



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**PROGRAMLANABİLİR 2-BİT
METAYÜZEY VE
ANTEN UYGULAMALARI**

Hasan YERAL

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

EYLÜL 2020



**PROGRAMLANABİLİR 2-BİT METAYÜZEY VE ANTEN
UYGULAMALARI**

Hasan YERAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Hasan YERAL tarafından hazırlanan PROGRAMLANABİLİR 2-BİT METAYÜZEY VE ANTEN UYGULAMALARI adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Emin ÜNAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Emin ÜNAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Şule ÇOLAK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 18/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



İmza

Hasan YERAL

18/09/2020

PROGRAMLANABİLİR 2-BİT METAYÜZEY VE ANTEN UYGULAMALARI
(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan YERAL

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Metamalzemeler (MTM); doğada bulunmayan, laboratuvar ortamında suni olarak üretilen malzemelerdir. Düzlemsel metamalzemeler olarak da bilinen metayüzeyler, ileri düzeyde sıra dışı elektromanyetik (EM) özellikleri, düşük profilli yapıları ve üretim kolaylığı sağlaması sebebi ile günümüzde önemli uygulamalarda yerini bulmuştur. Metayüzeylerin işlevselliği ve elektromanyetik özellikleri, metayüzeyin yapısı ve boyutları ayarlanarak değiştirilebilir veya yeniden düzenlenebilir.

Bu tez çalışmasında, bir monopol antenin ışınma yönünün kontrolü, anten kazancının ve yönlülüğünün iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Tasarım ve simülasyonlar için bir mikrodalga simülasyon programı kullanılmıştır. İki farklı birim hücre tasarlanmış olup, her bir birim hücre rezonatör amaçlı iki adet yama içermektedir. Birim hücreler üzerinde bulunan yamalardan bir tanesi çember, diğeri ise çubuk şeklindedir. Rezonatör olarak işlev gösteren bu yamaların FR4 malzemenin arka yüzeyindeki metal plakaya via aracılığı ile bağlantısı kontrol edilerek, anten parametreleri değiştirilebilecektir. Rezonatör ile metal plaka arasındaki temasın via aracılığı ile olması "1", olmaması ise "0" olarak adlandırılmıştır.

Çalışmada ayrıca, metayüzeylerin üretimi de yapılmış ve ölçümler PNA-L N5234A Network Analyzer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları, anten parametrelerinin kontrol edilebildiğini göstermiştir. Diğer taraftan, ölçüm sonuçları hem simülasyon sonuçları ile, hem de literatür sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Metayüzey, Radyasyon paterni, Monopol anten

Sayfa Adedi : 72

Danışman : Prof. Dr. Emin ÜNAL

2-BIT PROGRAMMABLE METASURFACE AND ANTENNA APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Hasan YERAL

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

September 2020

ABSTRACT

Metamaterials are artificial materials produced in laboratory environment. Metasurfaces, also known as planar metamaterials, have found their place in important applications today due to their high level of unusual electromagnetic properties, low profile structures and ease of production. The functionality and electromagnetic properties of the metasurface can be changed or rearranged by manipulating the structure and dimensions.

In this thesis, it is aimed to control the radiation direction of a monopole antenna and to improve the antenna gain and directionality. A microwave simulation program was used for design and simulations purposes. Two different unit cells are designed, and each unit cell contains two patches as resonators. One of the patches on the unit cells is circular and the other is rod-shaped. The antenna parameters can be adjusted by controlling the connection of these patches, which act as resonators, to the metal plate on the back surface of the FR4 material through vias. It is named "1" if there is contact between the resonator and metal plate, and "0" otherwise.

In the study, metasurfaces are also produced and measurements are carried out using PNA-L N5234A Network Analyzer device. Simulation and measurement results have showed that the antenna parameters can be controlled. On the other hand, the measurement results are compared with both the simulation results and the literature results and it is seen that the results are in agreement.

Key Words : Metasurface, Radiation pattern, Monopole antenna
Page Number : 72
Supervisor : Prof. Dr. Emin ÜNAL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başlamamın en büyük sebeplerinden biri olan, başladıktan sonra cevapladığı sorularla, verdiği bilgilerle, sabrıyla, duyduğu ilgiyle, tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde, uygulanmasında ve sonraki tüm tez aşamalarında takibi, tecrübesi ve yönlendirmeleriyle kısacası verebildiği bütün desteği esirgemedi veren sayın hocam Prof. Dr. Emin ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Ders aşamasında ve tez çalışması sırasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, tasarım aşamasında her türlü sorumu sabırla ve içtenlikle cevaplayan, tasarım a esirgemeyen saygıdeğer hocam Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik bilgi ve tecrübeleriyle, yüksek lisans eğitimim ve tez aşaması boyunca yardımını esirgemeyen, çalışmalarımda büyük desteği olan hocam saygıdeğer Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez aşaması süresince yardımlarını sürekli olarak aldığım, tasarladığım antenlerin üretimi ve ölçümleri sırasında yardımcı olan Araştırma Görevlisi Olcay ALTINTAŞ ve Araştırma Görevlisi Fatih Özkan ALKURT'a, yine üretim aşamasında çalışmamın destek gerektirdiği her kısmında yardımlarını esirgemeyen Araştırma Görevlisi Ahmet ATCI'ya ve Araştırma Görevlisi Şekip DALGAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana destek olan, iyi kötü her anımda yanımda olan, yardıma ihtiyacım olduğu zaman ilk yardımına koşan gerek maddi gerekse manevi konularda hiçbir zaman yardımını esirgemeyip beni buralara kadar getiren Aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. ÜRETME VE ÖLÇME CİHAZLARI.....	6
4. MATERYAL, METOD VE ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	8
4.1. Çember ve Artı Şeklinde İki Çubuktan Oluşan Metayüzey	8
4.1.1. Monopol anten tasarımı ve sonuçları	8
4.1.2. Birim hücre ve metayüzey tasarımı	10
4.1.3. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı birinci konfigürasyon	12
4.1.4. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı ikinci konfigürasyon	15
4.1.5. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı üçüncü konfigürasyon.....	19
4.1.6. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı dördüncü konfigürasyon	22
4.1.7. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı beşinci konfigürasyon	26
4.2. Bölünmüş Çember ve Uçları Oval Çubuk Metayüzey ve Uygulamaları.....	29
4.2.1. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk metayüzey için monopol anten tasarımı ve sonuçları	29

Sayfa

4.2.2. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk rezonatör içeren birim hücre ve metayüzey tasarımı	29
4.2.3. Monopol antene eklenmiş bölünmüş çember ve uçları oval çubuk metayüzey simülasyon sonuçları	31
4.2.4. İkinci metayüzey yapısı ile yapılan birinci konfigürasyon	34
4.2.5. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan ikinci konfigürasyon	39
4.2.6. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan üçüncü konfigürasyon	42
4.2.7. Tasarlanan ikinci metayüzey ile yapılan dördüncü konfigürasyon	44
4.2.8. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan beşinci konfigürasyon	48
4.2.9. Tasarlanan ikinci metayüzey ile yapılan altıncı konfigürasyon	51
4.3. G ve H Yamalı Metayüzey ile Yapılan Ek Çalışmalar	54
4.3.1. Dairesel toprak yüzeyli monopol anten tasarımı	54
4.3.2. G ve H yamalı metayüzeye dairesele toprak yüzeyli monopol antenin yerleştirilmesi ve sonuçları.....	56
4.3.3. G ve H metayüzey yapısı ve dairesele toprak yüzeyli monopol anten ile yapılan konfigürasyon	59
5. SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	70
DİZİN	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. (a) Örnek birim hücre görseli (b) Örnek metayüzey görseli	1
Şekil 4.1. Birinci metayüzey için monopol anten tasarımı ve ölçüleri	8
Şekil 4.2. Birinci metayüzey için olan monopol antenin S_{11} grafiği	9
Şekil 4.3. Monopol antenin 3- boyutlu radyasyon paterni (farfield)	9
Şekil 4.4. Monopol antenin polar radyasyon paterni	10
Şekil 4.5. (a) Birim hücre görünümü ve via bağlantıları (b) birim hücre tasarımı ve boyutları	11
Şekil 4.6. 10x10 birim hücreden oluşan metayüzey yapısı	12
Şekil 4.7. Metayüzey üzerine yerleştirilmiş monopol anten	13
Şekil 4.8. Monopol antene metayüzey eklendiği zamanki S_{11} parametresi	14
Şekil 4.9. Monopol antene eklenmiş metayüzeyin 3D radyasyon paterni	14
Şekil 4.10. Monopol antene eklenmiş metayüzeyin polar (2D) radyasyon paterni	15
Şekil 4.11. Monopol antene uygulanan ikinci konfigürasyon görseli.....	16
Şekil 4.12. İkinci konfigürasyonun S_{11} sonuçları	18
Şekil 4.13. İkinci konfigürasyonun deney ve simülasyon S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması.....	18
Şekil 4.14. Birinci metayüzeyin ikinci konfigürasyonunun 3-boyutlu radyasyon paterni.....	19
Şekil 4.15. Birinci metayüzeyin ikinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni.....	19
Şekil 4.16. Monopol antene uygulanan üçüncü metayüzey konfigürasyonu	20
Şekil 4.17. Üçüncü konfigürasyon için S_{11} sonuçları	21
Şekil 4.18. Üçüncü konfigürasyon için 3-boyutlu radyasyon paterni.....	22
Şekil 4.19. Üçüncü konfigürasyon için polar radyasyon paterni.....	22
Şekil 4.20. Monopol antene uygulanan dördüncü metayüzey konfigürasyonu.....	23

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21. Dördüncü konfigürasyonun S_{11} simülasyon sonucu	24
Şekil 4.22. Dördüncü konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni	25
Şekil 4.23. Dördüncü konfigürasyonun polar radyasyon paterni	25
Şekil 4.24. Monopol antene uygulanan beşinci konfigürasyon	26
Şekil 4.25. Beşinci konfigürasyonun S_{11} grafiği	27
Şekil 4.26. Beşinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni	28
Şekil 4.27. Beşinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni	28
Şekil 4.28. Bölünmüş çember (G) ve uçları oval çubuk (H) ile oluşan birim hücrenin (a) perspektif görüntüsü (b) ölçüleri	30
Şekil 4.29. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk ile oluşan metayüzey yapısı	31
Şekil 4.30. Monopol antene eklenmiş ikinci metayüzey tasarımı	32
Şekil 4.31. Monopol antene ikinci metayüzey tasarımı eklendiğinde S_{11} sonuçları	33
Şekil 4.32. Monopol antene ikinci metayüzey yapısı eklendiğindeki 3-boyutlu radyasyon paterni.....	34
Şekil 4.33. Monopol antene ikinci metayüzey yapısı eklendiğindeki polar radyasyon paterni.....	34
Şekil 4.34. Tasarlanan ikinci metayüzeyin birinci konfigürasyonu	35
Şekil 4.35. İkinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun S_{11} grafiği	37
Şekil 4.36. İkinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun karşılaştırmalı S_{11} grafiği .	37
Şekil 4.37. İkinci metayüzey birinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni	38
Şekil 4.38. İkinci metayüzey birinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni	38
Şekil 4.39. Tasarlanan ikinci metayüzey yapısının ikinci konfigürasyonu	39
Şekil 4.40. İkinci konfigürasyonun yansımaya katsayısı (S_{11}) sonucu	40
Şekil 4.41. İkinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni.....	41
Şekil 4.42. İkinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.43. İkinci metayüzey tasarımının üçüncü konfigürasyon görseli.....	42
Şekil 4.44. Üçüncü konfigürasyon ile elde edilen S_{11} parametresi	43
Şekil 4.45. Üçüncü konfigürasyondan elde edilen 3-boyutlu radyasyon paterni	44
Şekil 4.46. Üçüncü konfigürasyondan elde edilen polar radyasyon paterni	44
Şekil 4.47. İkinci metayüzey tasarımının dördüncü konfigürasyonu.....	45
Şekil 4.48. Dördüncü konfigürasyondan elde edilen S_{11} parametresi	46
Şekil 4.49. İkinci metayüzeyin dördüncü konfigürasyonunun 3-boyutlu radyasyon paterni.....	47
Şekil 4.50. İkinci metayüzeyin dördüncü konfigürasyonunun polar radyasyon paterni.....	47
Şekil 4.51. İkinci metayüzey çalışmasının beşinci konfigürasyon görseli.....	48
Şekil 4.52. Beşinci konfigürasyondan elde edilen S_{11} sonucu	49
Şekil 4.53. İkinci metayüzey beşinci konfigürasyonun 3D radyasyon paterni	50
Şekil 4.54. İkinci metayüzey beşinci konfigürasyonun 2D radyasyon paterni	50
Şekil 4.55. İkinci metayüzey çalışması için tasarlanan altıncı konfigürasyon	51
Şekil 4.56. Altıncı konfigürasyon için yansıma katsayısı sonucu	52
Şekil 4.57. Altıncı konfigürasyondan elde edilen 3-boyutlu radyasyon paterni.....	53
Şekil 4.58. Altıncı konfigürasyondan elde edilen polar radyasyon paterni.....	53
Şekil 4.59. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopol antenin S_{11} parametresi	54
Şekil 4.60. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopol antenin 3-boyutlu radyasyon paterni.....	55
Şekil 4.61. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopol antenin polar radyasyon paterni.....	55
Şekil 4.62. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol anten	56
Şekil 4.63. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol antenin S_{11} parametresi	57

Şekil	Sayfa
Şekil 4.64. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol antenin 3-boyutlu radyasyon paterni.....	58
Şekil 4.65. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol antenin polar radyasyon paterni.....	58
Şekil 4.66. İkinci metayüzey tasarımının yedinci konfigürasyonu.....	59
Şekil 4.67. Yedinci konfigürasyonun S_{11} parametresi.....	60
Şekil 4.68. Yedinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni	60
Şekil 4.69. Yedinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni.....	61



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Protomat E33 3-boyutlu baskı devre cihazı	6
Resim 3.2. PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı ile S_{11} ölçümü	7
Resim 4.1. İkinci konfigürasyonun üretilmiş görseli	17
Resim 4.2. İkinci konfigürasyonun S_{11} parametresinin deneysel ölçümü	17
Resim 4.3. İkinci metayüzey yapısının birinci konfigürasyonunun üretilmiş görseli	36
Resim 4.4. İkinci metayüzey yapısının birinci konfigürasyonunun S_{11} parametresinin deneysel ölçümü.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

λ

Dalga boyu

c

Işık hızı

f

Frekans

μ

Manyetik geçirgenlik

ϵ

Dielektrik sabiti

Ω

Ohm

Kısaltmalar

Açıklamalar

EM

Elektromanyetik

FEM

Sonlu elemanlar yöntemi

MTM

Metamalzeme

S_{11}

Saçılma parametreleri

dB

Desibel

Hz

Hertz

GHz

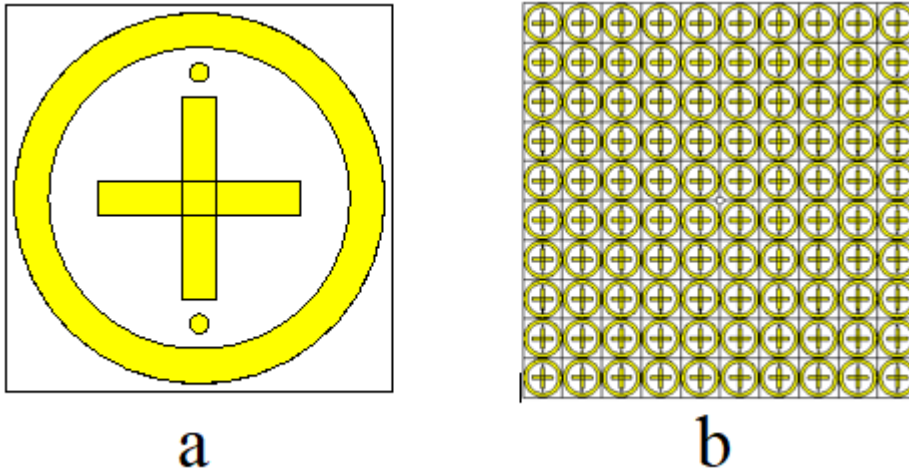
Gigahertz

mm

milimetre

1. GİRİŞ

Metamalzemeler, tipik olarak dielektrik yüzeyler üzerine yerleştirilmiş, periyodik metalik yamalardan oluşur. Negatif kırılma [1-3], elektromanyetik bant aralığı [4,5] yüksek empedans [5-7] gibi elektromanyetik özelliklere sahip ve laboratuvar ortamında üretilebilen yapay malzemelerdir. Metamalzemelerin günümüzde pek çok kullanım alanı vardır. Bunlardan bazıları, negatif kırılma [8,9], mükemmel lensler [10-12] ve görünmezlik pelerini [13-19] uygulamalarıdır. Bu uygulama alanlarının haricinde metamalzemeler, görüntüleme, algılama ve sensörler gibi birçok alanda da kullanılabilir [20-25]. İki boyutlu metamalzemeler metayüzeyler olarak bilinmektedir. Metayüzeyler, iletilen ve yansıyan elektromanyetik dalgaları manipüle etme özellikleri sayesinde kendilerine farklı uygulama alanı bulabilmektedirler [26-32]. Metamalzemelerin diğer uygulama alanları ise, enerji hasatlama ve absorber uygulamalarıdır [33-40]. Bir metayüzey ve örnek birim hücre görseli Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1. (a) Örnek birim hücre görseli (b) Örnek metayüzey görseli

Bu tez çalışmasında iki farklı metayüzey tasarımının monopol anten parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk çalışmada birim hücrede bir çember ve bir de artı şeklinde yama bulunan metayüzey yapısı kullanılmıştır. Her birim hücrede topraklanmış düzleme bağlı iki adet via bulunmaktadır. Metayüzey yapısı, periyodik olarak dizilmiş 10x10 birim hücreden oluşmaktadır. Her birim hücredeki yamaların arka plakaya via’lar aracılığıyla bağlantıları ayrı ayrı kontrol edilerek antenin parametrelerinin iyileştirilmesi ve antenin radyasyon paterninin yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu parametreler; yansıma

katsayısı (S_{11}), antenin kazancı ve antenin yönlülük değeridir. Antenin radyasyon paterni, antenden yayılan dalga genliklerinin iki ve üç boyutlu açısal bağımlılığını ifade etmektedir. Antenin yönlülüğü ise, belirli bir yöndeki ışınım şiddetinin tüm yönlerdeki ışınım şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır. Çalışmalarda tek bir monopol anten bulunduğu için sadece S_{11} parametresi incelenmiştir. Bu çalışmadaki her bir metayüzey konfigürasyonu için simülasyon programı aracılığıyla çok sayıda analiz yapılmıştır. Yapılan bütün simülasyonlar için elde edilen sonuçlar incelenmiş ve anten parametrelerini iyileştirip, iyileştirmediği irdelenmiştir. Ek olarak bu çalışmaların laboratuvar ortamında üretimleri, ölçümleri yapılmış ve simülasyon sonuçları ile kıyaslanıp uyumuna bakılmıştır.

İkinci çalışmada bölünmüş bir çember ve uçları oval bir çubuk yama kullanılarak birim hücreler oluşturulmuştur. Bu çalışmanın birinci çalışmaya göre farkı, çemberin bir kısmı açık bırakılmıştır. Her birim hücre 15 mm x 15 mm boyutlarında tasarlanmıştır. Birim hücreler periyodik bir şekilde 6x6 olarak dizilmiştir. Bu çalışmada iki tip toprak yüzey çalışılmıştır. İlk olarak, metayüzeyin altına kare bir toprak yüzey, daha sonra ise dairesel bir toprak yüzey yerleştirilmiştir. Yapılan testlerin sonucunda, metayüzeyin boyutları ile uyumlu olan kare toprak yüzey kullanıldığında daha iyi sonuç elde edildiği için çoğunlukla kare toprak yüzey ile çalışılmıştır. Toplamda 36 birim hücre için, birim hücre üzerinde bulunan her iki rezonatörün metal plaka ile temas edip etmediği ayrı ayrı kontrol edilip simülasyon programı yardımı ile incelenmiştir. Bu çalışmada da antenin parametrelerinde iyileştirme ve radyasyon paterninde yönlendirme amaçlanmıştır. İkinci çalışmadaki metayüzeyin laboratuvar ortamında üretimi yapılmış ve simülasyon sonucu ile kıyaslaması yapılmıştır.

Metayüzey üzerinde bulunan her iki rezonatörün metal plaka ile, via aracılığıyla bağlantı durumları “1” (on) ve “0” (off) olarak kodlanmıştır. Burada “0” via ile yama arasında bağlantı olmadığını, “1” ise via ile yama arasında bağlantı olduğunu ifade etmektedir. Tasarlanan metayüzeylerin her birim hücrelerinde 2 adet via bağlantısı bulunmaktadır. Dolayısıyla “00” “01” “10” “11” ($2^2=4$ bit) olmak üzere 4 farklı kodlama, yani 2-bit kodlama çalışılmıştır.

2. LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Tang ve arkadaşları 2017 yılında, kirigami şeklindeki metamalzemeye, termal duyarlı malzeme ekleyerek, kirigami yapılarının farklı yönlere eğilmesi ile programlanabilen metamalzeme tasarımını yapmışlardır ve binalardaki enerji tüketimini azaltmayı amaçlamışlardır [41].

Huang C. ve arkadaşları 2017 yılında, saçılmış elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde modüle edebilen ve farklı uzak alan ışınları gerçekleştirebilen, (2 bitlik) dijital olarak kontrol edilebilen, programlanabilir metayüzey tasarımı kullanmışlardır. Tasarımın kontrol mekanizmasını programlanabilir bir elektrik kaynağı ile gerçekleştirmişlerdir [42].

Yang ve arkadaşları 2016 yılında, aynı yüzey üzerinde birden fazla işlevsellik elde edilen programlanabilir bir metayüzeyin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkileri ve polarizasyon dönüşümü üzerinde çalışmışlardır. Her birim hücre üzerine PIN diyot entegre ederek “1” ve “0” kodları ile kontrolü gerçekleştirmişlerdir [43].

Li ve arkadaşları 2016 yılında, mikrodalga bandında bir sensör ve tek frekanslı görüntüleme için 2- bit programlanabilir metayüzey sunmuşlardır. Sunulan metayüzey ile hem uzak alan görüntülemesi hem de yakın alan görüntülemesi yapmışlardır. Programlama işlemini her birim hücre üzerine 2 adet PIN diyot yardımıyla “0” ve “1” kodlama kullanarak yapmışlardır [44].

Wan ve arkadaşları 2016 yılında, horn anten ve satranç tahtası şeklinde bir bitlik programlanabilir metayüzey sunmuşlardır. Bu metayüzey ile beraber anteni, yansıtıcı anten olarak kullanmak amaçlanmıştır. Kontrol mekanizması olarak PIN diyot kullanmışlardır [45].

Tang ve arkadaşları 2019 yılında, kablosuz iletişim için düşük maliyetli programlanabilir bir metayüzey sunmuşlardır. Programlanabilir metayüzeyin kontrol edilebilir özelliğinden yararlanılarak, QPSK anahtarlamalı iletim gerçekleştirmişlerdir. Kontrol mekanizması olarak PIN diyot kullanmışlardır [46].

Li ve arkadaşları 2017 yılında, 1-bitlik kodlanabilir metayüzeye dayanan yeniden programlanabilir bir hologram kavramı tanıtmışlardır. Holografik görüntünün yalnızca kodlanabilir metayüzey ile gerçekleştirilebileceğini göstermişlerdir [47].

Cui ve arkadaşları 2014 yılında, programlanabilir metamalzeme üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmalarda '0' ve '1' kodları kullanarak 1-bitlik kodlamalarla farklı fonksiyonları gerçekleştirmek için, elektromanyetik dalgaları kontrol etmişlerdir [48].

Ünal ve Altıntarla 2019 yılında, T şeklinde 1-bitlik programlanabilir metayüzey yapısı oluşturmuş ve bu yapıdaki via temas durumunu "0" ve "1" kodları ile kontrol ederek, monopol antenin radyasyon paternlerinde yönlendirme yapmışlardır [49].

Liu ve Cui 2016 yılında, terahertz dalgalarının geniş bant difüzyonları ve anizotropik kodlanabilir metayüzey kavramları da dahil olmak üzere, programlanabilir metayüzeylerdeki son gelişmeler üzerine bir inceleme yapmışlardır. Aynı zamanda halka benzeri radyasyon paterninin oluşturulması için yeni bir kodlama şeması önermişlerdir [50].

Cui ve arkadaşları 2019 yılında, dijital bilgileri kodlanabilir metayüzeye ekli mikroserit yama anten aracılığıyla iletmek için bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yönteme doğrudan dijital modülasyon (DDM) adı verilmiştir. DDM sistemine dayalı metayüzey ile bant genişliğini kullanmada daha verimli bir sonuç elde etmişlerdir. Bu sistemin günümüzde kullanılan iletişim sistemlerine göre avantajı daha yüksek seviyeli modülasyon kullanılmıştır [51].

Zheng ve arkadaşları 2019 yılında, kalite faktörü düşük rezonatörlere dayalı kodlanabilen metayüzeyler tasarlamışlardır. Q (kalite faktörü) değeri ile faz kayması arasındaki ilişkiyi, eşdeğer devre modeli kullanılarak analiz etmişlerdir. Daha fazla bant genişliği için rezonatörün Q değerinin daha düşük olması gerektiğini göstermişlerdir [52].

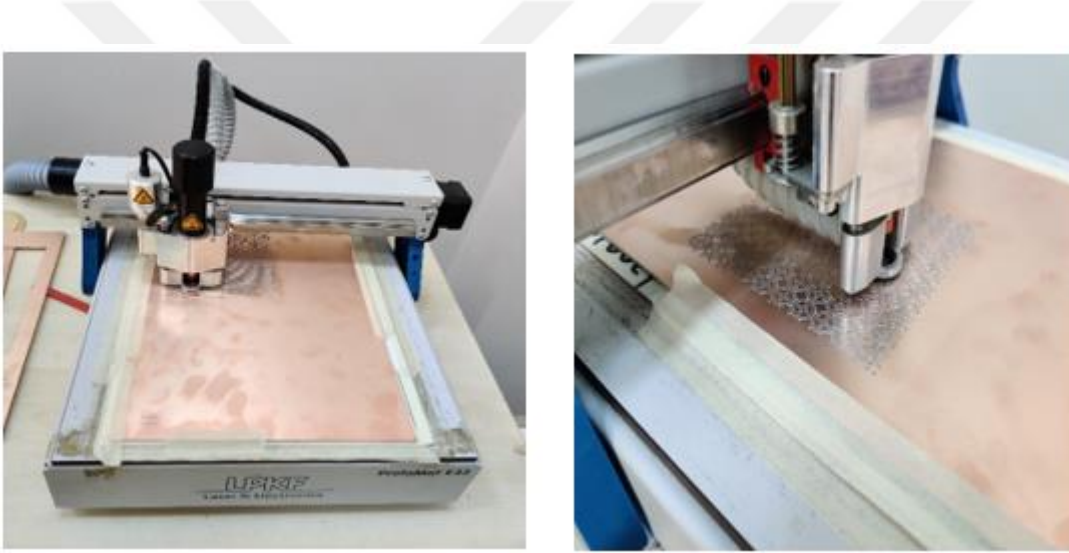
Wu ve arkadaşları 2018 yılında, esnek ışınların nasıl sentezleneceğini analiz etmek ve bunu deneyle doğrulamak amacıyla, düşük bitli kodlanabilir metayüzeyde çok sınırlı bir faz değeri kullanmışlardır. Bu çalışmada kontrol mekanizması olarak PIN diyotlar kullanılmış ve 1-bitlik kodlama yapmışlardır [53].

Yi ve arkadaşları 2020 yılında, piezoelektrik maddeden ve dijital sentetik empedans devrelerinden oluşan programlanabilir metamalzeme tasarlamışlardır. Dijital devreye bir mikro denetleyici yerleştirilmiş ve mikro denetleyici programlanarak piezoelektrik yamanın uçları arasında istenilen herhangi bir empedans değerini oluşturmuşlar. Önerilen programlanabilir metamalzemenin, istenen frekanslarda veya istenen geniş bir frekans bandında vibrasyonu azaltmak için esnek bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir [54].

Han ve arkadaşları 2020 yılında, hem uzak, hem de yakın alan bölgelerinde görüntüleme için 1-bit programlanabilir metayüzey sunmuşlardır. Programlanabilir metayüzey ile yankısız bir odada “planar near-field scanning” tekniğini kullanarak görüntüleme yapmışlardır. Sunulan programlanabilir metayüzey ile beraber mükemmel performansta görüntü alındığı gözlenmiştir. Metayüzeyin programlamasının kontrol mekanizmasını PIN diyotlarla yapmışlar ve 1-bitlik kodlama kullanmışlardır [55].

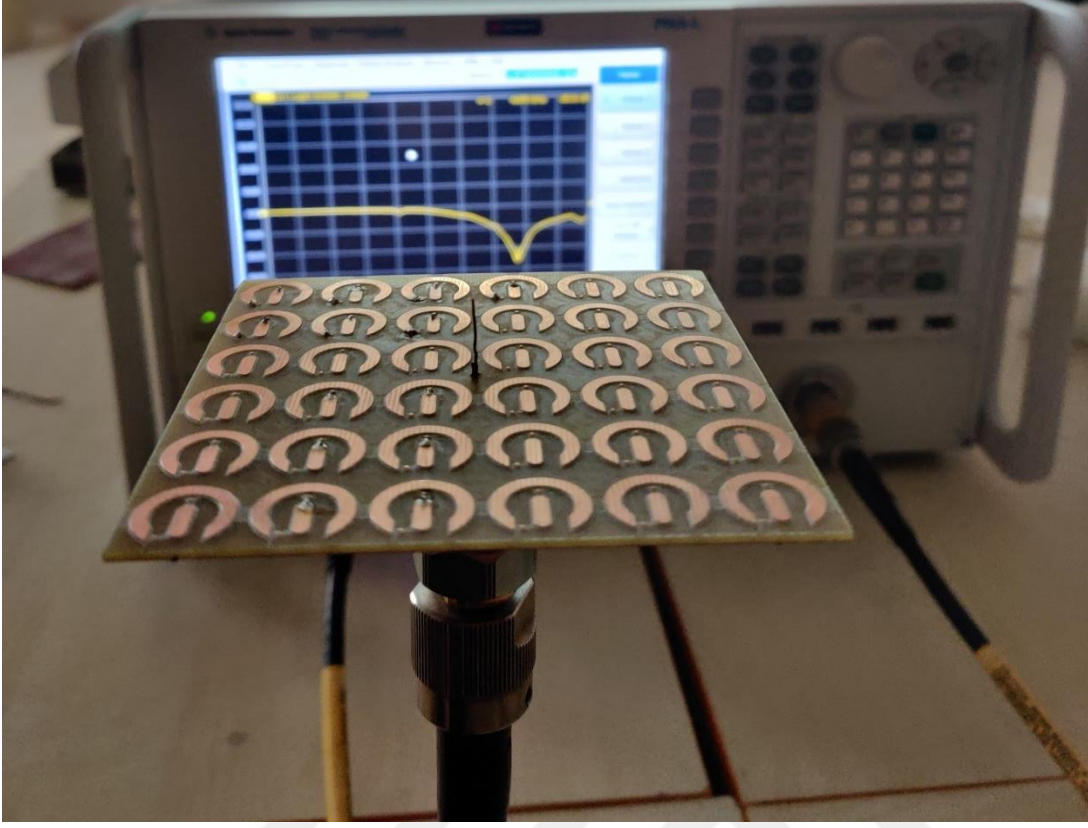
3. ÜRETME VE ÖLÇME CİHAZLARI

Monopol anten için tasarlanan metayüzey yapılarının tasarımı mikrodalga simülasyon programı ile yapıp, çizimlerin üretimi ve ölçme çalışmaları laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan modellerin üretimleri Protomat E33 cihazı ile yapılmıştır. Resim 3.1, cihazın resimlerini göstermektedir. Rezonatörleri arkadaki metal plakaya bağlamak için gereken delikler matkapla hassas olarak delinmiş ve daha sonra bu deliklere metal tel geçirilerek bağlanması gereken bakıra lehim makinesi ile lehim yapılmıştır. Son olarak metayüzeyin ortası yine matkapla delinerek monopol tel anten buraya metayüzeye dik olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Resim 3.1. Protomat E33 3-boyutlu baskı devre cihazı

Üretilen metayüzey yapılarının yansıma katsayısının (S_{11}) ölçümü ise PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı ile yapılmıştır. Cihaz 10 MHz ile 43,5 GHz gibi geniş bir bant aralığında ölçüm yapabilmektedir. Network Analyzer cihazından elde edilen verilerin Microsoft excel programında grafikleri çizilmiştir. PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı kullanılarak gerçekleştirilen ölçüm görüntüleri Resim 3.2’de verilmiştir.



