20’ te verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında genlik ve faz tepkileri genel olarak karardır. Geniş frekans bantına ulaşabilmek amacıyla U_d değerinin 9.5 mm olması yeterlidir. U_d değişimi ile U_i değişimi paralel olduğu için düzgün

sekizgen şekilli yapının küçük ölçekli olması band genişliğini azaltmaktadır. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.20) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

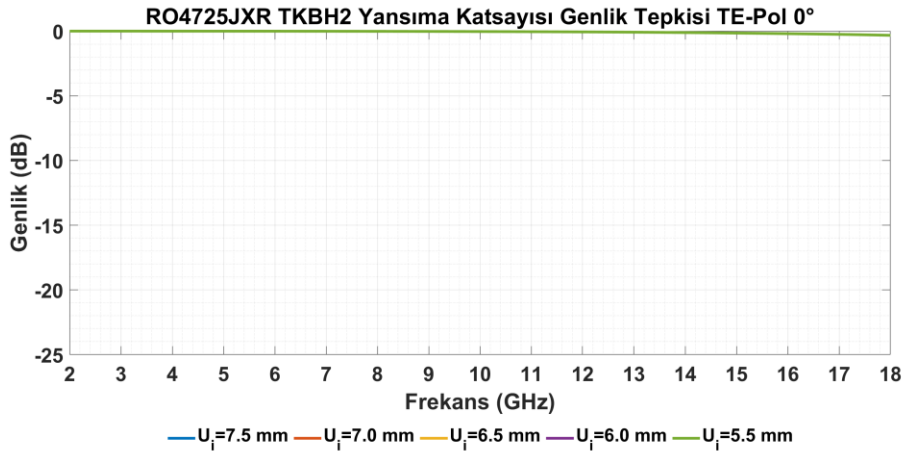
RO4725JXR TKBH1 için Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’ de, RO4725JXR TKBH2 için Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’ te Çizelge 4.1’ de verilen Karşılaştırma Grafiği 3’ e ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. RO4725JXR TKBH1 ve RO4725JXR TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.25’ te verilmiştir. RO4725JXR TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.



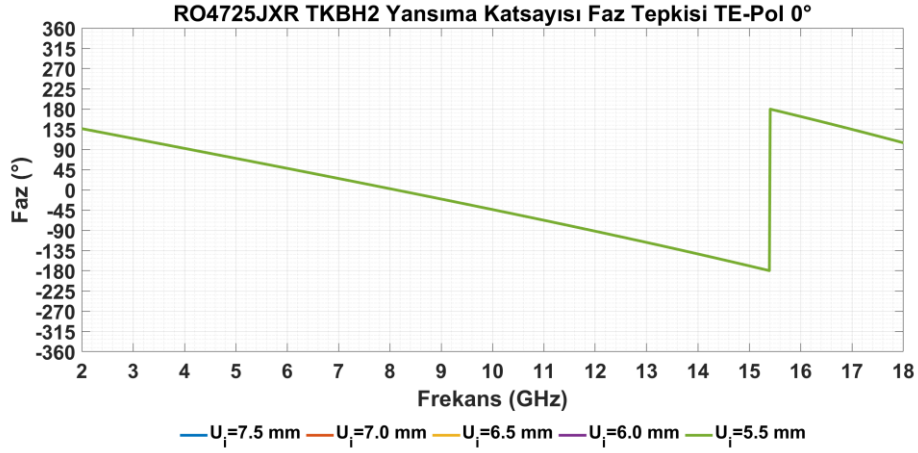
Şekil 4.21 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



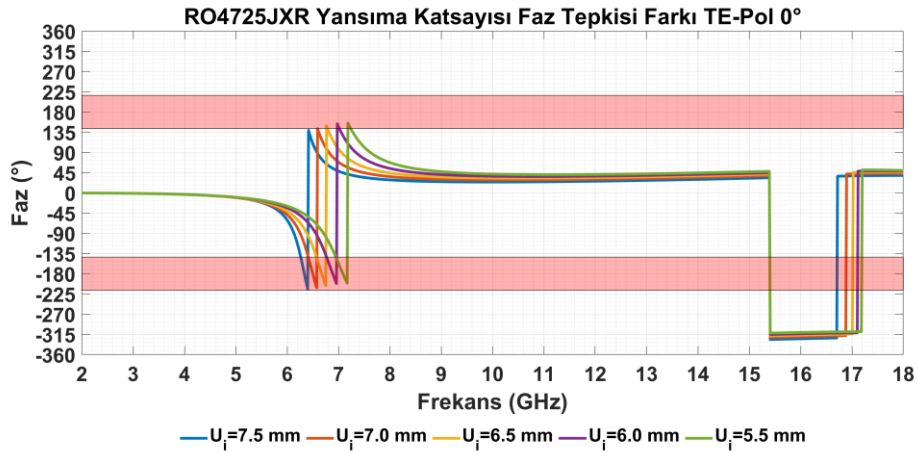
Şekil 4.22 RO4725JXR altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.23 RO4725JXR altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.24 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği

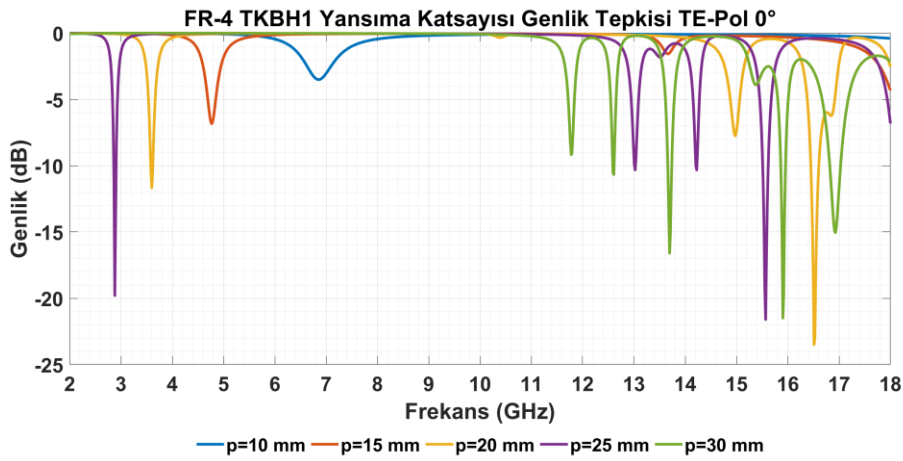


Şekil 4.25 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

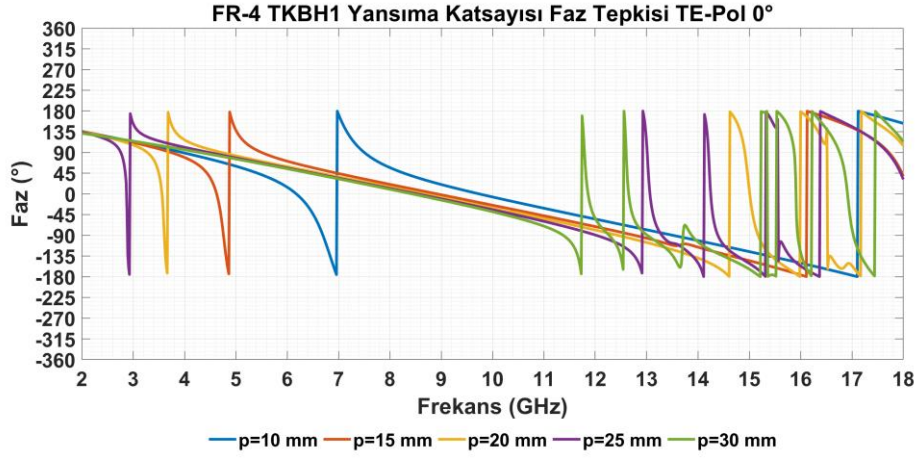
Şekil 4.21 ile Şekil 4.25’ de verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında genlik ve faz tepkileri genel olarak kararlıdır. Geniş frekans bantına ulaşabilmek amacıyla U_i değerinin 7.5 mm olması yeterlidir. U_d değişimi sabit olduğundan U_i değeri azaldığında

faz tepkisi kontrolü için frekans bantı daralmaktadır. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.25) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

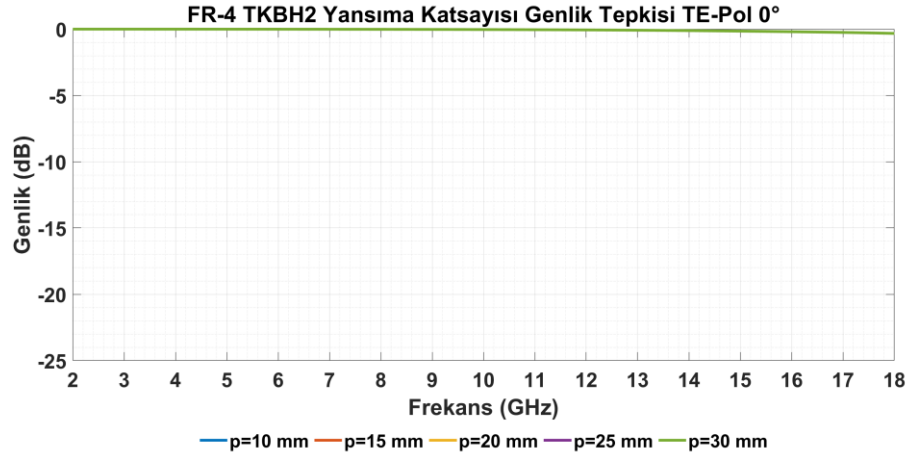
FR-4 TKBH1 için Şekil 4.26 ve Şekil 4.27' de, FR-4 TKBH2 için Şekil 4.28 ve Şekil 4.29' da Çizelge 4.2' de verilen Karşılaştırma Grafiği 1' e ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. FR-4 TKBH1 ve FR-4 TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.30' da verilmiştir. FR-4 TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.



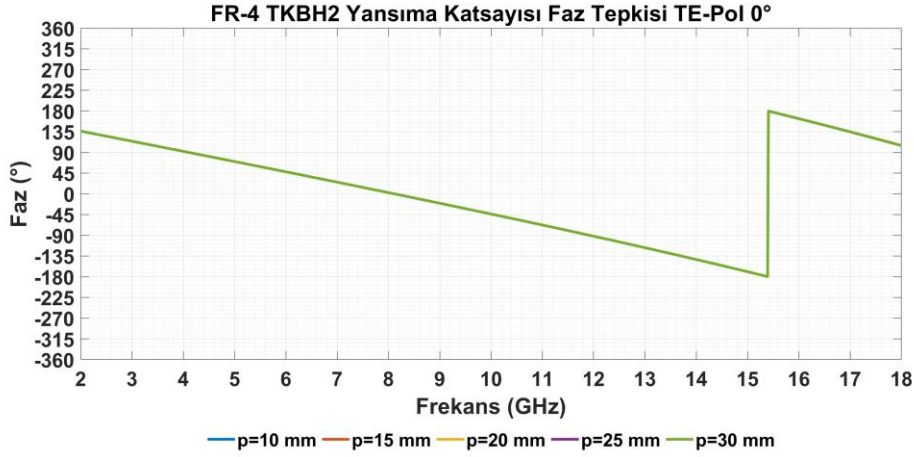
Şekil 4.26 FR-4 altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



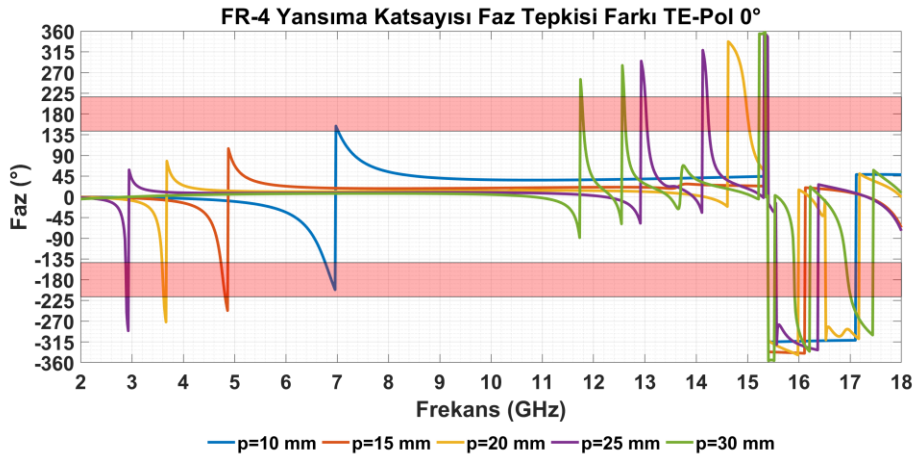
Şekil 4.27 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.28 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.29 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği

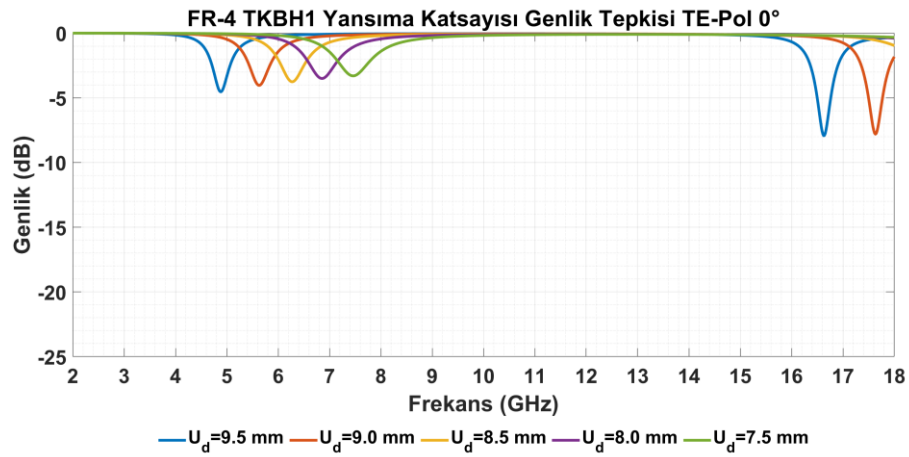


Şekil 4.30 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 1’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

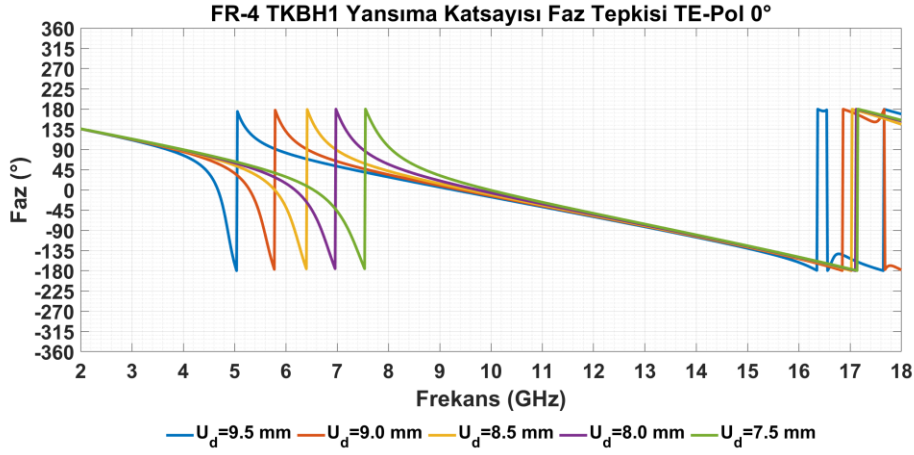
Şekil 4.26 ile Şekil 4.30’ te verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında kararlı genlik ve faz farkı tepkisinin elde edilebilmesi amacıyla p periyodunun 10 mm olması yeterlidir. Periyot arttıkça düşük frekanslarda (S – C bantı arası) faz tepkisi kontrolü yapılabilmektedir ancak yüksek frekanslarda (Ku bant) faz tepkisi ani değişimlere sahip

olduğundan kararlı bir yapı gözlenememektedir. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.30) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

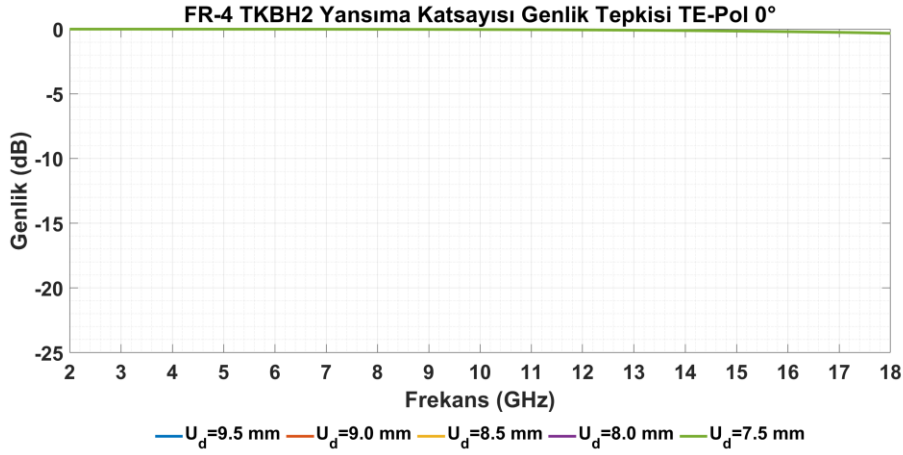
FR-4 TKBH1 için Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’ de, FR-4 TKBH2 için Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’ te Çizelge 4.2’ de verilen Karşılaştırma Grafiği 2’ ye ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. FR-4 TKBH1 ve FR-4 TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.35’ te verilmiştir. FR-4 TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.



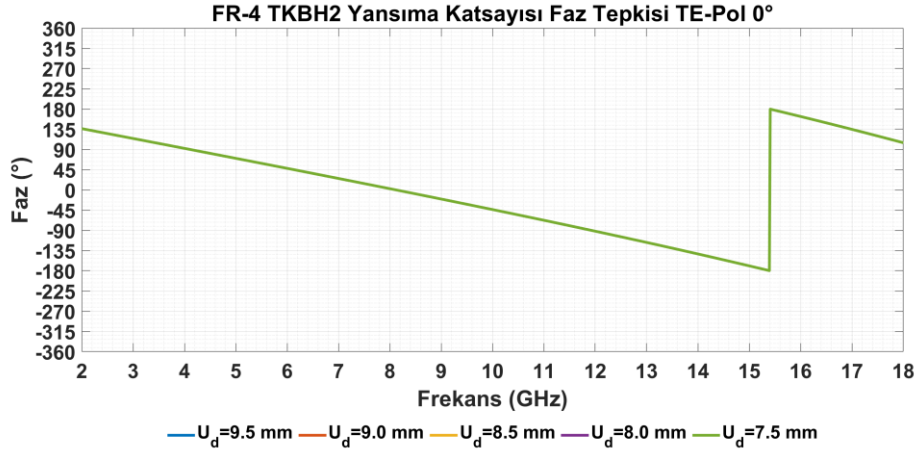
Şekil 4.31 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



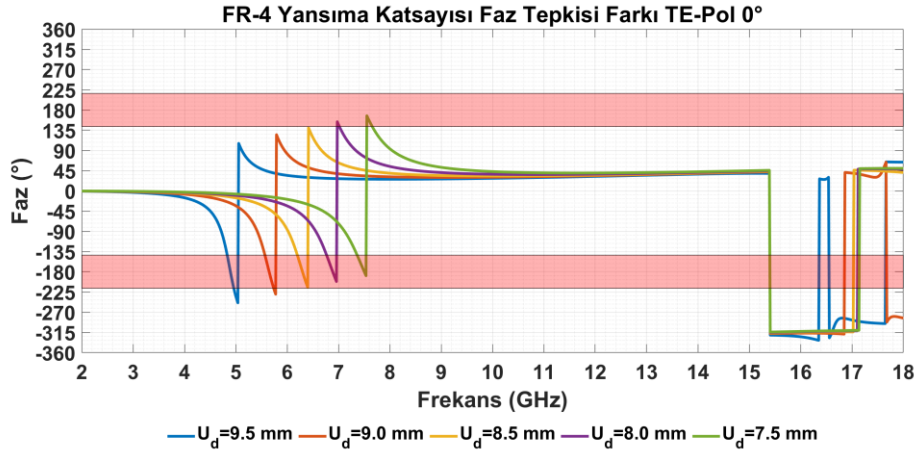
Şekil 4.32 FR-4 altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 2’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.33 FR-4 altaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.34 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği

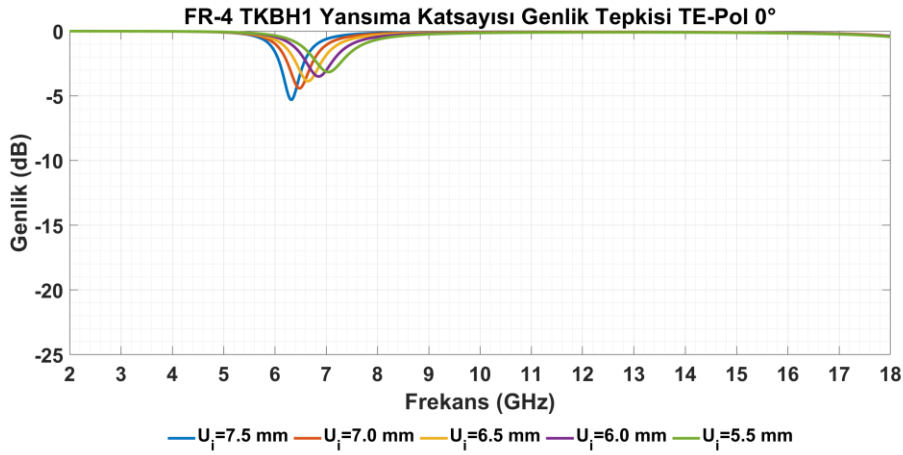


Şekil 4.35 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 2' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

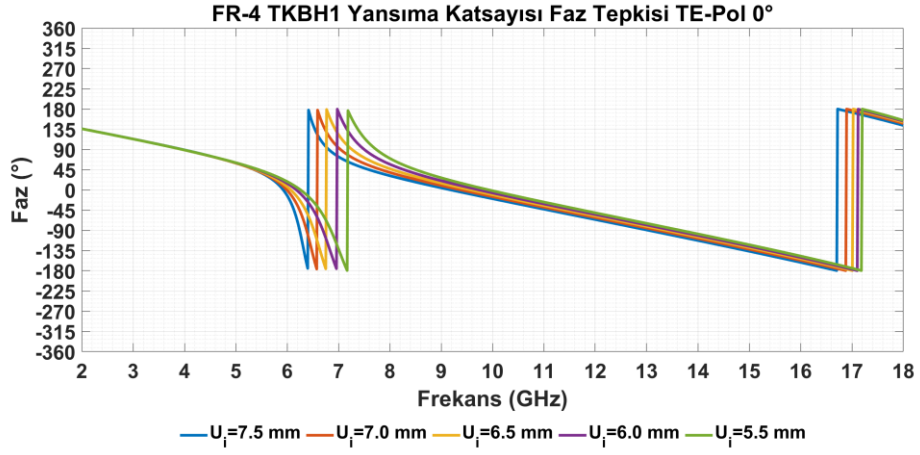
Şekil 4.31 ile Şekil 4.35' te verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında genlik ve faz tepkileri genel olarak karardır. Geniş frekans bantına ulaşabilmek amacıyla U_d değerinin 9.5 mm olması yeterlidir. U_d değişimi ile U_i değişimi paralel olduğu için düzgün

sekizgen şekilli yapının küçük ölçekli olması bant genişliğini azaltmaktadır. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.35) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

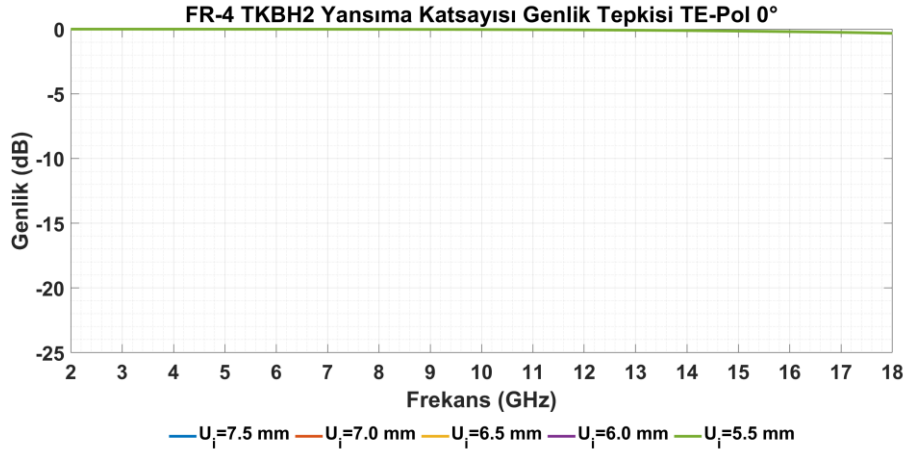
FR-4 TKBH1 için Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’ de, FR-4 TKBH2 için Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’ da Çizelge 4.2’ de verilen Karşılaştırma Grafiği 3’ e ait genlik ve faz tepkisi verilmiştir. FR-4 TKBH1 ve FR-4 TKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.40’ ta verilmiştir. FR-4 TKBH2 için düzgün sekizgen yapı bulunmaması sebebiyle sonuçlar parametre değişimlerinden bağımsız olarak aynı kalmıştır.



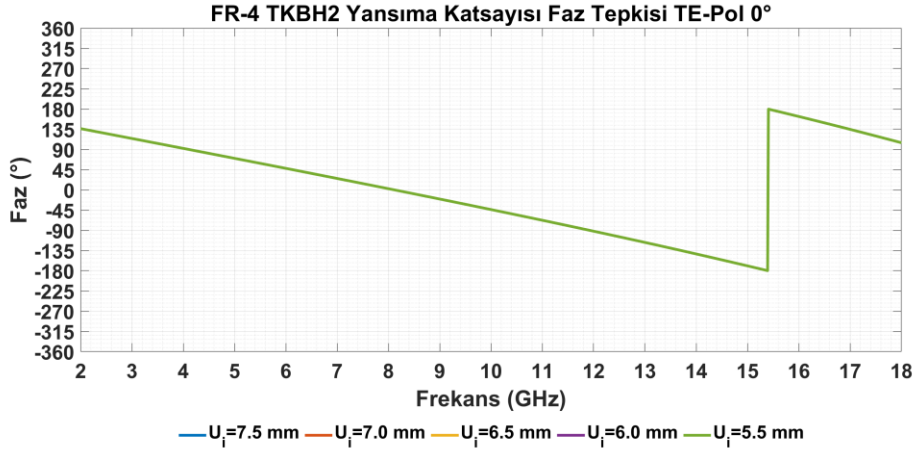
Şekil 4.36 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



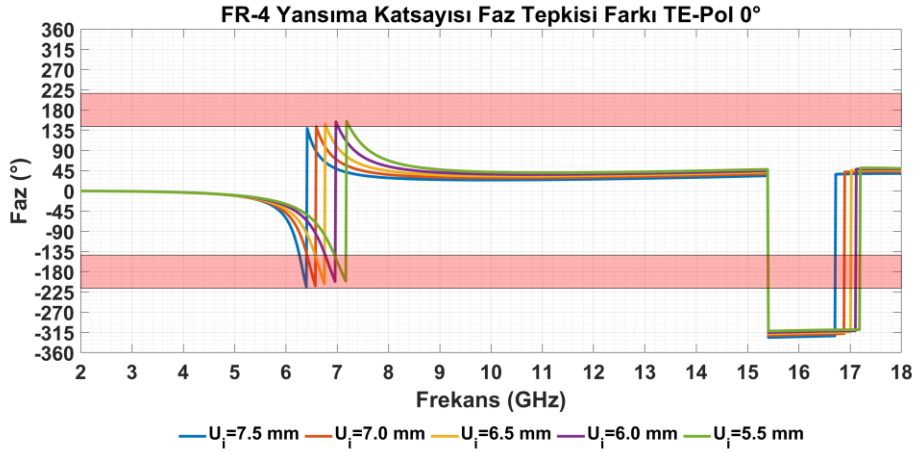
Şekil 4.37 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekilli tek katmanlı birim hücrenin (TKBH1) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.38 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3' de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.39 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olmayan tek katmanlı birim hücrenin (TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.40 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan düzgün sekizgen şekil olan ve olmayan tek katmanlı birim hücrenin (sırasıyla TKBH1 ve TKBH2) Karşılaştırma Grafiği 3’ de verilen değerlere göre enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

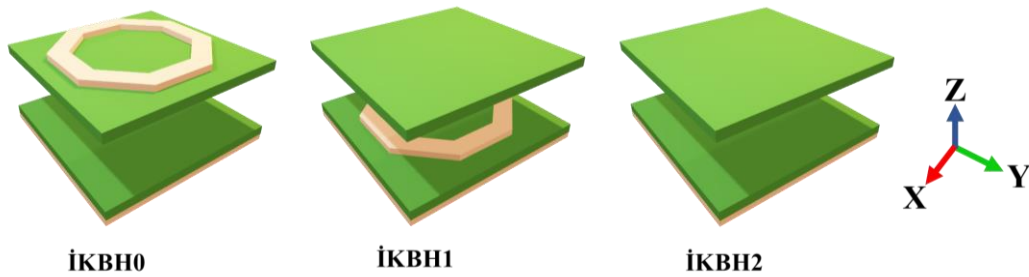
Şekil 4.36 ile Şekil 4.40’ ta verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında genlik ve faz tepkileri genel olarak kararlıdır. Geniş frekans bantına ulaşabilmek amacıyla U_i değerinin 7.5 mm olması yeterlidir. U_d değişimi sabit olduğundan U_i değeri azaldığında

faz tepkisi kontrolü için frekans bantı daralmaktadır. Faz tepkisi fark grafiği (Şekil 4.40) incelendiğinde faz farkı geniş bantta elde edilememiştir.

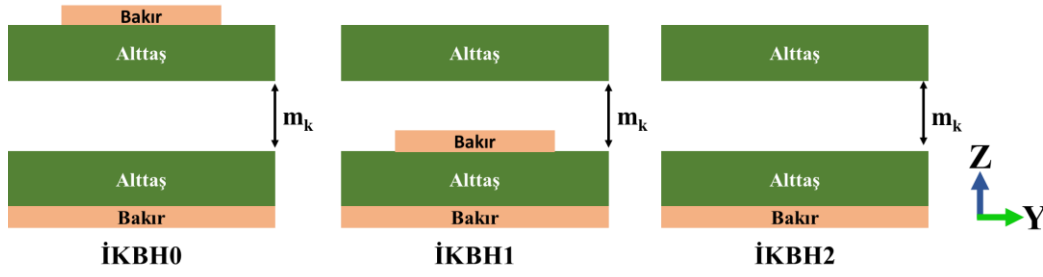
Geniş frekans bantında faz farkının $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında elde edilebilmesi amacıyla iki katmanlı birim hücre tasarımları gerçekleştirilmiştir.

