KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT YÖNTEMLER KULLANARAK YÜKSEK KAZANÇLI ANTEN TASARIMI

AYBİKE KOCAKAYA

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT YÖNTEMLER KULLANARAK YÜKSEK KAZANÇLI ANTEN TASARIMI

AYBİKE KOCAKAYA

Doç.Dr. Gonca ÇAKIR		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. İsmail Hakkı TAYYAR		
Jüri Üyesi,	**Karabük Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Sibel ÇİMEN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Güllü KIZILTAŞ ŞENDUR		
Jüri Üyesi,	**Sabancı Üniversitesi**	.....
Dr. Öğ.Gör. Adnan SONDAŞ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Duvar arkası görüntüleme, yeraltı geçitleri ve tünel görüntüleme, yeraltı patlayıcı görüntüleme, araçlarda çarpışmayı önlemek üzere tasarlanan sistemler, mesafelerin tam hassasiyetli ölçümleri, medikal ölçümler gibi sivil ve askeri ultra geniş bantlı radar uygulamalarında kullanılacak olan antenlerin küçük boyutlu ve tüm bantta yüksek kazanca sahip olması istenmektedir. Bu tez çalışmasında, ultra geniş bantlı radarlarda kullanılmak üzere, frekans seçici yüzeylerin yansıtıcı olarak kullanıldığı, kazancı bant boyunca arttırılmış mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasını 215E101 nolu araştırma projesi kapsamında destekleyen TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel Araştırma Kurumu)'na teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bilgisi ile çalışmalarıma yön veren, desteğini esirgemeyen, bana güvenen ve yüreklendiren, bir akademisyen olarak davranış ve duruşuyla örnek olan danışmanım Doç.Dr. Gonca ÇAKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca görüşleri ile çalışmalarıma katkıda bulunan, karşılaştığım zorluklarda desteğini ve zamanını esirgemeyen hocam Doç.Dr.Sibel ÇİMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana güç veren ve destekleyen anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım. Yoğun çalışmalarım sırasında bana gösterdiği destek ve sevgi için oğluma ve destekleri için eşime teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın bu alanda çalışmak isteyen tüm araştırmacılara faydalı olması dileğimle,

Haziran – 2018 Aybike KOCAKAYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER 5
1.1. FSY Tasarımları 9
1.1.1 X bant FSY tasarımı ve parametrik çalışmaları 9
1.1.2 UGB FSY-1 ve UGB FSY-2 tasarımı ve parametrik çalışmaları 19
1.1.3 UGB FSY-3 tasarımı ve parametrik çalışmaları 29
2. ULTRA GENİŞ BANTLI ANTENLER VE KAZANÇ ARTIRMA YÖNTEMLERİ 34
2.1. Ultra Geniş Bantlı Anten Tasarımları 36
2.2. İletken Yapraklar Konularak Anten-4'ün Maksimum Kazancının Arttırılması 46
2.3. Frekans Seçici Yüzeylerin Faz Cevabı ve Anten Kazancına Etkisi 49
2.4. Frekans Seçici Yüzeyler ile Anten-4'ün Maksimum Kazancının Arttırılması 50
2.5. FSY Dizi Eleman Sayısının Anten−4'ün Maksimum Kazancına Etkisi 52
2.6. Ultra Geniş Bantlı Frekans Seçici Yüzey Yansıtıcı ile Anten−5'in Maksimum Kazancının Artırılması 53
2.7. Anten−4 ve UGB FSY−3'ün Literatürdeki Yapılar ile Karşılaştırılması 57
2.8. FSY ve MİY Kullanılmasının Anten Kazancının Artırılmasındaki Etkilerinin Karşılaştırılması 59
2.9. FSY ve MİY Açılı Yerleşiminin Anten Kazancını Artırmasındaki Etkilerinin Karşılaştırılması 65
3. ÖLÇÜM SONUÇLARI 70
3.1. Frekans Seçici Yüzey Ölçümleri 70
3.1.1. X bant minyatürize FSY filtrenin iletim karakteristiği ölçümleri 70
3.1.2. UGB FSY−1'in iletim karakteristiği ölçümleri 72
3.1.3. UGB FSY−2'nin iletim karakteristiği ölçümleri 75
3.1.4. UGB FSY−3'ün iletim karakteristiği ölçümleri 77
3.2. UGB Anten Ölçümleri 79
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 86
KAYNAKLAR 88
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 93

ÖZGEÇMİŞ 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Pasif ve aktif durum için empedansı Z_L olan dipol elemanları için periyodik yapı 6
Şekil 1.2. FSS elemanları ve filtre yanıtları; (a) kare döngü- bant durduran filtre, (b) kare döngü açıklık- bant geçiren filtre , (c) kare yama eleman- alçak geçiren filtre , (d) kare açıklık eleman -yüksek geçiren filtre 7
Şekil 1.3. Eleman şekillerine göre FSY grupları 8
Şekil 1.4. Çarpı dipol FSY birim hücre yapısı 10
Şekil 1.5. Çarpı dipol FSY elemanına ait iletim karakteristiği 11
Şekil 1.6. FSY birim hücre geometrisi 12
Şekil 1.7. Çarpı dipol FSY ile önerilen FSY yapıya ait iletim karakteristikleri 13
Şekil 1.8. Transfer fonksiyonunu kestiren MATLAB Kodu 14
Şekil 1.9. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen FSY yapısına Ait (a) iletim katsayısı (b) faz grafikleri ve (c) fonksiyonunun sıfırlarının ve kutuplarının yerleşimi 15
Şekil 1.10. FSY yapısının 0.8 kat ve 1.2 kat ölçeklenmesi durumunda genlik, faz ve kutup-sıfır haritası 16
Şekil 1.11. İletim katsayısı benzetimleri (a) normal gelen dalga için (b) TE polarizasyonda 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° geliş açıları için 17
Şekil 1.12. İletim katsayısı benzetimleri (a) Çarpı ile önerilen FSY'nin karşılaştırılması (b) farklı geliş açılarında döndürülmüş Çarpı FSY iletim karakteristiği 18
Şekil 1.13. TE ve TM polarizasyonda yüzey akım dağılımları benzetimleri 18
Şekil 1.14. TE ve TM polarizasyonda yüzey akım dağılımları benzetimleri 19
Şekil 1.15. (a)Tasarlanan UGB-FSY-1 dizisi (b) Birim hücre geometrisi 20
Şekil 1.16. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen FSY-1 için (a)İletim katsayısı (b)İletim fazını (c)Sıfır-kutup haritası 21
Şekil 1.17. Yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda elde edilen TE ve TM modları için iletim ve yansıma karakteristiği 22
Şekil 1.18. Farklı r_1 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği 22
Şekil 1.19. Farklı g değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği 23
Şekil 1.20. TE modunda farklı geliş açıları için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri 23
Şekil 1.21. TM modunda farklı geliş açıları için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri 24
Şekil 1.22. Minyatürize UGB−FSY−2 (a)dizi yapısı (b) birim hücre geometrisi 24
Şekil 1.23. UGB FSY-2 birim hücre tasarım adımları (a) kare döngü (b) halka açıklıklı çapraz dipol (c) tasarlanan birim hücre 25

Şekil 1.24. Yüzey Normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda kare döngü elemanı ve tasarlanan FSY-2'nin iletim karakteristiği 26
Şekil 1.25. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen FSY-2 için a. İletim katsayısı b. İletim fazı c. Sıfır-kutup haritası 26
Şekil 1.26. Yüzey Normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda elde edilen TE ve TM modları için iletim ve yansıma karakteristiği 27
Şekil 1.27. Farklı w1 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği 27
Şekil 1.28. Farklı r2 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği 28
Şekil 1.29. TE modunda farklı geliş açılar için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri 28
Şekil 1.30. TM modunda farklı geliş açılar için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri 29
Şekil 1.31. UGB FSY-3 (a) birim hücre yapısı (b) periyodik FSY yapısı 30
Şekil 1.32. UGB FSY-3'ün tasarım aşamalarında elde edilen iletim katsayısı grafikleri 30
Şekil 1.33. UGB FSY-3 iletim ve yansıma katsayısı grafikleri 31
Şekil 1.34. UGB FSY-3'ün farkı Lin değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri 32
Şekil 1.35. UGB FSY-3'ün farkı Rin değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri 32
Şekil 1.36. UGB FSY-3'ün farkı w değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri 33
Şekil 2.1. UGB CPW beslemeli referans anten geometrisi 36
Şekil 2.2. w1 parametresinin yansıma katsayı üzerindeki etkisinin incelenmesi 37
Şekil 2.3. Toprak düzlemi değiştirilerek elde edilen antenler 38
Şekil 2.4. Referans Anten, Anten-1, Anten-2 ve Anten-3'e ait yansıma katsayısı grafikleri 38
Şekil 2.5. Referans Anten, Anten-1, Anten-2 ve Anten-3'e ait kazanç grafikleri 39
Şekil 2.6. Anten-4'ün geometrisi 40
Şekil 2.7. Anten 4'ün yansıma katsayısının frekans ile değişimi 41
Şekil 2.8. Anten 4'ün maksimum kazancının frekans ile değişimi 41
Şekil 2.9 Toprak düzleminden metal çıkarılmasının anten yansıma katsayısına etkisinin karşılaştırılması 42
Şekil 2.10. Toprak düzleminden metal çıkarılmasının antenin maksimum kazancına etkisinin karşılaştırılması 42
Şekil 2.11. w5 parametresini değişimi ile elde edilen yansıma katsayısı grafikleri 43
Şekil 2.12. w5 parametresini değişimi ile elde edilen maksimum kazanç grafikleri 43
Şekil 2.13. Anten-4 toprak düzlemi eliptik yapı geometrisi 44
Şekil 2.14. Ey parametresini değişimi ile elde edilen yansıma katsayısı grafikleri 44

Şekil 2.15. Ey parametresini değişimi ile elde edilen maksimum kazanç grafikleri 44
Şekil 2.16. Farklı gap parametreleri için yansıma katsayısının frekans ile değişimi 45
Şekil 2.17. Farklı gap parametreleri için maksimum kazancın frekans ile değişimi 45
Şekil 2.18. Anten-4'ün 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekansları için E düzlemi, H düzlemi polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları 46
Şekil 2.19. Anten-5 geometrisi 47
Şekil 2.20. Anten-4 ve Anten-5'in yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması 47
Şekil 2.21. Anten-4 ve Anten-5'in maksimum kazanç grafiklerinin 48
Şekil 2.22. Farklı u değerleri için elde edilen yansıma katsayısı grafikleri 48
Şekil 2.23. Farklı u değerleri için elde edilen maksimum kazanç grafikleri 48
Şekil 2.24. FSY ile anten kazancı artırma düzeninin şeması ve faz cevabı 49
Şekil 2.25. Anten-4'ün arkasına FSY yerleştirilmiş durumdaki ve yerleştirilmemiş durumdaki yansıma katsayıları benzetimlerinin karşılaştırması 51
Şekil 2.26. X bant FSY varken ve yok iken, Anten-4'ün maksimum kazançlarının karşılaştırılması 51
Şekil 2.27. UGB FSY-1, UGB FSY-2, UGB FSY-3'ün Anten-4 'ün arkasına yerleştirilerek elde edilen yansıma katsayılarının ve Anten-4'ün yansıma katsayısı benzetimleri ile karşılaştırılması 51
Şekil 2.28. UGB FSY-1, UGB FSY-2, UGB FSY-3'ün Anten-4 'ün arkasına yerleştirilerek elde edilen maksimum kazanç ve Anten-4'ün maksimum kazanç benzetimleri ile karşılaştırılması 52
Şekil 2.29. UGB FSY-3'e ait iletim katsayısı, yansıma katsayısı ve yansıma katsayısı fazının frekans ile değişimi 52
Şekil 2.30. (a) Anten-FSY yerleşimi (b) Anten-FSY perspektif görünümü 53
Şekil 2.31. Anten-5 arkasında FSY varken ve yokken elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması 53
Şekil 2.32. Anten-5 arkasında FSY varken ve yokken elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 54
Şekil 2.33. Farklı H değerleri için elde edilen yansıma grafikleri 55
Şekil 2.34. 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekansları için polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları 55
Şekil 2.35. [20] numaralı kaynakta verilen anten yapısı FSY geometrisi ve maksimum kazanç grafikleri 55
Şekil 2.36. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları 56
Şekil 2.37. Anten yapısı FSY geometrisi ve maksimum kazanç grafikleri [20] 57
Şekil 2.38. Makalede sunulan anten, Anten−FSY ve Anten−UGB FSY−3 için benzetimler ile elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması 58
Şekil 2.39. Makalede sunulan anten, Anten−FSY ve Anten−UGB FSY−3 için benzetimler ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerini Karşılaştırılması 58
Şekil 2.40. Makalede sunulan antenin FSY geometrisi ve maksimum kazanç grafikleri [43] 59

Şekil 2.41. Anten−4 arkasında MİY varken ve yokken elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması 60
Şekil 2.42. Anten−5 arkasında MİY varken ve yokken elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 60
Şekil 2.43. Farklı boyutlardaki FSY ve MIY kullanılarak elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 61
Şekil 2.44. CPW beslemeli dairesel monopol anten yapısı 62
Şekil 2.45. Yansıma katsayısı ve maksimum kazanç grafiği 62
Şekil 2.46. (a) Ölçeklenmiş FSY iletim katsayısı (b) X bant FSY iletim katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 63
Şekil 2.47. Dairesel monopol anten arkasına Ölçeklenmiş−FSY, UGB−FSY ve MİY yerleşiminin önden görünüşü 63
Şekil 2.48. Anten, Anten −UGB FSY ve Anten Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması 64
Şekil 2.49. Anten, Anten UGB−FSY ve Anten MİY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması 64
Şekil 2.50. Anten, Anten −UGB FSY ve Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 65
Şekil 2.51. Anten, Anten −UGB FSY ve Anten MİY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 65
Şekil 2.52. Açılı UGB FSY−3 ve Anten−4'ün perspektif ve yan görünüşü 66
Şekil 2.53. Farklı α açısı ile Anten−4'ün arkasına yerleştirilen UGB FSY ile elde edilen yansıma katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 66
Şekil 2.54. Farklı α açıları için elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 67
Şekil 2.55. Yatay ve dikey FSY plaka ekleyerek elde edilen kazancın UGB FSY ile elde edilen kazanç ile karşılaştırılması 67
Şekil 2.56. Farklı α açısı ile Anten−4'ün arkasına yerleştirilen MİY ile elde edilen yansıma katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 68
Şekil 2.57. Farklı α açıları için elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 68
Şekil 2.58. Anten−4 ün arkasına Açılı UGB FSY ve Açılı MİY yerleştirmesi ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması 69
Şekil 3.1. Üretimi gerçekleştirilen çift tabakalı bant durduran FSY filtre yapısının fotoğrafı 71
Şekil 3.2. X bant FSY'nin TE modu için farklı açılarda ölçüm ve benzetim ile elde edilen iletim katsayılarının karşılaştırılması 71
Şekil 3.3. X bant FSY'nin TM modu için farklı açılarda ölçüm ve benzetim ile elde edilen iletim katsayılarının karşılaştırılması 72
Şekil 3.4. Üretilen UGB FSY-1 tabakasının fotoğrafı 73
Şekil 3.5. TE modunda 0°, 20°, 40° ve 60°geliş açıları için ölçülen iletim katsayıları 74
Şekil 3.6. TM modunda 0°, 20°, 40° ve 60°geliş açıları için ölçülen iletim katsayıları 74
Şekil 3.7. TE ve TM modunda 20°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 74
Şekil 3.8. TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 75

Şekil 3.9. Üretilen UGB FSY-2'nin fotoğrafı 75
Şekil 3.10. UGB FSY-2'nin TE modu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları 76
Şekil 3.11. UGB FSY-2'nin TM modu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları 76
Şekil 3.12. TE ve TM modunda 30°'lik geliş açısı için iletim katsayısının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 77
Şekil 3.13. TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayısının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 77
Şekil 3.14. Üretilen UGB FSY yansıtıcı yapısının fotoğrafı 78
Şekil 3.15. TE modunda iletim katsayısı ölçümü ile CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 78
Şekil 3.16. TM modunda iletim katsayısı ölçümü ile CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 78
Şekil 3.17. Üretilen Referans Anten, Anten-1,Anten-2 ve Anten-3'ün fotoğrafları 79
Şekil 3.18. Üretilen Referans Anten, Anten-1, Anten-2 ve Anten-3'e ait ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması 80
Şekil 3.19. Anten-4 ve Anten-5'in fotoğrafları 80
Şekil 3.20. Üretilen Anten-4 ve Anten-5 ait ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması 81
Şekil 3.21. 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekanslarında Anten-4'ün CST benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma diyagramlarının karşılaştırılması 81
Şekil 3.22. 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekanslarında Anten-5'in CST benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma diyagramlarının karşılaştırılması 82
Şekil 3.23. Anten-5'in arkasına yerleştirilerek yapılan ölçüm düzeneği 82
Şekil 3.24. Ölçüm sonucu elde edilen yansıma katsayısı ile CST benzetim sonucu elde edilen sonuç ile karşılaştırılması 83
Şekil 3.25. 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekansları için ışıma diyagramları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 83
Şekil 3.26. 3 Anten-5 ve FSY yapısının 3 boyutlu ışıma diyagramı benzetim sonuçları 84
Şekil 3.27. Farklı frekanslar için elde edilen yönlü kazanç benzetim sonuçları 84
Şekil 3.28. 3,1 GHz frekansı yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 85
Şekil 3.29. 7 GHz frekansı yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 85
Şekil 3.30. 10 GHz frekansı yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 85

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. FSY birim hücre geometrik parametreleri 12
Tablo 1.2. Minyatürize FSY ile çarpı dipol FSY birim hücre boyutlarının karşılaştırılması 13
Tablo 1.3. Tablo 1.3 geliş açılarına göre iletim sıfır sapmaları..... 18
Tablo 1.4. UGB-FSY-1 birim hücre boyutları 21
Tablo 1.5. TE ve TM modları için geliş açısına bağlı frekans sapması 25
Tablo 1.6. Minyatürize UGB FSY-2 birim hücre boyutları 26
Tablo 1.7. TE ve TM modları için geliş açısına bağlı frekans sapması 31
Tablo 1.8. FSY-3 birim hücre boyutları 31
Tablo 2.1. UGB CPW beslemeli referans anten parametre değerleri..... 38
Tablo 2.2. Anten-4 parametre boyutları 41
Tablo 2.3. FSY'lerin anten ile arasındaki uzaklık değerleri ve sıfır faz frekansları..... 51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

β	:	Serbest uzay faz sabiti
θ	:	Azimut açısı (°)
φ	:	Yükselme açısı, (°)
λ	:	Serbest uzay dalga boyu, (m)
$\emptyset_{FSY}$	:	FSY'den yansıyan dalganın fazı (°)
$\emptyset_{R}$	:	R düzleminden yansıyan dalganın fazı (°)
$\emptyset_{T}$	:	T düzleminden yansıyan dalganın fazı (°)
τ	:	İletim katsayısı
Γ	:	Yansıma katsayısı
D_x	:	x yönünde birim hücre uzunluğu, (mm)
D_y	:	y yönünde birim hücre uzunluğu, (mm)
E^i	:	Gelen düzlem dalganın genliği, (V)
E^r	:	Yansıyan düzlem dalganın genliği, (V)
E^t	:	İletilen düzlem dalganın genliği, (V)
f_{ang}	:	Farklı geliş açısı için elde edilen frekans (Hz)
f_r	:	Yüzey normali doğrultusunda gelen dalga ile elde edilen rezonans frekansı (Hz)
Δf	:	Bağıl frekans sapması
H(s)	:	Transfer fonksiyonu
Z_L	:	Yük empedansı, (Ohm)

Kısaltmalar

AGF	:	Alçak Geçiren Filtre
CPW	:	Coplanar Waveguide (Eşdüzlemsel Dalga Kılavuzu)
DARPA	:	Defense Advanced Research Project Agency (Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı)
EBA	:	Elektromonyetik Bant Aralığı
EMC	:	Electromagnetic Compability (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMI	:	Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
FCC	:	Federal Communication Commission (Federal Haberleşme Komisyonu)
FSY	:	Frekans Seçici Yüzey
IEEE	:	The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
MİY	:	Mükemmel İletken Yüzey
TE	:	Transeverse Electric (Enine Elektrik)
TM	:	Transeverse Magnetic (Enine Mantetik)
UGB	:	Ultra Geniş Bant
YGF	:	Yüksek Geçiren Filtre

ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT YÖNTEMLER KULLANARAK YÜKSEK KAZANÇLI ANTEN TASARIMI

ÖZET

Son yıllarda ultra-geniş bantlı (UGB) kablosuz haberleşme ve radar sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak düşük maliyetli mikrodalga devre elemanlarının tasarımı ve üretimi araştırmacılar tarafından ele alınan önemli konulardan biri haline gelmiştir. UGB antenler bu elemanların başında gelmektedir. UGB antenler, UGB radarlar ve yüksek veri hızlı kablosuz haberleşme sistemleri gibi birçok sivil ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler, küçük boyutları, düşük maliyetleri ve üretim kolaylığı sebebiyle gerek sivil gerekse askeri uygulamalarda sıklıkla tercih edilen antenlerdir. Ancak mikroşerit antenlerin kazançlarının düşük ve bant genişliklerinin dar olması dezavantajdır.

Bu tez çalışmasının amacı, UGB radar sistemlerinde kullanılan mikroşerit antenlerin kazancını artırmaya yönelik tasarım yapmak ve tasarlanan yüksek kazançlı antenlerin deneysel ölçümlerini gerçekleştirmektir. Çalışma üç aşamadan oluşmaktır. İlk aşamada anten kazancını artırmada kullanılacak Frekans Seçici Yüzey (FSY) tasarımı ve FSY'lerin çalışmasını etkileyen parametreler incelenmiştir. İkinci aşamada mikroşerit antenin yapısı üzerinde değişikler yapılarak kazancın artmasını sağlayan tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş ve yapısal parametrelerin değişiminin kazanç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üçüncü aşamada ilk iki bölümde gerçekleştirilen tasarımlar bir arada kullanılarak yüksek kazançlı, ultra geniş bantlı anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise tasarlanan FSY'ler ve antenler üretilerek ölçümleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Frekans Seçici Yüzey, Kazanç Arttırma, Mikroşerit Anten, Ultra Geniş Bant.

HIGH GAIN ANTENNA DESIGN USING HYBRIT METHOD FOR ULTRA WIDE BAND RADARS

ABSTRACT

In recent years, the design and production of low cost microwave circuit elements in parallel with the development of ultra-wideband (UGB) wireless communications and radar systems has become one of the important issues addressed by researchers. UGB antennas are at the top of these elements. UGB antennas, UGB radars, and high data rate wireless communication systems are used in many civil and military applications. Microstrip antennas are often preferred antennas in civilian and military applications due to their small size, low cost and ease of production. However, it is disadvantageous that the gain of microstrip antennas is low and the bandwidth is narrow.

The aim of this thesis is to design the microstrip antennas used in UGB radar systems to enhance the gain and to make experimental measurements of the designed high gain antennas. The study consists of three stage. In the first stage, the frequency selective surface design to be used to increase antenna gain and the parameters affecting the operation of FSYs have been investigated. In the second stage, design studies were carried out to increase the gain of the microstrip antenna by making modifications on the ground plane structure and the effects on the antenna gain of the structural parameters change were examined. In the third stage, designs in the first two stage has been combined together to design a high-gain, ultra-wideband antenna. Finally, the designed FSYs and antennas were produced and measurements were made.

Key words: Frequency Selective Surface, Gain Enhancement, Microstrip Antenna, Ultra Wide Band.

GİRİŞ

Ultra Geniş Bant teknolojisinde, iletişim için çok kısa süreli darbeler kullanıldığından veriyi iletmek için geniş bir frekans spektrumuna ihtiyaç duyulur. Düşük güç spektral yoğunluğu özelliği olan UGB sistemleri, diğer haberleşme sistemleri için ayrılmış olan frekansların spektrumlarını diğer sistemlerle en düşük seviyede karışma ya da hiç karışma olmadan kullanabilmektedir [1]. Aslında UGB haberleşmesi yeni bir teknoloji olmamasına karşın, bu teknoloji 1960-1990 yılları arasında sadece askeri uygulamalarla sınırlanmıştır. 2002 yılında Amerikan Ulusal Haberleşme Komisyonunun (Federal Communication Commission-FCC) 3,1−10,6 GHz frekans bandını ticari kullanıma açmasıyla bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Bu tarihten itibaren, bu frekans aralığında çalışacak haberleşme sistemleri için anten, filtre, frekans seçici yüzey tasarımı, radar kesit alanı azaltma, kazanç artırma içeren çalışmalar literatürde hızla yerlerini almaya başlamıştır.

Gönderilen işaretin geri dönüş zamanının hesaplanmasının kısa süreli darbelerde çok daha kolay olması nedeniyle, radar uygulamalarında UGB teknolojisinden yararlanılmaktadır. Bu sebeple, UGB radar teknikleri literatür ve uygulamada yerini almaktadır. Duvar arkası görüntüleme, yeraltı geçitleri ve tünel görüntüleme, yer altı patlayıcı görüntüleme, radar kesit alanı kavramı ve radar performans analizi, deniz kargaşası analizleri, mesafelerin tam hassasiyetli ölçümleri, medikal görüntüleme gibi alanlar UGB radar tekniklerinin uygulama alanlarıdır. Son yıllarda UGB kablosuz haberleşme ve radar sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak düşük maliyetli mikrodalga devre elemanlarının tasarımı ve üretimi araştırmacılar tarafından ele alınan önemli konulardan biri haline gelmiştir. UGB antenler bu elemanların başında gelmektedir. UGB antenler, UGB radarlar ve yüksek veri hızlı kablosuz haberleşme sistemleri gibi birçok sivil ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır [2].

Mikroşerit anten kavramı ilk olarak 1953'de Deschams tarafından ortaya konulmuş olsa da, iyi dielektrik tabakaların mevcut olmamasından dolayı, ilk uygulamalar 1970'lerde Munson ve Howell tarafından gerçekleştirilmiştir [3]. Mikroşerit antenler düşük profil, hafiflik, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve entegrasyon kolaylığı gibi

avantajlara sahiptirler. Bu avantajlarından dolayı uydu sistemleri, küresel konumlama sistemi, kablosuz haberleşme sistemleri ve radar sistemlerinde tercih edilmektedir. Ancak, mikroşerit antenlerin dar bant genişliği, düşük verimlik ve düşük kazanç gibi dezavantajlara sahip olmaları, uygulama alanlarında kısıtlamalara neden olmaktadır. Bu eksiklikleri gidermek için son zamanlarda birçok çalışma yapılmıştır.

Bir antenin ultra geniş bantlı olup olmadığı konusunda kabul edilen iki yaklaşım vardır. Defense Advanced Research Project Agency (DARPA) tarafından 1990'da açıklanan rapora göre UGB antenin kesirsel bant genişliğinin 0,25 olması, 2002 yılında FCC'nin yayınladığı rapora göre ise kesirsel bant genişliğinin 0,2 olması gereklidir. Dar bant genişliği sorunu yama üzerine veya toprak düzlemi üzerine yapılan farklı slot şekilleri ve parazitik elemanlar sayesinde büyük ölçüde çözüme kavuşturulabilmektedir. Literatürde bant genişliğinin artırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yer alırken, kazanç artırma teknikleriyle ilgili çalışmaların sayısının az olması ve yapılan çalışmaların son birkaç yılda yoğunlaşması, bu konunun günümüzde de ilgi odağı olduğunun göstergesidir. Kazancın yüksek olması UGB haberleşme sistemlerinde çok aranan bir özellik değildir ancak UGB radar uygulamalarında anten kazancının yüksek olması gerekmektedir.

Literatürde dar bantlı mikroşerit antenlerin kazancının artırılmasına yönelik birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların bir kısmında, antenin ön kısmına parazitik elemanlar eklenerek kazanç artırılmaktadır [4-6]. Dar bantlı mikroşerit antenlerde, anten yüzeyine kısa horn yerleştirilerek kazanç artırılmıştır. Kazanç artarken bant genişliğinin azaldığı gözlenmektedir [7-8]. Dar bantlı antenlerde, bant genişliğindeki azalma kabul edilebilir limitlerde olmasına karşın, geniş bantlı antenlerde bandın ciddi oranda daralmasına sebep olacağı için, UGB antenlerde kazanç artırımı için kullanılabilir bir yöntem değildir.

Bu tezin amacı, 3,1−10,6 GHz frekans aralığını kapsayan UGB radar sistemlerinde kullanılabilecek yüksek bir kazanç grafiğine sahip anten tasarımı yapmaktır. Son yıllarda literatürde UGB antenlerde kazanç artırmaya yönelik çalışmalar da yerlerini almaya başlamışlardır. Eliptik konik açıklığa sahip yapıdaki antenlerin kazancı yüksek olduğundan bu antenler üzerinde yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu antenlerde, anten üzerinde yapılan çeşitli geometrik şekillerdeki çentikler ile kazanç artırma

çalışmaları yapılmıştır [9-11]. Boyuna ışıma yapan bu antenlerde hibrit yöntemlerle kazancı daha fazla artırmak mümkün değildir.

Literatürde var olan örnekler incelendiğinde, kazancı artırabilmek için çentikler açıldığı ya da antenin toprak düzlemi üzerinde değişiklikler yapıldığı görülmektedir [12-16]. Bu yöntemler ile yüksek frekans bölgelerinde kazanç artırılabilmektedir. Alt frekans bölgelerindeki kazancı artırabilmek için çentikler açmak, Frekans Seçici Yüzey (FSY) , Elektromanyetik Bant Aralığı (EBA) ya da meta malzeme gibi yapıları anten altına ya da üstüne yerleştirmek gibi yöntemler kullanılmaktadır [17-18].

Literatürde UGB anten kazancı artırma uygulamaları için birçok tek tabakalı ve çok tabakalı FSY tasarımları bulunmaktadır. [19] numaralı kaynakta tek tabaka kullanılarak 10mm×10mm boyutlarındaki birim hücresi kare döngü ve Jerusselam dipol elemanlarından oluşmuş birim hücre ile 3−20 GHz frekans aralığı için 4−5 dB kazanç artışı sağlanmıştır. [20] numaralı kaynakta 14mm×14mm boyutlarında tek tabakalı UGB bandında çalışan FSY reflektör ile anten kazancını artıran bir çalışma verilmiştir. [21] de sunulan çalışmada çift tabakalı 17mm×17mm boyutlarındaki birim hücresi kare döngü ve çapraz dipol elemanlarından oluşmuş 4−12 GHz frekansları arasında çalışan bir FSY'dir. Bu FSY UGB slot anten arkasına yerleştirilerek UGB bant boyunca antenin ortalama kazancı 7,5 dBi seviyesine çıkmıştır. [22] ile verilen çalışmada 3 tabaka ile 2,81–11,2 GHz aralığında 4−5 dB kazanç sağlayan kare döngülerden oluşan bir FSY yansıtıcı önerilmiştir. [23] de sunulan çalışmada 4 tabaka kullanılarak tasarlanan FSY yansıtıcı ile ±0,5 dBi değişen maksimum 9,3 dBi kazançlı anten verilmiştir.

Bu tez çalışmasında farklı frekans aralığında çalışan birçok özgün FSY tasarımları ile UGB anten tasarımları sunulmuştur. UGB antenlerin kazancını artırmak için iki yol izlenmiştir. Önce antenin toprak düzlemi üzerinde değişiklikler yapılarak kazancı artırmaya yönelik tasarımlar verilmiştir. Tasarımlarda antenin çalışmasına etki eden parametreler için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra farklı frekanslarda ve farklı özelliklere sahip FSY'lerin anten arkasına yerleştirilmesiyle anten kazancına nasıl bir katkı sağladığını ortaya koymak amacıyla benzetimler yapılmıştır. Literatür incelendiğinde yayınlarda, antenin kazancını artırmak için mükemmel iletken yüzey (MİY) yerine FSY kullanmanın daha avantajlı olduğu söylense de hem FSY hem de

MİY kullanılarak yapılmış karşılaştırılmalı çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple FSY yerine FSY ile aynı boyuta sahip MİY aynı uzaklığa konularak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca açılı FSY'lerin ve açılı MİY'lerin anten kazancını artırma üzerindeki etkilerini incelemek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan tasarım ve benzetimlerin doğruluğunu test etmek amacıyla FSY'lerin ve antenlerin ölçümleri yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre en yüksek kazancı elde etmeyi sağlayan anten ve FSY için anten kazancı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 1'de Frekans Seçici Yüzeylerin genel özellikleri, tasarımda rol oynayan önemli etkenler açıklanarak yapılan özgün tasarımlar ve benzetimleri sunulmuştur. Bölüm 2'de tasarlanan ultra geniş bantlı antenlerin toprak düzlemi üzerinde yapılan değişikler ile kazanç artırımı sağlanması ve FSY'lerin anten kazancına etkisi tasarlanan özgün FSY yansıtıcının anten arkasına yerleştirilmesi ile kazanç artışı elde edilmesine yer verilmiştir. Bölüm 3'de tasarlanan tüm FSY'lerin iletim katsayısı ölçümleri ile tasarlanan antenlerin yansıma katsayısı, ışıma diyagramları ve kazanç ölçümlerinin sonuçları verilmiştir. Bölüm 4'te ise sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

1. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

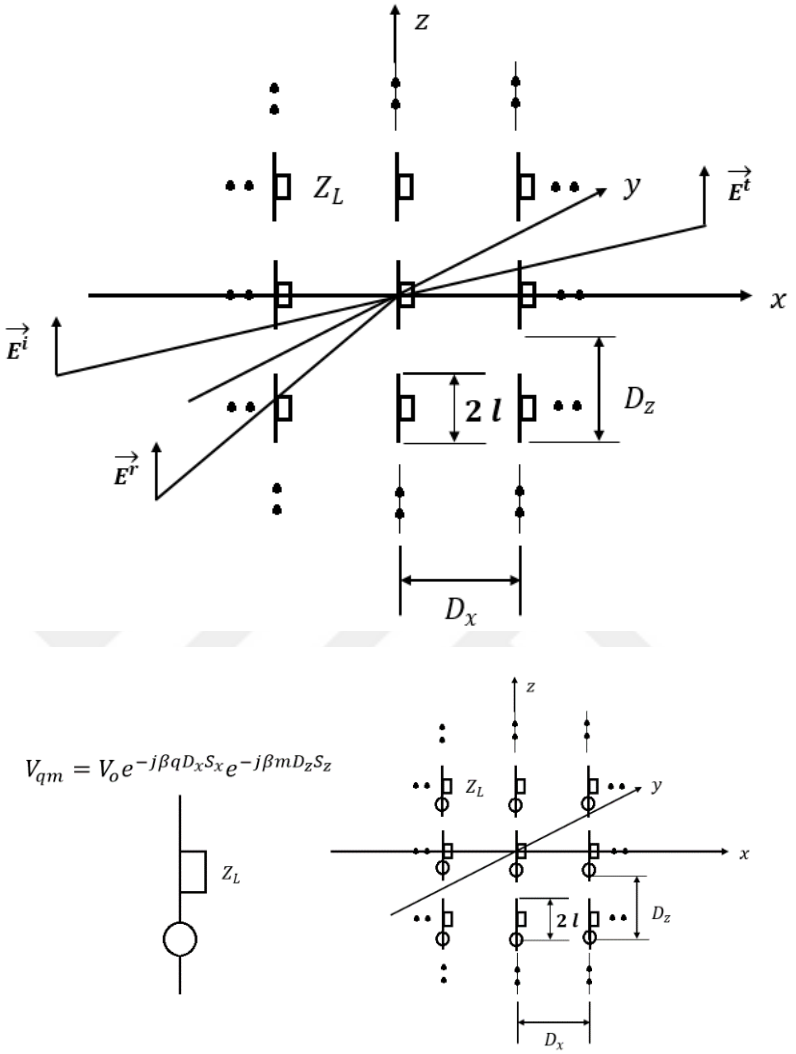
Frekans Seçici Yüzey (FSY) teknolojisi, mikrodalga endüstrisi, havacılık, tıp ve gayrimenkul gibi çeşitli alanlarda potansiyel uygulamalara sahiptir [24−28]. Tıp alanında cihazlardaki elektromanyetik girişimi engellemek için kullanılırken, binalarda daha iyi kablosuz iletişim sağlamak ve istenmeyen sinyaller nedeniyle EMI/EMC'yi azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Havacılık alanında FSY'ler radomlar ve yansıtıcı antenlerin performansını artırmak ve radar kesit alanını azaltmak için kullanılmaktadır. Mikrodalga endüstrisinde ise anten kazancı, yönlülük ve bant genişliği gibi parametrelerin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır.

Frekans seçici yüzey, dielektrik bir malzeme üzerine kazınmış açıklık ya da metal yamalardan oluşan iki boyutlu bir periyodik dizi olarak tanımlanan uzamsal elektromanyetik filtredir. İstenen frekansta rezonansa girmesi için tasarlanan FSY yapıları spektral seçiciliğe sahiptir [29].

Şekil 1.1'de teorik analiz için yük empedansı Z_L olan dipol elemanları, elemanlar arası uzaklığı D_x ve D_z olan dikdörtgen şeklinde düzenlenen bir dizi örneği gösterilmektedir. Dizi elemanları dipol ya da slot (açıklık) şeklinde olabilir. Dipol ya da slot elemanı olması arasındaki temel fark, dipol elemanı olması halinde elektrik akımı ile uyarım yapılırken slot elemanı olması halinde manyetik akım ile uyarım yapılmasıdır. Dipol elemanın uzunluğu gelen dalganın dalga boyunun yarısına eşit olduğunda rezonansa girer. Bu tip diziler uyarım yöntemine bağlı olarak pasif ve aktif dizi olarak sınıflandırılabilir. Temelde herhangi bir periyodik dizi, gelen düzlem dalga (pasif dizi) ile ya da her bir dizi elemanına bağlı üreteçler kullanmak yoluyla iki yolla uyarılabilir. Aktif dizinin periyodik dizi olabilmesi için üreteçlerin aynı genlik ve doğrusal faz değişimine sahip olması zorunludur.