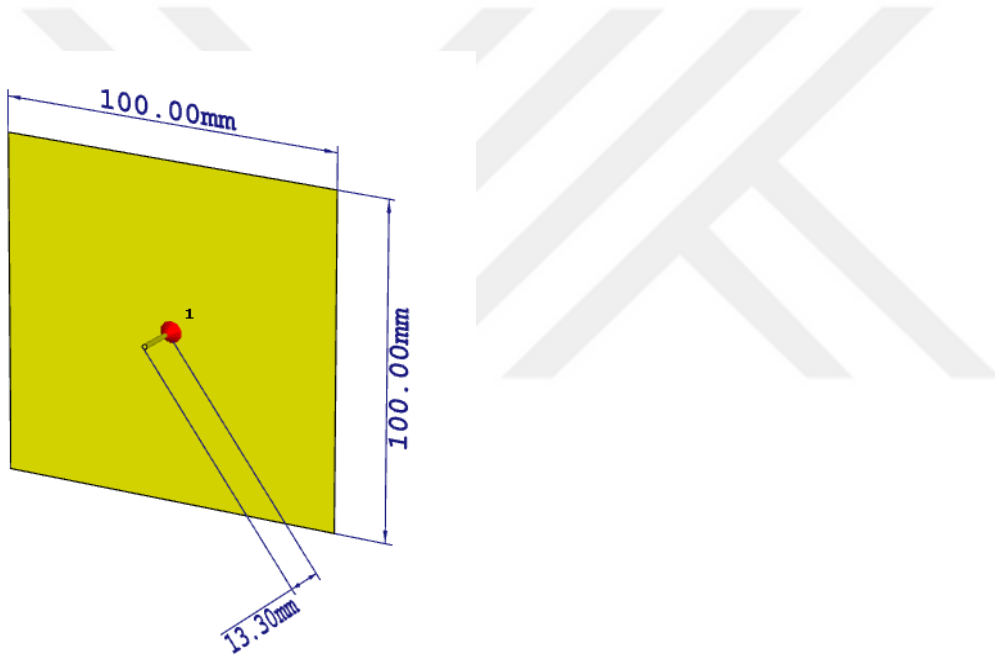
Resim 3.2. PNA-L Network Analyzer N5234A cihazı ile S_{11} ölçümü

4. MATERYAL, METOD VE ARAŞTIRMA SONUÇLARI

4.1. Çember ve Artı Şeklinde İki Çubuktan Oluşan Metayüzey

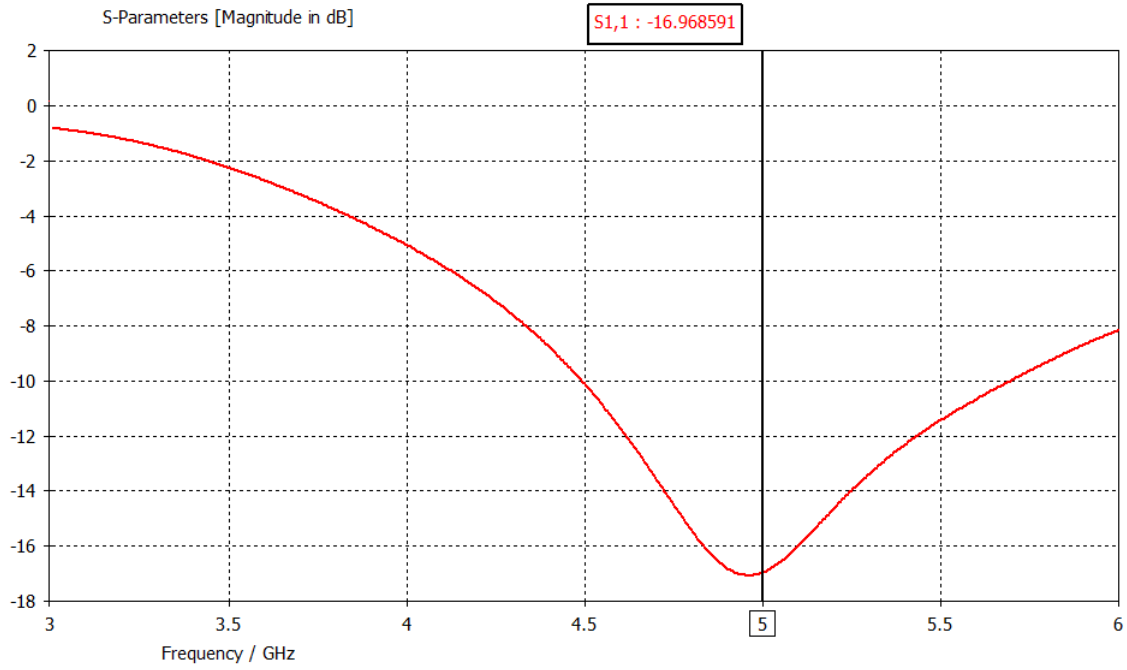
4.1.1. Monopol anten tasarımı ve sonuçları

İlk olarak Şekil 4.1’de görülen monopol anten tasarlanmıştır. Monopol antenin boyu 13,3 mm ve yarıçapı 0,5 mm olarak ayarlanmıştır. Anten, 5 GHz çalışma frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Monopol antenin ucuna 1 adet 50 ohm SMA konnektör bağlanmış, konnektörün diğer ucu ise topraklanmış düzleme bağlanmıştır.

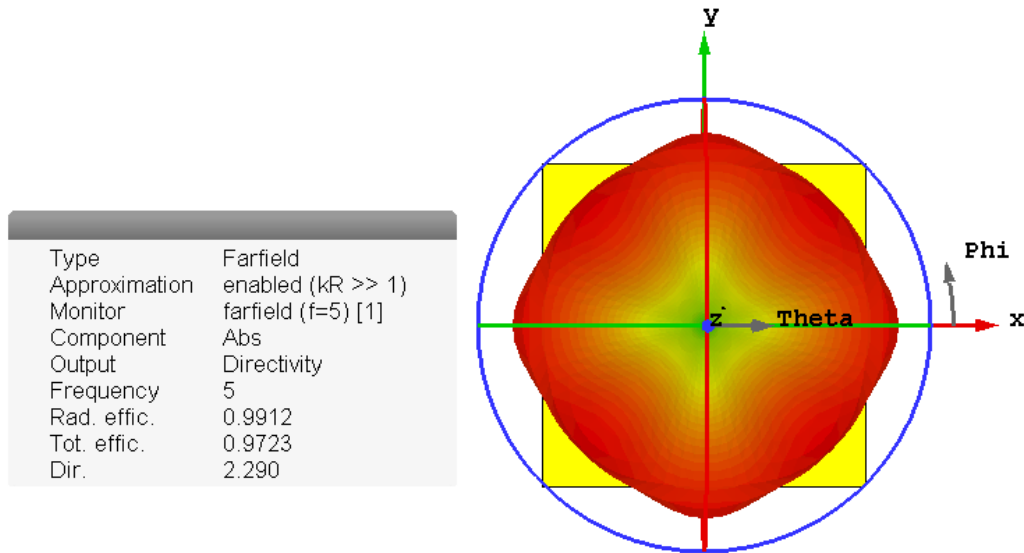


Şekil 4.1. Birinci metayüzey için monopol anten tasarımı ve ölçüleri

Monopol antenin yansımaya katsayısı (S_{11}) sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yansımaya katsayısının 5 GHz’de yaklaşık olarak -16,96 dB’ye kadar düştüğü görülmektedir. S_{11} parametresinin -10 dB’nin altına düştüğü frekans değerleri aynı zamanda bant genişliğini yani, antenin yaklaşık olarak hangi frekans aralıklarında çalışabileceğini göstermektedir. Buna göre, yansımaya katsayısının -10 dB’nin altına düştüğü 4,5 GHz - 5,7 GHz arasındaki frekans bandı, bant genişliği olarak ifade edilmektedir.

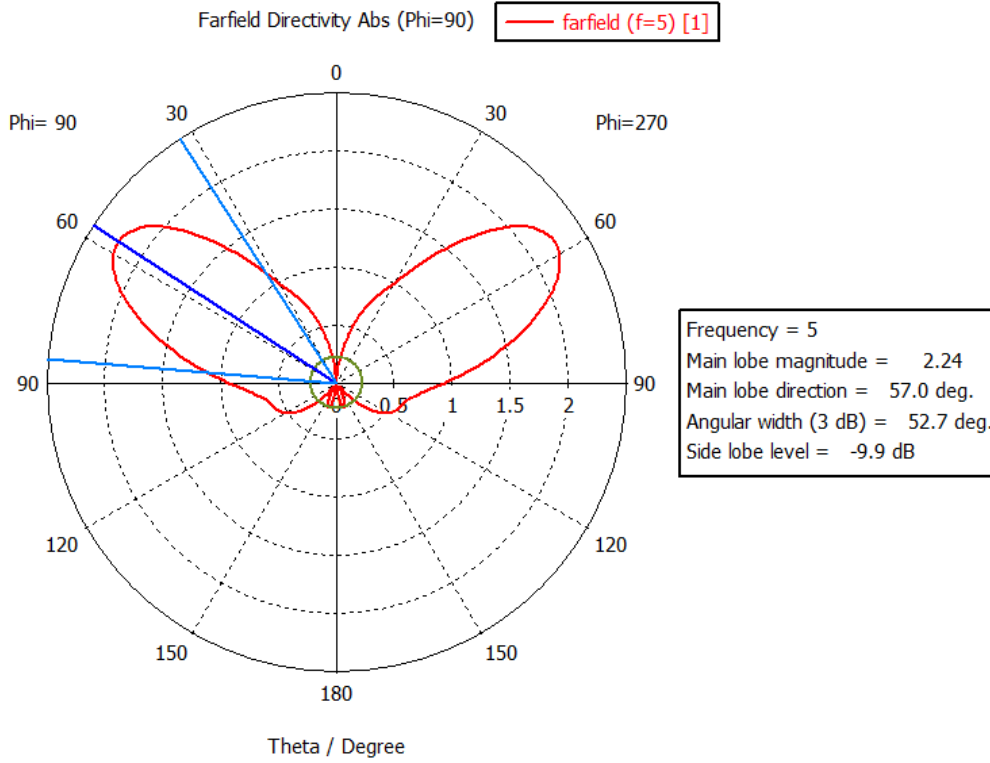


Şekil 4.2. Birinci metayüzey için olan monopol antenin $S_{1,1}$ grafiği



Şekil 4.3. Monopol antenin 3- boyutlu radyasyon paterni (farfield)

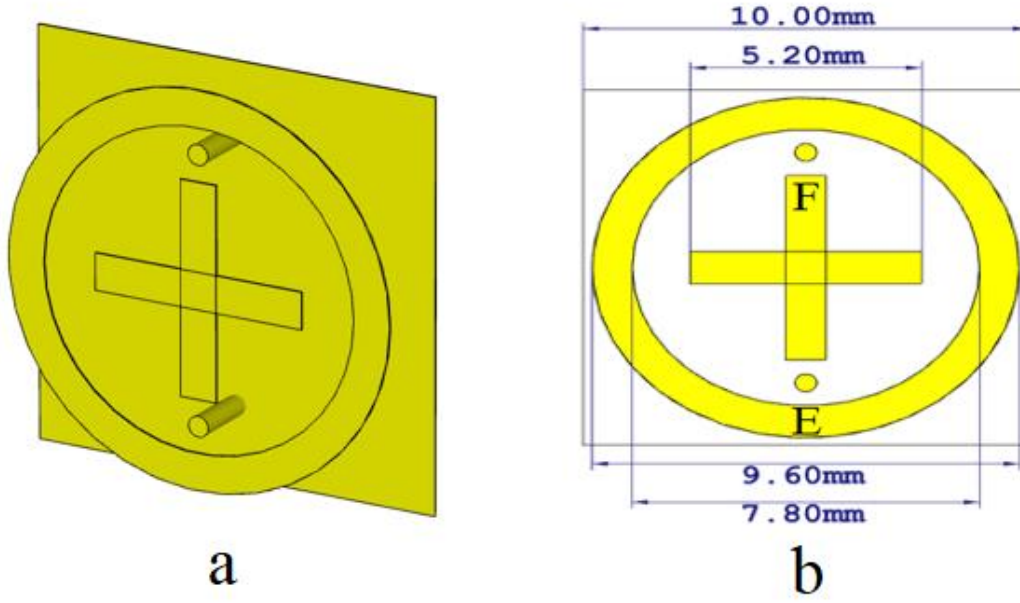
Monopol anten için 5 GHz'de simülasyon sonucundan elde edilen 3D ve polar (2D) radyasyon patern grafikleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Antenin ana lob yönü $57,0^\circ$, ana lob ışınma büyüklüğü 2,24 dB ve açısal genişliği ise $53,1^\circ$ olarak görülmektedir.



Şekil 4.4. Monopol antenin polar radyasyon paterni

4.1.2. Birim hücre ve metayüzey tasarımı

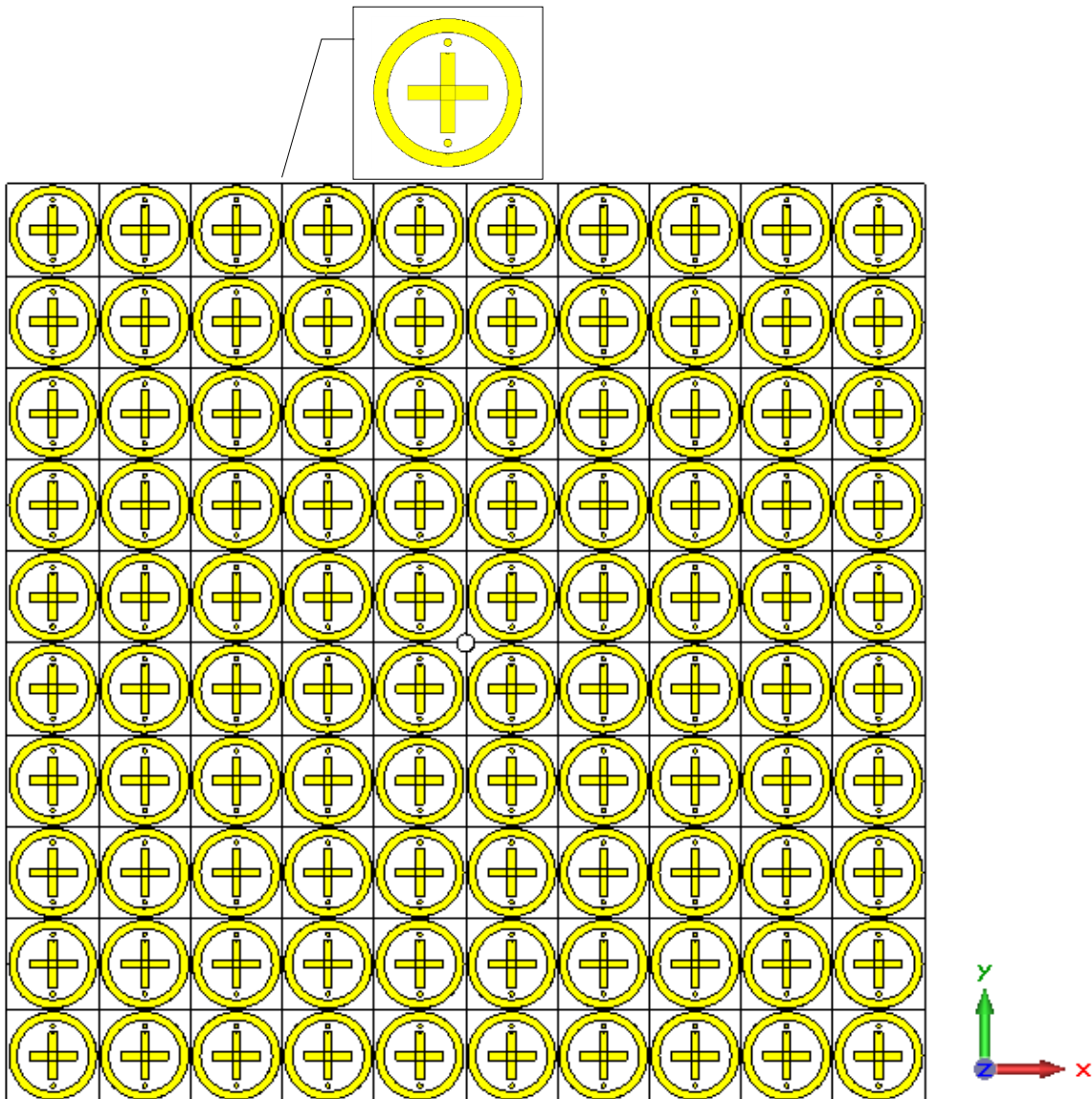
İlk olarak oluşturulan birim hücre 10 mm x 10 mm boyutlarındadır ve birim hücrenin temel yapısı Şekil 4.5 (a)'da gösterilmektedir. Birim hücrenin en alt tabakası 0,035 mm kalınlığında bakır bir levhadan oluşmaktadır. Rezonatörler ve bakır levha arasında 1,6 mm kalınlığında FR-4 ($\epsilon=4,3$, $\mu=1$) malzemesi bulunmaktadır. Birim hücrenin üst yüzeyinde rezonatör olarak çalışacak olan çember ve artı şeklinde düzlemsel yamalar oluşturulmuş ve her bir rezonatörün arkadaki metal plakaya temasını sağlayacak delikler delinip bakır doldurularak yapının en alt kısmındaki topraklanmış düzleme teması sağlanmıştır. Birim hücredeki çember yama “E” ve artı şeklindeki yama ise “F” olarak adlandırılmıştır. Birim hücre üzerinde bulunan rezonatör boyutları Şekil 4.5 (b)'de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiş olup 5 GHz rezonans frekansında çalışacak şekilde ölçüleri ayarlanmıştır.



Şekil 4.5. (a) Birim hücre görünümü ve via bağlantıları (b) birim hücre tasarımı ve boyutları

Bu çalışmada, her birim hücre yüzeyindeki çember ve artı şeklindeki iki yamanın arka tarafta bulunan metal yüzeye teması ayrı ayrı kontrol edilerek anten parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu işlem metayüzeyi oluşturan bütün birim hücelere gerektiğinde uygulanabilmektedir. Burada iki bitlik bir kodlama kullanılmıştır; artı şeklindeki rezonatörün arkadaki metal plakaya via aracılığı ile bağlantı noktası birinci biti, çember şeklindeki rezonatörün bağlantı noktası ise ikinci biti ifade etmektedir. Bu noktaların arkadaki metal plakaya bağlanması 1 (on), bağlanmaması ise 0 (off) olarak ifade edilmiştir.

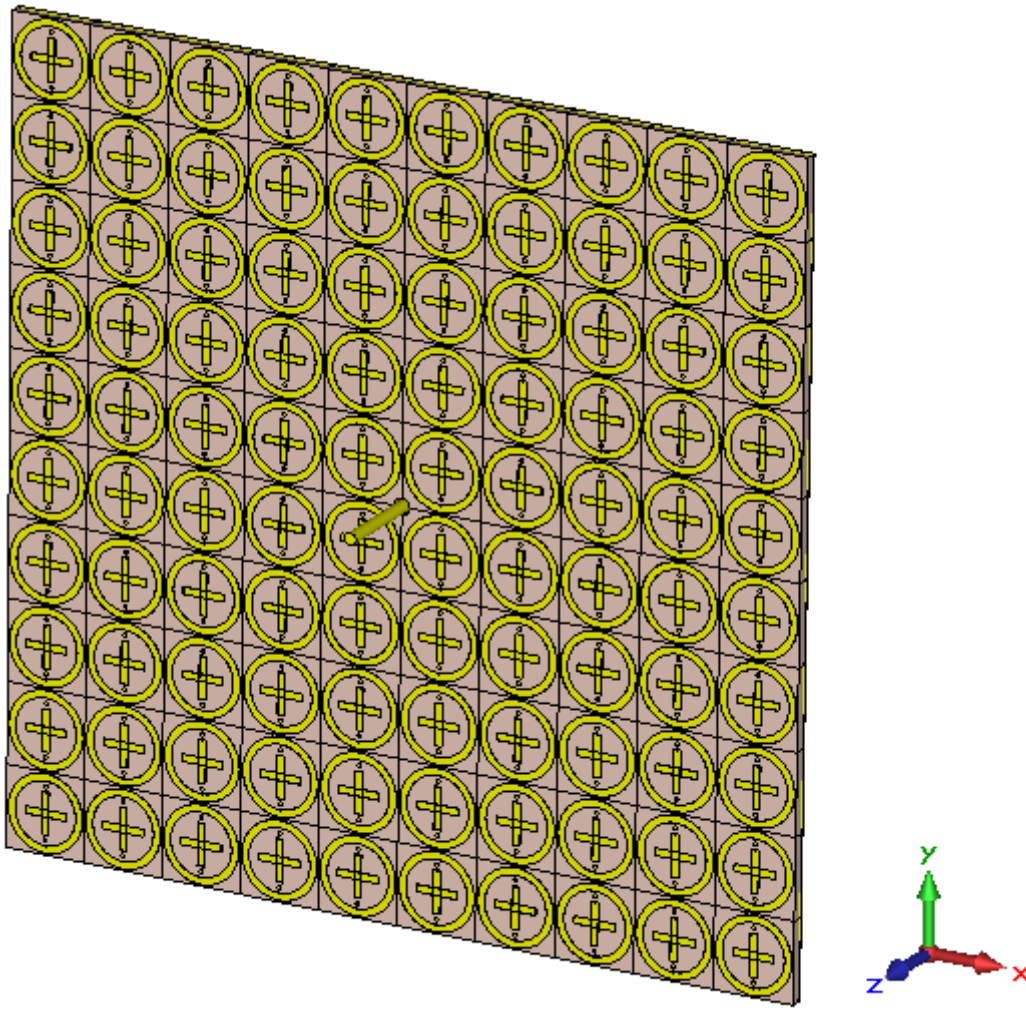
Metayüzey, Şekil 4.6’da görüldüğü gibi 10 x 10 birim hücreden oluşmaktadır. Metayüzey üzerindeki birim hücreler periyodiktir ve toprak düzlemin boyutları metayüzey boyutlarına eşittir.



Şekil 4.6. 10x10 birim hücreden oluşan metayüzey yapısı

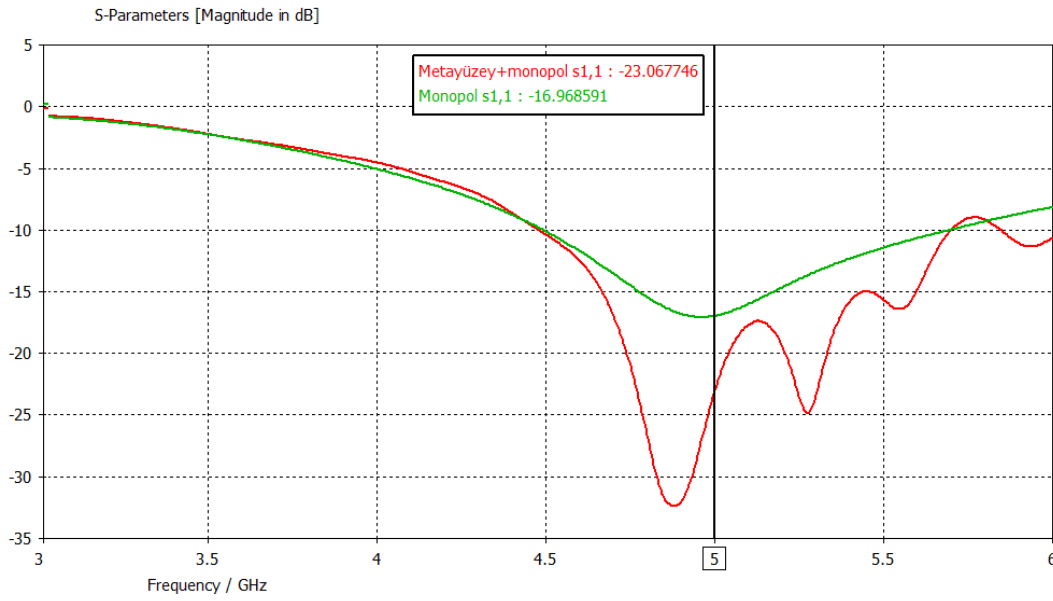
4.1.3. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı birinci konfigürasyon

Çember ve artı şeklinde yerleştirilmiş iki çubuktan oluşan metayüzey yapısı için ilk çalışma olarak monopol antene metayüzey yapısı eklenip tüm birim hücreler 00 yapıldığında metayüzeyin monopol anten parametreleri üzerindeki etkisi gözlenmiştir.

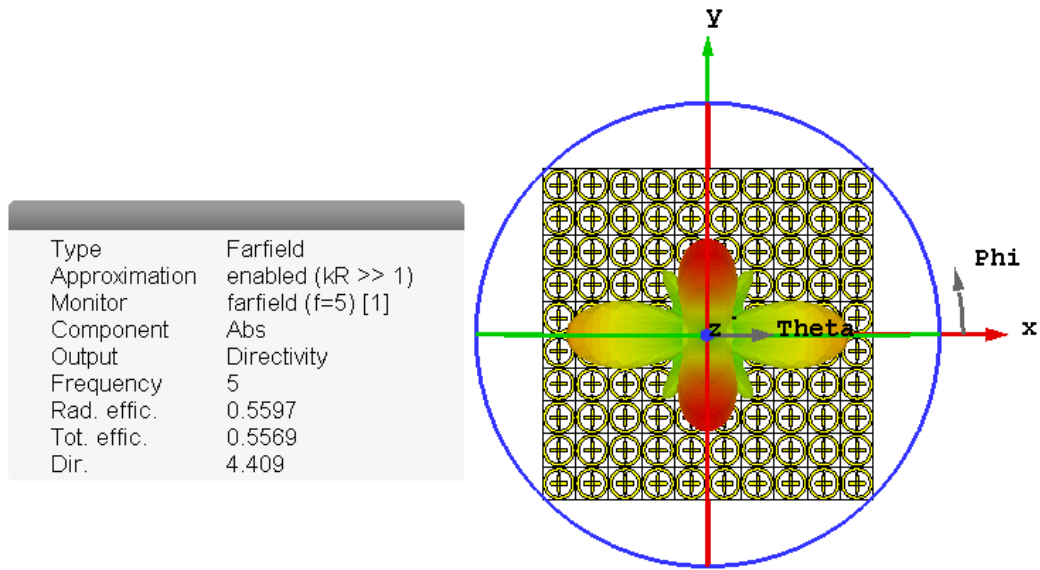


Şekil 4.7. Metayüzey üzerine yerleştirilmiş monopol anten

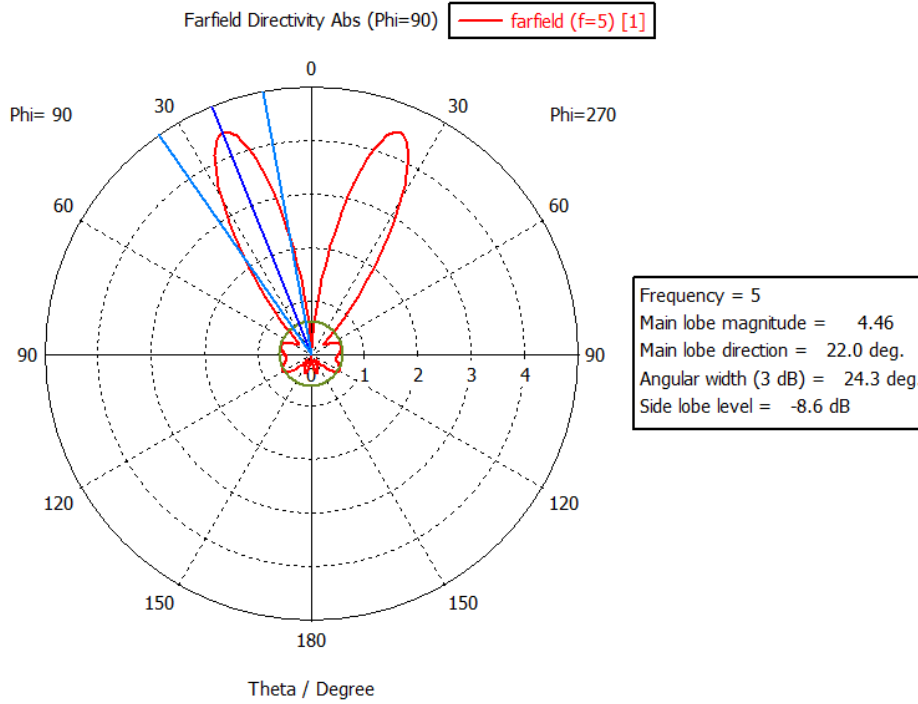
Şekil 4.7’de metayüzeyin her birim hücresinin “00” (off-off) durumdaki görünümü verilmiştir. Buna göre, simülasyon sonucunda elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 4.8’de görülmektedir. Monopol antenin çalışma frekansı olan 5 GHz’deki yansımaya katsayısı, metalmalzeme varken ve yok iken sırasıyla -16,96 dB ve -23,07 dB olarak elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, metayüzey eklendiği zaman yansımaya katsayısında 5 GHz’de -6,1 dB’lik bir iyileşme gözlenmiştir. Şekil 4.8 dikkatli incelenecek olursa; rezonans frekansında, metayüzeyin etkisi ile aşağı yönde yaklaşık 100 MHz’lik bir kayma vardır. Bu kayma dikkate alındığında, aslında yansımaya katsayısındaki iyileşme daha fazladır. 4,9 GHz’de yansımaya katsayısındaki iyileşme yaklaşık olarak -17,5 dB’dir.



Şekil 4.8. Monopol antene metayüzey eklendiği zamanki S_{11} parametresi



Şekil 4.9. Monopol antene eklenmiş metayüzeyin 3D radyasyon paterni

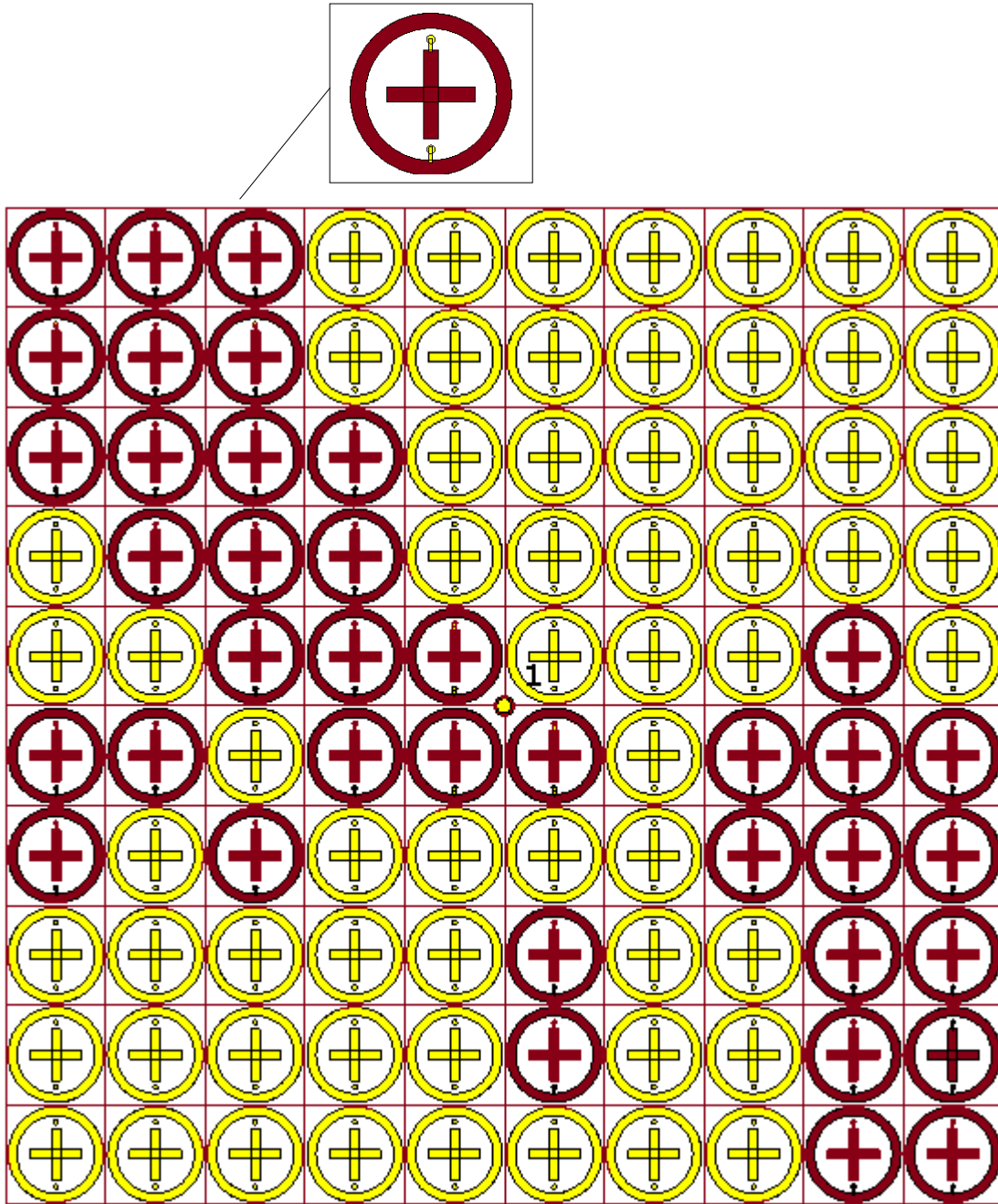


Şekil 4.10. Monopol antene eklenmiş metayüzeyin polar (2D) radyasyon paterni

Monopol antene E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı eklendiği zaman oluşan üç-boyutlu (3D) ve polar (2D) radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görülmektedir. Ana lob yönü $22,0^\circ$, ana lob ışıma büyüklüğü 4,46 dB ve ışıma açısı ise $24,3^\circ$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.9'da görüldüğü gibi iki tane ana lob oluşmuştur. Yönlülük değeri ise 4,409 dB olarak bulunmuştur.

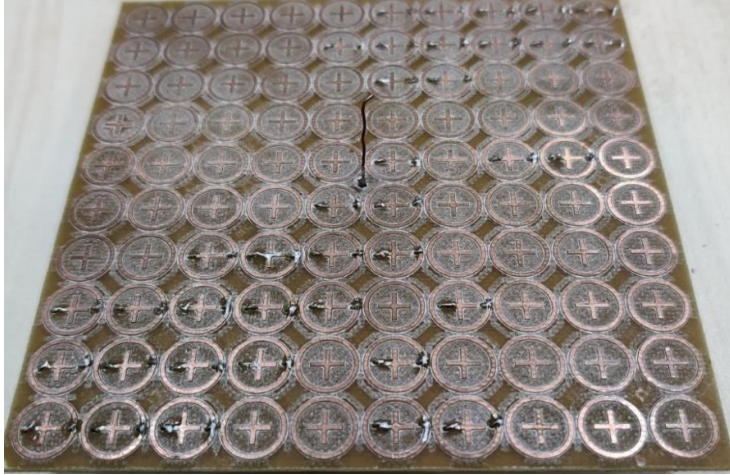
4.1.4. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı ikinci konfigürasyon

E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı ile yapılan ikinci konfigürasyonunda Şekil 4.11'de E ve F yamaları rastgele "on" ve "off" yapılmış ve anten parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. On (1) konumunda olan yamalar Şekil 4.11'de kırmızı renkte (koyu) görülmektedir.