4.1.2. İki Katmanlı Birim Hücre Tasarımı

İki katmanlı birim hücre tasarımında, tek katmanlı birim hücre tasarımında Şekil 4.2 ve Şekil 4.3' de verilen düzgün sekizgen şablonlu geometri kullanılarak bant genişliği ve açısal kararlılık artırımı hedeflenmiştir. İki katmanlı bir tasarımda düzgün sekizgen şablon iki farklı yerde konumlandırılabilirdiğinden, ayrı ayrı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmaları, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42' de verilen düzgün sekizgen şablonun üst katmanda konumlandığı İKBH0, düzgün sekizgen şablonun alt katmanda konumlandığı İKBH1 ve düzgün sekizgen şablonun olmadığı İKBH2 için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Benzetim çalışmalarında yalnızca m_k katmanlar arası mesafe değiştirilmiş, p periyodu 10 mm, U_d düzgün sekizgenin dıştaki karşılıklı kenarlar arasındaki uzunluğu 8 mm, U_i düzgün sekizgenin içteki karşılıklı kenarlar arasındaki uzunluğu 6 mm, k_b bakır kalınlığını 0.035 mm ve k_a altaş kalınlığını RO4725JXR için 1.542 mm, FR-4 için 1.6 mm olarak sabit bırakılmıştır. Amaç, geniş frekans bantında birim hücreler arası faz farkının $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında kalabilen, TE – TM polarizasyonda benzer davranışı gösteren, açısal olarak kararlı bir yapıya sahip birim hücre tasarımına ulaşmaktır.

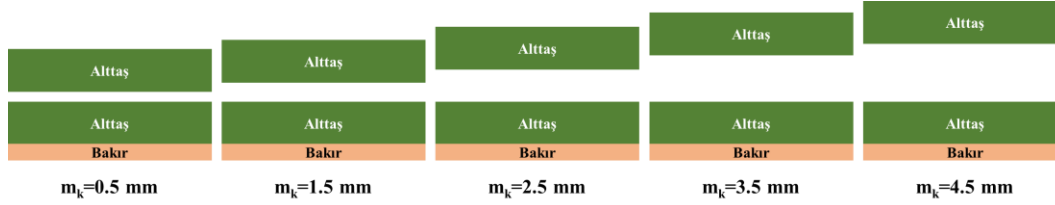


Şekil 4.41 İki katmanlı birim hücre yapıları 3B görüntüsü



Şekil 4.42 İki katmanlı birim hücre yapıları Z-Y düzlemi 2B görüntüsü ve katmanlar arası mesafe

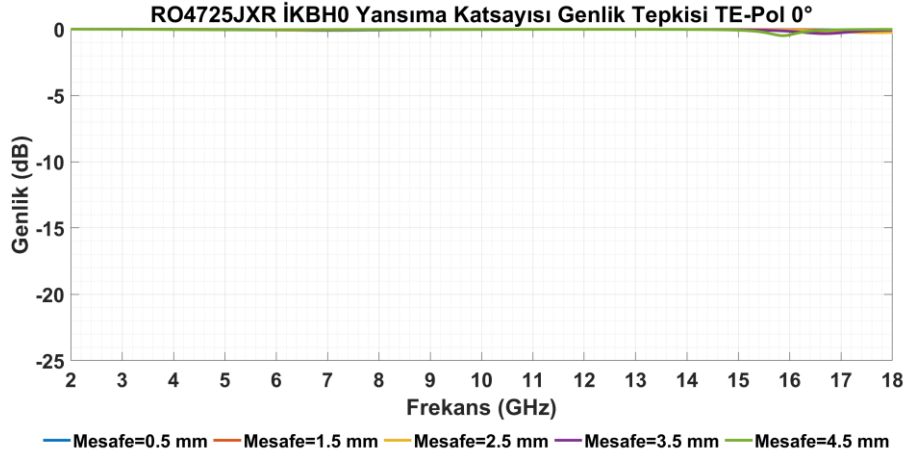
m_k katmanlar arası mesafeye bağlı olarak elde edilecek birim hücre yapısının 2B görüntüsü Şekil 4.43' de verilmiştir.



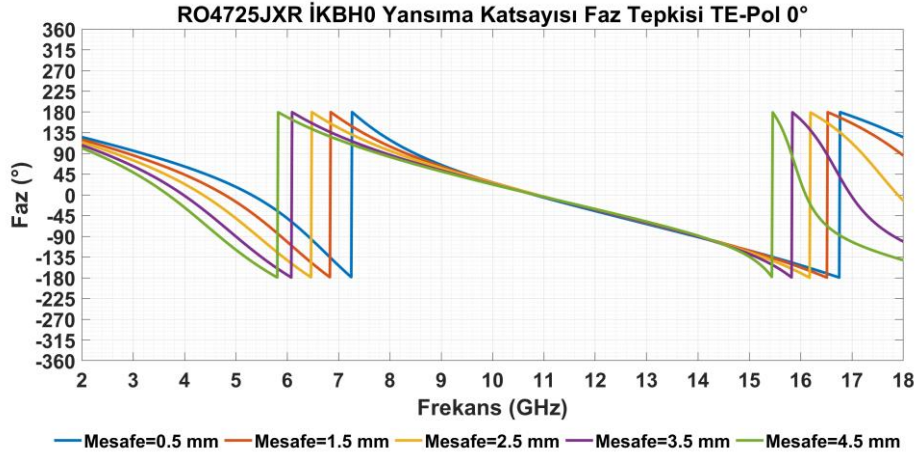
Şekil 4.43 Katmanlar arası mesafeye göre İKBH2 için birim hücre 2B görüntüsü

Benzetim çalışmaları sadece enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısı (0°) için gerçekleştirilmiştir. Düzgün sekizgenin simetrik yapısından dolayı enine manyetik alan (TM) polarizasyonu için sonuçlar aynıdır. RO4725JXR alttaşı veya FR-4 ile tasarlanan birim hücrelerinin genlik tepkilerinin 0 dB ' ye yakın olması, faz tepkisi farklarının ise Şekil 4.8' de verildiği gibi en az 10 dB RKA azaltımı için $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında olması (kırmızı taralı alan) tasarım hedefi olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma grafiklerinde bu husus dikkate alınmıştır. RO4725JXR alttaş ile yapılan çalışmalar Şekil 4.44 ve Şekil 4.52 arasında, FR-4 alttaş ile yapılan çalışmalar Şekil 4.53 ve Şekil 4.61 arasında verilmiştir. RO4725JXR İKBH0 için Şekil 4.44 ve Şekil 4.45' te, RO4725JXR İKBH1 için Şekil 4.46 ve Şekil 4.47' de, RO4725JXR İKBH2 için ise Şekil 4.48 ve Şekil 4.49' da genlik ve faz tepkisi grafikleri verilmiştir. RO4725JXR İKBH0 ve RO4725JXR İKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği Şekil 4.50' de, RO4725JXR İKBH1 ve RO4725JXR İKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği Şekil 4.51' de, RO4725JXR İKBH0 ve RO4725JXR İKBH1 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.52' de

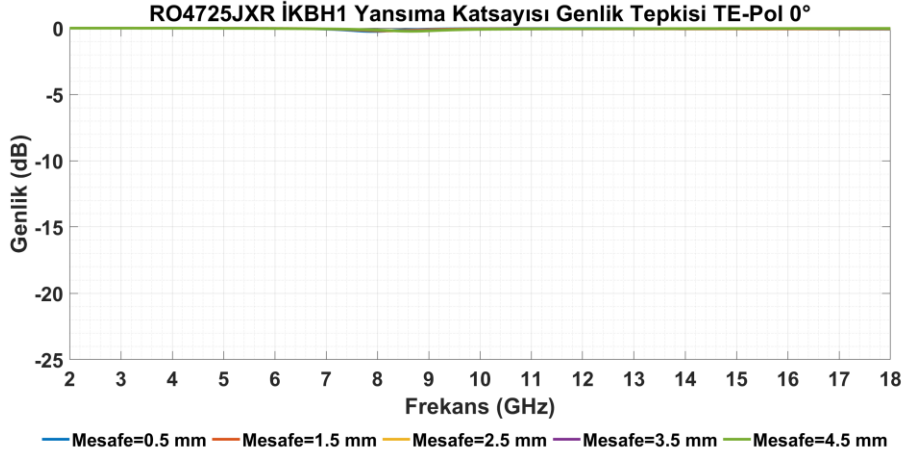
verilmiştir.



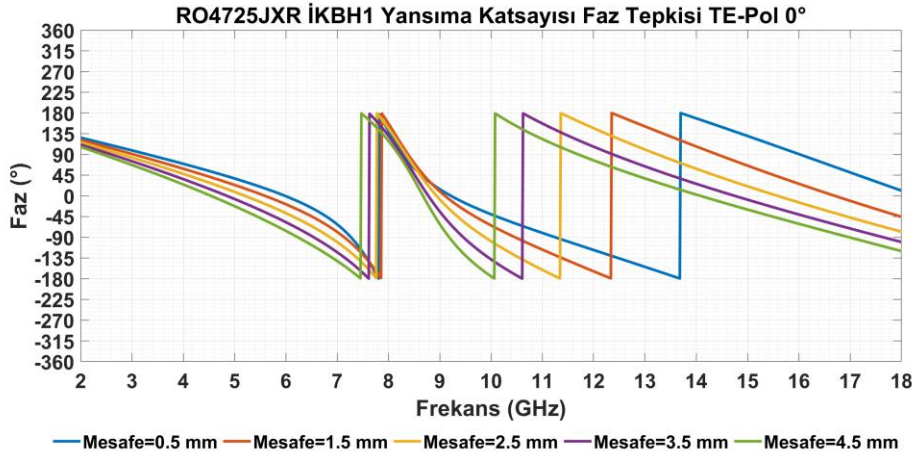
Şekil 4.44 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



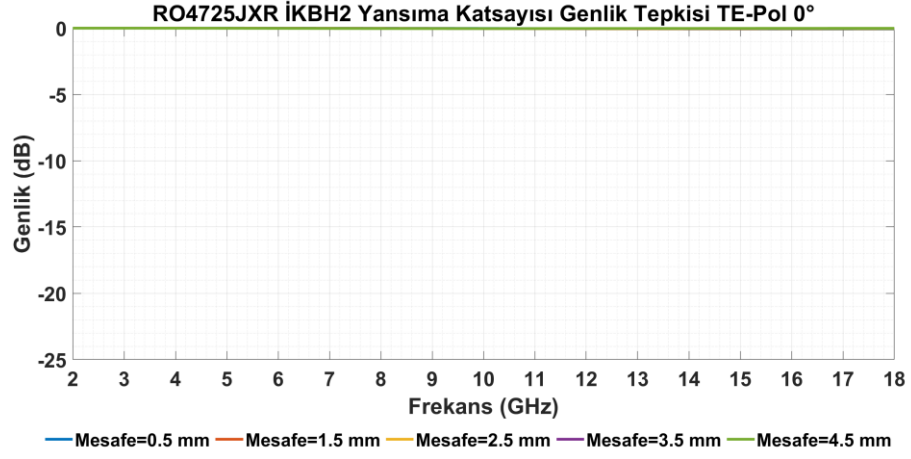
Şekil 4.45 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



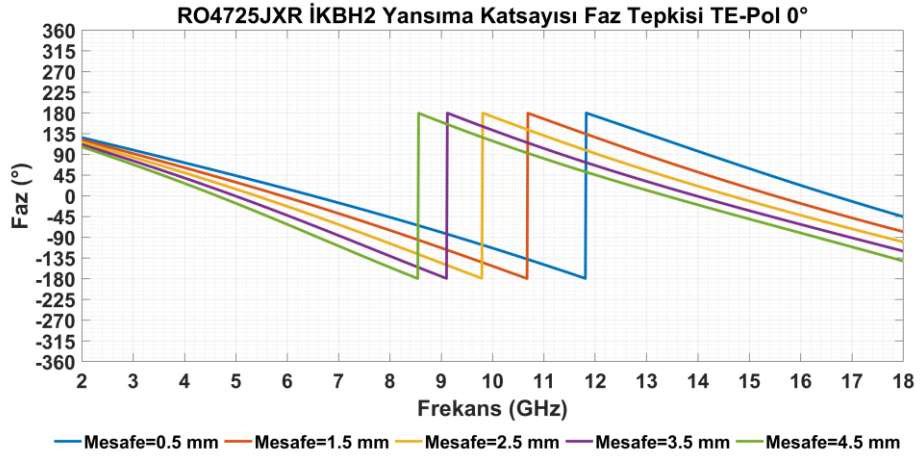
Şekil 4.46 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



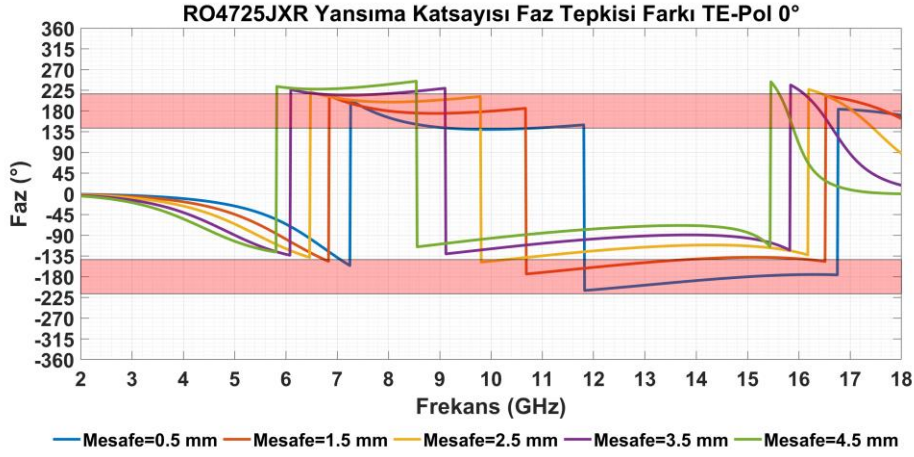
Şekil 4.47 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



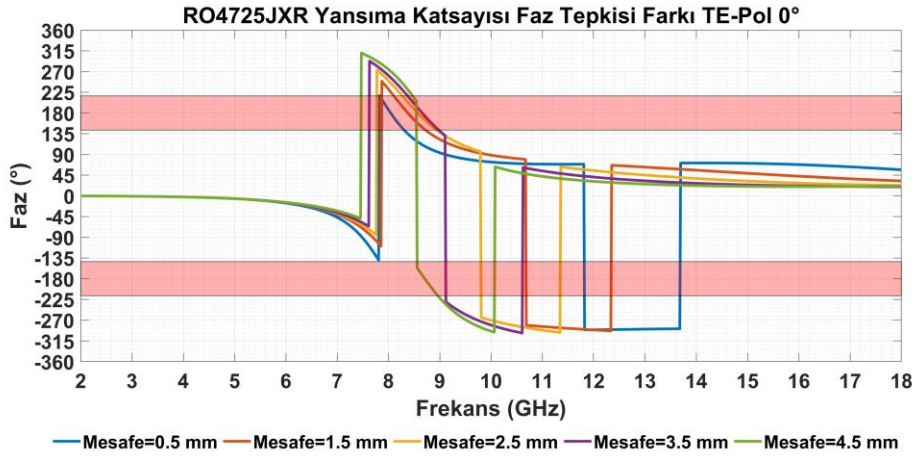
Şekil 4.48 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



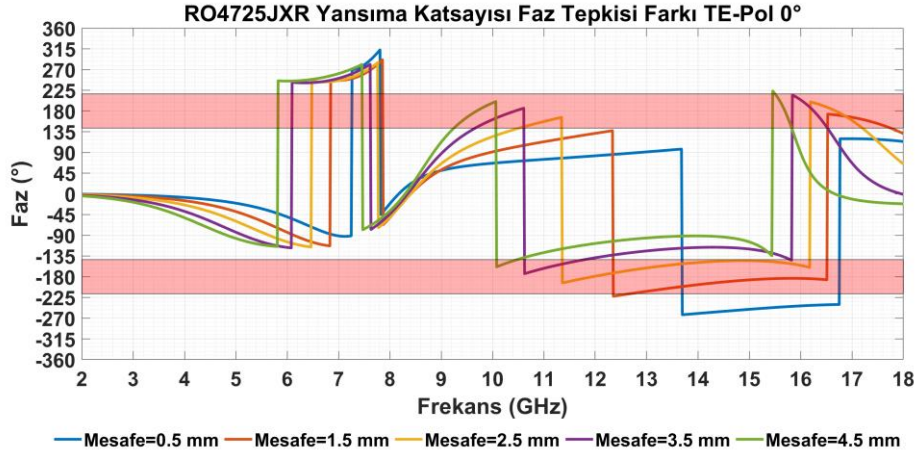
Şekil 4.49 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.50 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz farkı grafiği grafiği



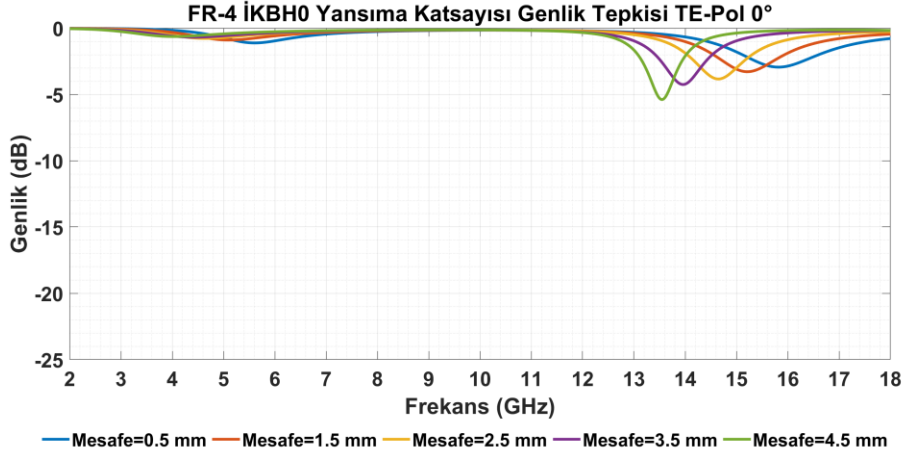
Şekil 4.51 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH1 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği



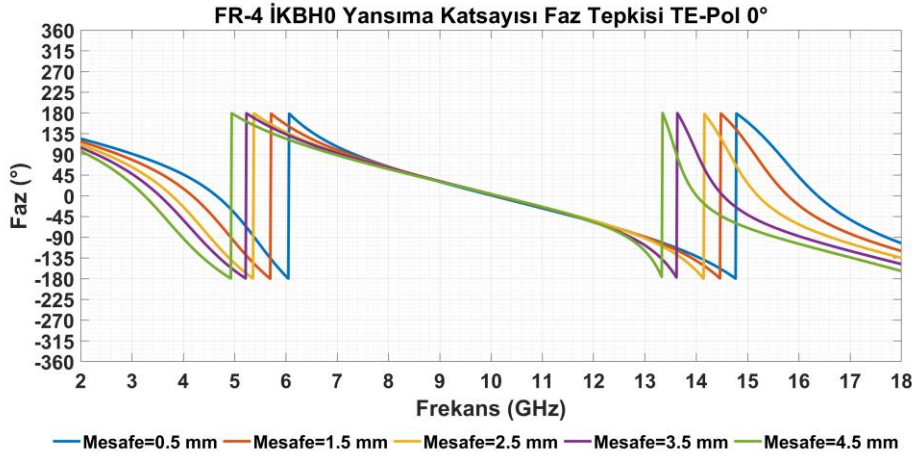
Şekil 4.52 RO4725JXR alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH1 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

Şekil 4.44 ile Şekil 4.52’ de verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında kararlı genlik ve faz farkı tepkisinin elde edilebilmesi amacıyla İKBH0 ile İKBH2 birim hücrelerinin seçilmesi, katmanlar arası mesafenin ise 0 – 2 mm arasında olması gerekmektedir. Örneğin katmanlar arası mesafe 1.5 mm olduğunda, İKBH0 ve İKBH2 birim hücreleri seçildiğinde 7 – 18 GHz arasında en az 10 dB RKA azaltımı mümkün olmaktadır. 7 dB RKA azaltımı için faz farkının $\pm 127^\circ$ ile $\pm 233^\circ$ arasında olması gerektiğinden katmanlar arası mesafenin 1.5 mm olduğu durumda İKBH0 ve İKBH2 birim hücreleri seçilmesi durumunda bant genişliği 6.5 – 18 GHz arasına yükselebilmektedir.

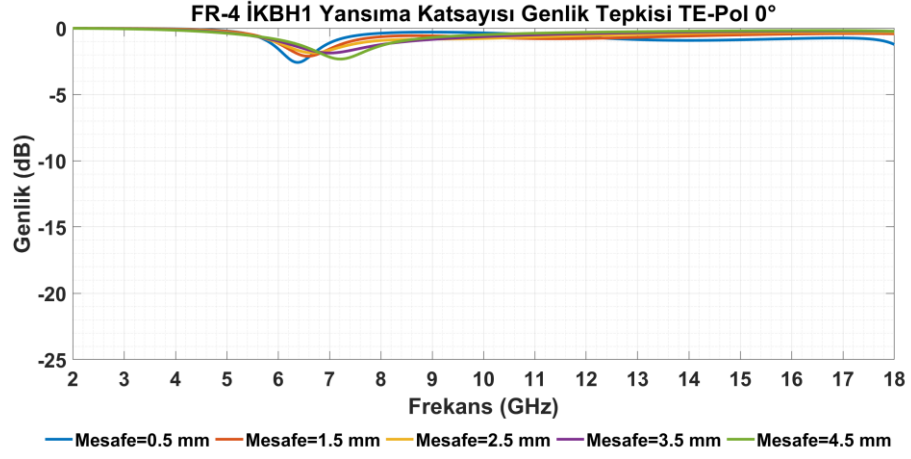
FR-4 İKBH0 için Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’ te, FR-4 İKBH1 için Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’ da, FR-4 İKBH2 için ise Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’ de genlik ve faz tepkisi grafikleri verilmiştir. FR-4 İKBH0 ve FR-4 İKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği Şekil 4.59’ da, FR-4 İKBH1 ve FR-4 İKBH2 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği Şekil 4.60’ ta, FR-4 İKBH0 ve FR-4 İKBH1 arasında oluşan faz tepkisi fark grafiği ise Şekil 4.61’ de verilmiştir.



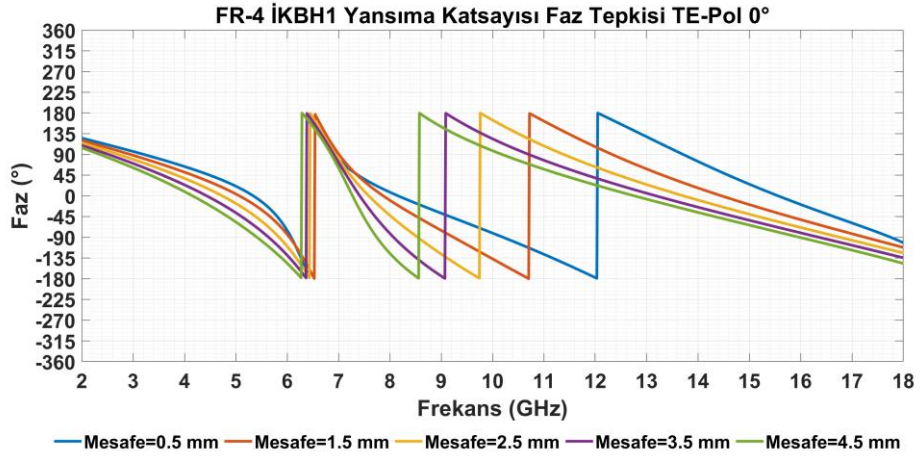
Şekil 4.53 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



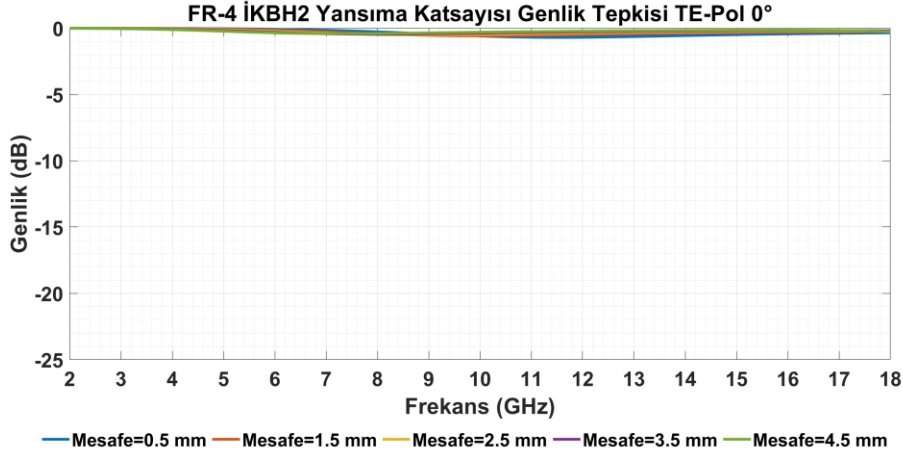
Şekil 4.54 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH0) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



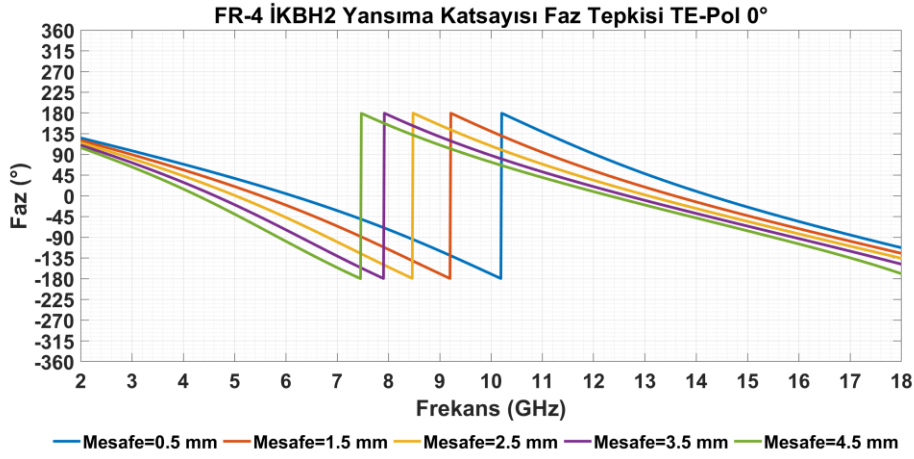
Şekil 4.55 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



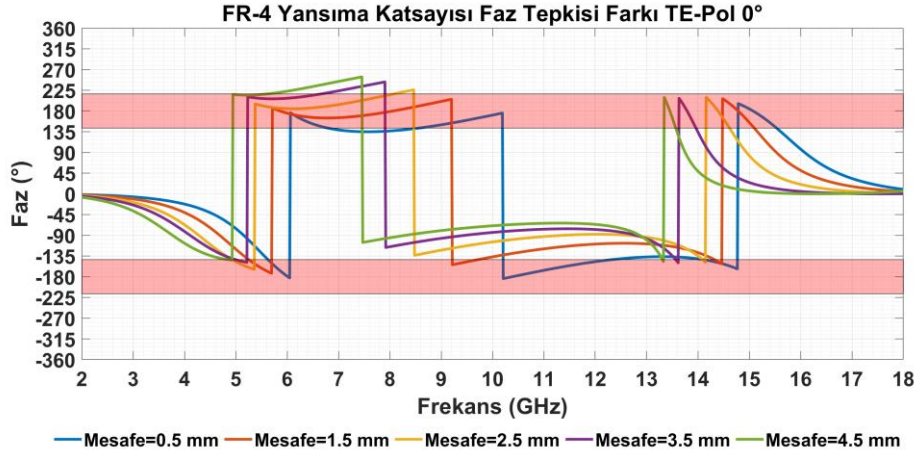
Şekil 4.56 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH1) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



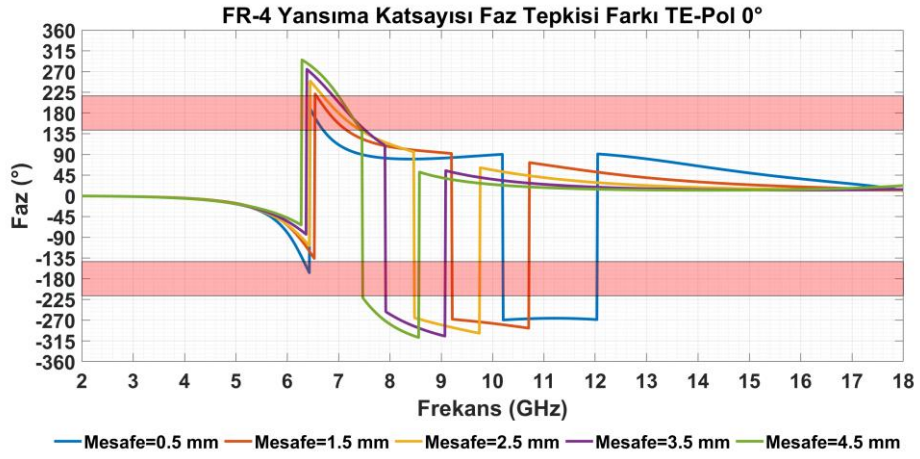
Şekil 4.57 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında genlik tepkisi grafiği



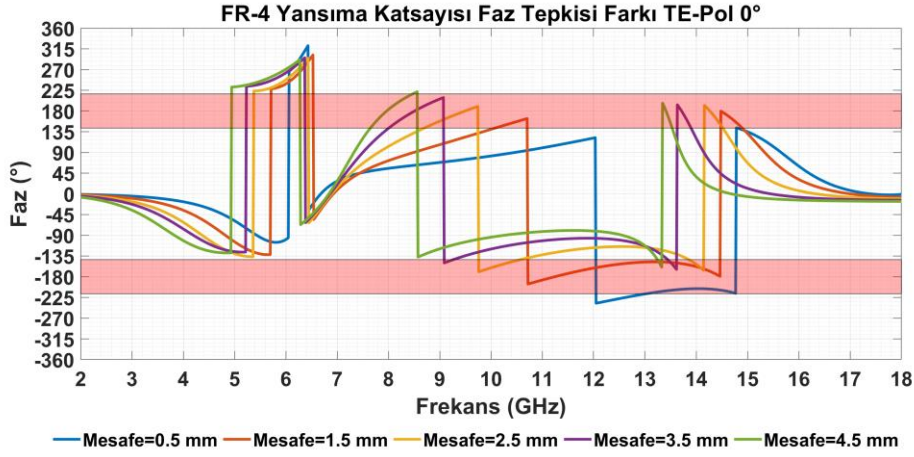
Şekil 4.58 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan iki katmanlı birim hücrenin (İKBH2) enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi grafiği



Şekil 4.59 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği grafiği



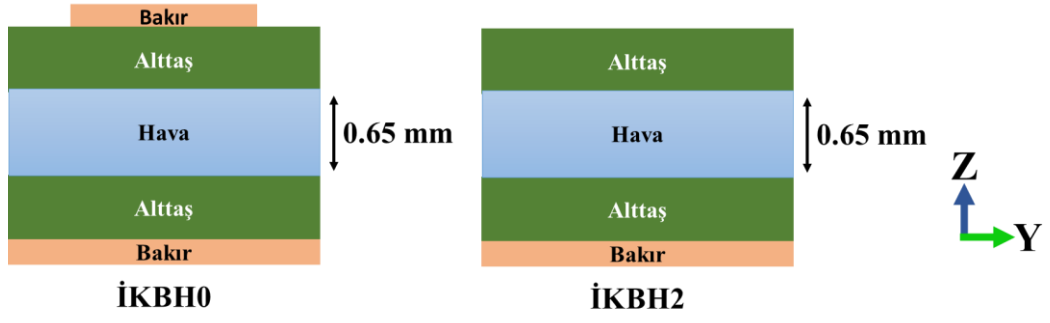
Şekil 4.60 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH1 ve İKBH2 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği



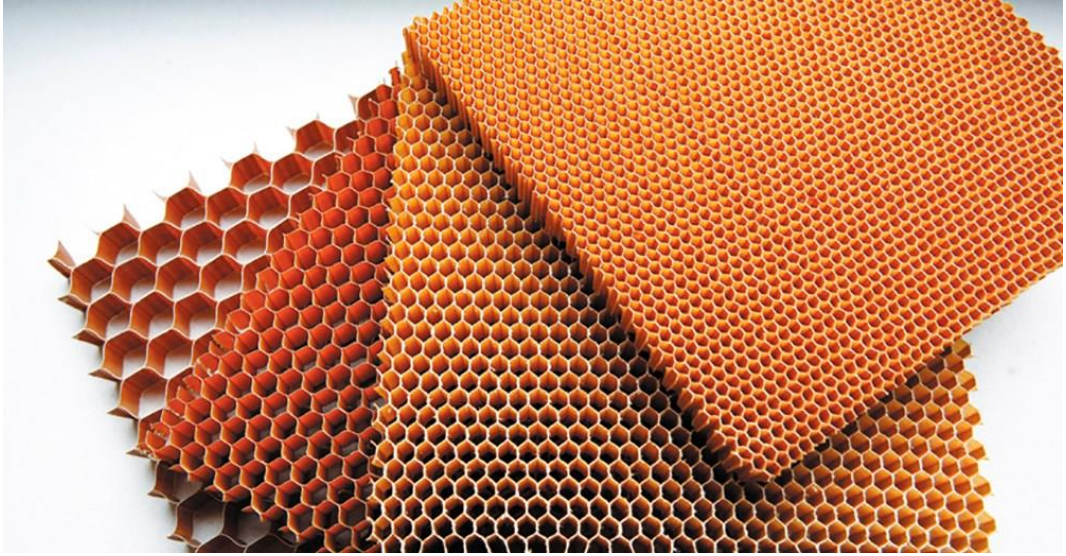
Şekil 4.61 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH1 birim hücrelerinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonu normal geliş açısında (0°) altında faz tepkisi fark grafiği

Şekil 4.53 ile Şekil 4.61’ da verilen grafikler incelendiğinde, C – X – Ku bantında kararlı genlik ve faz farkı tepkisinin elde edilebilmesi amacıyla İKBH0 ile İKBH2 birim hücrelerinin seçilmesi, katmanlar arası mesafenin ise 0 – 1 mm arasında olması gerekmektedir. Örneğin katmanlar arası mesafe 0.5 mm olduğunda, İKBH0 ve İKBH2 birim hücreleri seçildiğinde 5.5 – 15.5 GHz arasında en az 7 dB RKA azaltımı mümkün olmaktadır.