Pasif diziye gelen düzlem dalga E^i'nin bir kısmı geri yansır E^r**,** bir kısmı ileri yönde E^t iletilir. Sırasıyla E^i , E^r, ve E^t ,gelen düzlem, yansıyan ve iletilen düzlem dalganın genliğini ifade etmektedir. Rezonans durumunda yansıyan dalganın genliği gelen

dalganın genliğine eşit olur. Yansıma katsayısı Denklem (1.1)'de ve iletim katsayısı Denklem (1.2)'de görüldüğü gibi ifade edilir,



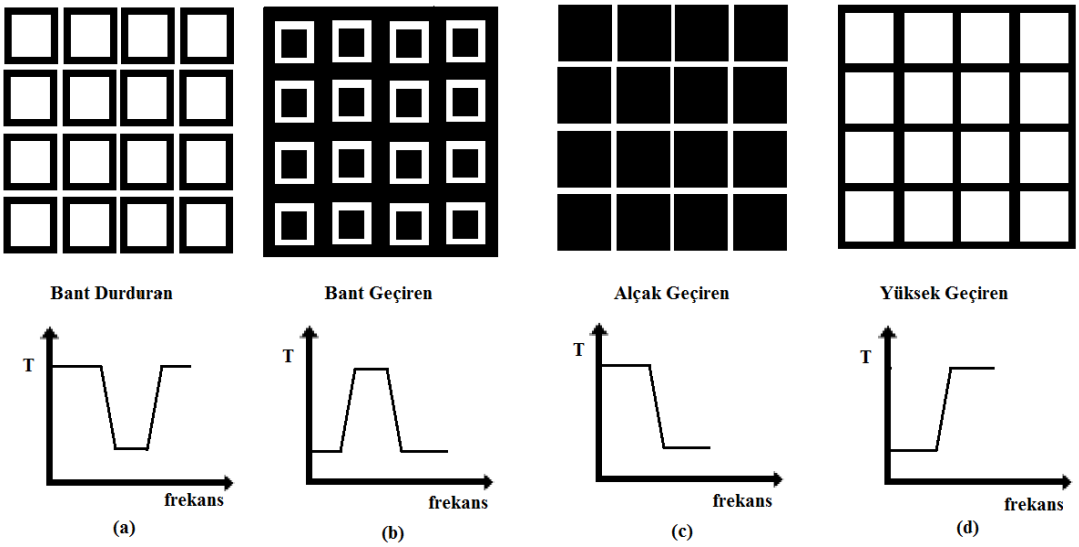
Şekil 1.1. Pasif ve aktif durum için empedansı Z_L olan dipol elemanları için periyodik yapı

$$\Gamma = {E^r}/{E^i} \tag{1.1}$$

$$\tau = {E^t}/{E^i} \tag{1.2}$$

Temelde, FSY yapıları eleman geometrisine dayalı olarak iki gruba ayrılabilir. Genellikle kapasitif FSY olarak adlandırılan ilk grup metalik yamalardan oluşur. Bu tür FSY yapıları, alçak geçiren filtre (AGF) özelliği gösterir. Diğer FSY yapısı tipik olarak bir endüktif FSY olarak bilinen bir metalik yapı üzerinde açıklıklar içerir. Bu

tip FSY yapısı, yüksek geçiren filtre (YGF) özelliği gösterir. Şekil 1.2'de yama ve açıklık elamanlarının geometrileri ve frekans yanıtları görülmektedir. FSY'nin en küçük özdeş elaman yapısına birim hücre denir. FSY üzerine gelen dalga, frekans yanıtına bağlı olarak ya iletilir ya yansıtılır. FSY filtre yanıtı esas olarak birim hücre geometrisine bağlıdır.

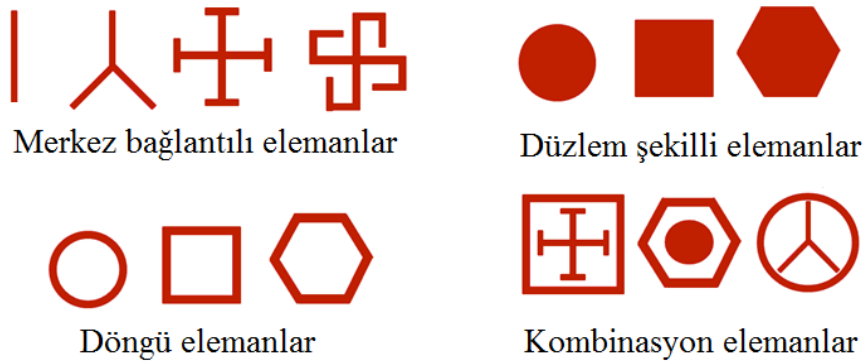


Şekil 1.2. FSS elemanları ve filtre yanıtları; (a) kare döngü− bant durduran filtre, (b) kare döngü açıklık− bant geçiren filtre , (c) kare yama eleman− alçak geçiren filtre, (d) kare açıklık eleman −yüksek geçiren filtre

FSY performansını belirleyen faktörler, FSY birim hücre geometrisi, dielektrik tabaka özellikleri ve düzlem dalganın geliş açısı olarak özetlenebilir. İki birim hücre arasındaki elemanlar arasındaki uzaklık frekansın bir fonksiyonudur. İstenmeyen ikincil hüzmelerin oluşmasını engellemek için birim hücre boyutunun, çalışma frekansı dalga boyundan küçük olması gereklidir. Birim hücre elemanı geometrisi FSY'nin performansını doğrudan belirlemektedir. Ayrıca eleman şekli geliş açısı kararlılığını, bant genişliğini, bant ayırımını ve polarizasyon bağımsızlığını da etkilemektedir. Açısal kararlılık düzlem dalga geliş açısının değişimine karşın eleman şeklinin duyarlılığını ifade eder.

Şekil 1.3'te görülen FSY'ler birim hücre geometrisine göre merkez bağlantılı, döngü, düzlem şekilli ve kombinasyon olmak üzere 4 gruba ayrılır. Merkez bağlantılı elaman şekillere örnek olarak dipol, 3 kutuplu ve Jerusalem dipol sayılabilir. Bu grup FSY elemanın bir kolunun uzunluğunun yarı dalga boyunda rezonans yapar. Döngü elamanlarına örnek olarak kare, dairesel ve altıgen döngüler örnek gösterilebilir. Bu

grup FSY elemanının toplam uzunluğuna karşılık gelen dalga boyunda rezonans yapar ve daha geniş bant genişliğine sahiptirler. Düzlem şekilli elemanlar kare, daire ya da diğer düzlem geometrik şekiller de olabilir. Son olarak kombinasyon elemanları adından da anlaşılacağı gibi diğer grup eleman şekillerinin bir arada kullanılması ile elde edilen şekillerden oluşur.



Şekil 1.3. Eleman Şekillerine göre FSY grupları

FSY tasarımında önemli noktalardan biri bant genişliğidir. Bant genişliğini artırmak için birim hücre elemanları arasındaki uzaklığın azaltılması veya dielektrik tabakanın kalınlığının artırılması önerilir. Tüm bu yöntemler bir arada kullanılabilir. Ayrıca rezonant ya da rezonant olmayan elemanların uygun şekilde bir araya getirilmesiyle yeni bir birim hücre eleman kombinasyonu elde ederek geniş bantlı frekans karakteristiği elde etmek de mümkündür.

FSY tasarımında bir diğer önemli nokta, FSY filtre karakteristiklerinin açısal kararlılığıdır. Rezonans frekansındaki dalga boyu ile karşılaştırıldığında daha küçük boyutta birim hücre tasarlamak açısal kararlılığı iyileştirmek için iyi bir yaklaşımdır. Birim hücre minyatürleştirme olarak da isimlendirilen bu yöntemde birim hücre boyutunun dalga boyuna göre en az 10:1 oranında azalması açısal kararlılık sağlaması açısından gereklidir. Ayrıca birim hücre elemanının simetrik olması, yatay ve düşey polarizasyon bağımsızlığı özelliğinin elde edilmesini sağlamaktadır.

FSY'leri mikrodalga filtre ya da anten kazancı artırmak için yansıtıcı olarak kullanmak mümkündür. Literatürde, filtre olarak kullanım söz konusu olduğunda başarım ölçütü, FSY iletim katsayısının −3 dB'nin altında kalan frekans bölgesi çalışma bölgesi olarak kabul edilir. FSY'lerin yansıtıcı olarak kullanılması için, FSY iletim katsayısının −10 dB'nin altında kalan bölgedeki frekans aralığı çalışma bölgesi kabul edilir. Bu tez

çalışmasında FSY'lerin hem bant durduran filtre hem de yansıtıcı olarak çalışması incelenmiştir. Değişik frekans bölgelerinde çalışan FSY'ler için minyatürleştirme, açısal bağımsızlık, polarizasyon bağımsızlığı, geniş bant elde etme gibi özellikler incelenerek özgün tasarımlar yapılmış, üretilmiş ve ölçülmüştür.

1.1. FSY Tasarımları

Bu bölümdeki FSY tasarımları iki farklı frekans bandı için bant durduran filtre özelliği sergilemektedir. Bu frekans bantları 8−12 GHz aralığı olan X bant ve 3,1−10,6 GHz aralığı olan ultra geniş banttır. X bant aralığı için FSY'nin iletim karakteristiğinin −3dB'nin altında kalan frekansları referans alınmıştır. Ultra geniş bant aralığı için iki tipte tasarım yapılmıştır. Bunlardan ilk ikisi −3 dB referanslı açısal kararlılığa sahip FSY'lerdir. Diğeri ise −10 dB referanslı FSY yansıtıcıdır. Bütün FSY tasarımlarında öncelikle birim hücre eleman yapısı, frekans cevabı özellikleri ve tasarım süreci detaylı olarak incelenecektir. İletim karakteristiğinde −3dB referans alındığında, bir dielektrik tabaka kullanarak tasarım yapmak kolaydır. Ancak iletim karakteristiği frekans yanıtının zayıflamasının yüksek ve geçiş bandında sıfıra yakın düz bir karakteristiğe sahip olması için birden fazla dielektrik tabaka kullanılmalıdır. Yine tek bir dielektrik tabaka kullanılarak ultra geniş bant için −10dB referans alındığında literatürde bulunan temel eleman yapıları ile tasarım yapmak bu alanın sınırlayıcı problemidir. Bu problem, bilinen birim hücre elemanlarının uygun boyutlarda bir araya getirilerek yeni ve özgün eleman yapıları oluşturulması ile çözülebilmektedir. Tasarım ve benzetim çalışmaları CST Microwave Studio programı ile yapılmıştır. Programda benzetim kolaylığı için metalik yüzeyler sıfır kalınlıklı mükemmel iletken seçilmiştir.

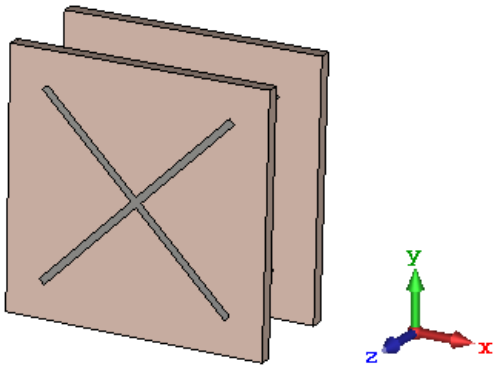
1.1.1. X bant FSY tasarımı ve parametrik çalışmaları

Bu bölümde X bant 8−12 GHz frekans aralığında çalışan bant durduran filtre tasarımı ve benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Tasarım aşaması ve parametrik çalışmalar ile FSY frekans karakteristikleri, polarizasyon ve açısal kararlılık açısından incelenmiştir.

Literatürde birim hücre boyutunu küçültmek için hem çok tabakalı hem tek tabakalı FSY'lerde katlanmış slot yapıların, fraktal yapıların kullanıldığı, kare döngülerin kendi içlerine doğru metal şeritlerin yerleştirildiği ya da metal şeritlerin içe doğru

büküldüğü tasarımlar görülmektedir [30−35]. [36] numaralı kaynakta X bant için modifikasyon yapılmış halka geometrisine sahip bant geçiren açısal olarak kararlı bir FSY tasarımı verilmiştir. Diğer bir çalışmada 30 GHz'e kadar harmonik içermeyen minyatürize bant geçiren bir FSY tasarımına yer verilmiştir [37]. [38] numaralı kaynakta tek bir tabaka üzerinde değişken kapasite kullanılarak yüksek dereceli minyatür FSY tasarımı üzerine çalışılmıştır. [39] numaralı kaynakta üç katmanlı çift bantlı yüksek dereceli bant geçiren FSY sunulmuştur. Diğer bir çalışmada, çift bant frekans seçiciliği yüksek bantları birbirine yakın bant durduran özelliğe sahip bir FSY tasarımı verilmiştir [40]. Literatürde çoğunlukla bant geçiren minyatürize FSY çalışmalarına rastlanmaktadır. Bu tez çalışmasında sunulan X bant FSY, hem kararlı rezonans frekansına hem de eğik geliş açılarına karşı bağımsız iletim karakteristiğine sahiptir. Bu anlamda tasarım özgün bir değer taşımaktadır. Bu çalışma IET Microwaves, Antennas & Propagation dergisinde yayınlanmıştır [41].

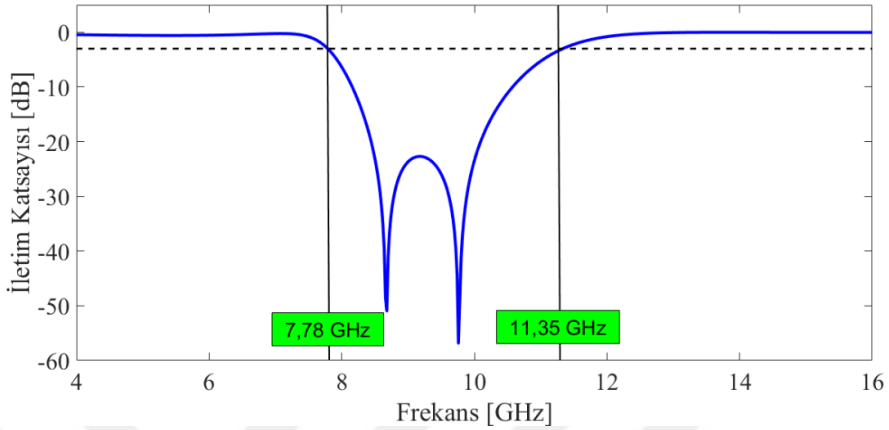
Minyatürize FSY yapısı tasarımına çapraz dipol elamanı ile başlanmıştır. Dipol elemanlar bant durduran filtre cevabına sahiptirler. Bu eleman yapısı iki dielektrik tabaka kullanılarak oluşturulmuş bant durduran FSY yapısı Şekil 1.4'te görülmektedir. Tasarımda kullanılan tabakanın kalınlığı 0,762 mm ve dielektrik sabiti 2,2'dir. Birinci tabakadaki çarpı dipol kol uzunluğu 14,8 mm, ikinci tabakadaki çarpı dipol kol uzunluğu ise 13,6 mm'dir. FSY elemanının birim hücresi kare şeklinde olup bir kenarının uzunluğu 14,5 mm'dir. İki tabaka arasındaki uzaklık ise 6 mm'dir.



Şekil 1.4 Çarpı dipol FSY birim hücre yapısı

Tasarlanan FSY elemanına ait iletim karakteristiği Şekil 1.5'te görülmektedir. İletim karakteristiğinden de görüldüğü gibi birinci rezonans frekansı 8,68 GHz, ikinci rezonans frekansı 9,72 GHz'dir. Bant durduran filtre karakteristiği gösteren FSY'nin

7,78−11,35 GHz frekansları arasındaki 3 dB bant genişliği 3,57 GHz'dir. Bu tasarımdaki FSY yaklaşık olarak X bantta çalışmaktadır ve 20 GHz'e kadar olan frekans bölgesinde kendini tekrarlamamaktadır.

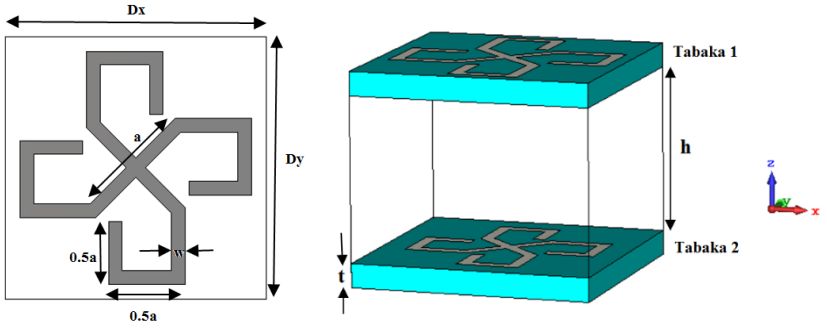


Şekil 1.5. Çarpı dipol FSY elemanına ait iletim karakteristiği

Şekil 1.6' da birim hücre yapısı görülen FSY elemanı, X bant frekansında çalışan, düzlem dalganın geliş açısına karşı kararlı, bant durduran filtre karakteristiği özelliğine sahiptir. Birim hücre geometrisine ait uzunluklar Tablo 1.1'de verilmiştir. Kullanılan tabakanın dielektrik sabiti 2,2 ve kalınlığı 0,762 mm'dir. D_x ve D_y birim hücrenin boyutlarıdır. FSY'nin periyodikliği de denilen D_x ve D_y uzunluklarının yeterince küçük seçilmesiyle frekans karakteristiğindeki istenmeyen tekrarlamaların oluşması önlenir. Tasarım iki dielektrik tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakaların sadece birer yüzlerinde birim hücreler bulunmaktadır. Her iki tabaka üzerinde bulunan birim hücre boyutları ve geometrik şekilleri aynıdır. Ancak iki farklı rezonans frekansı elde edebilmek amacıyla iletken kolların boyları farklı alınmıştır. İki tabaka arasındaki uzaklık h, 6 mm'dir.

Tablo 1.1. FSY birim hücre geometrik parametreleri [mm]

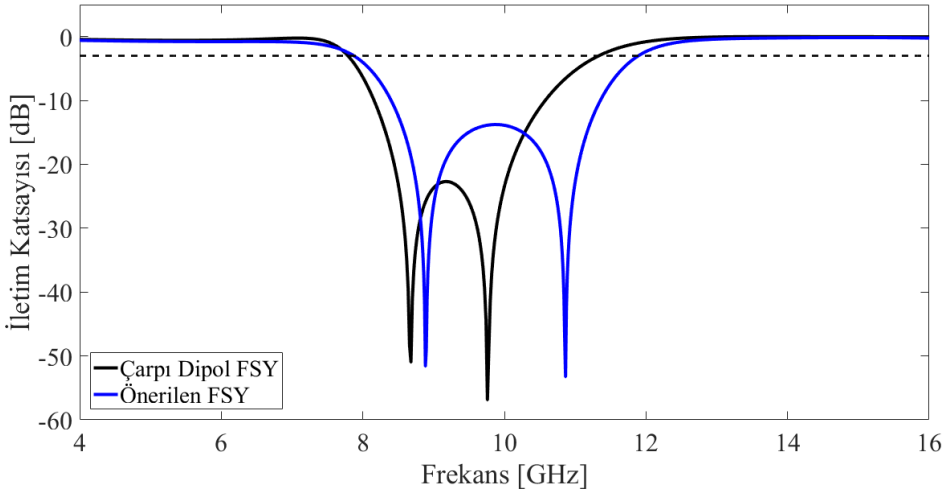
	D_x	D_y	a	w	t
Tabaka 1	7,7	7,7	3,7	0,4	0,762
Tabaka 2	7,7	7,7	3,2	0,4	0,762



Şekil 1.6. FSY birim hücre geometrisi

Geometrik yapısı Şekil 1.6 'da sunulan FSY'nin benzetimleri CST MWS programı ile yapılmıştır. Geleneksel çarpı dipol FSY ile yaklaşık olarak aynı kol uzunluk değerlerine sahip yeni tasarlanan FSY'nin iletim karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 1.7'de çarpı dipol FSY ile önerilen FSY yapıya ait iletim karakteristikleri görülmektedir. Çarpı dipol FSY 7,95−11,51 GHz frekansları arasında, tasarlanan FSY ise 7,94 GHz ile 11,53 GHz frekansları arasında bant durduran filtre karakteristiğine sahiptir. −3 dB bant genişlikleri ise neredeyse eşittir.

Tasarlanan minyatürize FSY ile çarpı dipol birim hücre boyutları Tablo 1.2 'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi önerilen FSY'nin birim hücre alanı %75 daha küçüktür. Minyatürleştirme yalnızca birim hücre alanında küçülme sağlanmakla kalmayıp büyük geliş açıları için hem iletim karakteristiğinin sabit kalmasını sağlamakta hem de frekans kararlılığı elde edilmesine katkı vermektedir.



Şekil 1.7. Çarpı dipol FSY ile önerilen FSY yapıya ait iletim karakteristikleri

Tablo 1.2. Minyatürize FSY ile çarpı dipol FSY birim hücre boyutlarının karşılaştırılması

FSY tipi	w	$D_x - D_y$	BirimHücreAlanı [mm^2]
Tasarlanan FSY	0,4	7,7	60,06
Çarpı dipol FSY	0,4	15,5	240,25

Literatür incelendiğinde filtrelerin derecesinin kullanılan dielektrik tabaka ile belirlendiği görülmektedir. Oysaki FSY iletim katsayısının transfer fonksiyonunun kutup−sıfır değerleri hesaplanarak filtrenin derecesinin daha doğru bir biçimde saptanabileceği düşüncesi ile yola çıkılıp, aşağıda verilen MATLAB kodu yazılmıştır. Literatürdeki çalışmalara göre ikinci dereceden bir filtre olarak değerlendilirken gerçekte sekizinci dereceden bir filtre yapısına sahiptir. CST MWS programı ile elde edilen iletim katsayısının genlik ve faz değerleri kullanılarak filtrenin transfer fonksiyonu ve derecesini kestiren MATLAB kodu Şekil 1.8'de verilmiştir.

Şekil 1.8'de verilen kod kullanılarak önerilen FSY yapısına en uygun transfer fonksiyonu Şekil 1.9'da görüldüğü gibi kutup ve sıfır sayısı 8 olduğu zaman elde edilmiştir, yani önerilen FSY yapısı sekizinci dereceden filtre özelliği göstermektedir. FSY'nin filtre derecesinin yüksek olması, geçirme bandının geniş bir bölge boyunca sıfıra yakın ve düz olmasını sağlamaktadır.

```
%Frekans domeni verileri kullanarak transfer fonksiyonu kestirimi
clc;clear;
PHASE_FREQ=load('phase.txt');
MAG_FREQ=load('s21.txt');
Gr_FREQ=load('real.txt');
Gi_FREQ=load('imag.txt');

CPX=Gr_FREQ(:,2)+1j*Gi_FREQ(:,1)
MAG=MAG_FREQ(:,2); FRQ=MAG_FREQ(:,1)
PHASE=PHASE_FREQ(:,2);DATA=frd(CPX,FRQ);

%------- Optimum transfer fonksiyonu kestirimi-----------------%
%-----------------------------------------------------------------%
if(1)
    ind=0
    for np=5:8
        for nz=5:8

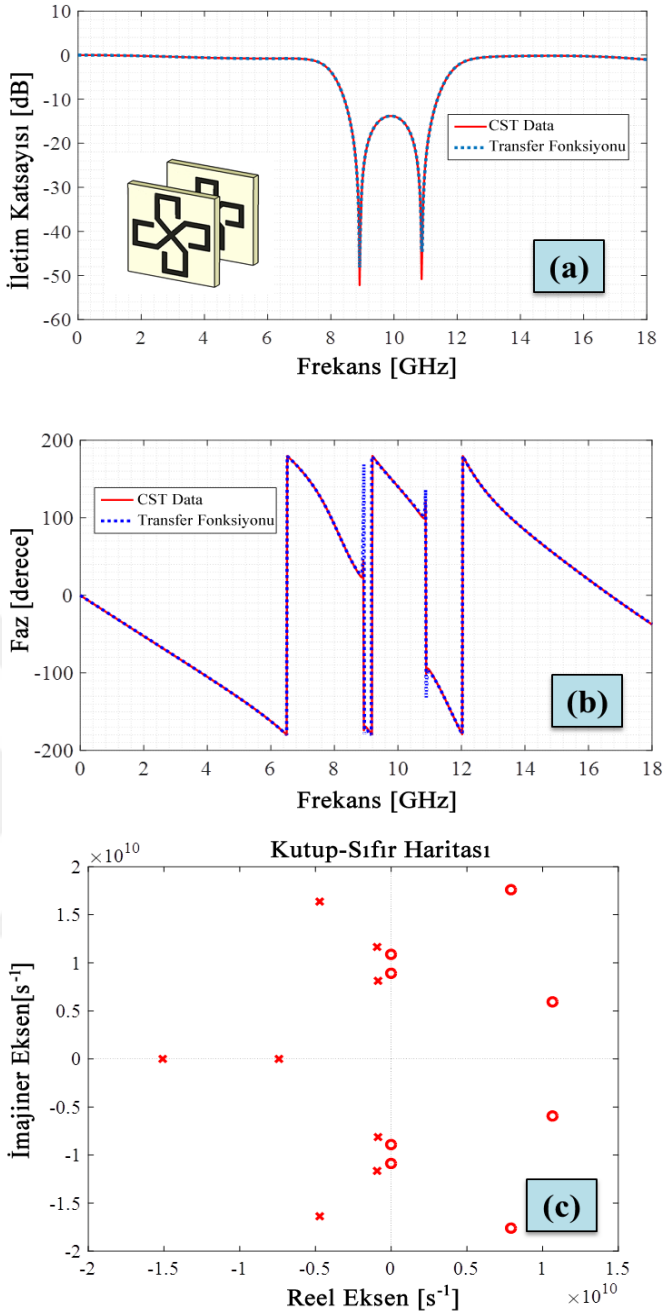
GON_TF=tfest(DATA,np,nz);[M(:),P(:)]=bode(GON_TF,FRQ)
            for i=1:size(P,2)
                while(P(i)>180),P(i)=P(i)-360;end
            end
            %-------------------------------------------------
            ind=ind+1;disp([ind np nz])
            figure;
            subplot(2,1,1);hold on
            plot(FRQ,MAG,'b','LineWidth',3);
            plot(FRQ,20*log10(M),'R','LineWidth',3)

title(strcat('kutup=',numt2str(np),'sıfır=',num2str(nz)))
            label('Frekans[GHz]');ylabel('İLetim Katsayısı[dB]')
            subplot(2,1,2);hold on
            plot(FRQ,PHASE,'b','LineWidth',3)
            plot(FRQ,P,'r','LineWidth',3)
            xlabel('Frekans[GHz]');ylabel('Faz [derece]')
        end
    end
end
%-----------------------------------------------------------------%
```

Şekil 1.8. Transfer fonksiyonunu kestiren MATLAB kodu

Şekil 1.9'da, FSY'nin CST ile elde edilen transfer katsayısı ve faz grafikleri, MATLAB kodu ile elde edilen transfer fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır ve ilgili transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfırların yerleşimi verilmiştir. Sekizinci dereceden filtre karakteristiği gösteren FSY yapısına ait transfer fonksiyonu ise Denklem (1.3)'de verildiği gibidir;

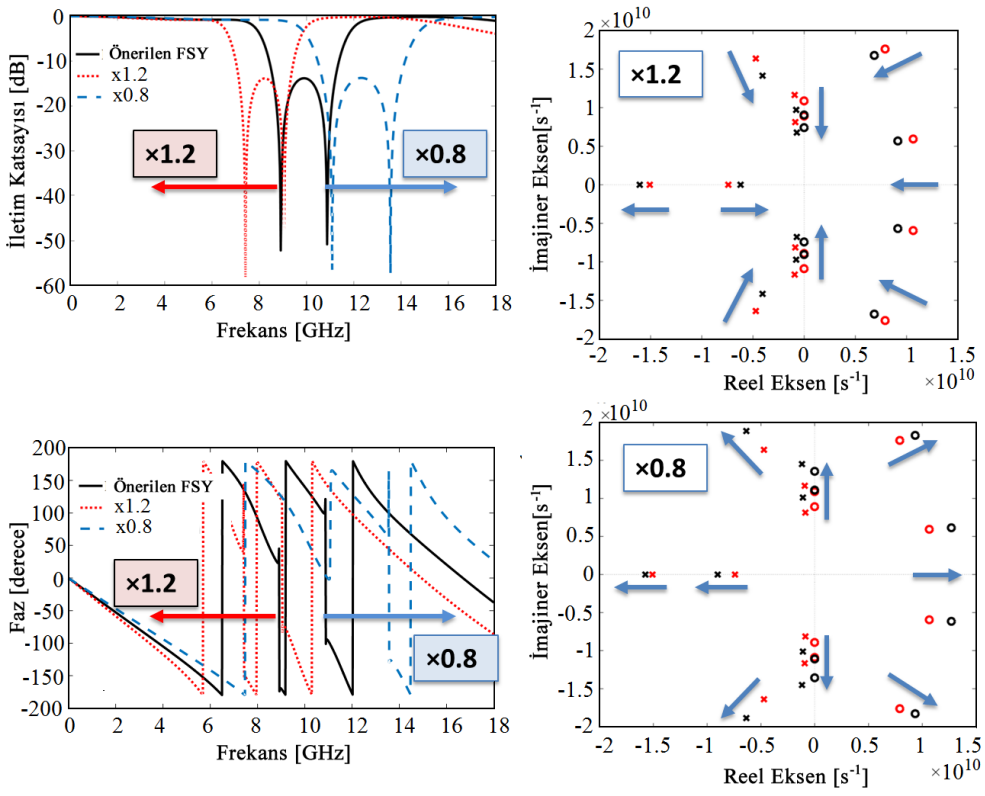
$$H(s)=\frac{0{,}6.s^{8}-2{,}1.e^{10}.s^{7}+6e^{20}.s^{6}-.e^{31}.s^{5}+1{,}3.e^{41}.s^{4}-1{,}3.e^{51}.s^{3}+1{,}1.e^{61}.s^{2}-5{,}5.e^{70}.s+3.e^{80}}{s^{8}+3{,}6.e^{10}.s^{7}+9{,}4.e^{20}.s^{6}+1{,}7e^{31}.s^{5}+2{,}1e^{41}.s^{4}+2{,}2.e^{51}.s^{3}+1{,}5.e^{61}.s^{2}+8{,}1.e^{70}.s+3.e^{80}} \quad (1.3)$$



Şekil 1.9. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen FSY yapısına ait (a) iletim katsayısı (b) faz grafikleri ve (c) fonksiyonunun sıfırlarının ve kutuplarının yerleşimi

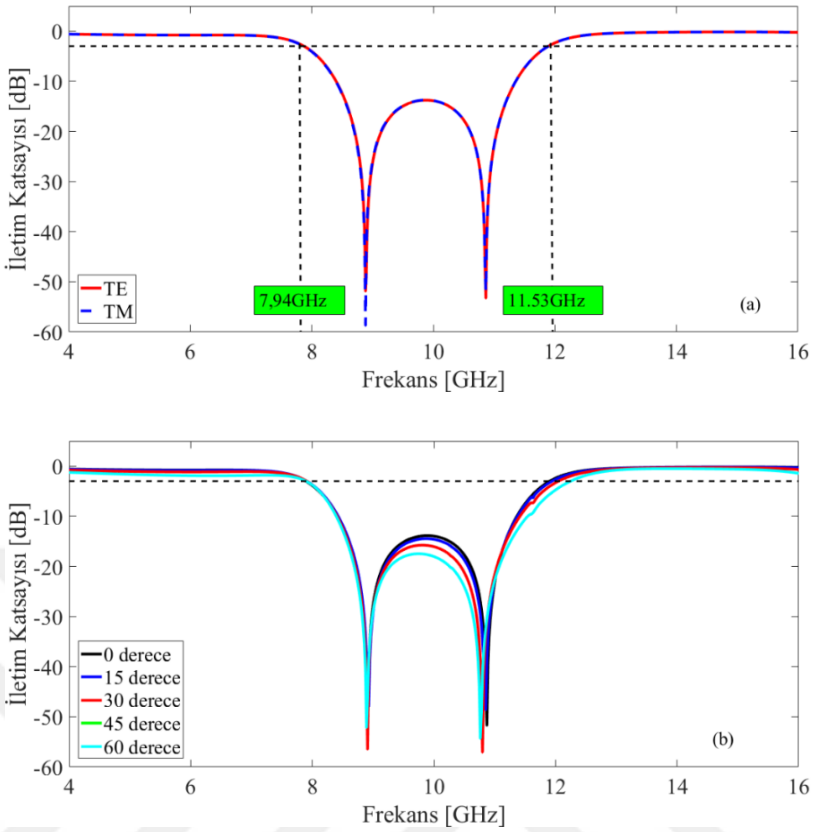
Transfer fonksiyonu ve kutup−sıfır haritası kullanılarak, FSY'nin karakteristiği, hangi parametrelerin filtrenin hangi özelliklerini değiştirildiği tespit edilebilir. FSY yapıları, çentik filtre gibi davrandıkları için, filtre tasarım ve incelemelerinde kullanılan teknikler FSY yapılarında da kullanılabilir. Örnek olarak, Şekil 1.10'da, FSY yapısının 0,8 kat ve 1,2 kat ölçeklenmesi durumunda genlik, faz ve kutup−sıfır haritası

değişimleri verilmiştir. Gerek bu karakteristiklerin incelenmesi gerekse transfer fonksiyonları, FSY parametrelerinin karakteristiklerini nasıl etkilediği konusunda bilgi vermektedir.



Şekil 1.10. FSY yapısının 0,8 kat ve 1,2 kat ölçeklenmesi durumunda genlik, faz ve kutup−sıfır haritası

FSY iletim karakteristiğinin frekans ile değişmesi istenen bir durum değildir. Ayrıca iletim karakteristiğinin bant dışında sıfıra yakın ve düz olması, zayıflama oranının da yüksek olması istenir. Şekil 1.11 (a) da −3 dB durdurma bandının 7,94−11,53 GHz frekansları arasında olduğu görülmektedir. İletim sıfırları, 8,91 GHz ve 10,87 GHz'dir. Durdurma bandı dışında kalan geçirme bandında iletim karakteristiği düz ve neredeyse sıfıra eşit olup alt geçirme bant genişliği 7,94 GHz üst geçirme bant genişliği 8,67 GHz'dir. Tasarlanan FSY'nin açısal kararlılığını incelemek için FSY farklı açılarda eğik düzlem dalgalar ile uyarılmıştır. Şekil 1.11'de TE polarizasyonda 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° geliş açıları için iletim katsayısı verilmiştir.



Şekil 1.11. İletim katsayısı benzetimleri (a) yüzey normali doğrultusunda gelen dalga için (b) 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° geliş açıları için TE modu için

Tasarlanan FSY farklı polarizasyon ve geliş açıları için kararlı bir performans sergilemektedir. Tablo 1.3'te iletim sıfırlarının frekans sapma değerleri verilmiştir. En büyük bağıl sapma değeri, 10,87 GHz'deki TE polarizasyonlu 60°'lik geliş açısı için %1,28 olarak elde dilmiştir. Bağıl frekans sapması Denklem (1.4) ile hesaplanır;

$$\Delta f = \left|\frac{f_r - f_{ang}}{f_r}\right| \times 100 \quad (1.4)$$

f_r :Yüzey normali doğrultusunda gelen dalga ile elde edilen rezonans frekansı

f_{ang} :Farklı geliş açısı için elde edilen frekans

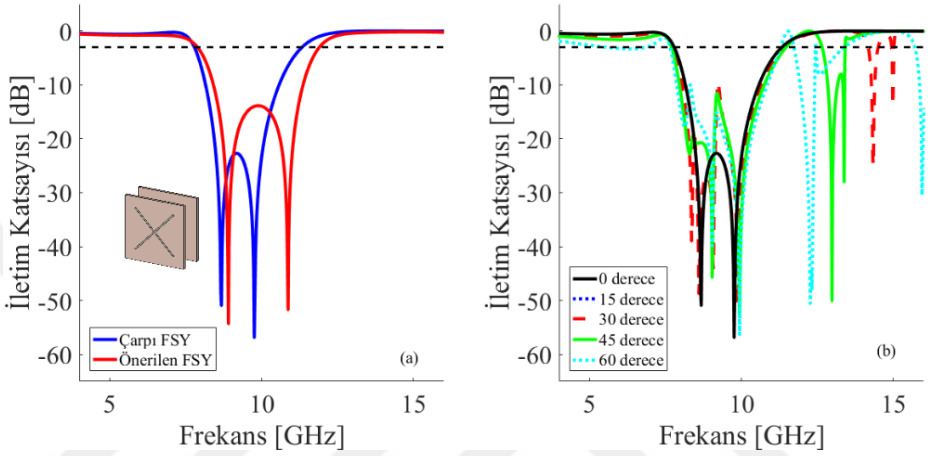
Δf :Bağıl frekans sapması

Tasarlanan FSY yapısı yerine, kol boyları aynı olan ve arka arkaya yerleştirilen artı şeklinde FSY veya çarpı şeklinde FSY tabakaları kullanılırsa, dalganın karşıdan gönderilmesi durumunda yaklaşık aynı frekans karakteristiği elde edilir. Ancak, açılı

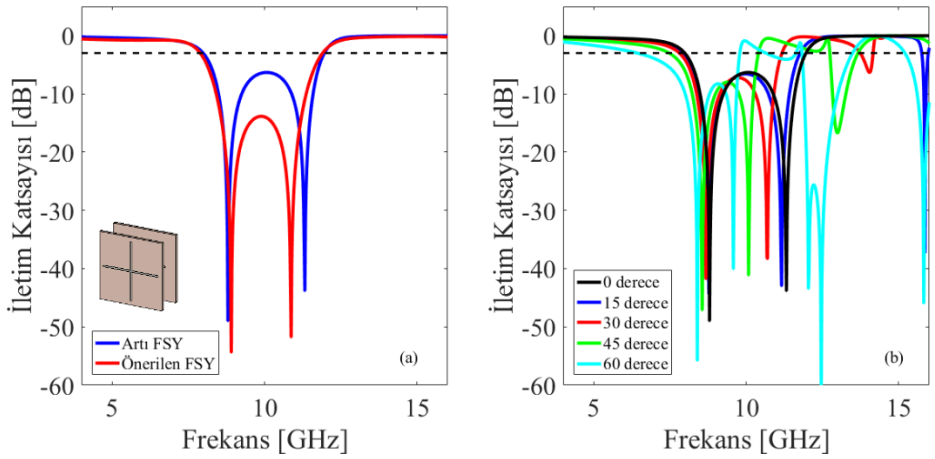
gönderim durumunda, boyutları önerilen FSY'den yaklaşık %75 daha büyük olduğu için açıya duyarlılıkları da artacaktır.