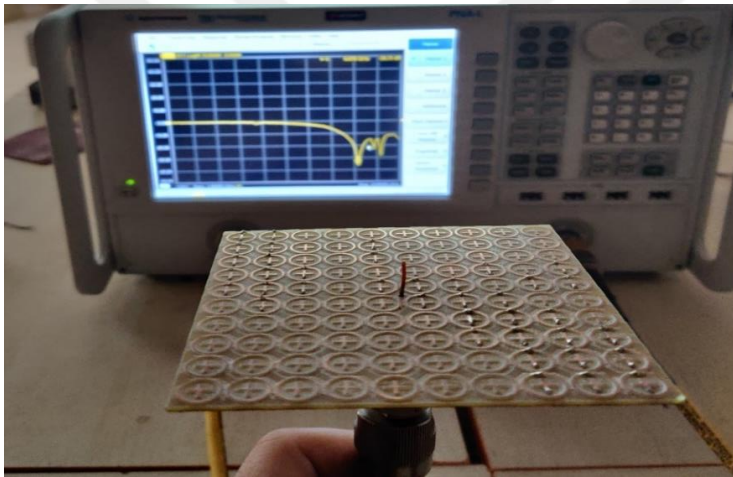


Şekil 4.11. Monopol antene uygulanan ikinci konfigürasyon görseli

Bu konfigürasyonun laboratuvar ortamında üretimi yapılmıştır. Bu üretim LPKF Protomat cihazı ile yapılmıştır. Rezonatörlerin metal plakaya via'lar ile bağlantılarının yapılması için birim hücreler via boyutunda delinip yerine metal tel yerleştirilmiştir. Bağlantısı olan birim hücrelerdeki rezonatörler metal tel ile lehim yapıp bağlantı sağlanmıştır. Daha sonra, yapının ortası delinerek monopul anten içinden geçirilmiş ve SMA konnektör aracılığıyla ölçüm sistemine entegre edilmiştir. Üretilmiş metalmalzemelerin görseli Resim 4.1'de, S_{11} parametresinin ölçümü için deney düzeneği ise Resim 4.2'de gösterilmiştir.

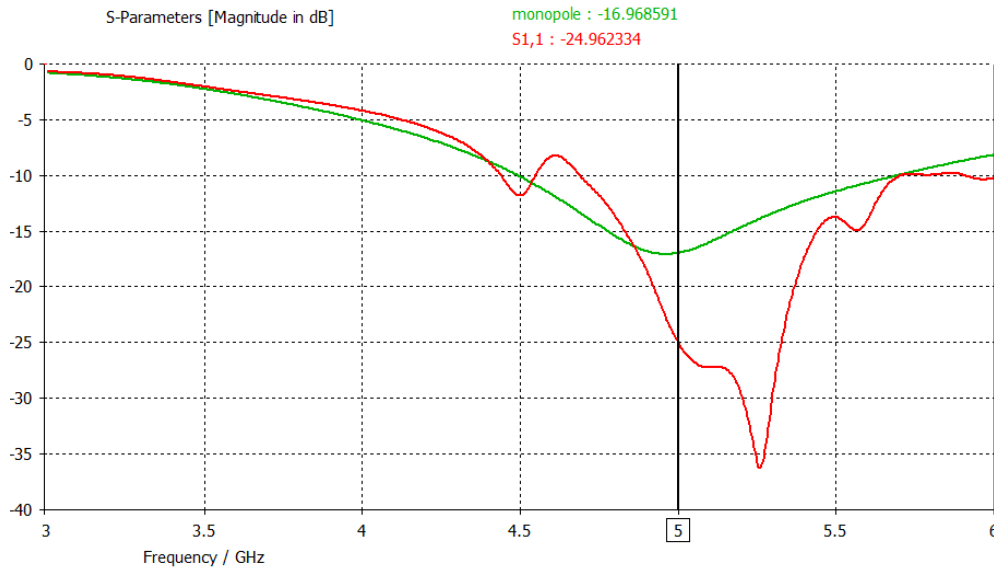


Resim 4.1. İkinci konfigürasyonun üretilmiş görseli

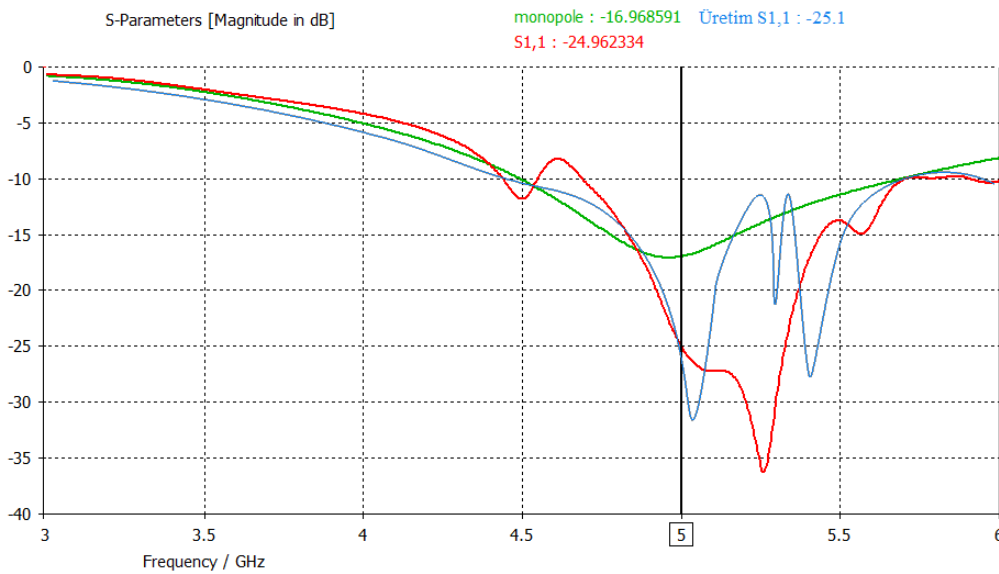


Resim 4.2. İkinci konfigürasyonun S_{11} parametresinin deneysel ölçümü

İkinci konfigürasyonun, Şekil 4.12’de verilen S_{11} sonuçları incelendiğinde 4,8 GHz ile 5,5 GHz frekans aralığında yansımaya katsayısının önemli oranda azaldığı görülmektedir. Monopol antenin tek başına yansımaya katsayısı 5 GHz’de -16,97 dB olduğu halde, metamazeme eklendiğinde -25 dB olarak elde edilmiştir ve yaklaşık olarak 8,03 dB’lik bir iyileşme sağlanmıştır. S_{11} sonuçları dikkatli incelendiğinde, rezonans frekansında yukarı yönde, yaklaşık olarak 300 MHz bir kayma olduğu görülecektir. Bu kayma dikkate alındığı zaman S_{11} parametresindeki iyileşmenin aslında -19 dB civarında olduğu görülecektir. Şekil 4.12’de görülen simülasyon sonuçlarına göre, 5,3 GHz’de antenin yansımaya katsayısı -36 dB’dir. Üretimi yapılan anten ve metayüzeyin S_{11} parametresinin deneysel ve simülasyon sonuçları kıyaslaması Şekil 4.13’de verilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları birbiri ile karşılaştırıldığında, uyum içerisinde oldukları görülmektedir. Sonuçlar arasındaki farklılıkların, üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



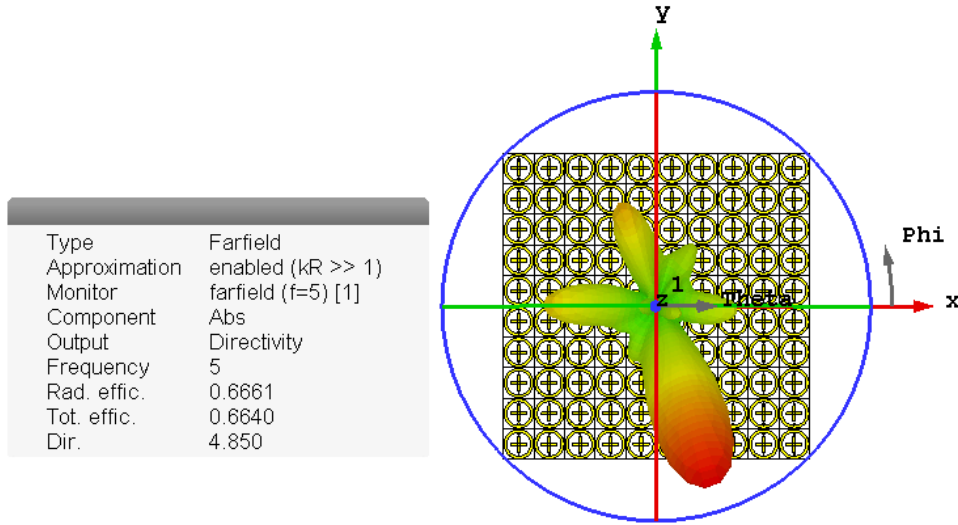
Şekil 4.12. İkinci konfigürasyonun S_{11} sonuçları



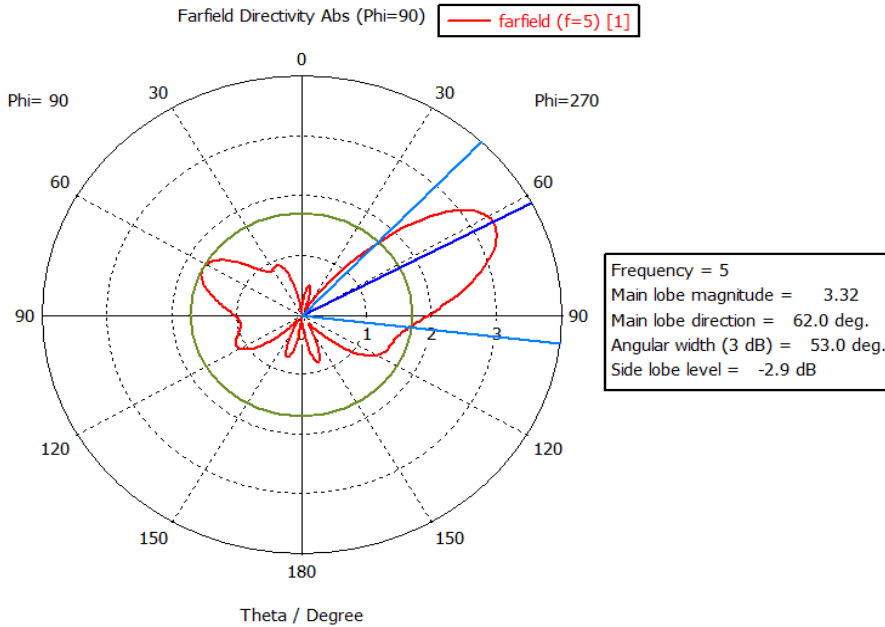
Şekil 4.13. İkinci konfigürasyonun deney ve simülasyon S_{11} sonuçlarının karşılaştırılması

Elde edilen 3-boyutlu ve 2-boyutlu radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir. Radyasyon paterni incelendiğinde, tek bir ana lob olduğu ve ana lob yönünün yaklaşık 62 derece olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, 3-boyutlu radyasyon paterni sonuçlarından görüldüğü gibi yönlülük 4,850 dB olarak elde edilmiştir ve metayüzeyin bu parametreyi artırdığı görülmektedir. Radyasyon paterninin yönlendiği bölgelerde via’lar ile yapılan kısa devre bağlantıları yoğun olarak görülmektedir. 2 boyutlu radyasyon paterni grafiğinde, 5 GHz frekansta ana lob ışınma büyüklüğü 3,32 dB, yönlülüğü 62° ve açılal

genişliği 53° olarak ölçülmüştür.



şekil 4.14. Birinci metayüzeyin ikinci konfigürasyonunun 3-boyutlu radyasyon paterni

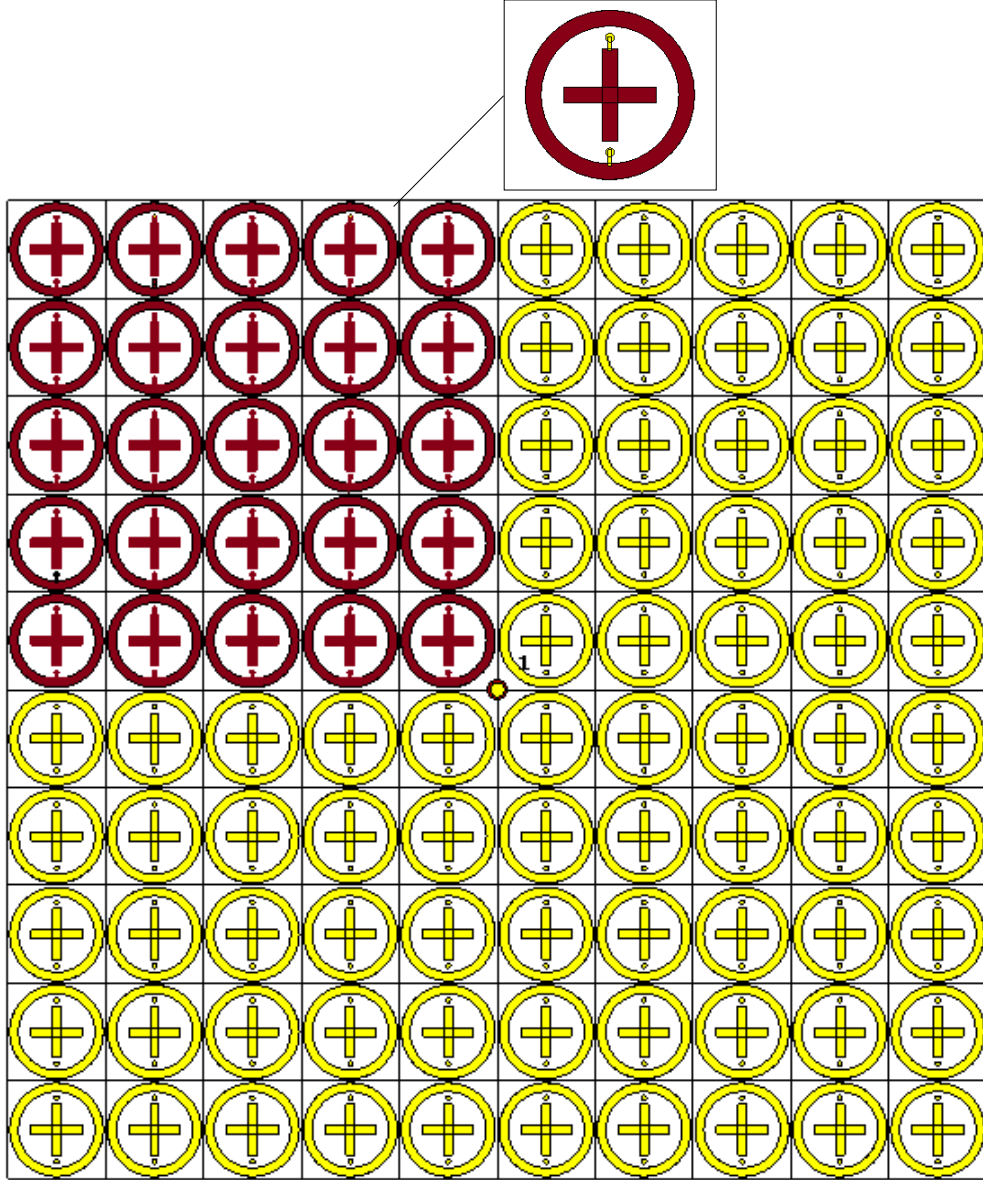


şekil 4.15. Birinci metayüzeyin ikinci konfigürasyonunun polar radyasyon paterni

4.1.5. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı üçüncü konfigürasyon

E ve F yamalarından oluşan metayüzey ile yapılan üçüncü konfigürasyonda ise metayüzeyin sol üst çeyreğindeki tüm birim hücrelerdeki her iki rezonatörün via bağlantısı “on” geriye kalan bütün birim hücreler “off” yapılmıştır. şekil 4.16’den de anlaşılacağı gibi, metayüzeyin tam ortası orijin kabul edilirse, ikinci bölgede bulunan birim hücreler,

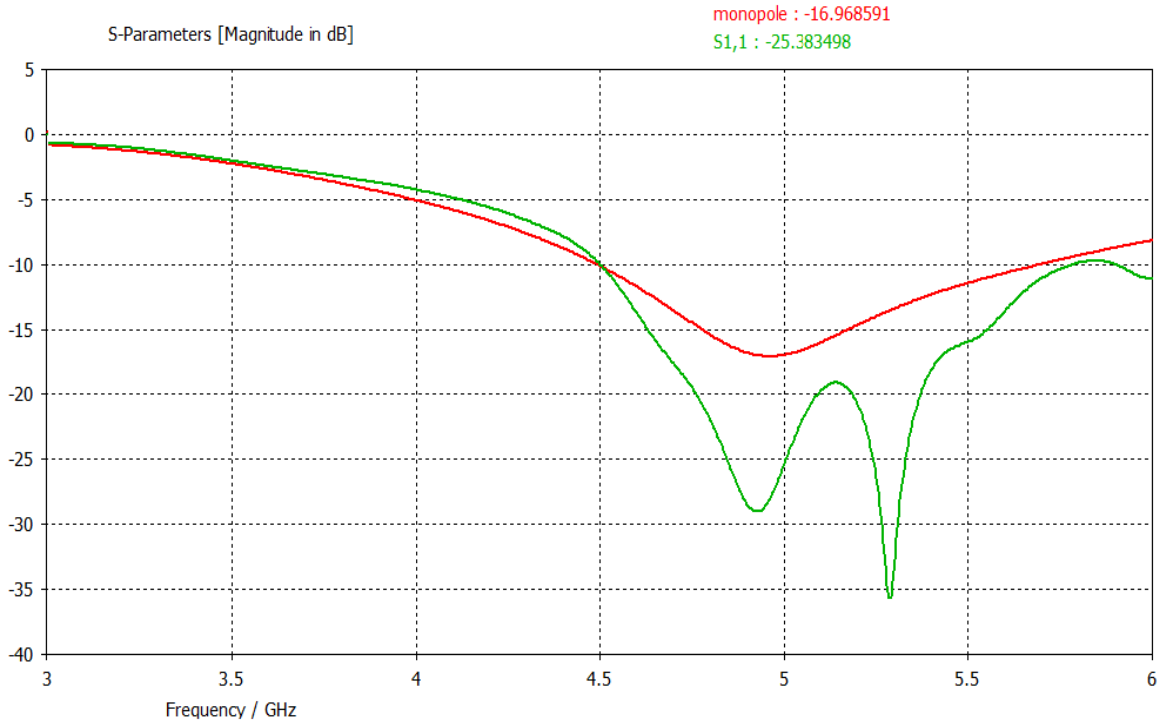
yani $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ hücreler “on” yapılmıştır ve anten parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Metayüzeyin 11 (on-on) konumuna getirilen birim hücreleri Şekil 4.16’da kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Monopol antene uygulanan üçüncü metayüzey konfigürasyonu

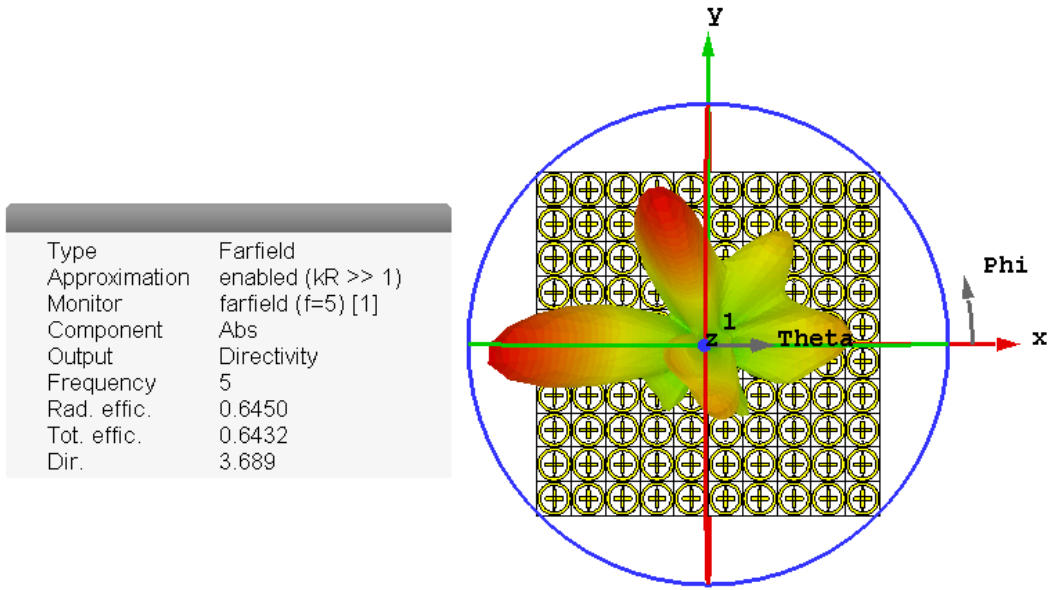
Üçüncü konfigürasyon için elde edilen yansımaya katsayısı (S_{11}) Şekil 4.17’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, metamalzeme bulunmayan monopol antene göre 4,5 GHz ile 5,5 GHz aralığında antenin kazancının ciddi bir şekilde iyileştiği söylenebilir. Rezonans frekansı olan 5 GHz frekansı baz alınacak olursa, yansımaya katsayısı, -16,97 dB’den -25,38 dB’ye düşmüş ve yaklaşık 8 dB’lik bir iyileşme gözlenmiştir. Metayüzeyin etkisi ile birisi 4,9 GHz ve diğeri 5,3 GHz’de olmak üzere iki ayrı rezonans oluşmuş ve bant genişliği yaklaşık 100

MHz artmıştır. Ayrıca, monopol antenin çalışma frekansında, metayüzeyin etkisi ile aşağı yönde 100 MHz'lik bir kayma oluşmuştur. Diğer taraftan, monopol antenin çalışma frekansında, yansımaya katsayısındaki iyileştirmesi yaklaşık olarak 12 dB'ye ulaşmaktadır. Diğer rezonans frekansı olan 5,3 GHz'de ise yansımaya katsayısı -35 dB'nin altına düşmüştür.

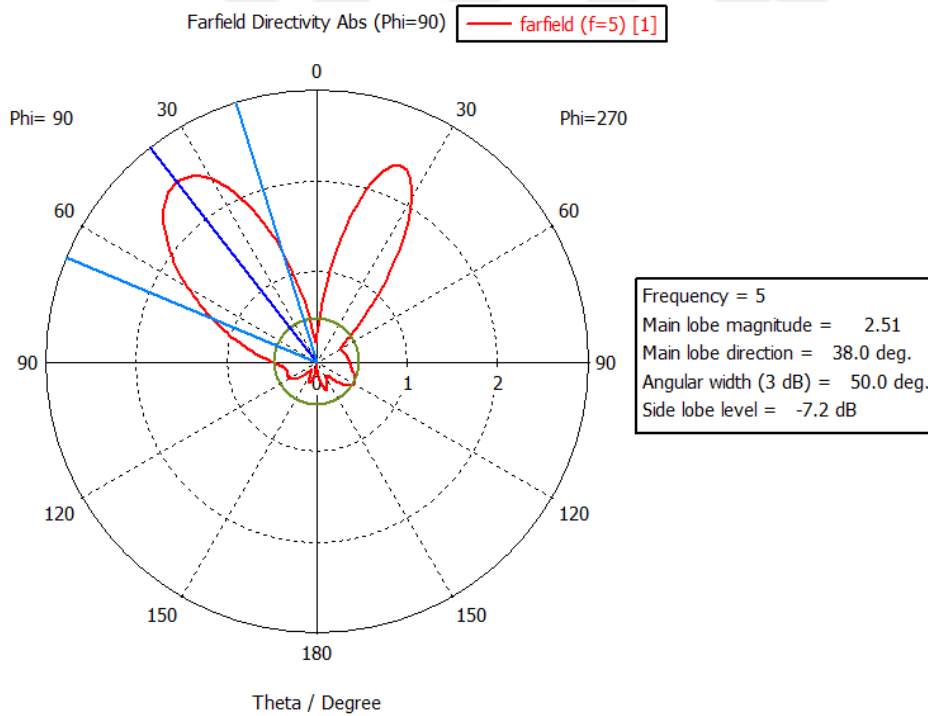


Şekil 4.17. Üçüncü konfigürasyon için S_{11} sonuçları

Önceki konfigürasyonlarda olduğu gibi, bu konfigürasyon için de 3D ve 2D radyasyon paterni sonuçları sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ikinci bir ana lobun daha oluştuğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 3,689 dB, ana lob genliği 2,51 dB, ana lob yönü 38° ve açılal genişliği 50° 'dir. Monopul anten tek başına iken yönlülüğü 2,306 dB olmasına rağmen, metayüzeyin sol üst çeyreğinde bulunan birim hücreler "11" yapıldığında yönlülüğü 3,689 dB olmuş ve yaklaşık 1,3 dB'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. Üçüncü konfigürasyon için 3-boyutlu radyasyon paterni

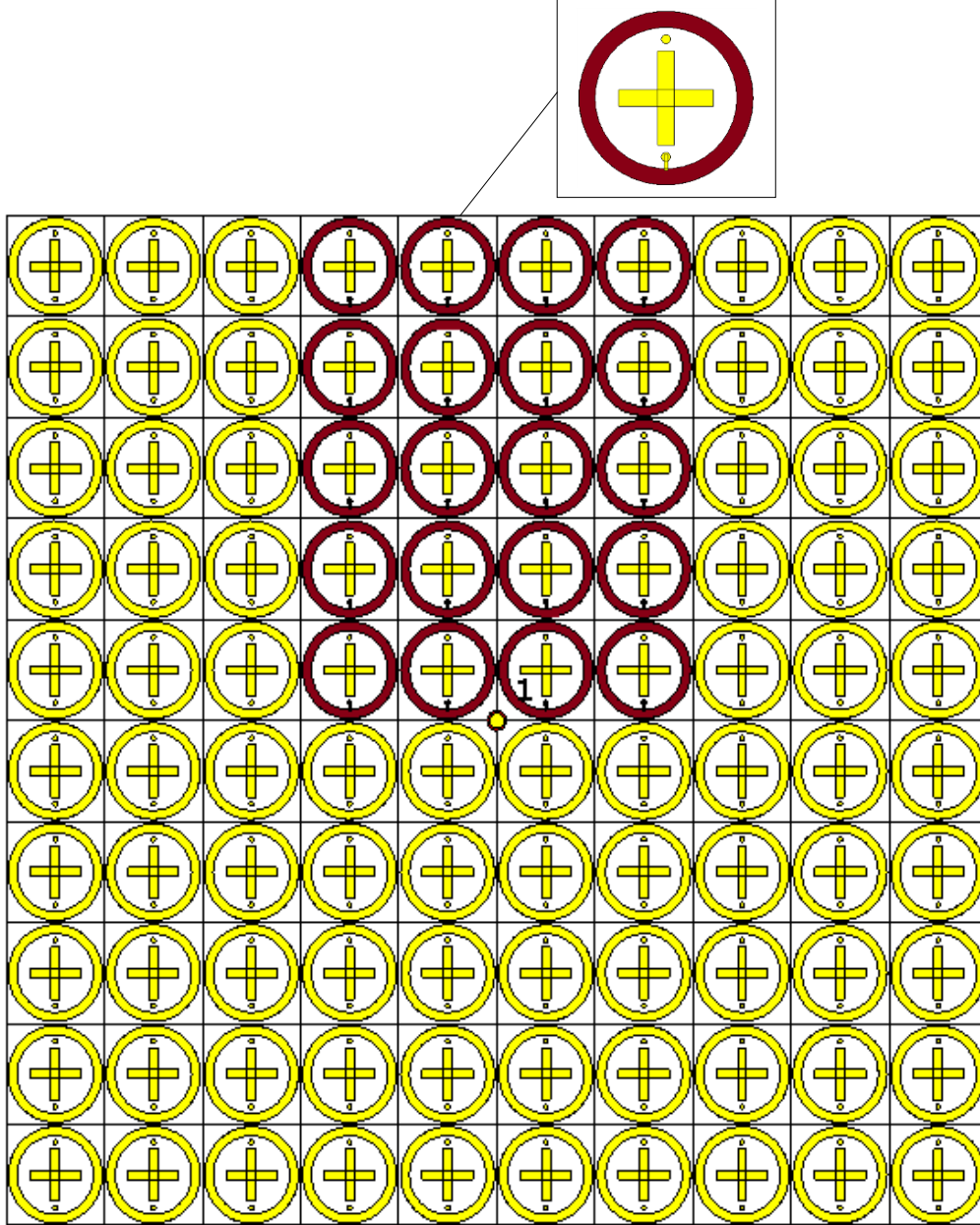


Şekil 4.19. Üçüncü konfigürasyon için polar radyasyon paterni

4.1.6. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı dördüncü konfigürasyon

İlk tasarımın dördüncü konfigürasyonunda, Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, metayüzeyin üst yarısının ortasına denk gelen hücrelerin sadece çember şeklindeki rezonatörleri “on” yapılmış, diğer tüm rezonatörler ise “off” konumunda bulunmaktadır. Burada amaç, çember

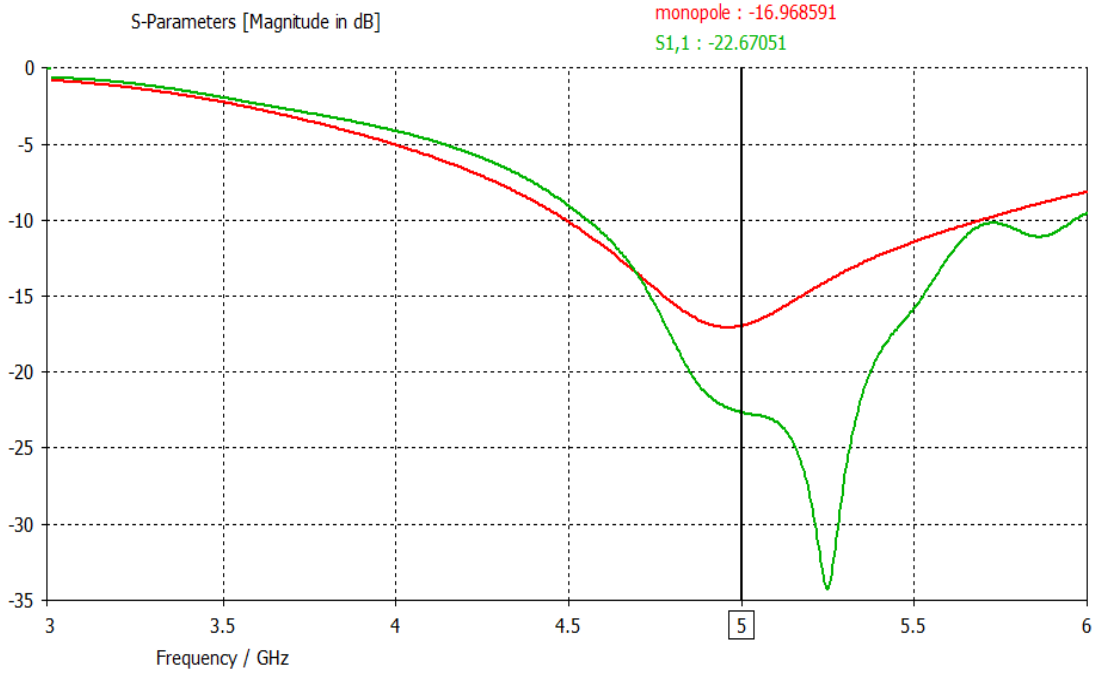
ve artı şeklindeki rezonatörlerin anten parametreleri üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı araştırılmasıdır. Şekil 4.20’de metayüzeydeki “on” konumundaki rezonatörler kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Monopol antene uygulanan dördüncü metayüzey konfigürasyonu

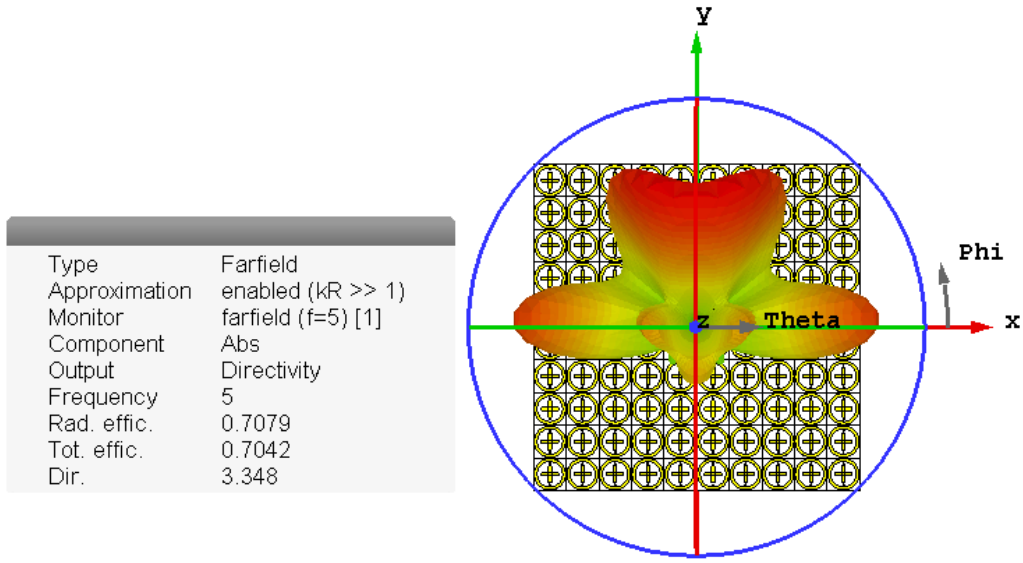
Dördüncü konfigürasyon için elde edilen yansıma katsayısı (S_{11}) Şekil 4.21’de görülmektedir. Önceki konfigürasyon sonuçlarına benzer şekilde, yansıma katsayısında 4,5 GHz ile 5,5 GHz aralığında bir iyileşme olduğu görülmektedir. Yansıma katsayısındaki kayma, önceki üç konfigürasyon sonuçlarına göre biraz daha fazladır ve yukarı yönde yaklaşık olarak 250 MHz’dir. 5 GHz çalışma frekansında yansıma katsayısı -16,97 dB iken,

dördüncü metayüzey konfigürasyonu ile -22,67 dB'ye kadar düşmüş ve 5,7 dB'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Rezonans frekansındaki 250 MHz'lik kayma dikkate alındığında yansıma katsayısında 17,03 dB'lik iyileşme olmuştur. 5,25 GHz'de yansıma katsayısı -34 dB olarak görülmektedir.