Tek katmanlı birim hücre tasarımları ve iki katmanlı birim hücre tasarımları incelendiğinde, katman sayısının artması bant genişliğini çok yüksek miktarda artırmaktadır. Öte yandan kodlanmış metamalzeme tasarımı hem RO4725JXR alttaş hem de FR-4 alttaş kullanılarak geniş bantta gerçekleştirilebilmektedir. Düşük maliyetli, düşük profilli olması sebebiyle FR-4 alttaş kullanılarak kodlanmış metamalzeme tasarımı yapılmış ve hem MATLAB ortamında hem de CST ortamında (tam-dalga) alınan sonuçlar kıyaslanmıştır. Bant genişliğini bir miktar daha artırmak amacıyla Şekil 4.62’ de verildiği gibi katmanlar arası mesafe 0.65 mm olarak seçilmiş ve modellenmiştir. Katmanlar arası mesafe bu çalışma kapsamında hava olarak alınmıştır. Ancak yapısal dayanıklılığı artırmak amacıyla katmanlar arasına Şekil 4.63’ te verilen dielektrik malzemeden üretilen bal peteği yapısı kullanılabilir [68].

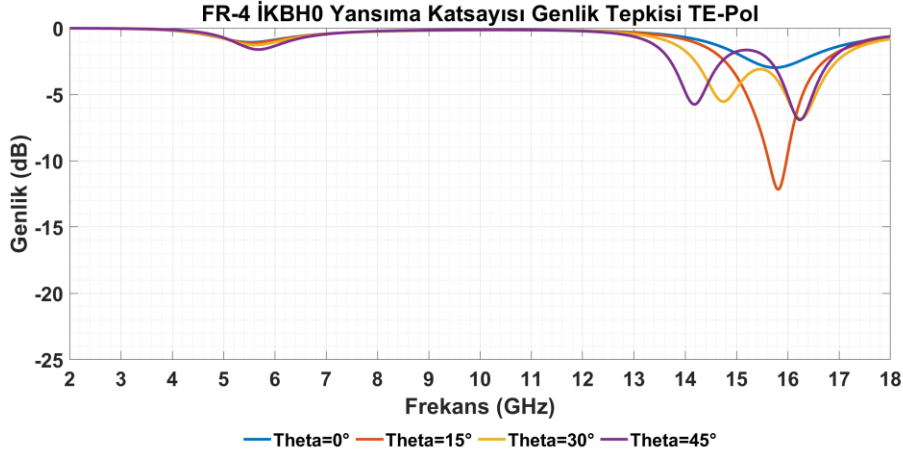


Şekil 4.62 İKBH0 ve İKBH2 için nihai birim hücre yapılandırması

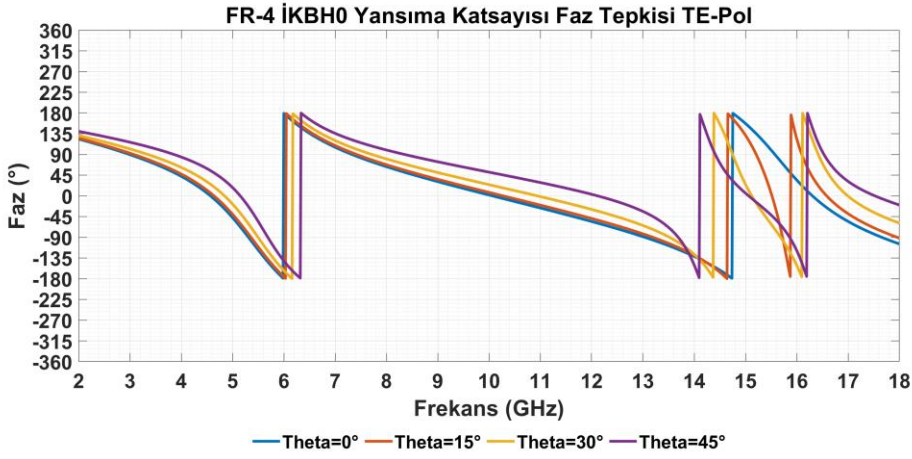


Şekil 4.63 Örnek bal peteği yapısı [68]

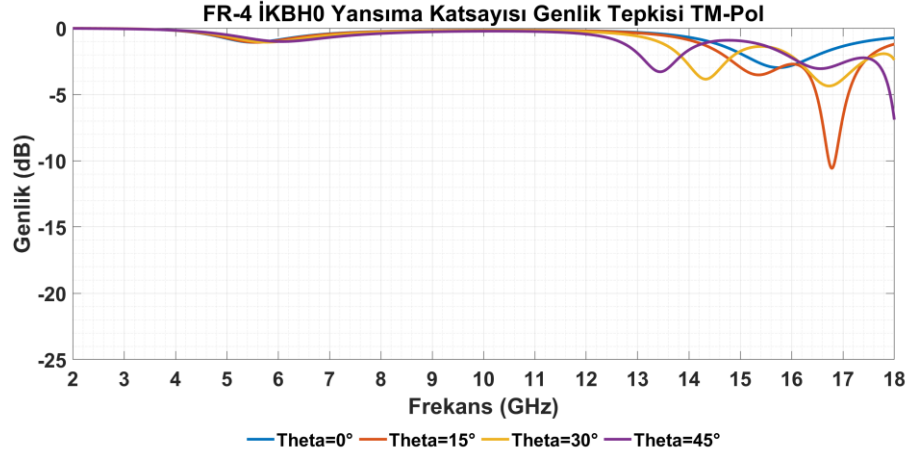
Birim hücrelerin enine elektrik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) polarizasyonu altında $0^\circ - 45^\circ$ arasında davranışları Şekil 4.64 ile Şekil 4.73 arasında verilmiştir. Aynı grafiklerin farklı bir bakış açısı ve daha kolay anlaşılması amacıyla, Şekil 4.74 ve Şekil 4.80 arasında ise enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda 0° geliş açısı altında polar grafik ile 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 GHz frekanslarında aynı anda genlik, faz tepkileri ve faz tepkisi farkları gösterilmiştir.



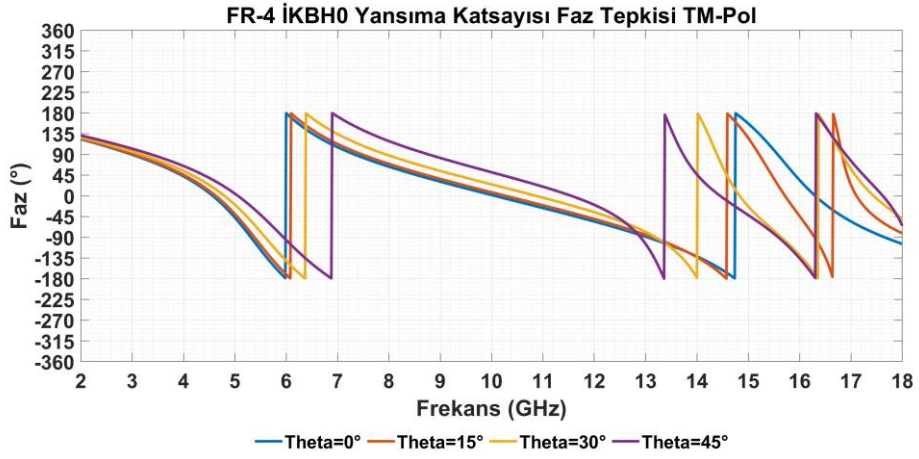
Şekil 4.64 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği



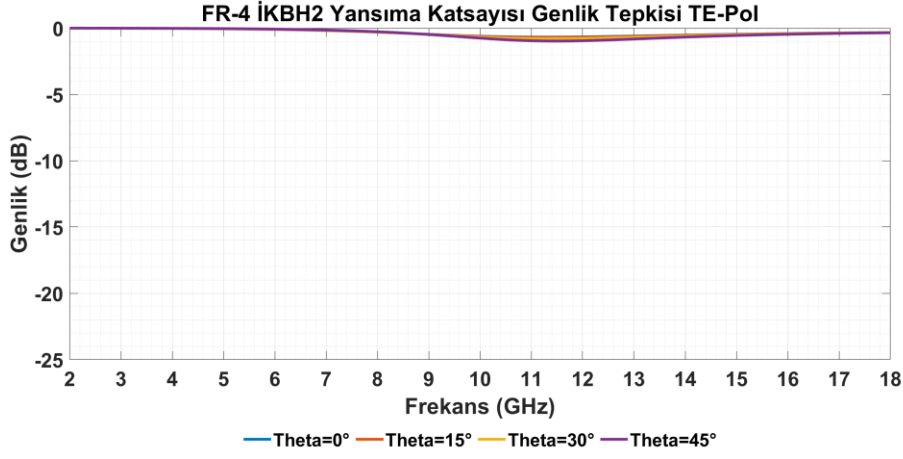
Şekil 4.65 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği



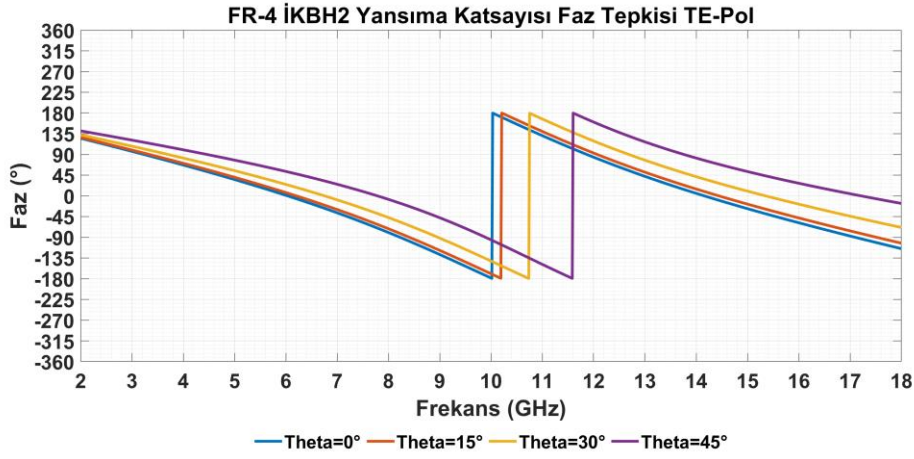
Şekil 4.66 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda Theta=0°, Theta=15°, Theta=30° ve Theta=45° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği



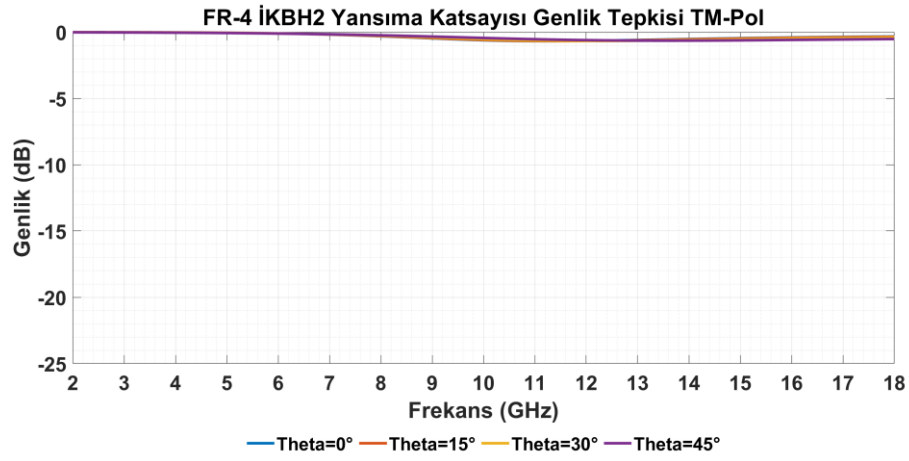
Şekil 4.67 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda Theta=0°, Theta=15°, Theta=30° ve Theta=45° geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği



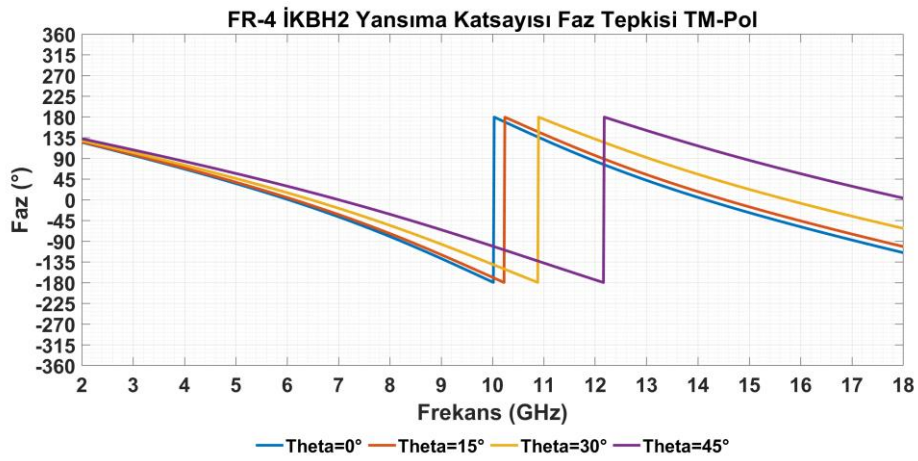
Şekil 4.68 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği



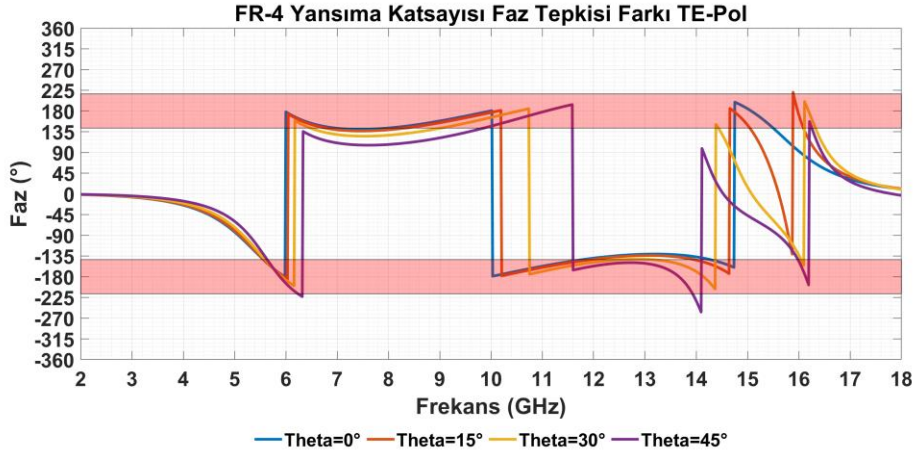
Şekil 4.69 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği



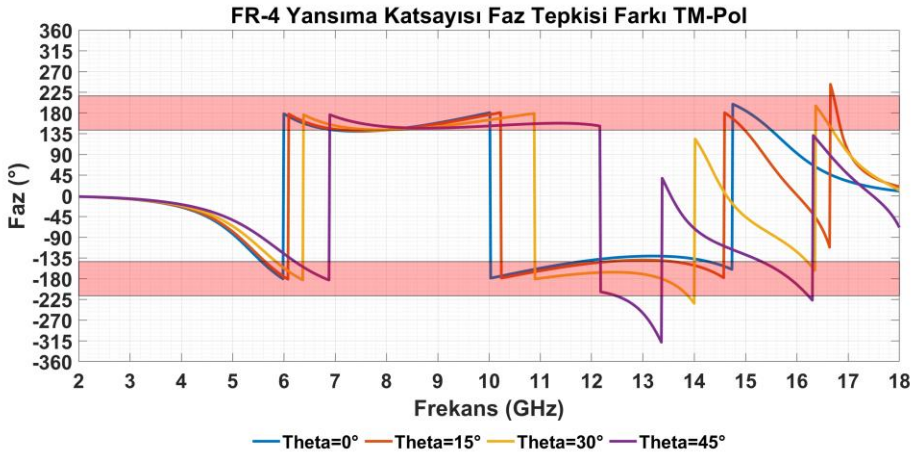
Şekil 4.70 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda Theta=0°, Theta=15°, Theta=30° ve Theta=45° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik tepkisi grafiği



Şekil 4.71 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda Theta=0°, Theta=15°, Theta=30° ve Theta=45° geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi grafiği

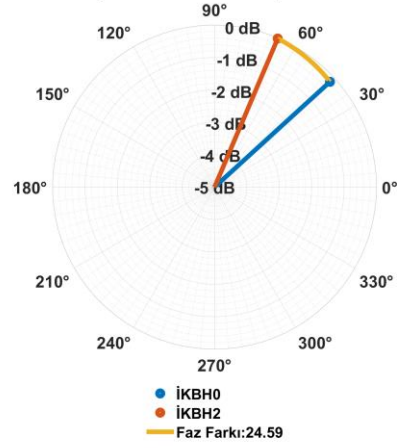


Şekil 4.72 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi fark grafiği



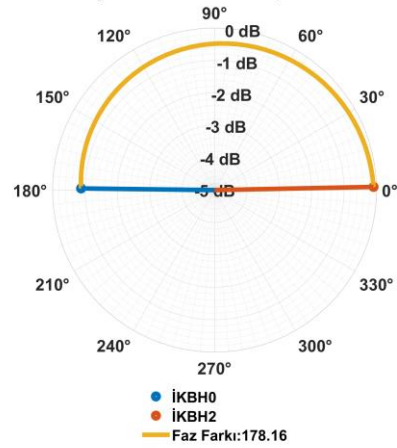
Şekil 4.73 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin enine manyetik alan (TM) polarizasyonunda $\Theta=0^\circ$, $\Theta=15^\circ$, $\Theta=30^\circ$ ve $\Theta=45^\circ$ geliş açısında yansımaya katsayısı faz tepkisi fark grafiği

FR-4 Yansımaya Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 4 GHz



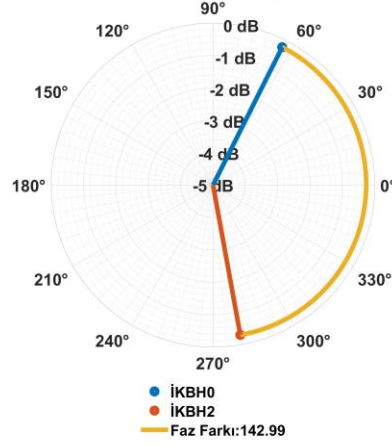
Şekil 4.74 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 4 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansımaya Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 6 GHz



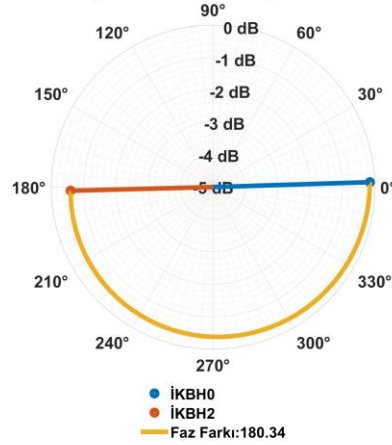
Şekil 4.75 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 6 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansımaya Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 8 GHz



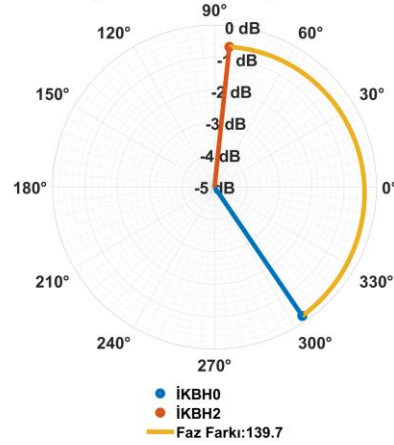
Şekil 4.76 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrenin 8 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansımaya Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 10 GHz



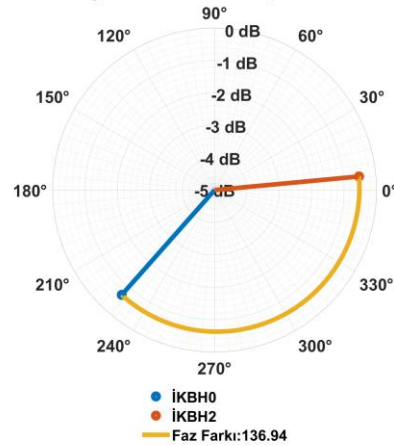
Şekil 4.77 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrenin 10 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansımaya katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansıma Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 12 GHz



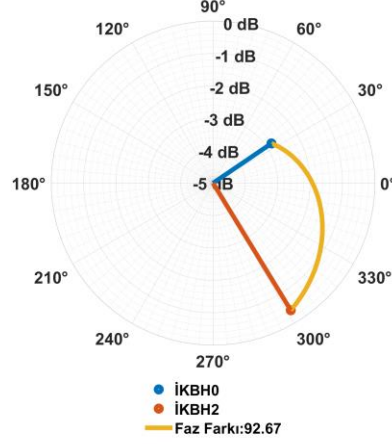
Şekil 4.78 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 12 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansıma Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 14 GHz



Şekil 4.79 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücresinin 14 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geliş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

FR-4 Yansıma Katsayısı Genlik ve Faz Tepkisi Farkı TE-Pol 0° 16 GHz



Şekil 4.80 FR-4 alttaş kullanılarak oluşturulan İKBH0 ve İKBH2 birim hücrenin 16 GHz’ de enine elektrik alan (TE) polarizasyonunda Theta=0° geniş açısında yansıma katsayısı genlik, faz tepkisi ve faz tepkisi farkı grafiği

Şekil 4.72 ve Şekil 4.80 incelendiğinde, her iki polarizasyon için, Theta=0° ile Theta=30° arası baz alındığında, 6 – 14 GHz frekans bantında faz farkının $\pm 127^\circ$ ile $\pm 233^\circ$ arasında olduğu görülmektedir. Theta=30° ye kadar en az 7 dB mono-statik RKA azaltımı beklenmektedir. Theta=0° ve Theta=15° için 5.5 – 15.5 GHz arasında, Theta=30° için 5.5 – 14 GHz arasında en az 7 dB mono-statik RKA azaltımı beklenmektedir. Theta=45° olduğu durumda, her iki polarizasyon için, ise 6 – 13 GHz frekans bantında en az 6 dB RKA azaltımı beklenmektedir.

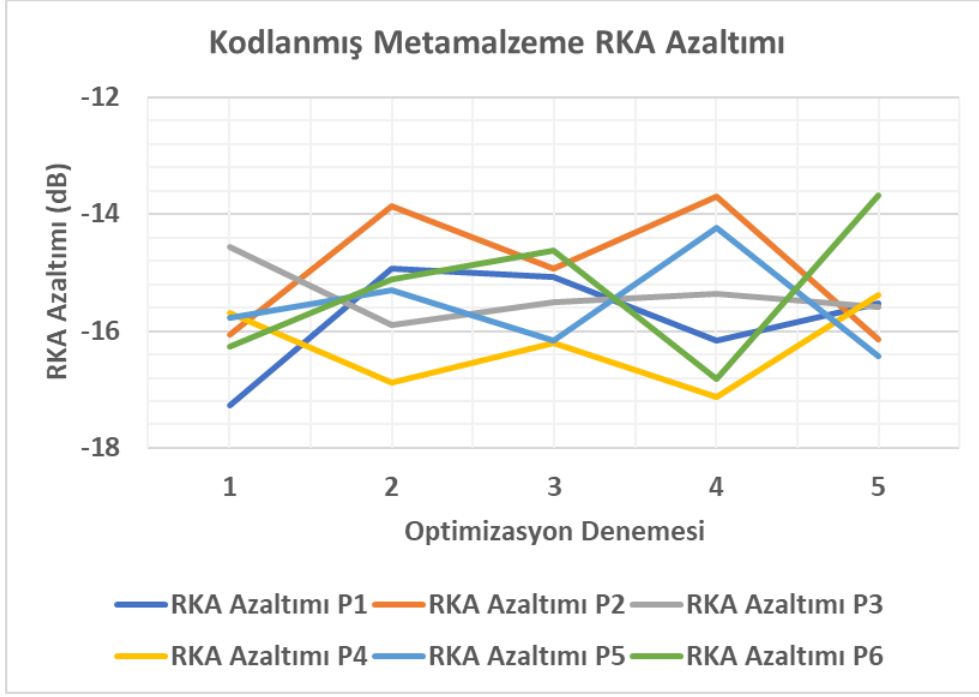
4.2. Kodlanmış Metamalzeme Tasarımı

Kodlanmış metamalzeme tasarımı, Bölüm 3’ te belirtilen uzak alan saçılma örüntüsü ve parçacık sürü optimizasyon algoritması ile Bölüm 4.1.’ de belirtilen birim hücre tasarımının kodlanmış metamalzeme oluşturulmasında kullanılması adımlarından oluşmaktadır. Uzak alan saçılma örüntüsü formülleri MATLAB ortamında kodlanarak, parçacık sürü optimizasyonunda gereken maliyet fonksiyonunun en hızlı ve doğruya en yakın olacak şekilde hesaplanması sağlanmış, birim hücre tasarımı adımında belirtilen iki katmanlı tasarım ile de frekans bantı artırımı ve eğik gelen elektromanyetik dalga da kararlılık sağlanmıştır.

Optimizasyon algoritmasında, farklı parametrelerin (yineleme sayısı, parçacık sayısı, c_1 , c_2 ve w) en uygun değerlerini bulabilmek amacıyla periyodu 10 mm olan, 4x4 birim hücreden oluşan süper birim hücre kullanılarak (örneğin Şekil 3.6), 10x10 kodlanmış metamalzeme üzerinde en düşük RKA'ya sahip olacak şekilde 5 farklı benzetim yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları normal elektromanyetik dalga geliş açısında ($0^\circ, 0^\circ$), birim hücreler arası faz farkının 180° , frekansın 15 GHz ve polarizasyonun dikey olduğu durum için yapılmıştır. Frekansın 15 GHz seçilmesinin nedeni, denklem (3.18), (3.19) ve (3.20)'de belirtilen kısıtlardan dolayı görünür bölgede elde edilebilecek en yüksek frekans değerindeki sonuçları irdelemektir. Maliyet değeri olarak bütün açılardaki RKA değerleri karşılaştırılmış ve bu değerlerden en yüksek olanı seçilmiştir. Böylece mono-statik ve bi-statik RKA azaltımını aynı anda sağlayabilen kodlanmış metamalzeme tasarımının bulunması amaçlanmıştır.