Tablo 1.3. Geliş açılarına göre iletim sıfır sapmaları

İletim sıfır frekansları	0°	15 °	30°	45°	60°
f_1 (8,91GHz)	0	0,20%	0	0,20%	0,69%
f_2 (10,87GHz)	0	0,16%	0,66%	0,99%	1,28%



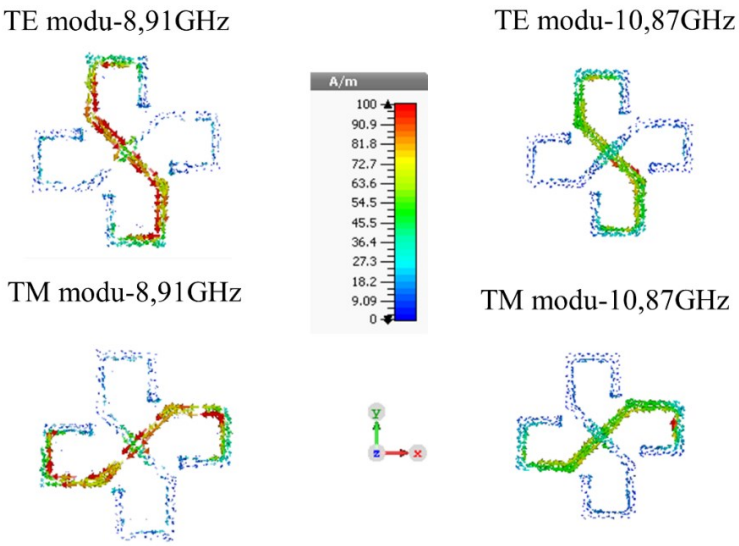
Şekil 1.12. İletim katsayısı benzetimleri (a) Çarpı ile önerilen FSY'nin karşılaştırılması (b) farklı geliş açılarında döndürülmüş Çarpı FSY iletim karakteristiği



Şekil 1.13. İletim katsayısı (c) Artı FSY ile önerilen FSY'nin karşılaştırılması (d) farklı geliş açılarında Artı FSY iletim karakteristiği

Şekil 1. 12'de artı şeklinde FSY ve Şekil 1.13'de çarpı şeklinde FSY kullanılması durumunda açıyla iletim karakteristiğinin nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 1.14'te hem TE hem de TM polarizasyonda yüzey akım dağılımları görülmektedir. Birinci

tabaka 8,91 GHz birinci iletim sıfır frekansı için TE polarizasyonda dikey kolda akım geçerken, TM polarizasyonda yatay koldan akım geçmektedir. Benzer şekilde 10,87 GHz ikinci iletim sıfır frekansında TE polarizasyonda dikey kolda akım geçerken, TM polarizasyonda yatay koldan akım geçmektedir.

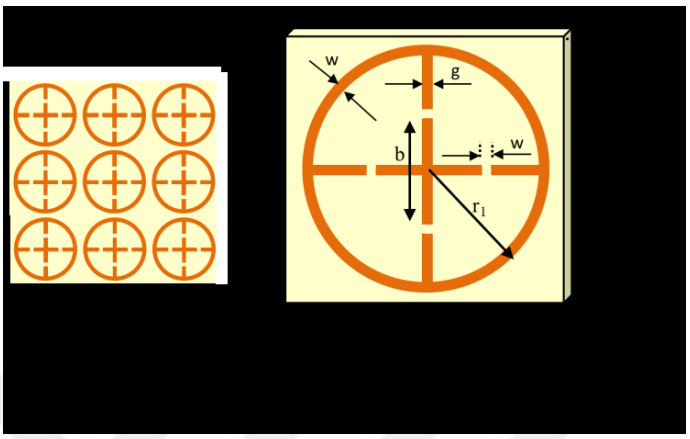


Şekil 1.14. TE ve TM polarizasyonda yüzey akım dağılımları benzetimleri

1.1.2. UGB FSY−1 ve UGB FSY−2 tasarımı ve parametrik çalışmaları

Bu bölümde UGB frekanslarında çalışan bant durduran açısal kararlılığa sahip minyatürize FSY yapıları açıklanacaktır. İlk çalışmada, FCC'nin tanımladığı UGB bandı boyunca bant durduran özelliği gösteren, tek katmanlı, açısal kararlılığa ve polarizasyon bağımsızlığına sahip UGB−FSY tasarımı yapılmıştır. FSY tasarımlarında, geniş bant elde edebilmek için farklı teknikler kullanılır. Birden fazla katman kullanmak, birim hücre elemanlar arası uzaklığı azaltmak, dielektrik tabakanın kalınlığını artırmak bu tekniklerden bazılarıdır. Birden fazla tabaka kullanımı ya da tabaka kalınlığını artırmak, yapının boyutunu ve imalat maliyetini de artırmaktadır. Bant genişliğini etkileyen en önemli unsurlardan bir diğeri ise birim hücre elemanının geometrik yapısıdır. Uygun geometrik şekiller ile katmanlı yapıya ya da kalın dielektrik tabaka kullanımına gerek kalmadan geniş bantlı FSY tasarımı yapılabilmektedir.

Önerilen UGB FSY−1 birim hücre yapısı, iki rezonans elemanının bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Birinci rezonans elemanı halka şekli, ikincisi ise halka açıklığı olan çapraz dipol şeklidir. Tasarlanan FSY−1'in yapısı Şekil 1.15a'da, FSY−1'i oluşturan birim hücre tasarımı ise Şekil 1.15b'de verilmiştir



Şekil 1.15. (a) Tasarlanan UGB−FSY−1 dizisi (b) Birim hücre geometrisi

Şekilden de görüldüğü gibi UGB FSY−1'in birim hücresinin simetrik bir yapıya sahip olması, polarizasyon bağımsızlığını sağlamaktadır. Tablo 1.4'te FSY−1 birim hücre geometrisinin boyutları verilmiştir.

Tablo 1.4. UGB−FSY−1 birim hücre boyutları [mm]

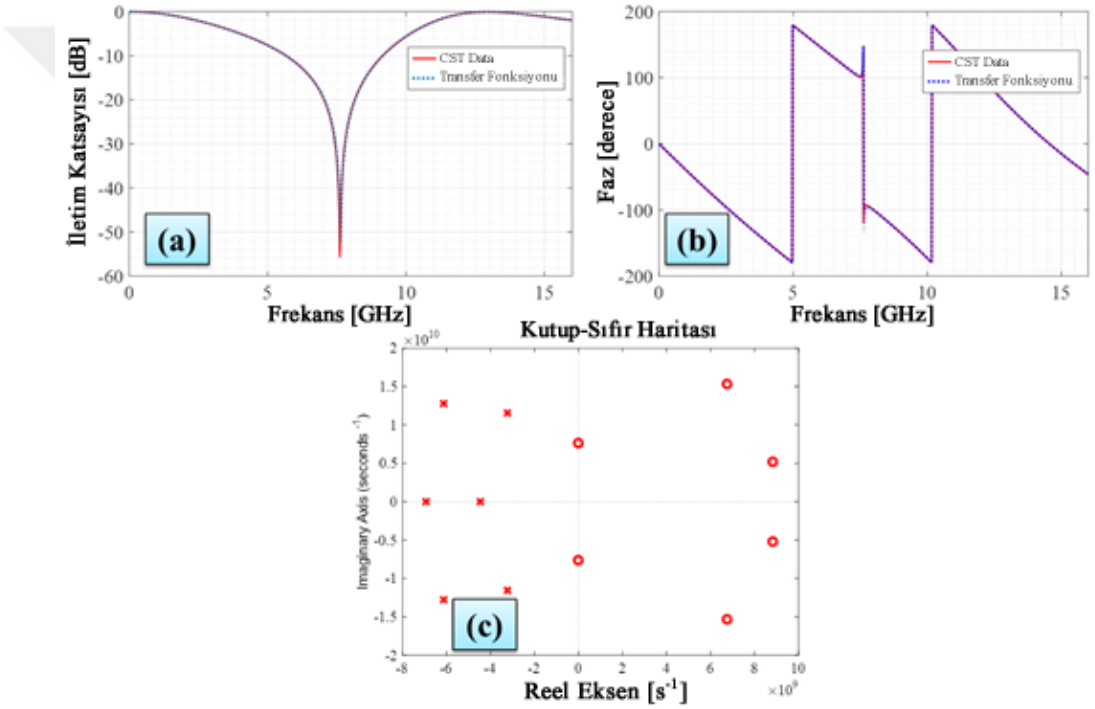
L	w	g	h	b	r_1
6,4	0,2	0,2	0,508	2,8	3,1

UGB FSY−1 tasarımında kalınlığı 0,508 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 6,15 olan Arlon AD 600 dielektrik tabaka kullanılmıştır. Birim hücre boyutu 6,4 × 6,4 mm^2 olup, UGB bandın en düşük frekansı olan 3,1 GHz'e karşılık gelen serbest uzay dalga boyu cinsinden 0,07λ×0,07λ'dır. Boyutunun küçük olması açısal kararlılığını sağlamaktadır.

Transfer fonksiyonunu kestiren MATLAB Kodu ile CST programı ile elde edilen FSY'nin iletim dataları (genlik, faz, reel ve imajiner kısımlar) kullanılarak uygun transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Verilen kodda, kutup ve sıfır sayısı 5'ten 8'e kadar değiştirilerek, FSY için en uygun transfer fonksiyonu ve derece tespit edilebilmektedir. Önerilen UGB FSY−1 yapısına en uygun transfer fonksiyonu

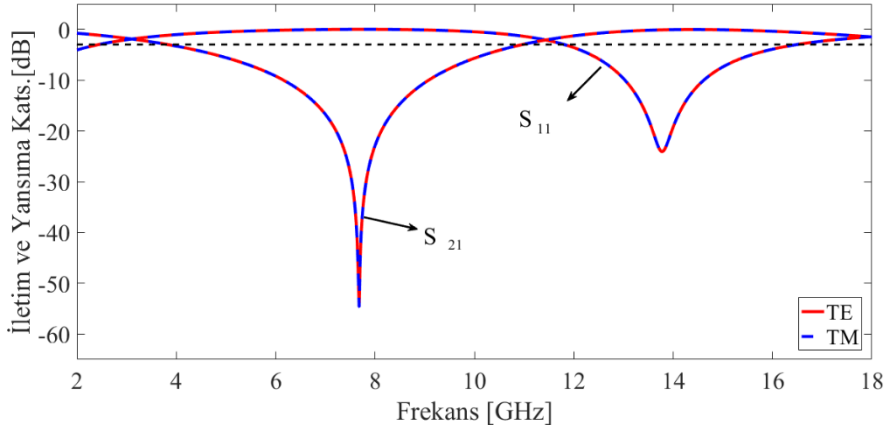
Şekil 1.16'da görüldüğü gibi kutup ve sıfır sayısı 6 olduğu zaman elde edilmiştir, yani önerilen UGB FSY−1 yapısı altıncı dereceden bant durduran filtre özelliği göstermektedir. Ayrıca, Şekil 1.16'da, UGB FSY−1'in CST ile elde edilen transfer katsayısı ve faz grafikleri, MATLAB kodu ile elde edilen transfer fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır ve ilgili transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfırların yerleşimi verilmiştir. Altıncı dereceden filtre karakteristiği gösteren FSY−1 yapısına ait transfer fonksiyonu ise Denklem (1.5)'te verildiği gibidir;

$$H(s)=\frac{0{,}44\,s^6 - 1{,}63e^{10}s^5 + 4{,}5e^{20}s^4 - 6{,}49e^{30}\,s^3 + 5{,}9e^{40}\,s^2 - 3{,}3e^{50}\,s + 1{,}9e^{60}}{s^6 + 3{,}2e^{10}\,s^5 + 8{,}9e^{20}\,s^4 + 1{,}2e^{31}\,s^3 + 1{,}2e^{41}\,s^2 + 7{,}1e^{50}\,s + 1{,}9e^{60}} \quad (1.5)$$



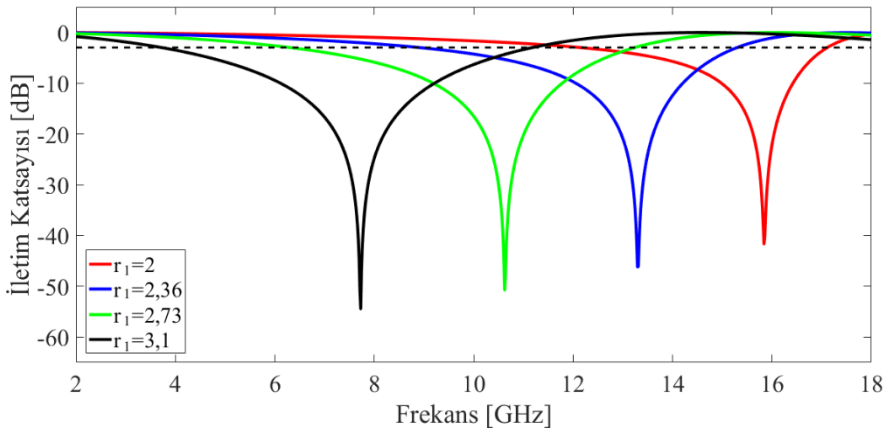
Şekil 1.16. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen UGB FSY−1 için (a) İletim katsayısı (b) İletim fazını (c) Sıfır−kutup haritası

İstenen iletim karakteristiğini elde etmek için birim hücre geometrisindeki birçok parametre içinbenzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 1.17'de FSY−1'in TE ve TM polarizasyonları için elde edilen yansıma ve iletim katsayısı grafikleri verilmiştir. İletim katsayısı grafiğine bakıldığında, FSY−1'in 3,5−11 GHz aralığında bant durduran filtre olarak çalıştığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda FSY birim hücresinin simetrik olması sebebiyle, TE ve TM polarizasyonları için elde edilen grafikler aynı olduğu görülmektedir.

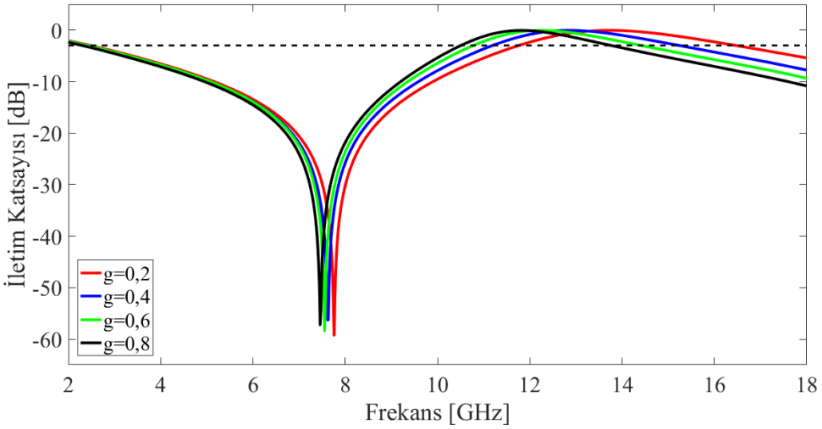


Şekil 1.17. Yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda elde edilen TE ve TM modları için iletim ve yansıma karakteristiği

UGB FSY−1 birim hücresinde rezonans frekansını ayarlamak için, g ve r_1 parametreleri değiştirilebilir. Bu parametrelerin değiştirilmesinin FSY'nin iletim katsayısını nasıl etkilendiğini gösteren grafikler Şekil 1.18 ve Şekil 1.19'da verilmiştir. Şekil 1.18'de görüldüğü gibi r_1 değerinin büyümesi ile rezonans frekansı düşük değerlere doğru kaymaktadır. Şekil 1.19'da ise, g parametresinin 4 kat artırılması durumunda rezonans frekansında büyük bir değişim olmazken bant genişliğini arttığı gözlenmiştir.



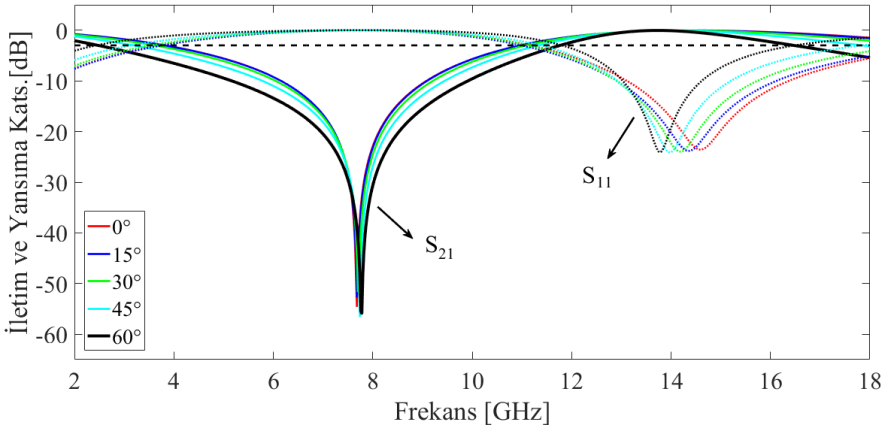
Şekil 1.18. Farklı r1 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği



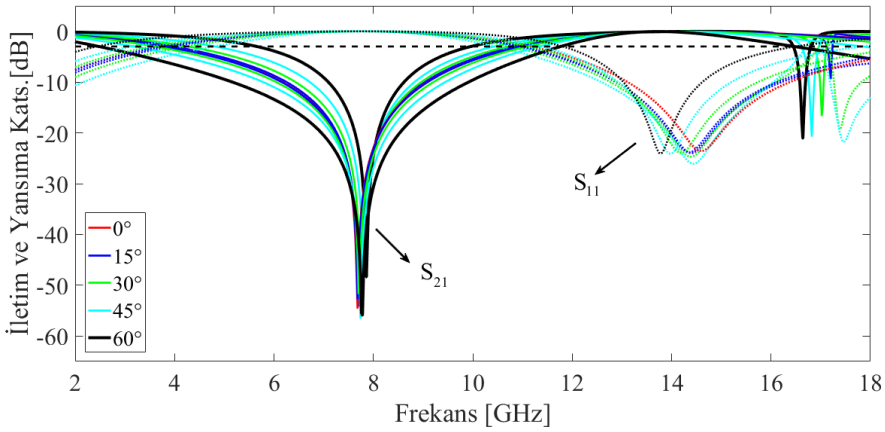
Şekil 1.19. Farklı g değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği

FSY'ler için önemli özelliklerden biri de düzlem dalganın farklı açılardan gönderimi durumunda da karakteristiğini koruyabilmesidir. Açısal kararlılığını incelemek için hem TE (Şekil 1.20) hem de TM (Şekil 1.21) polarizasyonlarında düzlem dalganın 60°'ye kadar 15° aralık ile gönderimi durumunda iletim ve yansıma katsayısı grafikleri elde edilmiştir.

Tasarlanan FSY her iki polarizasyonda da açısal kararlılık göstermektedir. Merkez frekansı için Denklem (1.4) kullanılarak hesaplanan frekans sapması değerleri her iki polarizasyon için (TE ve TM), Tablo 1.5'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi her iki polarizasyon için frekans sapması yüzdesi oldukça düşüktür.



Şekil 1.20. TE modunda farklı geliş açılar için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri

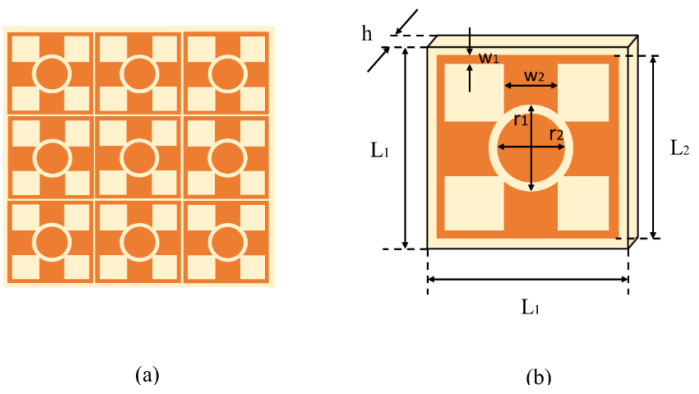


Şekil 1.21. TM modunda farklı geliş açıları için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri

Tablo 1.5. TE ve TM modları için geliş açısına bağlı frekans sapması

Geliş Açısı	0°	15°	30°	45°	60°
Δf (TE)	%0	%0	%0,26	%0,52	%1,03
Δf (TM)	%0	%0	%0,52	%1,29	%1,94

Önerilen UGB FSY−2 birim hücre yapısı, kare döngü ve üzerinde halka açıklık bulunan çapraz dipol şekillerinin elemanının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 1.22 birim hücre geometrisi ve FSY−2 dizi yapısı görülmektedir. FSY−2 tasarımında kalınlığı 0,508 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 6,15 olan Arlon AD600 dielektrik tabaka kullanılmıştır. Birim hücre boyutu 4,6×4,6 mm^2 olup, UGB bandın en düşük frekansı olan 3,1 GHz'e karşılık gelen serbest uzay dalga boyu cinsinden 0,047λ×0,047λ'dır. Önerilen FSY−2 birim hücrenin boyutunun küçük olması açısal kararlılığını sağlamaktadır.

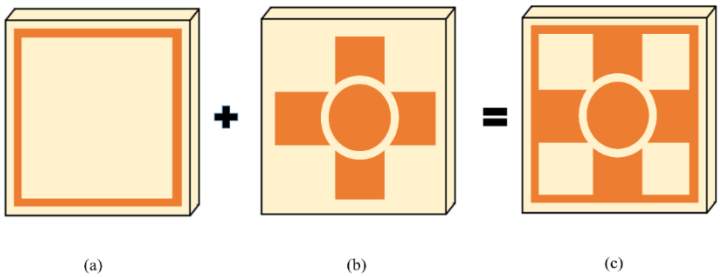


Şekil 1.22. Minyatürize UGB−FSY−2 (a)dizi yapısı (b) birim hücre geometrisi

Tablo 1.6. Minyatürize UGBFSY−2 birim hücre boyutları [mm]

L_1	L2	r1	r2	w
4,6	4,4	2,2	1,8	1,4

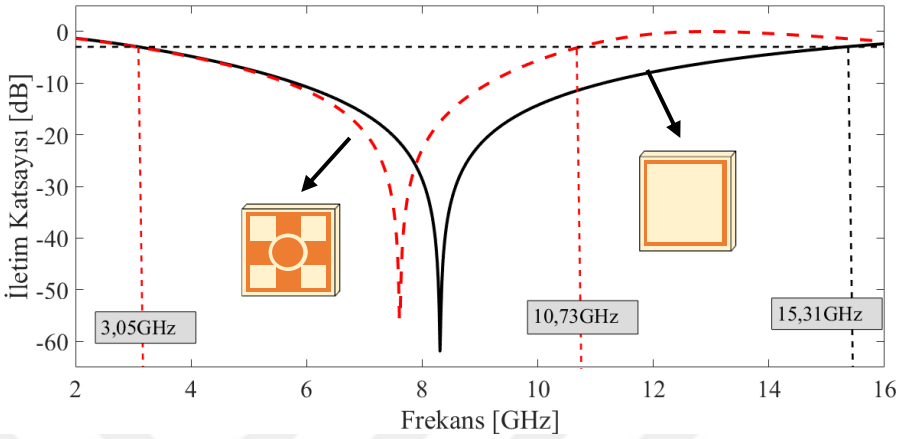
Tasarıma ait parametreler Tablo 1.6'da verilmiştir. Bu tasarımdaki birim hücre boyutu bir önceki tasarıma göre daha küçüktür. Şekil 1.23'de birim hücre tasarım adımları görülmektedir. Kare döngü elemanı geniş bant genişliğine sahip bir elemandır. Ancak FCC'nin tanımladığı UGB bant genişliğini içinde kalmak ve açısal kararlılığa sahip bir birim hücre tasarlamak için ikinci bir rezonans elemanı eklemek gereklidir. Şekil 1.24'te yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda kare döngü elemanı ve tasarlanan UGB FSY−2'nin iletim karakteristiği görülmektedir. Kare döngü elemanının dış uzunluğu alt kesim frekansını, belirlemektedir. Halka açıklıklı çapraz dipol elemanını eklemek üst kesim frekansını ve rezonans frekansını küçültmeye yarar. İki rezonans elemanının birleşimiyle istenen frekans aralığında açısal kararlılığa sahip bant durduran bir filtre gibi çalışan FSY birim elemanı tasarımı gerçekleştirilmiştir.



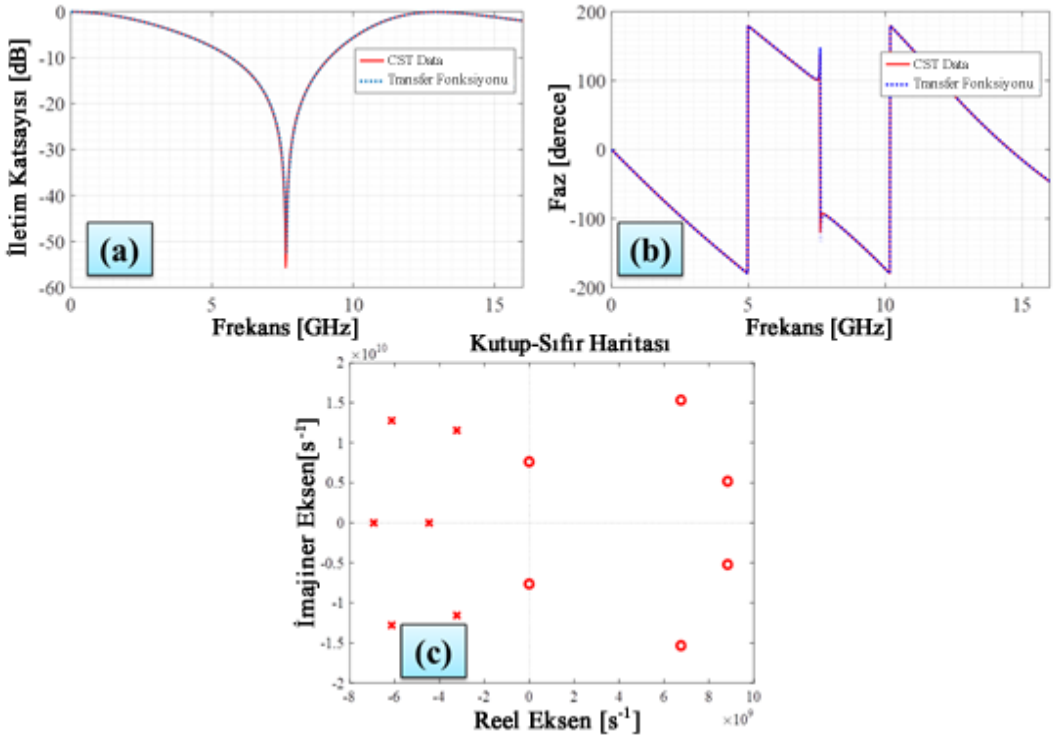
Şekil 1.23. UGB FSY−2 birim hücre tasarım adımları (a) kare döngü (b) halka açıklıklı çapraz dipol (c) tasarlanan birim hücre

Transfer fonksiyonunu kestiren MATLAB kodu ile, CST programı ile elde edilen FSY'nin iletim dataları kullanılarak transfer fonksiyonunu elde edilmiştir. Önerilen FSY−1 yapısına en uygun transfer fonksiyonu Şekil 1.25'te görüldüğü gibi kutup ve sıfır sayısı 6 olduğu zaman elde edilmiştir, yani önerilen FSY−2 yapısı altıncı dereceden bant durduran filtre özelliği göstermektedir.

Şekil 1.25'de, FSY−2'nin CST ile elde edilen transfer katsayısı ve faz grafikleri, MATLAB kodu ile elde edilen transfer fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır ve ilgili transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfırların yerleşimi verilmiştir.



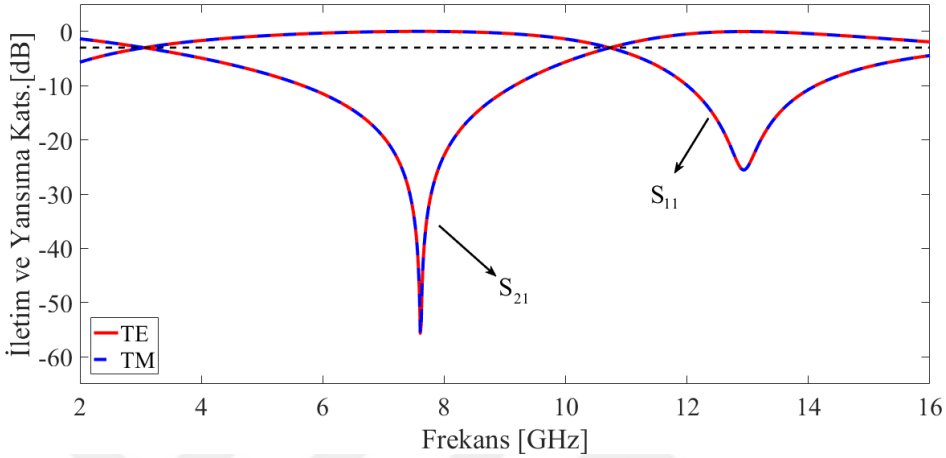
Şekil 1.24. Yüzey Normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda kare döngü elemanı ve tasarlanan FSY−2'nin iletim karakteristiği



Şekil 1.25. CST dataları ve MATLAB ile elde edilen önerilen FSY−2 için a. İletim katsayısı b. İletim fazı c. Sıfır−kutup haritası

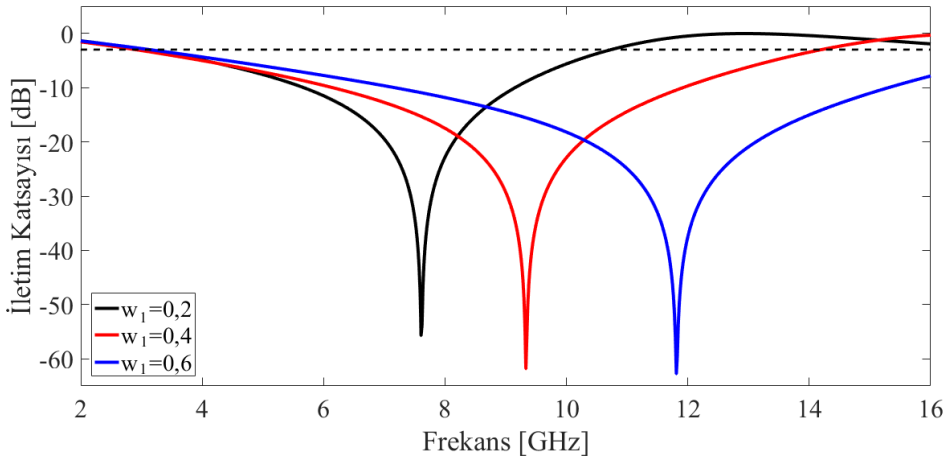
Altıncı dereceden filtre karakteristiği gösteren FSY−2 yapısına ait transfer fonksiyonu ise Denklem (1.6)'da verildiği gibidir;

$$H(s)=\frac{0{,}53s^6-1{,}6e^{10}s^5+3{,}5e^{20}s^4-4{,}3e^{30}s^3+3{,}4e^{40}s^2-1{,}9e^{40}s-8{,}9e^{59}}{s^6-3e^{10}s^5+6{,}7e^{20}s^4+8{,}48e^{30}s^3+7{,}7e^{40}s^2+4{,}3e^{50}s+8.e^{59}} \quad (1.6)$$

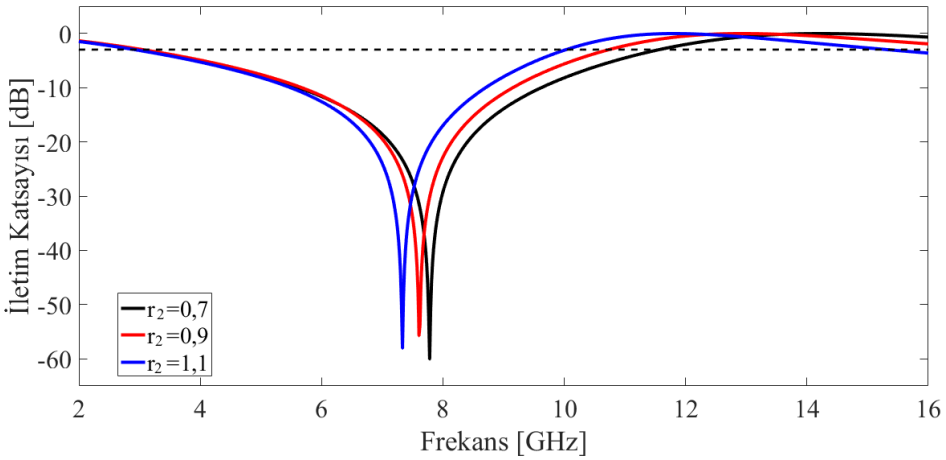


Şekil 1.26. Yüzey Normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda elde edilen TE ve TM modları için iletim ve yansıma karakteristiği

UGB FSY−2 birim hücresinin rezonans frekansını ayarlamak için, w_1 ve r_2 parametreleri değiştirilebilir. Bu parametrelerin değişmesinin FSY'nin iletim katsayısını nasıl etkilendiğini gösteren grafikler Şekil 1.27 ve Şekil 1.28'de verilmiştir.



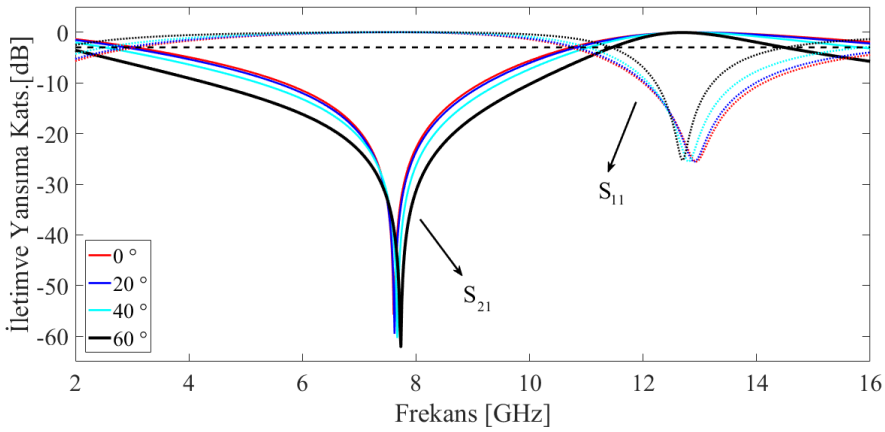
Şekil 1.27. Farklı w_1 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği



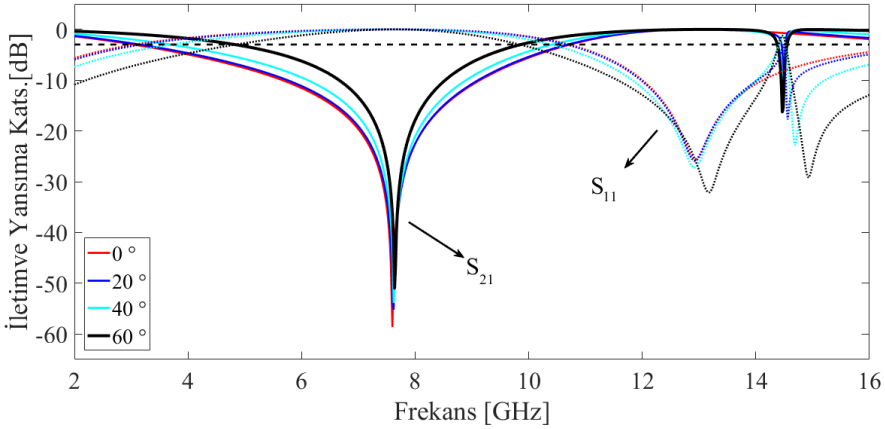
Şekil 1.28. Farklı r2 değerleri için yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE modunda iletim karakteristiği

Şekil 1.27'de görüldüğü gibi w_1 değerinin büyümesi yani kare döngü elemanının genişliğinin artması ile rezonans frekansı yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Şekil 1.28'de görüldüğü gibi r_2 parametresinin küçülmesi yani çapraz dipol üzerindeki halka açıklığın artması rezonans frekansında büyük bir değişim yaratmazken üst kesim frekansının artmasına sebep olmaktadır.

Önerilen UGB FSY−2'nin iletim ve yanıma karakteristiklerinin açısal kararlığını incelemek için yüzeye farklı θ açılarında dalga gönderilerek benzetimler yapılmıştır. Şekil 1.29'da TE modunda, Şekil 1.30'da ise TM modunda θ geliş açısının sırasıyla 0°, 15°, 30°, 45° ve 60°'lik değerleri için iletim ve yansıma karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 1.29. TE modunda farklı geliş açılar için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri



Şekil 1.30. TM modunda farklı geliş açılar için elde edilen iletim ve yansıma katsayısı grafikleri

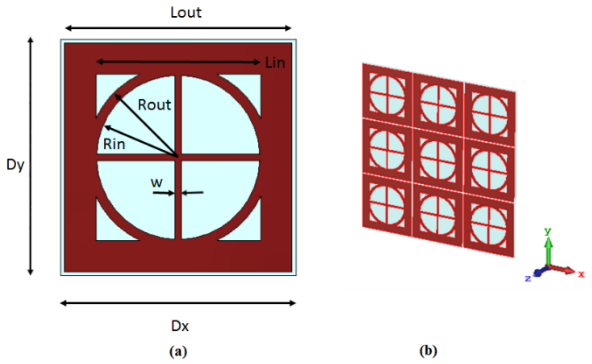
UGB bandı 3,1 ile 10,6 GHz olduğu göz önüne alındığında ilgilenilen bölgede iletim karakteristiğinin açısal kararlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Yapılan benzetimler kullanılarak TE ve TM modları için geliş açısına bağlı olarak rezonans frekansının bağıl sapması hesaplanmıştır ve Tablo 1.7'de sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlara göre en büyük sapma değeri, TE modunda 60° ile gelen dalga için %1,71 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1.7. TE ve TM modları için geliş açısına bağlı frekans sapması

Geliş Açısı	0°	20°	40°	60°
Δf (TE)	%0	%0,39	%1,68	%1,71
Δf (TM)	%0	%0	%0,26	%0,39

1.2.3. UGB FSY−3 tasarımı ve parametrik çalışmaları

Bant durduran FSY'ler mikroşerit antenlerin kazancını artırmak amacıyla kullanılabilirler. Anten kazancını artırmada kullanılan FSY yansıtıcı için başarım ölçütü olarak iletim karakteristiğinde −10dB'nin altında kalan bölgeler çalışma bölgesi olarak kabul edilmektedir. Tasarlanan UGB−FSY−3 yapısı, dielektrik tabakanın tek yüzeyine basılan, kare çerçeve ve içine yerleştirilen çember ve çapraz dipolden oluşmuştur. Tek katmanlı olarak tasarlanmıştır ve dielektrik tabaka olarak dielektrik katsayısı 6,15 ve kalınlığı 0,508 mm olan Arlon AD600 kullanılmıştır. Şekil 1.31a'da FSY birim hücre yapısı Şekil1.31b'de periyodik FSY yapısı, Tablo 1.8'de ise FSY yapısının boyutları verilmiştir. Tüm boyutlar mm cinsindendir.