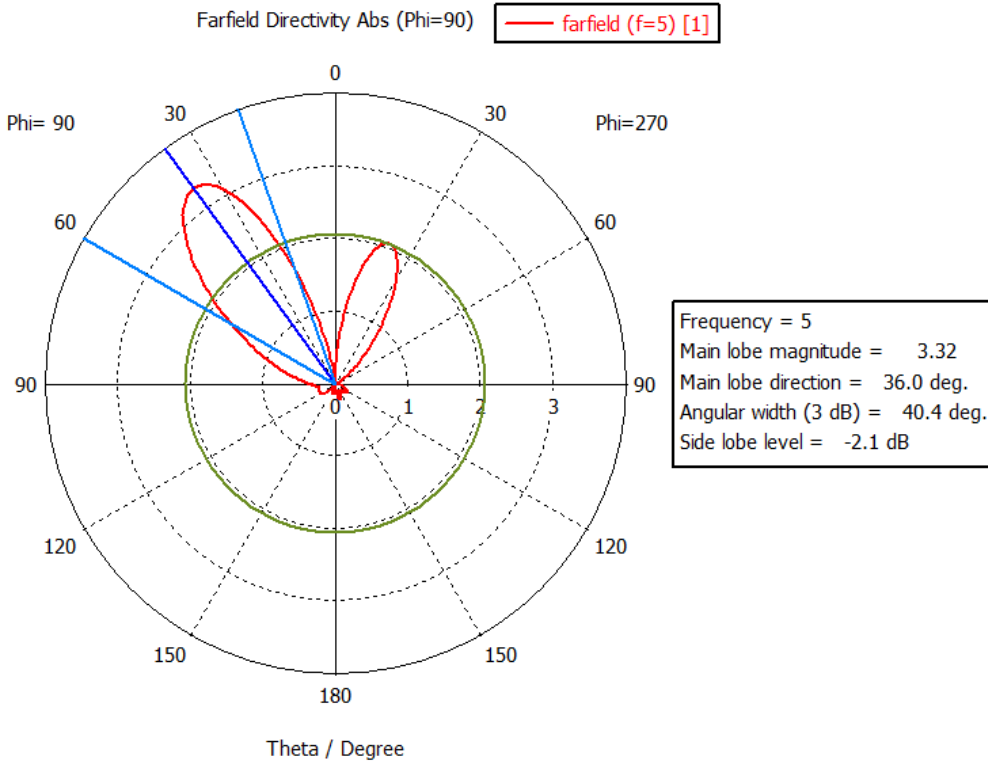


Şekil 4.21. Dördüncü konfigürasyonun S_{11} simülasyon sonucu

Dördüncü konfigürasyon için elde edilen 3D ve 2D radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, büyük bir ana lob ve yanında yan lob seviyesi -2.1 dB olan iki tane oldukça büyük yan lobun olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 3,348 dB, ana lob genliği 3,32 dB, ana lob yönü 36° ve açısall genişliği $40,4^\circ$ dir. Ana lob genliği monopol antene göre 1,08 puan iyileşmiştir.

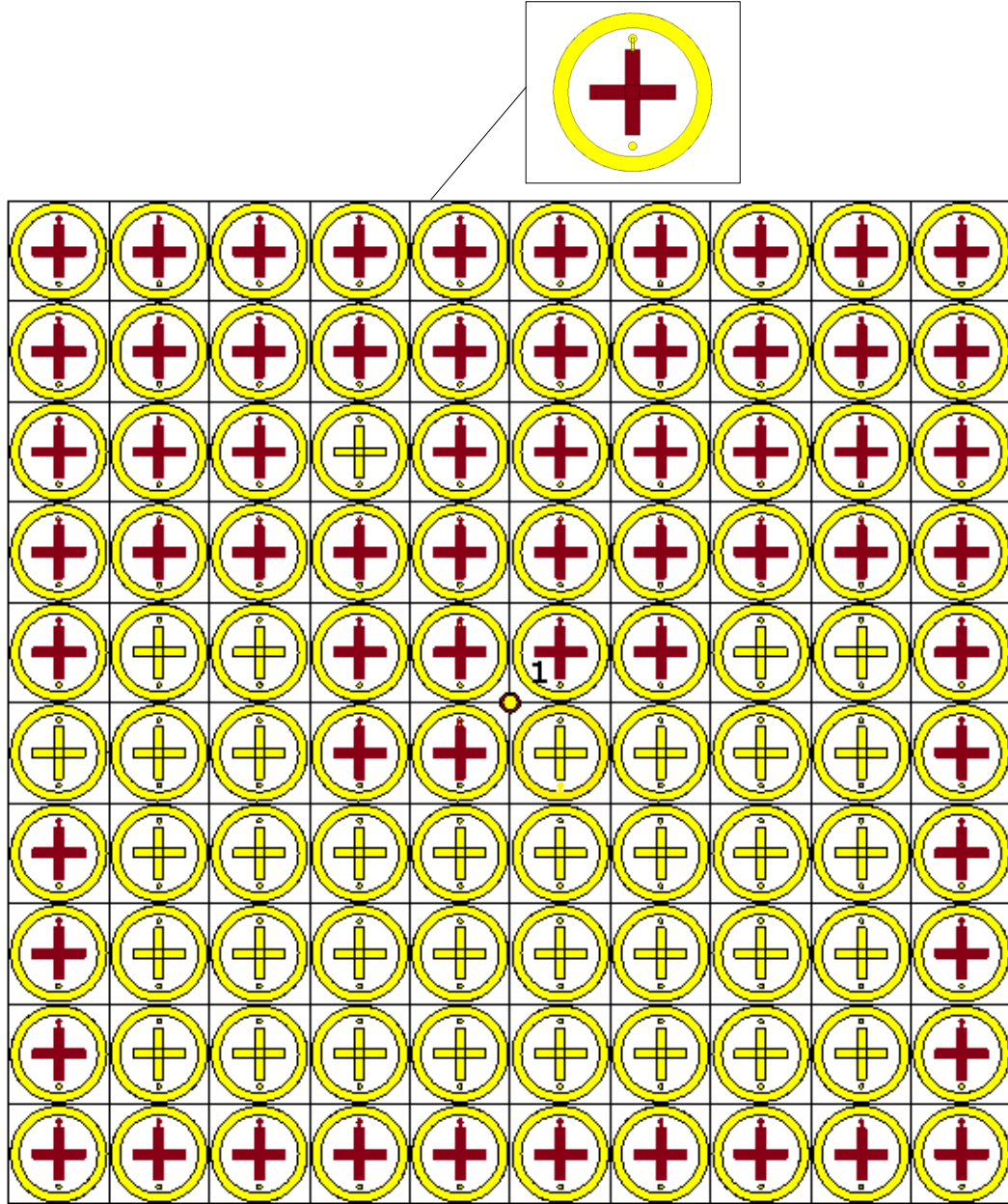


Şekil 4.22. Dördüncü konfigurasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni



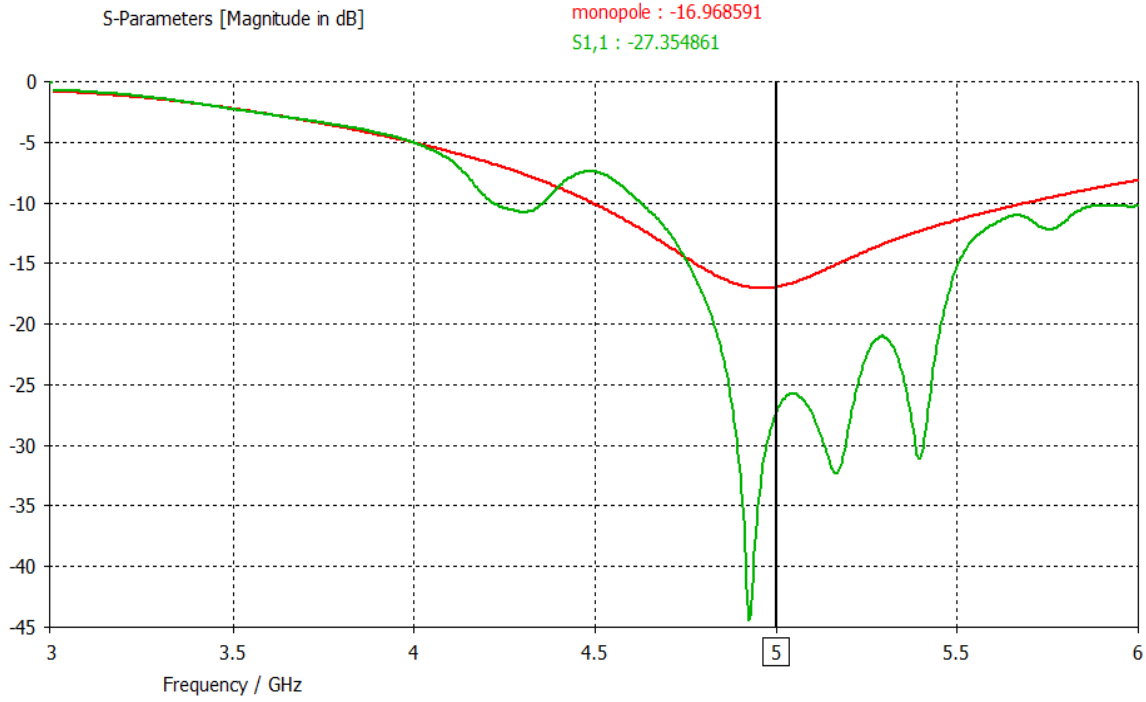
Şekil 4.23. Dördüncü konfigurasyonun polar radyasyon paterni

4.1.7. E ve F yamalarından oluşan metayüzey yapısı beşinci konfigurasyon



Şekil 4.24. Monopol antene uygulanan beşinci konfigurasyon

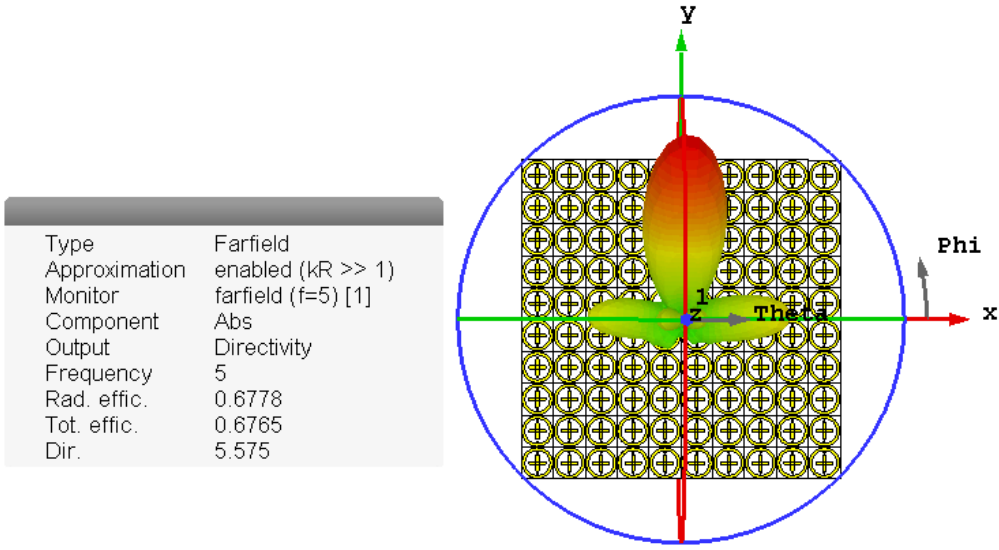
İlk tasarımın beşinci konfigurasyonunda, Şekil 4.24’de görüldüğü gibi, metayüzeyin özellikle üst yarısındaki rastgele hücrelerin sadece artı şeklindeki rezonatörleri “on” yapılmış, diğer tüm rezonatörler ise “off” konumunda bulunmaktadır. Burada amaç, çember ve artı şeklindeki rezonatörlerin anten parametreleri üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı araştırılmasıdır. Şekil 4.24’de birim hücrelerde “on” yapılmış rezonatörler kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Beşinci konfigürasyonun S_{11} grafiği

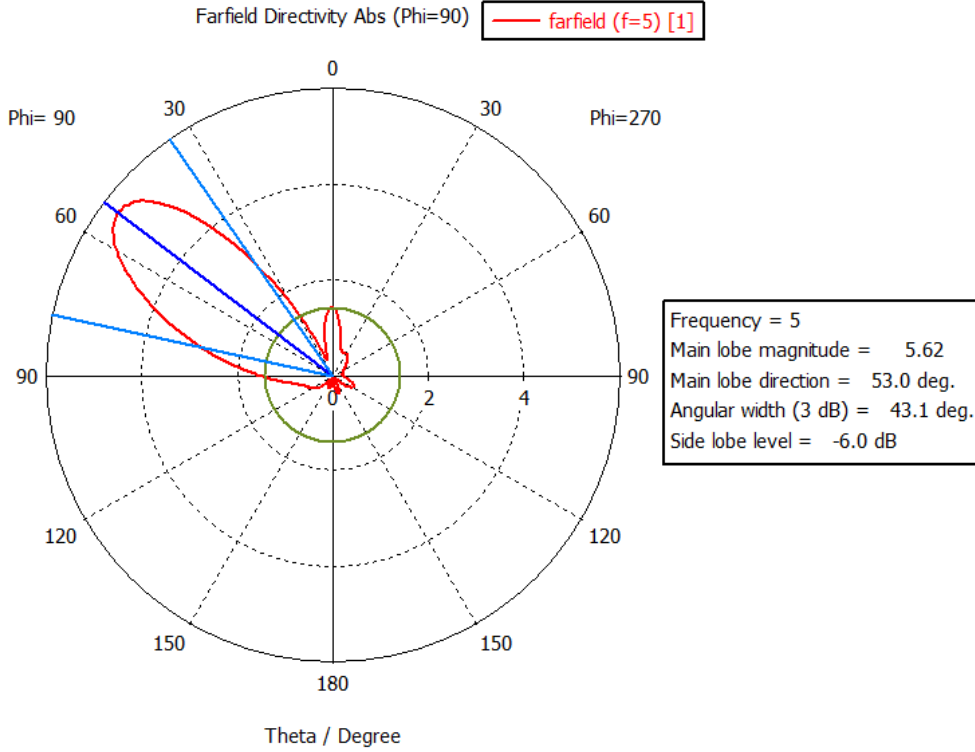
Beşinci konfigürasyon için elde edilen yansımaya katsayısı (S_{11}) Şekil 4.25’de verilmiştir. Önceki konfigürasyon sonuçlarına benzer şekilde, yansımaya katsayısında 4,5 GHz ile 5,5 GHz aralığında bir iyileşme olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu frekans aralığında, yansımaya katsayısı üç tane minimum değere sahiptir. Yansımaya katsayısındaki kayma aşağı yönde ve yaklaşık olarak 100 MHz’dir. Bir önceki çalışma ile karşılaştırıldığında “on” yapılan çember rezonatörlerin rezonans frekansında yukarı yönde, artı şeklindeki rezonatörlerin ise aşağı yönde kaymaya sebep olduğu anlaşılmaktadır. 5 GHz çalışma frekansında yansımaya katsayısı -16,97 dB iken, beşinci metayüzey konfigürasyonu ile -27,35 dB’ye kadar düşmüş ve 10,38 dB’lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Rezonans frekansındaki 100 MHz’lik kayma dikkate alındığında yansımaya katsayısında yaklaşık olarak 27 dB’lik iyileşme olmuştur. 4,9 GHz’de yansımaya katsayısı -44 dB olarak elde edilmiştir.

Beşinci konfigürasyon için elde edilen 3D ve 2D radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, tek bir ana lob olduğu ve yan lob seviyelerinin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 5,575 dB, ana lob genliği 5,62 dB, ana lob yönü 53° ve açılal genişliği $43,1^\circ$ dir.



Şekil 4.26. Beşinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni

Polar radyasyon grafiğinden yola çıkarak, ana lob genliğinin 5,62 dB olduğunu ve bu değerın metayüzey olmayan monopul anten için elde edilen genlik değerinin 2 katından daha fazla bir değere ulaştığı söylenebilir.



Şekil 4.27. Beşinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni

Birinci tasarım için çalışılan 5 farklı konfigürasyon incelendiğinde, “on” yapılan çember rezonatörlerin rezonans frekansında yukarı yönde, artı şeklindeki rezonatörlerin ise aşağı yönde kaymaya sebep olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, “on” konumundaki rezonatör sayısı arttıkça, anten yönlülüğü ve ana lob genişliğinin arttığı anlaşılmaktadır.

4.2. Bölünmüş Çember ve Uçları Oval Çubuk Metayüzey ve Uygulamaları

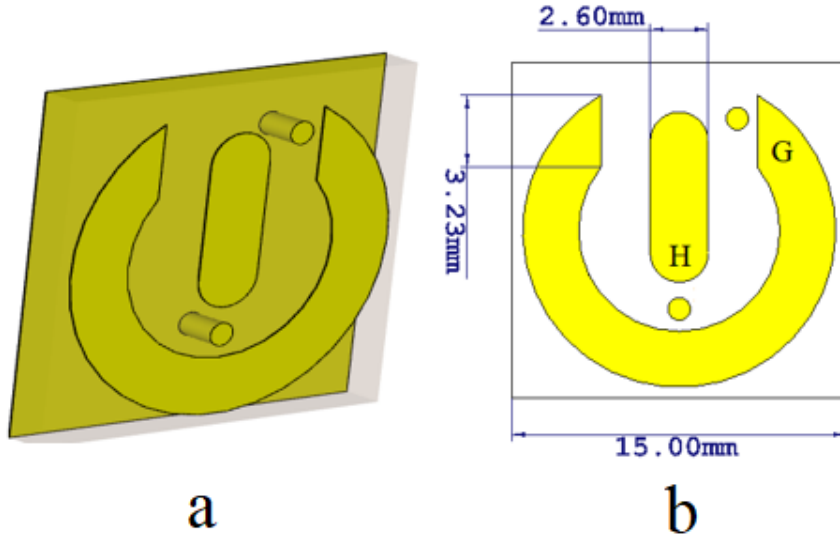
4.2.1. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk metayüzey için monopol anten tasarımı ve sonuçları

Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk metayüzey ile beraber kullanılacak olan monopol antenin boyu tasarlanan birinci metayüzey yapısında kullanılan monopol anten ile aynı olup 13,3 mm ve yarıçapı 0,5 mm boyutlarındadır. Toprak düzlemi ise 90 mm x 90 mm boyutlarında kare metal bir yüzeyden oluşmaktadır. Monopol anten 5 GHz çalışma frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Monopol antenin ucuna 1 adet 50 ohm SMA konnektör bağlanmış, konnektörün diğer ucu ise topraklanmış düzleme bağlanmıştır.

Monopol antenin simülasyon sonucundan elde edilen yansıma katsayısı değeri -16,97 dB'dir. Monopol antenin 3-boyutlu ve polar farfield sonuçlarından elde edilen sonuçlar ise; antenin yönlülük değeri 2,29 dB, ana lob yönü 57,0°, ana lob ışınma büyüklüğü 2,24 dB ve açısal genişliği ise 53,1° olarak elde edilmiştir.

4.2.2. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk rezonatör içeren birim hücre ve metayüzey tasarımı

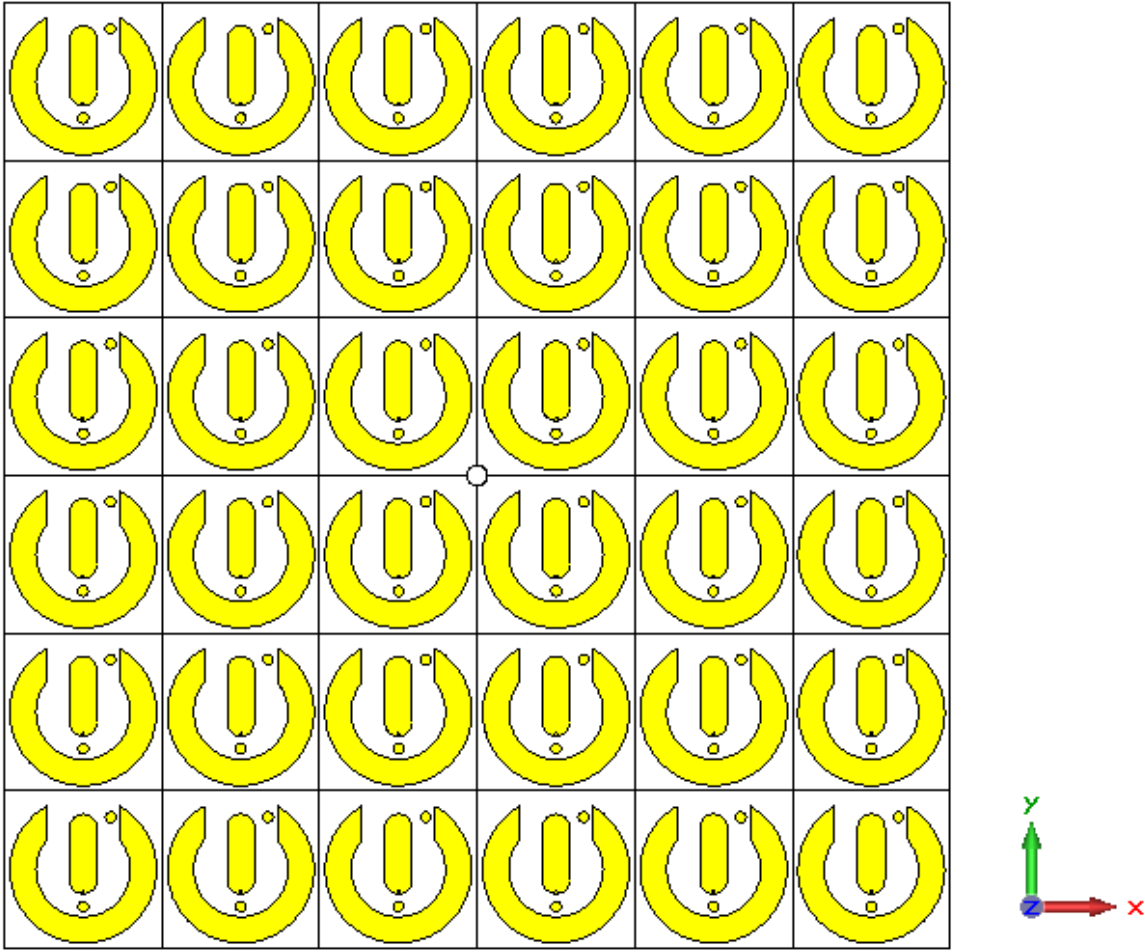
Birim hücreler 3 katmandan oluşmaktadır. En alttaki katmanda birim hücrenin toprak yüzeyi bulunmaktadır. Toprak yüzeyi 15 mm x 15 mm boyutlarında ve 0,035 mm kalınlığında bakırdan oluşmaktadır. Orta katman, FR-4 olarak adlandırılan, 1,6 mm kalınlığında ($\epsilon=4,3$, $\mu=1$) bir dielektrik malzemedir. Üst katmanda ise bakır malzemedен oluşan bölünmüş çember ve uçları oval çubuk rezonatörlerden oluşan yamalar bulunmaktadır.



Şekil 4.28. Bölünmüş çember (G) ve uçları oval çubuk (H) ile oluşan birim hücrenin (a) perspektif görüntüsü (b) ölçüleri

Birim hücrenin perspektif görünüşü Şekil 4.28 (a)'da ölçüleri ise Şekil 4.28 (b)'de verilmiştir. Bölünmüş çemberin eni 3,2 mm ve kalınlığı ise 0,035 mm olarak ayarlanmıştır. Çubuğun eni ise 2,6 mm, uzunluğu uçtan uca 7,6 mm ve kalınlığı yine 0,035 mm olarak tasarlanmıştır. Bölünmüş çembere (G), uçları oval çubuğa ise (H) harfleri atanmıştır. Birim hücrelerde, birinci metayüzey çalışmasında olduğu gibi arkadaki metal plaka ile bağlantı sağlanabilmesi için metal plakaya temas ettirilen iki adet via bulunmaktadır. Via bağlantılarının boyu 1,635 mm ve yarıçapı 0,5 mm'dir.

Tez çalışmasının bu bölümünde, her birim hücrenin üst yüzeyindeki bölünmüş çember ve uçları oval çubuk şeklindeki iki yamanın arka tarafta bulunan metal yüzeye via'lar aracılığı ile teması ayrı ayrı kontrol edilerek anten parametrelerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Burada birinci çalışmada olduğu gibi iki bitlik bir kodlama kullanılmıştır; uçları oval çubuk şeklindeki rezonatörün arkadaki metal plakaya via aracılığı ile bağlantı noktası birinci biti, bölünmüş çember şeklindeki rezonatörün bağlantı noktası ise ikinci biti ifade etmektedir. Bu noktaların arkadaki metal plakaya bağlanması 1 (on), bağlanmaması ise 0 (off) olarak ifade edilmiştir.

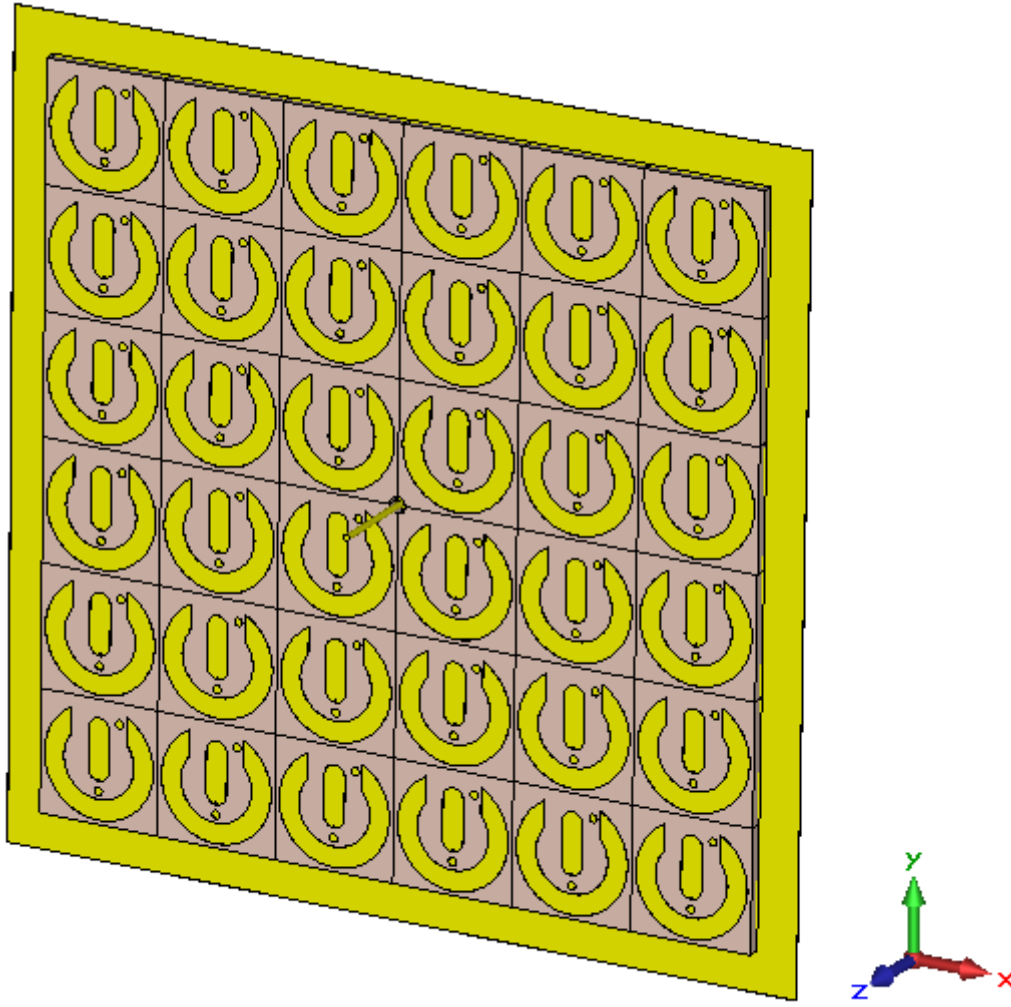


Şekil 4.29. Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk ile oluşan metayüzey yapısı

Metayüzey, Şekil 4.29'da görüldüğü gibi periyodik olarak dizilmiş 6 x 6 birim hücreden, toplamda 36 birim hücreden oluşmaktadır.

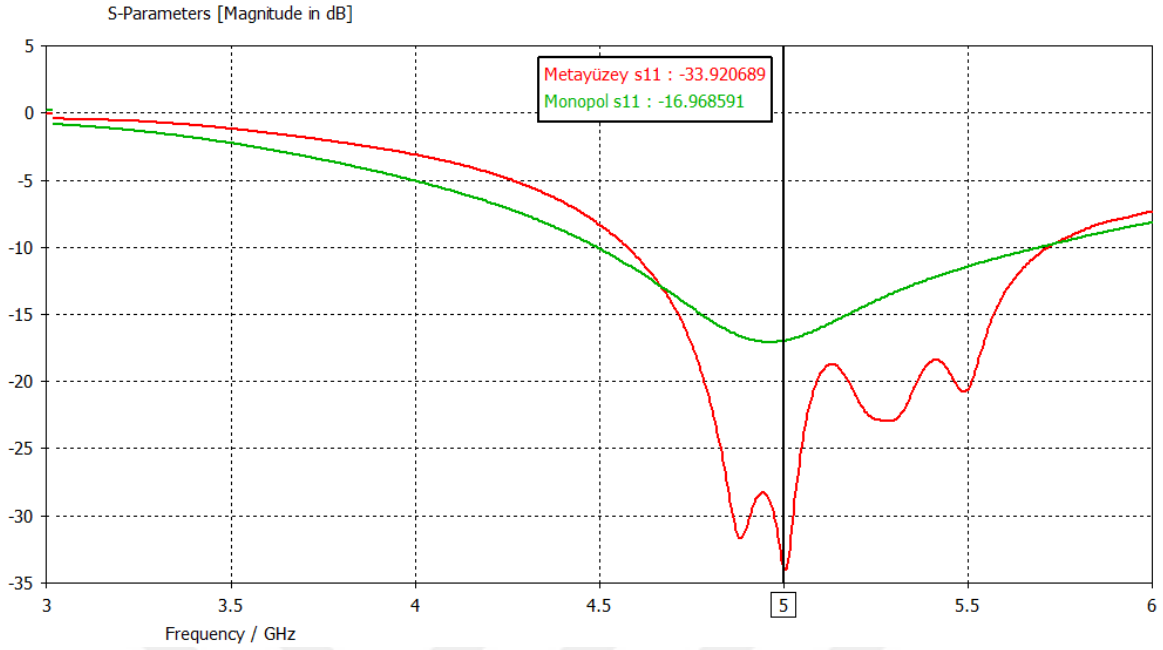
4.2.3. Monopol antene eklenmiş bölünmüş çember ve uçları oval çubuk metayüzey simülasyon sonuçları

Bölünmüş çember ve uçları oval çubuk rezonatörlerinden oluşan metayüzey yapısı için ilk çalışma olarak monopol antene metayüzey yapısı eklenip tüm birim hücrelerdeki metalik rezonatörlerin via'lar ile olan bağlantısı "00" yapıldığında metayüzeyin monopol anten parametreleri üzerindeki etkisi gözlenmiştir.



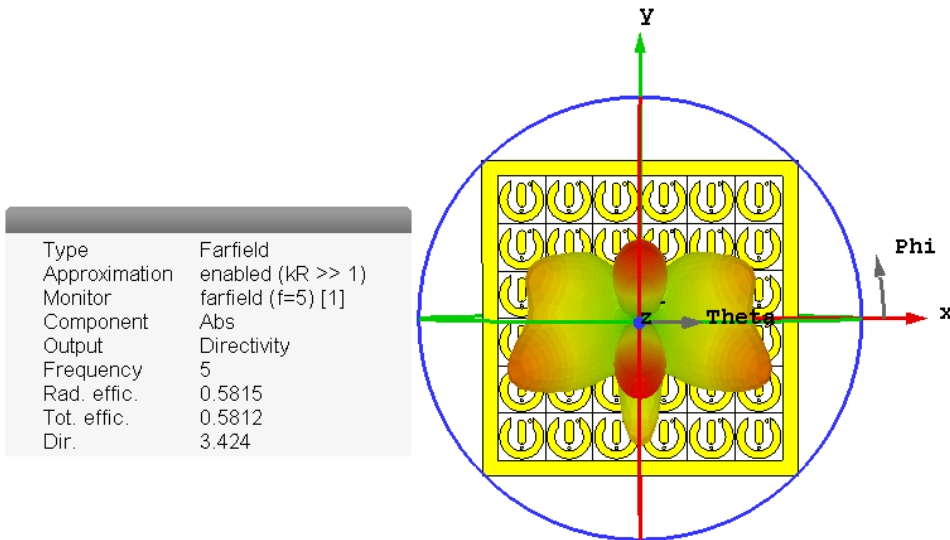
Şekil 4.30. Monopol antene eklenmiş ikinci metayüzey tasarımı

Şekil 4.30’da bölünmüş çember ve uçları oval çubuktan oluşan metayüzeyin her birim hücrenin “00” (off-off) durumdaki görünümü verilmiştir. Buna göre, simülasyon sonucundan elde edilen S_{11} parametresi Şekil 4.31’de görülmektedir. Monopol antenin çalışma frekansı olan 5 GHz’deki yansımaya katsayısı, metamalzeme olmadan -16,97 dB iken metamalzeme eklendiğinde -33,92 dB olmuştur. Şekilden de anlaşılacağı gibi, metayüzey eklendiği zaman 5 GHz’de yansımaya katsayısında -16,95 dB’lik bir iyileşme gözlenmiştir. Aynı zamanda antenin çalışma bandında metayüzeyin, monopol antenin kazancını ciddi bir şekilde iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

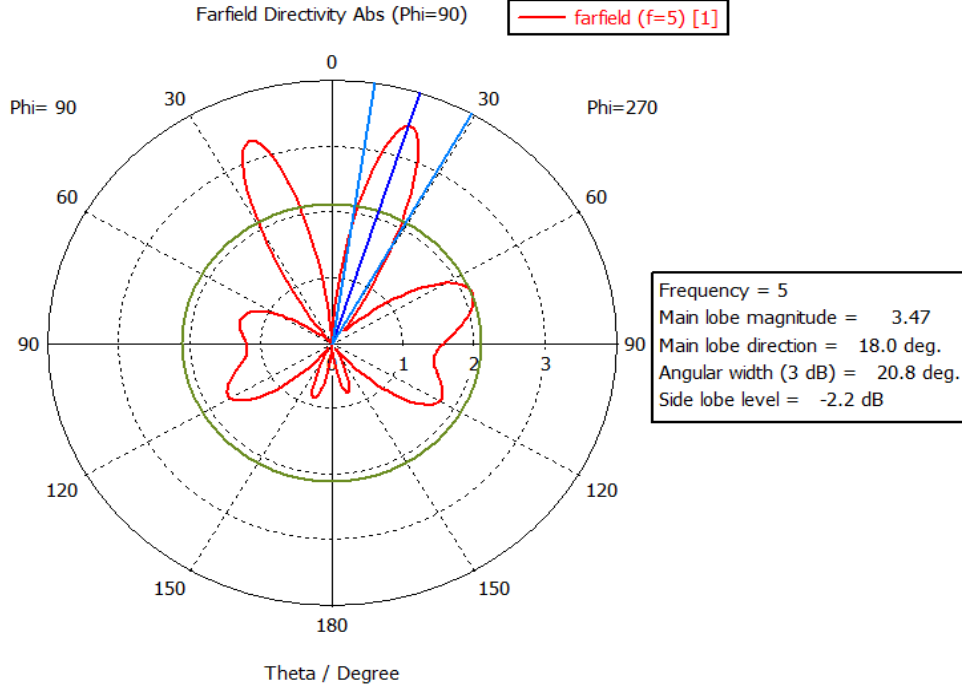


Şekil 4.31. Monopol antene ikinci metayüzey tasarımı eklendiğinde S_{11} sonuçları

Monopol antene ikinci metayüzey tasarımı eklendiği zaman oluşan üç-boyutlu (3D) ve polar (2D) radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de görülmektedir. Sonuçlar incelendiği zaman üç-boyutlu radyasyon paterninde 2 tane ana lob olduğu ve yönlülük değerinin 3,42 dB olduğu anlaşılmaktadır. Buradan metayüzeyin eklenmesi ile yönlülük değerinin 2,29 dB'den, 3,42 dB'ye çıkarak 1,13 puan iyileştirildiği sonucu çıkarılabilir. Polar radyasyon paterninden ise; ana lob yönü $18,0^\circ$, ana lob ışınma büyüklüğü 3,47 dB ve açısız genişliği $20,8^\circ$ sonuçları elde edilmiştir. Ana lob ışınma büyüklüğü monopol antende 2,24 dB iken metayüzey eklendiği zaman 3,47 dB olarak artmış ve 1,19 puan iyileştirilmiştir.