Çizelge 4.3 Optimizasyon algoritması parametre karşılaştırmaları

Parametre Karşılaştırma Numarası	Yineleme Sayısı	Parçacık Sayısı	c_1	c_2	w
1	100	75	0.4	0.2	0.9
2	100	150	0.4	0.2	0.9
3	150	75	0.4	0.2	0.9
4	100	75	0.8	0.2	0.9
5	100	75	0.4	0.6	0.9
6	100	75	0.4	0.2	0.5



Şekil 4.81 Optimizasyon algoritması parametreleri baz alınarak farklı denemelere göre en düşük RKA azaltımı değerleri

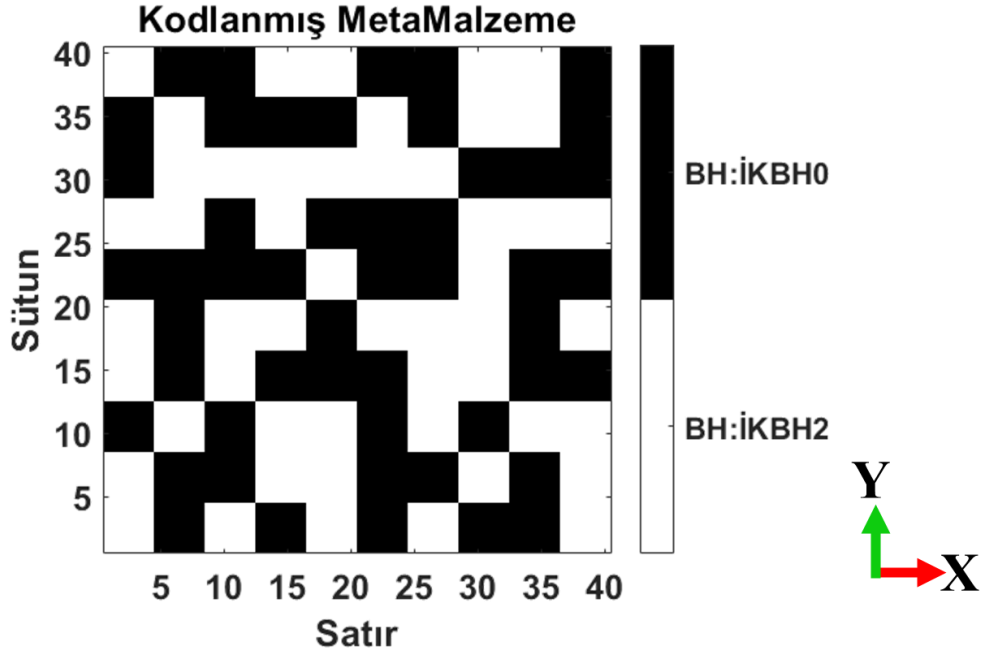
Çizelge 4.3 ve Şekil 4.81 incelendiğinde genel anlamda RKA azaltımı en az -14 dB seviyelerinde gerçekleşmiştir. Yineleme sayısının artması sonuçların daha kararlı olmasını sağlayabilir. Parçacık sayısının artmasının en küçük RKA'ya sahip kodlanmış metamalzeme tasarımının bulunmasına büyük anlamda katkısı görülmemiştir. Öte yandan kişisel davranış etkisinin (c_1), sürü davranış etkisinden (c_2) büyük olması ve önceki hız değeri etkisinin bir miktar daha baskın olması en küçük mono-statik ve bi-statik RKA'ya sahip kodlanmış metamalzeme tasarımının elde edilmesinde etkin çözüme ulaştıracağı değerlendirilmektedir.

Benzetim çalışmalarında elde edilen en küçük RKA'ya sahip kodlanmış metamalzemelerden bir tanesi seçilerek tam-dalga benzetim çalışmaları yapılmış ve MATLAB ortamında alınan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

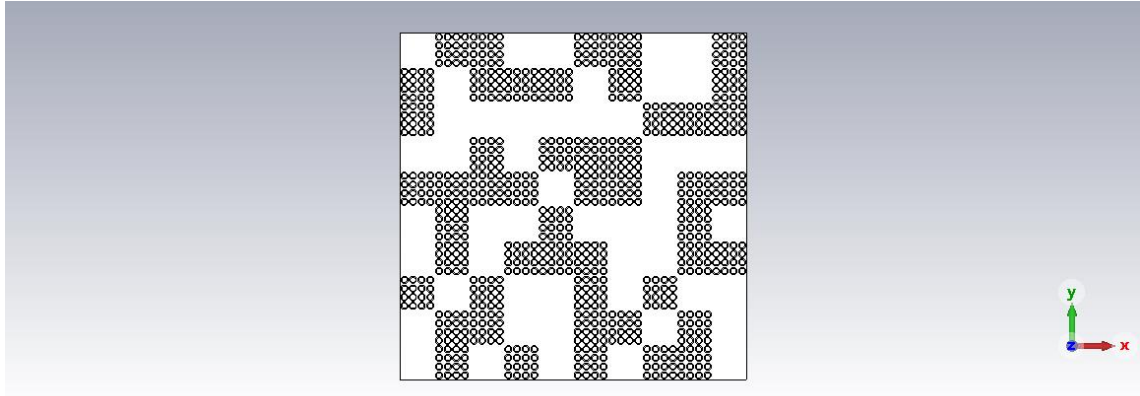
4.2.1. Numerik Yöntemlerle Karşılaştırma

Çizelge 4.3' de verilen 6 numaralı parametrelerin, farklı denemeler sonucunda elde edilen RKA azaltımı değerlerine göre (Şekil 4.81) 4 numaralı kodlanmış metamalzeme seçilmiş

ve hem MATLAB ortamında hem de CST programı kullanılarak uzak alan saçılma örüntüleri elde edilmiştir. Seçilen kodlanmış metalmalzeme ile İKBH0 ve İKBH2 birim hücrelerinin metalmalzeme üzerinde dağılımları MATLAB ortamında Şekil 4.82’ de, CST programında Şekil 4.83’ te verilmiştir.



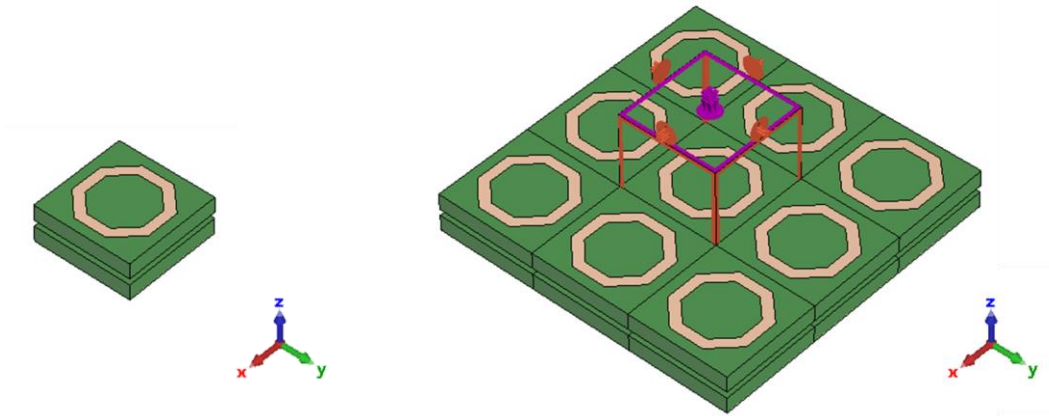
Şekil 4.82 MATLAB ortamında kodlanmış metalmalzeme ve birim hücre dağılımları



Şekil 4.83 CST programında kodlanmış metalmalzeme ve birim hücre dağılımları

Birim hücre benzetim çalışmaları daha önce belirtildiği üzere (Bölüm 4. ilk paragraf), Floquet yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde birim hücre yansıma/iletim/soğurma tepkileri birim hücrenin uzunluk (x) ve genişlik (y) ekseninde sonsuza kadar tekrarlandığı, kalınlık (z) ekseninde sınırlı bir kalınlığa sahip olduğu

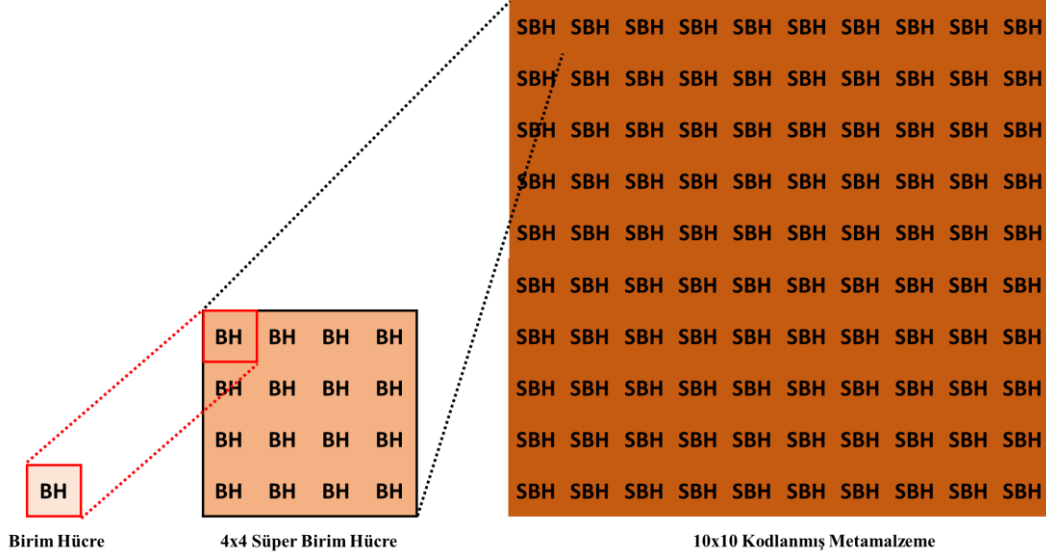
varsayımı ile hareket etmektedir. Şekil 4.84' te birim hücrenin CST Studio Suite programında tasarım görseli ile benzetim esnasında oluşan görseli verilmiştir.



Şekil 4.84 Birim hücre tasarımı (solda) ve benzetim esnasında oluşan birim hücreler (sağda)

Dolayısıyla, birim hücrenin Floquet Yöntemi ile elde edilen genlik ve faz tepkisini gösterebilmesi için aynı birim hücrelerin belirli miktarda kendini tekrar etmesi gerekmektedir. Böylece sonsuz sayıda tekrar ettiği durumda elde edilen genlik ve faz tepkileri elde edilmiş olacaktır. Literatürde bulunan yayınlar incelendiğinde [12-37], genellikle ilgilenilen frekansın en düşük değerinin bir dalga boyu kadar uzunluğa sığacak birim hücreler tekrar edilmiştir. Örneğin bu tez kapsamında ilgilenilen frekans bandında en küçük değer 6 GHz kabul edilirse bir dalga boyu yaklaşık olarak 50 mm olacaktır. Birim hücre tasarımında p periyodu 10 mm alındığında, benzetim çalışmalarında elde edilen genlik ve faz tepkilerini 5 satırda ve 5 sütunda olmak üzere toplamda en az 25 birim hücre ile sağlamak gerekmektedir. Satır ve sütunda birden fazla birim hücrenin oluşturduğu yapıya ise süper birim hücre adı verilmektedir. 400 mm x 400 mm uzunlukta bir kodlanmış metamalzeme, 5x5 süper birim hücreler yardımıyla 8x8' lik bir kodlamaya sahip olacaktır. Ancak bu durumda farklı kodlamalardan elde edilebilecek en düşük mono-statik ve bi-statik RKA' ya sahip metamalzeme tasarım olasılığı sınırlanacaktır. Bu yüzden en düşük mono-statik ve bi-statik RKA' ya sahip kodlanmış metamalzeme tasarımı olasılığını artırmak amacıyla süper birim hücreler bir dalga boyunun 0.8' i olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece bu tez kapsamında kullanılan süper birim hücreler 4x4 birim hücreden oluşacak şekilde düzenlenmiştir. 400 mm x 400 mm uzunluk ve genişliğe sahip bir kodlanmış metamalzeme 10x10 tane süper birim hücreden oluşmaktadır. Şekil

4.85’ te verildiği gibi, kodlanmış metamazeme birim hücrelerin oluşturduğu 4x4 süper birim hücre ve süper birim hücrelerin oluşturduğu 10x10 kodlanmış metamazmeden oluşmaktadır.



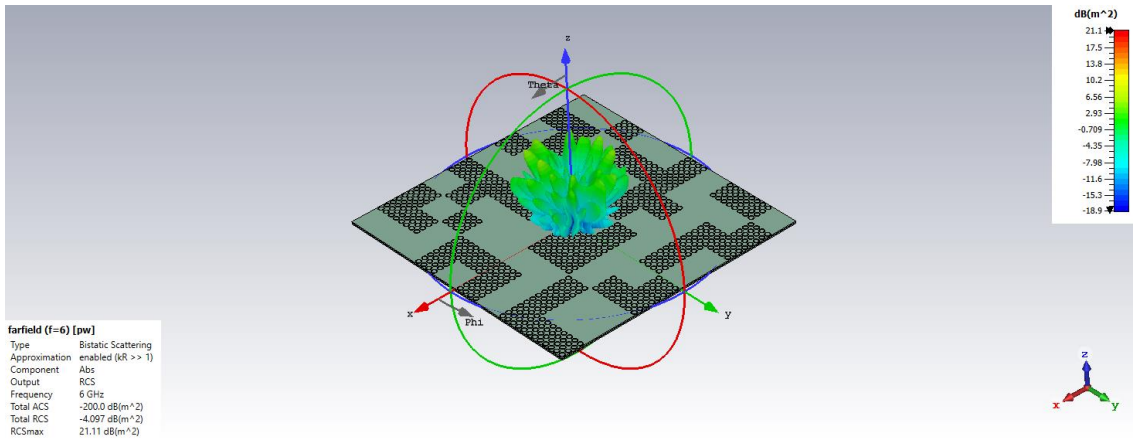
Şekil 4.85 Birim hücre, 4x4 süper birim hücre ve 10x10 kodlanmış metamazeme

Kodlanmış metamazeme uzak alan saçılma örüntüleri 4 – 16 GHz arasında incelenmiştir. p periyodunun 10 mm seçilmesinden dolayı Bölüm 3.1. ‘de belirtilen görünür bölgenin matrisin içinde kalması kısıtı en yüksek 15 GHz’ e kadar geçerlidir. Diğer bir ifade ile, 15 GHz’ e kadar (15 GHz dahil) MATLAB ortamında elde edilen değerler eksiksiz olarak $u-v$ düzleminde $\theta-\phi$ açılara haritalanabilmektedir. 15 GHz üstünde ise elde edilen değerler yeterli olmamaktadır. 16 GHz için, bilinmeyen değerlere 0 (sıfır) atanmış ve tam-dalga sonuç ile kıyaslanmıştır.

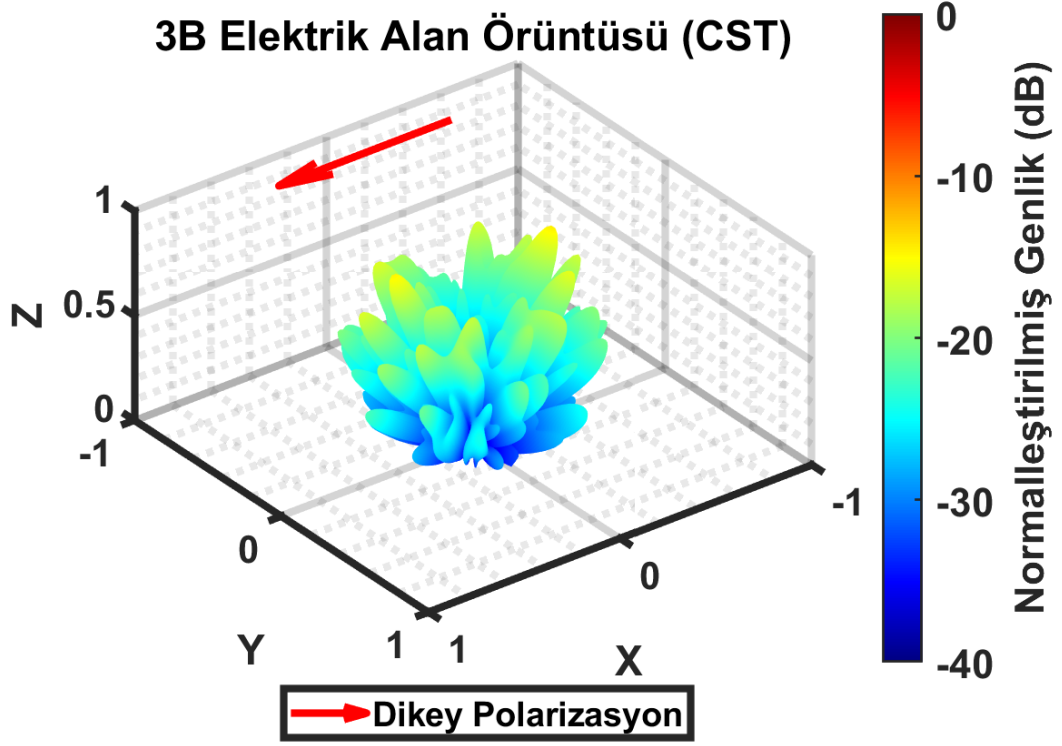
Uzak alan saçılma örüntüsü elde etme işlemi, MATLAB ortamında 4 fiziksel çekirdek, 16 GB RAM, 3.2 GHz Intel Core i7 işlemcisine sahip bilgisayarda her bir frekans, elektromanyetik dalga geliş açısı ve polarizasyon için ortalama anlık 2 GB RAM, %50 CPU tüketimi ile 120 saniye sürmüştür. CST Studio Suite programında tam-dalga benzetim ile elde edilen sonuçlar, 16 fiziksel çekirdek, 32 GB RAM, 3.2 GHz Intel Xeon Gold 6134 işlemci ile ortalama anlık 4 GB RAM ve %100 CPU tüketimi ile 6 GHz’ de 81.972 ağ için 14 dakika, 12 GHz’ de 264.848 ağ için 42 dakika ve 16 GHz’ de 461.196 ağ için 2 saat 30 dakika sürmüştür. Kaynak kullanımı açısından karşılaştırıldığında MATLAB ortamında yapılan benzetimlerin çok daha verimli olduğu ortaya çıkmaktadır.

CST Studio Suite programında yapılan benzetim çalışmaları ÇSHÇKY ile 0.003 artakalan hata ile gerçekleştirilmiştir.

CST Studio Suite programında elde edilen uzak alan saçılma örüntüleri MATLAB ile elde edilen uzak alan saçılma örüntüleri ile daha iyi karşılaştırılabilmesi amacıyla, CST Studio Suite programında elde edilen sonuçların MATLAB ortamında çizdirilmesi sağlanmıştır. Örnek olması açısından Şekil 4.86’ da 6 GHz dikey polarizasyonda normal geliş açısı ile gönderilen düzlem dalga altında kodlanmış metamatuzemenin uzak alan saçılma örüntüsü ve Şekil 4.87 ’de MATLAB ortamında grafiklendirilen uzak alan saçılma örüntüsü verilmiştir.

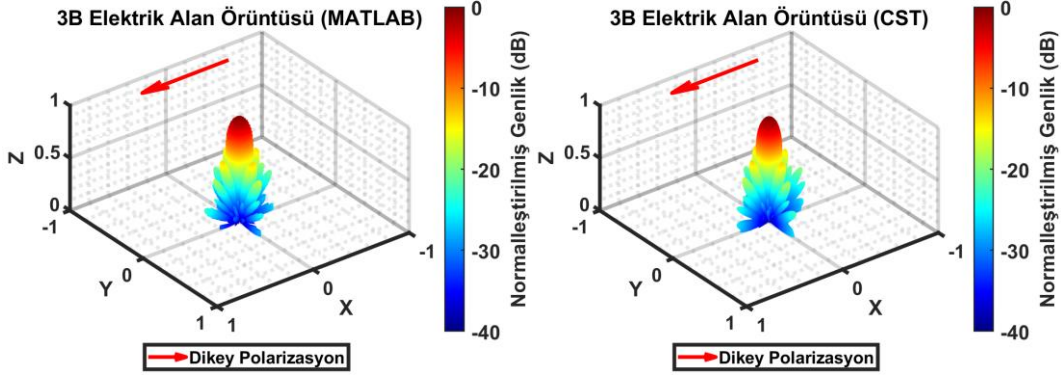


Şekil 4.86 Kodlanmış metamatuzeme ve 6 GHz dikey polarizasyon normal geliş açısında CST Studio Suite programında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü

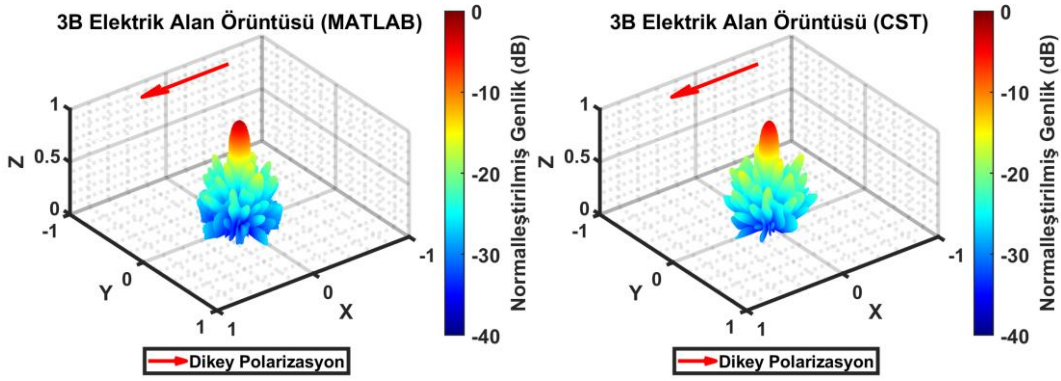


Şekil 4.87 Kodlanmış metamatzeme ve 6 GHz dikey polarizasyon normal ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında CST programında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsünün MATLAB ortamında grafiklendirilmesi

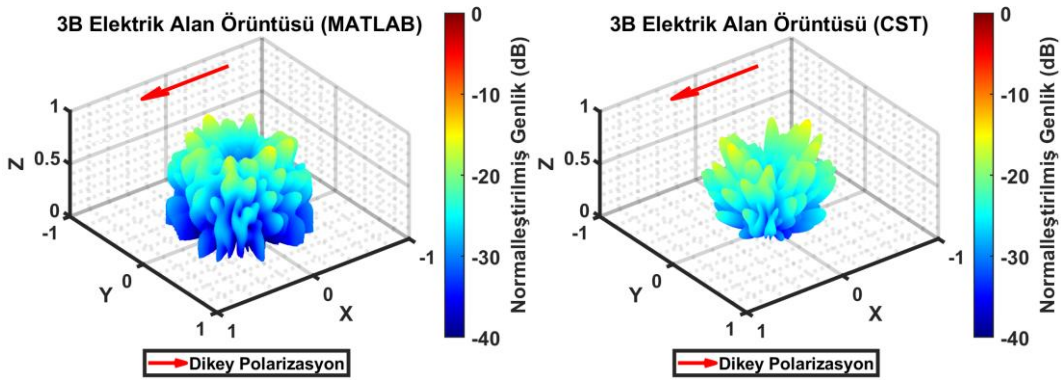
Şekil 4.88 ile Şekil 4.100 arasında dikey polarizasyon için ($0^\circ, 0^\circ$) ile gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen sonuçlar ve CST Studio Suite programında elde edilen sonuçlar verilmiştir.



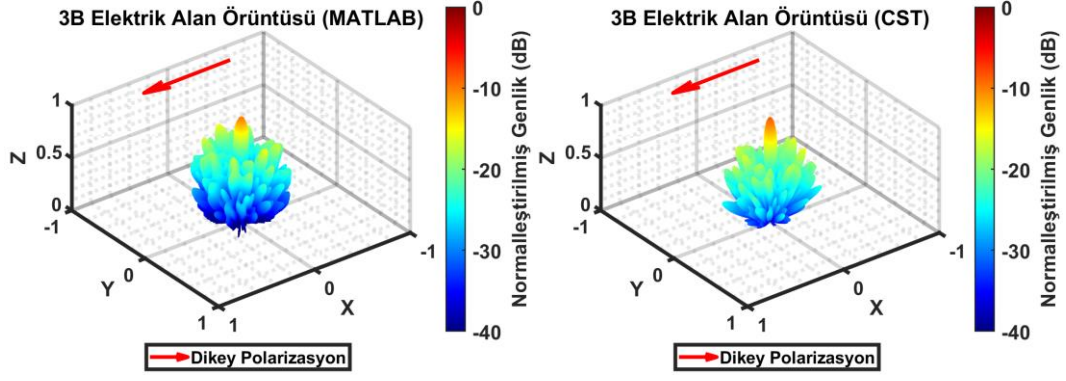
Şekil 4.88 Kodlanmış metamalzemenin 4 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



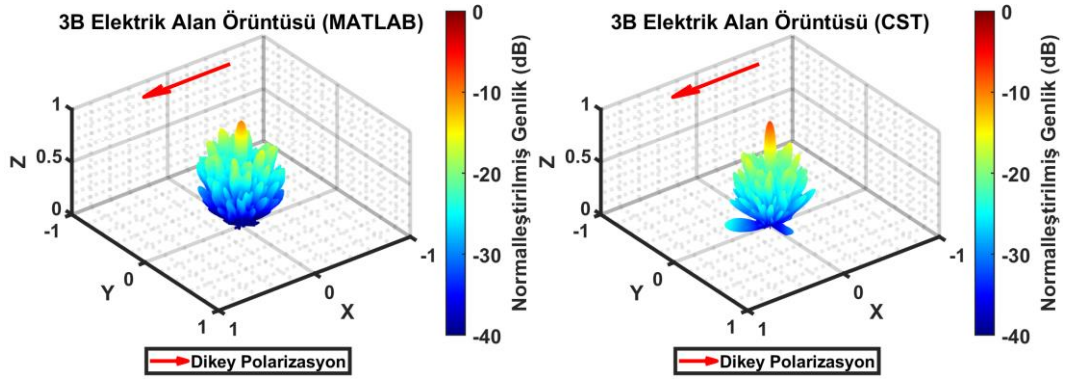
Şekil 4.89 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



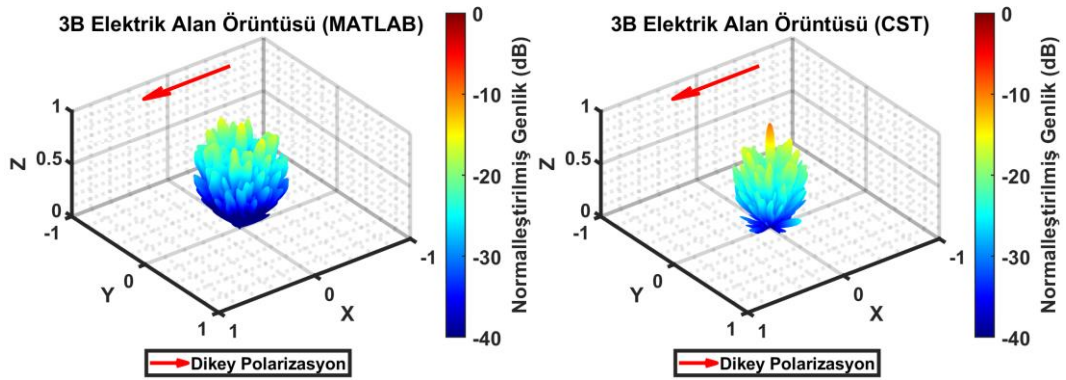
Şekil 4.90 Kodlanmış metamalzemenin 6 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



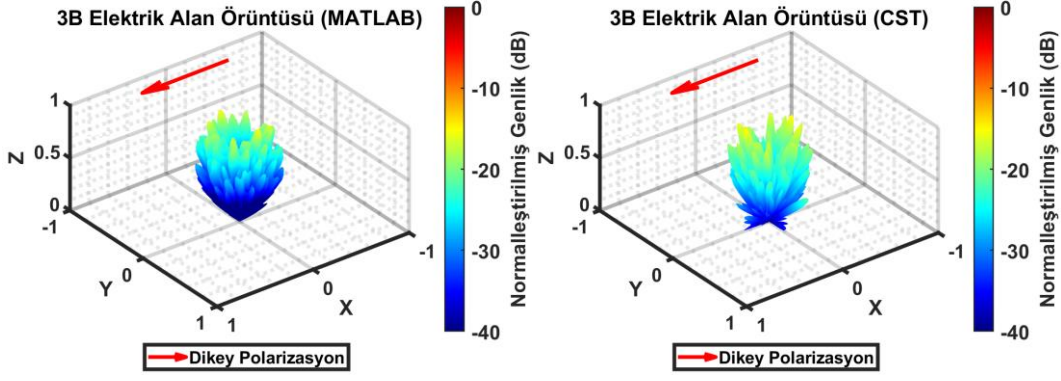
Şekil 4.91 Kodlanmış metamalzemenin 7 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği



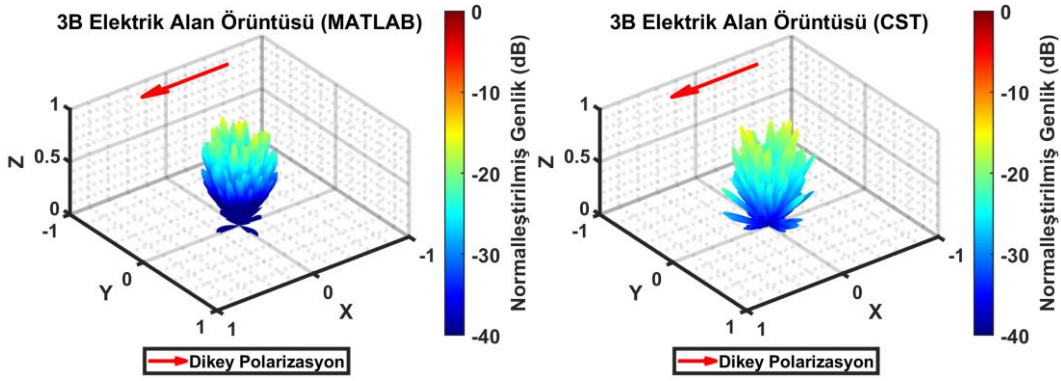
Şekil 4.92 Kodlanmış metamalzemenin 8 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği