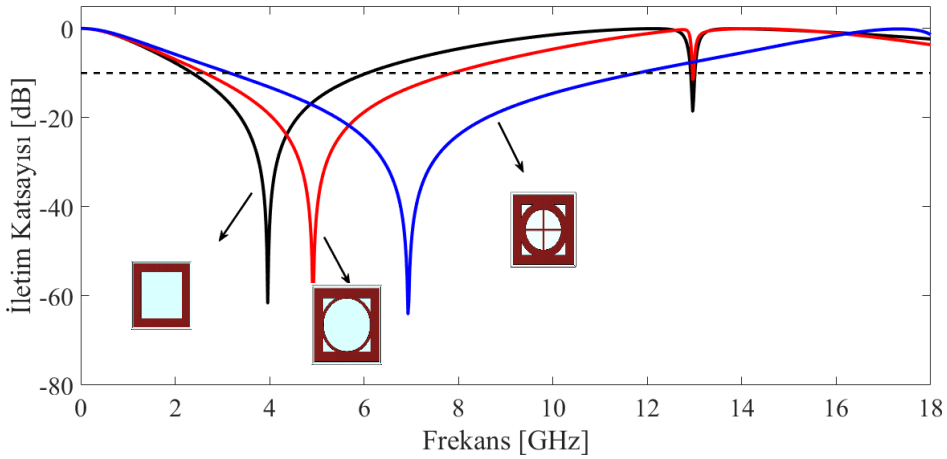


Şekil 1.31. UGB FSY−3 (a) birim hücre yapısı (b) periyodik FSY yapısı

Tablo 1.8 FSY−3 birim hücre boyutları [mm]

D_x	D_y	L_{out}	L_{in}	R_{out}	R_{in}	w
15	15	14,5	10,5	5,8	5,2	0,4

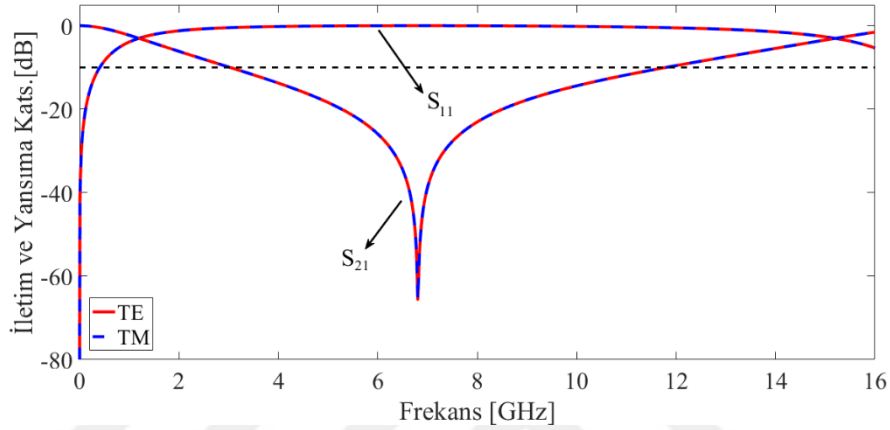
Döngü şeklindeki yapılar literatürde yer alan temel yapılardır. Bant durduran filtre özelliği göstermesi sebebiyle başlangıç şekli olarak kare döngü seçilmiştir. Dış boyutu 14,5mm × 14,5mm, iç boyutu ise 10,5mm × 10,5mm seçilmiştir. Bu FSY birim hücre yapısı, yansıtıcı olarak çalışma ölçütüne göre dar bir bant aralığında bant durduran filtre özelliği gösterir.



Şekil 1.32. UGB FSY−3'ün tasarım aşamalarında elde edilen iletim katsayısı grafikleri

UGB olarak çalışması için, öncelikle iç kısmına halka şekli eklenmiştir. Bu yapının eklenmesi ile rezonans frekansının üst frekanslara doğru kayması sağlanmıştır, ancak

3,1 −10,6 GHz'lik bant genişliğini elde etmek için yeterli olmamıştır. Yapının içine çapraz dipol yerleştirilerek, −10 dB bant genişliği 3,02 GHz −11,79 GHz aralığına ayarlanmıştır. Şekil 1.32'de üç adımlı tasarım ile elde edilen iletim katsayısı benzetim grafikleri, Şekil 1.33'de ise yüzey normali doğrultusunda dalga gönderilmesi durumunda elde edilen FSY−3 iletim katsayısı ve yansıma katsayısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 1.33. UGB FSY−3 iletim ve yansıma katsayısı grafikleri

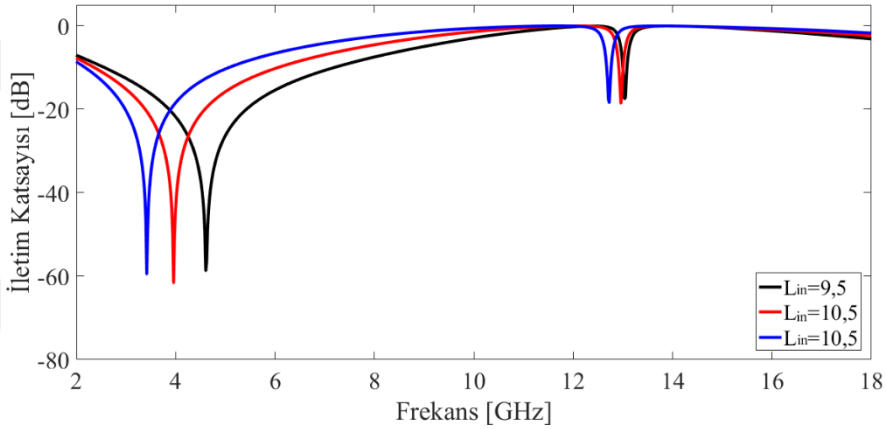
Şekil 1.33'den de görüldüğü gibi tasarlanan FSY, yüzey normali doğrultusunda dalga gönderilmesi durumunda 3,02 GHz ve 11,79 GHz frekansları arasında bant durduran filtre gibi davranmaktadır.

Tasarlanan filtrenin derecesi ve kutup−sıfır haritasını elde edebilmek için CST iletim katsayısı datalarını (reel, imajiner, genlik ve faz bileşenleri) kullanarak kestirim yapılmasını sağlayan kodu ile filtre derecesi 7 olarak belirlenmiştir. Bu kod, belli bir kutup sıfır haritasına ve transfer fonksiyonuna sahip FSY tasarlamak isteyen araştırmacılara kolaylık sağlayacak bir araçtır. Literatürde, FSY'ler ile ilgili bu tarz bir inceleme metodu bulunmamaktadır. Tasarlanan FSY'ye ait transfer fonksiyonu ise, Denklem (1.7)'de verilmiştir;

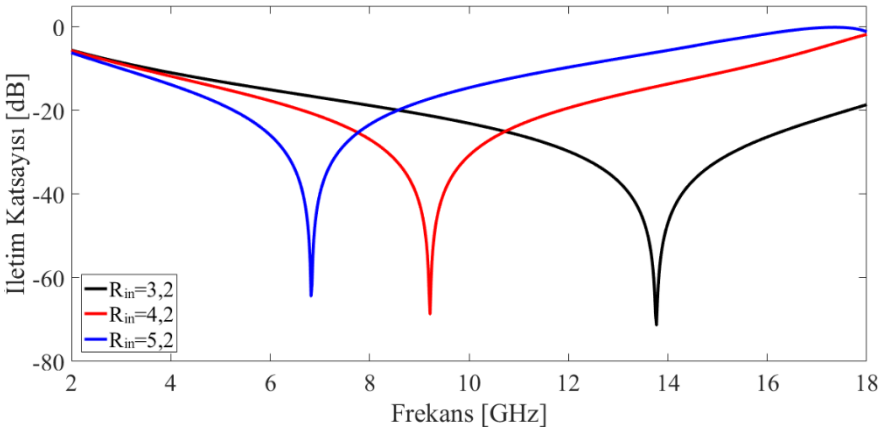
$$H(s)=\frac{-0{,}38\ s^7 + 9{,}7e^9\ s^6 - 3{,}1e^{20}\ s^5 + 5e^{30}\ s^4 - 7e^{40}\ s^3 + 5{,}4e^{50}\ s^2 - 2{,}68e^{60}\ s + 1{,}56e^{70}}{s^7 + 2{,}82e^{10}\ s^6 + 9{,}8e^{20}\ s^5 + 1{,}7e^{31}\ s^4 + 2{,}57e^{41}\ s^3 + 2{,}4e^{51}\ s^2 + 1{,}5e^{61}\ s + 1{,}5e^{70}} \quad (1.7)$$

Tasarımda, FSY'nin boyutlarının belirlenmesinde, parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 1.34'de Lin parametresinin değişimini iletim katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Dıştaki kare döngünün genişliğinin artması, bant genişliğini

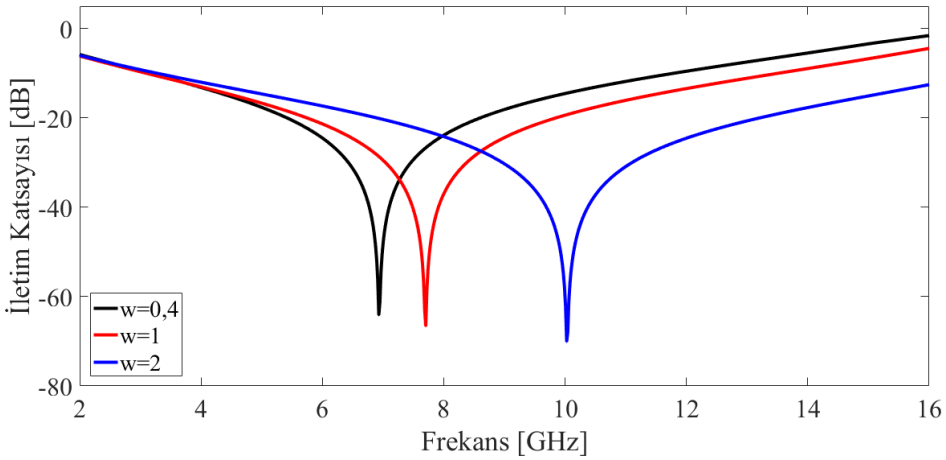
artırmaktadır. Şekil 1.35'te R_{in} parametresinin 3,2 −5,2 mm arasında değiştirmesi ile iletim karakteristiğinin değişimi görülmektedir. Benzer şekilde çapraz dipol genişliğinin artması da rezonans frekansının yüksek frekanslara kaymasına neden olarak bant genişliğini artırmaktadır. Son olarak w parametresin değişmesinin FSY'nin iletim katsayısını nasıl etkilediğini gösteren grafik Şekil 1.36'da görülmektedir. Halka genişliğinin artması, rezonans frekansının yüksek frekanslara kaymasına neden olarak bant genişliğini artmasına ve aynı zamanda ikincil harmoniklerin oluşmasına sebep olmaktadır Bu çalışma,10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering isimli konferansta bildiri olarak sunulmuştur [42].



Şekil 1.34. UGB FSY−3'ün farklı L_{in} değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri



Şekil 1.35. UGB FSY−3'ün farklı R_{in} değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri



Şekil 1.36. UGB FSY−3'ün farklı w değerleri için benzetimlerle elde edilen iletim katsayısı grafikleri

2. ULTRA GENİŞ BANTLI ANTENLER VE KAZANÇ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Amerikan Federal Haberleşme Komisyonunun ultra geniş bant uygulamalar için bir frekans bandını tahsis etmesinden bu zamana kadar geçen sürede, ultra geniş bant teknolojisi sadece araştırmacılar için değil akademik ve ticari alanlar için bir çalışma alanı haline gelmiştir. Diğer birçok teknolojik gelişmede olduğu gibi başlangıçta askeri alanlarda kullanılırken, günümüzde ise UGB tasarımlar sivil uygulamalarda yer almaktadır. UGB teknolojisi ile ilgili olarak yapılan birçok konferans ve dergi yayınlarının bulunması ve kitapların yazılması, bu konunun önemini ortaya koymaktadır. UGB teknolojisinin görüntüleme, algılama ve haberleşme alanlarındaki uygulamaları için UGB antenlerin geliştirilmesine ihtiyaç doğmuştur.

Mikroşerit antenlerin boyutlarının küçük, düşük maliyetli ve üretimlerinin kolay olması nedeniyle gerek sivil gerekse askeri uygulamalarda bu antenler sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu avantajlarının yanı sıra iki önemli dezavantajları bulunmaktadır; kazançlarının düşük ve bant genişliklerinin dar olması. Literatürde bant genişliğinin arttırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yer alırken, kazanç artırma teknikleriyle ilgili çalışmaların sayısının az olması ve yapılan çalışmaların son birkaç yılda yoğunlaşması, bu konunun günümüzde de ilgi odağı olduğunun göstergesidir. Kazancın yüksek olması UGB haberleşme sistemlerinde çok aranan bir özellik değildir ancak UGB radar uygulamalarında bant boyunca anten kazancının yüksek olması gerekmektedir.

Bant genişliğinin yüksek olması radar ve görüntüleme uygulamalarında iyi bir çözünürlük sağlar. Literatürde birçok UGB anten tasarımı vardır [44−53]. Bu antenler monopol, slot, fraktal geometrili yada basit geometrili yapılarda tasarlanmış mikroşerit besleme yada CPW (Eş düzlemsel dalga kılavuzu) besleme olarak sınıflandırılabilir. Bu tiplerin arasında CPW beslemeli slot antenler düşük bozulma ve ışıma kaybı ile karakterize olan ve yalnızca dielektrik tabakanın bir yüzü kullanılarak tasarlandıkları için oldukça ilgi görmektedir. Yönlü ışımanın istendiği belli uygulamalarda, hem ultra

geniş bant empedans hem de yüksek kazancın bir arada olması gerekir. CPW beslemeli slot antenlerin sunduğu kazanç tipik olarak 3−5 dB arasındadır ve çoğunlukla ışıma diyagramı tüm yönlüdür. Mikroşerit antenlerin kazancını artırmak için literatürde bulunan kare, daire yama gibi yapılar temel alınarak bu yapılar üzerinde değişiklikler yapıldığı görülmektedir. Benzer şekilde antenin toprak düzlemi üzerinde açıklıklar oluşturma, elektromanyetik bant aralığı (EBA) yapıları yerleştirme, toprak düzleminin boyutunu artırma, asimetrik besleme gibi uygulamalar bulunmaktadır. Bu tip uygulamalar ile anten kazancını belli frekanslarda artırmak mümkündür. Yüksek kazanç elde etmenin bir yolu antenin altına metalik yüzey yerleştirmektir. Metal yansıtıcı yerine UGB aralığı boyunca anten kazancını artırmak istenirse antenin arkasına yine UGB frekans bölgesinde çalışan bir FSY konulabilir.

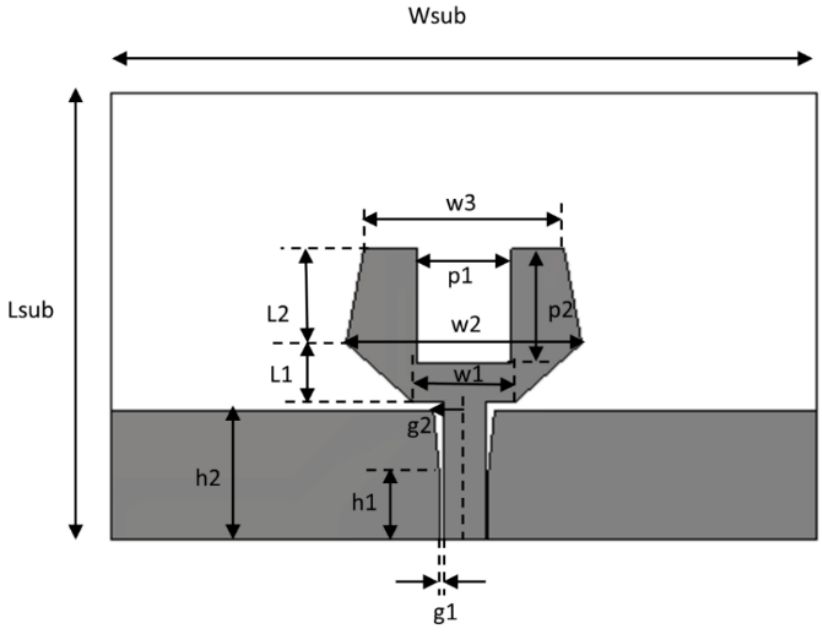
Geleneksel monopol antenler, toprak düzlemi ışıma yamasının altına dik olarak yerleştirilmekte ve koaksiyel bir hat ile beslenmektedirler. Bu şekliyle sistemlere monte etmek zor olduğu için mikroşerit besleme veya eş düzlemsel dalga kılavuzu besleme kullanmak tercih edilir. CPW besleme türünde, toprak düzlemi ile ışıma yaması aynı düzlemde yer almaktadır. Işıma yaması, toprak düzlemi arasında yer alan besleme şeridi yardımıyla beslenir. CPW besleme şeklinde toprak düzlemi de ışımaya katkıda bulunur. Bu tip beslemenin düzlemsel bir yapı sunması, deliklere gereksinim duymamasından dolayı daha az kayıplı olması, geniş bir empedans bant genişliği sağlaması ve tasarım açısından çok çeşitlilik sunması gibi avantajlarından dolayı diğer besleme şekillerine göre daha çok tercih edilen bir besleme türüdür. Dolayısıyla toprak düzlemi üzerinde yapılacak değişiklikler ile de empedans uyumu ayarlanabilmekte ve antenin kazancında artış sağlanabilmektedir. Ayrıca ışıma yaması ile toprak düzlemi arasındaki uzaklığın empedans uyumunu sağlamak açısından önemli bir etkisi bulunmaktadır. Antenin belirli bir frekans aralığında başarılı bir şekilde çalıştığının söylenebilmesi için antenin istenen frekans bandı boyunca empedans uyumu sağlaması ve ışıma diyagramını koruması gerekmektedir. Anten yansıma katsayısının −10 dB'nin altında olduğu bölge antenin çalışma bölgesi olarak kabul edilir.

Bu tez çalışmasında, CPW beslemeli slot antenlerin bant genişliği daha fazla olduğu için tasarıma bu tip anten ile başlanmıştır. Tasarlanan antenin toprak düzlemi üzerinde değişiklikler yapılarak anten kazancı yükseltilmeye çalışılmıştır. Bu tip antenlerin tam analizini yapmaya yardımcı olacak matematiksel ifadeler olmadığı için deneme

yanılma yolu ile sonuçlar optimize edilmeye çalışılmıştır. Tasarlanan antenlerin CST Microwave Studio ile parametrik benzetimleri yapılarak bant genişliği ve kazanç üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci adımda ise FSY'ler ile kazanç artışı elde edilmiştir. Daha sonra Mükemmel İletken Yüzey (MİY) kullanarak kazanç artışı elde edilmesi için benzetimler yapılarak FSY ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca hem FSY hem MİY için açılı yerleşimlerin kazanç artışı üzerindeki etkisi incelemiştir.

2.1. Ultra Geniş Bantlı Anten Tasarımları

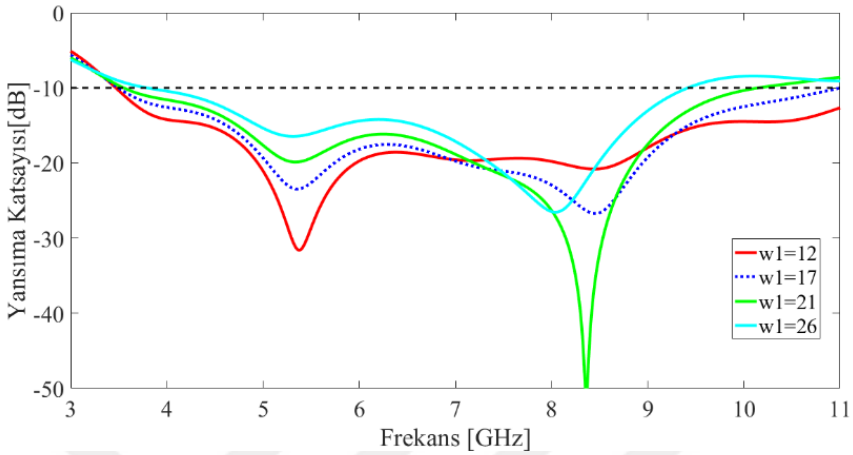
Şekil 2.1'de UGB CPW beslemeli anten yapısı görülmektedir. Antenin boyutları 38 mm× 60 mm olup kullanılan dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti 3 ve kalınlığı 1,524 mm'dir. Besleme şeridi 3,6 mm×11,7 mm boyutlarındadır. Işıma yaması ile toprak düzlemi arasındaki uzaklık ve w1 değeri bant genişliğini en fazla etkileyen parametrelerdir. w1 parametresinin değişiminin empedans bant genişliğine olan etkisini incelemek için parametrik çalışma yapılarak elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1. UGB CPW beslemeli Referans anten geometrisi

Antenin geometrik yapısının değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Tüm boyutlar mm cinsindendir. Bu boyutlar parametrik çalışma sonucunda elde edilmiştir. Bu anten referans alınarak toprak düzlemi üzerinde yapılan değişikliklerin kazanca etkisi

incelenmiştir. Antenin alt frekansı 3,1 GHz'den büyüktür, ancak toprak düzlemindeki değişiklikler ile bu değer 3,1 GHz'e doğru genişletilmiştir. w1 parametresininin artması ile üst frekans sola doğru kayarak bant genişliği azalmaktadır.

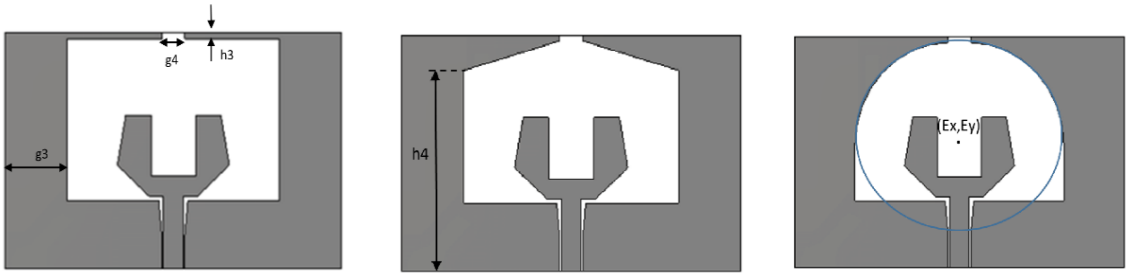


Şekil 2.2. w1 parametresinin yansıma katsayı üzerindeki etkisinin incelenmesi

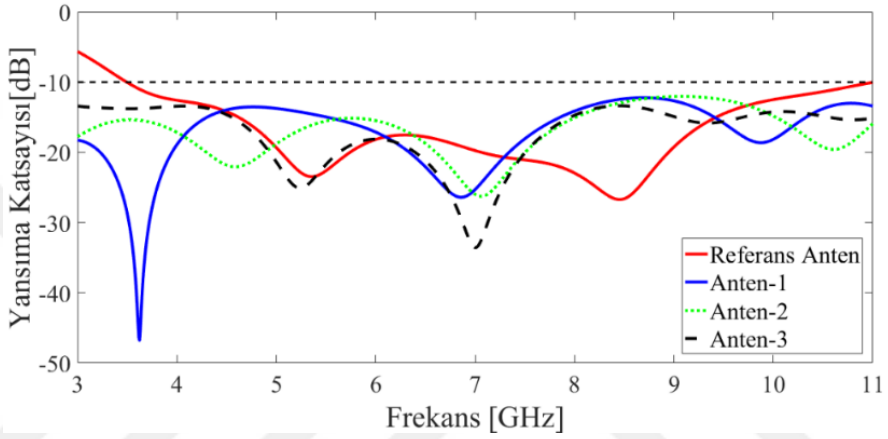
Tablo 2.1. UGB CPW beslemeli Referans anten parametre değerleri

Lsub	Wsub	w1	w2	w3	L1	L2	h1	h2	p1	p2	g1	g2
38	60	8,7	20	17	5	8	5	11	8	10	0,2	0,8

Referans antenin toprak düzleminde yapılan değişiklikler Şekil 2.3'te görülmektedir. Bu tip antenler slot anten olarak bilinirler. Slot genişliğini artırmak ve antenin ışıma yamasının üst kısmındaki toprak düzleminde açıklık oluşturmak antenin bant genişliğini iyileştirmektedir [44]. Anten−1 de referans antenin yanlarına ve üst kısmına metal şeritler eklenip, üst kısmına dikdörtgen açıklık oluşturularak toprak düzlemi değiştirilmiştir. Yan şeritlerin genişliği g3 11 mm, üst şerit genişliği 1mm ve açıklık uzunluğu ise 4mm'dir. Daha sonra toprak düzlemin üst kısmına üçgen şeklinde bir yapı eklenerek Anten−2 elde edilmiştir. Burada h4 uzunluğu 32,7 mm'dir. Son olarak toprak düzleminin üst kısmında eliptik bir şekil çıkarılarak Anten−3 geometrisi elde edilmiştir. (Ex,Ey) noktasının değeri (0, 20) dir. Elipsin asal eksen uzunluğu 39 mm, yedek eksen uzunluğu 34 mm'dir. Referans anten ve toprak düzlemleri üzerinde değişiklik yapılmış üç antene ait yansıma katsayısının grafiklerini Şekil 2.4'te görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere toprak düzleminde yapılan değişiklikler sayesinde antenin empedans bant genişliği artmıştır.



Şekil 2.3. Toprak düzlemi değiştirilerek elde edilen antenler

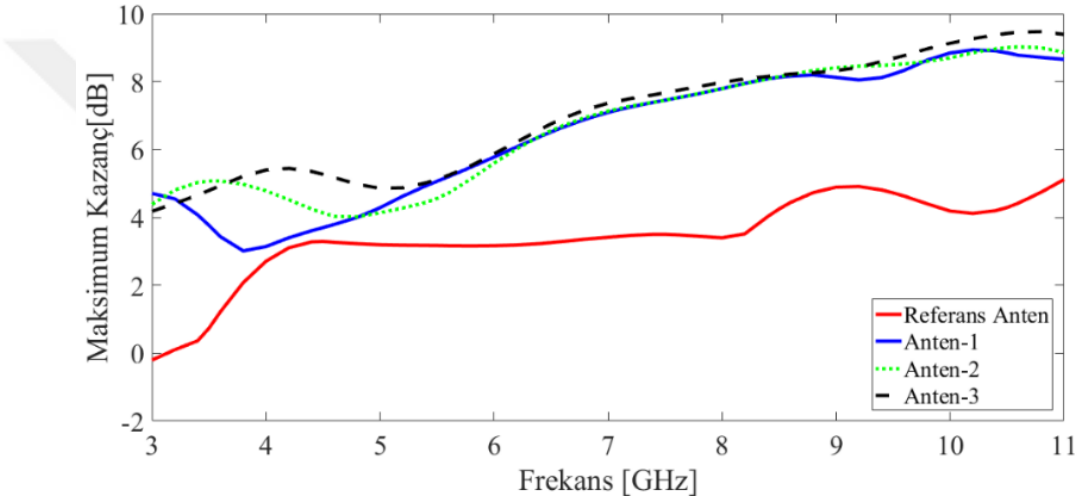


Şekil 2.4. Referans Anten, Anten−1, Anten−2 ve Anten−3'e ait yansıma katsayısı grafikleri

Bu antenlere ait maksimum kazanç grafikleri Şekil 2.5'te görülmektedir. Toprak düzlemi değiştirilmiş üç anten içinde en yüksek kazanç artışı Anten−3'te elde edilmiştir. Referans antenin 3,1−10,6 GHz frekansları arasındaki ortalama maksimum kazancı 3,4 dB iken Anten−3'ün ortalama maksimum kazancı 6,92 dB'dir. Toprak düzleminde yapılan değişiklikler ile yüksek frekanslarda daha fazla kazanç artışı sağlanmıştır.

Literatür incelendiğinde küçük boyutlu antenlerin arkasına FSY yerleştirilerek anten kazancını artırmaya yönelik çalışmalara rastlanmaktadır. Yapılan bir çalışmada, 34mm×26mm boyutlarındaki mikroşerit antenin 27 mm arkasına FSY konulmuştur [20]. Bu çalışmada tek tabakalı FSY'nin her iki yüzüne 14mm×14mm boyutlu birim hücre basılıdır. Bu FSY ile ortalama 4 dB'lik artış ile maksimum 8,9 dB kazanç elde edilmiştir. FSY dizi 6×6 elemanlıdır. Diğer bir çalışmada 40mm×40mm boyutlarındaki antenin 15,5 mm arkasına metal şeritlerden oluşan bir FSY konulmuştur [43]. Metal şeritlerden oluşan FSY'nin birim hücre boyutu

21,7mm×6,6mm dir. FSY plaka 5×13 elemanlıdır. Bu FSY ile antenin kazancı yaklaşık 4 dB artırılmıştır. Böyle küçük boyutlardaki antenlerin kazancını artırmak için FSY kullanıldığı zaman antenin boyutlarının küçük olmasının bir önemi kalmamaktadır. Eğer anten boyutunun küçük olması zorunluluğu bulunmuyorsa, öncelikle antenin kendi geometrisi ve/veya toprak düzlemi üzerinde değişiklik yapmak yoluyla kazancını artırmaya çalışmak hem maliyet hem de toplam hacim bakımından daha uygun olacaktır. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen referans antenin en ve boy değerleri değiştirilmeden sadece toprak düzlemi üzerinde yapılan değişiklikler ile kazancında yaklaşık olarak 3,5 dB kazanç artışı elde edilmiştir.



Şekil. 2.5. Referans Anten, Anten−1, Anten−2 ve Anten−3'e ait kazanç grafikleri

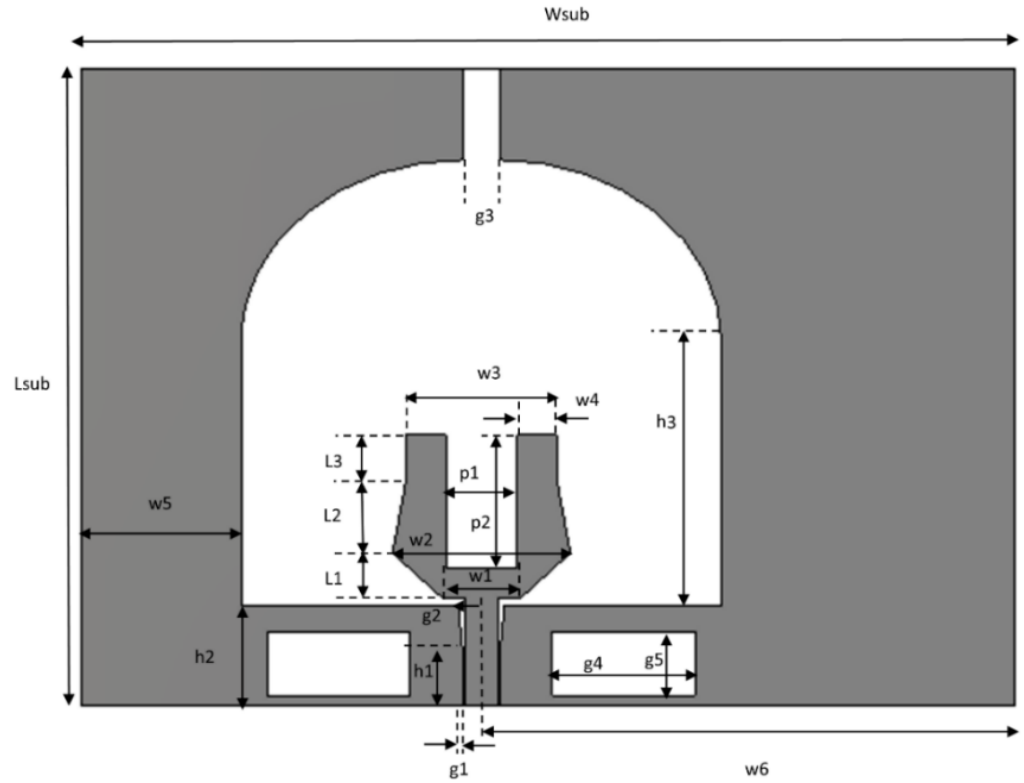
Daha yüksek kazanç elde etmek için Anten−3'ün geometrik yapısına benzer ancak daha büyük boyutlu anten tasarımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Antenin toprak düzlemi büyütülüp, ışıma yamasının üst kısımları uzatılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen Anten−4, Şekil 2.6'da görülmektedir. Toprak düzleminden metal parça çıkarılarak anten kazancına olan etkisi incelenmiştir.

Şekil 2.6'dan da görüldüğü üzere antenin toprak düzlemi asimetrik yapıdadır. Asimetrik yapılar anten kazancı artışına katkı vermektedir. Antenin toprak düzlemi önce simetrik olarak tasarlanmıştır. Simetrik yapıda antenin genişliği 90 mm'dir. Daha sonra sağ tarafa 20 mm'lik bir dikdörtgen metal alan eklenmiştir. Antenin boyutları 70mm×105mm olup kullanılan dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti 3 ve

kalınlığı 1,524 mm'dir. Besleme şeridi 3,6mm×11,7mm boyutlarındadır. Anten−4'ün geometrik yapısının boyutları Tablo 2.2'de mm cinsinden verilmiştir.

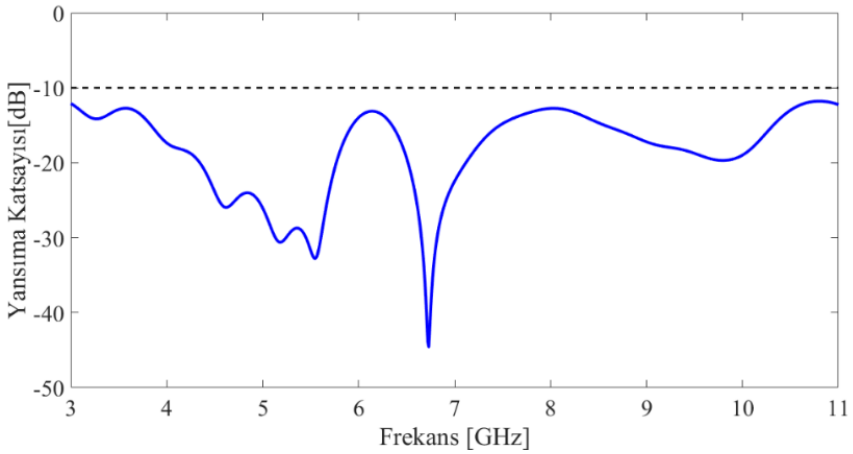
Tablo 2.2. Anten−4 parametre boyutları

Lsub	Wsub	w1	w2	w3	w4	w5	w6	L1	L2	L3
70	105	8,7	20	17	4,5	18	60	5	8	8
h1	h2	h3	g1	g2	g3	g4	g5	p1	p2	
5	11	16	0,2	0,8	2	16	7	8	10	

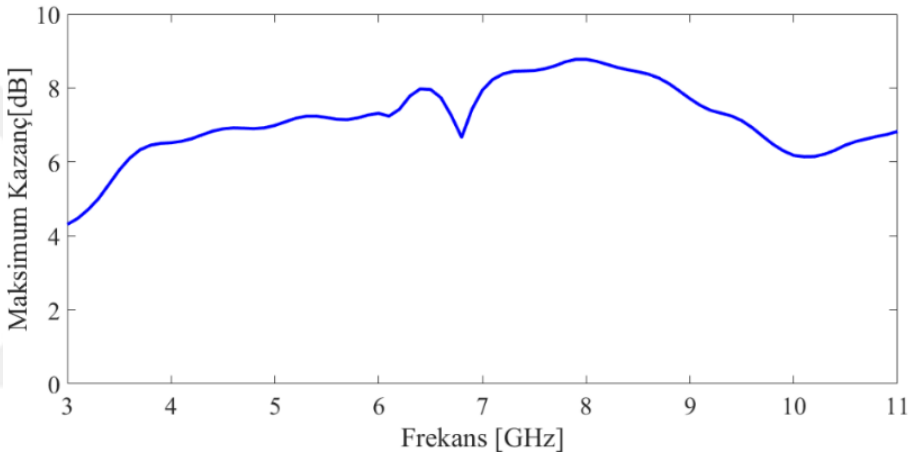


Şekil 2.6. Anten−4'ün geometrisi

Şekil 2.7'de Anten−4 e ait yansıma katsayısı grafiği görülmektedir. 2,81−12,36 GHz frekansları arasında ışıma yapan antenin kesirsel bant genişliği % 126'dır. Şekil 2.8'de ise maksimum kazancın frekans ile değişimi görülmektedir. UGB frekans bandı için değerlendirme yapıldığında 3,1 GHz frekansında kazancın 4,81 dB ile minimum, 7,5 GHz frekansında 8,49 dB ile maksimum olduğu sonucuna varılır.



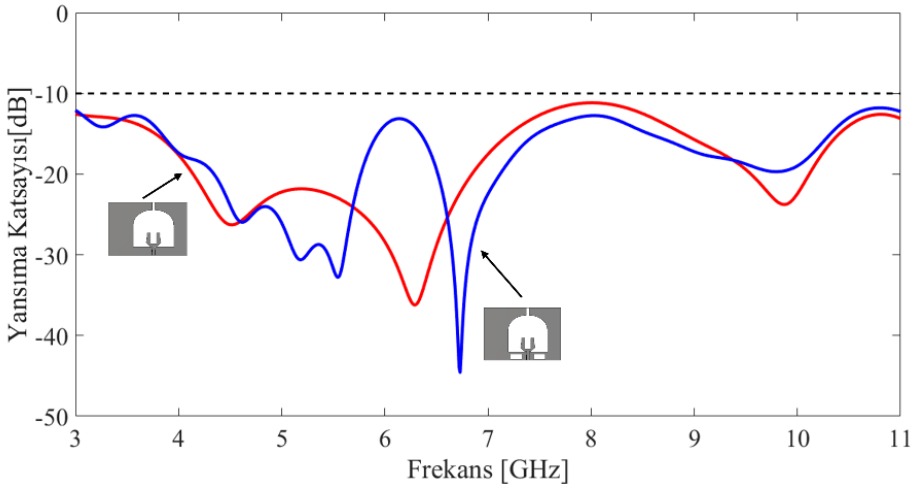
Şekil 2.7. Anten−4'ün yansıma katsayısının frekans ile değişimi



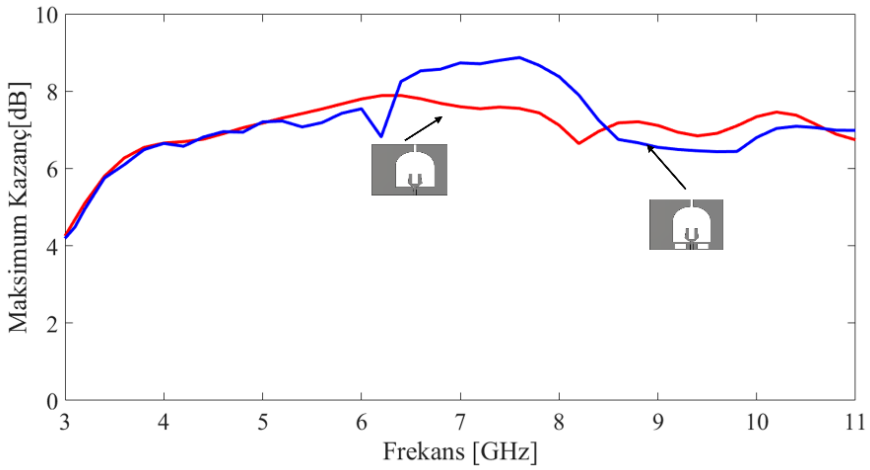
Şekil 2.8. Anten−4'ün maksimum kazancının frekans ile değişimi

Toprak düzleminden metal parça çıkarılmadan önceki hali ile metal çıkarılarak elde edilen Anten−4'ün yansıma katsayılarının karşılaştırılması Şekil 2.9'da, maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.10'da verilmiştir. Toprak düzleminden metal parça çıkarmak kazancın artmasına sebep olmuştur.