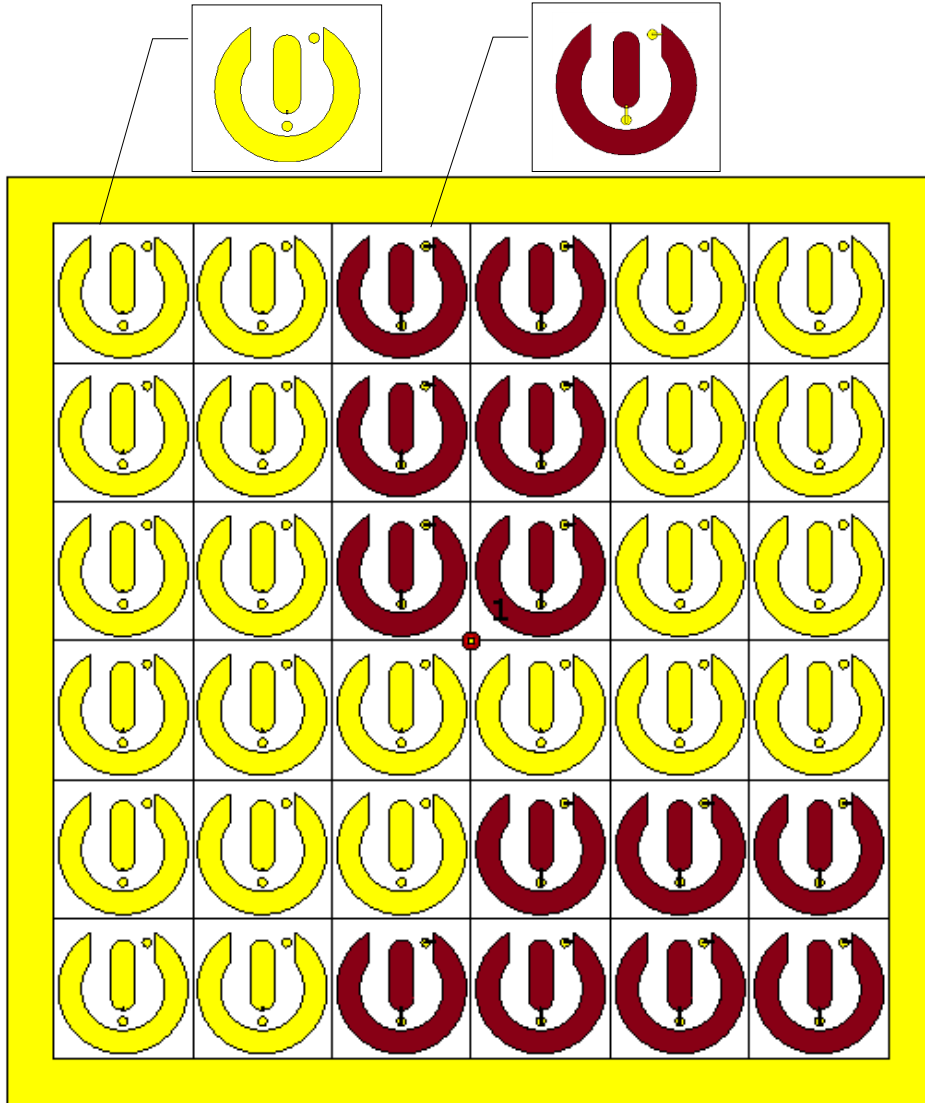
Şekil 4.32. Monopol antene ikinci metayüzey yapısı eklendiğindeki 3-boyutlu radyasyon paterni



Şekil 4.33. Monopol antene ikinci metayüzey yapısı eklendiğindeki polar radyasyon paterni

4.2.4. İkinci metayüzey yapısı ile yapılan birinci konfigürasyon

İkinci olarak tasarlanan metayüzey yapısı ile yapılan birinci konfigürasyonun Şekil 4.34’de G ve H yamaları rastgele “on” ve “off” yapılmıştır. Rastgele seçilen birim hücrelerin her iki metalik rezonatörü on (1) konumuna getirilip, radyasyon paterni ve anten parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. On (1) konumunda olan rezonatörler Şekil 4.34’de kırmızı renkte görülmektedir.

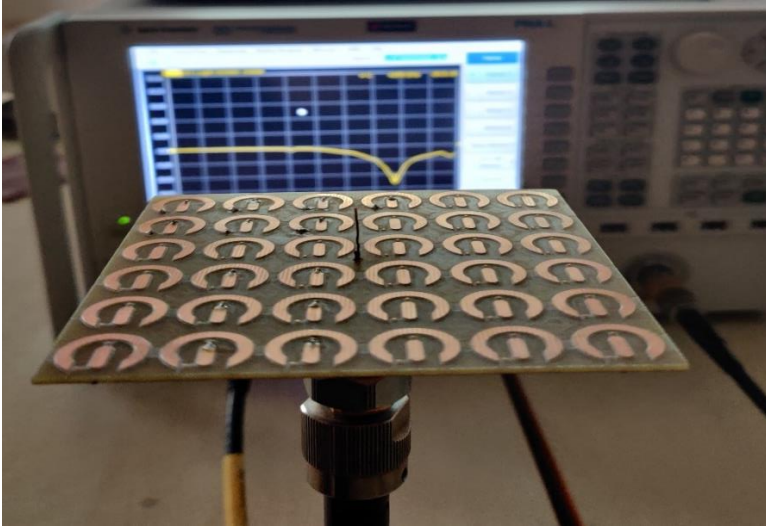


Şekil 4.34. Tasarlanan ikinci metayüzeyin birinci konfigürasyonu

Birinci konfigürasyonun laboratuvar ortamında üretimi LPKF Protomat cihazı ile yapılmıştır. Birinci çalışmada olduğu gibi yine bu konfigürasyonun da üretilmiş halinin S_{11} parametresinin ölçümü deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş metmalzemenin görseli Resim 4.3'de, S_{11} parametresinin ölçümü için deney düzeneği ise Resim 4.4'de gösterilmiştir.

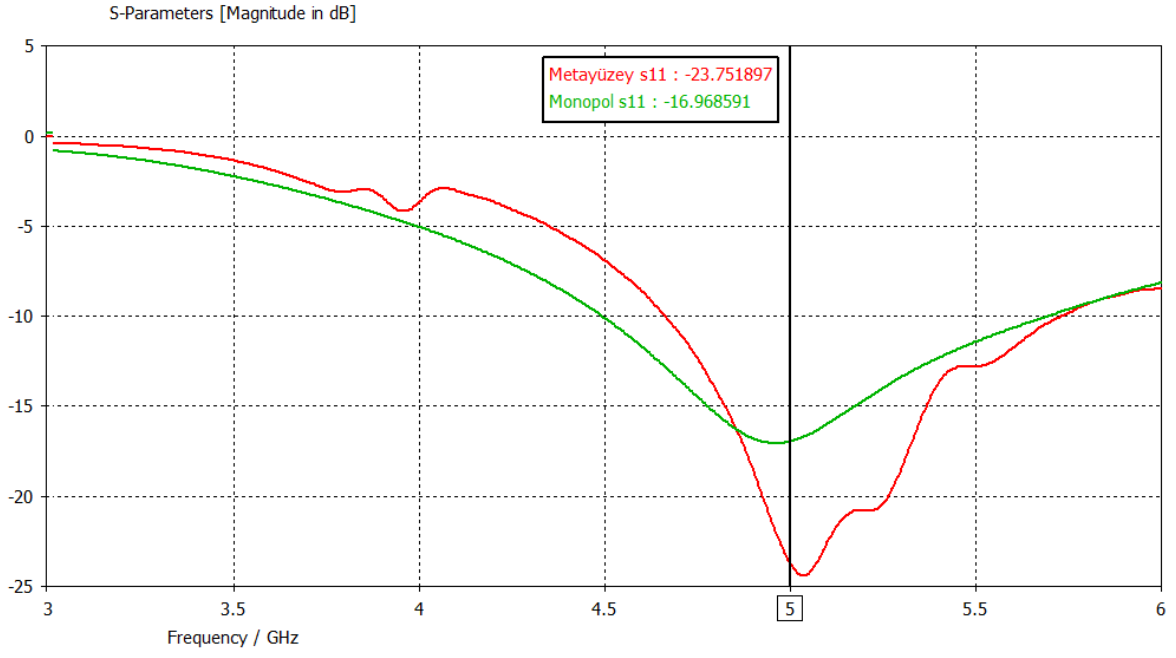


Resim 4.3. İkinci metayüzey yapısının birinci konfigürasyonunun üretilmiş görseli

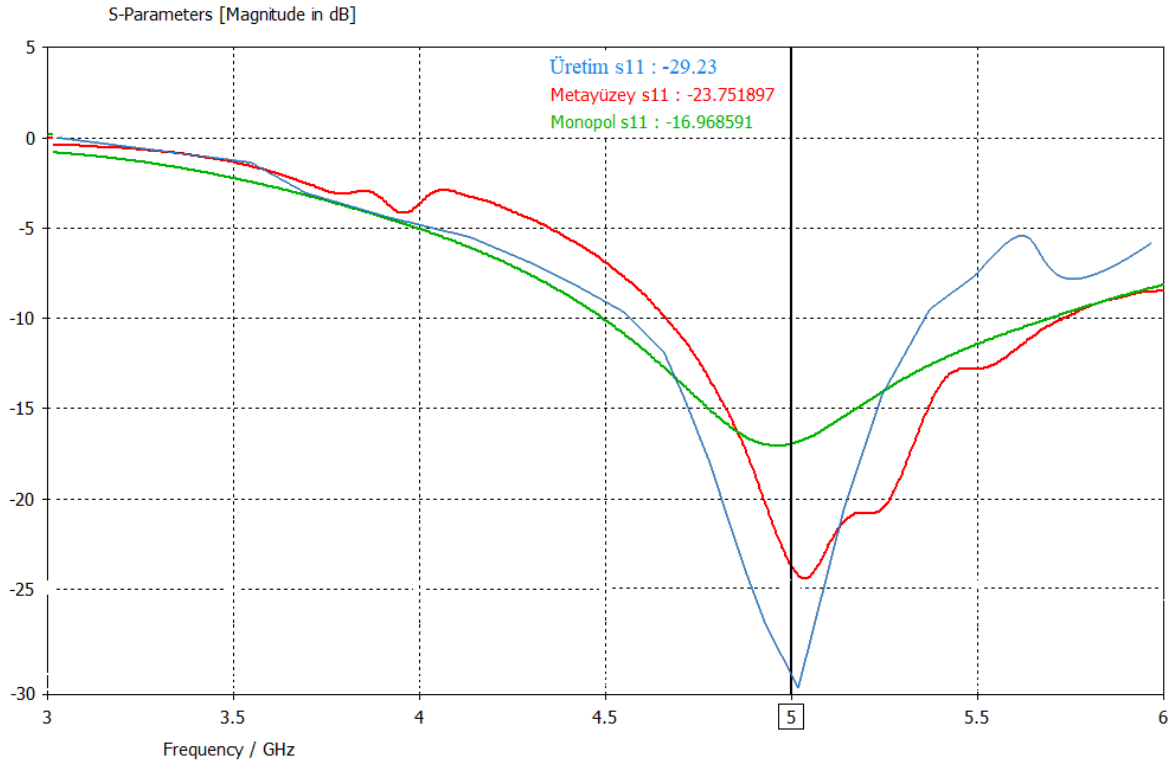


Resim 4.4. İkinci metayüzey yapısının birinci konfigürasyonunun S_{11} parametresinin deneysel ölçümü

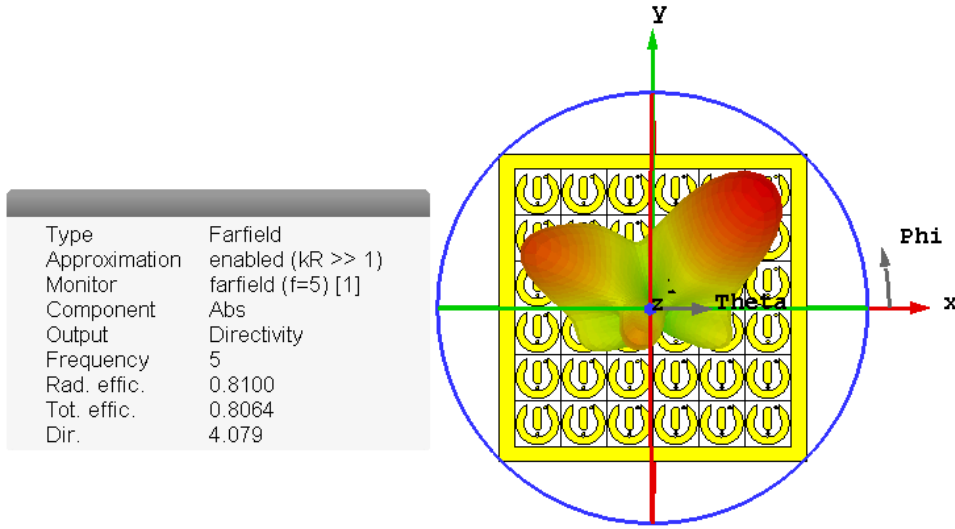
Tasarlanan ikinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun Şekil 4.35’de verilen S_{11} parametre sonuçları incelendiğinde tek başına monopul antenin yansımaya katsayısı 5 GHz frekansında -16,97 dB olduğu halde, metamalzeme eklendiğinde -23,35 dB olarak bulunmuş ve yaklaşık olarak 6,38 dB’lik bir iyileşme gerçekleşmiştir. Üretimi yapılan anten ve metayüzeyin S_{11} parametresinin deneysel ve simülasyon sonuçları kıyaslaması Şekil 4.36’da verilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları 5 GHz’de birbiri ile karşılaştırıldığında, sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ölçülen yansımaya katsayısı değerinin simülasyon sonucundan -5,77 dB daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuçlardaki farklılık, üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.



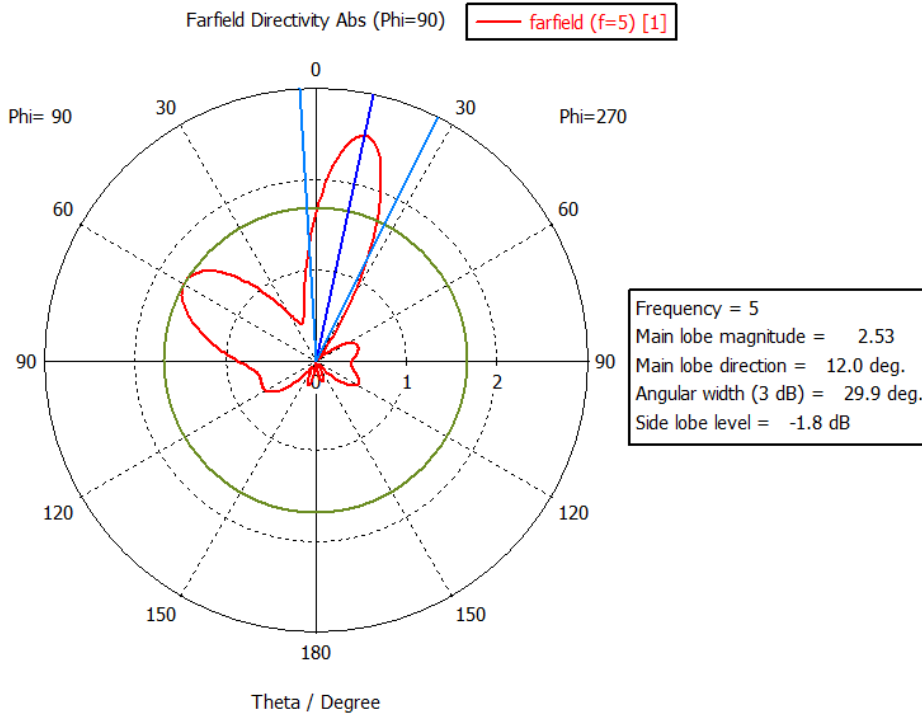
Şekil 4.35. İkinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun S_{11} grafiği



Şekil 4.36. İkinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun karşılaştırmalı S_{11} grafiği



Şekil 4.37. İkinci metayüzey birinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni

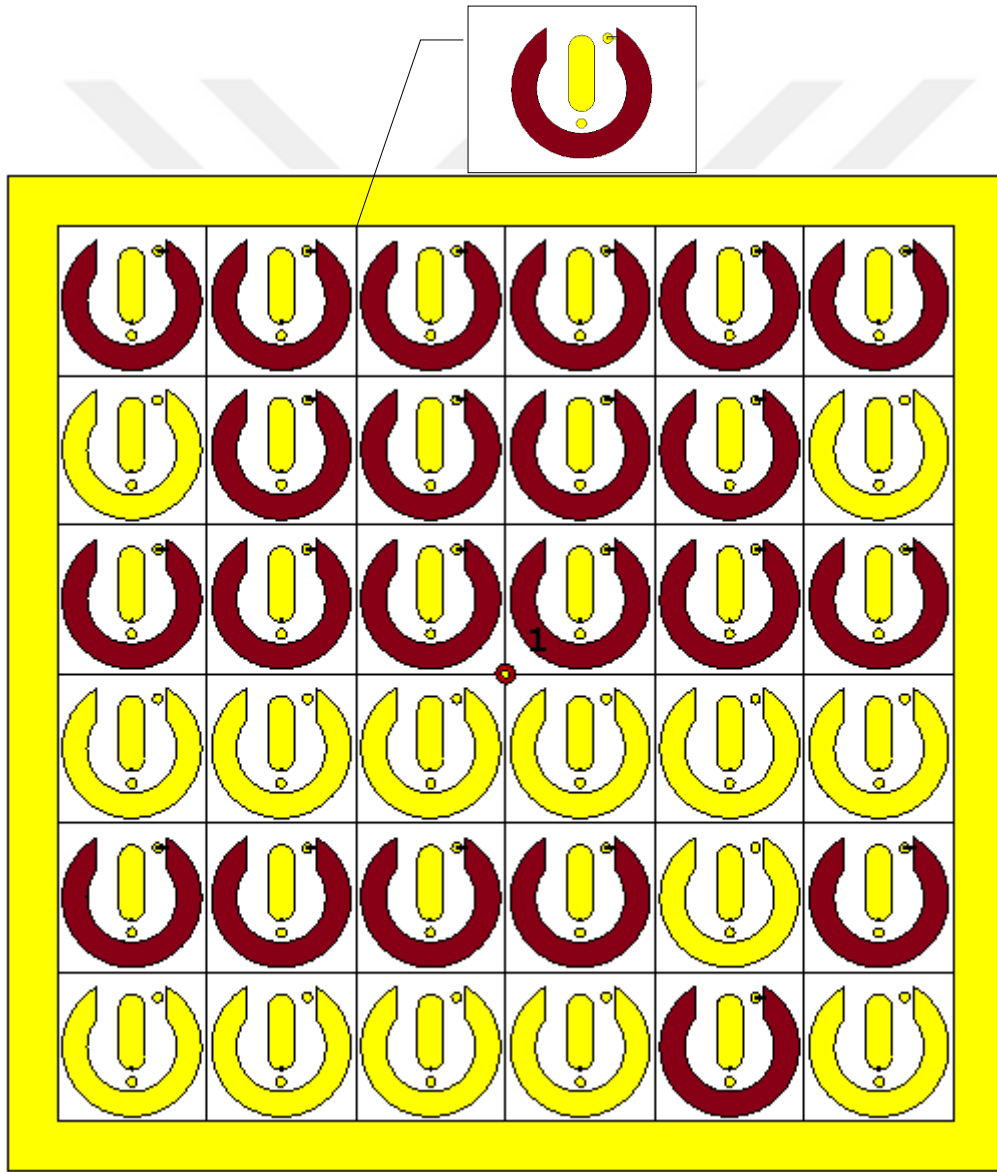


Şekil 4.38. İkinci metayüzey birinci konfigürasyonunun polar radyasyon paterni

İkinci metayüzeyin birinci konfigürasyonunun 3D ve 2D radyasyon paterni sonuçları sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman, yan lob seviyesi oldukça büyük olan bir yan lobun oluştuğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 4,079 dB, ana lob genliği 2,53 dB, ana lob yönü 12° ve açılal genişliği $29,9^\circ$ dir.

4.2.5. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan ikinci konfigürasyon

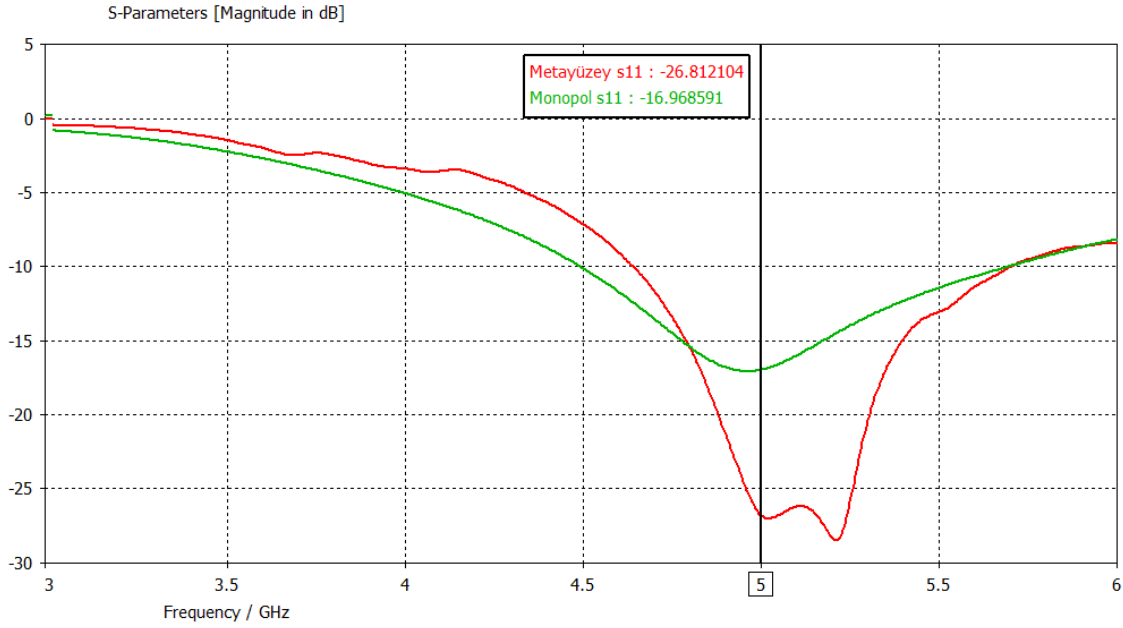
İkinci metayüzey tasarımının ikinci konfigürasyonunda, Şekil 4.39’da görüldüğü gibi, metayüzeyin özellikle üst yarısındaki rastgele birim hücrelerin sadece bölünmüş çember şeklindeki rezonatörleri “on” (1) yapılmış, diğer tüm rezonatörler ise “off” (0) konumunda bulunmaktadır. Burada amaç, bölünmüş çember ve uçları açık çubuk şeklindeki rezonatörlerin anten parametreleri üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı araştırılmasıdır. Şekil 4.39’da birim hücrelerde “on” yapılmış rezonatörler kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.39. Tasarlanan ikinci metayüzey yapısının ikinci konfigürasyonu

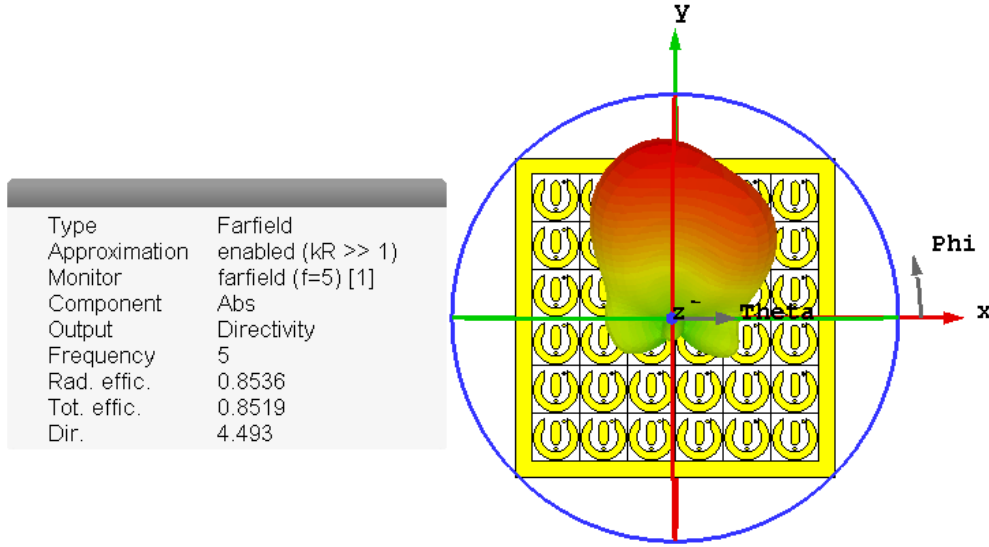
İkinci konfigürasyon için elde edilen yansımaya katsayısı (S_{11}) sonucu Şekil 4.40’da

verilmiştir. Yansıma katsayısında 4,65 GHz ile 5,7 GHz çalışma frekans aralığında ciddi bir iyileşme olduğu söylenebilir. 5 GHz rezonans frekansında monopol antenin yansıma katsayısı -16,97 dB iken, ikinci konfigürasyon eklendiği zaman -26,81 dB'ye kadar düşmüş ve 9,84 dB'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. İkinci minimum değer ise 5,25 GHz frekansta -28,7 dB değeridir.



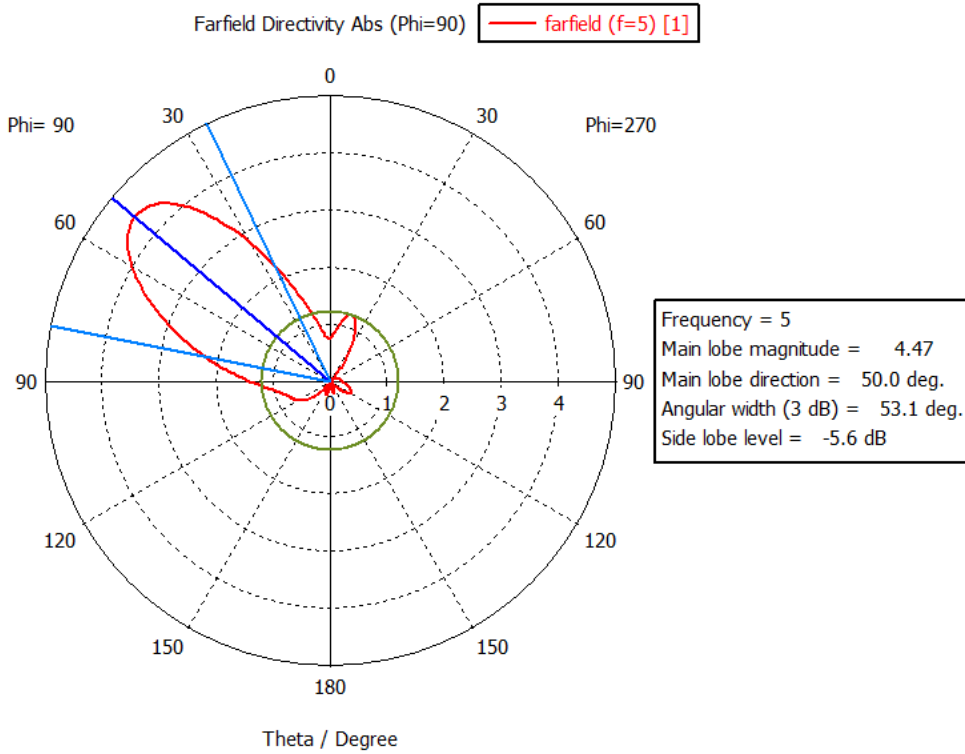
Şekil 4.40. İkinci konfigürasyonun yansıma katsayısı (S_{11}) sonucu

İkinci konfigürasyon için simülasyon sonuçlarından elde edilen 3D ve 2D radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de görülmektedir. 3D radyasyon paterni sonucu incelendiğinde, açıl genişliği $53,1^\circ$ olan tek bir ana lob olduğu ve yan lob seviyelerinin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Yönlülük değeri ise 4,493 dB olmuş ve bu değere dayanarak, 2,29 olan monopol antenin yönlülük değerinin yaklaşık olarak iki katına çıktığı söylenebilir.