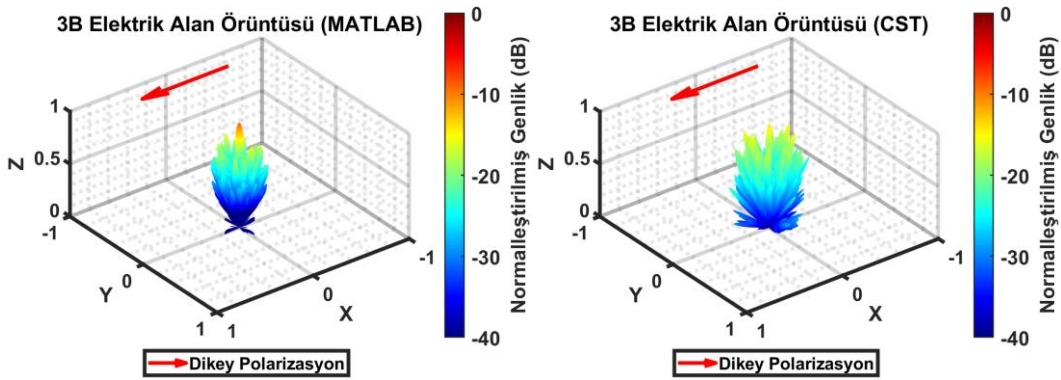
Şekil 4.93 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği



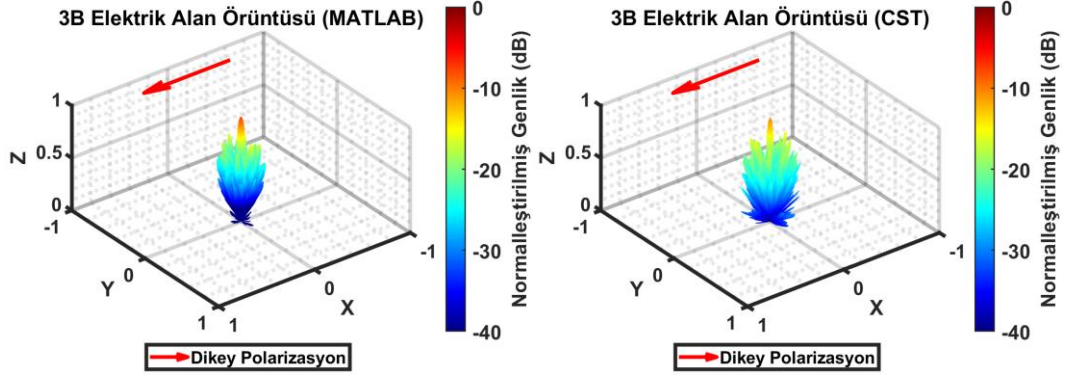
Şekil 4.94 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



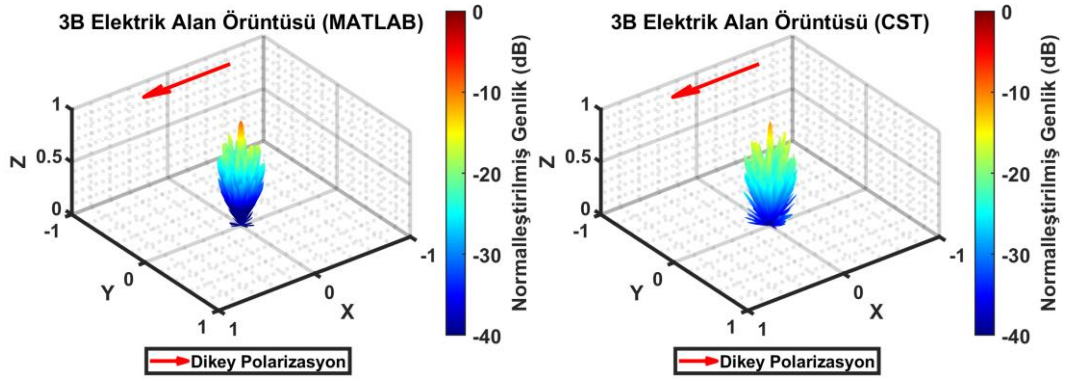
Şekil 4.95 Kodlanmış metamalzemenin 11 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



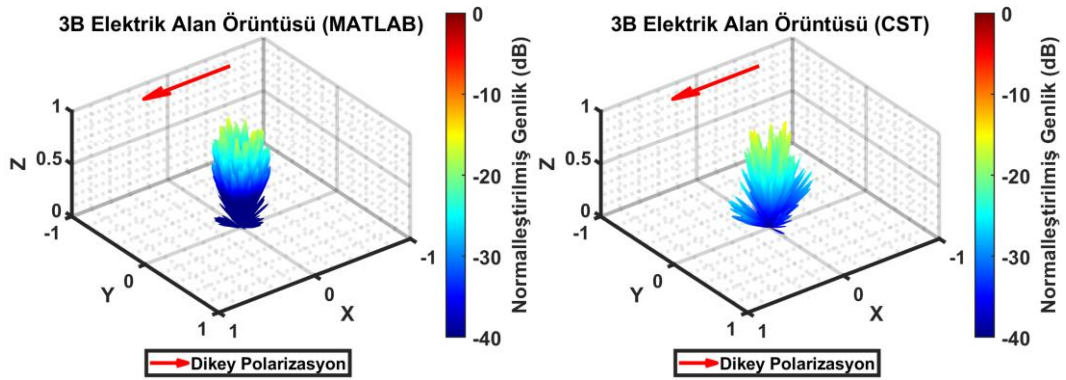
Şekil 4.96 Kodlanmış metamalzemenin 12 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



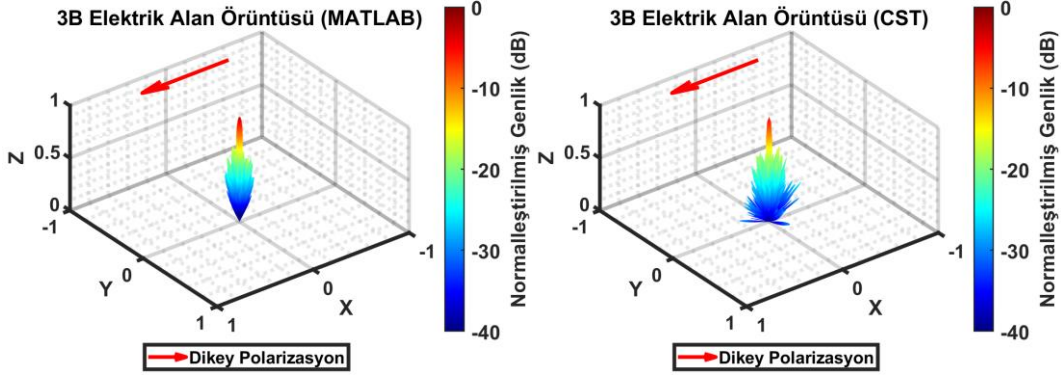
Şekil 4.97 Kodlanmış metamatzemenin 13 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği



Şekil 4.98 Kodlanmış metamatzemenin 14 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği

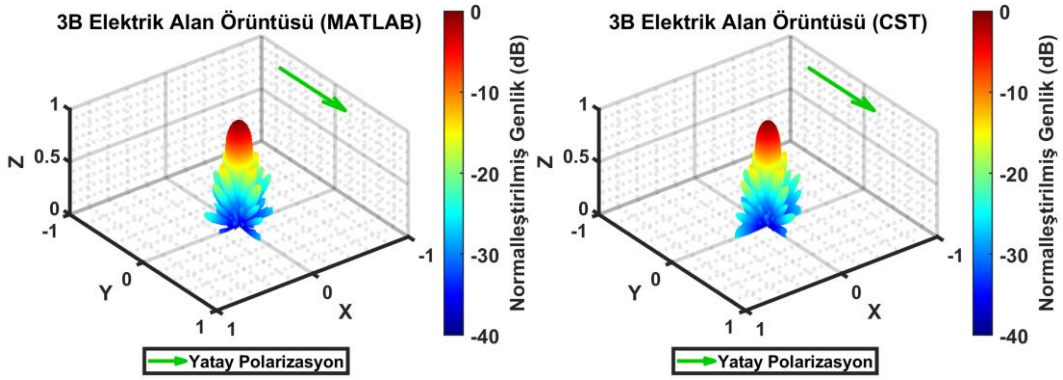


Şekil 4.99 Kodlanmış metamatzemenin 15 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneği

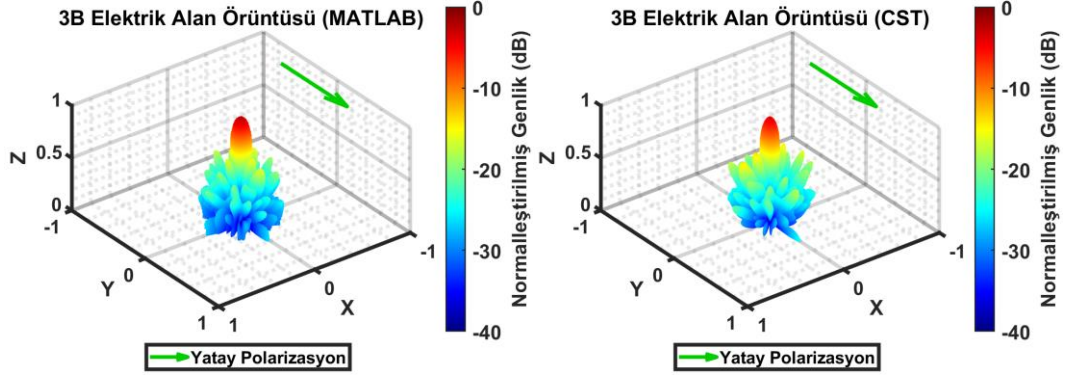


Şekil 4.100 Kodlanmış metalmalzemenin 16 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geniş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

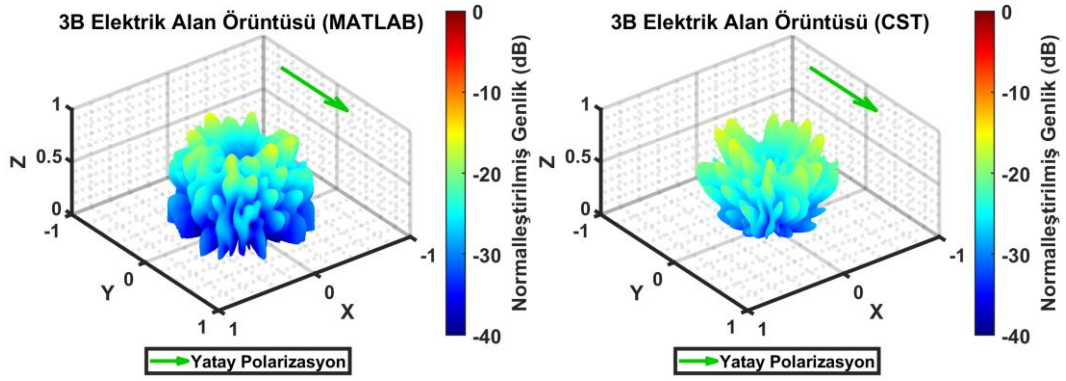
Şekil 4.101 ile Şekil 4.113 arasında yatay polarizasyon için ($0^\circ, 0^\circ$) ile gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen sonuçlar ve CST programında elde edilen sonuçlar verilmiştir.



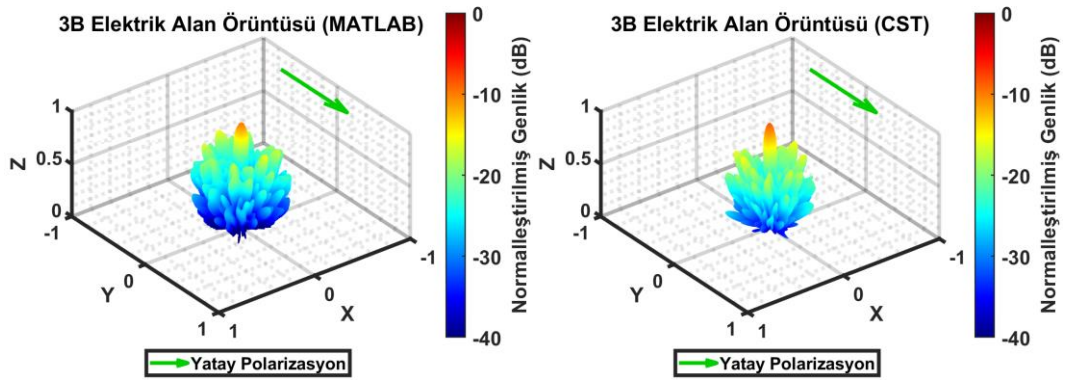
Şekil 4.101 Kodlanmış metalmalzemenin 4 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



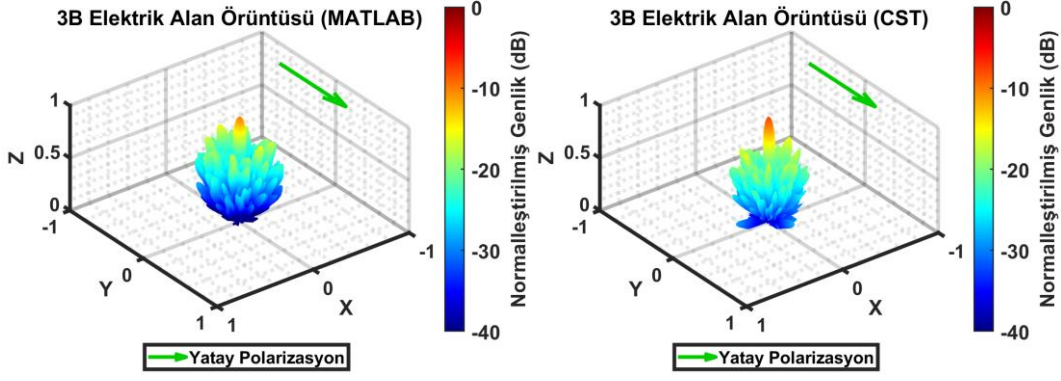
Şekil 4.102 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



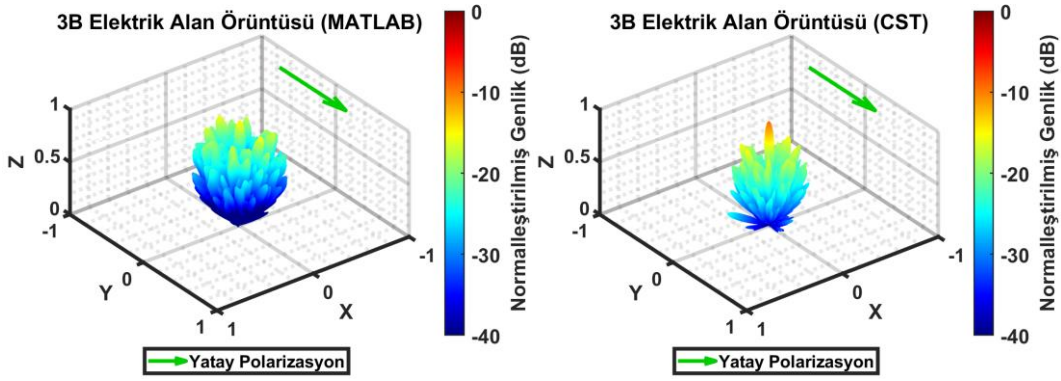
Şekil 4.103 Kodlanmış metamalzemenin 6 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



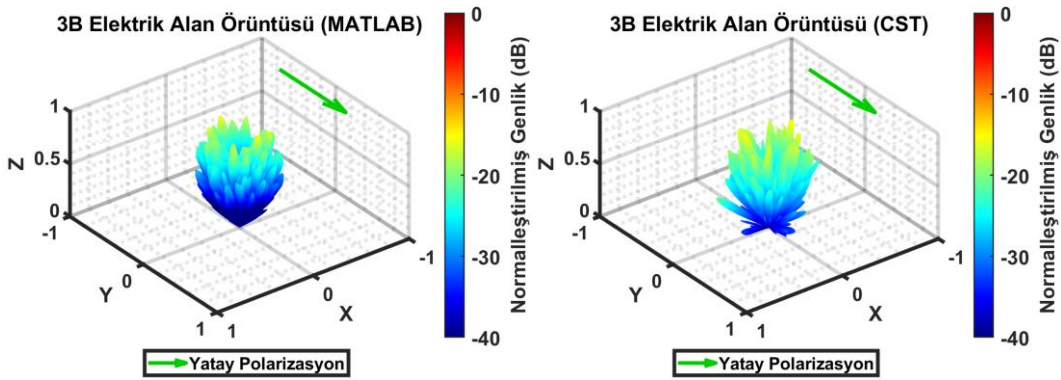
Şekil 4.104 Kodlanmış metamalzemenin 7 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



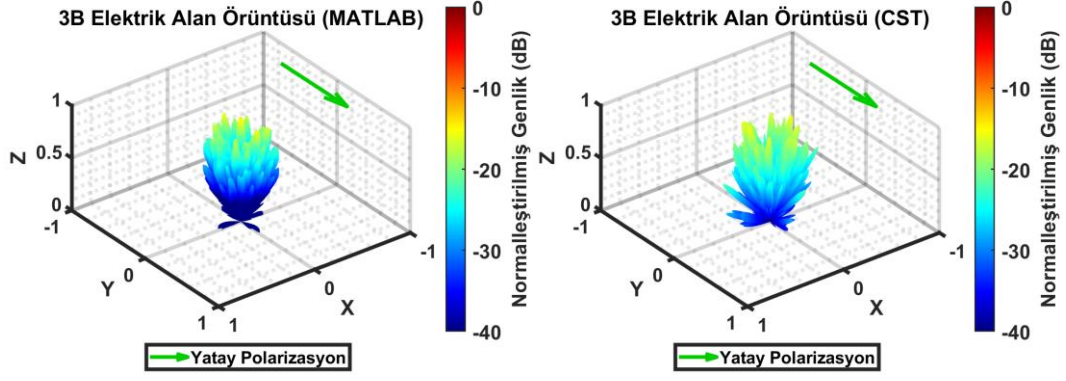
Şekil 4.105 Kodlanmış metamalzemenin 8 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



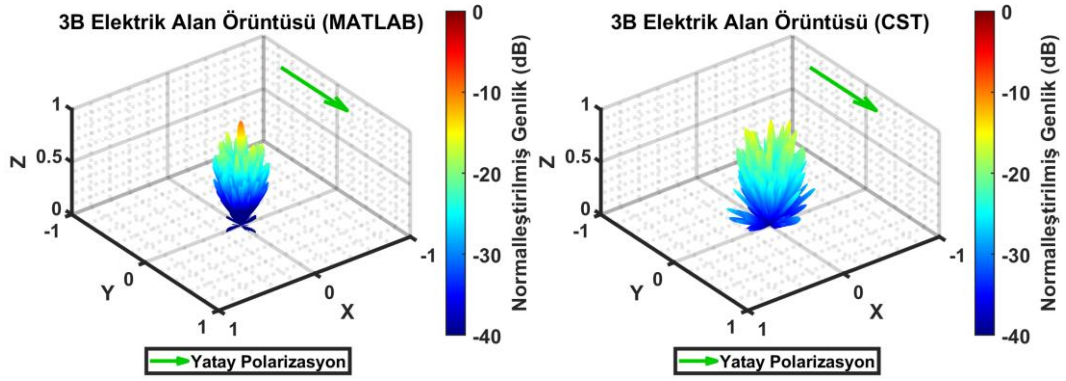
Şekil 4.106 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



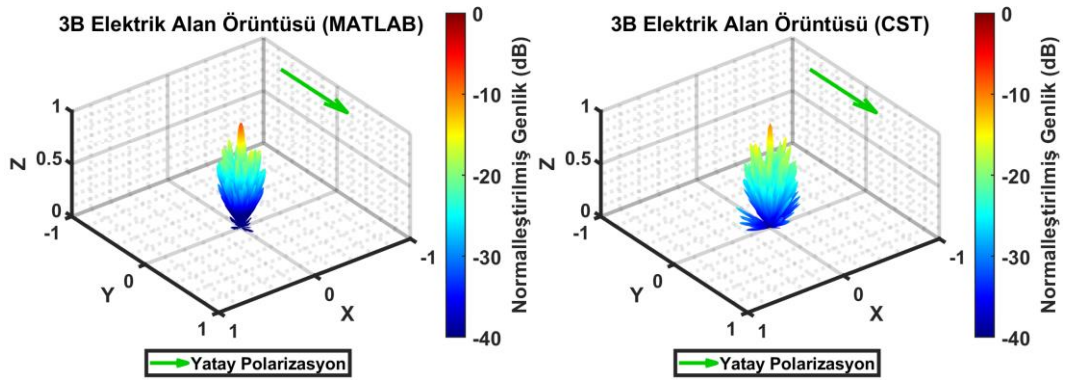
Şekil 4.107 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü



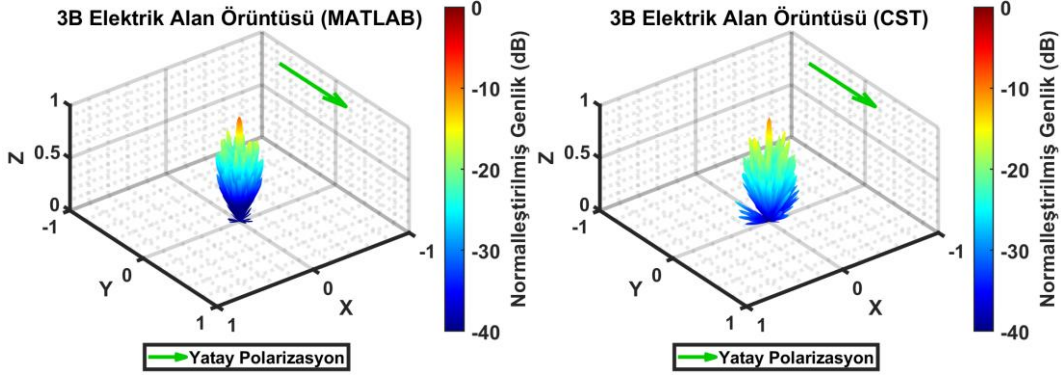
Şekil 4.108 Kodlanmış metamalzemenin 11 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



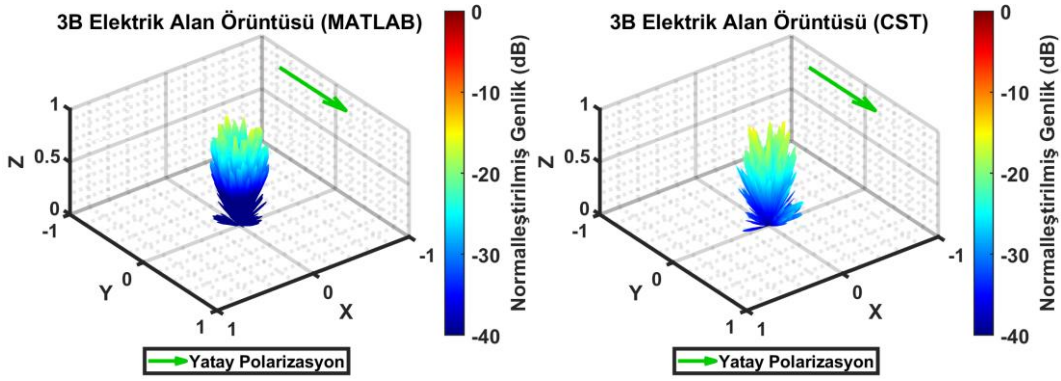
Şekil 4.109 Kodlanmış metamalzemenin 12 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



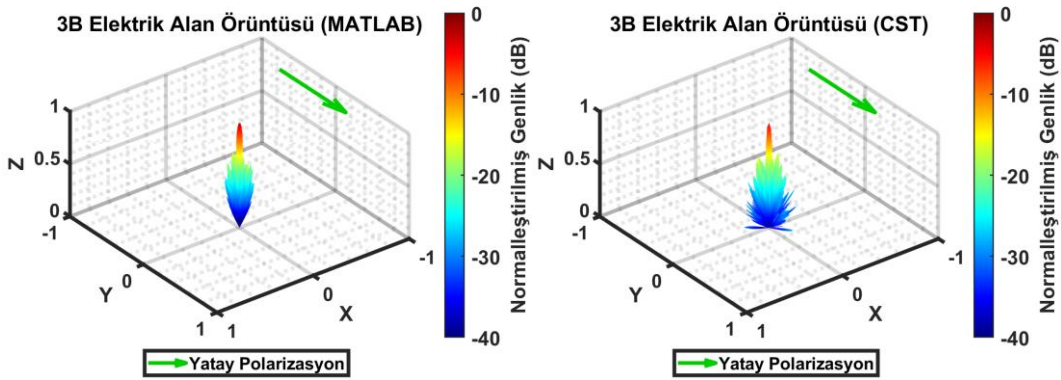
Şekil 4.110 Kodlanmış metamalzemenin 13 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örneüsü



Şekil 4.111 Kodlanmış metamalzemenin 14 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

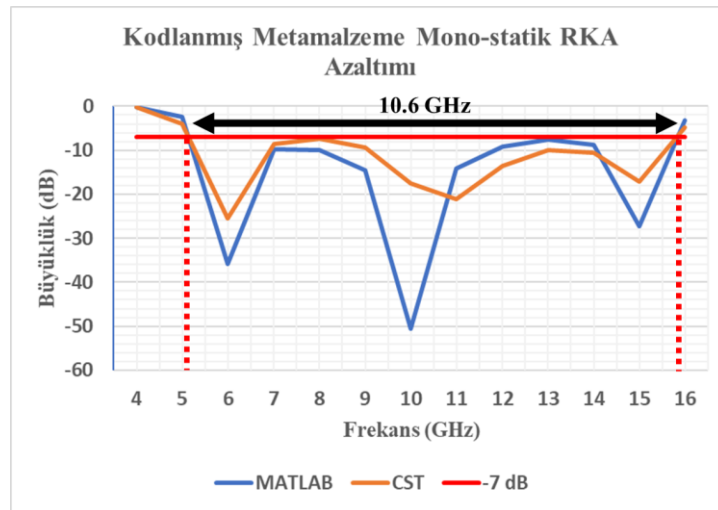


Şekil 4.112 Kodlanmış metamalzemenin 15 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

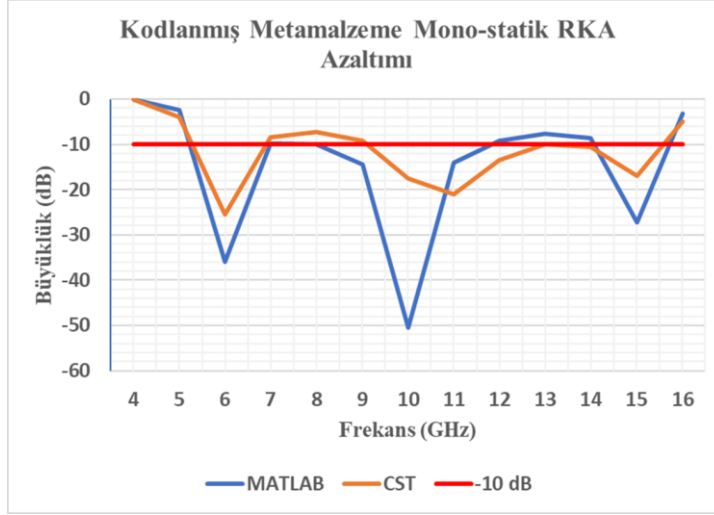


Şekil 4.113 Kodlanmış metamalzemenin 16 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geniş açısı yatay polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

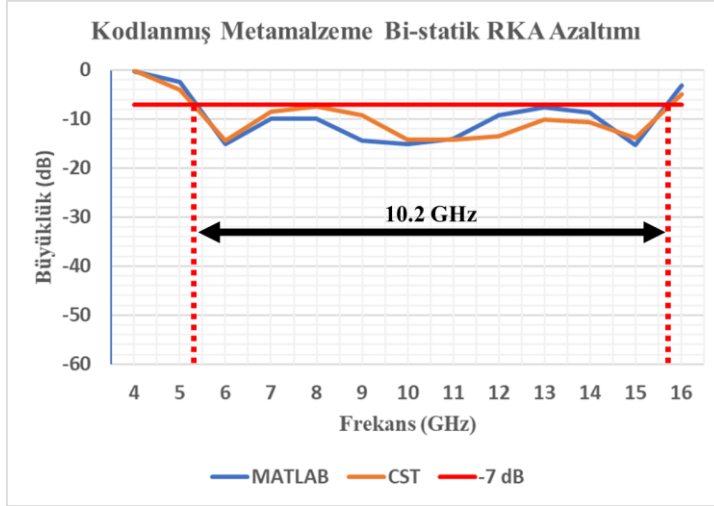
Şekil 4.88 ile Şekil 4.113 arasında verilen sonuçlar kıyaslandığında yüksek oranda sonuçlar birbiri ile uyuşmaktadır. Kartezyen grafik olarak, $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalga altında dikey polarizasyonda (Yatay polarizasyonla aynı sonuç elde edildiği için sadece dikey polarizasyon paylaşılmıştır.) elde edilen mono-statik RKA azaltımı ve en düşük bi-statik RKA azaltımı Şekil 4.114 ile Şekil 4.115 ve Şekil 4.116 ile Şekil 4.117’ de verilmiştir. -7 dB referans olarak alındığında bant genişliği mono-statik için yaklaşık olarak 10.6 GHz, bi-statik için 10.2 GHz düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu değer referans alınması geri dönen gücün en yüksek %20 seviyesinde olması, gelen güç miktarının en az %80 seviyesinde soğurulması anlamına gelmektedir. -10 dB referans olarak alındığında ise mono-statik için 3 farklı, bi-statik için 2 farklı bantta RKA azaltımı elde edilmektedir. Bu değer referans alınması geri dönen gücün en yüksek %10 seviyesinde olması, gelen güç miktarının en az %90 seviyesinde soğurulması anlamına gelmektedir. Mono-statik durum için, MATLAB ile elde edilen değerler incelendiğinde, yaklaşık olarak 5.3 ile 12 GHz arasında ve 14.2 ile 15.6 GHz arasında, CST ile elde edilen değerler incelendiğinde, yaklaşık olarak 5.3 ile 6.8 GHz ve 9 ile 15.5 GHz arasında en az 10 dB RKA azaltımı elde edilmektedir. Bi-statik durum için, MATLAB ile elde edilen değerler incelendiğinde, yaklaşık olarak 5.4 ile 11.8 GHz arasında ve 14.2 ile 15.4 GHz arasında, CST ile elde edilen değerler incelendiğinde, yaklaşık olarak 5.4 ile 6.6 GHz ve 9.2 ile 15.4 GHz arasında en az 10 dB RKA azaltımı elde edilmektedir.