Anten−4'ün empedans bant genişliğini ve kazancını etkileyen parametrelerin parametrik analizi yapılmıştır. Parametrik analiz grafiklerinde mavi noktalı eğriler antenin orijinal boyutlarına ait olan değerler için elde edilen grafiklerdir. Antenin en son hali için kullanılan boyutların değerlerinin seçiminde empedans bant genişliği 3,1−10,6 GHz aralığını sağlayan ve minimum kazancı en yüksek olan parametreler seçilmiştir.

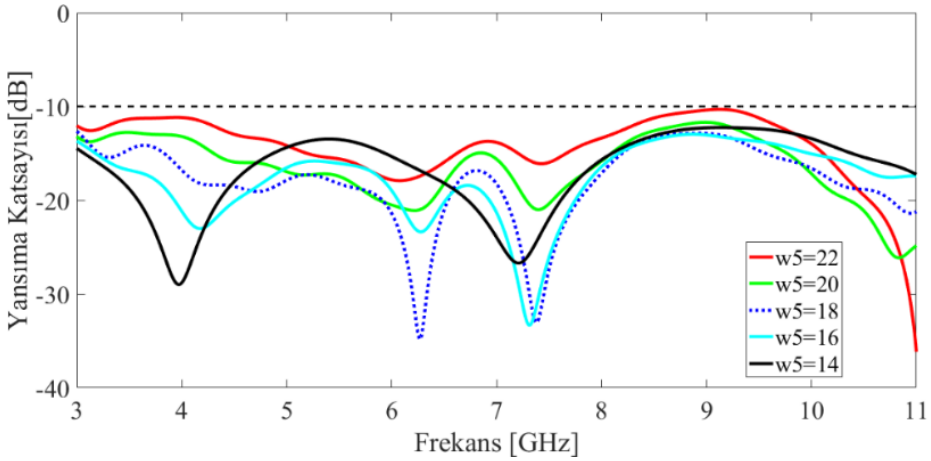


Şekil 2.9. Toprak düzleminden metal çıkarılmasının anten yansıma katsayısına etkisinin karşılaştırılması

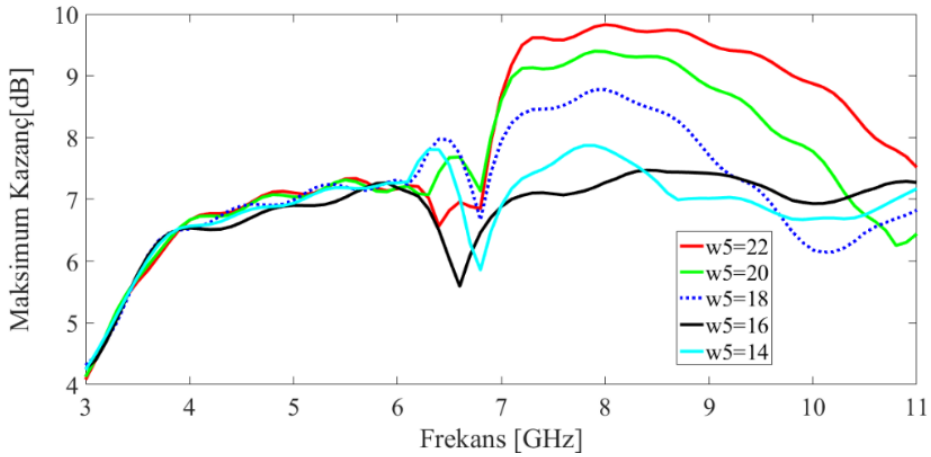


Şekil 2.10. Toprak düzleminden metal çıkarılmasının antenin maksimum kazancına etkisinin karşılaştırılması

Slot açıklığının empedans bant genişliğine olan etkisini incelemek için w5 parametresi 14 mm ile 22 mm arasında değiştirilerek Şekil 2.11'de ve Şekil 2.12'de görülen yansıma katsayısı ve maksimum kazanç grafikleri elde edilmiştir. Toprak düzlemi açıklığının azalması empedans bant genişliğini azaltmaktadır. Yan şerit genişliğinin azalması ise maksimum kazancı azaltmaktadır.

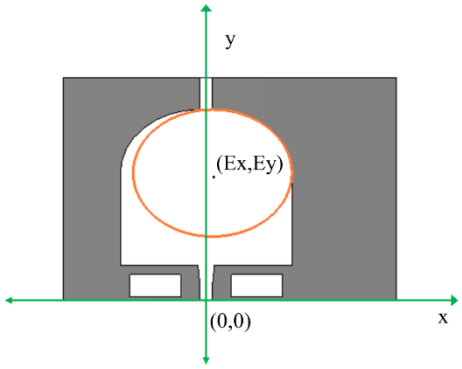


Şekil 2.11. w5 parametresinin değişimi ile elde edilen yansıma katsayısı grafikleri

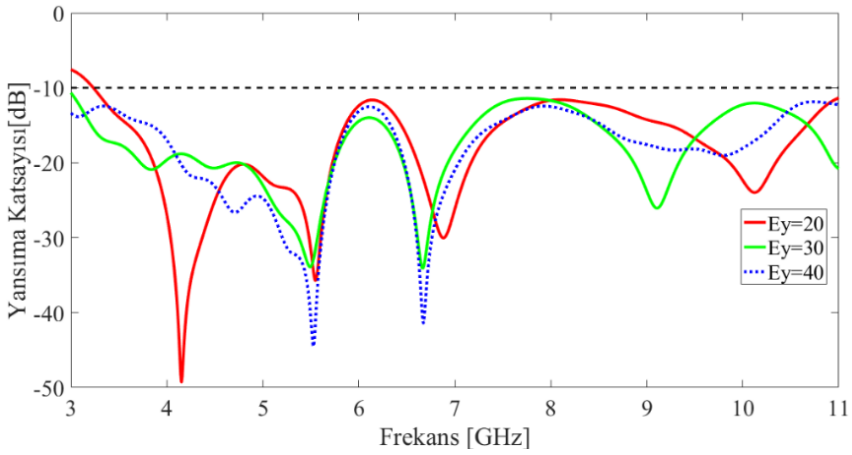


Şekil 2.12. w5 parametresinin değişimi ile elde edilen maksimum kazanç grafikleri

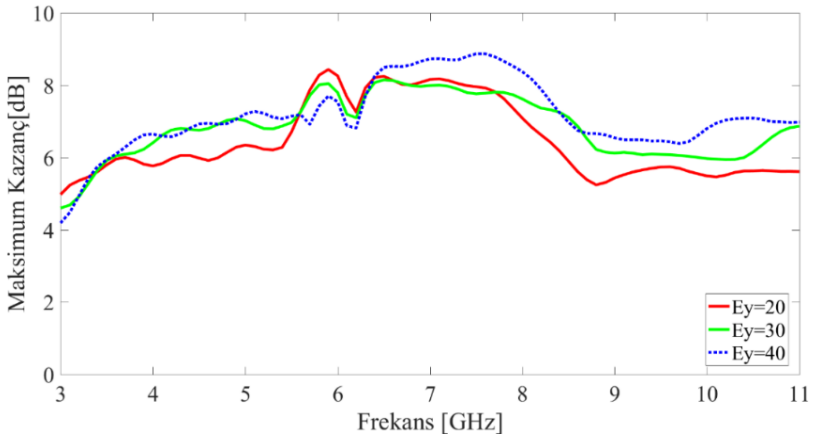
Toprak düzleminde açıklık geometrisini etkileyen bir diğer parametre ise üst taraftan çıkarılan eliptik yapıdır. Şekil 2.13'de toprak düzleminden çıkarılan eliptik yapının ayrıntıları görülmektedir. (Ex,Ey) elipsin merkez noktasının koordinatları (2,40) noktasında olup asal eksen uzunluğu (Rx) 25 mm ve yedek eksen uzunluğu (Ry) ise 20 mm'dir. Burada elipsin merkez noktasının değişiminin etkileri incelenmiştir. Çıkarılan elipsin y eksenindeki merkez konumu değiştirilerek elde edilen yansıma katsayısı ve maksimum kazanç grafikleri Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'de görülmektedir. y eksenindeki merkez noktasının değerinin azaltılması sonucunda açıklık alan azalarak toprak düzlemi ışıma yamasına yakınlaşmakta ve anten kazancı azalmaktadır.



Şekil 2.13. Anten−4 toprak düzlemi eliptik yapı geometrisi

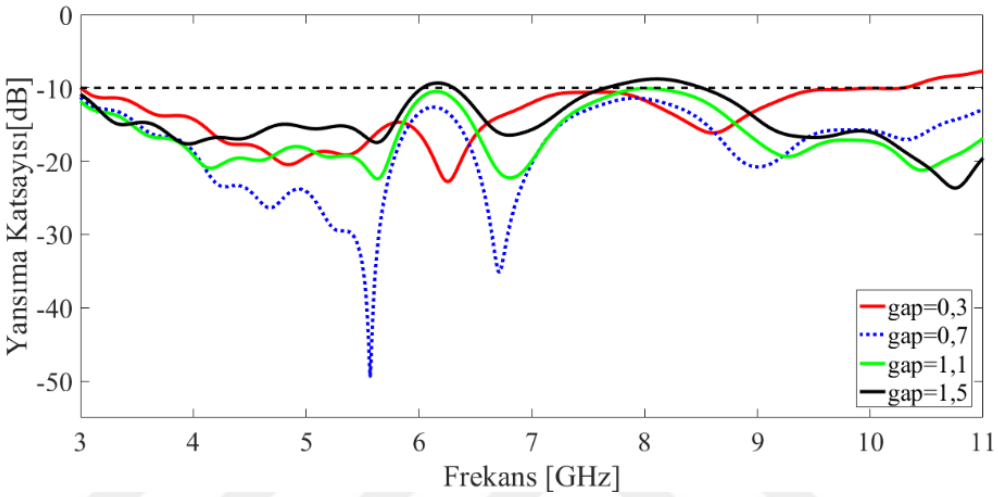


Şekil 2.14. Ey parametresinin değişimi ile elde edilen yansıma katsayısı grafikleri

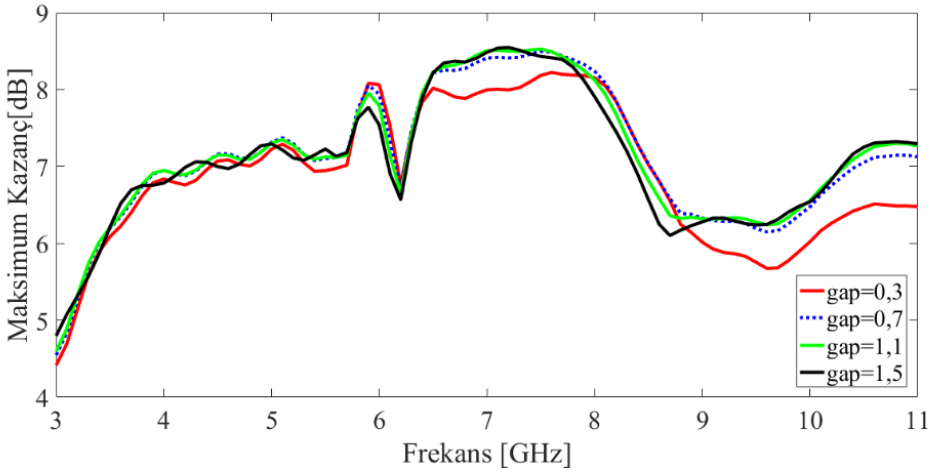


Şekil 2.15. Ey parametresinin değişimi ile elde edilen maksimum kazanç grafikleri

Son olarak toprak düzlemi ile antenin ışıma yaması arasındaki uzaklığın yansıma katsayısına ve kazanca olan etkisi incelenmiştir. Uygun uzaklık değeri ayarlandığında antenin empedans bant genişliği istenen frekans bölgesini sağlamaktadır. Şekil 2.16'da uzaklık 0,3 mm ile 1,5 mm arasında değiştirilerek elde edilen yansıma karakteristiğinin frekans ile değişimi görülmektedir. Bu değerler için elde edilen maksimum kazanç grafikleri ise Şekil 2.17'te verilmiştir.



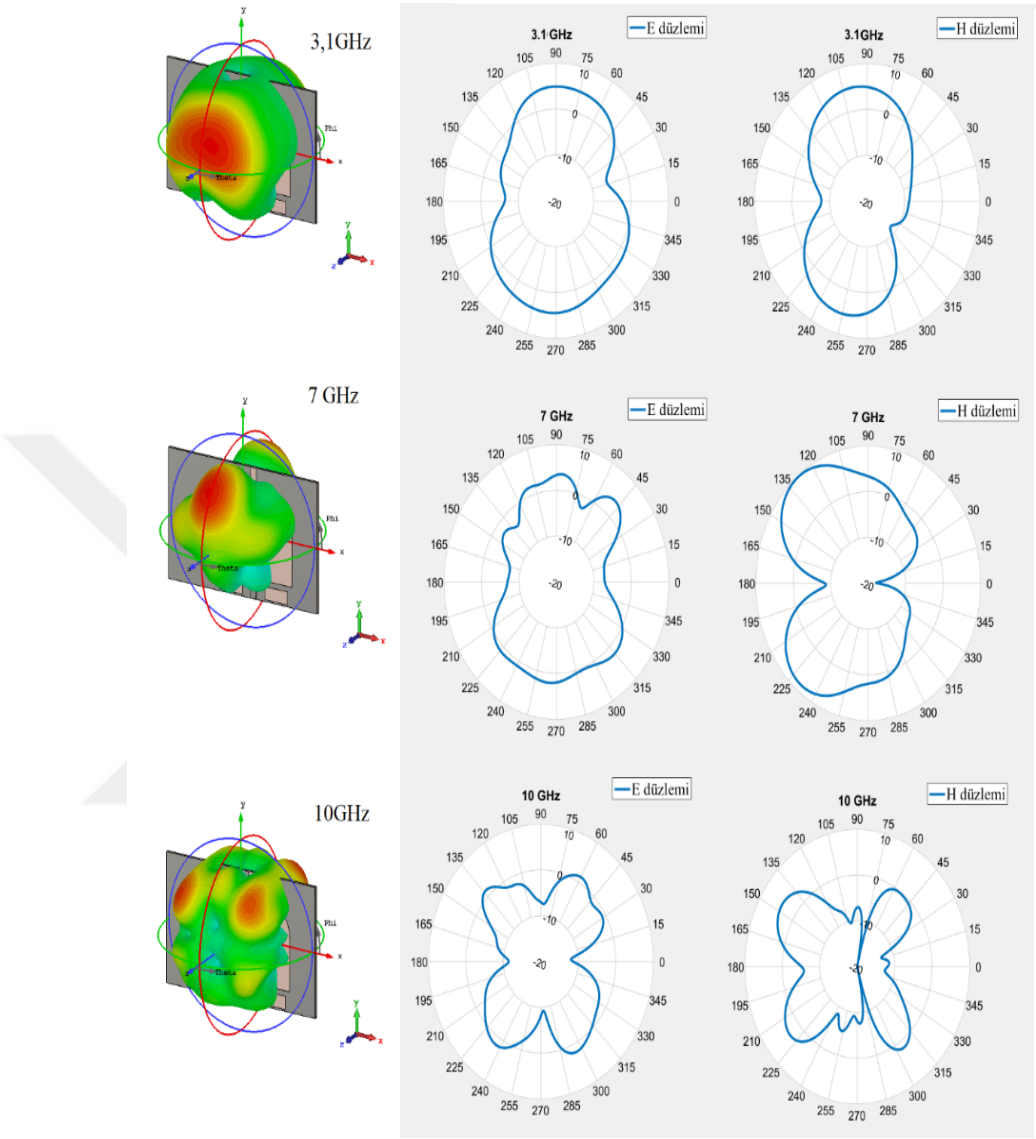
Şekil 2.16. Farklı gap boyutları için yansıma katsayısının frekans ile değişimi



Şekil 2.17. Farklı gap boyutları için maksimum kazancın frekans ile değişimi

Anten−4'ün 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için E düzlemi, H düzlemi polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları Şekil 2.18'te görülmektedir. Ultra geniş bantlı antenlerde ışıma örüntüsünün tüm frekans bandı boyunca değişmeden korunması

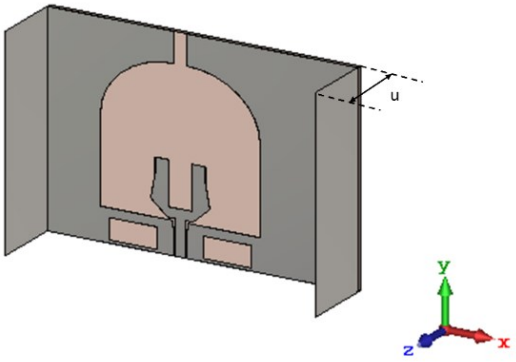
oldukça zordur. Özellikle yüksek frekanslara doğru çıkıldıkça antenin ışıma örüntüsünün değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.18.Anten−4'ün 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekansları için E düzlemi, H düzlemi polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları

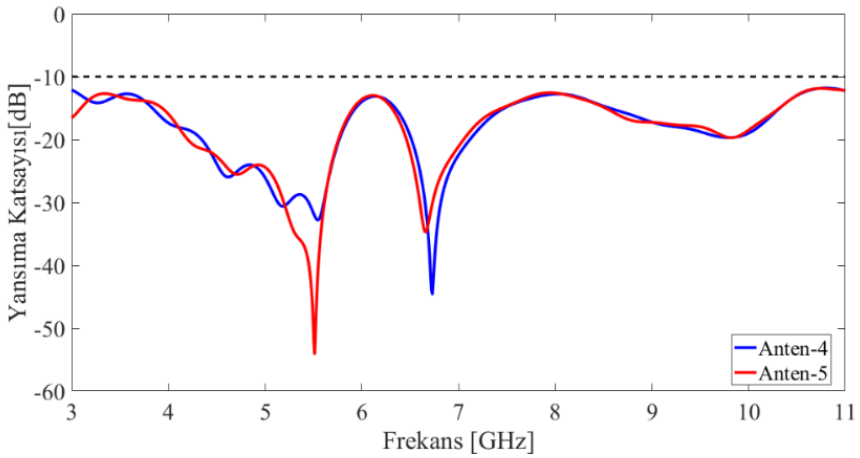
2.2. İletken Yapraklar Konularak Anten−4'ün Maksimum Kazancının Arttırılması

Anten−4'ün geometrik yapısı ve boyutlarını değiştirmeden sağ ve sol tarafına iletken yapraklar konulmuştur. İletken yaprak konularak elde edilen Anten−5 Şekil 2.19'da görülmektedir. İletken yaprakların boyutları 70mm×25mm'dir. İletken yapraklar antenin yansıma katsayısını bozmadan kazançta artış elde edilmesine olanak vermiştir.



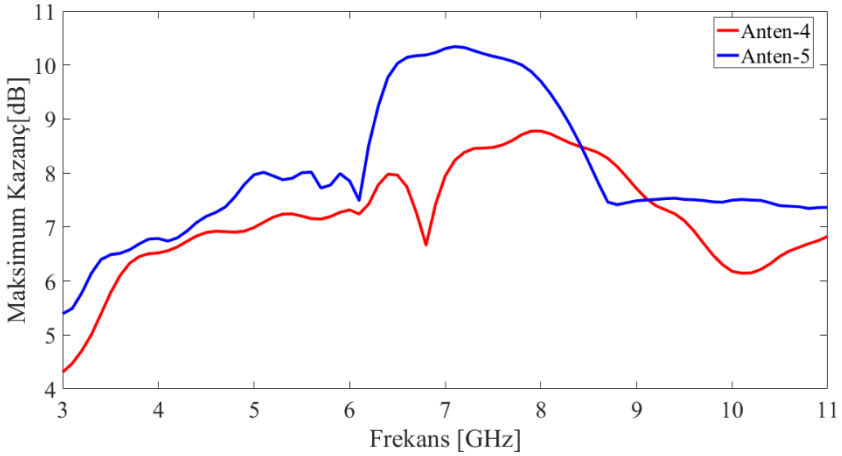
Şekil 2.19. Anten−5 geometrisi

Şekil 2.20'de Anten−4 ve Anten−5'in yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 2.21'de ise Anten−4 ve Anten−5'in maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 2.21 den de görüldüğü gibi iletken yaprakların eklenmesiyle kazanç artmıştır. UGB frekans aralığında, minimum kazanç 3,1 GHz frekansında 5,49 dB iken maksimum kazanç 7,1 GHz frekansında 10,34 dB değerindedir.

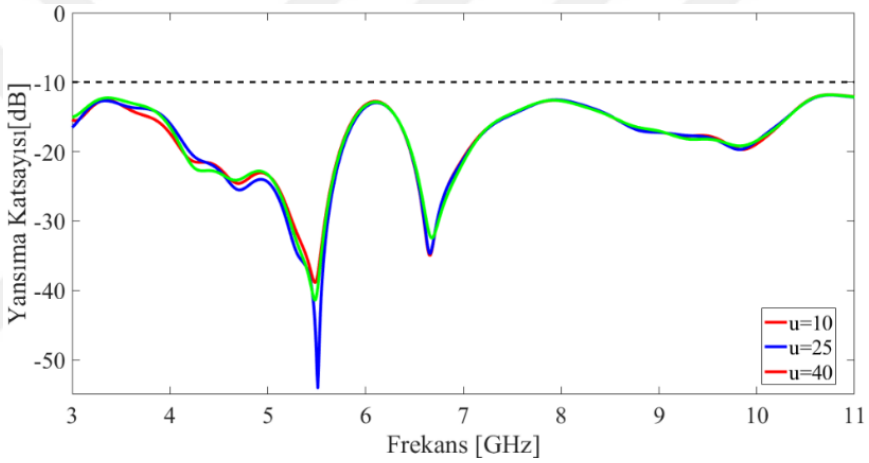


Şekil 2.20. Anten−4 ve Anten−5'in yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması

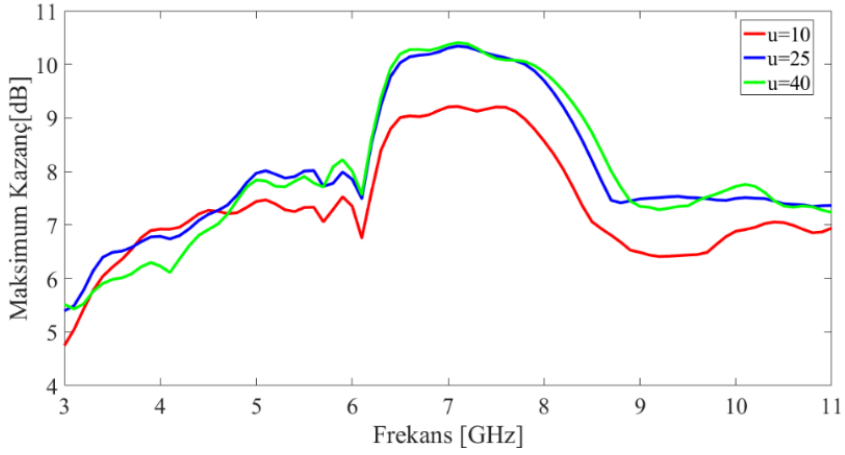
İletken yaprakların yüksekliğinin yansıma katsayısı ve maksimum kazanca etkisi incelenmiştir. Yükseklik miktarının 10 mm ile 40 mm arasındaki değerleri için elde edilen yansıma katsayısı grafiği Şekil 2.22'de maksimum kazanç grafikleri ise Şekil 2.23'te verilmiştir. Yükseklik miktarının 25 mm olması ile elde edilen kazanç artışı en iyi olandır.



Şekil 2.21. Anten−4 ve Anten−5'in maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması



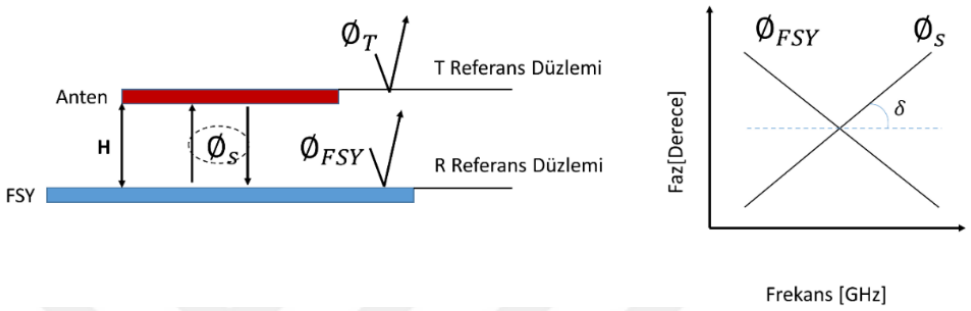
Şekil 2.22. Farklı u değerleri için elde edilen yansıma katsayısı grafikleri



Şekil 2.23. Farklı u değerleri için elde edilen maksimum kazanç grafikleri

2.3. Frekans Seçici Yüzeylerin Faz Cevabı ve Anten Kazancına Etkisi

Literatürde anten kazancını artırmak için birçok FSY uygulamalarının bulunması sebebiyle ve bu noktada anten boyutlarını değiştirmek yoluyla kazançta daha fazla artış elde edilemediği için antenin arkasına FSY yerleştirilmiştir. FSY ile antenin kombinasyonunun çalışma mekanizması hakkında bilgi edinmek için, çalışma prensibini açıklayan şematik çizim Şekil 2.24'da verilmiştir [24].



Şekil 2.24. FSY ile anten kazancı artırma düzeninin şeması ve faz cevabı

T ve R olmak üzere iki tane referans düzlemi tanımlanmıştır. R referans düzlemi FSY'den yansıyan dalganın faz $\emptyset_{FSY}$'dir. T referans düzlemindeki dalganın fazı $\emptyset_T$, ile $\emptyset_s$ fazlarının toplamına eşittir ise anten ile FSY arasında yansıyan dalganın fazıdır. FSY antenin altına belirli bir uzaklığa yerleştirildiğinde, antenden FSY'ye doğru gelen dalga yansır. Antenden direkt yayılan dalga ile FSY'den yansıyan dalga aynı fazda olduğu zaman antenin ön arka oranı ve yönlülüğü artar. Antenden FSY'ye doğru ışıyan dalganın fazı frekansın artmasıyla beraber artar. Anten kazancını artırmak yansıyan için dalgaların fazı, anten düzleminde frekanstaki artışla birlikte azalmalıdır. Yani FSY yansıma fazının doğrusal olarak azalması gereklidir. Anten düzleminde FSY'nin kazanca katkıda bulunması için anten ile arasındaki uzaklığın önemli bir etkisi vardır. Bu uzaklık aşağıda verilen Denklem (2.1) aracılığı ile bulunabilir,

$$\varphi_{FSY}-2\beta H=2\pi n \qquad n=\ldots-2,-1,0,1\ldots \tag{2.1}$$

β serbest uzay faz sabiti, H anten ile FSY arasındaki uzaklık olmak üzere bu denklemin sıfıra eşit olabilmesi için H uzaklığı λ olmalıdır. Burada λ dalga boyu FSY yansıma katsayısı fazının 0° olduğu frekansının dalga boyudur.

2.4. Frekans Seçici Yüzeyler ile Anten−4'ün Maksimum Kazancının Arttırılması

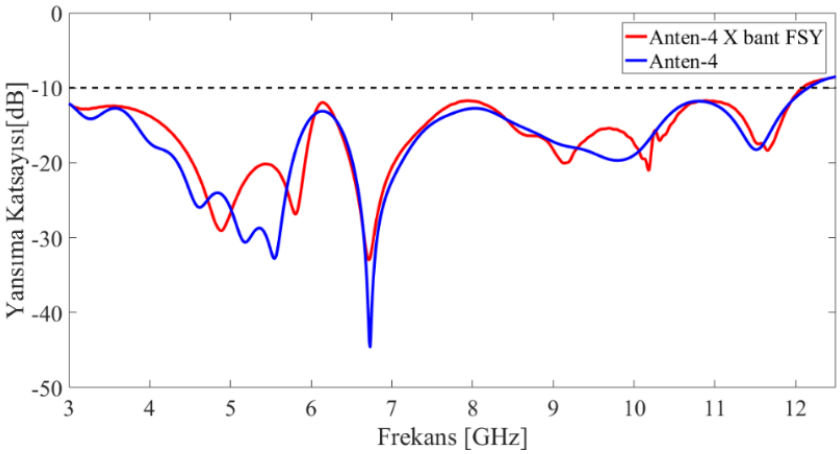
Bu çalışmada sunulan tüm FSY'lerin anten kazancını artırmadaki etkisi incelenmiştir. Bölüm 1'de tasarımları detaylı olarak anlatılan X bant FSY, UGB FSY−1, UGB FSY−2 ve UGB FSY−3'ün herbiri Anten−4'ün arkasına yerleştirilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. X bant FSY, FSY'lerin kismi kazanç artışı etkisini gözleyebilmek için tasarlanmıştır. Literatürde, UGB FSY'lerin ise iki referansa göre tasarlandığı görülmektedir. Bu çalışmada −3 dB ve −10 dB referansına göre tasarlanan FSY'lerin anten kazancı artırma kapasitesi incelenmek istenmiştir. FSY'ler yansıma katsayısı faz bilgisine dayalı olarak elde edilen uygun uzaklıklara yerleştirilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. Herbir FSY'nin anten ile arasındaki uzaklık değerleri ve yansıma katsayısı fazının 0° olduğu frekanslar Tablo 2.3'de yeralmaktadır.

Tablo 2.3. FSY'lerin anten ile arasındaki uzaklık değerleri ve sıfır faz frekansları

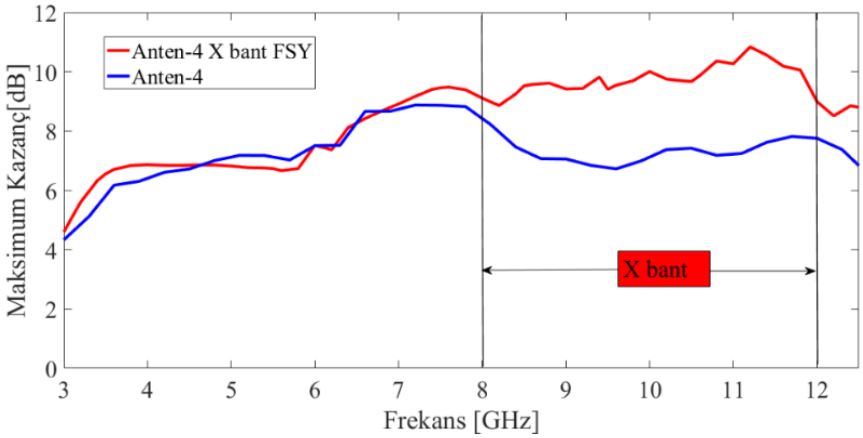
	Xbant FSY	UGB FSY−1	UGB FSY−2	UGB FSY−3
Sıfır Faz Frekansı [GHz]	10,49	9	7,86	8,7
Uzaklık [mm]	29	33	39	35

Şekil 2.25'te X bant FSY ile Anten−4'ün yansıma katsayıları benzetim karşılaştırması Şekil 2.26'da ise maksimum kazançlarının karşılaştırılması görülmektedir. X bant FSY yansıma faz bilgisi kullanılarak anten ile FSY arasındaki uzaklık belirlendiği için antenin yansıma katsayısı bozulmamıştır. Kazanç grafiklerine bakıldığında ise X bant frekans bölgesinde kazanç artışı olduğu görülmektedir. Bir antenin hangi frekans bölgesinde kazanç artışı sağlanmak isteniyorsa o frekans aralığında bant durduran özelliğe sahip bir FSY anten arkasına yerleştirilmelidir [54].

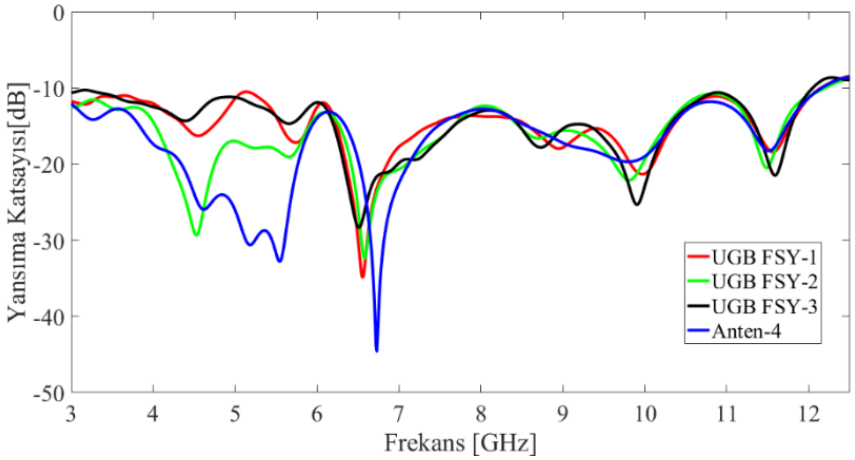
UGB FSY−1, UGB FSY−2, UGB FSY−3'ün Anten−4 'ün arkasına yerleştirilerek elde edilen yansıma katsayılarının Anten−4'ün yansıma katsayısı benzetimleri ile karşılaştırılması şekil 2.27'da, maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması ise şekil 2.28'de verilmiştir.



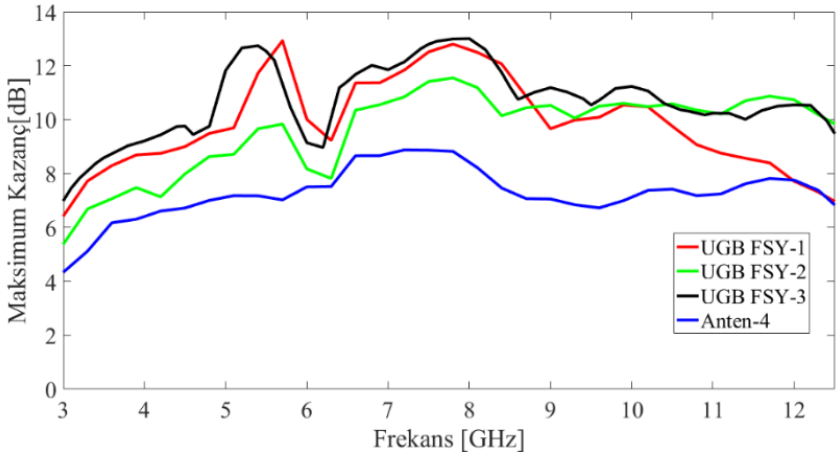
Şekil 2.25. Anten−4'ün arkasına FSY yerleştirilmiş durumdaki ve yerleştirilmemiş durumdaki yansıma katsayıları benzetimlerinin karşılaştırması



Şekil 2.26. X bant FSY varken ve yok iken, Anten−4'ün maksimum kazançlarının karşılaştırılması



Şekil 2.27. UGB FSY−1, UGB FSY−2, UGB FSY−3'ün Anten−4 'ün arkasına yerleştirilerek elde edilen yansıma katsayılarının ve Anten−4'ün yansıma katsayısı benzetimleri ile karşılaştırılması

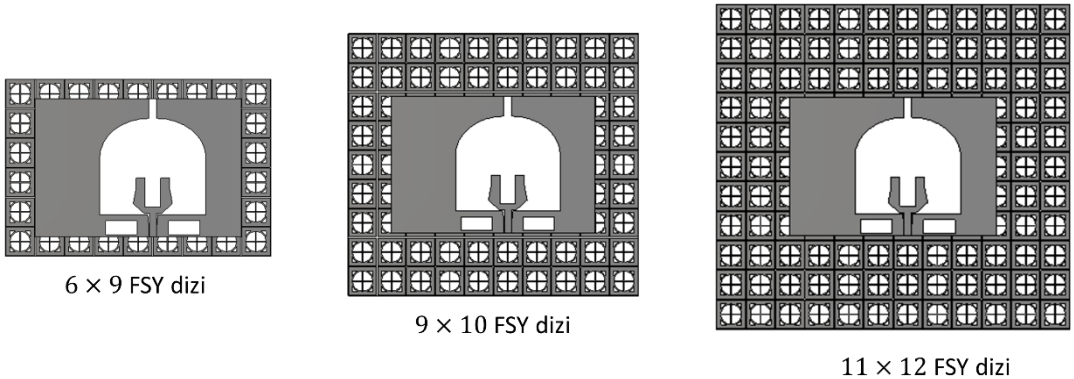


Şekil 2.28. UGB FSY−1, UGB FSY−2, UGB FSY−3'ün Anten−4 'ün arkasına yerleştirilerek elde edilen maksimum kazanç ve Anten−4'ün maksimum kazanç benzetimleri ile karşılaştırılması

Her üç FSY ile UGB frekans bandında Anten−4'ün kazancında artış elde edilmiştir. −3 dB referanslı FSY'leri minyatürize tasarımı daha kolaydır. Minyatürize tasarım ile açısal kararlılık elde edilir. Ancak en fazla kazanç artışı −10 dB referans alınarak tasarlanan UGB FSY−3 ile elde edilmiştir. −10 dB de daha fazla yansıtıcılık özelliğine sahip olası nedeniyle bu artış beklenen bir sonuçtur.