Şekil 4.41. İkinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni

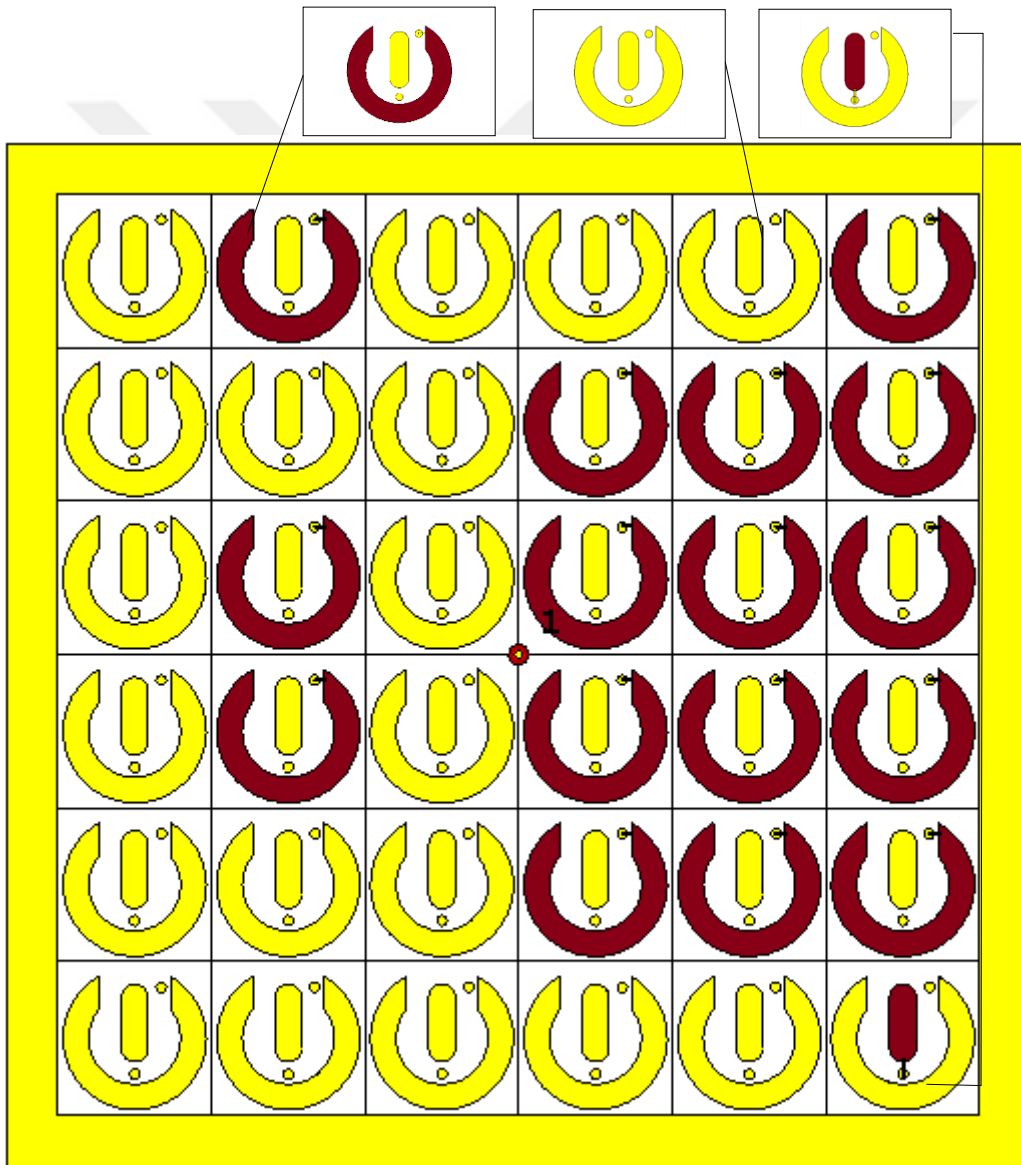
Polar radyasyon paterni sonuçlarına göre; ana lob genliği 4,47 dB, ana lob yönü 50° ve açısal genişliği $53,1^\circ$ 'dir. Polar radyasyon grafiğinden yola çıkarak, ana lob genliğinin 4,47 dB olduğunu ve bu değerın metayüzey olmayan monopol anten için elde edilen genlik değerinin yaklaşık olarak 2 katı değere ulaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.42. İkinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni

4.2.6. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan üçüncü konfigürasyon

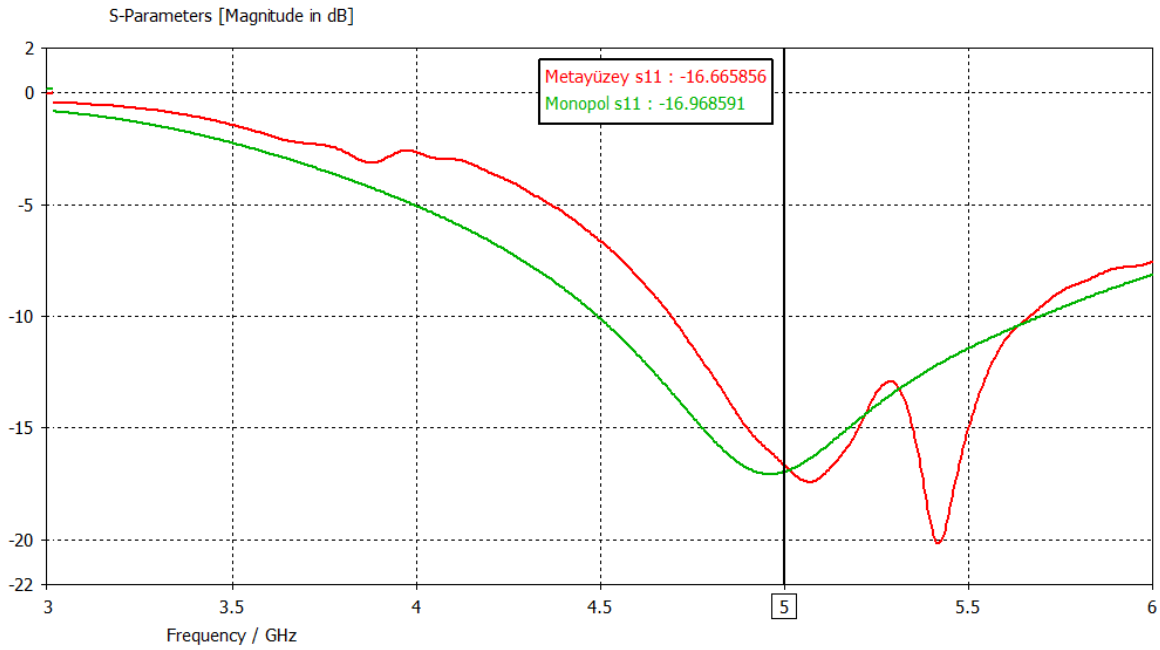
Tasarlanan ikinci metayüzey yapısı ile yapılan üçüncü konfigürasyonda, Şekil 4.43’de görüldüğü gibi, metayüzeyin rastgele seçilen birim hücrelerden sadece birinin uçları açık olan çubuk rezonatörü geriye kalanların ise bölünmüş çember şeklindeki rezonatörleri “on” (1) konumunda, diğer tüm rezonatörler ise “off” (0) konumunda bulunmaktadır. Şekil 4.43’de birim hücrelerde “on” yapılmış rezonatörler kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.43. İkinci metayüzey tasarımının üçüncü konfigürasyon görseli

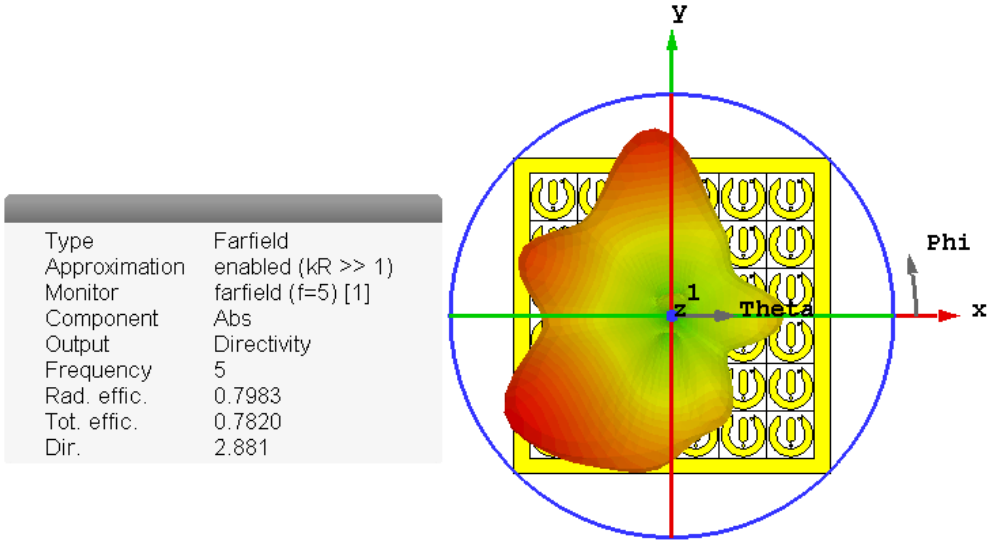
İkinci metayüzey yapısının üçüncü konfigürasyonu için elde edilen S_{11} parametresi Şekil 4.44’de verilmiştir. Burada ikinci konfigürasyonun sonuçlarına benzer şekilde, iki adet

rezonans olduğu görülmektedir. 5 GHz çalışma frekansında monopul anten tek başına olduğunda yansımaya katsayısı -16,97 dB iken, üçüncü konfigürasyon ile beraber -16,67 dB olmuştur. Metayüzey yapısının etkisiyle çalışma frekansında yukarı yönde yaklaşık olarak 400 MHz'lik bir kayma olmuştur. Sonuçlar dikkatli bir şekilde analiz edildiğinde, üçüncü konfigürasyonun monopul antenin yansımaya katsayısına maximum etkisinin 5,4 GHz'de olduğu ve yansımaya katsayısının -20 dB'ye düştüğü görülmüştür.

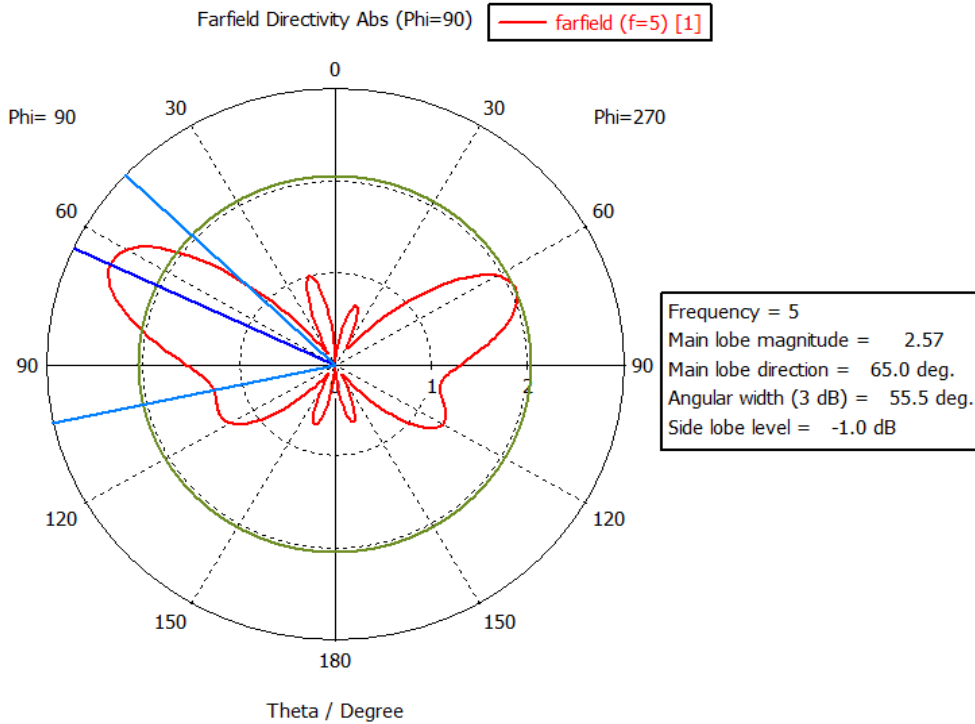


Şekil 4.44. Üçüncü konfigürasyon ile elde edilen S_{11} parametresi

Önceki konfigürasyonlarda olduğu gibi, üçüncü konfigürasyon için de 3D ve 2D radyasyon paterni sonuçları sırasıyla Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ikinci bir ana lobun daha oluştuğu ve yan lob sayısının arttığı anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 2,881 dB, ana lob genliği 2,57 dB, ana lob yönü 65° ve açısız genişliği $55,5^\circ$ 'dir. Oluşan ikinci ana lobun genliği 2 dB yönü ise 64° 'dir. 3D radyasyon paterninde görülen yan lob -1 dB seviyesindedir. Üçüncü konfigürasyonun monopul anten üzerindeki etkisinin diğer konfigürasyonlara göre daha az olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.



Şekil 4.45. Üçüncü konfigürasyondan elde edilen 3-boyutlu radyasyon paterni

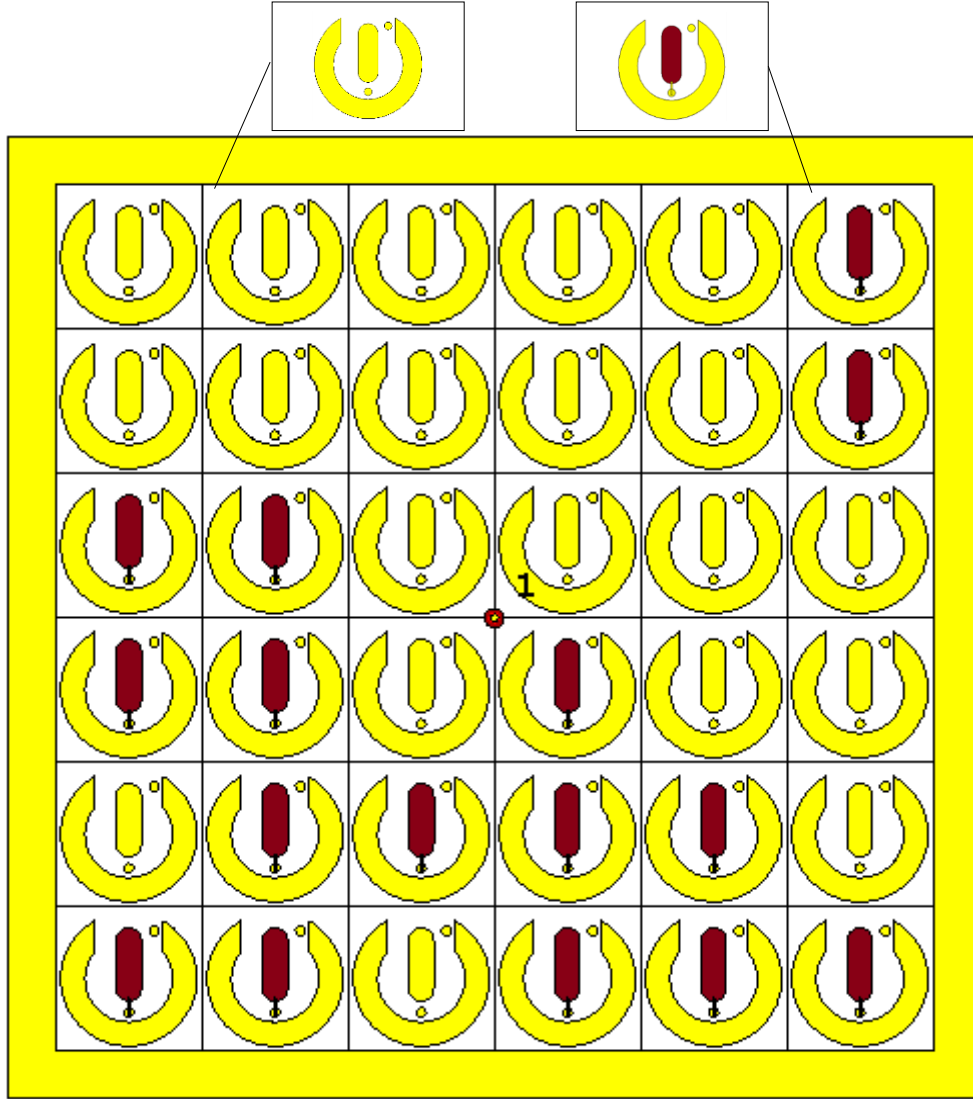


Şekil 4.46. Üçüncü konfigürasyondan elde edilen polar radyasyon paterni

4.2.7. Tasarlanan ikinci metayüzey ile yapılan dördüncü konfigürasyon

Dördüncü konfigürasyon ise Şekil 4.47’de görüldüğü gibi metayüzeydeki rastgele birim hücrelerin yalnız uçları oval çubuktan oluşan metalik rezonatörü “on” (1) konumuna getirilip geriye kalan bütün rezonatörler “off” (0) konumundadır. Burada özellikle metayüzeyin alt

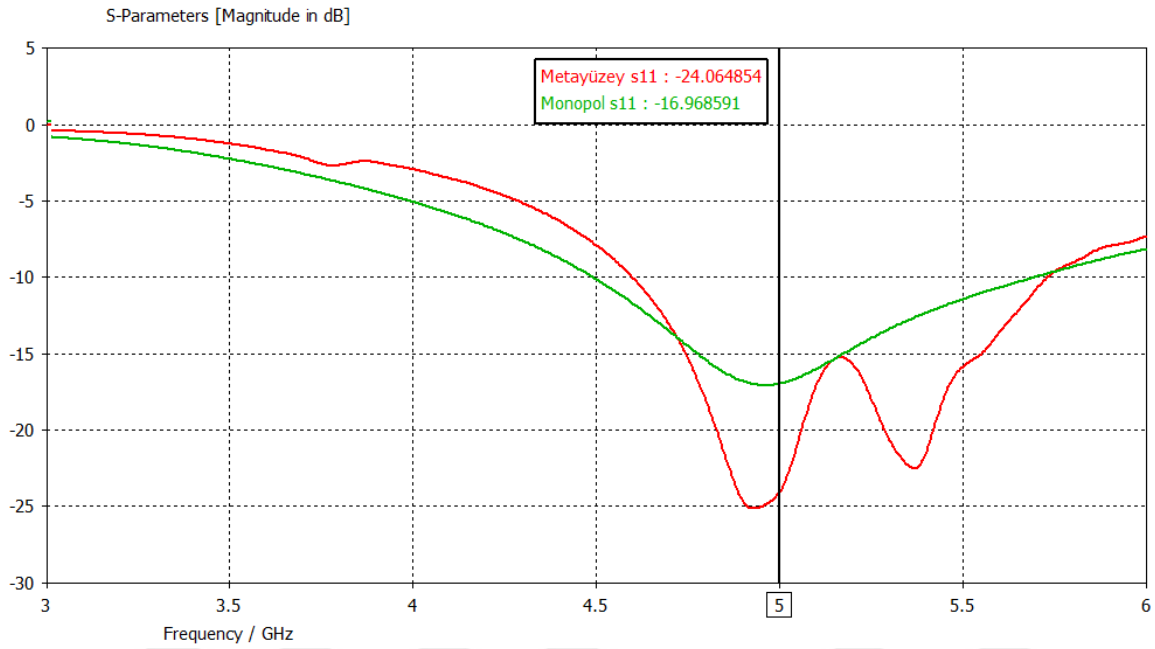
yarısındaki birim hücreler seçilip sonuçlar incelenmiştir. Bu konfigürasyonda amaç ikinci konfigürasyonda olduğu gibi her bir metalik rezonatörün ayrı ayrı monopol anten parametreleri üzerindeki etkilerini görmektir. On konumuna getirilen birim hücreler Şekil 4,47’de kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.47. İkinci metayüzey tasarımının dördüncü konfigürasyonu

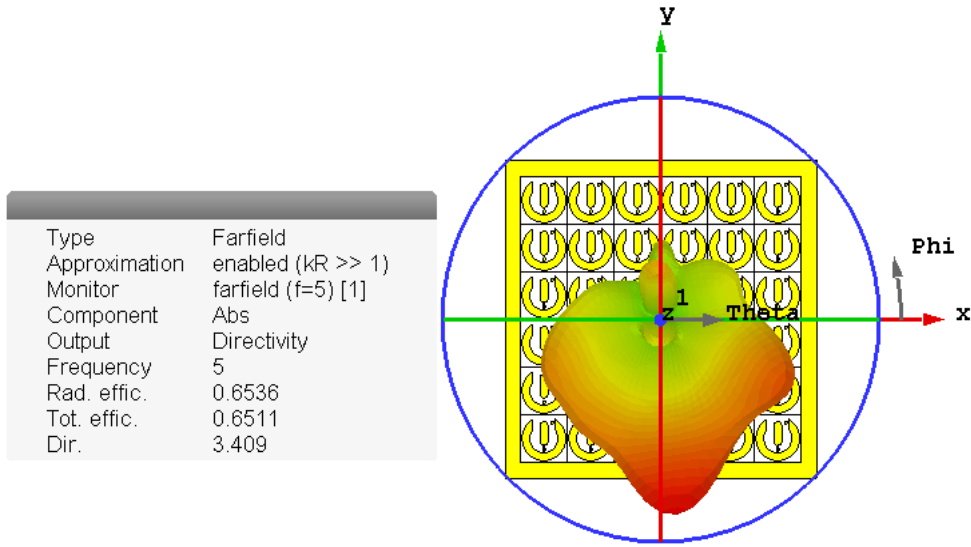
Dördüncü konfigürasyon için simülasyon programı ile elde edilen yansıma katsayısı (S_{11}) sonucu Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, metalmalzeme bulunmayan monopol antene göre 4,65 GHz ile 5,75 GHz çalışma frekansı aralığında antenin kazancının ciddi bir şekilde iyileştiği söylenebilir. Rezonans frekansı olan 5 GHz baz alınacak olursa, yansıma katsayısı, -16,97 dB’den -24,06 dB’ye düşmüş ve 7,09 dB’lik bir iyileşme gözlenmiştir. Metayüzeyin etkisi ile birisi 4,9 GHz ve diğeri 5,4 GHz’de olmak üzere iki

ayrı rezonans oluşmuştur. Ayrıca, monopul antenin çalışma frekansında, metayüzeyin etkisi ile aşağı yönde 100 MHz'lik bir kayma oluşmuştur. Monopul antenin çalışma frekansında, kayma dikkate alındığında yansıma katsayısındaki iyileştirmesi yaklaşık olarak 8 dB'ye ulaşmaktadır. Yansıma katsayısı 4,9 GHz'de -25 dB ve 5,4 GHz'de ise -23 dB'ye düşmüştür.



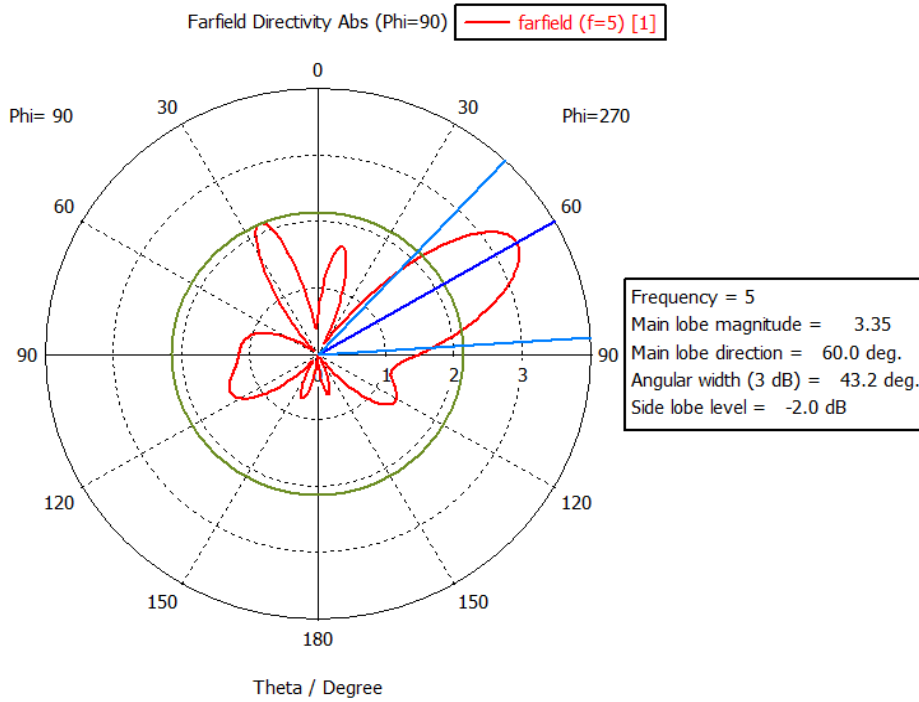
Şekil 4.48. Dördüncü konfigürasyondan elde edilen S_{11} parametresi

Önceki konfigürasyonlarda olduğu gibi, dördüncü konfigürasyon için de 3D ve 2D radyasyon paterni sonuçları sırasıyla Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, tek bir ana lob ve yan lob seviyeleri oldukça yüksek yan lobların oluştuğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 3,409 dB, ana lob genliği 3,35 dB, ana lob yönü 60° ve açılal genişliği $43,2^\circ$ 'dir.



Şekil 4.49. İkinci metayüzeyin dördüncü konfigürasyonunun 3-boyutlu radyasyon paterni

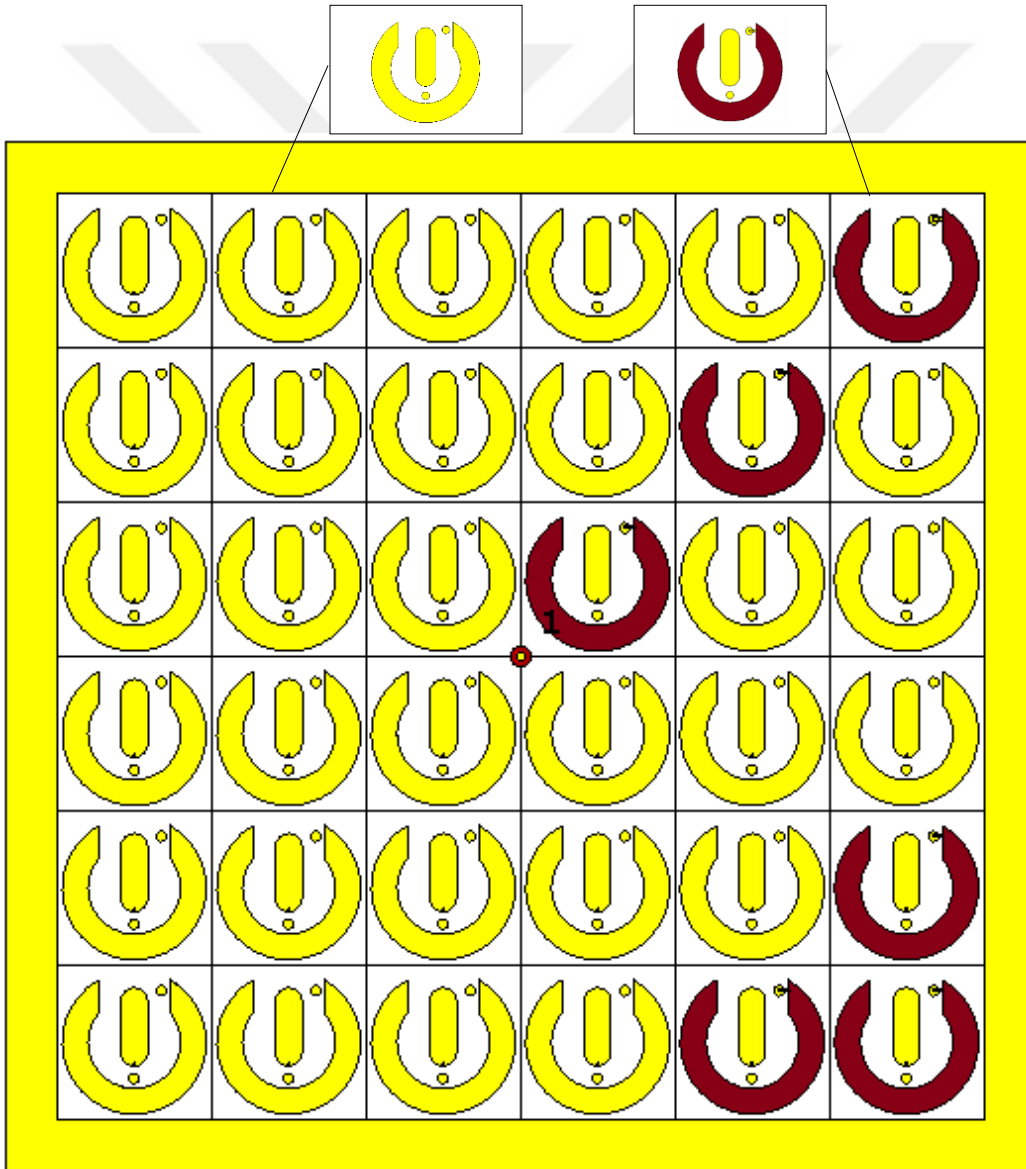
Monopol anten tek başına iken yönlülüğü 2,29 dB olmasına rağmen, dördüncü konfigürasyon eklendiğinde yönlülüğü 3,409 dB'ye çıkmış ve 1,12 dB'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu çalışmada antenin radyasyon paterninin yönünün, uçları oval çubuk rezonatörün “on” (1) konumunda yoğun olduğu bölgeye doğru yönlendiği söylenebilir.



Şekil 4.50. İkinci metayüzeyin dördüncü konfigürasyonunun polar radyasyon paterni

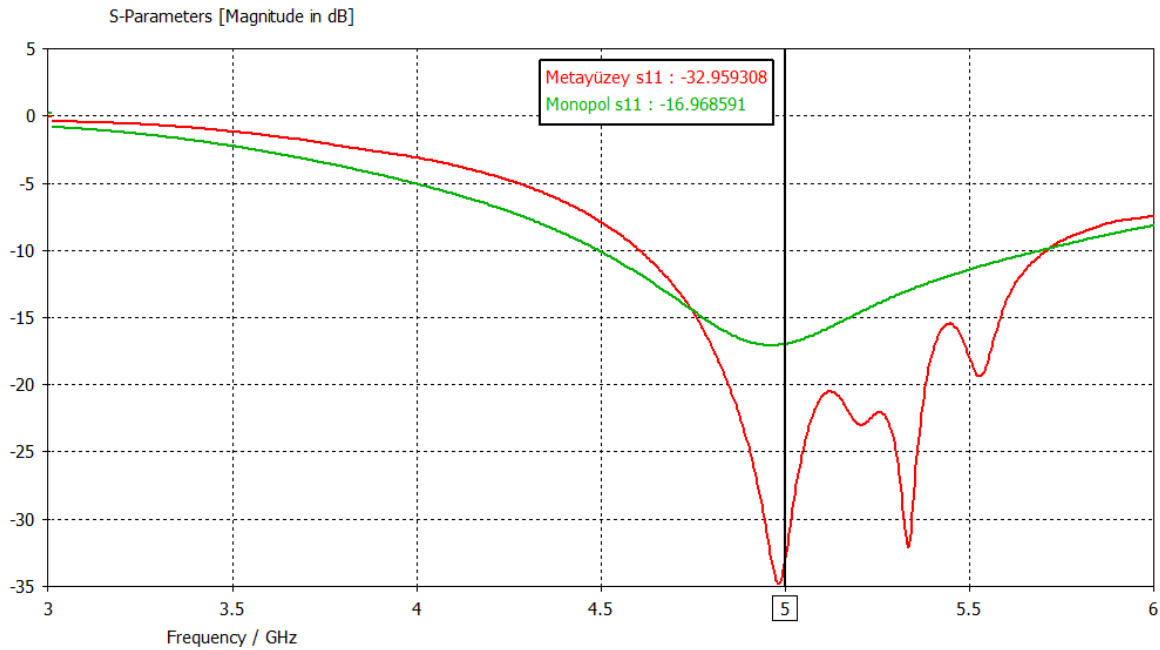
4.2.8. İkinci metayüzey tasarımı ile yapılan beşinci konfigürasyon

G ve H rezonatörlerinden oluşan metayüzeyin beşinci konfigürasyonunda Şekil 4.51’de görüldüğü gibi metayüzey yapısındaki 36 adet birim hücreden yalnızca 6 adet birim hücrenin bölünmüş çember “on” (1) konumuna getirilmiştir. Bu birim hücreler seçilirken özellikle monopol antenin belli bir yarısında bulunan birim hücreler tercih edilmiştir. Burada amaç metayüzeyin az sayıda rezonatör “on” konumundayken monopol anten parametreleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Şekil 4.51’de “on” konumunda olan rezonatörler kırmızı renkte gösterilmektedir.



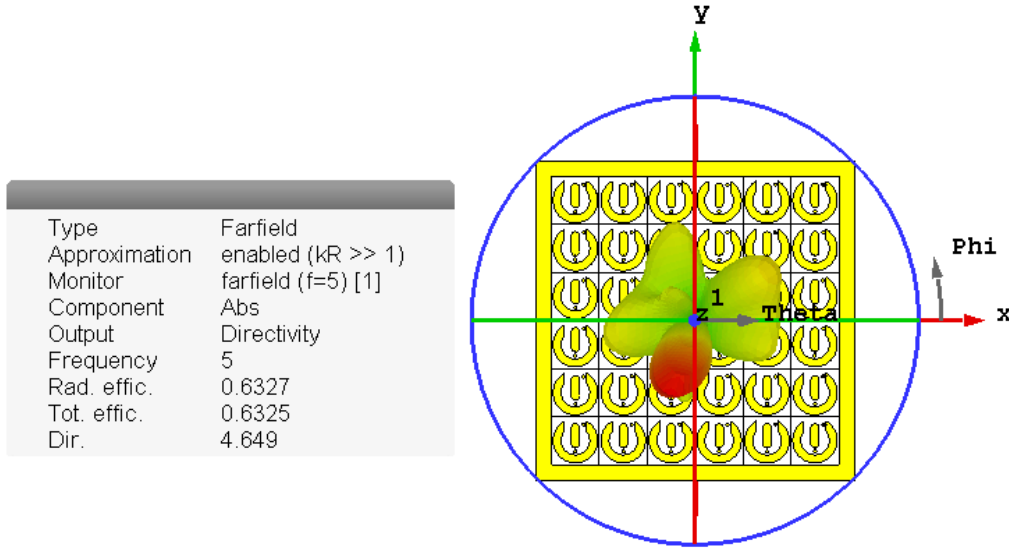
Şekil 4.51. İkinci metayüzey çalışmasının beşinci konfigürasyon görseli

Beşinci konfigürasyon için elde edilen yansıma katsayısı (S_{11}) Şekil 4.52’de verilmiştir. Bu konfigürasyon için, yansıma katsayısında 4,65 GHz ile 5,7 GHz aralığında ciddi bir iyileşme olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu frekans aralığında, üç adet rezonans oluşmuştur. Antenin çalışma frekansı olan 5 GHz’de yansıma katsayısı -16,97 dB iken, beşinci metayüzey konfigürasyonu ile -32,96 dB’ye kadar düşmüş ve -16 dB’lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. S_{11} parametresinin minimuma indiği diğer frekanslarda yani; 5,35 GHz ve 5,5 GHz’de yansıma katsayısı sırasıyla -32 dB ve -19 dB olarak elde edilmiştir.



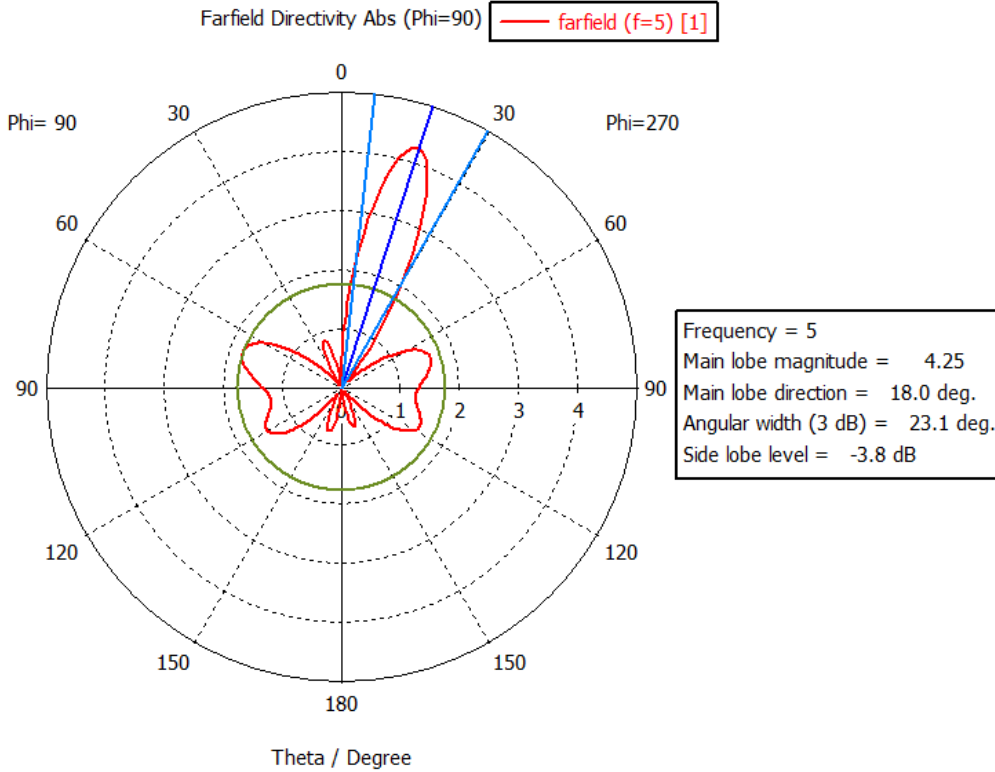
Şekil 4.52. Beşinci konfigürasyondan elde edilen S_{11} sonucu

Beşinci konfigürasyon için elde edilen 3D ve 2D radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, tek bir ana lob oluştuğu ve yan lob seviyelerinin oldukça büyük olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre; yönlülük 4,649 dB, ana lob genliği 4,25 dB, ana lob yönü 18° ve açılal genişliği $23,1^\circ$ dir.