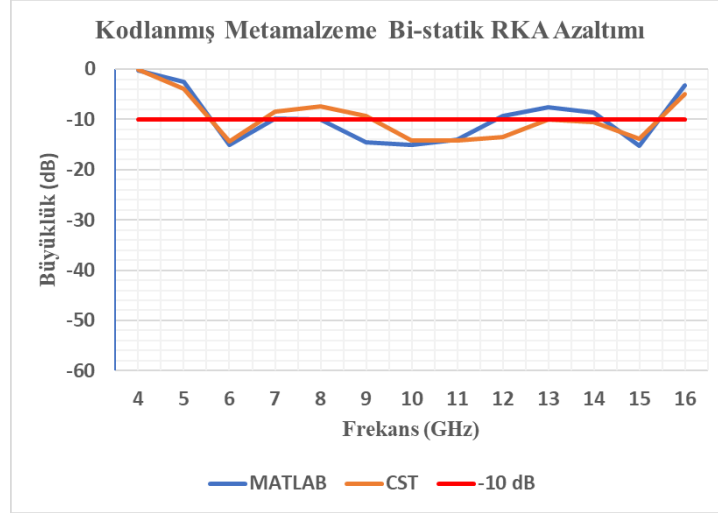
Şekil 4.114 Kodlanmış metamalzeme mono-statik RKA azaltımı MATLAB ve CST programında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve -7 dB referans çizgisi



Şekil 4.115 Kodlanmış metamalzeme mono-statik RKA azaltımı MATLAB ve CST programında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve -10 dB referans çizgisi



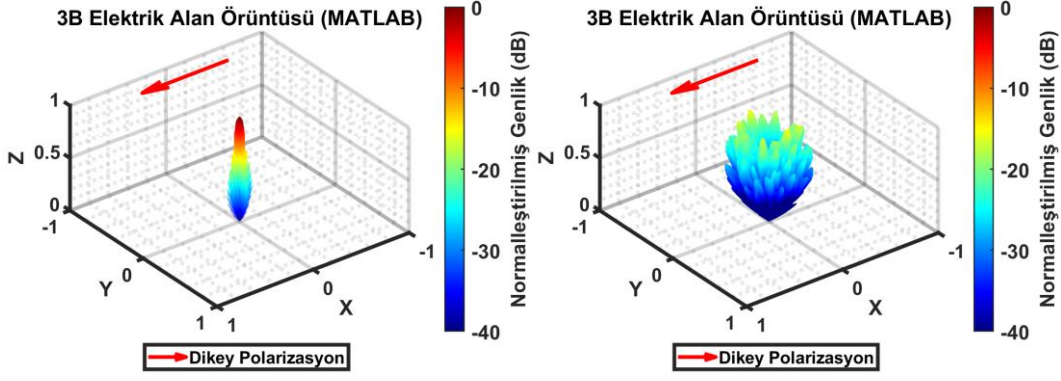
Şekil 4.116 Kodlanmış metamalzeme bi-statik RKA azaltımı MATLAB ve CST programında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve -7 dB referans çizgisi



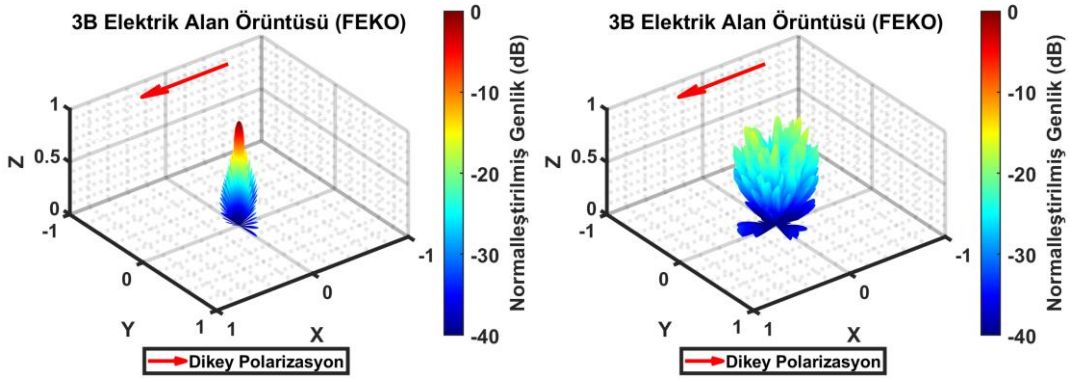
Şekil 4.117 Kodlanmış metamalzeme bi-statik RKA azaltımı MATLAB ve CST programında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve -10 dB referans çizgisi

Gelen elektromanyetik dalga açısı ($0^\circ, 0^\circ$) olduğunda, sonuçlar tutarlı olmasına karşın bazı değerlerde küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu durumun iki önemli sebebi olabilir. Birim hücre benzetim çalışmalarında faz değerleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilirken, tam-dalga benzetimleri Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup Yöntemi ile elde edilmiştir. İki yöntem arasında bulunan küçük faz farkları bu duruma sebebiyet verebilir. Diğer sebep ise, tam-dalga yöntem ile kenar kırılım etkilerinin hesaplamalara dahil edilmesi olabilir.

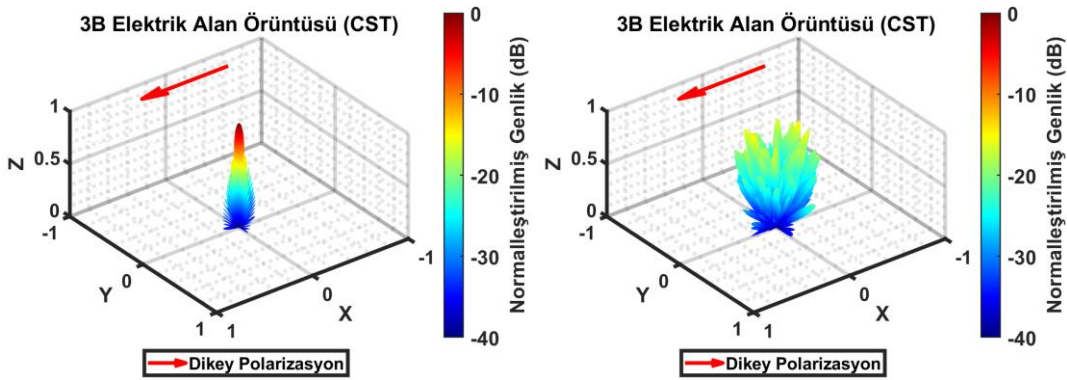
Kenar kırılım etkisinin uzak alan saçılma örüntüsü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, ($0^\circ, 0^\circ$) ve ($45^\circ, 0^\circ$) geliş açısında hem kodlanmış metamalzemenin hem de kodlanmış metamalzeme ile aynı genişliğe ve uzunluğa sahip mükemmel elektrik iletken yüzeyin MATLAB, Altair FEKO (Asimptotik yöntem) ve CST Studio Suite (Tam-dalga yöntem) ile benzetimleri 10 GHz' de ve dikey polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamında elde edilen grafikler ve değerlerde Bölüm 3.1.' de ifade edilen uzak alan saçılma formülleri kullanılmıştır. Bu formüllerde kenar kırılım etkileri dahil değildir. FEKO programında, elde edilen grafik ve değerler asimptotik yöntemle birim hücrelere faz ve genlik tanımlaması yapılarak elde edilmiştir. FEKO programında hesaplamalar yapılırken kenar kırılım etkileri dahil edilmemiştir. CST programında, elde edilen grafik ve değerler tam-dalga yöntemle bütün kodlanmış metamalzeme bilgileri ve boyutları tanımlanarak elde edilmiştir. Bu yöntemde kenar kırılım etkileri sonuçlara dahildir.



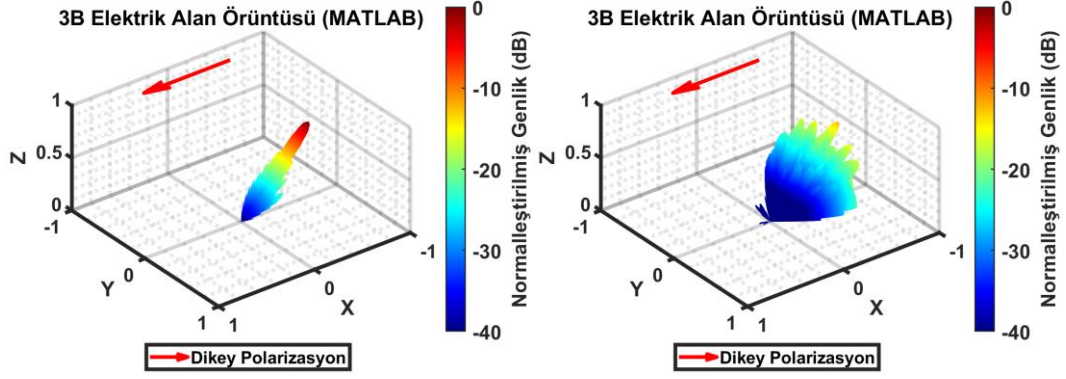
Şekil 4.118 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü



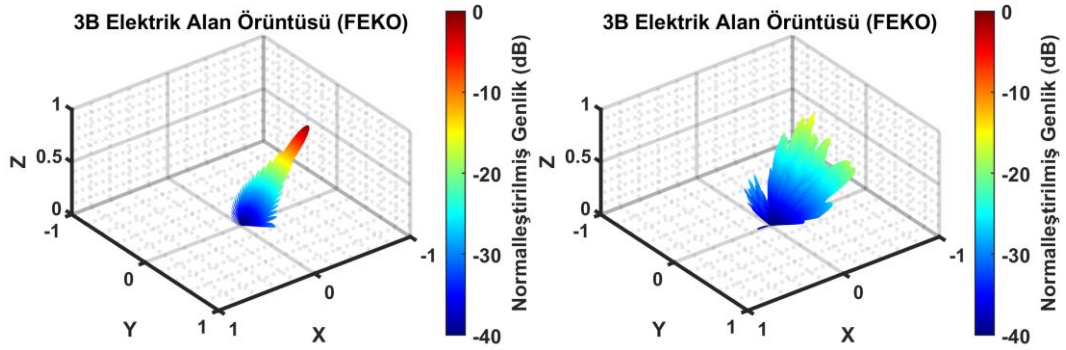
Şekil 4.119 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında FEKO ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü



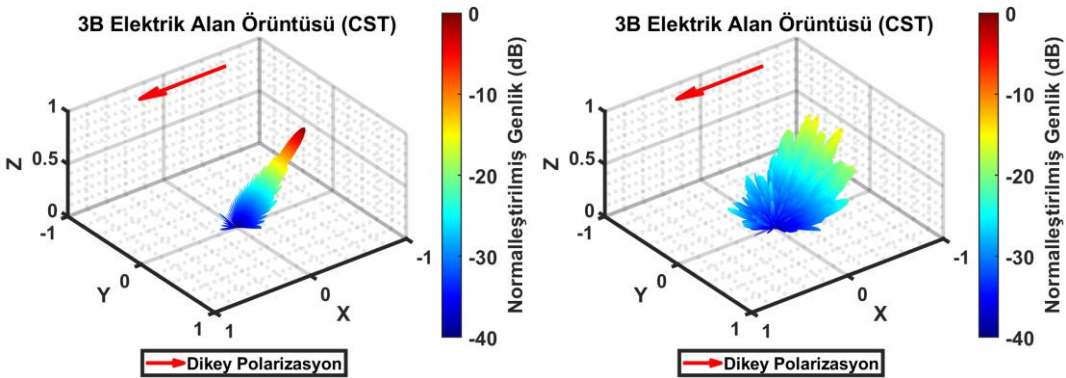
Şekil 4.120 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metamalzemenin (sağda) 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında CST ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü



Şekil 4.121 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metalmalzememin (sağda) 10 GHz ($45^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü



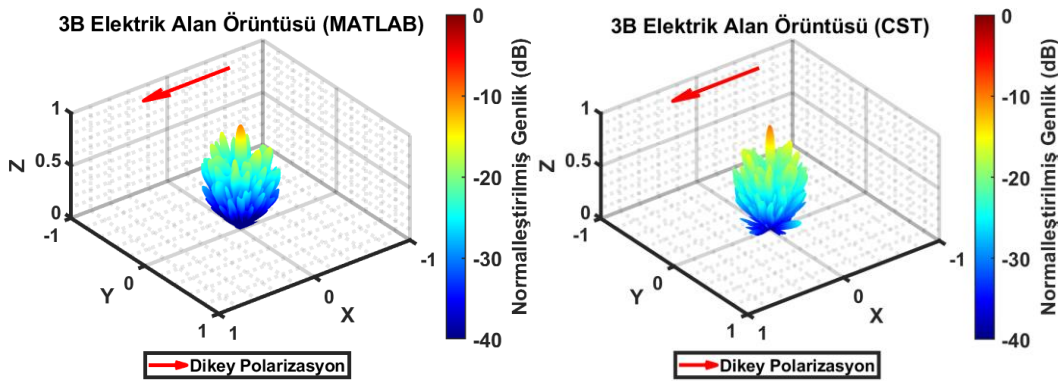
Şekil 4.122 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metalmalzememin (sağda) 10 GHz ($45^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında FEKO ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü



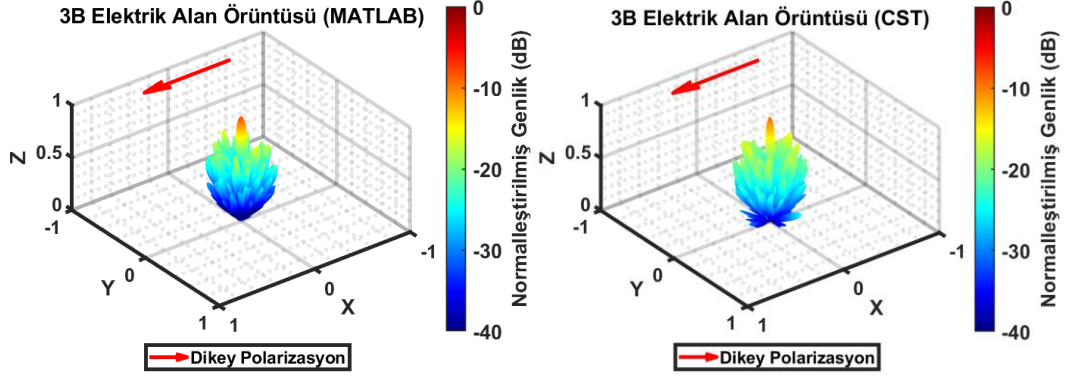
Şekil 4.123 Mükemmel elektrik iletken yüzeyin (solda) ve kodlanmış metalmalzememin (sağda) 10 GHz ($45^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında CST ortamında elde edilen uzak alan saçılma örüntüsü

Şekil 4.118 ile Şekil 4.123 arasında verilen uzak alan saçılma örüntüleri incelendiğinde $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısında dikey polarizasyonda gelen elektromanyetik dalga ile aydınlatılan mükemmel elektrik iletken ve kodlanmış metamalzemenin uzak alan saçılma örüntüleri genel anlamda benzerlik göstermektedir. Ancak, $(45^\circ, 0^\circ)$ geliş açısında dikey polarizasyonda gelen elektromanyetik dalga ile aydınlatılan mükemmel elektrik iletken ve kodlanmış metamalzemenin uzak alan saçılma örüntüleri ana yansıma yönünde (ana yansıma yönü $(45^\circ, 180^\circ)$) benzerlik gösterdiği için en yüksek bi-statik RKA değerleri benzer iken, mono-statik RKA değerleri elde edilen açılarda bir miktar farklılıklar gözlemlenmektedir.

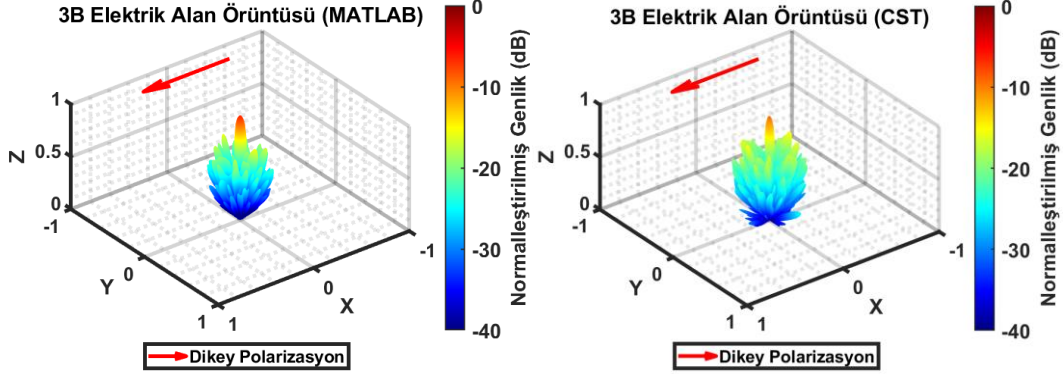
Uzak alan saçılma formüllerinde kullanılan faz farkı değerlerindeki farklılıkların uzak alan saçılma örüntüsüne etkisini incelemek amacıyla $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısı dikey polarizasyonda 9 GHz’ de gelen düzlem dalganın kodlanmış metamalzeme üzerinde farklı faz farkı değerlerine karşı davranışı incelenmiştir. Şekil 4.93’ de verilen MATLAB’ da elde edilen uzak alan saçılma örüntüsünde birim hücreler arası faz farkı yaklaşık olarak 157° dir. Şekil 4.124’ te, Şekil 4.125’ te ve Şekil 4.126’ da birim hücreler arası faz farkı sırasıyla 143° , 133° ve 123° için elde edilen MATLAB sonuçları ve karşılaştırma için CST tam-dalga sonuçları paylaşılmıştır. Özellikle faz farkı değeri 133° olduğunda sonuçlar birbirleri ile uyumlu olmaktadır. Dolayısıyla birim hücrelerden elde edilen faz farkı ile tam-dalga benzetimlerde küçük farklılıklar bulunabilmektedir.



Şekil 4.124 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 143° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB’ da (solda) ve CST’ de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

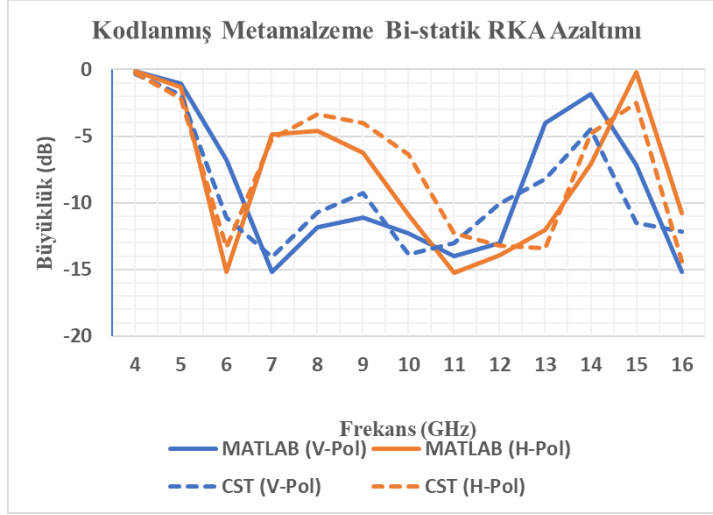


Şekil 4.125 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 133° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

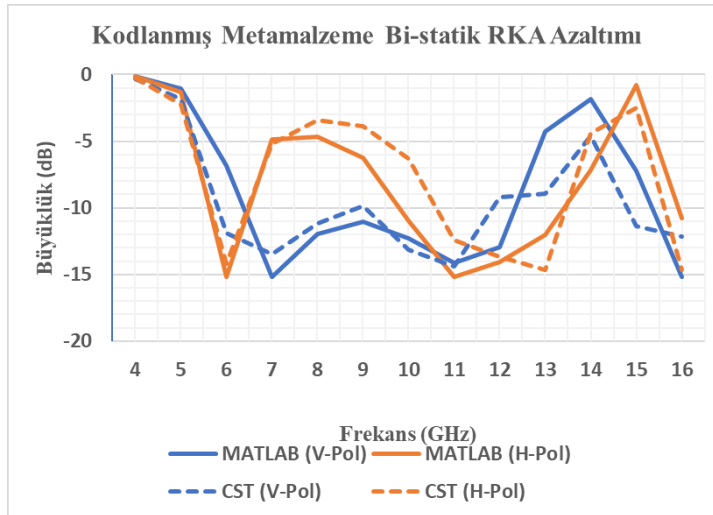


Şekil 4.126 Kodlanmış metamalzemenin 9 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında 123° birim hücreler arası faz farkı için MATLAB' da (solda) ve CST' de (sağda) uzak alan saçılma örüntüsü

($45^\circ, 0^\circ$) ve ($45^\circ, 90^\circ$) geliş açısında dikey ve yatay polarizasyonda gelen elektromanyetik dalganın kodlanmış metamalzeme ile MATLAB ve CST ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri Şekil 4.127 ve Şekil 4.128' de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde genel anlamda değerler birbirini takip etmektedir.



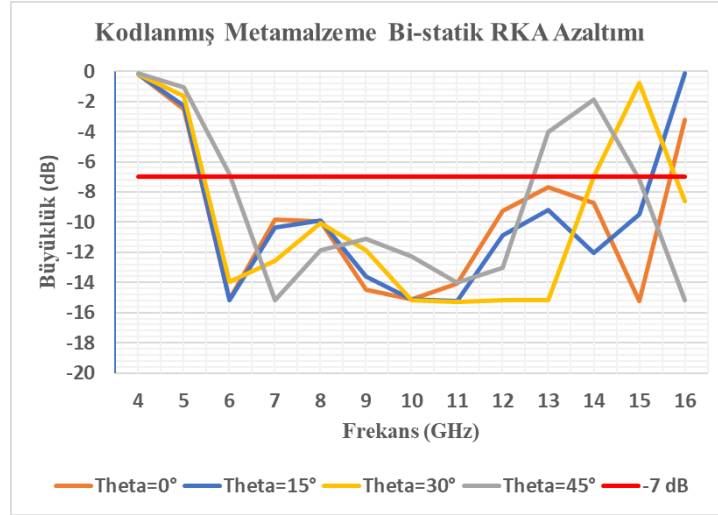
Şekil 4.127 (45°,0°) geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalganın kodlanmış metamalzeme ile MATLAB ve CST ortamında elde edilen değerlerin en düşük bi-statik RKA azaltım değerleri



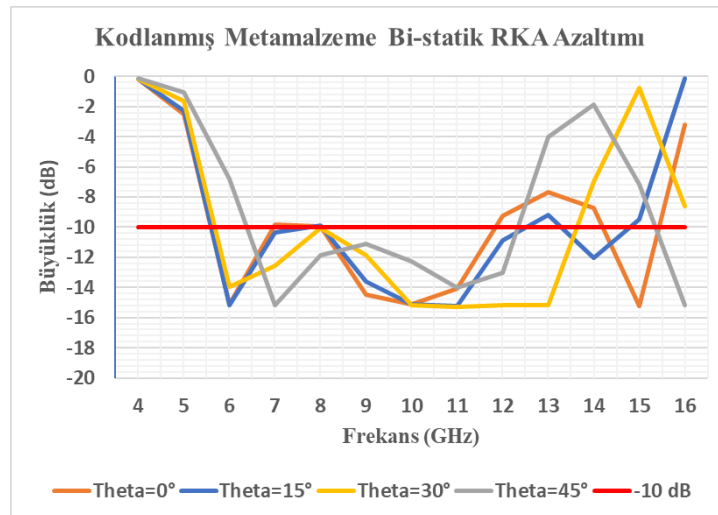
Şekil 4.128 (45°,90°) geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalganın kodlanmış metamalzeme ile MATLAB ve CST ortamında elde edilen en düşük bi-statik RKA azaltım değerleri

Şekil 4.129 ile Şekil 4.130' da MATLAB ortamında elde edilen dikey polarizasyon için Şekil 4.131 ile Şekil 4.132' de MATLAB ortamında elde edilen yatay polarizasyon için farklı geliş açılarında bi-statik RKA azaltım değerleri, sırasıyla, verilmiştir. 7 dB ve 10 dB RKA azaltımı referans alındığında dikey polarizasyon için geliş açısı arttıkça, bant genişliği Ku-bant bölgesinde bir miktar azalmıştır. Yatay polarizasyon için bant genişliği -7 dB referans alındığında Ku bant bölgesinde daha kararlı iken, -10 dB referans

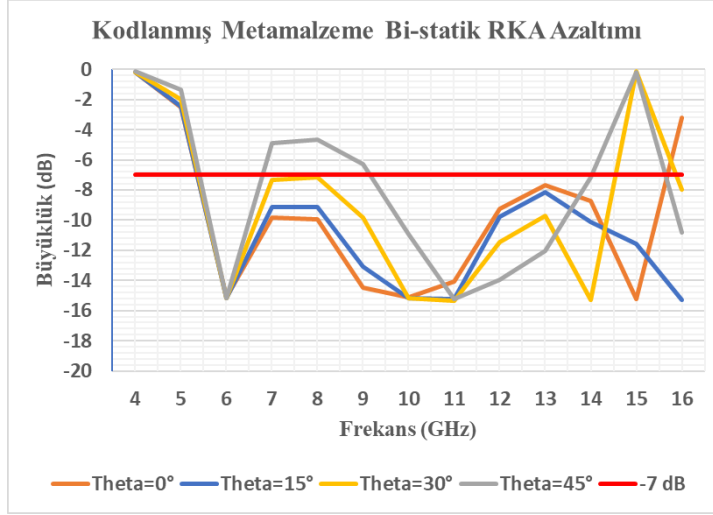
alındığında bant genişliği azalmaktadır. Kodlanmış metamalzeme bi-statik RKA azaltımı farklı geliş açıları için dikey polarizasyonda yatay polarizasyona göre daha karardır. Bu durumun temel nedeni birim hücreler arası faz farkının farklı geliş açlarındaki tepkisidir. Şekil 4.72 ve Şekil 4.73' de birim hücreler arası faz farkının farklı geliş açlarında polarizasyona bağı değerleri verilmiştir.



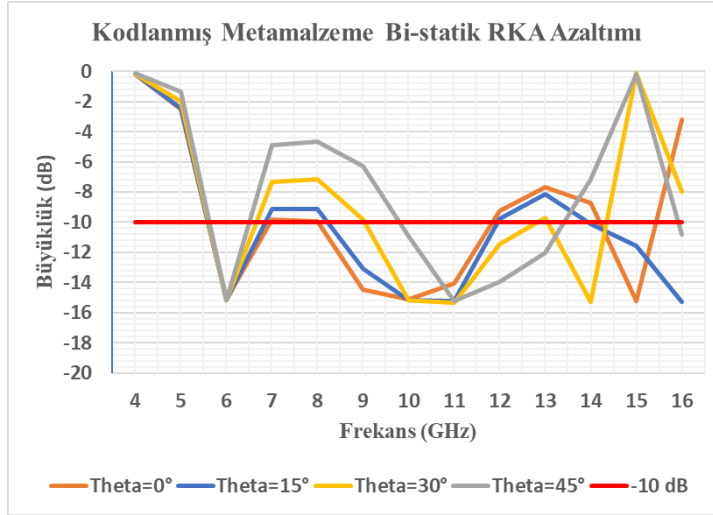
Şekil 4.129 Kodlanmış metamalzemenin dikey polarizasyon farklı geliş açlarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -7 dB referans çizgisi



Şekil 4.130 Kodlanmış metamalzemenin dikey polarizasyon farklı geliş açlarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -10 dB referans çizgisi



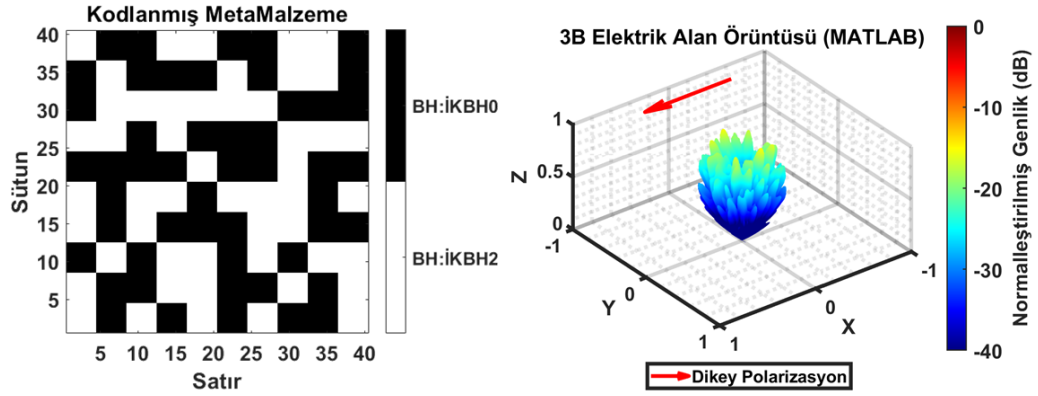
Şekil 4.131 Kodlanmış metamalzemenin yatay polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -7 dB referans çizgisi



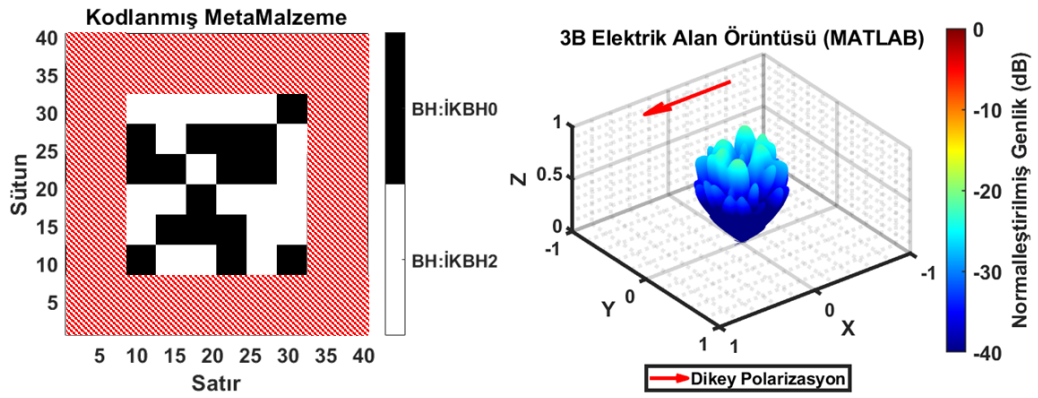
Şekil 4.132 Kodlanmış metamalzemenin yatay polarizasyon farklı geliş açılarında MATLAB ortamında elde edilen bi-statik RKA azaltım değerleri ve -10 dB referans çizgisi

Öte yandan, kodlanmış metamalzemeyi oluşturan birim hücre konumlarının uzak alan saçılma örüntüsüne olan etkisi her konum için aynı olmamaktadır. Bu etkiyi incelemek amacıyla kodlanmış metamalzeme bulunan süper birim hücrelerin bir kısmının genliği sıfır olarak ayarlanmış, bir kısmının genliği ise değiştirilmemiştir. Böylece genliği değiştirilmeyen süper birim hücreler uzak alan saçılma örüntüsüne dahil edilmiş, genliği sıfır olanlar ise uzak alan saçılma örüntüsünden çıkarılmıştır. 10 GHz, dikey polarizasyon

ve $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısında gelen düzlem dalga altında kırmızı ile taranan süper birim hücrelerin genlikleri sıfır olduğunda (süper birim hücreler uzak alan saçılma örüntüsüne katkı vermediği durumda) elde edilen uzak alan saçılma örüntüleri Şekil 4.134 ile Şekil 4.137 arasında verilmiştir. Şekil 4.133' te ise kodlanmış metamalzemenin 10 GHz $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü verilmiştir.