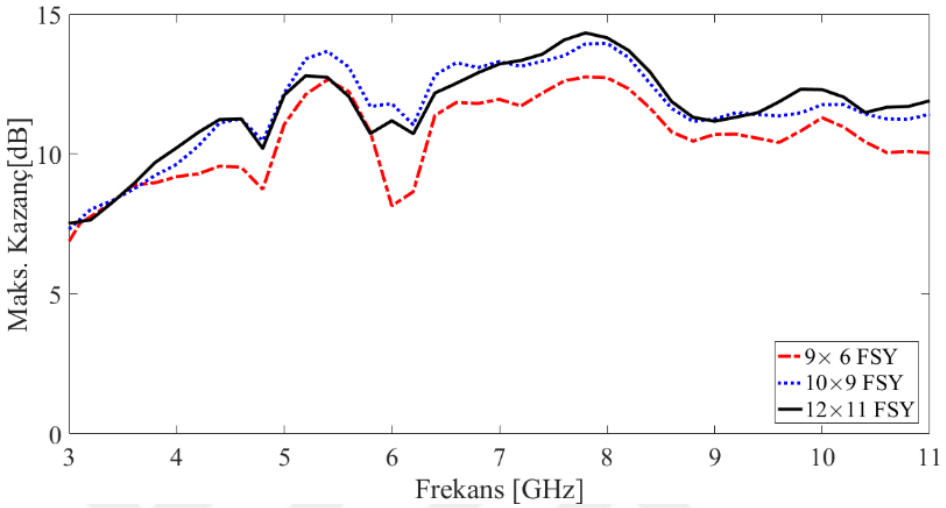
2.5. FSY Dizi Eleman Sayısının Anten−4'ün Maksimum Kazancına Etkisi

FSY dizi eleman sayısının anten kazancını artırma etkisini incelemek için Anten−4'ün arkasına Şekil 2.29'da görülen 6×9, 9×10 ve 11×12 elemanlı UGB FSY−3 plakalar yerleştirilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 2.29. Farklı eleman sayısına sahip UGB FSY−3 tabakaların Anten−4 arkasına yerleşiminin önden görünüşü

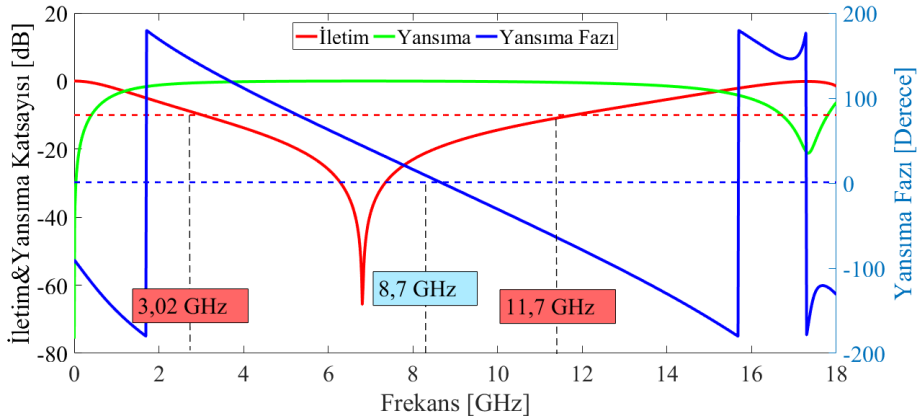
Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 2.30'da görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi dizi eleman sayısının antenin boyutundan biraz daha büyük olması gerekmektedir. Dizi eleman sayısının daha büyük olması ise anten kazancını daha fazla artırmamaktadır.



Şekil 2.30. Farklı eleman sayısına sahip UGB FSY−3 plakalarının Anten−4 maksimum kazancına etkisinin karşılaştırılması

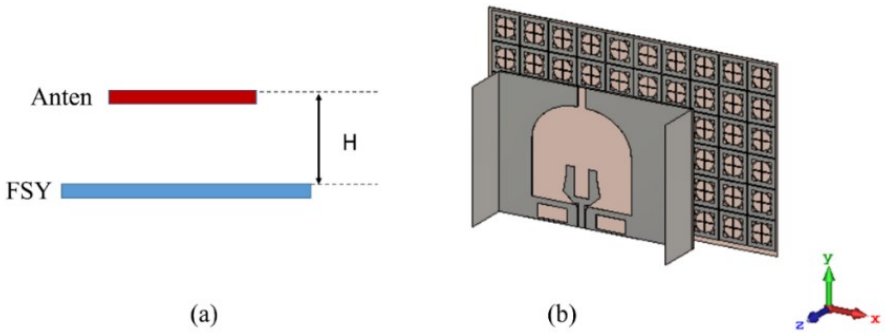
2.6. Ultra Geniş Bantlı Frekans Seçici Yüzey Yansıtıcı ile Anten−5'in Maksimum Kazancının Artırılması

Tasarlanan UGB FSY−3 ile en fazla kazanç elde edildiği için Anten−5'in arkasına yerleştirilerek maksimum kazançlı anten elde edilmek istenmiştir. Bu bölümde UGB FSY−3 iletim katsayısı, yansıma katsayısı ve yansıma katsayısının fazının grafikleri ayrıntılı olarak Şekil 2.31'da verilmiştir.



Şekil 2.31. UGB FSY−3'e ait iletim katsayısı, yansıma katsayısı ve yansıma katsayısı fazının frekans ile değişimi

Yansıma katsayısının fazı 1,7−15,7 GHz frekansları arasında doğrusal olarak azalmaktadır. Fazın sıfıra eşit olduğu frekans 8,7 GHz ve bu frekansın serbest uzay dalga boyu 34,45 mm olduğu için FSY ile anten arasındaki uzaklık en az 34,45 mm olmalıdır. Şekil 2.32'da Anten−5 in arkasına UGB FSY−3'ün yerleştirilmesi görülmektedir. Anten−5 ile UGB FSY arasındaki uzaklık H 35 mm'dir.

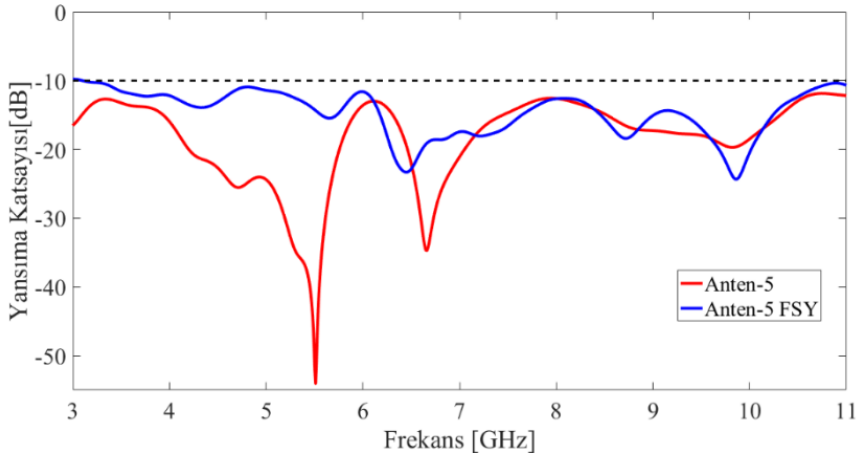


Şekil 2.32. (a) Anten−FSY yerleşimi (b) Anten−FSY perspektif görünümü

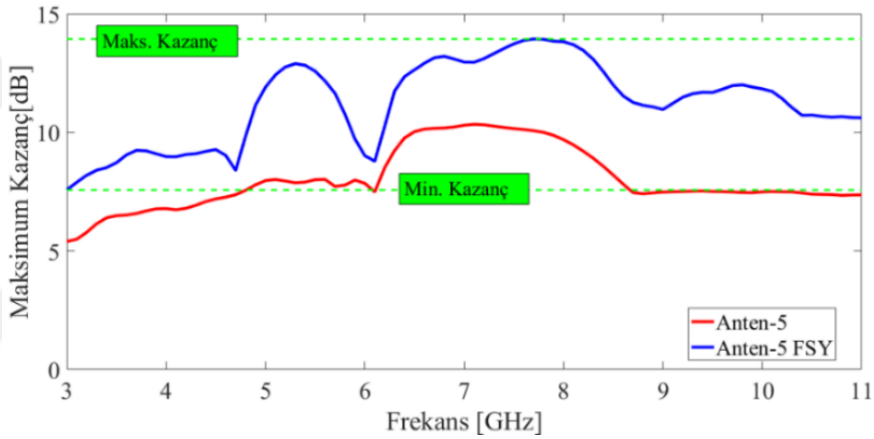
Antenin arkasına FSY yansıtıcı konularak elde edilen antenin yansıma katsayısı grafiği ile FSY konulmadan elde edilen yansıma katsayısı grafiğinin karşılaştırılması Şekil 2.33'te maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.34'te verilmiştir. FSY uygun uzaklığa yerleştirildiği için Anten−5 UGB frekans aralığında ışımaya devam etmektedir.

Anten−5'in arkasına UGB FSY−3 yerleştirildiği zaman elde edilen kazancın minimum değeri 7,57 dB ve maksimum değeri ise 13,94 dB değerindedir. Anten ile UGB FSY−3 arasındaki uzaklık antenin yansıma katsayısı üzerinde büyük etkisi vardır. Bu etkiyi ortaya koyabilmek için FSY yansıma fazının sıfıra eşit olduğu frekans bilgisi kullanılarak elde edilen uzaklığın yarısı ve dörtte biri kadar uzaklığa FSY yerleştirilerek yansıma katsayısı grafikleri elde edilmiştir. Bu uzaklıklar için elde edilen yansıma katsayısı grafikleri Şekil 2.35'te görülmektedir. Anten ile FSY arasındaki uzaklığın 35 mm olması, FSY'nin antenin çalışmasına olumsuz bir etki yapmamıştır.

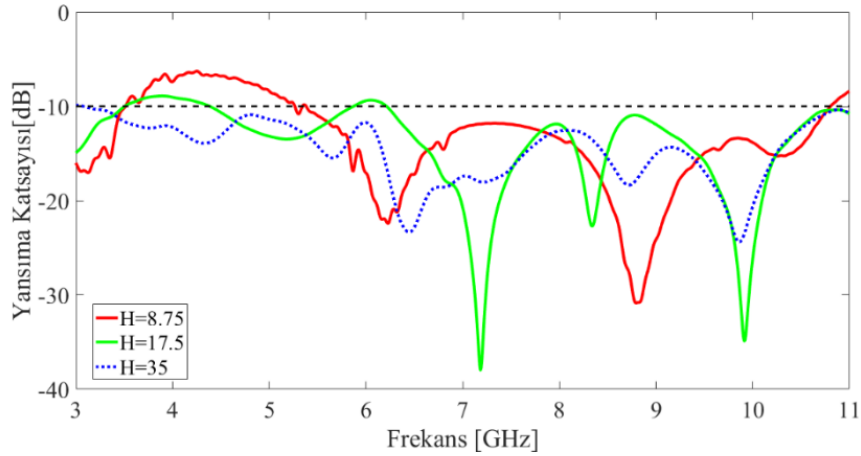
Antenin çalışma performansını daha iyi ortaya koyabilmek için ışıma diyagramları incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.36'te 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için E düzlemi, H düzlemi polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları görülmektedir.



Şekil 2.33. Anten−5 arkasında FSY varken ve yokken elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması



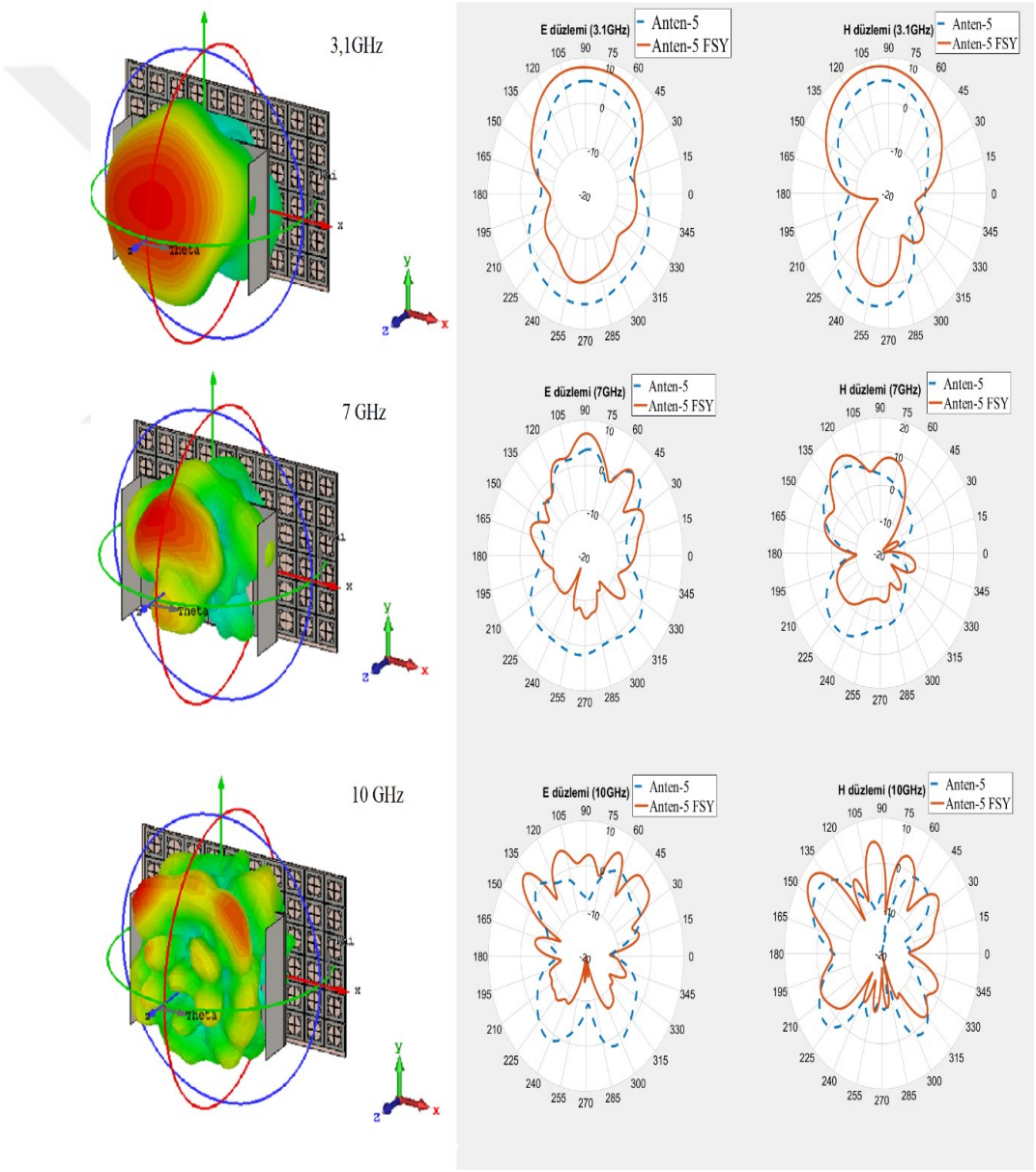
Şekil 2.34. Anten−5 arkasında FSY varken ve yokken elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 2.35. Farklı H değerleri için elde edilen yansıma grafikleri

Anten arkasına FSY konulmasının ışıma diyagramları üzerindeki etkisini görebilmek için FSY varken ve yokken elde edilen ışıma diyagramları karşılaştırıldığında her üç frekans içinde arka loblardaki ışıma azalmış ve ışıma z yönündedir.

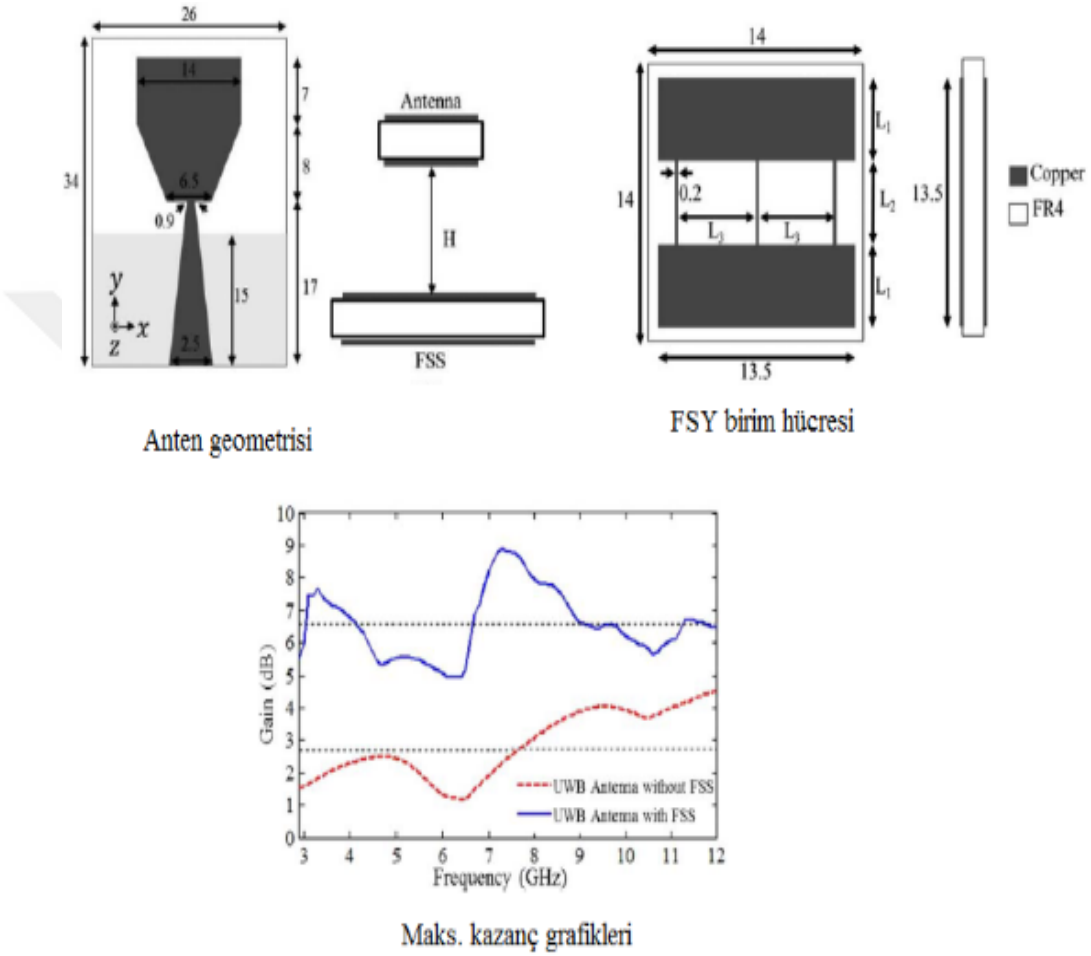
Yapılan tasarım çalışmaları sonucunda istenilen bant genişliğine ve yansıma katsayısı değerlerine sahip yüksek kazançlı CPW beslemeli monopol anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten düşük frekanslarda phi=0° de ışıma yaparken, frekans yükseldikçe kazanç ve yönlendiricilik değerlerinin arttığı ve bunun sonucunda farklı açılarda ışıma yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 2.36. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için polar ve 3 boyutlu ışıma diyagramları

2.7. Anten−4 ve UGB FSY−3'ün Literatürdeki Yapılar ile Karşılaştırılması

[20] numaralı kaynakta yapılmış çalışmadaki anten ve FSY yapısını Şekil 2.37'de görülmektedir. Makalede antenin 30 mm arkasına ultra geniş bantlı, tek tabakanın her iki yüzüne de birim hücre yapısı basılı bir FSY yerleştirilmiştir.

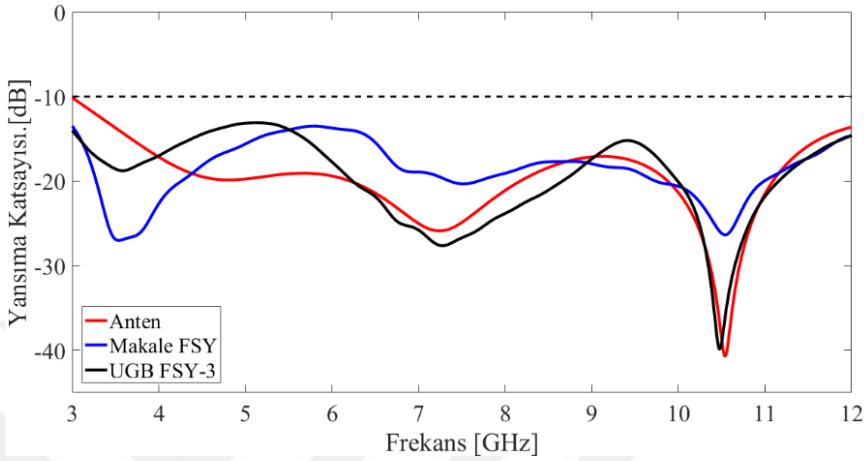


Şekil 2.37. Anten yapısı FSY geometrisi ve maksimum kazanç grafikleri [20]

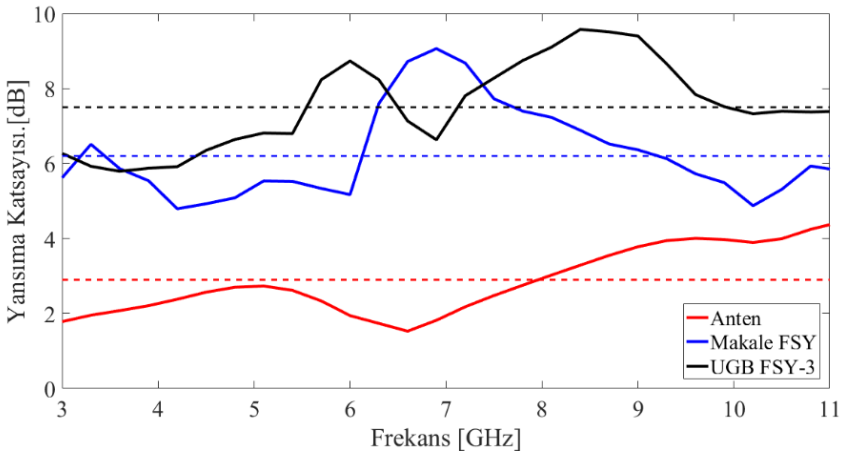
Önerilen UGB FSY−3'ün anten kazancını artırma kapasitesini diğer FSY'ler ile karşılaştırabilmek için bu çalışmadaki antenin 35 mm arkasına UGB FSY−3 yerleştirilerek benzetimleri yapılmıştır. Makalede önerilen FSY yapısı ile ortalama 4 dB artış ile maksimum 8,9 dB kazanç artışı elde edilirken, tasarlanan UGB FSY−3 ile minimum 6 dB maksimum 9,36 dB kazanç elde edilmiştir.

Benzetim sonucunda elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 2.38'de, maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.39'da verilmiştir. Makalede sunulan FSY ile elde edilen anten maksimum kazancının ortalaması 6,2 dB,

önerilen UGB FSY−3 ile elde edilen anten maksimum kazancın ortalaması 7,5 dB'dir. Önerilen UGB FSY−3 tek bir tabakanın bir yüzüne birim hücre basılı yapıdadır. Bu sebeple hem üretim kolaylığı hem de anten kazancını artırma kapasitesi açısından FSY'den daha iyidir.



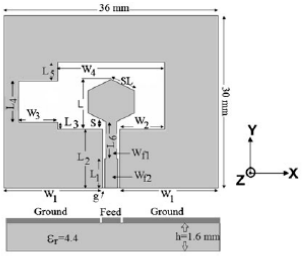
Şekil 2.38. Makalede sunulan anten, Anten−FSY ve Anten−UGB FSY−3 için benzetimler ile elde edilen yansıma katsayısı grafiklerinin karşılaştırılması



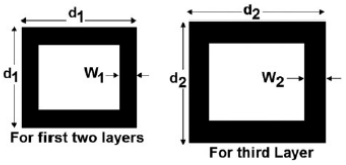
Şekil 2.39. Makalede sunulan anten, Anten−FSY ve Anten−UGB FSY−3 için benzetimler ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerini karşılaştırılması

Diğer bir çalışmada [43] yüksek kazançlı kablosuz haberleşme sistemleri için UGB anten tasarımı sunulmuştur. Anten ve FSY yapısı Şekil 2.40'da görülmektedir. Bu çalışmada 36mm×30mm boyutlarında CPW beslemeli monopol antenin kazancını artırmak için, çift tabakalı bir FSY antenin 26 mm arkasına yerleştirilmiştir. Antenin ölçülen kazancının 4−8 dB arasında değiştiği, FSY ile artırılan kazancın ise 8−12 dB

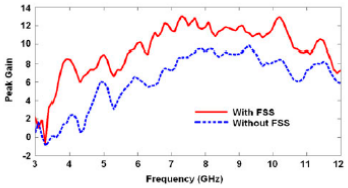
arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu çalışma ile yüksek kazanç elde edilmiştir. Anten boyutları küçük olmasına rağmen, kazancı artırmak için çift tabakalı FSY dizi kullanıldığı için anten boyutunun küçük olmasının bir önemi kalmamıştır.



Anten Geometrisi



FSY birim hücre yapısı



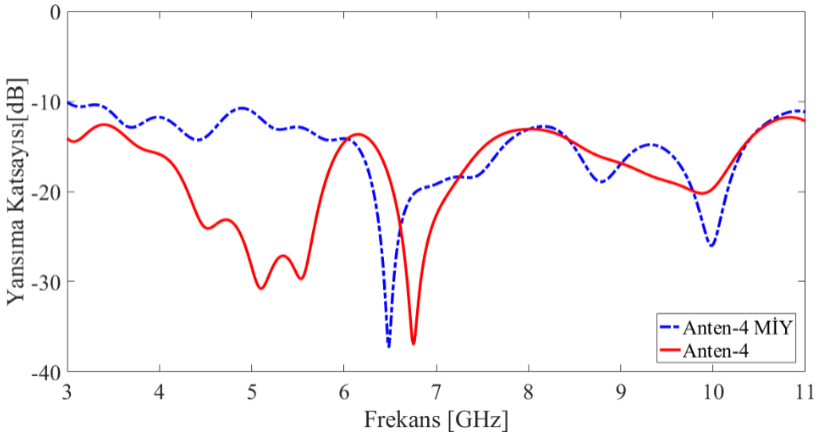
Maksimum kazanç grafikleri

Şekil 2.40. Makalede sunulan antenin FSY geometrisi ve maksimum kazanç grafikleri [43]

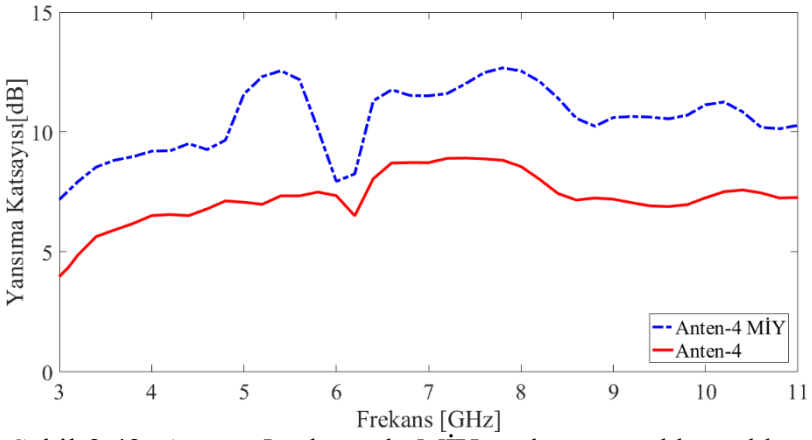
Bu makalede elde edilen sonuçlar ile tasarlanan Anten−4 ve UGB FSY−3 ile elde ilen benzetim sonuçları kıyaslanmıştır. UGB FSY−3 ile artırılmış kazanın ortalaması 10 dB olup kazanç değerleri 6,93−13 dB arasında değişmektir. Yüksek kazançlı anten elde etmek için toprak düzlemi modifiye edilmiş bir antenin arkasına tek tabakalı bir FSY yerleştirmek üretim kolaylığı ve maliyet açısından çok tabakalı FSY kullanmak yerine tercih edilebilir. Makalede sunulan anten boyutları her ne kadar Anten−4'ten daha küçük olsa da anten boyutunun küçük olmasının bir avantajı kalmamaktadır.

2.8. FSY ve MİY Kullanılmasının Anten Kazancının Artırılmasındaki Etkilerinin Karşılaştırılması

Anten−4'ün 35 mm arkasına 135mm×90mm boyutlarında MİY yerleştirilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen yansıma katsayısı Şekil 2.41'de ve maksimum kazanç grafiklerin karşılaştırılması Şekil 2.42'de verilmiştir.



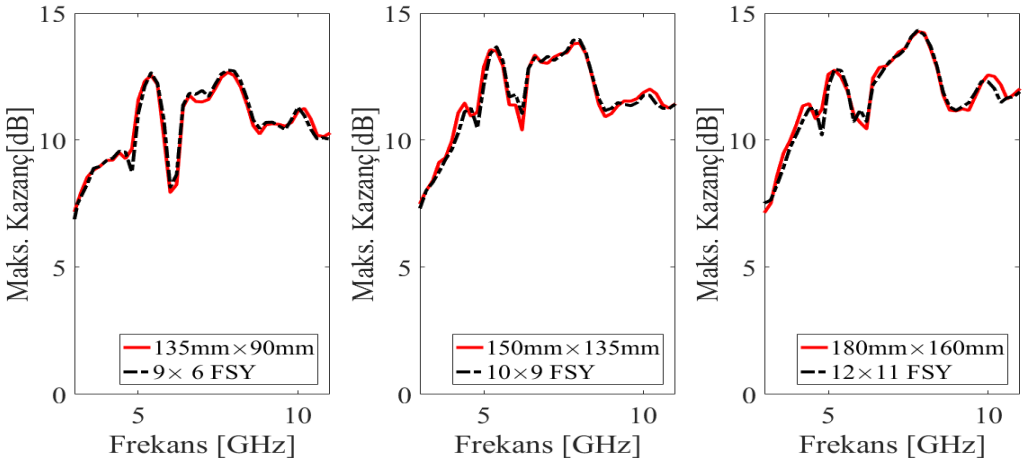
Şekil 2.41. Anten−4 arkasında MİY varken ve yokken elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması



Şekil 2.42. Anten−5 arkasında MİY varken ve yokken elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

Aynı boyutlarda UGB FSY−3 ile MİY'in Anten−4 arkasına yerleştirilmesi ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 2.43'de görülmektedir. Kazanç grafikleri incelendiği zaman UGB FSY−3 ile MIY yerleştirilmesi sonucunda elde edilen kazanç artışı açısından bir fark görülmemektedir. Metal yansıtıcılar tüm frekanslarda kazanç artışı sağlamaktadır. UGB FSY ile iletim katsayısının −1 dB altına kalan frekans bölgesinde kazanç artışı sağlanmaktadır.

Literatürde FSY'ler ile kazanç artışının elde edildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çok büyük çoğunluğunda −10 dB referans alınmış bazılarında ise −3 dB referans alınmıştır. Oysaki −1 dB'nin altında kalan frekanslarda bile anten kazancını artırılabilmektedir.

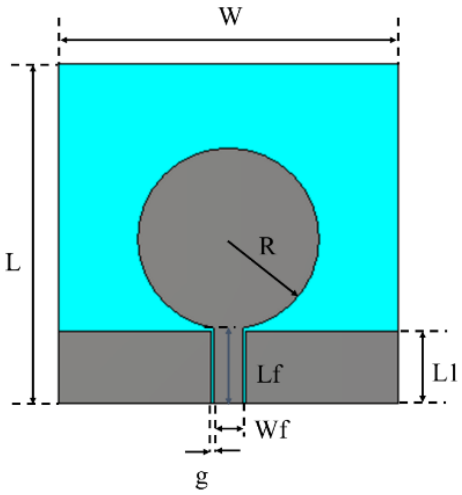


Şekil 2.43. Farklı boyutlardaki FSY ve MIY kullanılarak elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

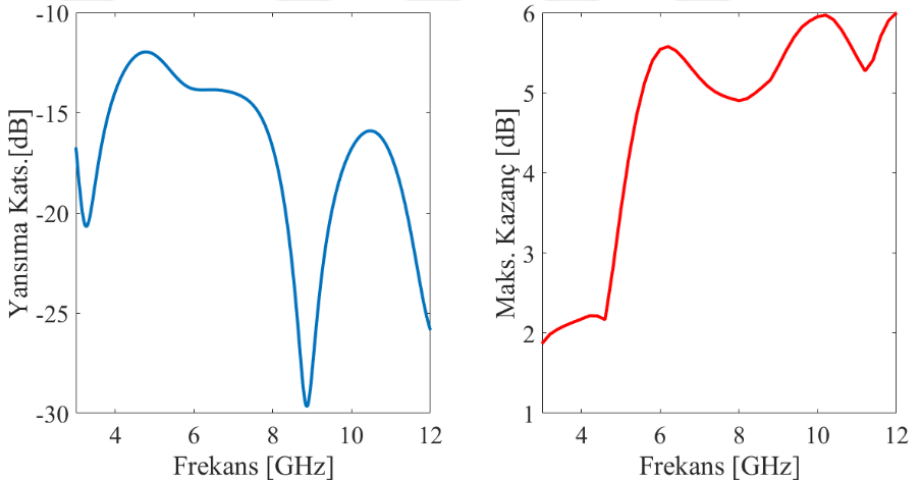
Ayrıca FSY'ler ile anten kazancının artırmanın metal yansıtıcı yüzey ile kazanç artırmaya göre daha iyi olduğu söylense de hem FSY hem de metal yansıtıcı yüzey ile beraber kazanç artışının karıştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Eğer metal yansıtıcı yüzey ile kazanç artışı sağlanabiliyorsa FSY tasarımı için neden uğraş verilmelidir sorusu akla gelmektedir. Metal yansıtıcı kullanıldığında frekans bandı üzerinde bir kontrol imkânı yoktur. Eğer tüm bant boyunca kazanç artışı isteniyor ise FSY yerine metal yansıtıcı kullanılabilir.

Özellikle mikroşerit antenlerin düşük frekanslardaki kazancı yüksek frekanslardaki kazancına göre daha azdır. Sabit kazançlı ya da kazançtaki değişimin az olduğu bir anten tasarlanmak isteniyor ise kazancın düşük olduğu frekans bölgesinde bant durduran FSY'yi anten arkasına yerleştirmek bir çözüm olabilir.

Bu amaç doğrultusunda [49] da yapılan çalışmada sunulan anten kullanılarak farklı frekans bantlarında çalışan bant durduran arkasına farklı FSY'ler ve MİY yerleştirilerek benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.44'de CPW beslemeli dairesel monopol anten görülmektedir. Anten geometrisine ait parametreler mm cinsinden Tablo 2.4'te verilmiştir. Tasarımda kullanılan dielektrik tabakanın bağıl dielektrik sabiti 3 ve kalınlığı 1,6 mm'dir. Şekil 2.44'te bu antene ait yansıma katsayısı ve maksimum kazanç grafiği görülmektedir.



Şekil 2.44. CPW beslemeli dairesel monopol anten yapısı



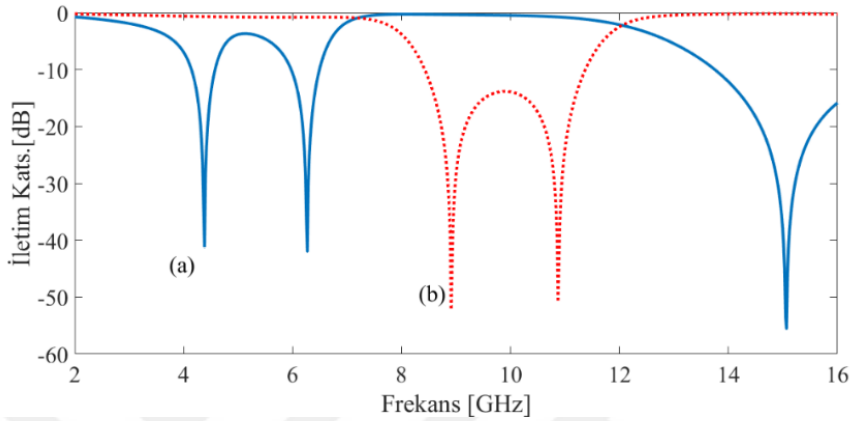
Şekil 2.45. Yansıma katsayısı ve maksimum kazanç grafiği

Tablo 2.4. CPW beslemeli dairesel monopol anten geometrik parametreler

W	L	R	Wf	Lf	L1	g
47	47	12,5	4	10,3	10	0,33

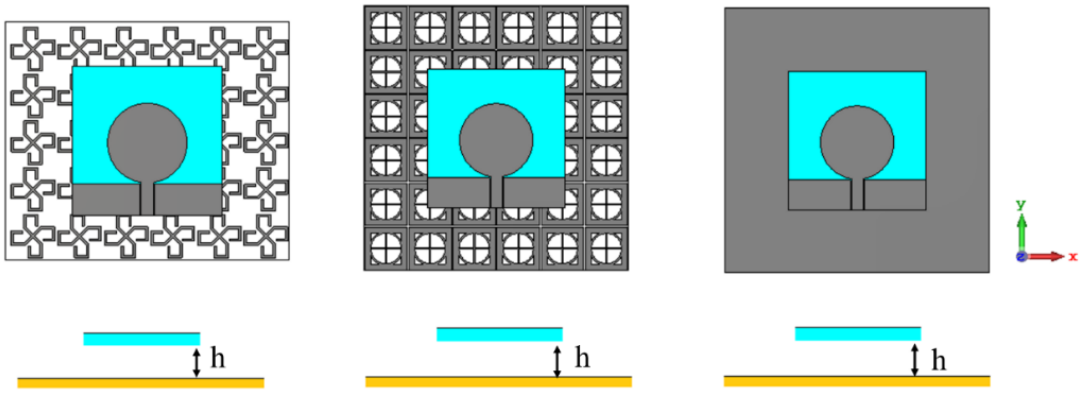
Bu antenin kazancı düşük frekanslarda yüksek frekanslardaki kazancından daha azdır. Düşük frekans bölgesindeki kazancını artırıp yüksek frekanslardaki kazancını artırmadan, tüm UGB bandındaki kazancındaki değişimin daha az olabilmesi için sadece alçak frekanslarda bant durduran bir FSY anten arkasına yerleştirilebilir. Bu sebeple X bant minyatürize bant durduran FSY x ve y yönünde 1,9 ile ölçeklenerek durdurma bandı alçak frekans bölgesine kaydırılmıştır. Birim hücre boyutu

7,7 mm'den 14,63 mm'ye çıkmıştır. İki tabaka arasındaki uzaklık h, 6 mm'dir. Şekil 2.46'da X bant FSY ile ölçeklenerek durdurma bandı kaydırılan FSY'nin iletim katsayısı birlikte görülmektedir. Ölçeklendirme ile birim hücre yapının kol uzunlukları arttığı için dalga boyu artmış ve rezonans frekansları düşük frekans bölgesine kaymıştır.



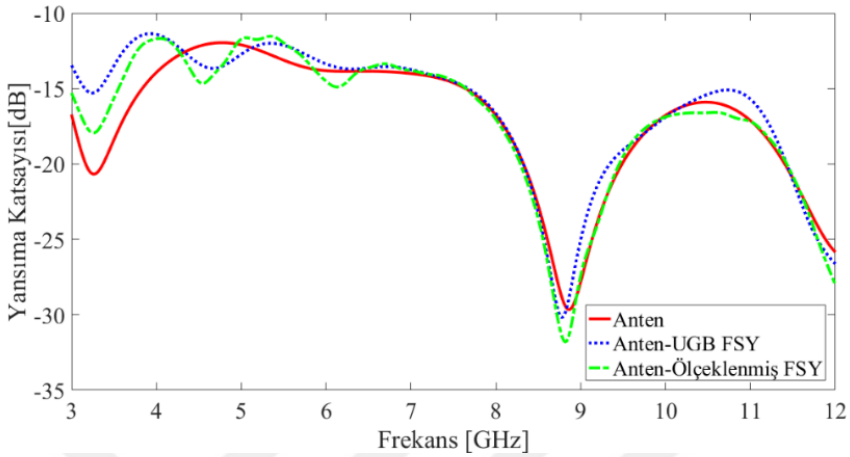
Şekil 2.46. (a) Ölçeklenmiş FSY iletim katsayısı (b) X bant FSY iletim katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 2.47'de CPW beslemeli dairesel monopol antenin 60 mm arkasına Ölçeklenmiş−FSY, UGB FSY−3 ve MİY yerleşimi görülmektedir. Bu yüzeyler antenden 60 mm uzaklığa yerleştirildiği için yansıma katsayısı etkilenmemektedir. Bu uzaklık değeri benzetim denemeleri sonucunda bulunmuştur. Ultra geniş bant antenler ile çalışıldığında FSY'nin yansıma fazının sıfır olduğu frekans bilgisi ile anten FSY arasındaki uzaklık belirleme yöntemi her zaman uygun olmamaktadır. Bu yöntem daha çok dar bantlı antenler için kullanılabilmektedir. Her üç yüzey ile elde edilen antenin yansıma katsayıları ve maksimum kazançlarını karşılaştırılmıştır.