Şekil 4.53. İkinci metayüzey beşinci konfigürasyonun 3D radyasyon paterni

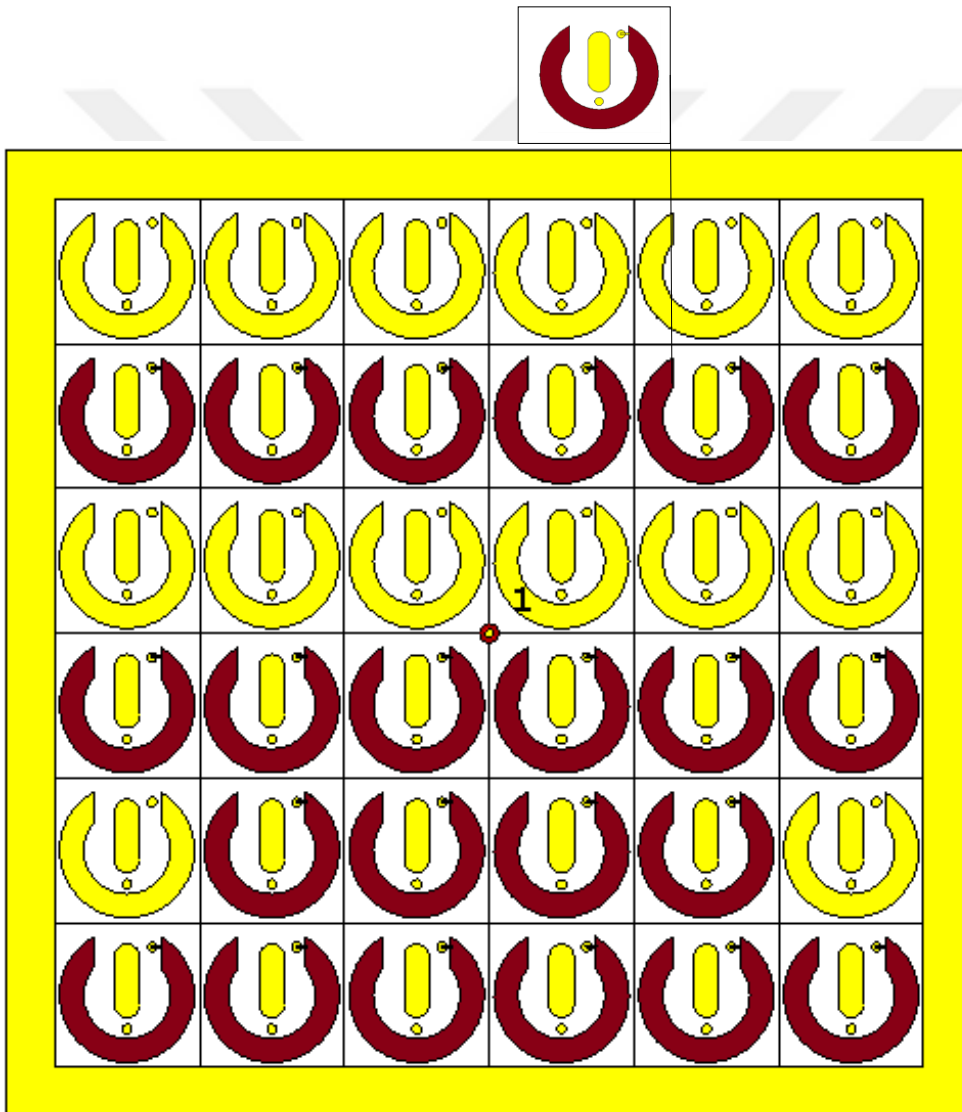
Monopol anten tek başınayken ana lob ışın büyüklüğü ve anten yönlülüğü sırasıyla, 2,24 dB ve 2,29 dB iken beşinci konfigürasyon eklendiğinde ise sırasıyla 4,25 dB ve 4,649 dB olmuştur. Böylece beşinci konfigürasyonun ana lob ışın büyüklüğünü 2 dB, yönlülük değerini ise 2,36 dB iyileştirildiği söylenebilir.



Şekil 4.54. İkinci metayüzey beşinci konfigürasyonun 2D radyasyon paterni

4.2.9. Tasarlanan ikinci metayüzey ile yapılan altıncı konfigürasyon

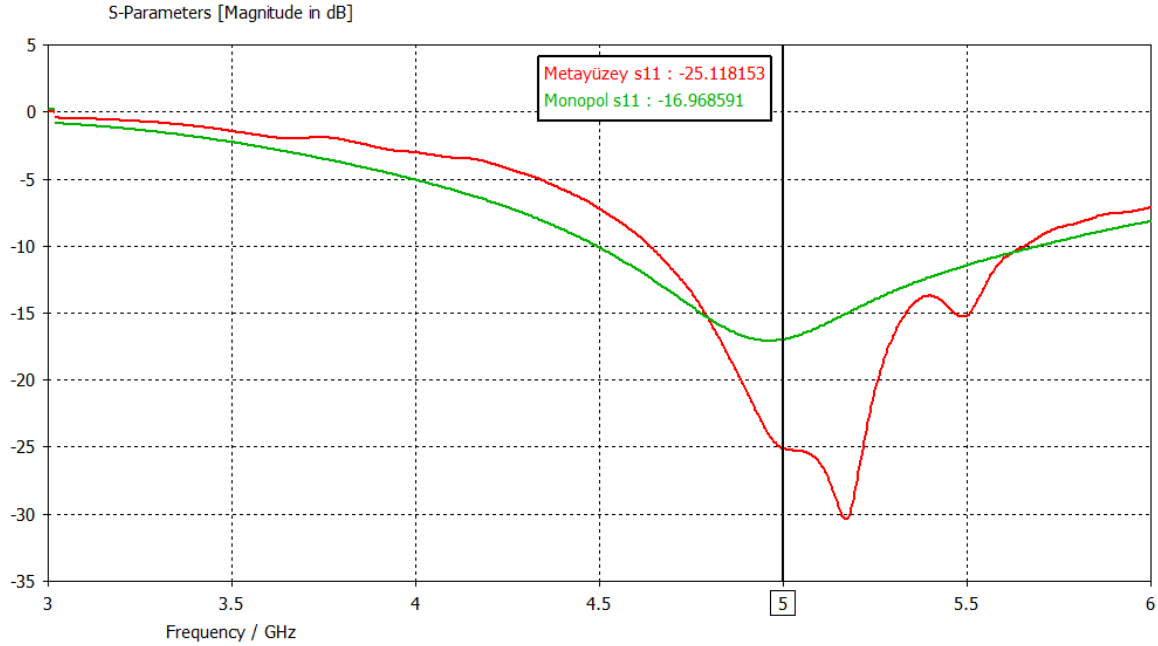
İkinci metayüzey çalışmasının altıncı konfigürasyonunda Şekil 4.55’de görüldüğü gibi metayüzeyin özellikle alt yarısında bulunan rastgele birim hücrelerinin sadece bölünmüş çember şeklindeki rezonatörleri “on” (1) yapılmış, diğer tüm rezonatörler ise “off” (0) konumunda bırakılmıştır. Burada amaç, bölünmüş çember rezonatörlerin radyasyon paterni yönlendirmesindeki etkisini incelemektir. Şekil 4.55’de birim hücrelerde “on” yapılmış rezonatörler kırmızı renkte gösterilmiştir.



Şekil 4.55. İkinci metayüzey çalışması için tasarlanan altıncı konfigürasyon

Altıncı konfigürasyon için elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 4.56’da görülmektedir. 5 GHz rezonans frekansında yansımaya katsayısı -16,97 dB iken, ikinci metayüzey yapısının altıncı

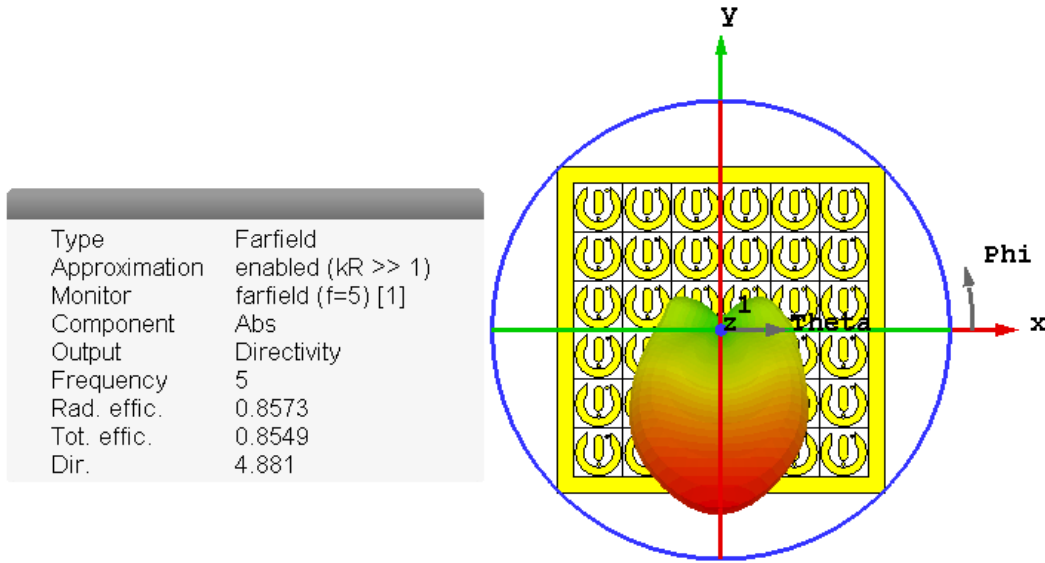
konfigürasyonu ile -25,11 dB'ye kadar düşmüş ve 8,14 dB'lik bir iyileşme olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.56'yı dikkatli inceleyecek olursak; Metayüzey monopol antene eklendiğinde çalışma frekansında bir kayma olduğu anlaşılmaktadır. 250 MHz'lik kayma dikkate alındığında yansımaya katsayısında 15,02 dB'lik iyileşme olmuştur. 5,25 GHz'de yansımaya katsayısı -30 dB olarak görülmektedir.



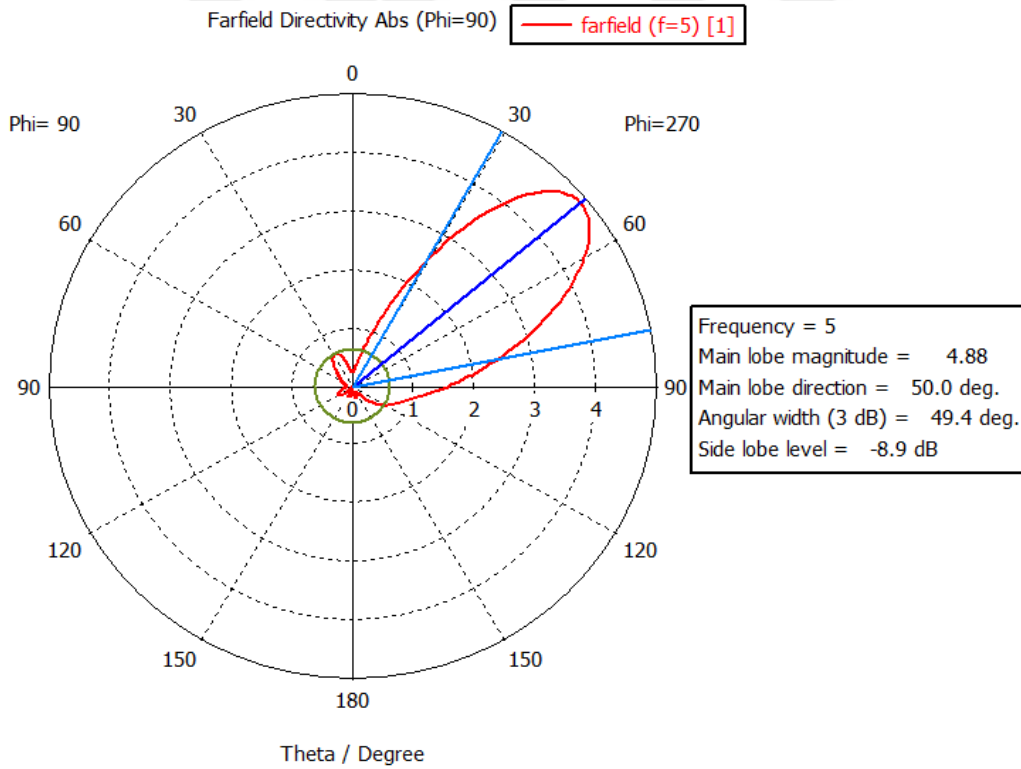
Şekil 4.56. Altıncı konfigürasyon için yansımaya katsayısı sonucu

Altıncı konfigürasyonun simülasyon sonuçlarından elde edilen üç-boyutlu ve polar radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de görülmektedir. Üç-boyutlu radyasyon paterni sonucu incelendiğinde, oldukça büyük tek bir ana lob oluştuğu ve yan lob seviyelerinin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Monopol antenin yönlülük değeri; 2,29 dB iken altıncı konfigürasyon eklendiğinde 4,881 dB olmuş ve iki katından daha fazla iyileştirme gerçekleşmiştir.

Polar radyasyon paterni sonuçlarına göre; ana lob ışınma büyüklüğü 4,88 dB, ana lob yönü 50° ve açılal genişliği $49,4^\circ$ 'dir. Polar radyasyon grafiğinden yola çıkarak, ana lob genliğinin 4,88 dB olduğunu ve bu değer metayüzey olmayan monopol anten için elde edilen genlik değerinden 2 katından fazla değere ulaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.57. Altıncı konfigürasyondan elde edilen 3-boyutlu radyasyon paterni



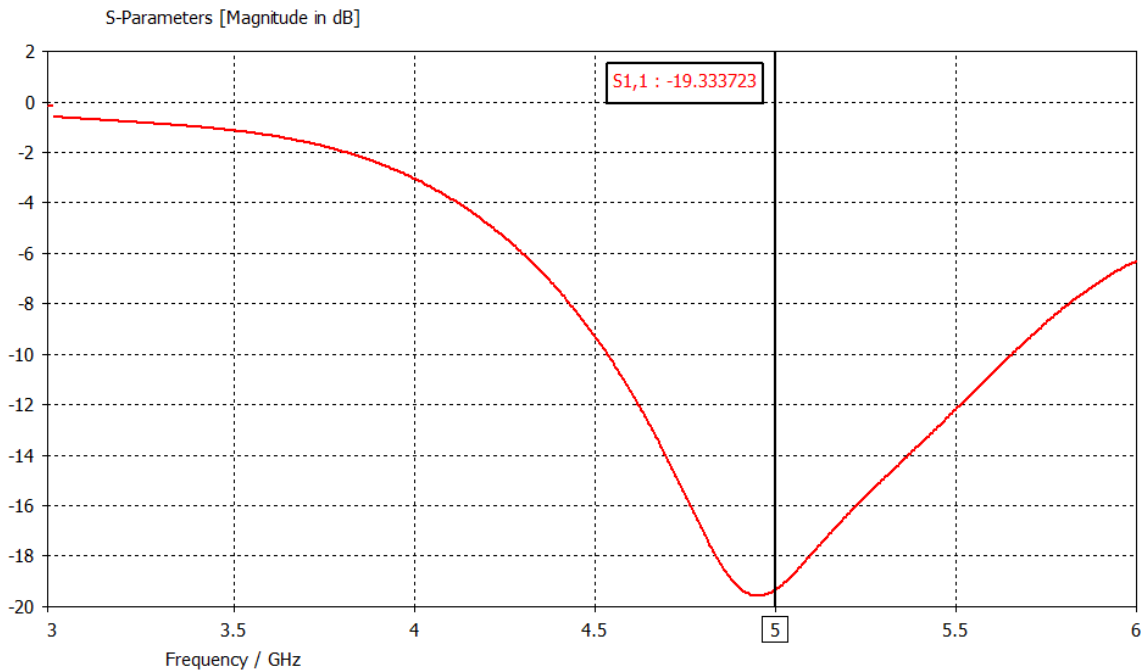
Şekil 4.58. Altıncı konfigürasyondan elde edilen polar radyasyon paterni

İkinci metayüzey tasarımı kullanılarak elde edilen konfigürasyonlarda monopol antenin radyasyon paterninin yönü, her iki rezonatörün ayrı ayrı “on” (1) konumuna getirildiği bölgelere doğru yönlendiği söylenebilir. Ek olarak bu metayüzey ile yapılan bütün çalışmalarda monopol antenin kazancını iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

4.3. G ve H Yamalı Metayüzey ile Yapılan Ek Çalışmalar

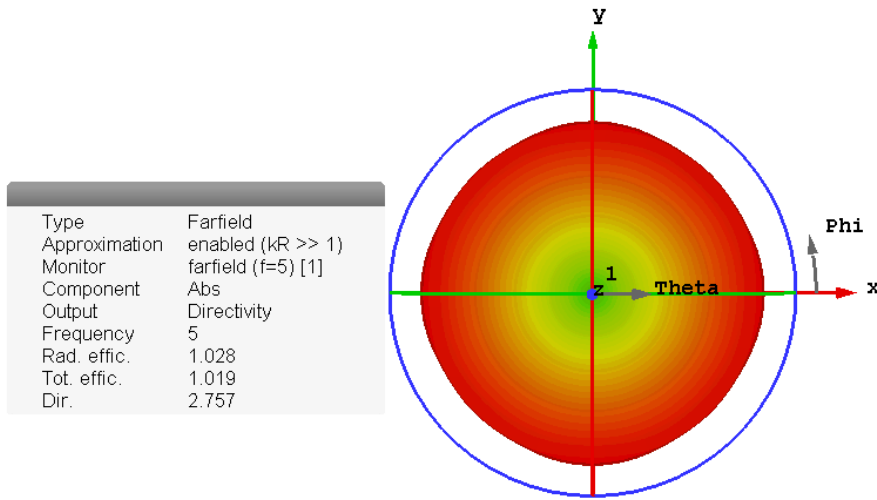
4.3.1 Dairesel toprak yüzeyli monopoll anten tasarımı

Bu çalışmada bulunan monopoll antenin toprak yüzey kısmı dairesel olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan dairesel toprak yüzeyin yarıçapı 64 mm, kalınlığı ise 0,035 mm'dir. Toprak yüzey bakırdır. G ve H yamalı metayüzey için tasarlanan monopoll anten burada da kullanılmıştır. Monopoll antenin ucuna 1 adet 50 ohm SMA konnektör bağlanmış, konnektörün diğer ucu ise dairesel topraklanmış düzleme bağlanmıştır.



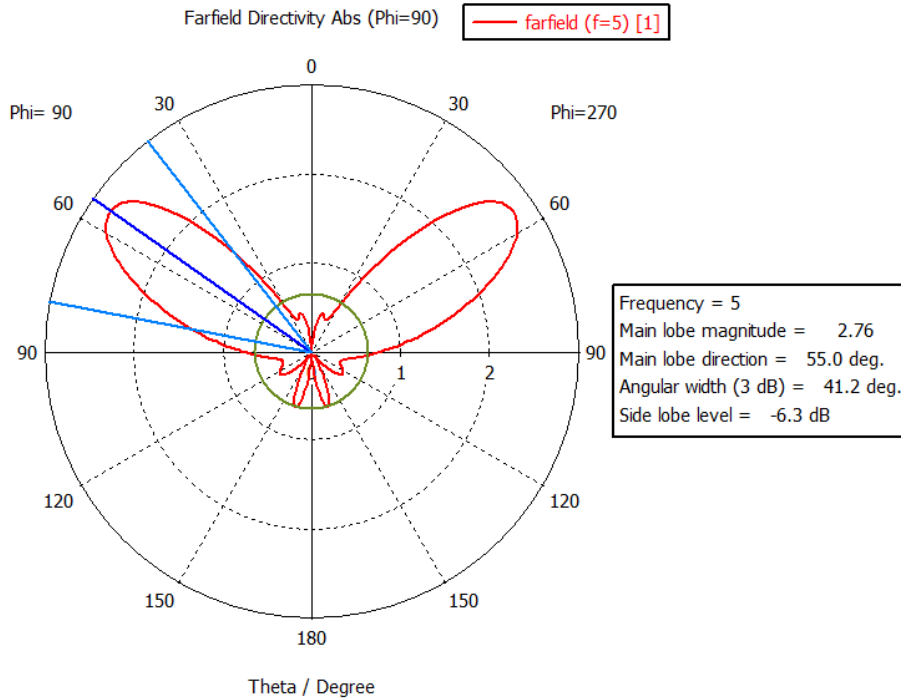
Şekil 4.59. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopoll antenin S_{11} parametresi

Monopoll antenin yansıma katsayısı (S_{11}) sonuçları Şekil 4.59'da gösterilmiş olup yansıma katsayısının 5 GHz'de -19,33 dB'ye kadar düştüğü anlaşılmaktadır. S_{11} parametresinin -10 dB'nin altına düştüğü frekans değerleri aynı zamanda bant genişliğini yani, antenin yaklaşık olarak hangi frekans aralıklarında çalışabileceğini göstermektedir. Buna göre, yansıma katsayısının -10 dB'nin altına düştüğü 4,55 GHz - 5,65 GHz arasındaki frekans bandı, bant genişliği olarak ifade edilmektedir.



Şekil 4.60. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopol antenin 3-boyutlu radyasyon paterni

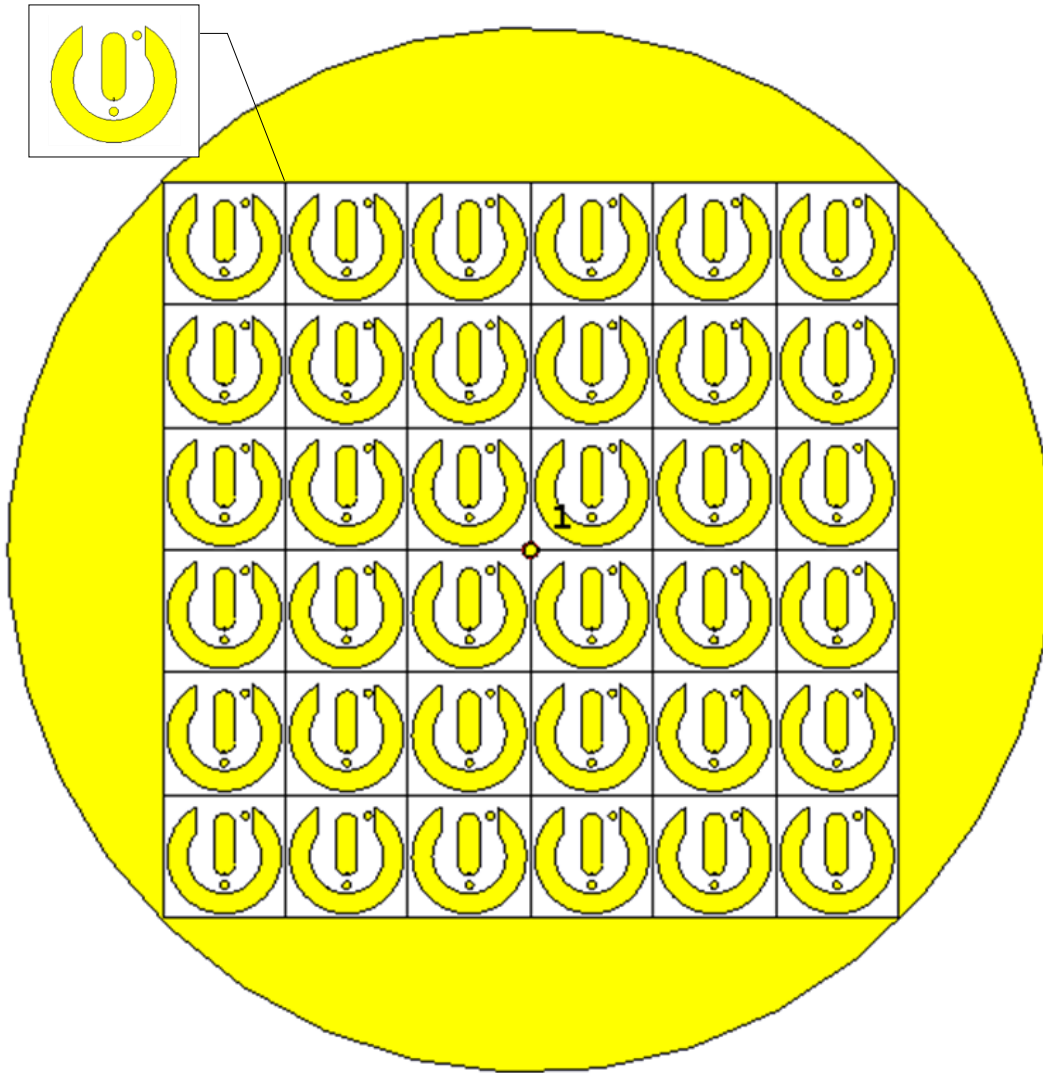
Monopol anten için 5 GHz’de simülasyon sonucundan elde edilen üç-boyutlu (3D) ve polar (2D) radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Antenin yönlülük değeri 2,757 dB, ana lob yönü 55,0°, ana lob ışınma büyüklüğü 2,76 dB ve açısal genişliği ise 41,2° olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.61. Dairesel toprak yüzey ile tasarlanan monopol anten polar radyasyon paterni

4.3.2 G ve H yamalı metayüzeye dairesel toprak yüzeyli monopol antenin yerleştirilmesi ve sonuçları

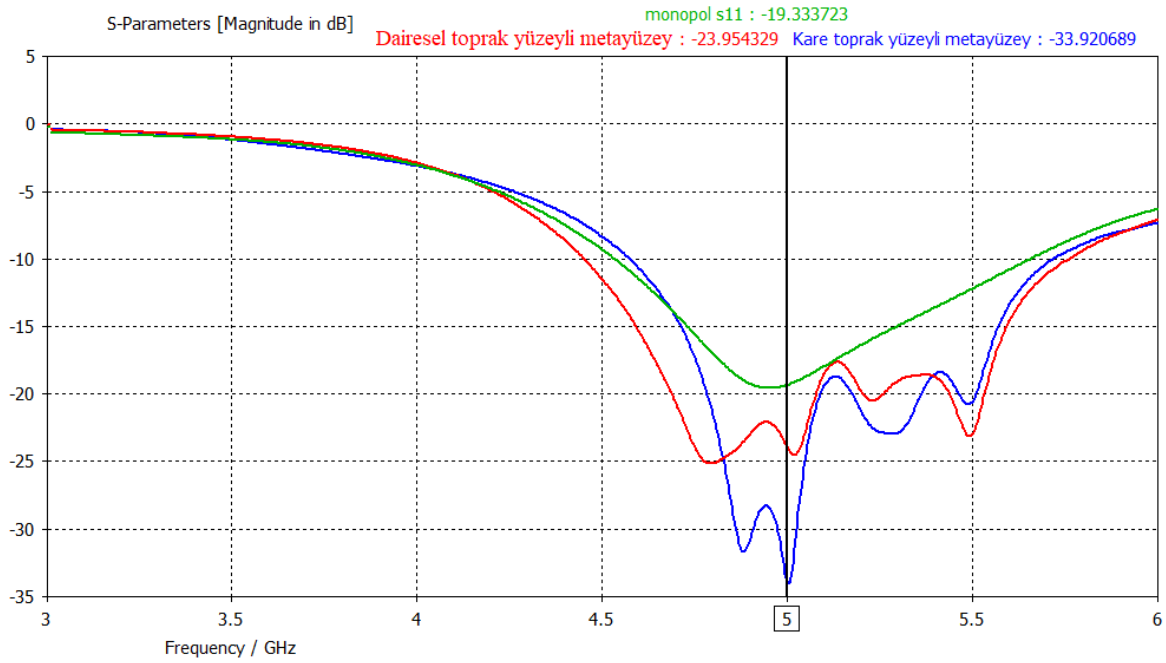
Dairesel toprak yüzeyinin üzerine G ve H yamalı birim hücrelerden oluşan metayüzey yapısı yerleştirilmiştir. Burada amaç, dairesel toprak yüzeyin monopol anten parametreleri üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Şekil 4.62’de metayüzeyin monopol anten ile birleştirilmiş görseli bulunmaktadır.



Şekil 4.62. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol anten

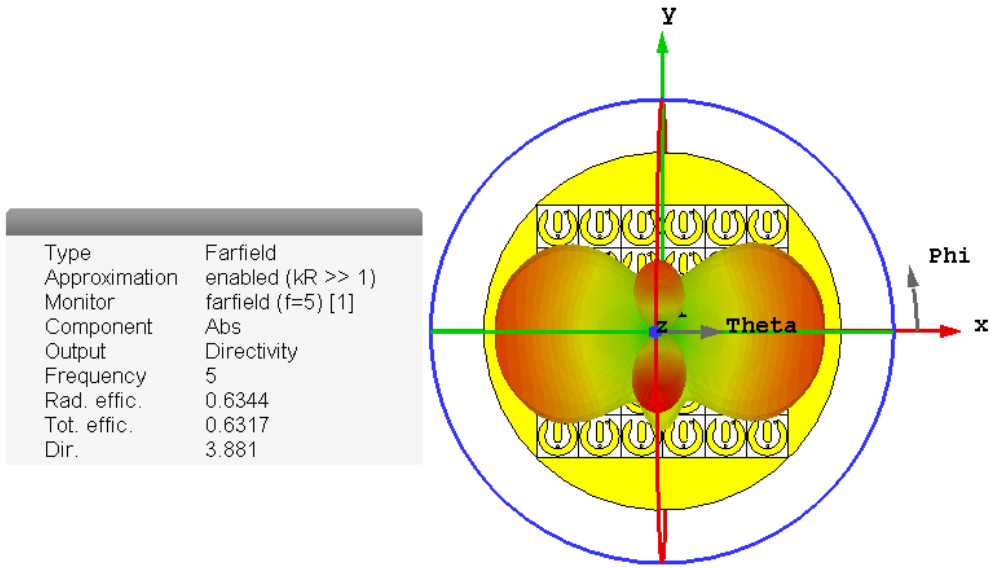
Monopol antenin üzerine metayüzey yapısı yerleştirildiği zamanki S_{11} sonucu Şekil 4.63’de gösterilmiştir. Şekilde sonucun minimum olduğu dört adet frekans bulunmaktadır. Çalışma frekansı olan 5 GHz’de monopol anten tek başına iken yansıtma katsayısı -19,33 dB,

metayüzey eklendiği zaman ise -23,95 dB'ye düşüp yaklaşık olarak 4,62 dB iyileştirme gözlenmiştir. Şekilde mavi renkte bulunan kare toprak yüzeyli metayüzey çalışmasından elde edilen metayüzeyin yansımaya katsayısı sonucu görülmektedir. Buradan 5 GHz olan rezonans frekansında kare toprak yüzey ile dairesel toprak yüzey yansımaya katsayısı sonuçları sırasıyla; -33,92 dB ve -23,95 dB olarak elde edilmiştir. Böylece kare toprak yüzeyin monopoll antenin yansımaya katsayısı üzerindeki etkisi dairesel toprak yüzeye göre -10 dB daha iyi bir değerde olduğu söylenebilir. Şekil 4.63'ü dikkatlice incelersek antenin bant genişliği (4,4 GHz- 5,75 GHz) 1,35 GHz olup 250 MHz artmıştır. Ayrıca, bu frekans aralığında yansımaya katsayısının iyileştiği anlaşılmaktadır.

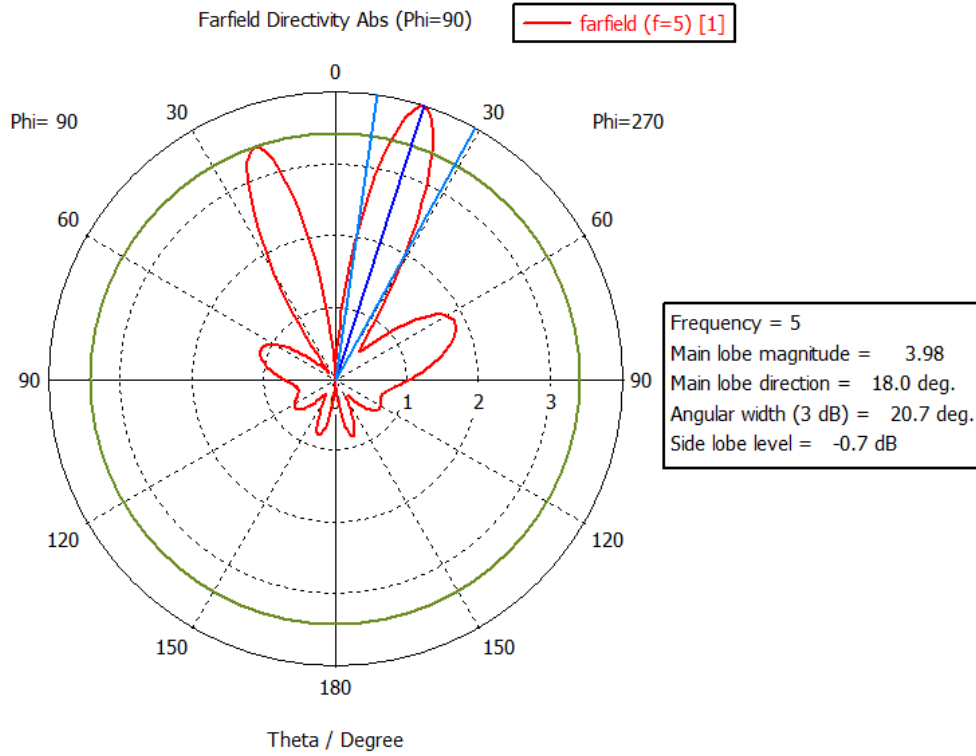


Şekil 4.63. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopoll antenin S_{11} parametresi

Monopoll antene metayüzey eklendiği zamanki 3D ve 2D radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'de gösterilmiştir. Anten parametrelerinin sonuçları; yönlülük 3,881 dB, ana lob ışımaya büyüklüğü 3,98 dB, ana lob yönü 18° ve açılal genişliği $20,7^\circ$ olarak elde edilmiştir.