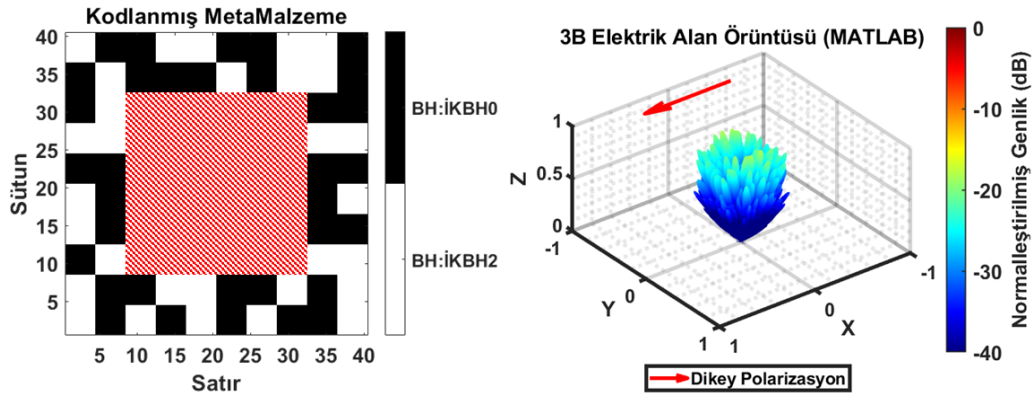


Şekil 4.133 Kodlanmış metamalzemenin 10 GHz $(0^\circ, 0^\circ)$ geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

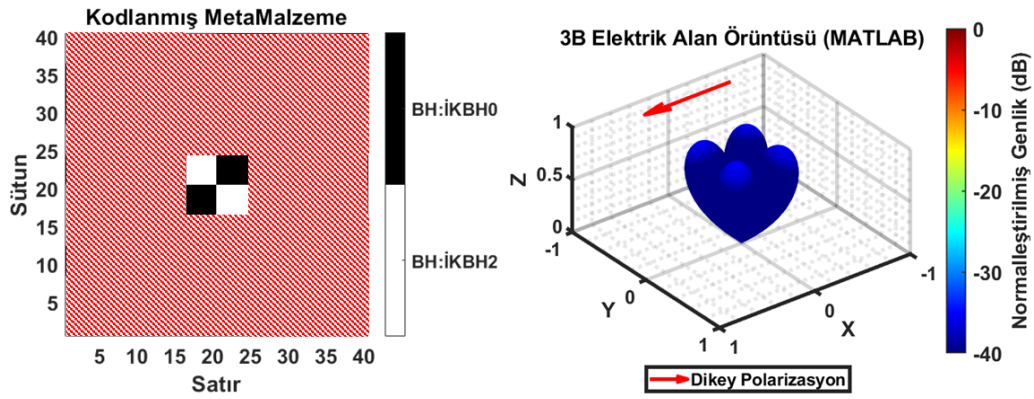


Şekil 4.134 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücrenin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz

($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

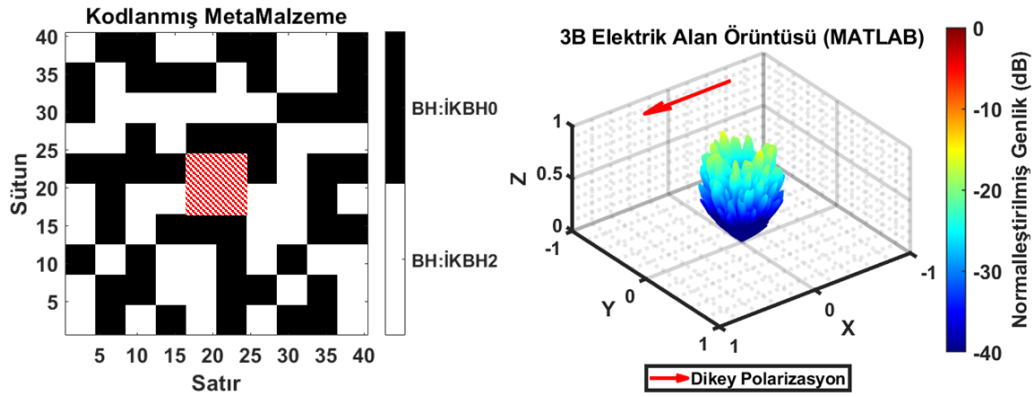


Şekil 4.135 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü



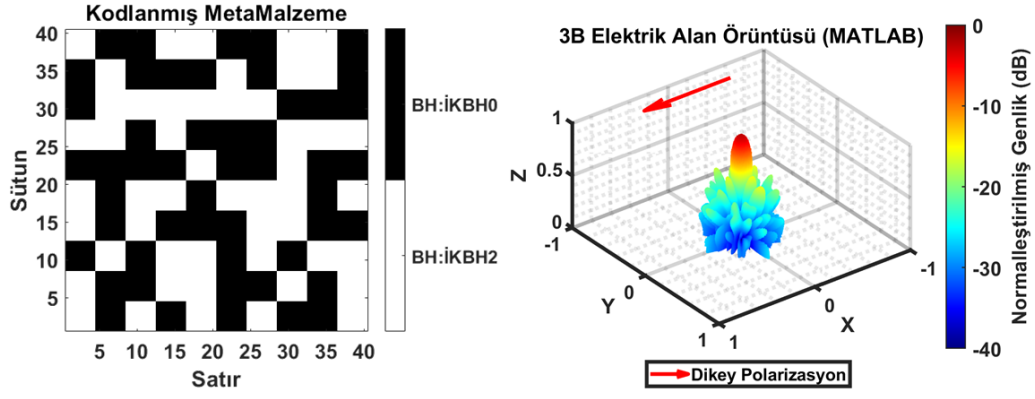
Şekil 4.136 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 4 süper birim hücrenin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz

($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

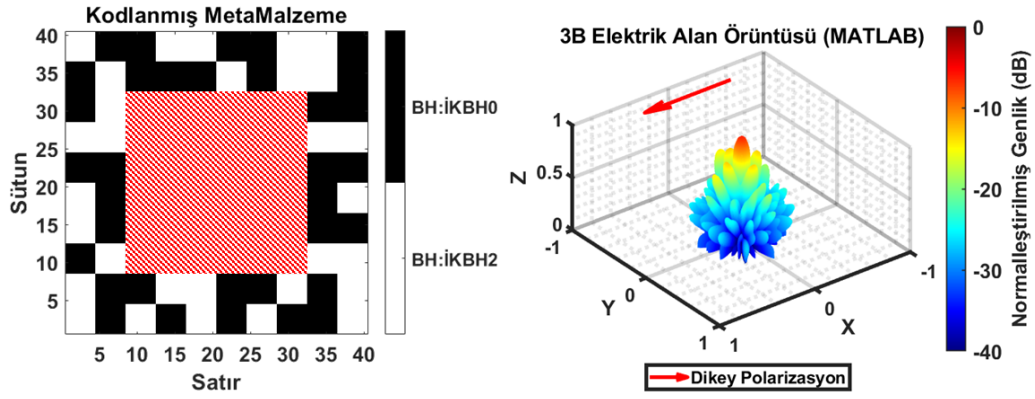


Şekil 4.137 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 4 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 10 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

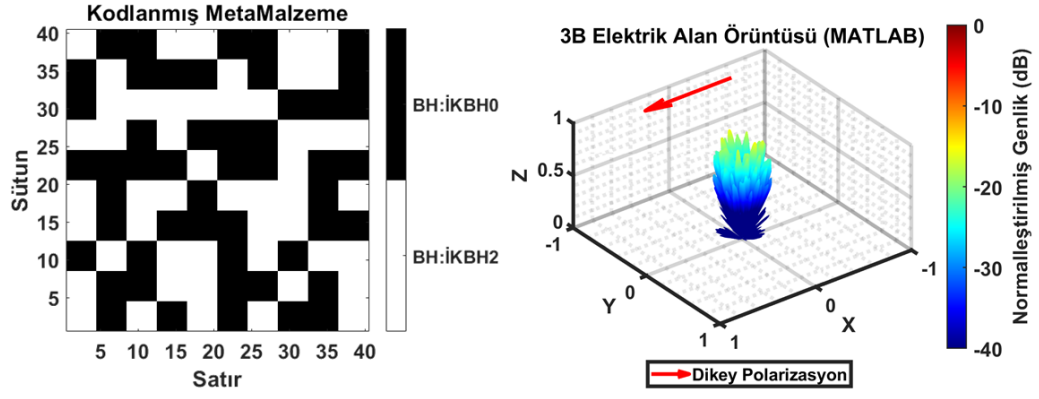
Şekil 4.133 ve Şekil 4.137 arasında verilen sonuçlar incelendiğinde merkez süper birim hücrelerinin uzak alan saçılma örüntüsüne daha az katkı sağladığı, kenarlarda bulunan süper birim hücrelerin daha çok katkı sağladığı söylenebilir. Kenarlarda bulunan süper birim hücreler uzak alan saçılma örüntüsünde etkin role sahiptir. Bu durumun farklı frekanslarda tepkilerini incelemek amacıyla merkez etrafında bulunan süper birim hücrelerin genliklerinin sıfır olduğu uzak alan saçılma örüntüleri 5 GHz ve 15 GHz' de incelenmiştir. 5 GHz ve 15 GHz' de dikey polarizasyon ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısında gelen düzlem dalga altında kırmızı ile taranan süper birim hücrelerin genlikleri sıfır olduğunda (süper birim hücreler uzak alan saçılma örüntüsüne katkı vermediği durumda) elde edilen uzak alan saçılma örüntüleri, sırasıyla, Şekil 4.139 ve Şekil 4.141' de verilmiştir. Şekil 4.138 ve Şekil 4.140' de ise, sırasıyla, kodlanmış metamalzemenin 5 GHz ve 15 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü verilmiştir.



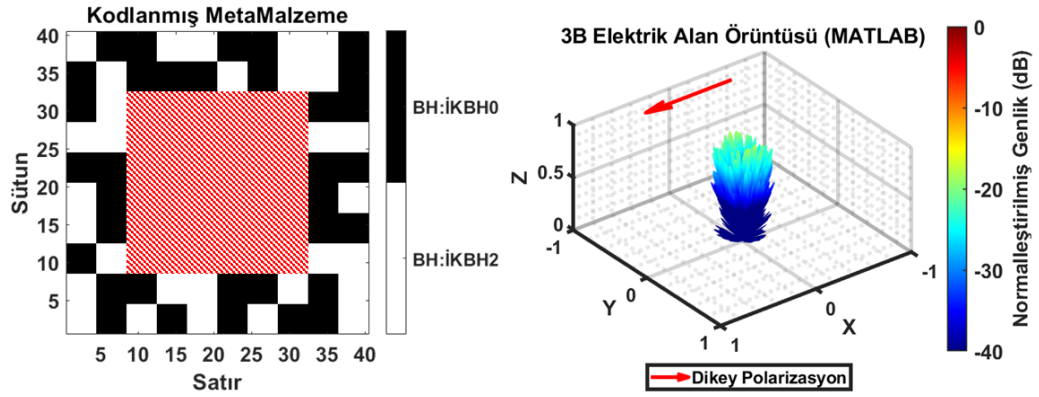
Şekil 4.138 Kodlanmış metamalzemenin 5 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü



Şekil 4.139 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 5 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü



Şekil 4.140 Kodlanmış metamalzemenin 15 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

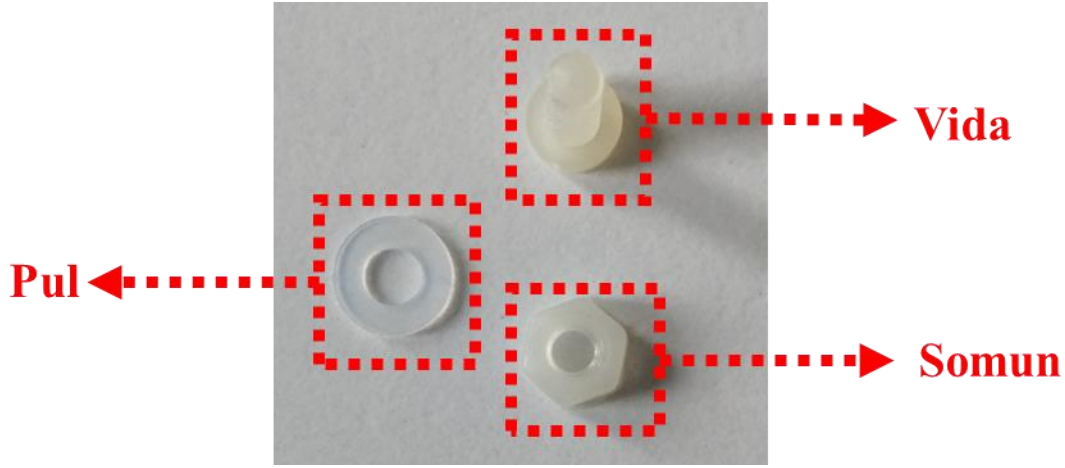


Şekil 4.141 Kodlanmış metamalzemenin her başlangıç/bitiş satır ve sütunundan 2 süper birim hücre hariç diğerlerinin sıfır genliğe sahip olduğu durumda (kırmızı taralı alan) 15 GHz ($0^\circ, 0^\circ$) geliş açısı dikey polarizasyonda gelen düzlem dalga altında MATLAB' da uzak alan saçılma örüntüsü

Farklı frekanslar için uzak alan saçılma örüntüleri incelendiğinde düşük frekansta bir miktar farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak genel anlamda sonuçlar birbiriyle uyuşmaktadır. Uzak alan saçılma örüntüleri incelendiğinde kodlanmış metamalzemenin uzak alan saçılmasına en çok katkıyı veren kenarlarda bulunan birim hücrelerin davranışları olduğu, orta kısımda bulunan birim hücrelerin daha az katkı verdiği anlaşılmaktadır.

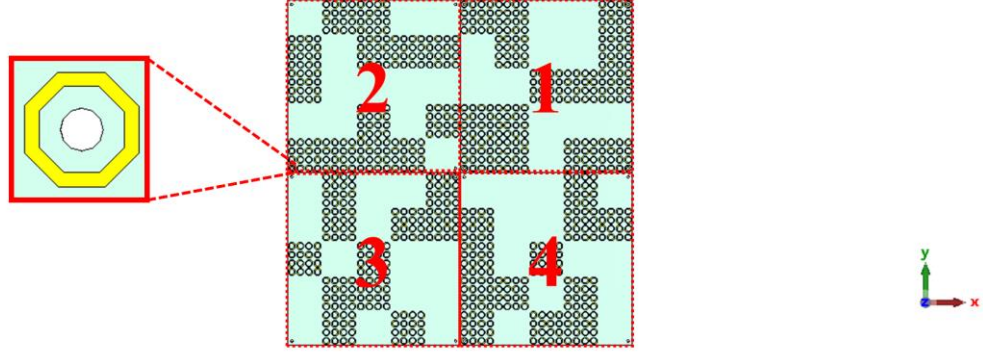
5. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bölüm 4' te tasarlanıp benzetim çalışmaları gerçekleştirilen kodlanmış metamatmalzemenin üretimi yapılarak ölçüm sonuçları alınmıştır. Üretim kısıtlarından dolayı 400 mm x 400 mm boyutlarında üretim yapılamamış, tüm metamatmalzeme 4 parça şeklinde ayrı ayrı üretilmiş ve daha sonra birleştirilmiştir. İki katmanlı yapıdan dolayı alt katman ayrı, üst katman ayrı olacak şekilde üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.62' de verildiği üzere birim hücrenin katmanlar arasında hava olduğu için üstteki birim hücre ile alttaki birim hücre arasında bağlantı sağlamak amacıyla plastik vida, pul ve somun kullanılmıştır. Plastik vida ve somun üst katman ve alt katmanı birbirine bağlamak için plastik pul ise katmanlar arası mesafeyi sağlamak için kullanılmıştır. Şekil 5.1' de görselleri verilmiştir.

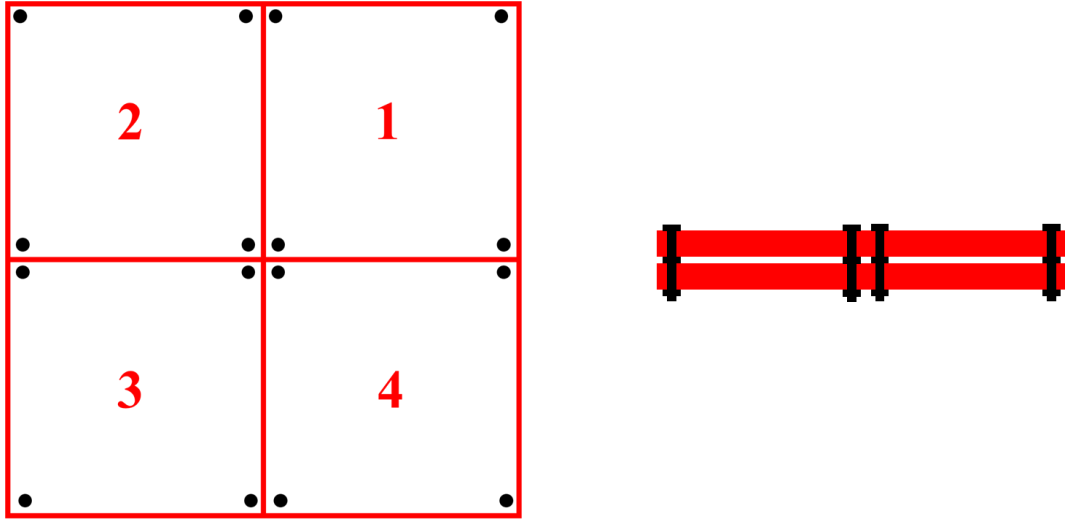


Şekil 5.1 Plastik vida, somun ve pul

Ölçüm sonuçlarının kodlanmış metamatmalzemedede plastik vida, somun ve pul kullanımından dolayı mümkün olduğunca az etkilenmesi amacıyla vida, somun ve pul çapı en düşük değer olan 3 mm seçilmiştir. Kodlanmış metamatmalzeme 4 eşit parçaya ayrıldığı için her parçada köşelerde olmak üzere 4 tane 3 mm delikler açılmış, vida ve somunlar bu kısımdan birleştirilmiştir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te kodlanmış metamatmalzemenin alt ve üst katmanlarının bir arada durabilmesi amacıyla açılan delikler ve üretimi amacıyla ayrılan 4 bölüm verilmiştir.

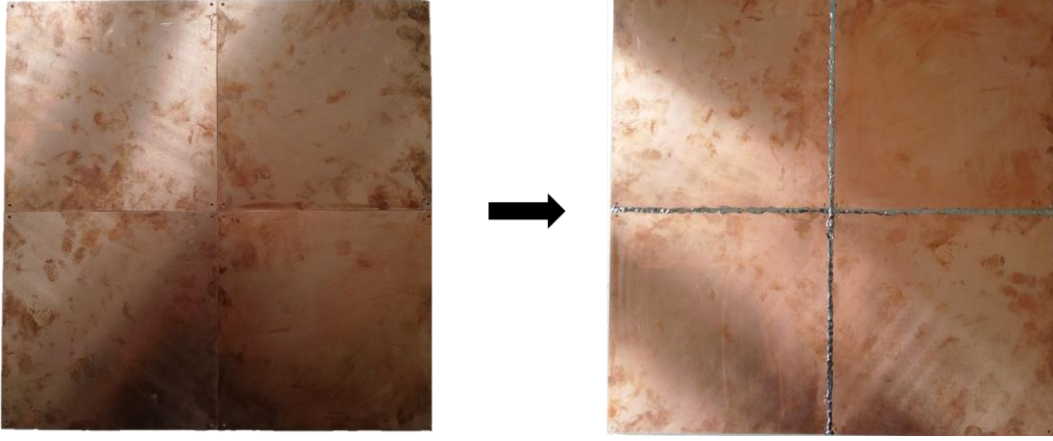


Şekil 5.2 Üretimi yapılan kodlanmış metalmalzeme bölümleri ve örnek delik açılan kısım



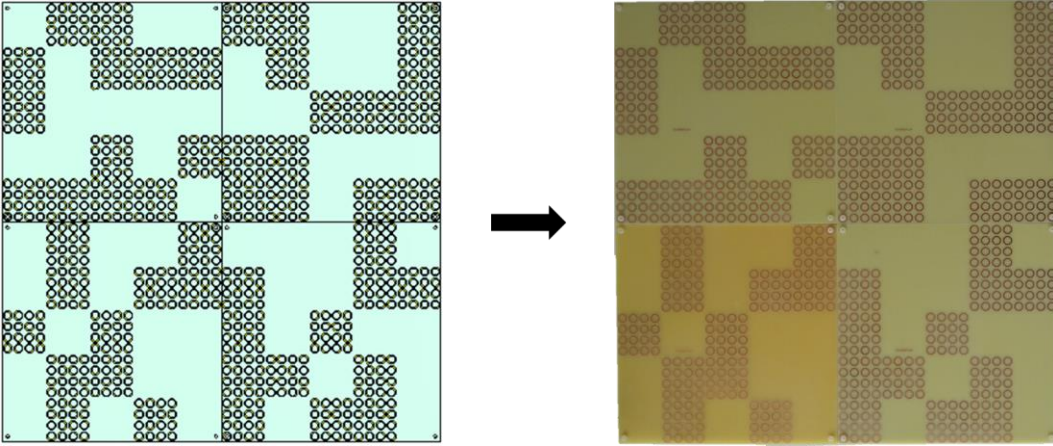
Şekil 5.3 Kodlanmış metalmalzeme bölümleri ve delik açılan kısımlarla birlikte bağlantı elemanları temsili üstten (solda) ve yandan (sağda) görünüşü

Üretilen kodlanmış metalmalzeme alt katmanları akım sürekliliğinin sağlanması amacıyla birbirlerine lehimlenmiştir. Lehimlenmeden önceki ve lehimlendikten sonraki görselleri Şekil 5.4' te verilmiştir.



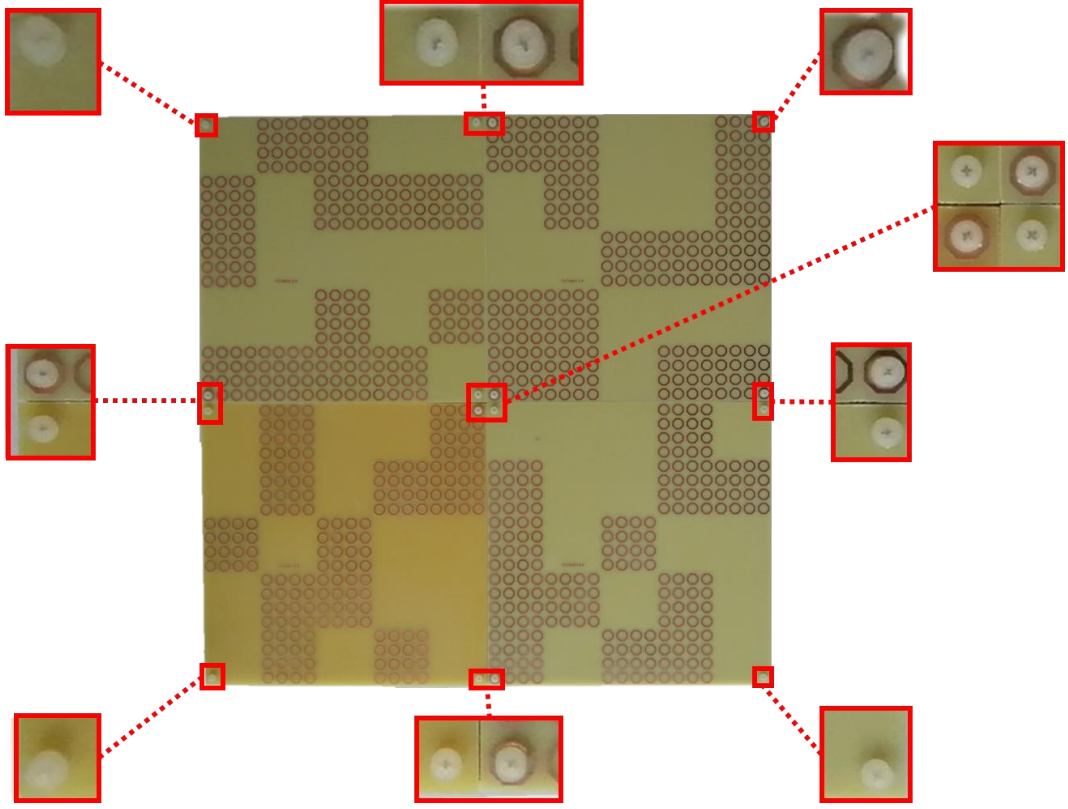
Şekil 5.4 Kodlanmış metalzeme alt katmanın lehimlenmeden önce (solda) ve lehimlendikten sonra (sağda) alttan görünümü

Şekil 5.5' te birleştirme işlemi tamamlanmış iki katmanlı birim hücreden oluşan kodlanmış metalzeme verilmiştir.

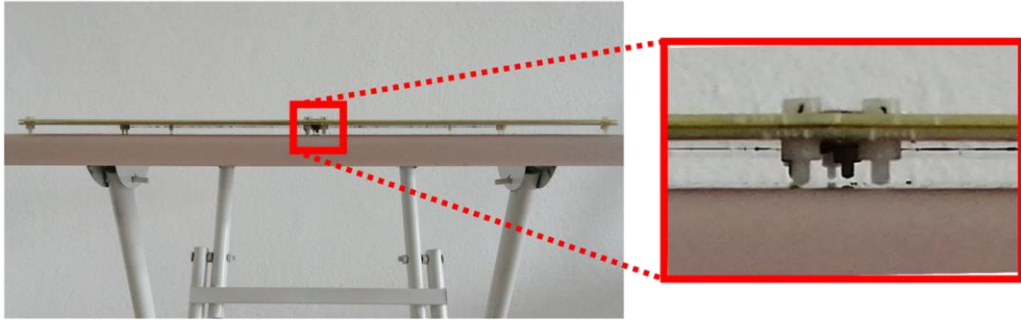


Şekil 5.5 Kodlanmış metalzeme üst katmanın CST ortamı (solda) ve üretiminin (sağda) üstten görünümü

Şekil 5.6' da, Şekil 5.3' te belirtilen vida ve delik bölgeleri verilmiştir. Bu bölgeler alt ve üst katmanın bir arada durabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 5.7' de ise kodlanmış metalzemenin yandan görünümü verilmiştir.

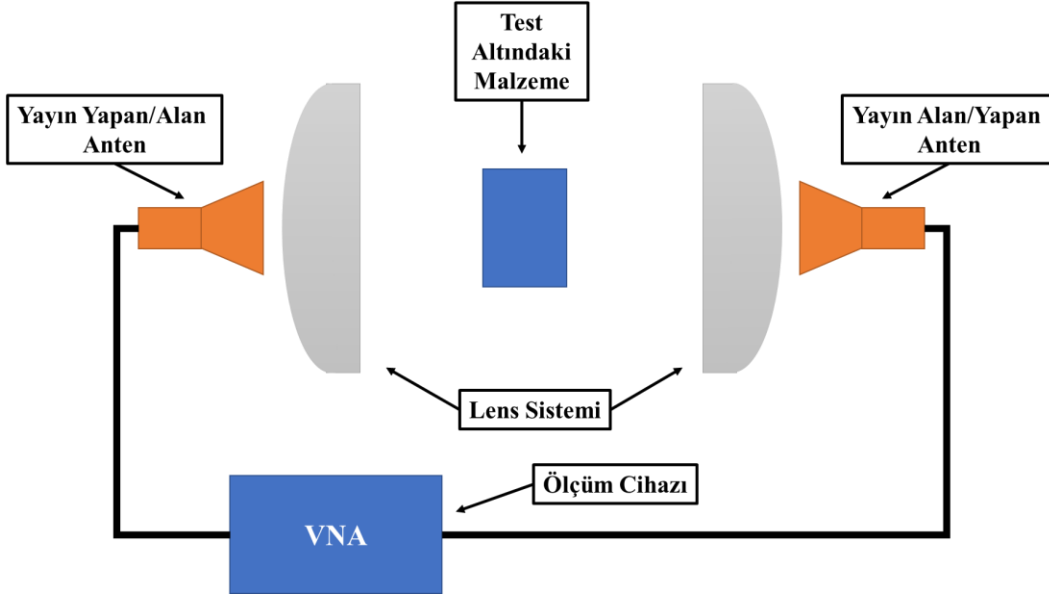


Şekil 5.6 Kodlanmış metamalzeme alt ve üst katmanın birleştirilmesi amacıyla kullanılan plastik vida bölgeleri



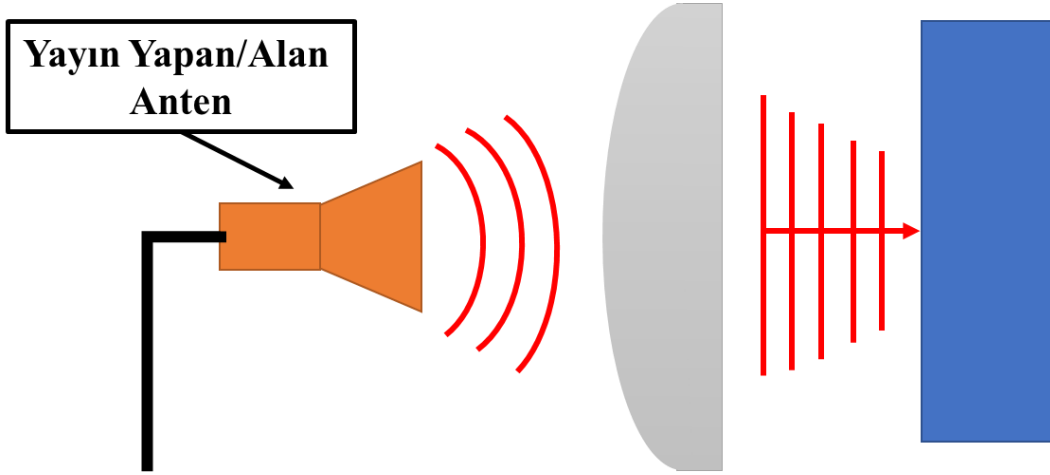
Şekil 5.7 Kodlanmış metamalzeme yandan görünümü

Ölçümler, Şekil 5.8' de verilen kurulum ile genişbant 2 boynuz anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Antenlerin önlerinde bulunan iki lens sistemi sayesinde yayın, Test Altındaki Malzemeye odaklanarak yansıma/soğurma/geçirgenlik değerleri elde edilmektedir.