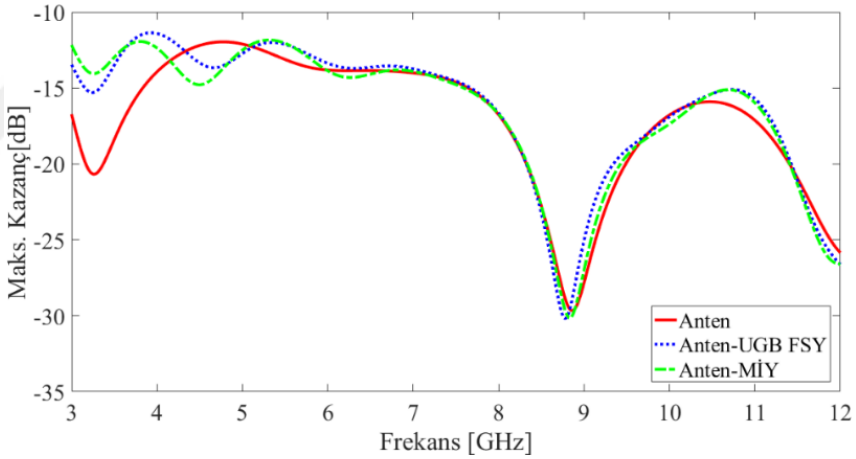


Şekil 2.47. Dairesel monopol anten arkasına Ölçeklenmiş−FSY, UGB −FSY ve MİY yerleşiminin önden görünüşü

Şekil 2.48'de anten, UGB FSY−3 ve Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması, Şekil 2.49'da anten, UGB FSY−3 ve MİY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir.



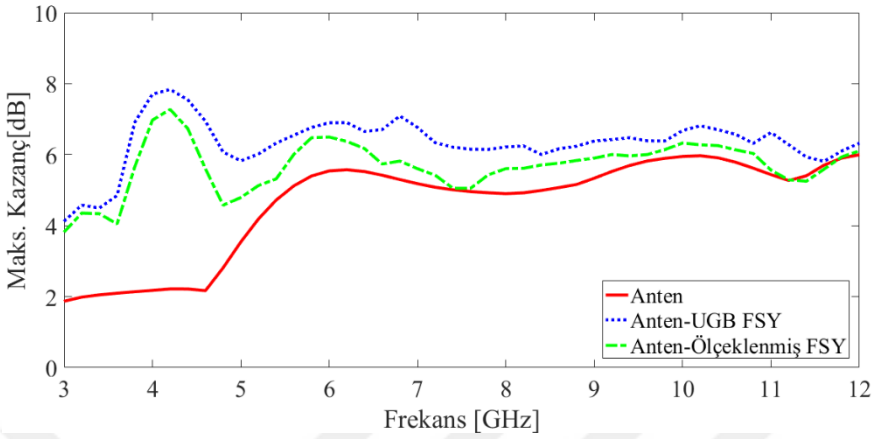
Şekil 2.48. Anten, Anten −UGB FSY ve Anten Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması



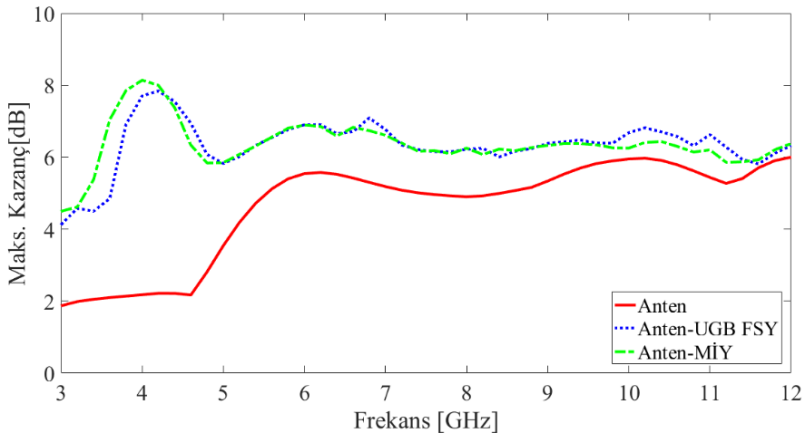
Şekil 2.49. Anten, Anten UGB−FSY ve Anten MİY ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 2.50'de anten, UGB FSY−3 ve Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması ve Şekil 2.51'de ise anten, UGB FSY−3 ve MİY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Ölçeklenmiş FSY'nin iletim katsayısının −1 dB frekans aralığı 2,3−7,2 GHz −3 dB frekans aralığı ise 3,4−6,8 GHz'dir. Ölçeklenmiş FSY ile 3−7,5 GHz aralığında daha fazla kazanç elde edilerek anten kazancı minimum 4 dB maksimum 7,2 dB değerleri arasındadır. Şekil 2.49'da verilen kazanç grafikleri incelendiğinde UGB FSY−3 ile

tüm frekanslarda kazanç artışı elde edilmiştir. Şekil 2.51'deki grafiğe bakıldığında UGB FSY−3 ile MİY kullanımımda hemen hemen aynı kazanç artışına ulaşılmıştır.



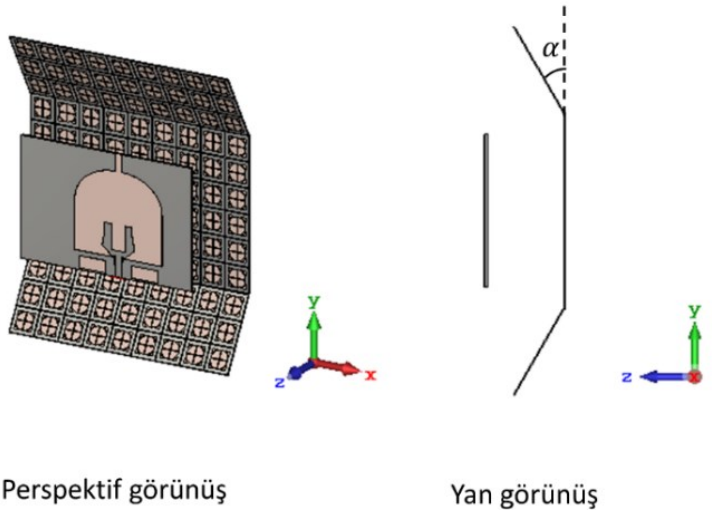
Şekil 2.50. Anten, Anten −UGB FSY ve Ölçeklenmiş FSY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 2.51. Anten, Anten −UGB FSY ve Anten MİY ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

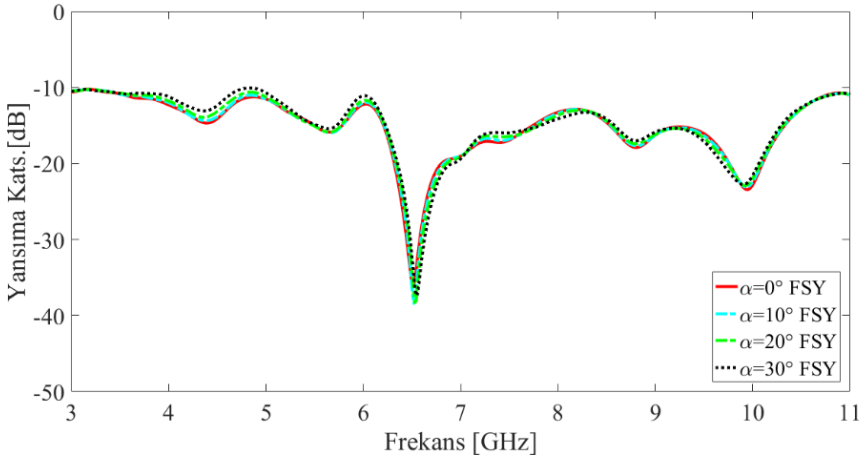
2.9. FSY ve MİY Açılı Yerleşiminin Anten Kazancını Artırmasındaki Etkilerinin Karşılaştırılması

Literatür incelendiğinde anten kazancını artırmak için FSY plakaların antenin arkasına düz bir biçimde yerleştirildiği görülmektedir. FSY plakaların kenar kısımlarına açılı şekilde FSY eklenmesinin kazanç artışı üzerinde etkisi olup olmadığını inceleyebilmek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu sebeple, Anten−4'ün 35 mm arkasına Açılı UGB FSY−3 yerleştirilmiştir. Şekil 2.52'de 6×9 elemanlı FSY plakanın alt ve üst kısımlarına 3×9 elemanlı iki FSY plaka yerleştirmek yoluyla oluşturulan açılı UGB FSY−3 ve Anten−4'ün perspektif ve yan görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.52. Açılı UGB FSY−3 ve Anten−4'ün perspektif ve yan görünüşü

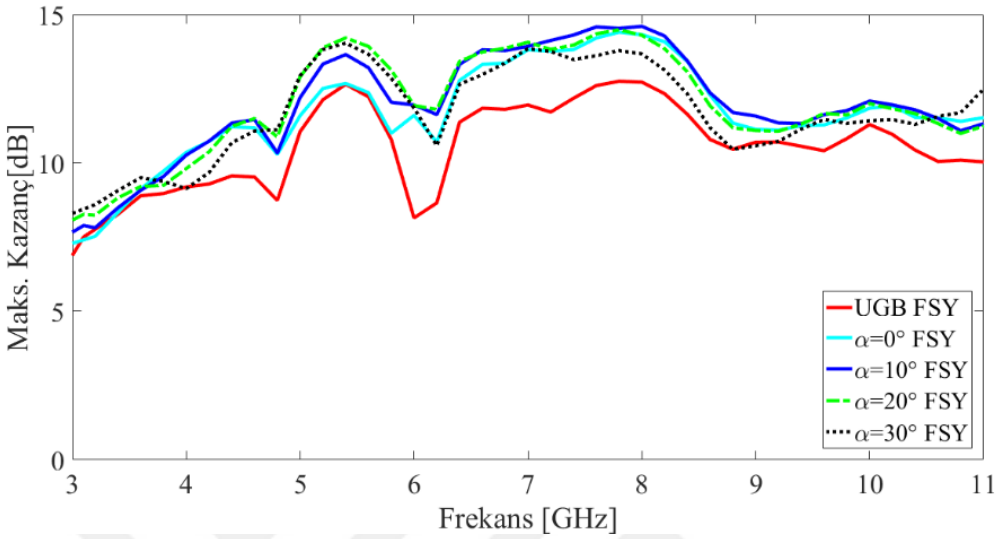
Şekil 2.53'de ve farklı α açıları için elde edilen yansıma katsayısı verilmiştir. α açısının değişimi ile yansıma katsayısı değişmediği görülmüştür.



Şekil 2.53. Farklı α açısı ile Anten−4'ün arkasına yerleştirilen UGB FSY ile elde edilen yansıma katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

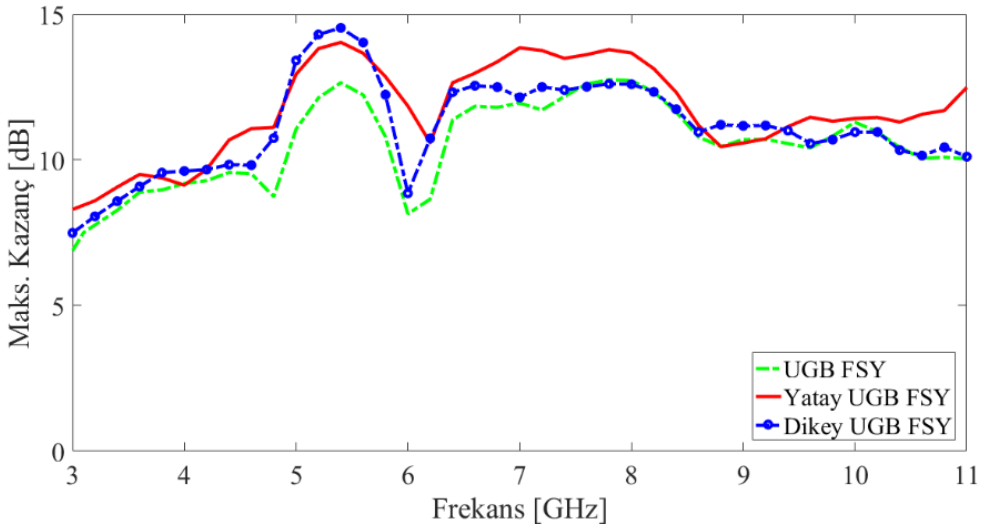
Şekil 2.54'de ise farklı α açıları için elde edilen maksimum kazanç grafikleri ile FSY plakaya yan kenarlar eklenmemiş durumdaki kazanç ile karşılaştırılması görülmektedir. Kazanç grafikleri incelendiğinde alt ve üst kenarlara açılı FSY yerleştirmenin kazanç artışına sebep olduğu açıkça görülmektedir. α açısının 0° olması FSY plaka dikey uzunluğun artması anlamına gelmektedir. Bu artış ile yüksek frekans bölgesinde kazanç artışı sağlanmıştır. Düşük frekanslarda α açısının artmasıyla daha fazla kazanç artışı elde edilirken, yüksek frekanslarda α açısı 10° iken daha yüksek

kazanç elde edilmiştir. Açısız FSY ile anten kazancının 10 dB ve üzerinde olduğu frekanslar 4,9−5,8 GHz ile 6,3−10,6 GHz aralığında iken tüm açılı FSY yerleşimleri için 3,9−10,6 GHz aralığında kazanç 10 dB'nin üzerindedir.



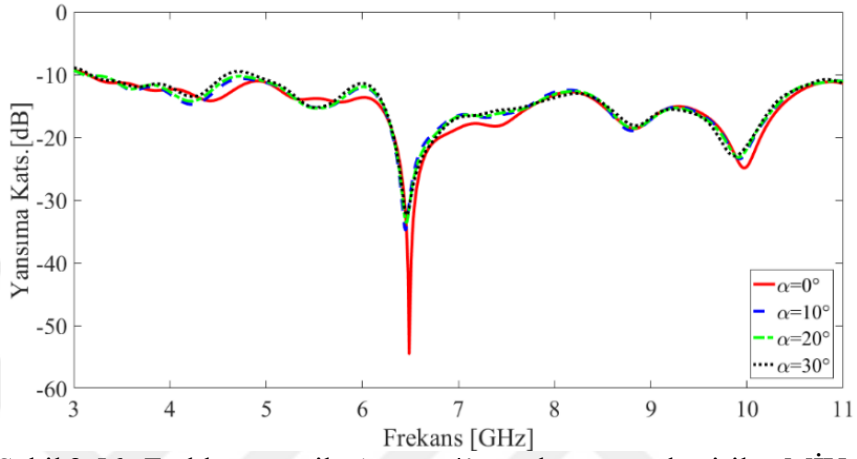
Şekil 2.54. Farklı α açıları için elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

Benzer şekilde açılı FSY plakalar dik kenarlara yerleştirilerek anten kazancına etkisi incelenmek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Dik kenarlara 3×6 elemanlı iki FSY plaka eklenmiştir. Alt ve üst kenarlara eklenen yatay FSY plakalar ile elde edilen kazanç yan kenarlara eklenen dikey FSY plakalar ile elde edilen kazanca göre daha yüksektir.

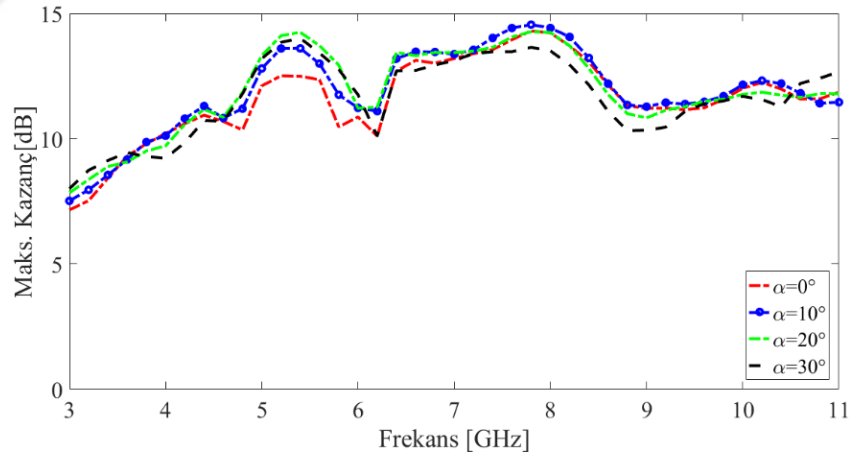


Şekil 2.55. Yatay ve dikey FSY plaka ekleyerek elde edilen kazancın UGB FSY ile elde edilen kazanç ile karşılaştırılması

Anten−4'ün 35 mm arkasına Açılı UGB FSY−3 yapısı ile aynı boyutlarda alt ve üst kenarlara 45mm×135mm boyutlarında açılı MİY yerleştirilerek benzetimleri yapılmıştır. Farklı α açıları için elde edilen yansıma katsayısı Şekil 2.56'da maksimum kazanç grafikleri Şekil 2.57'de verilmiştir. α açısının değişimi ile yansıma katsayısı değişmediği görülmüştür.

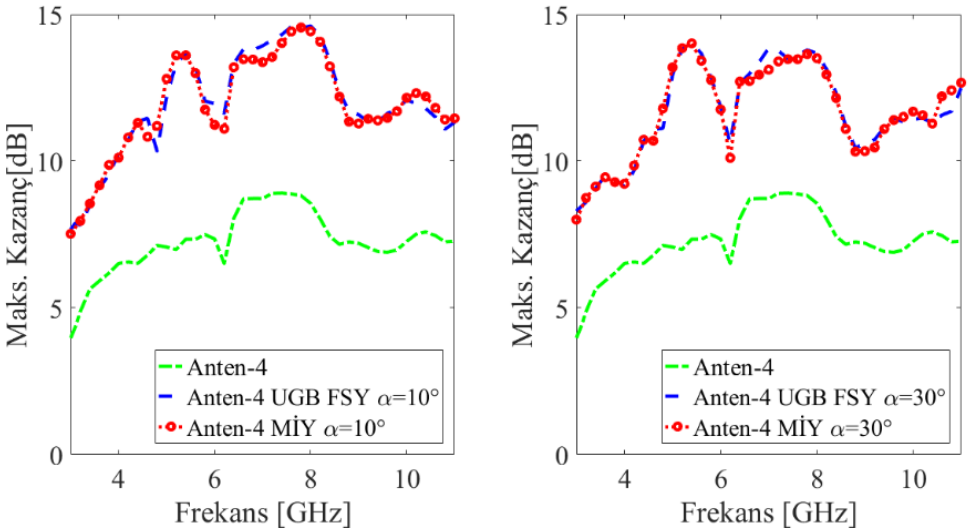


Şekil 2.56. Farklı α açısı ile Anten−4'ün arkasına yerleştirilen MİY ile elde edilen yansıma katsayısı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 2.57. Farklı α açıları için elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

Anten−4 ün arkasına Açılı UGB FSY ve Açılı MİY yerleştirmesi ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 2.58'de verilmiştir. Kazanç grafiklerinden de anlaşıldığı gibi açılı UGB FSY ile açılı MİY kullanmanın kazanç artışı elde edilmesi açısından farkı yoktur.



Şekil 2.58. Anten−4 ün arkasına Açılı UGB FSY ve Açılı MİY yerleştirmesi ile elde edilen maksimum kazanç grafiklerinin karşılaştırılması

3. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Tasarlanan tüm FSY'ler ve antenler kimyasal aşındırma yöntemi ile üretilmiştir. Benzetimlerle elde edilen sonuçların doğrulanması için Kocaeli Üniversitesi Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı bünyesinde bulunan yansımasız odada ölçümler yapılmıştır. İlk önce tasarlanan FSY'lerin iletim katsayıları ile iletim katsayısının açısal performansının ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan tüm antenlerin yansıma katsayısı, Anten−4, Anten−5 ve Anten−5'in arkasına FSY yansıtıcı yerleştirilerek belirli frekanslar için ışıma diyagramları ve kazanç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Frekans Seçici Yüzey Ölçümleri

FSY'lerin iletim katsayısı ölçümleri için yansımasız odada standart kazançlı alıcı ve verici horn antenlerden oluşan test düzeneği oluşturulur. Bu iki anten arasına yerleştirilen FSY'nin enine elektrik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) iletim ve yansıma karakteristiği, anten polarizasyonlarının dikeyden yataya sırasıyla değiştirilmesiyle ölçülür.

3.1.1. X bant minyatürize FSY filtrenin iletim karakteristiği ölçümleri

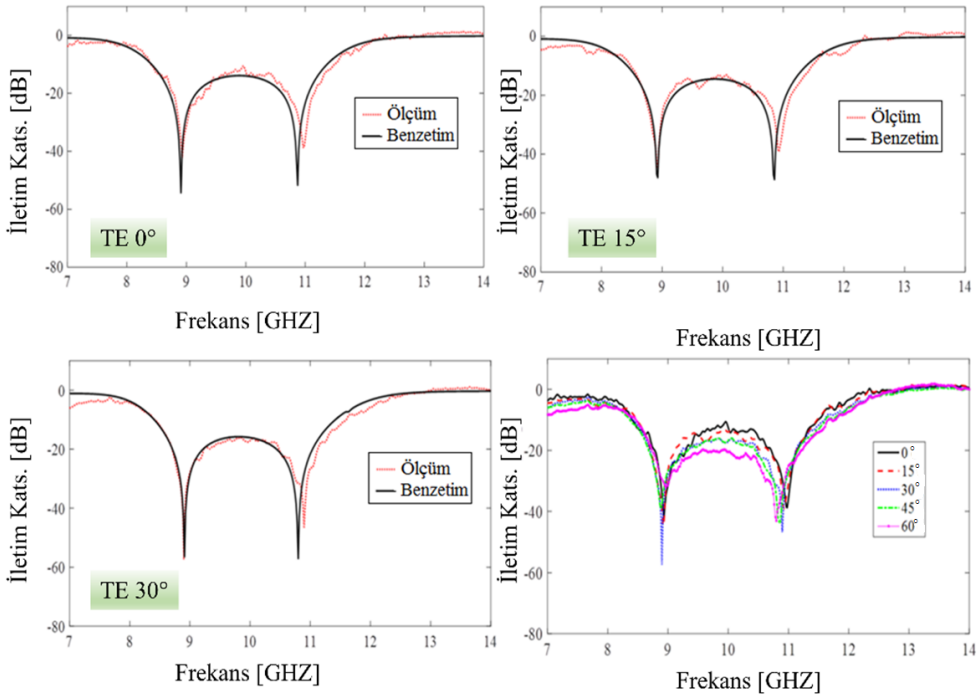
Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak tasarlanan X bant frekanslarında çalışan minyatürize edilmiş açısal bağımsızlık özelliği gösteren bant durduran FSY'nin fotoğrafı Şekil 3.1'de görülmektedir. FSY üretiminde kalınlığı 0,76 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 2,2 olan Arlon Di 880 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Her bir tabaka 21×14 elemanlı diziden oluşmaktadır. Bant durduran FSY'nin ölçümlerinde çalışma frekansı 8–12 GHz, 61mm ×45mm açıklığa ve 120 mm uzunluğa sahip kazancı 15 dB olan iki adet eş horn anten kullanılmıştır. Horn antenlerin 3 dB hüzme genişliği 33,4° ile 32,2° arasındadır. İki anten düşük kayıplı eş-eksenli kablolar ile Rohde & Schwarz ZVB 20 vektör network analizöre (VNA) bağlanmıştır. Alıcı ve verici antenler direk görüş doğrultusunda, aynı yükseklikte ve FSY tabakalarına eşit

uzaklıkta yerleştirilmiştir. Farklı eğik geliş açılardaki çalışmasını test edebilmek için FSY merkez noktasından ölçülmek istenen açı kadar döndürülmüştür.



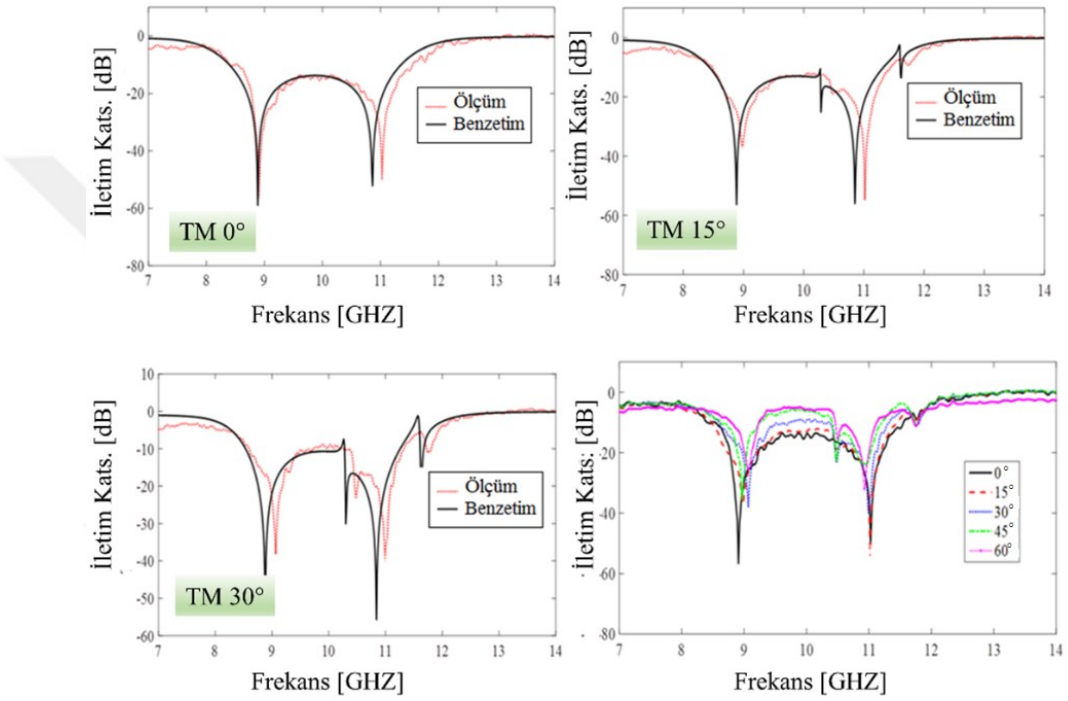
Şekil 3.1. Üretimi gerçekleştirilen çift tabakalı bant durduran FSY filtre yapısının fotoğrafı

Farklı eğik geliş açıları için FSY'nin iletim katsayısı hem TE hem de TM modunda düzlem dalga ile yüzey normali arasında 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° açı yapacak şekilde yerleştirilerek iletim katsayısı ölçümleri alınmış ve CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.2. X bant FSY'nin TE modu için farklı açılarda ölçüm ve benzetim ile elde edilen iletim katsayılarının karşılaştırılması

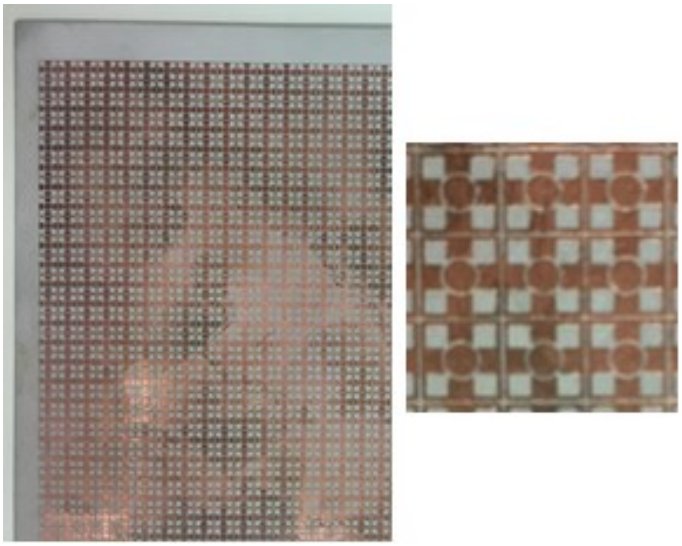
Şekil 3.2'de TE modu, Şekil 3.3'te ise TM modu için alınan iletim katsayısı ölçümlerinin benzetim sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi ölçüm ve benzetim sonuçları birbiri ile tutarlıdır. İletim karakteristiği, TE modunda 60°'ye kadar açısal kararlılık özelliği gösterirken, TM modunda 45°'ye kadar açısal kararlık göstermektedir. Sekizinci dereceden bir filtre karakteristiğine sahip FSY yapısı, geniş ve düz bant geçiren bölgelerine ve keskin inişli durdurma bandına sahiptir.



Şekil 3.3. X bant FSY'nin TM modu için farklı açılarda ölçüm ve benzetim ile elde edilen iletim katsayılarının karşılaştırılması

3.1.2. UGB FSY−1'in iletim karakteristiği ölçümleri

UGB FSY−1'in benzetimlerle elde edilen sonuçlarını doğrulamak için, üretiminde kalınlığı 0,508 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 6,15 olan Arlon AD600 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Üretilen FSY 43×61 elemanlı bir dizidir. Üretilen UGB FSY−1'in fotoğrafı Şekil 3.4'te verilmiştir. UGB FSY−1'in ölçümlerinde çalışma frekansı 1−18 GHz, 244mm×164mm açıklığa ve 204 mm uzunluğa sahip, kazancı 11 dB olan iki adet geniş bantlı horn anten kullanılmıştır. İki anten düşük kayıplı eş-eksenli kablolar ile Rohde&Schwarz ZVB 20 vektör network analizöre (VNA) bağlanmıştır. Antenler FSY yapısından eşit uzaklığa, birbirini görecek şekilde yerleştirilmiştir.

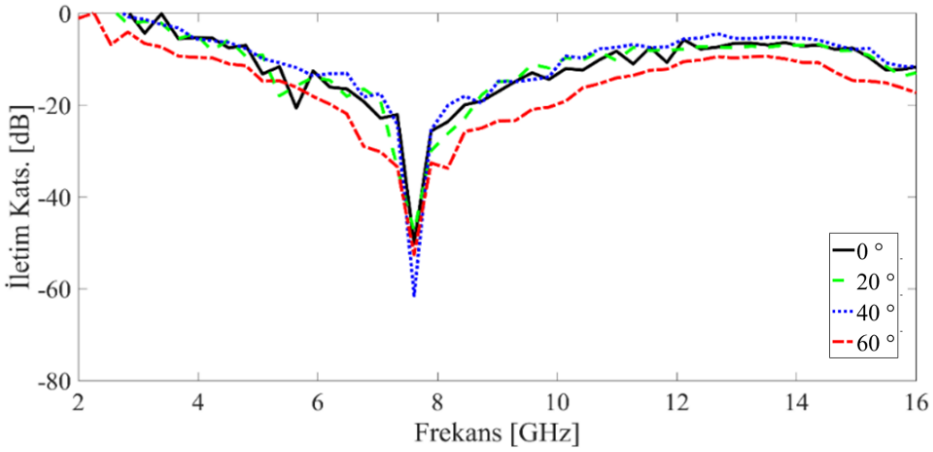


Şekil 3.4. Üretilen UGB FSY−1 tabakasının fotoğrafı

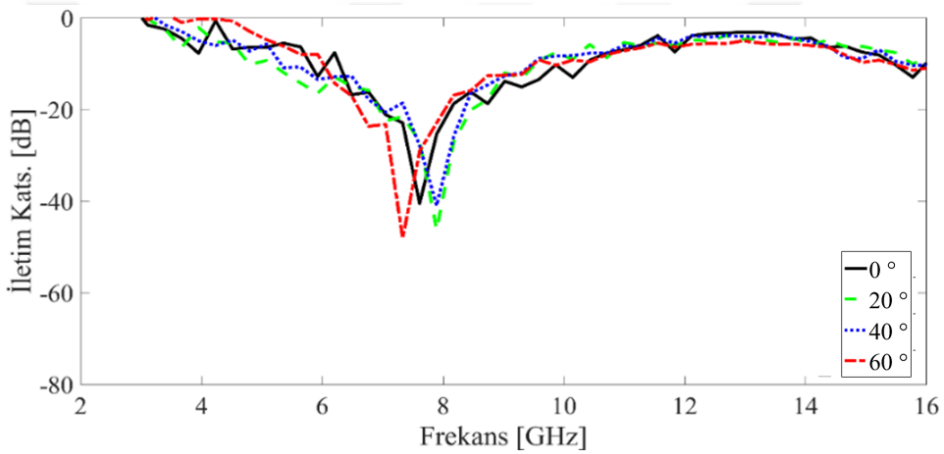
UGB FSY−1, hem TE hem de TM modunda düzlem dalga ile yüzey normali arasında 0°, 20,° 40° ve 60° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. İletim katsayısı ölçümleri alınmış ve CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.5'te TE modu, Şekil 3.6'da ise TM modu için alınan iletim katsayısı ölçümlerinin verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi her iki mod için de 60°'lik geliş açısına kadar iletim katsayısının kararlı olduğu görülmektedir.

Benzetimlerle elde edilen sonuçlarını doğrulamak için, 20° ve 60° ile gelen dalga için benzetim ve ölçüm yolu ile elde edilen iletim katsayısı grafiklerinin karşılaştırılmıştır. Şekil 3.7'de TE ve TM modunda 20°'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 3.8'de TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları birbiri ile uyumludur.

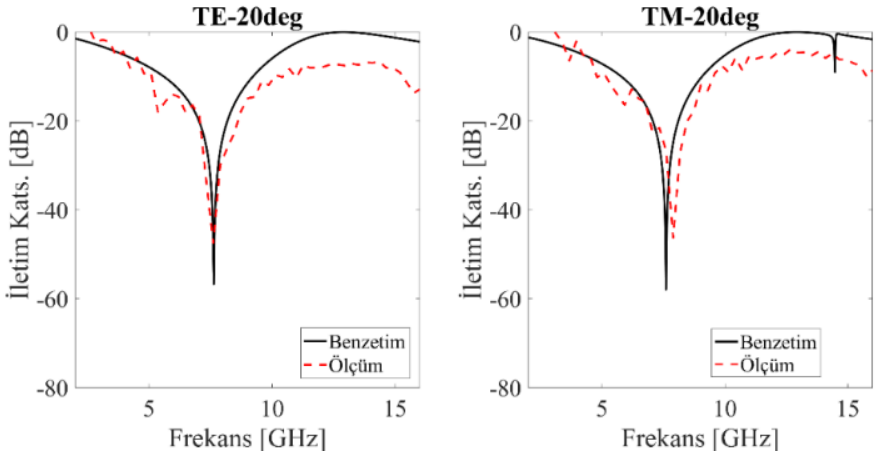
Tasarlanan özgün UGB FSY−1 bant durduran filtre karakteristiğine sahiptir. −3 dB bant genişliği 3,05 GHz ile 10,73 GHz arasında olup FCC tarafından tanımlanan frekans bandını kapsamaktadır. Minyatürleştirme sayesinde, hem TE hem de TM modunda 60°' kararlı rezonans frekansı ve açısal bağımsız bir iletim karakteristiği elde edilmiştir.



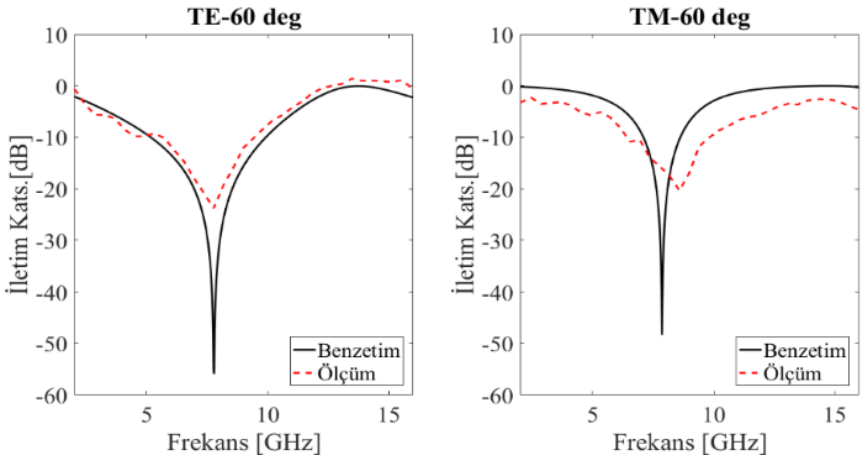
Şekil 3.5. TE modunda 0°, 20°, 40° ve 60°geliş açıları için ölçülen iletim katsayıları



Şekil 3.6. TM modunda 0°, 20°, 40° ve 60°geliş açıları için ölçülen iletim katsayıları



Şekil 3.7. TE ve TM modunda 20°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

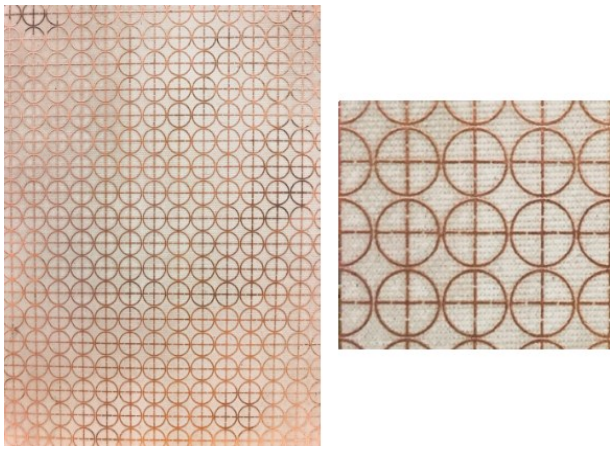


Şekil 3.8. TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

3.1.3. UGB FSY−2'nin iletim karakteristiği ölçümleri

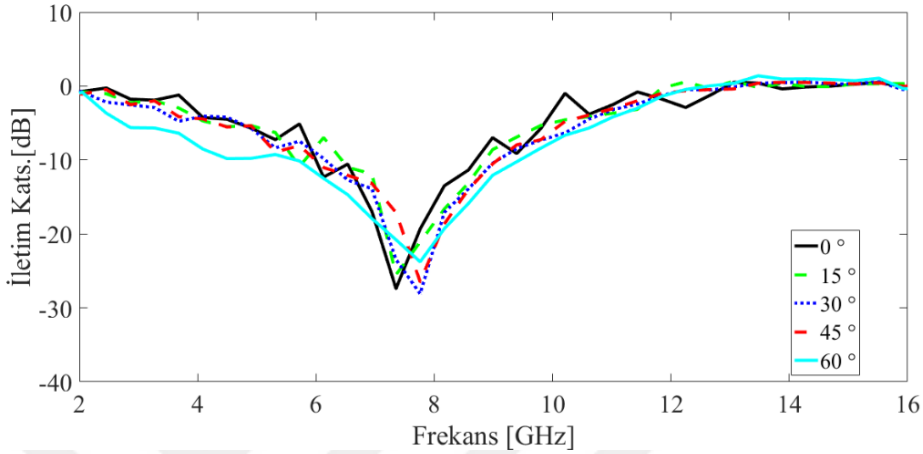
UGB FSY−2 üretiminde kalınlığı 0,508 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 6,15 olan Arlon AD 600 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Üretilen UGB FSY−2'nin fotoğrafı Şekil 3.9'da verilmiştir. UGB FSY−2'nin ölçüm düzeneği UGB FSY−1 ölçüm düzeneği ile aynı özelliktedir.