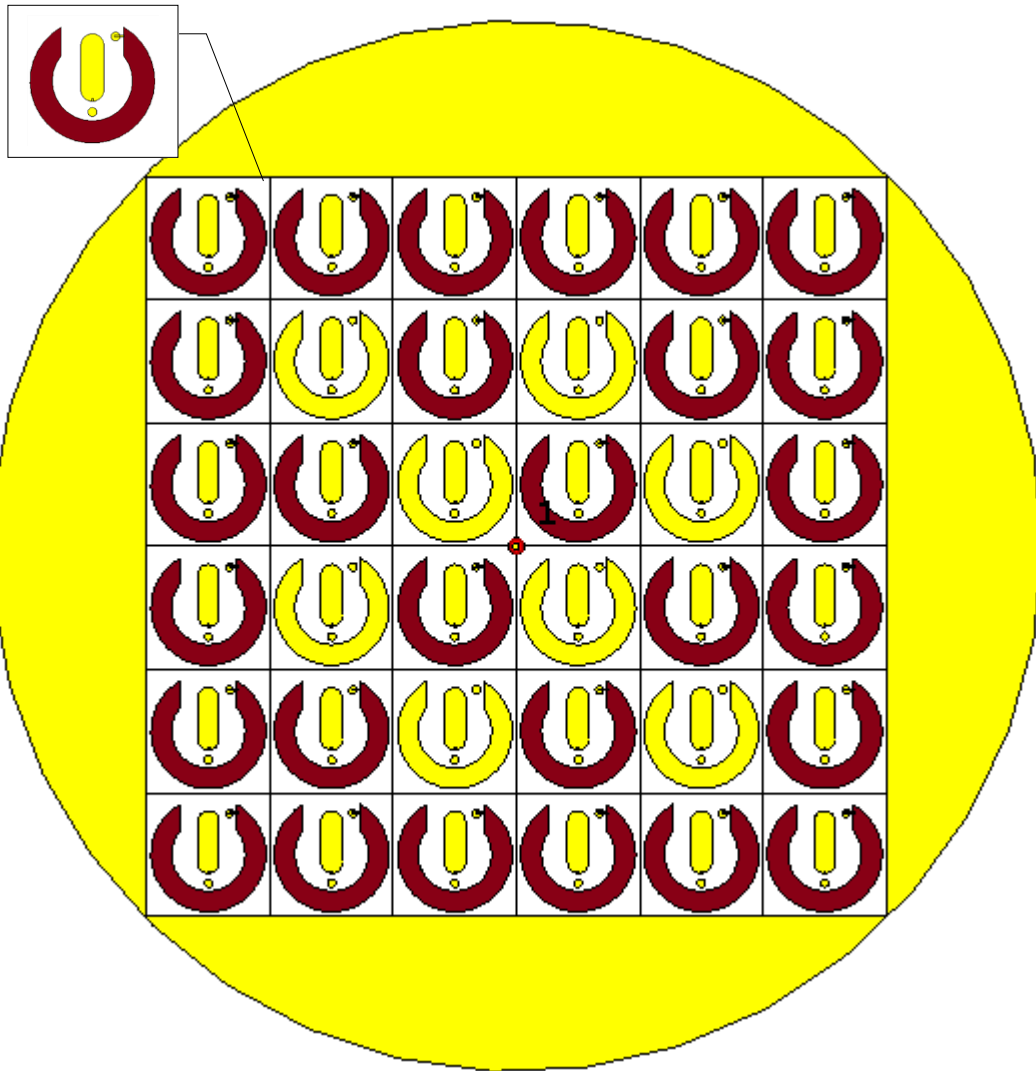
Şekil 4.64. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol antenin 3-boyutlu radyasyon paterni



Şekil 4.65. Metayüzeye eklenmiş dairesel toprak yüzeyli monopol antenin polar radyasyon paterni

4.3.3 G ve H metayüzey yapısı ve dairesel toprak yüzeyli monopol anten ile yapılan konfigürasyon

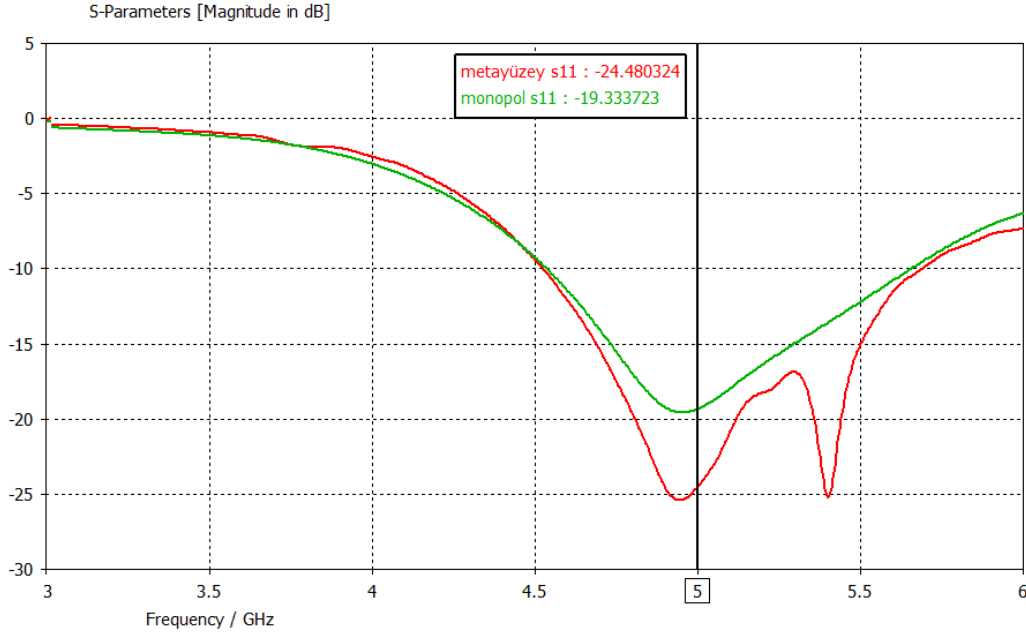
Bu çalışmada Şekil 4.66'da görüldüğü gibi rastgele birim hücrelerin sadece bölünmüş çember rezonatörü "on" (1) konumuna getirilip geriye kalan bütün birim hücreler "off" (0) konumunda bırakılmıştır. On konumuna getirilen birim hücreler Şekil 4.66'da kırmızı renkte gösterilmektedir.



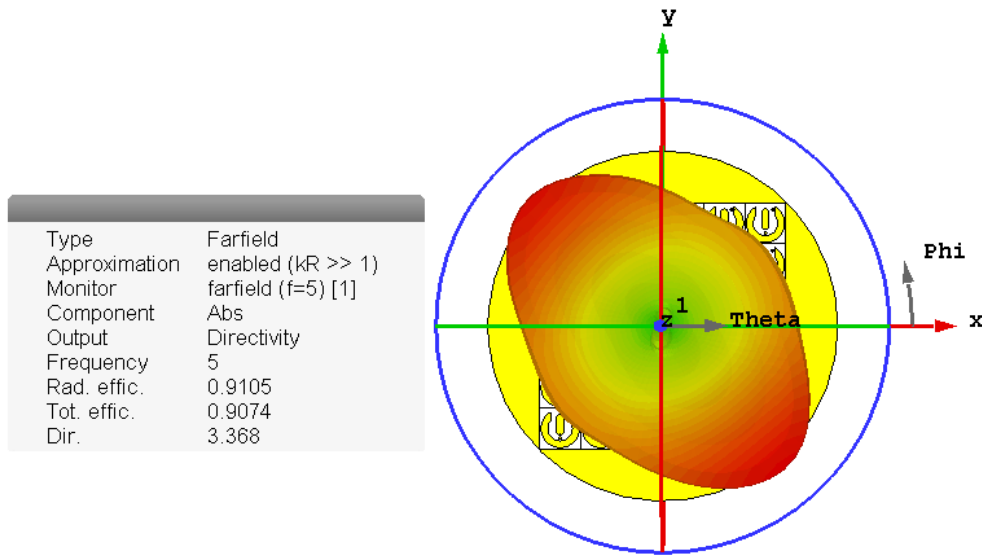
Şekil 4.66. İkinci metayüzey tasarımının yedinci konfigürasyonu

Bu çalışmanın S_{11} sonucu Şekil 4.67'de görülmektedir. Burada, birisi 4,9 GHz'de diğeri 5,4 GHz'de olmak üzere iki tane rezonans oluştuğu anlaşılmaktadır. İki rezonans anında da yansımaya katsayısının değeri -25 dB'ye düşmüştür. 5 GHz'de monopol anten metayüzey

eklenmeden -19,33 dB iken metayüzey eklendikten sonra -24,48 dB olup yansımaya katsayısı 5,15 dB iyileştirilmiştir.

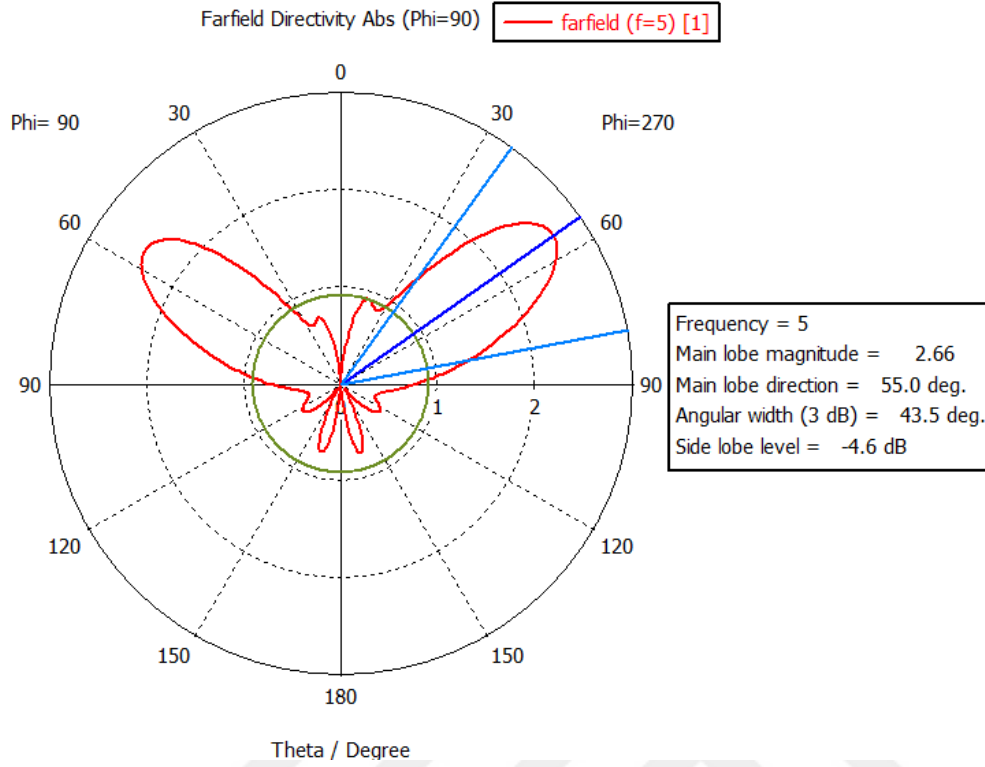


Şekil 4.67. Yedinci konfigürasyonun S₁₁ parametresi



Şekil 4.68. Yedinci konfigürasyonun 3-boyutlu radyasyon paterni

Yedinci konfigürasyonun 3-boyutlu ve polar radyasyon paternleri sırasıyla Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da gösterilmiştir. Burada, iki adet ana lob oluşmuştur. Parametre sonuçlarını incelersek; yönlülük değeri 3,368 dB, ana lob genliği 2,66 dB, ana lob yönü 55° ve açısız genişliği 43,5° olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.69. Yedinci konfigürasyonun polar radyasyon paterni

Burada bahsedilen konfigürasyonlara ilaveten birçok konfigürasyon daha denenmiş ve sonuçlar hemen hemen benzer niteliktedir. Metayüzeyin, dairesel toprak yüzeyin üzerine tam olarak oturabilmesi için, toprak yüzeyin boyutu, metayüzeyin boyutlarından daha büyük olması gerekir. Arada oluşan boyut farkından dolayı toprak düzlemi dairesel olan monopol antenin radyasyon paterninde istenilen kontrolün tam olarak yapılamadığı söylenebilir. Kare toprak yüzey kullanıldığında ise monopol antenin radyasyon paterninde istenilen kontrolün tam olarak yapılabildiği anlaşılmıştır. Bu sebeple çalışmaların genelinde kare toprak yüzeyli monopol anten kullanılması tercih edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında 5 GHz rezonans frekansında çalışan monopol antenin, anten parametrelerinde iyileştirme ve radyasyon paterninde yönlendirme amaçlanmıştır. Bu işlemleri gerçekleştirebilmek için 2-bit kodlamaya uygun, 2 farklı metayüzey yapısı tasarlanmıştır. Birim hücrelerin her birinin üst yüzeyinde rezonatör olarak çalışacak iki adet düzlemsel yama bulunmaktadır ve her bir rezonatörün arkadaki metal plakaya temasını sağlayacak delikler delinip bakır doldurularak yapının en alt kısmındaki topraklanmış düzleme teması kontrol edilmiştir. Her birim hücrede bulunan iki rezonatörün via aracılığı ile metal plakaya bağlantı kontrolü 00-01-10-11 olmak üzere 4 şekilde gerçekleşmektedir. Metayüzeyler simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış, optimizasyonları yapılmış ve analiz edilmiştir. Daha sonra, bazı konfigürasyonların üretimleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Parametreleri incelenecek olan monopol anten, metayüzeylerin ortasına yerleştirilerek analiz ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı metayüzey konfigürasyonlarının monopol anten parametrelerine etkisi ve radyasyon paterninin kontrol edilebilirliği araştırılmıştır.

Tasarlanan birinci metayüzey yapısının birim hücresinde bir çember ve çemberin ortasına artı şeklinde çubuk bulunmaktadır. Birim hücrede, arkadaki metal plakaya bağlı iki adet via bulunmaktadır. Bunlardan birisi çember rezonatör ile metal yüzey arasındaki bağlantıyı, diğeri ise artı şeklindeki çubuk rezonatör ile metal yüzey arasındaki bağlantıyı kontrol etmek için kullanılmıştır. Metayüzey 10x10 birim hücre olmak üzere toplam 100 birim hücreden oluşturulmuştur. Bu metayüzey yapısıyla simülasyon programında birçok konfigürasyon gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlara göre bazı konfigürasyonların üretimi yapılmış ve sonuçları analiz edilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, monopol antenin radyasyon paterninin via bağlantıları aracılığı ile kontrol edilebileceği ve metayüzeyin ön tarafına bakan bölgede istenilen yönde ayarlanabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, antenin yansıma katsayısında (S_{11}) çalışılan her konfigürasyon için önemli ölçüde iyileşme gerçekleşmiş ve bazı konfigürasyonlar ile monopol antenin bant genişliği de arttırılmıştır. Antenin kazancı ve ana lob ışınma büyüklüğü, iyileştirilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlarda meydana gelen bazı sapmalar mevcuttur, bu farklılıkların sebebinin ise üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu metayüzey çalışması ile, literatürde henüz

yeni çalışılan 2-bit programlama, via kontrol mekanizmasıyla yapılmış olup, bu sayede birçok anten parametresi aynı anda kontrol edilip, antenin radyasyon paterni yönlendirilmiştir. Bu metayüzey ile kullanılan monopol antenin çalışma frekansı, literatürdeki çalışmalarda sıkça kullanılan 5 GHz olarak seçilmiştir.

Tasarlanan ikinci metayüzeyin birim hücresinde ise bölünmüş çember rezonatör ve uçları oval çubuk rezonatör bulunmaktadır. Her birim hücre üzerinde iki adet de via bulunmaktadır. Bunlardan birisi bölünmüş çember rezonatör ile metal yüzey arasındaki bağlantıyı, diğeri ise çubuk rezonatör ile metal yüzey arasındaki bağlantıyı kontrol etmek için kullanılmıştır. Metayüzey 6x6 birim hücre olmak üzere toplam 36 birim hücreden oluşturulmuştur. Tasarlanan ikinci metayüzey yapısı kullanılarak birçok farklı konfigürasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, birinci konfigürasyon sonuçlarına paralel olarak, bu tasarımın farklı konfigürasyonları için de yansıma katsayısında önemli ölçüde iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca, ölçüm ve simülasyon sonuçları incelendiğinde, antenin tüm parametrelerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, tüm konfigürasyonlar için monopol antenin radyasyon paterninin via bağlantıları aracılığı ile kontrol edilebileceği ve metayüzeyin ön tarafına bakan bölgede istenilen yönde ayarlanabileceği anlaşılmıştır. Birinci metayüzey çalışmasında olduğu gibi ikinci metayüzeyin de üretimi laboratuvar ortamında yapılmıştır. Üretilen malzemenin yansıma katsayısı deneysel olarak ölçülmüş ve simülasyonda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçlarda meydana gelen bazı sapmalar mevcuttur, bu sapmaların üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu metayüzey tasarımı ile, literatürde son zamanlarda yeni çalışılmaya başlanan 2-bit kodlama, via kontrol mekanizmasıyla yapılmış olup, 2-bit programlama işlemi sayesinde antenin birçok parametresinin aynı anda daha kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi mümkün olmuştur. Birinci metayüzey çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da kullanılan monopol antenin çalışma frekansı 5 GHz'dir.

Bu tez çalışmasında birçok yenilik ve literatüre katkı bulunmaktadır. Bunlardan ilki tasarlanan her iki metayüzey yapısında, tasarım ve boyutlar değiştirilmeden via'lar yardımı ile 2-bit kodlama yapılarak monopol anten parametrelerin iyileştirilmesi ve radyasyon paterninin kontrol edilmesidir. Literatürdeki çalışmalarda genellikle 1-bit programlama ile antenin bir parametresinde iyileştirme yapılmıştır. Bu çalışma ile tek bir metayüzey yapısı ile yansıma katsayısı, kazanç, yönlülük, bant genişliği, ana lob genliği, ana lob yönü, açılal

genişliği gibi pek çok anten parametresi iyileştirilebilmektedir. Üstelik, antenin radyasyon paterni via bağlantıları aracılığı ile kontrol edilebilmektedir. Ayrıca literatürde, 2-bit programlamaların kontrol mekanizmalarının genellikle 2 adet PIN diyot ile yapılmış olup, bu çalışmada via kontrol mekanizması kullanılmıştır. Böylece hem daha kolay tasarım ve üretim yapılmış, hem de literatürdeki çalışmalara göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan simülasyon ve ölçüm sonuçları birbiri ile uyum içerisindedir. Ayrıca, simülasyon ve ölçüm sonuçları literatürde bulunan ve farklı kontrol mekanizmaları kullanılarak elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir. Literatürde bulunan ve 2 bit kodlama kullanan çalışmalar [56,57] genellikle farklı frekans bantları kullanmış ve parametreleri bu çalışma kapsamında olmayan farklı amaçlarla kontrol etmişlerdir. Bu sebeple, doğrudan grafiksel karşılaştırma yapılamamıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalar ile uyum içerisindedir.

KAYNAKLAR

1. Ling, F., Zhong, Z., Huang, R., & Zhang, B. (2018). A broadband tunable terahertz negative refractive index metamaterial. *Scientific reports*, 8(1), 1-9.
2. Tong, S., Ren, C., & Tang, W. (2019). High-transmission negative refraction in the gradient space-coiling metamaterials. *Applied Physics Letters*, 114(20), 204101.
3. Zhao, G., & Bi, S. (2019). Design and verification of double band negative refraction metamaterial. *Chemical Physics Letters*, 725, 92-96.
4. Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R. F., Alexopolous, N. G., & Yablonovitch, E. (1999). High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques*, 47(11), 2059-2074.
5. Zhou, L., & Chan, C. T. (2004). High-impedance reflectivity and surface-wave band gaps in metamaterials. *Applied physics letters*, 84(9), 1444-1446.
6. Yang, F., & Rahmat-Samii, Y. (2003). Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 51(10), 2691-2703.
7. Engheta, N. (2002, June). Thin absorbing screens using metamaterial surfaces. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313)* (Vol. 2, pp. 392-395). IEEE.
8. V. G. Veselago, *Sov. Phys. Uspekhi*, 1968, 10, 509–514.
9. Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.
10. Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.
11. Fang, N., Lee, H., Sun, C., & Zhang, X. (2005). Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science*, 308(5721), 534-537.
12. Liu, Z., Lee, H., Xiong, Y., Sun, C., & Zhang, X. (2007). Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects. *science*, 315(5819), 1686-1686.
13. Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *science*, 312(5781), 1780-1782.
14. Islam, S. S., Hasan, M. M., & Faruque, M. R. I. (2018). A new metamaterial-based wideband rectangular invisibility cloak. *Applied Physics A*, 124(2), 160.
15. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), 977-980.

16. Li, J., & Pendry, J. B. (2008). Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking. *Physical review letters*, *101*(20), 203901.
17. Zhao, G., Bi, S., Niu, M., & Cui, Y. (2019). A zero refraction metamaterial and its application in electromagnetic stealth cloak. *Materials Today Communications*, *21*, 100603.
18. Ergin, T., Stenger, N., Brenner, P., Pendry, J. B., & Wegener, M. (2010). Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. *science*, *328*(5976), 337-339.
19. Dash, R. K., Sahu, S. K., Mishra, C. S., Sethi, K., Palai, G., & Sahu, S. (2016). Realization of 'non-linear invisibility cloak' using meta-material. *Optik*, *127*(20), 9635-9639.
20. Smith, D. R., Kolinko, P., & Schurig, D. (2004). Negative refraction in indefinite media. *JOSA B*, *21*(5), 1032-1043.
21. Podolskiy, V. A., & Narimanov, E. E. (2005). Strongly anisotropic waveguide as a nonmagnetic left-handed system. *Physical Review B*, *71*(20), 201101.
22. Abdulkarim, Y. I., Deng, L., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Awl, H. N., Muhammadsharif, F. F., ... & Luo, H. (2020). Novel metamaterials-based hypersensitized liquid sensor integrating omega-shaped resonator with microstrip transmission line. *Sensors*, *20*(3), 943.
23. Zagoskin, A. M., Felbacq, D., & Rousseau, E. (2016). Quantum metamaterials in the microwave and optical ranges. *EPJ Quantum Technology*, *3*(1), 1-17.
24. Zhou, Z., Zhou, T., Zhang, S., Shi, Z., Chen, Y., Wan, W., ... & Chen, L. (2018). Multicolor T-ray imaging using multispectral metamaterials. *Advanced Science*, *5*(7), 1700982.
25. Montoya, J. A., Tian, Z. B., Krishna, S., & Padilla, W. J. (2017). Ultra-thin infrared metamaterial detector for multicolor imaging applications. *Optics express*, *25*(19), 23343-23355.
26. Kuester, E. F., Mohamed, M. A., Piket-May, M., & Holloway, C. L. (2003). Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metafilm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *51*(10), 2641-2651.
27. Yin, X., Zhu, H., Guo, H., Deng, M., Xu, T., Gong, Z., ... & Chen, S. (2019). Hyperbolic metamaterial devices for wavefront manipulation. *Laser & Photonics Reviews*, *13*(1), 1800081.
28. Holloway, C. L., Mohamed, M. A., Kuester, E. F., & Dienstfrey, A. (2005). Reflection and transmission properties of a metafilm: With an application to a controllable surface composed of resonant particles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *47*(4), 853-865.
29. Xu, H. X., Sun, S., Tang, S., Ma, S., He, Q., Wang, G. M., ... & Zhou, L. (2016). Dynamical control on helicity of electromagnetic waves by tunable metasurfaces. *Scientific reports*, *6*, 27503.

30. Holloway, C. L., Kuester, E. F., & Dienstfrey, A. (2011). Characterizing metasurfaces/metafilms: The connection between surface susceptibilities and effective material properties. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *10*, 1507-1511.
31. Holloway, C. L., Kuester, E. F., Gordon, J. A., O'Hara, J., Booth, J., & Smith, D. R. (2012). An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, *54*(2), 10-35.
32. Zhang, Y., Feng, Y., & Zhao, J. (2020). Graphene-enabled tunable multifunctional metamaterial for dynamical polarization manipulation of broadband terahertz wave. *Carbon*.
33. Akgol, O., Unal, E., Altintas, O., Karaaslan, M., Karadag, F., & Sabah, C. (2018). Design of metasurface polarization converter from linearly polarized signal to circularly polarized signal. *Optik*, *161*, 12-19.
34. Akgol, O., Altintas, O., Dalkılınc, E. E., Unal, E., Karaaslan, M., & Sabah, C. (2017). Metamaterial absorber-based multisensor applications using a meander-line resonator. *Optical Engineering*, *56*(8), 087104.
35. Ashyap, A. Y., Zainal Abidin, Z., Dahlan, S. H., Majid, H. A., & Saleh, G. (2019). Metamaterial inspired fabric antenna for wearable applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, *29*(3), e21640.
36. Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Karadag, F., Alkurt, F. Ö., Altıntaş, O., ... & Sabah, C. (2018). Microfluidic and fuel adulteration sensing by using chiral metamaterial sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, *165*(11), B475.
37. Zhang, F., Zhao, Q., Zhang, W., Sun, J., Zhou, J., & Lippens, D. (2010). Voltage tunable short wire-pair type of metamaterial infiltrated by nematic liquid crystal. *Applied Physics Letters*, *97*(13), 134103.
38. Cui, T. J. (2017). Microwave metamaterials—from passive to digital and programmable controls of electromagnetic waves. *Journal of Optics*, *19*(8), 084004.
39. Zhou, Y., Cao, X., Gao, J., Yang, H., & Li, S. (2018). Reconfigurable metasurface for multiple functions: magnitude, polarization and phase modulation. *Optics express*, *26*(22), 29451-29459.
40. Zheng, Q., Li, Y., Pang, Y., Wang, J., Chen, H., Qu, S., ... & Zhang, J. (2019). Wideband Coding metasurfaces based on low Q resonators. *Optics Communications*, *430*, 189-194.
41. Tang, Y., Lin, G., Yang, S., Yi, Y. K., Kamien, R. D., & Yin, J. (2017). Programmable Kiri-Kirigami Metamaterials. *Advanced Materials*, *29*(10), 1604262.
42. Huang, C., Sun, B., Pan, W., Cui, J., Wu, X., & Luo, X. (2017). Dynamical beam manipulation based on 2-bit digitally-controlled coding metasurface. *Scientific reports*, *7*(1), 1-8.

43. Yang, H., Cao, X., Yang, F., Gao, J., Xu, S., Li, M., ... & Li, S. (2016). A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Scientific reports*, 6, 35692.
44. Li, Y. B., Li, L. L., Xu, B. B., Wu, W., Wu, R. Y., Wan, X., ... & Cui, T. J. (2016). Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging. *Scientific reports*, 6, 23731.
45. Wan, X., Qi, M. Q., Chen, T. Y., & Cui, T. J. (2016). Field-programmable beam reconfiguring based on digitally-controlled coding metasurface. *Scientific reports*, 6, 20663.
46. Tang, W., Li, X., Dai, J. Y., Jin, S., Zeng, Y., Cheng, Q., & Cui, T. J. (2019). Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results. *China Communications*, 16(5), 46-61.
47. Li, L., Cui, T. J., Ji, W., Liu, S., Ding, J., Wan, X., ... & Zhang, S. (2017). Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms. *Nature communications*, 8(1), 1-7.
48. Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J., & Cheng, Q. (2014). Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 3(10), e218-e218.
49. Ünal, E., & Altıntarla, G. (2019). Smart monopole antenna with pattern and frequency reconfiguration characteristics based on programmable metasurface. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(9), e21805.
50. Liu, S., & Cui, T. J. (2016). Flexible controls of terahertz waves using coding and programmable metasurfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23(4), 1-12.
51. Cui, T. J., Liu, S., Bai, G. D., & Ma, Q. (2019). Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface. *Research*, 2019, 2584509.
52. Zheng, Q., Li, Y., Pang, Y., Wang, J., Chen, H., Qu, S., ... & Zhang, J. (2019). Wideband Coding metasurfaces based on low Q resonators. *Optics Communications*, 430, 189-194.
53. Wu, Q., Cheng, Y., Li, X., & Wang, H. (2018). Beam Synthesis with Low-Bit Reflective Coding Metamaterial Antenna: Theoretical and Experimental Results. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
54. Yi, K., Matten, G., Ouisse, M., Sadoulet-Reboul, E., Collet, M., & Chevallier, G. (2020). Programmable metamaterials with digital synthetic impedance circuits for vibration control. *Smart Materials and Structures*, 29(3), 035005.
55. Han, J., Li, L., Tian, S., Liu, G., Liu, H., & Shi, Y. (2020). Millimeter-Wave Imaging Using 1-Bit Programmable Metasurface: Simulation Model, Design, and Experiment. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 10(1), 52-61.

56. Ma, Q., Hong, Q. R., Bai, G. D., Jing, H. B., Wu, R. Y., Bao, L., ... & Cui, T. J. (2020). Editing Arbitrarily Linear Polarizations Using Programmable Metasurface. *Physical Review Applied*, 13(2), 021003.
57. Saifullah, Y., Zhang, F., Yang, G. M., & Xu, F. (2019, July). Design of 2-bit Programmable Reflective Metasurface in K-band. *In 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* (pp. 441-442). IEEE.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YERAL, Hasan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.02.1995, Hatay
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (539) 3984677
 e-mail : yeralhasan28@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor.
Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2017
Lise	Özbuğday Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2017	Doğatek Enerji Mühendislik	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce, Arapça

Yayınlar

Yeral Hasan, “2-bit Programmable Metasurface and Antenna Applications” *International Conference on Artificial Intelligence towards Industry 4.0*, 14-16 Kasım 2019, Hatay 2019, s. (156-161).

Hobiler

Teknoloji, Müzik, Gezi

DİZİN

A

ABSTRACT · v, vii
 açık · 19, 62
 ana lob · 9, 15, 21, 24, 27, 38, 43,
 46
 ana lob genliği · 21, 24, 27, 38,
 41, 43, 46, 49, 60
 anten · iv, 6, 8, 15, 16, 21, 30, 35,
 47, 62
 anten kazancı · iv
 anten yönlülüğünü · iv

B

bağlantı · 16
 bant genişliği · 63
 bant genişliğini · 8
 birim hücre · iv, viii, ix, 1, 2, 10,
 11, 29, 31, 62, 63
 bölünmüş çember · viii, 29, 30,
 31, 32, 39, 42, 51, 59, 63

Ç

çalışma · x, 8, 12, 23, 27, 30, 43
 çalışma frekansı · 8, 30
 çember · 31
 çubuk · iv, vii, viii, x, xiii, 2, 29, 30,
 31, 39, 47, 48, 62, 63

D

dB · xiv, 8, 9, 13, 15, 17, 18, 20,
 21, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 33,
 36, 38, 40, 41, 43, 45, 46, 47,

49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57,
 59, 60

F

frekans · 5, 8, 17, 27, 40, 49, 54,
 56

G

GHz · xiv, 6, 8, 9, 10, 13, 17, 19,
 20, 23, 27, 29, 30, 32, 36, 40,
 43, 45, 49, 51, 54, 55, 56, 59,
 62, 63

I

ışınma açısı · 15
 ışınma büyüklüğü · 9, 15, 19, 29,
 33, 50, 52, 55, 57, 63
 ışınma yönü · iv

K

kısa devre bağlantıları · 18
 konfigürasyon · vii, viii, ix, x, xi,
 12, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23,
 24, 26, 27, 28, 34, 39, 40, 42,
 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 61,
 62

L

lineer · ix, x, xi, 9, 10, 22, 25, 28,
 34, 38, 41, 44, 47

M

metalik rezonatör · ix, 11, 16
 metamalzeme · xiv
 metayüzey · vii, viii, ix, x, 1, 3, 4,
 5, 6, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 19,
 20, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30,
 31, 32, 33, 34, 39, 41, 42, 44,
 48, 49, 51, 52, 53, 54, 56, 57,
 59, 62, 63
 Metayüzey · iv, 8, 10, 11, 19, 22,
 23, 29, 31
 mm · xiv, 2, 8, 10, 29, 30, 31, 54,
 63
 model · viii, 39, 40, 42, 43, 44, 46,
 48, 49, 51, 52, 59, 63
 Monopol anten · iv, 8

O

off · 2, 11, 13, 15, 19, 22, 26, 30,
 32, 34, 39, 42, 45, 51, 59, 62,
 63
 on · v, 2, 11, 15, 20, 22, 26, 27,
 28, 30, 34, 39, 42, 44, 47, 48,
 51, 53, 59, 62, 63, 64, 65, 66,
 67, 68

Ö

ölçüm · 6, 63

P

parametre · ix, x, xi, 17, 33, 36, 43,
 56, 63

polar · ix, x, xi, 9, 10, 15, 19, 21,
22, 25, 28, 34, 38, 43, 44, 46,
47

R

Radyasyon paterni · iv, ix, 9
rezonatör · iv, viii, 10, 29, 48, 62,
63

S

s11 · ix, 6, 8, 18, 20, 23, 27, 42,
45

saçılma parametreleri · 20, 45
simülasyon · iv, ix, 6, 9, 24, 30, 62
sonuçlar · 18

T

Tasarım · iv, vii
temas · 4, 10, 62

Ü

üç-boyutlu · 15, 33, 52, 55
Üretilen · 6, 63
üretim · iv, 16, 35

V

via · iv, 1, 2, 4, 11, 16, 18, 19, 30,
31, 62, 63, 67

Y

yansımaya katsayısı · 1, 13, 17, 20,
23, 27, 29, 32, 36, 39, 43, 45,
49, 51, 56, 59, 62, 63
yayılmı · 62
Yönlülük · 15



TEKNOVERSITE



teknoversite AYRICALIĞINDASINIZ

İSTE