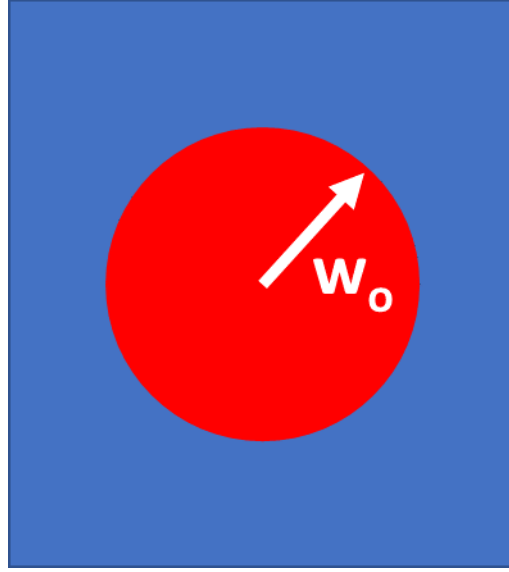


Şekil 5.8 Üretilen numunenin elektromanyetik yansıma/iletim ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneğinde bulunan antenden gönderilen elektromanyetik dalgalar lens ile karşılaştıktan sonra düzlem dalga şeklinde Test Altındaki Malzemeye odaklanmaktadır. Kodlanmış metamateryalinin RKA azaltım performans testi tek anten üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9’ da temsili elektromanyetik dalganın ilerlemesi yandan verilmiştir. Önden bakıldığında 3B olarak odaklama gerçekleştirilen bölge Şekil 5.10’ da verildiği gibi daire şeklinde olmaktadır (Test altındaki malzeme mavi, odaklanan bölge kırmızı ile gösterilmiştir.).



Şekil 5.9 Test kurulum düzeneğinde elektromanyetik dalganın yayılımı



Şekil 5.10 Elektromanyetik dalgaların Test Altındaki Malzeme üzerinde oluşan odaklama bölgesi ve yarıçapı

Şekil 5.10' da verilen yarıçap değerinin iki katı Test Altındaki Malzemenin ölçüm esnasında aydınlatılan bölgenin çapını ifade etmektedir. Yayımların Test Altındaki Malzemeye yaptığı odaklamanın yarıçap değeri denklem (5.1)' de verilen w_0 değeridir. En küçük malzeme boyutlarının (genişlik ve yükseklik olarak) aydınlatılan bölgenin çapı kadar olması gerekmektedir. Ancak malzeme etrafından gelecek diğer yansıma/kırılma/kırınım vb. etkilerden daha az etkilenmesi için en küçük malzeme boyutları çap değerinin ($2w_0$) yaklaşık olarak 1.5 katı olması önerilmektedir [69].

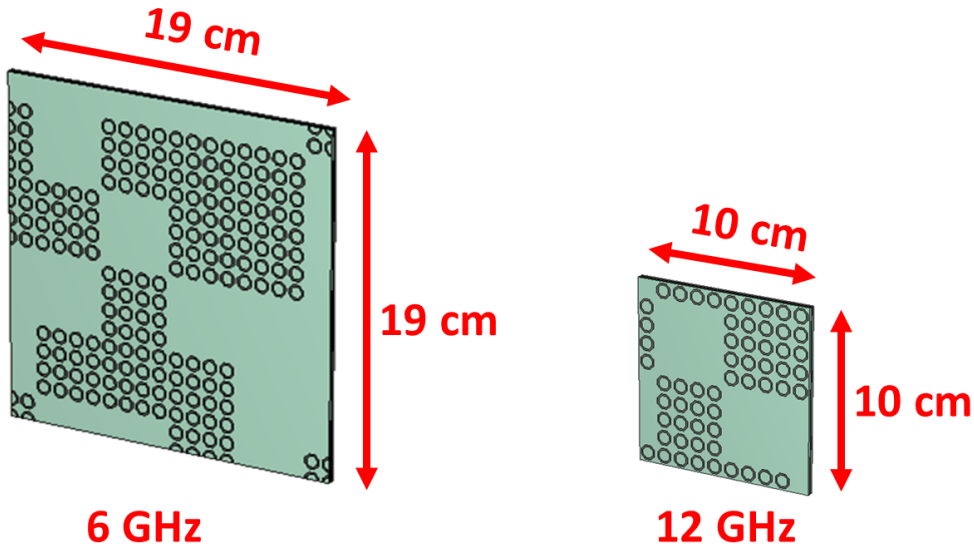
$$w_0 \cong \frac{8}{K_0} = \frac{8\lambda}{2\pi} = \frac{4\lambda}{\pi} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.1' de frekansa bağlı olarak elde edilen yarıçap (w_0), çap ($2w_0$) ve en küçük malzeme boyutları verilmiştir. Dolayısıyla elde edilen ölçümler çap ($2w_0$) değerlerine göre aydınlatılan metamalzeme bölgesi için sonuçları içermektedir.

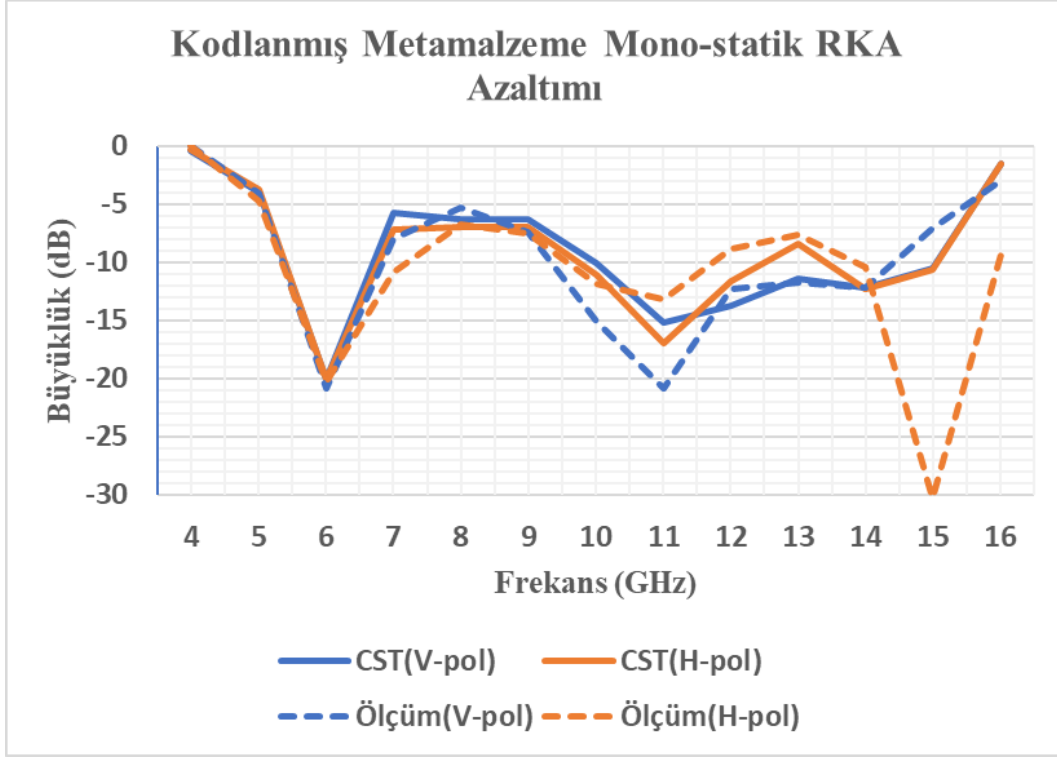
Çizelge 5.1 Aydınlatılan bölgenin frekansa bağlı yarıçap ve en küçük malzeme boyutları için gerekli yarıçap ve çap değerleri

Frekans (GHz)	w_0 (cm)	$2w_0$ (cm)	En küçük boyut bilgisi (cm)
4	9,5	19,0	28,5
5	7,6	15,2	22,8
6	6,4	12,8	19,2
7	5,5	11,0	16,5
8	4,7	9,4	14,1
9	4,2	8,4	12,6
10	3,8	7,6	11,4
11	3,5	7,0	10,5
12	3,2	6,4	9,6
13	2,9	5,8	8,7
14	2,7	5,4	8,1
15	2,5	5,0	7,5
16	2,4	4,8	7,2

Çizelge 5.1’ de verilen çap değerlerine göre kodlanmış metamalzemenin aydınlatılan bölgesi için mono-statik RKA azaltım benzetim değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.11’ de 6 GHz ve 12 GHz için ölçüm sonuçları ile karşılaştırılabilmesi amacıyla kırpılmış kodlanmış metamalzemenin görselleri ve boyutları verilmiştir.



Şekil 5.11 Kırpılan kodlanmış metamalzemenin 6 GHz ve 12 GHz için boyutları



Şekil 5.12 Kodlanmış metamalzemenin kırılması ile elde edilen CST tam-dalga benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.12’de kodlanmış metamalzemenin frekansa bağlı olarak (Çizelge 5.1) kırılması ile elde edilen boyutlara göre benzetim sonuçları ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde benzetim ile elde edilen RKA azaltım değerlerinin ölçüm sonuçlarına yüksek oranda uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Bazı frekanslarda oluşan farklılıklar faz tepkisi farklarının küçük miktarda değişiklik göstermesi, ölçüm sırasında oluşan kalibrasyon hataları vb. durumlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.12’de verilen RKA azaltım değerleri, daha önce belirtildiği üzere Bölüm 4’ te tasarlanan kodlanmış metamalzemenin RKA azaltım değerlerini yansıtmamaktadır. Bölüm 4’ te tasarlanan kodlanmış metamalzemenin Çizelge 5.1’ de belirtilen boyutlarda kırılması ile elde edilen kodlanmış metamalzeme değerlerdir. CST tam-dalga sonuçları ile ölçüm sonuçlarının yüksek oranda uyumu, 400 mm x 400 mm boyutlarındaki asıl kodlanmış metamalzemenin RKA azaltım değerlerini doğrulamaktadır. RKA azaltımının Şekil 4.114 ve Şekil 4.116’ da belirtilen değerlere yakın olduğunu ispatlamaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, öncelikle radar soğurucu yapılar ve bu yapıların bir üyesi olan kodlanmış metamalzeme ile ilgili bilgiler verilmiştir. Daha sonra, modelleme ve optimizasyon çalışmalarında kullanılan uzak alan saçılma örüntüsü denklemi çıkartılmış, bu formüller ile elde edilen sonuçlar elektromanyetik yazılımlar ile doğrulanmış ve optimizasyon çalışmalarında kullanılan parçacık sürü optimizasyonu ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tasarım ve benzetim çalışmalarında, birim hücre tasarımı ile daha önce ilgili frekans bantında kodlanmış metamalzeme oluşturulmasında kullanılmayan yeni bir geometri üzerinde çalışılmış, tek katmanlı ve iki katmanlı birim hücrelerde sonuçlar irdelenmiş ve elde edilen en iyi sonuç ile kodlanmış metamalzeme tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen kodlanmış metamalzeme uzak alan sonuçları ile elektromanyetik yazılımlarla elde edilen tam-dalga benzetim sonuçları kıyaslanmıştır. Daha sonra tasarımı yapılan kodlanmış metamalzemenin üretimi yapılmış, RKA azaltım karakteristiği ölçülmüş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Kodlanmış metamalzeme tasarımı iki temel bileşen üzerine kuruludur. Birincisi, birim hücre tasarımı, ikincisi ise metamalzemenin kodlanmasıdır. Birim hücre tasarımında, polarizasyon bağımsızlık, yüksek bant genişliği ve açısal kararlılık ön plana çıkarken, metamalzeme kodlamasında algoritmanın hızı, verimliliği ve uzak alan saçılma hesaplamalarında kaynak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Birim hücre tasarımında amaç yansıma katsayısı genlik değerinin mümkün olduğunca 1'e (0 dB) yakın, yansıma katsayısı faz değeri farkı yüksek olan (mümkün olduğunca $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında) en az iki birim hücre elde etmektir. İki'den fazla birim hücre tasarımı kodlanmış metamalzeme tasarımında daha uygun kodlama konusunda esneklik getirebilir. Ancak bu tez çalışması kapsamında iki farklı birim hücre tasarımı ile ilderlenmiştir. Birim hücreler arası yansıma katsayısı faz farkı değerine göre, normal geliş açısı ile gelen elektromanyetik dalga için, soğurma değeri değişkenlik göstermektedir. En az 10 dB soğurma elde edebilmek için, birim hücreler kodlanmış metamalzeme yaklaşık olarak eşit sayıda dağıldığı varsayılırsa, faz farkı değerinin $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında olması gerekmektedir. Tasarımın uygun olup olmadığı bu faz farkı değerine göre değerlendirilmiştir. İlk olarak tek katmanlı birim hücre tasarımı yapılmış, farklı boyutların (dış kenarlar arası uzunluk, iç kenarlar arası uzunluk, periyot vb.) tepkisi

irdelenmiştir. Ancak, tek katmanlı birim hücre tasarımında yeterince geniş frekans bantına (C-X-Ku bantı kapsayan) ulaşamadığı için iki katmanlı birim hücre tasarımı ile ilerlenmiştir. İki katmanlı birim hücre tasarımında, tek katmanlı birim hücre tasarımına göre en önemli parametrelerden birisi de katmanlar arası mesafedir. Katmanlar arası mesafe bant genişliğinin artmasına ve açısal kararlılığa pozitif anlamda katkı vererek, normal geliş açısında 5.4 GHz ile 15.6 GHz arasında en az 7 dB RKA azaltımı gerçekleşmiştir. Bant genişliği bir miktar azalmak kaydıyla 45° açığa kadar birim hücreler arası faz farkı $\pm 143^\circ$ ile $\pm 217^\circ$ arasında kalmıştır.

Metamalzeme kodlaması birim hücrelerin uygun şekilde yan yana yerleştirilmesi ile oluşmaktadır. Birim hücrelerin yerleşimine göre uzak alan saçılma örüntüsü farklılaşmaktadır. Kullanılan birim hücre sayısı arttıkça, en uygun kodlamaya sahip metamalzemeyi bulmak zorlaşmaktadır. Bu amaçla Ters Ayırık Fourier Dönüşümü kullanılan uzak alan saçılma örüntüsü denklemleri MATLAB ortamında kodlanmıştır. Böylece fazla sayıda birim hücre kullanılsa dahi kısa sürede uzak alan saçılma örüntüleri elde edilebilmiştir. Uzak alan saçılma örüntüleri FEKO ve CST yazılımları ile elde edilen değerlerle doğrulanmıştır. Uzak alan saçılma formüllerinden gelen birim hücre periyodunun bant genişliği içerisindeki en düşük dalga boyunun yarısından küçük veya eşit olması kısıtı birim hücre tasarımını etkilemiş ve tasarımlar bu kısıt göz önüne alınarak ilerlemiştir. Birim hücre yerleşimlerinden ötürü farklı metamalzemeler oluşabileceği ve en uygun metamalzemeyi bulmak zaman alacağı için optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Parçacık sürü optimizasyon algoritması ile birden fazla parçacığın en uygun kodlamayı bulabilmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon algoritması maliyet fonksiyonu hesabında uzak alan saçılma örüntüsü formülleri kullanılmış, böylece kısa sürede birçok kodlama incelenmiş ve en uygun kodlamaya ulaşılmaya çalışılmıştır. Optimizasyon algoritmasında, parçacık hız ve konum değerlerinin güncellenmesinde kullanılan birçok farklı parametre incelenmiş ve algoritmanın en uygun değerlere ulaşabilmesi irdelenmiştir. Özellikle rastgele sayı oluşturulmasında kullanılan tekdüze dağılım ve normal dağılımın en uygun kodlamayı bulmak amacıyla performansları karşılaştırılmış, normal dağılım kullanımının en uygun sonuca ulaştırmada etkisi gösterilmiştir. Tasarlanan kodlanmış metamalzeme, CST Studio Suite yazılımı ile tam-dalga benzetim çalışmaları yapılmış ve MATLAB ortamında elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Normal geliş açısı altında benzer değerler elde edilmiş, ancak eğik geliş

açılarında bir miktar farklılaşmalar gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların nedenin ise, birim hücreler arası faz farkı değerlerinin nümerik elektromanyetik yöntemlerde bir miktar farklılaşması ve kenar kırılım etkilerinin MATLAB ortamında elde edilen uzak alan saçılma formüllerinde dahil olmayıp, CST Studio Suite ortamında tam-dalga yöntemde dahil olmasından kaynaklanabileceği vurgulanmış ve örnek çalışmalar verilmiştir. Kodlanmış metamalzemenin üretimi yapılmış ve 4 – 16 GHz arasında ölçümü yapılarak sonuçlar benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve doğrulanmıştır.

Radar soğurucu malzemeler; tasarımının, üretiminin yüksek teknoloji içermesi ve çoğunlukla içeriği ve bileşenleri hakkında açık bilgi olmamasından dolayı kritik ürünler arasına girmektedir. Askeri ve sivil alanlarda farklı ihtiyaçlarla ortaya çıkan radar soğurucu malzeme tasarım ihtiyacı, kodlanmış metamalzeme yardımıyla etkin, verimli ve ihtiyaca uygun tasarım ile karşılanabileceği gerçekleştirilen tez çalışması ile irdelenmiştir. Tasarımın birim hücre ve kodlamaya bağlı olması ile tek üretim yöntemi kullanılarak farklı frekans, polarizasyon ve elektromanyetik dalga geliş açısı için istenilen radar soğurucu malzemelerin elde edilebileceği düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, özellikle bant genişliği ve açısız kararlılığı artırmak amacıyla iki katman yerine üç ya da daha fazla katman kullanılmasının çok daha etkin bir kodlanmış metamalzeme tasarımına ulaştıracağı, uzak alan saçılma formüllerine kenar kırılım etkilerinin dahil edilmesi ile gerçeğe en yakın sonuçların ve dolayısıyla kodlamanın yapılabileceği, kodlanmış metamalzemenin merkezine anten yapıları yerleştirilerek anten RKA azaltımlarının çok daha hızlı ve maliyet etkin bir şekilde yapılabileceği ve yüzey uyumlu yapılarda kodlanmış metamalzemenin davranışı incelenerek, hava, kara, deniz ve uzay platformlarında kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Electrical Telegraph, https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_telegraph, (Erişim tarihi: 15.04.2023)
- [2] History of Radio, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radio, (Erişim tarihi: 15.04.2023)
- [3] C.A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [4] History of RADAR, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radar, (Erişim tarihi: 16.04.2023)
- [5] Historical Overview, <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi04.en.html>, (Erişim tarihi: 16.04.2023)
- [6] P. Saville, *Review of Radar Absorbing Materials*, Defence Research and Development Canada - Atlantic, 2005.
- [7] V.G. Veselago, *Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Sigma and Mu*, *Sov Phys Uspekhi*, 10 (1968) 509-&.
- [8] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*, *Ieee T Microw Theory*, 47 (1999) 2075-2084.
- [9] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity*, *Phys Rev Lett*, 84 (2000) 4184-4187.
- [10] Metamaterial, <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>, (Erişim tarihi: 16.04.2023)
- [11] S. Abadal, T.J. Cui, T. Low, J. Georgiou, *Programmable Metamaterials for Software-Defined Electromagnetic Control: Circuits, Systems, and Architectures*, *Ieee J Em Sel Top C*, 10 (2020) 6-19.
- [12] X.M. Yang, X.Y. Zhou, Q. Cheng, H.F. Ma, T.J. Cui, *Diffuse reflections by randomly gradient index metamaterials*, *Opt Lett*, 35 (2010) 808-810.
- [13] D.R. Smith, Y.J. Tsai, S. Larouche, *Analysis of a Gradient Index Metamaterial Blazed Diffraction Grating*, *Ieee Antenn Wirel Pr*, 10 (2011).
- [14] S.L. Sun, Q. He, S.Y. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou, *Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves*, *Nat Mater*, 11 (2012) 426-431.
- [15] J. Zhao, Q. Cheng, J. Chen, M.Q. Qi, W.X. Jiang, T.J. Cui, *A tunable metamaterial absorber using varactor diodes*, *New J Phys*, 15 (2013).
- [16] Y.F. Li, J.Q. Zhang, S.B. Qu, J.F. Wang, H.Y. Chen, Z. Xu, A.X. Zhang, *Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces*, *Appl Phys Lett*, 104 (2014).
- [17] C. Della Giovampaola, N. Engheta, *Digital metamaterials*, *Nat Mater*, 13 (2014) 1115-1121.
- [18] T.J. Cui, M.Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, Q. Cheng, *Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials*, *Light-Sci Appl*, 3 (2014).
- [19] X. Gao, X. Han, W.P. Cao, H.O. Li, H.F. Ma, T.J. Cui, *Ultrawideband and High-Efficiency Linear Polarization Converter Based on Double V-Shaped Metasurface*, *Ieee T Antenn Propag*, 63 (2015) 3522-3530.
- [20] T.J. Cui, S. Liu, L.L. Li, *Information entropy of coding metasurface*, *Light-Sci Appl*, 5 (2016).

- [21] H.H. Yang, X.Y. Cao, F. Yang, J. Gao, S.H. Xu, M.K. Li, X.B. Chen, Y. Zhao, Y.J. Zheng, S.J. Li, A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control, *Sci Rep-Uk*, 6 (2016).
- [22] S. Liu, T.J. Cui, L. Zhang, Q. Xu, Q. Wang, X. Wan, J.Q. Gu, W.X. Tang, M. Qing Qi, J.G. Han, W.L. Zhang, X.Y. Zhou, Q. Cheng, Convolution Operations on Coding Metasurface to Reach Flexible and Continuous Controls of Terahertz Beams, *Advanced Science*, 3 (2016) 1600156.
- [23] P. Su, Y.J. Zhao, S.L. Jia, W.W. Shi, H.L. Wang, An Ultra-wideband and Polarization-independent Metasurface for RCS Reduction, *Sci Rep-Uk*, 6 (2016).
- [24] W.B. Pan, C. Huang, M.B. Pu, X.L. Ma, J.H. Cui, B. Zhao, X.G. Luo, Combining the absorptive and radiative loss in metasurfaces for multi-spectral shaping of the electromagnetic scattering, *Sci Rep-Uk*, 6 (2016).
- [25] Y. Zhuang, G. Wang, J. Liang, T. Cai, X.-L. Tang, T. Guo, Q. Zhang, Random Combinatorial Gradient Metasurface for Broadband, Wide-Angle and Polarization-Independent Diffusion Scattering, *Sci Rep-Uk*, 7 (2017) 16560.
- [26] X. Kong, Q. Wang, S. Jiang, L. Kong, J. Yuan, X. Yan, X. Wang, X. Zhao, A metasurface composed of 3-bit coding linear polarization conversion elements and its application to RCS reduction of patch antenna, *Sci Rep-Uk*, 10 (2020) 17843.
- [27] F. Yuan, G.M. Wang, H.X. Xu, T. Cai, X.J. Zou, Z.H. Pang, Broadband RCS Reduction Based on Spiral-Coded Metasurface, *Ieee Antenn Wirel Pr*, 16 (2017) 3188-3191.
- [28] T.T. Nguyen, S. Lim, Wide Incidence Angle-Insensitive Metamaterial Absorber for Both TE and TM Polarization using Eight-Circular-Sector, *Sci Rep-Uk*, 7 (2017).
- [29] A.Y. Modi, C.A. Balanis, C. Birtcher, Novel Technique for Enhancing RCS Reduction Bandwidth of Checkerboard Surfaces, *Ieee Antennas Prop*, (2017) 1911-1912.
- [30] Y.L. Zhou, X.Y. Cao, J. Gao, S.J. Li, X. Liu, RCS reduction for grazing incidence based on coding metasurface, *Electron Lett*, 53 (2017) 1381-1382.
- [31] H.X. Xu, S.J. Ma, X.H. Ling, L. Zhou, H.X. Xu, X.K. Zhang, Broadband Wide-Angle Polarization-Independent Diffusion Using Parabolic-Phase Metasurface, *Ieee Int Symp Elec*, (2018) 1114-1118.
- [32] H. Jeong, T.T. Nguyen, S. Lim, Meta-Dome for Broadband Radar Absorbing Structure, *Sci Rep-Uk*, 8 (2018).
- [33] J.X. Su, H. He, Z.R. Li, Y.Q. Yang, H.C. Yin, J.H. Wang, Uneven-Layered Coding Metamaterial Tile for Ultra-wideband RCS Reduction and Diffuse Scattering, *Sci Rep-Uk*, 8 (2018).
- [34] Y. Saifullah, A. Waqas, G.M. Yang, F.H. Zhang, F. Xu, 4-Bit Optimized Coding Metasurface for Wideband RCS Reduction, *Ieee Access*, 7 (2019) 122378-122386.
- [35] H.G. Hao, S.M. Du, T. Zhang, Small-Size Broadband Coding Metasurface for RCS Reduction Based on Particle Swarm Optimization Algorithm, *Prog Electroma Res M*, 81 (2019) 97-105.
- [36] P. Tiwari, S.K. Pathak, V.P. Anitha, Design of an Ultra Wideband Polarization Insensitive and Wide Angle Metasurface Absorber based on Resistive-Ink, *Proceedings of the 2020 Ieee International Conference on Computational Electromagnetics (Iccem 2020)*, (2020) 243-245.
- [37] L. Zhu, T.C. Li, J.H. Huang, L. Dong, H.D. Li, W.J. Zhou, C.H. Zhao, Frequency coding all-dielectric metasurface for flexible control of electromagnetic radiation, *Appl Phys a-Mater*, 127 (2021).
- [38] M. I.Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed., The McGraw-Hill Companies, 2008.

- [39] C.A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [40] Radar Systems, <https://www.radartutorial.eu/index.en.html>, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [41] Milli Muharip Uçak, <https://www.tusas.com/urunler/yeni-projeler/ozgun/mmu>, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [42] SOM-J Mühimmatı, <https://www.roketsan.com.tr/tr/urunler/som-j-stand-muhimmatı>, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [43] Stealth Technology, https://en.wikipedia.org/wiki/Stealth_technology, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [44] Maximum Power Transfer Theorem, https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_transfer_theorem, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [45] Permeability, [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)), (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [46] Permittivity, <https://en.wikipedia.org/wiki/Permittivity>, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [47] Pyramidal Absorber, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation-absorbent_material, (Erişim tarihi: 19.04.2023)
- [48] W.W. Salisbury, Absorbent body for electromagnetic waves, US Department of Navy, 1952.
- [49] H. Severin, Nonreflecting absorbers for microwave radiation, *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 4 (1956) 385-392.
- [50] MagRAM (Magnetic Radar Absorbing Materials) RF Absorbers, <https://www.mwtmaterials.com/products/magram-rf-absorbers/>, (Erişim tarihi: 20.04.2023)
- [51] R.F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [52] J.B. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens, *Phys Rev Lett*, 85 (2000) 3966-3969.
- [53] L. Li, T. Jun Cui, W. Ji, S. Liu, J. Ding, X. Wan, Y. Bo Li, M. Jiang, C.-W. Qiu, S. Zhang, Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms, *Nature Communications*, 8 (2017) 197.
- [54] K.B. Fan, X.G. Zhao, J.D. Zhang, K. Geng, G.R. Keiser, H.R. Seren, G.D. Metcalfe, M. Wraback, X. Zhang, R.D. Averitt, Optically Tunable Terahertz Metamaterials on Highly Flexible Substrates, *Ieee T Thz Sci Techn*, 3 (2013) 702-708.
- [55] M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, S. Tretyakov, Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead, *Ieee J Sel Area Comm*, 38 (2020) 2450-2525.
- [56] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications, *Ieee T Antenn Propag*, 51 (2003) 2936-2946.
- [57] O. Ozgun, M. Kuzuoglu, Electromagnetic metamorphosis: Reshaping scatterers via conformal anisotropic metamaterial coatings, *Microw Opt Techn Let*, 49 (2007) 2386-2392.
- [58] J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, Controlling Electromagnetic Fields, *Science*, 312 (2006) 1780-1782.
- [59] D.H. Kwon, D.H. Werner, Transformation Electromagnetics: An Overview of the Theory and Applications, *Ieee Antenn Propag M*, 52 (2010) 24-46.

- [60] F. Costa, A. Monorchio, G. Manara, Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces, *Ieee T Antenn Propag*, 58 (2010) 1551-1558.
- [61] W.G. Chen, C.A. Balanis, C.R. Birtcher, Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction, *Ieee T Antenn Propag*, 63 (2015) 2636-2645.
- [62] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 39-43.
- [63] J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, 1995 *Ieee International Conference on Neural Networks Proceedings*, Vols 1-6, (1995) 1942-1948.
- [64] Y.H. Shi, R. Eberhart, A modified particle swarm optimizer, *Ieee C Evol Computat*, (1998) 69-73.
- [65] J. Kennedy, R.C. Eberhart, A discrete binary version of the particle swarm algorithm, *Ieee Sys Man Cybern*, (1997) 4104-4108.
- [66] F. Afshinmanesh, A. Marandi, A. Rahimi-Kian, A novel binary particle swarm optimization method using artificial immune system, *Eurocon 2005: The International Conference on Computer as a Tool*, Vol 1 and 2 , *Proceedings*, (2005) 217-220.
- [67] Rogers 4725JXR, <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4700-antenna-grade-laminates>, (Erişim tarihi: 07.05.2023)
- [68] Bal Peteği Yapısı, <https://www.hexcel.com/Products/Honeycomb/HexWeb-Honeycomb>, (Erişim tarihi: 14.05.2023)
- [69] J.W. Schultz, *Focused Beam Methods: Measuring Microwave Materials in Free Space*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fahrettin Tural
Telefon : 0539-506-22-18
Elektronik posta adresi : fahrettin.tural@gmail.com
Yabancı dili : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lisans : 2014-2019 Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans : -
Doktora : -

İş Tecrübesi

2019 - ... : Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş. – Aviyonik ve Görev Sistemleri Mühendislik Müdürlüğü