UGB FSY−2, hem TE hem de TM modunda düzlem dalga ile yüzey normali arasında 0°, 30° 45° ve 60° açı yapacak şekilde yerleştirilerek iletim katsayısı ölçümleri alınmış ve CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.10'da TE modu, Şekil 3.11'de ise TM modu için alınan iletim katsayısı ölçümlerini verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi her iki mod için de 60°'lik geliş açısına kadar iletim katsayısının kararlı olduğu görülmektedir.

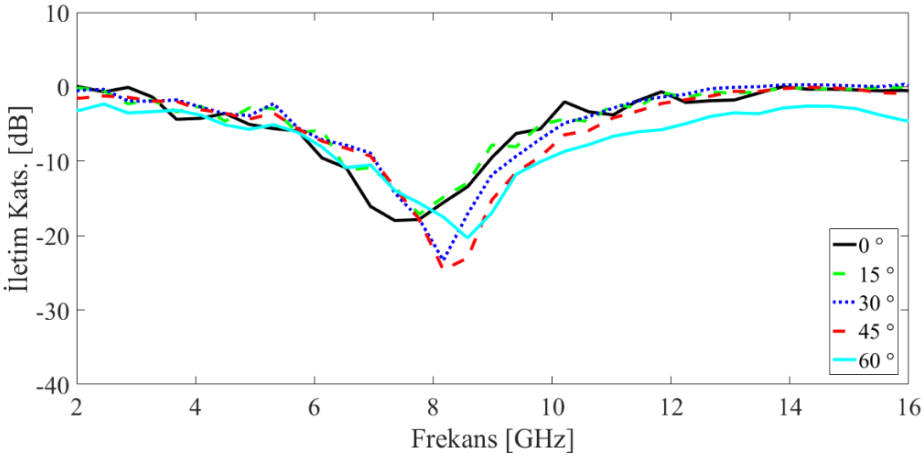


Şekil 3.9. Üretilen UGB FSY−2'nin fotoğrafı

Şekil 3.12'de TE ve TM modunda 30°'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 3.13'te TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları birbiri ile uyumludur.

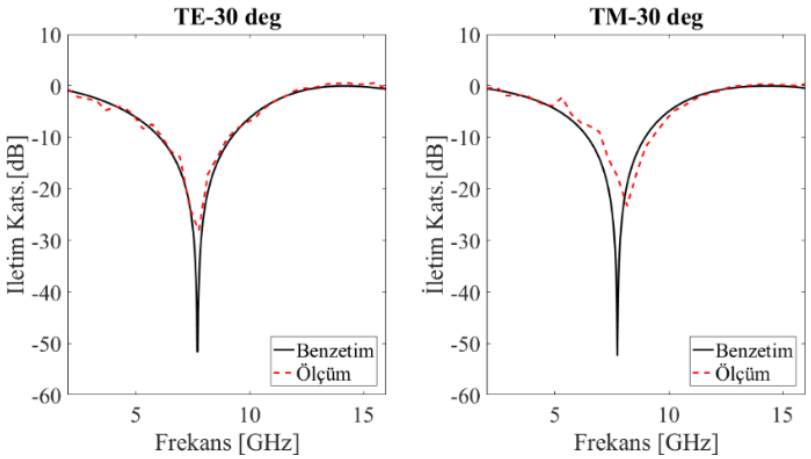


Şekil 3.10. UGB FSY−2'nin TE modu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları

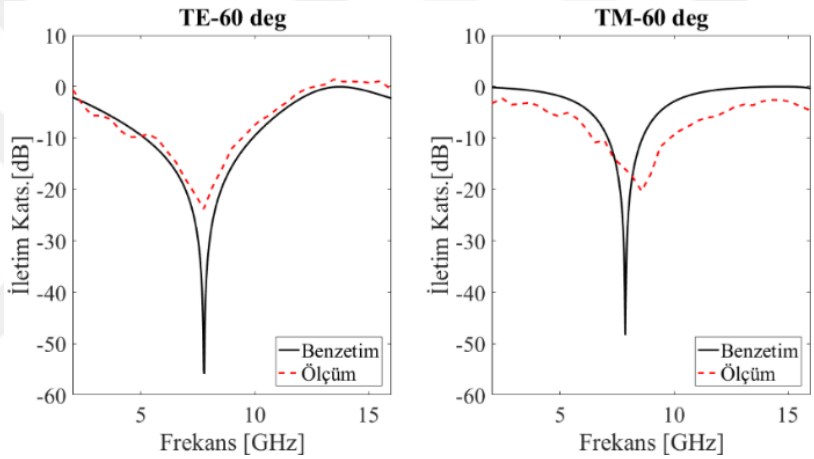


Şekil 3.11. UGB FSY−2'nin TM modu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları

Bu çalışmada, 3,5−11 GHz frekans bandında çalışan, tek tabakalı, ultra geniş bantlı, bant durduran frekans seçici yüzey tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan UGB FSY−2'nin birim hücresinin boyutunun küçük olması ve simetrik yapısı, 60°'ye kadar açı kararlılığı ve polarizasyon bağımsızlığını sağlamıştır.



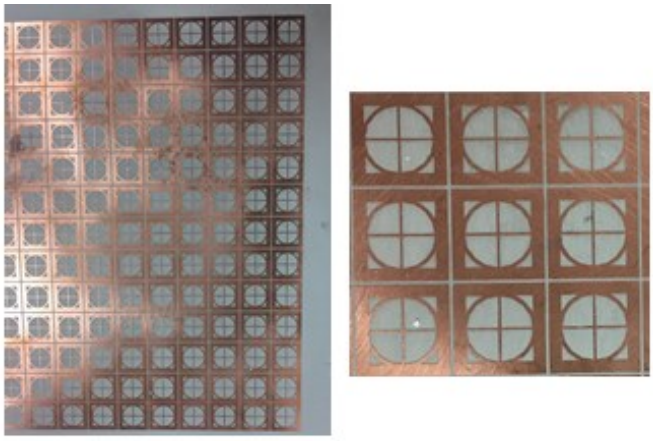
Şekil 3.12. TE ve TM modunda 30°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



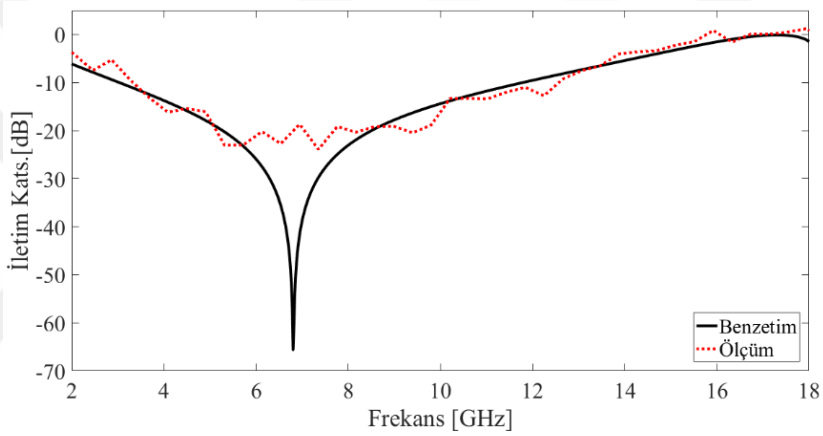
Şekil 3.13. TE ve TM modunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

3.1.4. UGB FSY−3'ün iletim karakteristiği ölçümleri

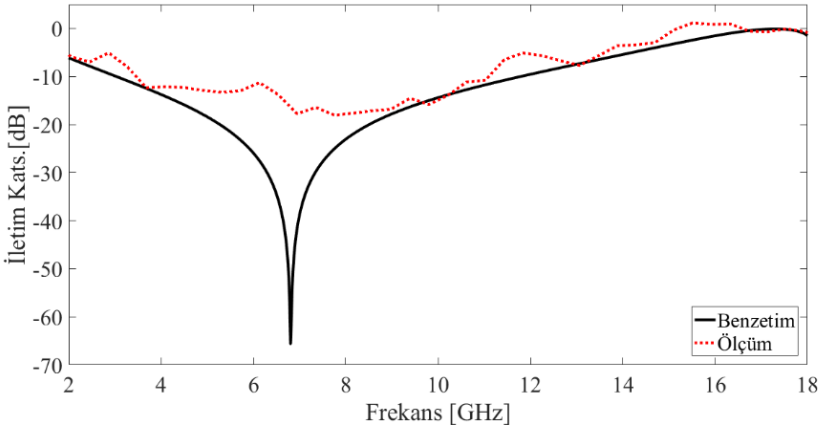
UGB FSY−3'ün üretiminde kalınlığı 0,508 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 6,15 olan Arlon AD 600 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Üretilen UGB FSY−3 yansıtıcının fotoğrafı Şekil 3.14'te verilmiştir. UGB FSY−3 yansıtıcının ölçüm düzeneği UGB FSY−1 ölçüm düzeneği ile aynı özelliktedir. UGB FSY−3'ün hem TE hem de TM modunda yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda iletim katsayısı ölçümleri alınmış ve CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.15'de TE modu, Şekil 3.16'da ise TM modu için alınan iletim katsayısı ölçümlerinin benzetim sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi ölçüm ve benzetim sonuçları uyumludur.



Şekil 3.14. Üretilen UGB FSY−3 yansıtıcı yapısının fotoğrafı



Şekil 3.15. TE modunda iletim katsayısı ölçümü ile CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



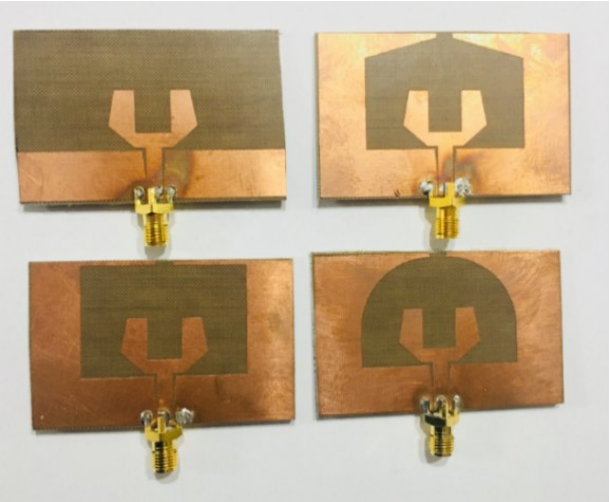
Şekil 3.16. TM modunda iletim katsayısı ölçümü ile CST programı ile elde edilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

3.2. UGB Anten Ölçümleri

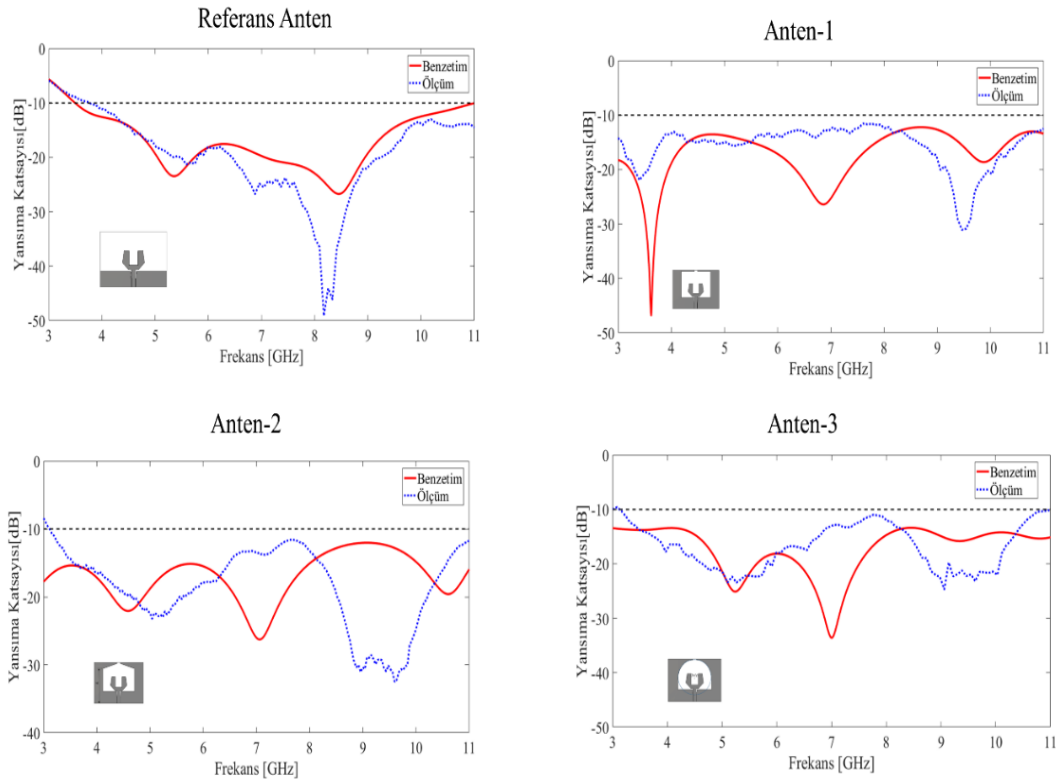
Tasarlanan ve benzetim çalışmaları yapılan UGB antenler, dielektrik sabiti 3 ve kalınlığı 1,524 mm olan Arlon AD 300 mikrodalga kartına basılmıştır. Pratikte, UGB antenlerin istenen frekans bandı boyunca empedans bant genişliği özelliğini koruması güçtür. Özellikle SMA konnektörün antene lehimlenmesi sırasında antenin yansıma katsayısı bozulabilmektedir. Bu sebeple lehimlemenin dikkatli yapılması önemlidir.

Antenlerin yansıma katsayısı, ışıma diyagramları ve kazanç ölçümleri yansımasız odada gerçekleştirilmiştir. DAMS x100 Heavy Duty Measurement System anten ölçüm sisteminde kullanılan referans anten, 500 MHz−20 GHz frekans aralığında çalışan yüksek kazançlı ultra geniş bantlı bir horn antendir. Referans horn anten ile ölçümü yapılan antenin arasındaki uzaklık 240 mm'dir. Bu ölçümler esnasında verici anten olarak kullanılan referans antenin kazanç bilgileri, verici-alıcı anten arasındaki mesafe gibi bilgiler ölçüm düzeneğinde kullanılan ara yüze yüklenerek ölçümler yapılmıştır.

Şekil 3.17'de üretilen Referans anten, Anten-1, Anten-2 ve Anten-3'ün fotoğrafları görülmektedir. Bu antenlerin yansıma katsayıları ölçülmüştür. Ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması Şekil 3.18'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere antenler istenen frekans aralığı içinde çalışmaktadır.



Şekil 3.17. Üretilen Referans Anten, Anten−1, Anten−2 ve Anten−3'ün fotoğrafları

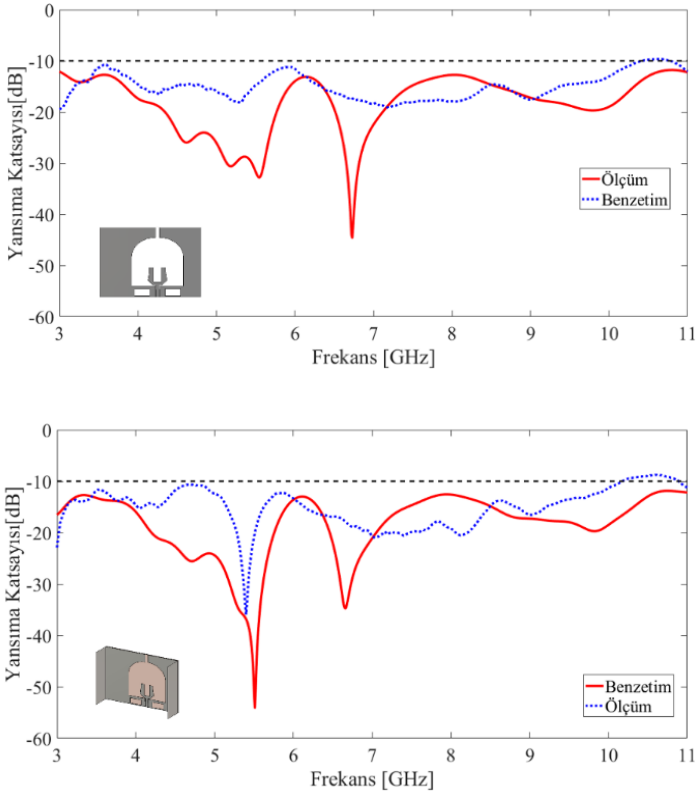


Şekil 3.18. Üretilen Referans Anten, Anten-1, Anten-2 ve Anten-3'e ait ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 3.19'da üretilen Anten−4ve Anten−5'in fotoğrafları görülmektedir. Bu antenlerin yansıma katsayıları ölçülmüştür. Ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması Şekil 3.20'de verilmiştir.

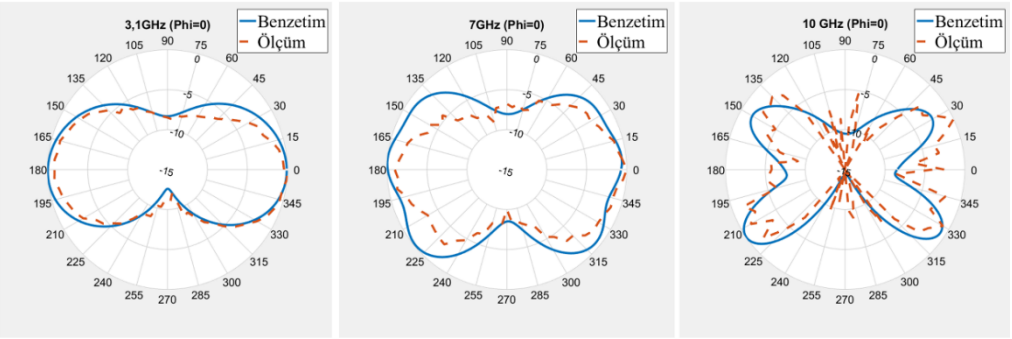


Şekil 3.19. Anten−4 ve Anten−5'in fotoğrafları



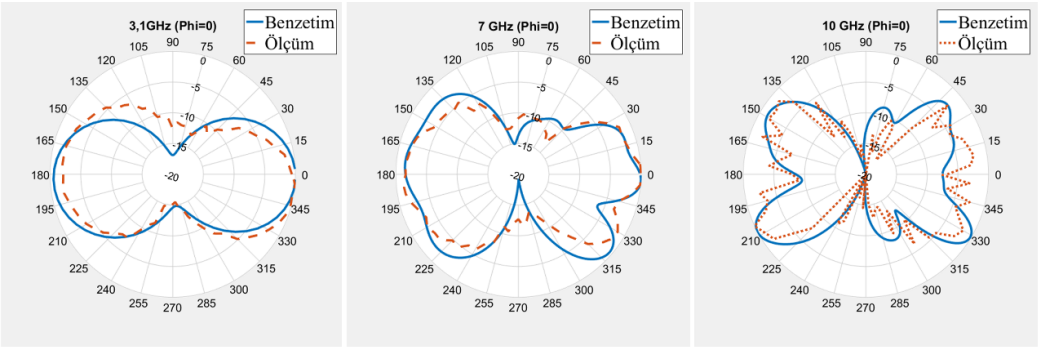
Şekil 3.20. Üretilen Anten−4ve Anten−5 ait ölçülen ve CST programı ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırılması

Anten−4 için yapılan ışıma diyagramı ölçümleri yapılırken, ölçüm sistemi platformunun yükselme açısı sıfıra eşit alınıp azimut açı taraması yapılmıştır. Benzer Şekilde CST programında benzetim yapılırken phi açısı sıfıra eşit alınıp theta açı taraması yapılmıştır. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3.21'de verilmiştir.



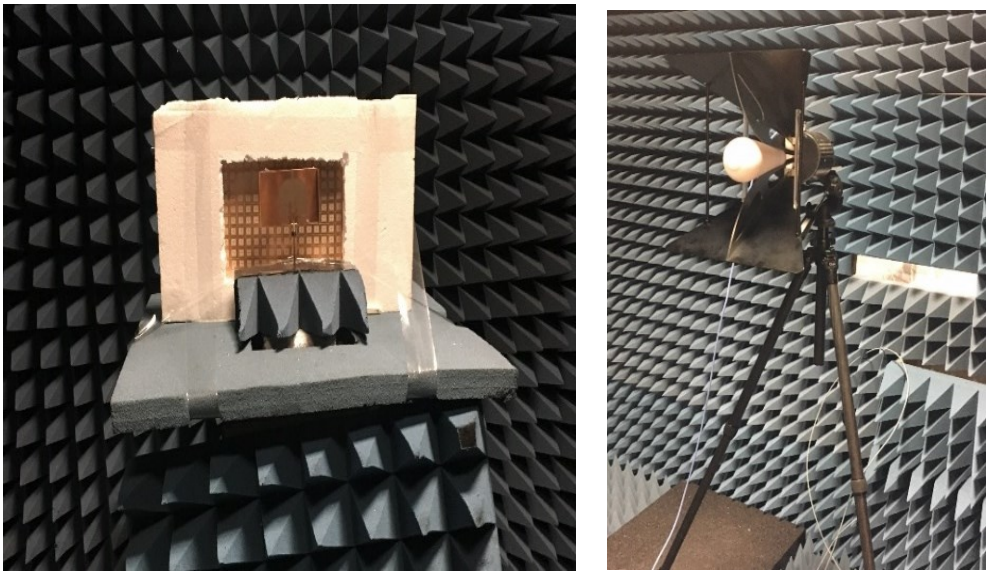
Şekil 3.21. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarında Anten-4'ün CST benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma diyagramlarının karşılaştırılması

Benzer şekilde Anten−5 için, 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekanslarında ışıma diyagramları ölçülmüştür. Şekil 3.21'de CST benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma diyagramlarının karşılaştırılması görülmektedir.

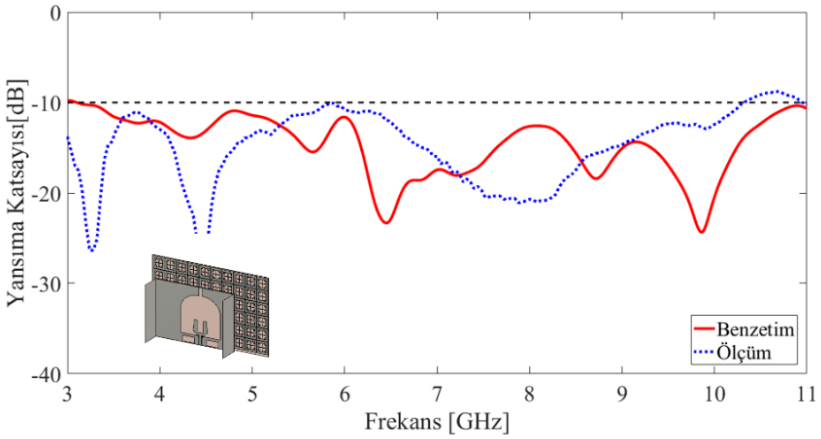


Şekil 3.22. 3,1GHz, 7GHz ve 10GHz frekanslarında Anten−5'in CST benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen ışıma diyagramlarının karşılaştırılması

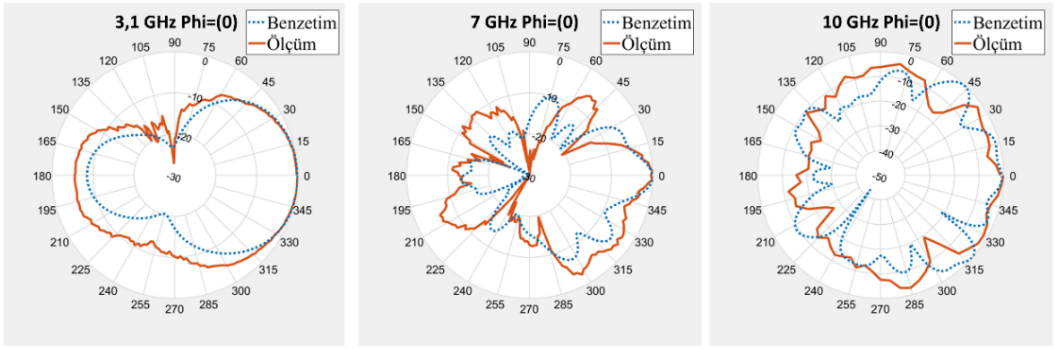
Yansımasız odada Anten−5'in 35 mm arkasına UGB FSY−3 yerleştirilerek yapılan ölçüm düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.23'de görülmektedir. Ölçüm sonucu elde edilen yansıma katsayısı ile CST benzetim sonucu elde edilen sonuç ile karşılaştırılması Şekil 3.24'de görülmektedir. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için ışıma diyagramları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 3.25'te görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları birbiri ile uyumludur.



Şekil 3.23. Anten−5'in arkasına yerleştirilerek yapılan ölçüm düzeneği



Şekil 3.24. Ölçüm sonucu elde edilen yansıma katsayısı ile CST benzetim sonucu elde edilen sonuç ile karşılaştırılması



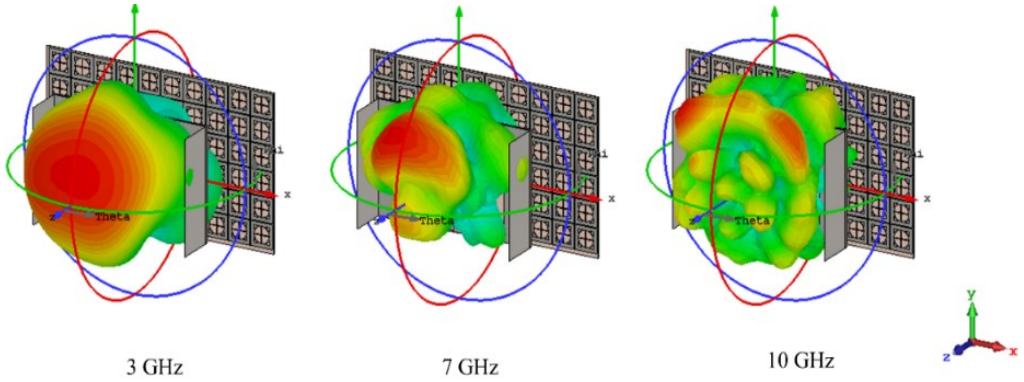
Şekil 3.25. 3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları için ışıma diyagramları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Antenlerin ışıma diyagramları incelendiğinde frekansın değişmesi ile ışıma diyagramlarının değiştiği görülmektedir. Antenin maksimum kazancını ölçerken antenin hangi yönde maksimum ışıma yaptığı belirlenmelidir. Bunun için belirli frekanslarda CST ile elde edilen ışıma diyagramlarının benzetim sonuçları incelenmiştir.

3,1 GHz, 7 GHz ve 10 GHz frekansları Anten−5'in arkasına FSY yerleştirilerek yapılan benzetim çalışması ile elde edilen 3 boyutlu ışıma diyagramları Şekil 3.26'da görülmektedir.

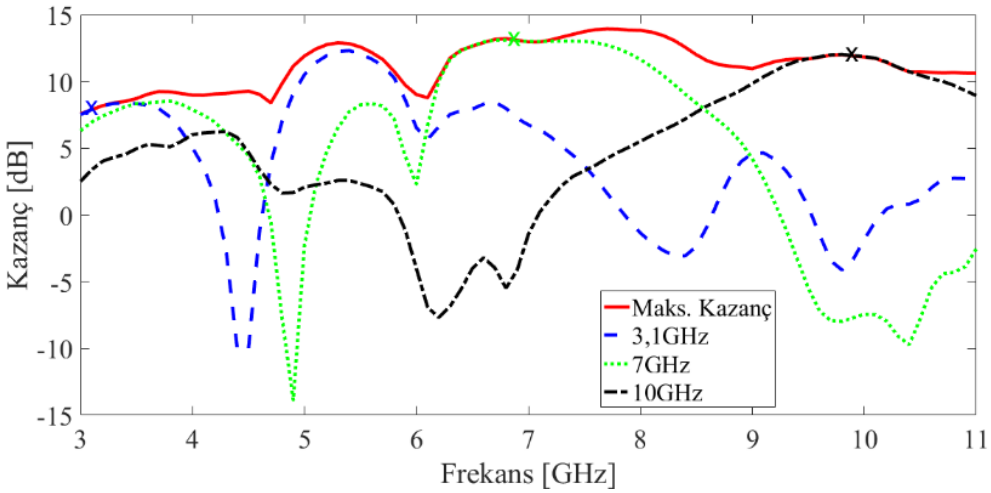
3,1 GHz frekansı ışıma diyagramında maksimum kazanç yönü θ açısı 15°, φ açısı ise 85°dir. 7 GHz frekansı için ışıma diyagramının maksimum kazanç yönü, θ açısı 30°, φ açısı ise 105°dir. 10 GHz frekansı için ise , θ açısı 50° ve φ açısı 130°dir. Bu açı değerleri için elde edilen maksimum kazanç grafikleri Şekil 3.27'de görülmektedir.

Belirlenen bu açı değerleri ile anten ölçüm sisteminin azimut ve yükselme açıları tayin edilerek kazanç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yükselme açısını belirlemek için θ açısı kullanılmış ve azimut açısı 360° tarama yapılmıştır.

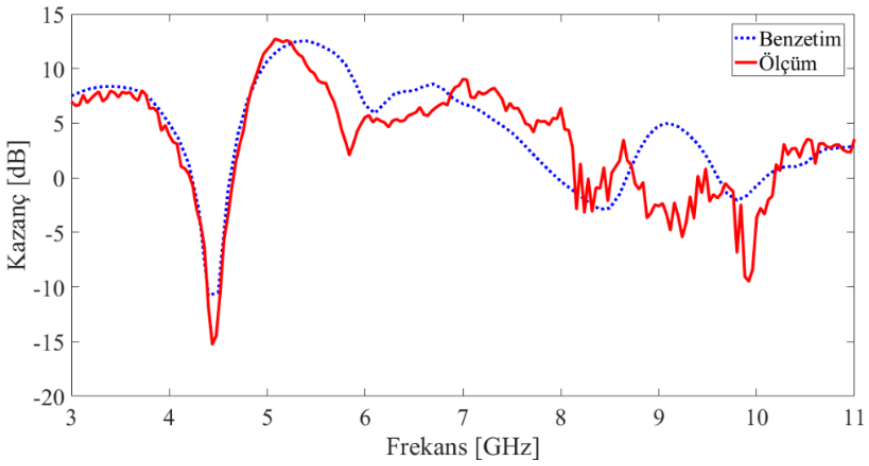


Şekil 3.26. Anten−5 ve FSY yapısının 3 boyutlu ışıma diyagramı benzetim sonuçları

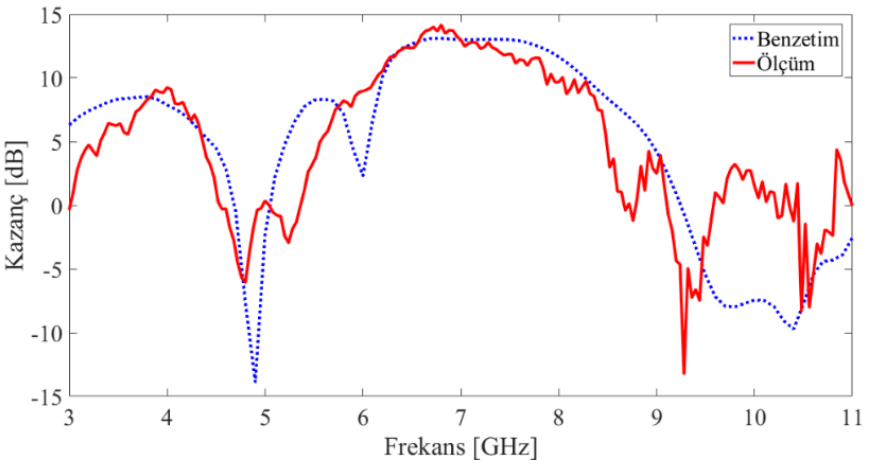
3,1 GHz frekansı için ölçülen yönlü kazanç ile benzetim ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 3.28'de verilmiştir. 7 GHz frekansı için ölçülen yönlü kazanç ile benzetim ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 3.29'da verilmiştir. 10 GHz frekansı için ölçülen yönlü kazanç ile benzetim ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 3.30'da verilmiştir. Ölçülen kazanç grafikleri ile benzetim sonuçları birbirleriyle uyumludur.



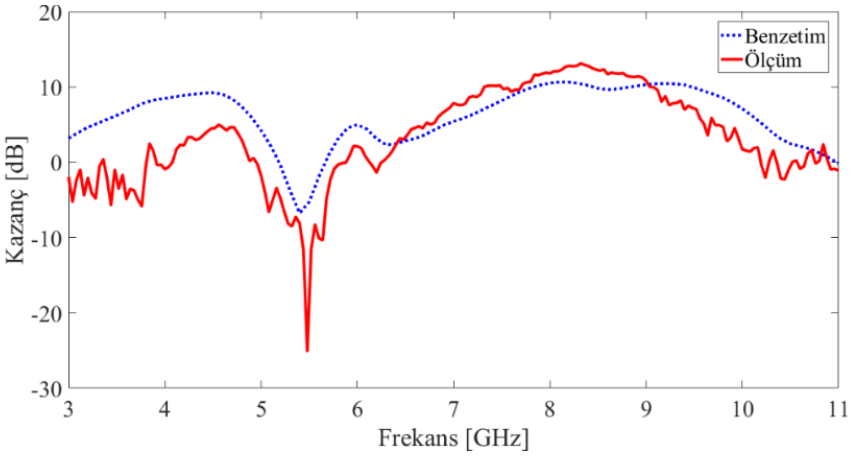
Şekil 3.27. Farklı frekanslar için elde edilen yönlü kazanç benzetim grafikleri



Şekil 3.28. 3,1 GHz frekansında yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 3.29. 7 GHz frekansında yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 3.30. 10 GHz frekansı yönlü kazanç benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, frekans seçici yüzeylerin tasarımı, tasarımı etkileyen parametreler detaylı olarak açıklanarak 4 adet özgün bant durduran filtre cevabına sahip FSY tasarımı sunulmuştur. Frekansa bağlı olarak iletim katsayıları ve çalışmasını etkileyen parametreler için analizler yapılmıştır. Literatürde bulunan temel birim hücre geometrilerin tek başına kullanılarak ultra geniş bantlı yansıtıcı FSY tasarlamak için birden fazla dielektrik tabaka kullanmak ya da bir tabakanın her iki yüzünü de kullanmak gerekmektedir. Başka bir yol ise, tek bir tabaka yalnızca bir yüzünü kullanarak birden fazla rezonant birim hücre geometrisini uygun boyutlarda birleştirip yeni bir geometri oluşturmaktır. Ultra geniş bant aralığının alt frekansı olan 3,1 GHz için dalga boyu yaklaşık 97 mm olduğu için birim hücre boyutu büyük olmaktadır. Birim hücre boyutunu küçültmek için dielektrik sabiti yüksek olan tabakalar seçilerek, rezonans frekansı düşük frekanslara doğru kaydırılabilir. Böylece daha küçük boyutlu birim hücreler tasarlanarak minyatürleşme sağlanır. Minyatürize edilmiş birim hücre geometrileri açısal kararlılık özelliği sağlar. Eğik geliş açılarında bile bant genişliği korunur. Bu kısımda UGB bandında çalışan tek bir tabakanın yalnızca bir yüzüne basılı FSY yansıtıcı tasarımı yapılmıştır. Literatürde bu geometrik özellikte bir UGB-FSY tasarımı bulunmamaktadır.

Çalışmanın diğer kısmında özgün bir referans anten tasarımı yapılmıştır. Anten tipi olarak son zamanlarda geniş bant genişliği sunması sebebiyle UGB uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen monopol planar anten tercih edilmiştir. Ayrıca deliksiz olmasından dolayı daha az kayıplı olması ve ışımaya katkısından ötürü eş düzlemsel hat besleme türü seçilmiştir. Antenler, dielektrik katsayısı 3 kalınlığı 1,524 mm olan Arlon D 300 mikrodalga kartı üzerine basılmıştır. Referans antenin empedans bant genişliği UGB olarak ayarlandıktan sonra antenin tipini karakterize eden matematiksel ifadeler bulunmadığından deneme yanılma metodu ile toprak düzlemi üzerinde literatürde benzeri bulunan yapılar uygulanmıştır. Bu yapılar sayesinde referans antenin bant genişliği arttırılmış ve kazancı yükseltilmiştir. Bu antenlerin kazancını daha fazla artırabilmek için boyutları büyütülmüş ve yan taraflarına iletken yapraklar

eklenmiştir. Bu haliyle özgün yüksek kazançlı bir anten elde edilmiştir. Antenlerin arkasına X bantta ve ultra geniş bant aralığında çalışan FSY'ler yerleştirilerek, FSY'lerin çalışma bölgesinin anten kazancına olan etkileri incelenmiştir. Benzetimler sonucunda bir antenin hangi frekans bölgesinde kazancının artırılması isteniyorsa, o frekans bölgesinde çalışan bir FSY kullanmanın bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca FSY tasarımında −10 dB referans alındığında, bu tip FSY'ler ile daha fazla kazanç artışı sağlandığı görülmüştür.

Literatür incelendiğinde yayınlarda, antenin kazancını artırmak için mükemmel iletken yüzey (MİY) yerine FSY kullanmanın daha avantajlı olduğu söylense de hem FSY hem de MİY kullanılarak yapılmış karşılaştırılmalı çalışmaya rastlanmamıştır. Bu sebeple FSY yerine FSY ile aynı boyuta sahip MİY aynı uzaklığa konularak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre, UGB FSY−3 ile MİY kullanmak anten kazancını aynı oranda artırmaktadır.

Literatürde anten kazancını artırmak için FSY plakaların antenin arkasına düz bir biçimde yerleştirildiği görülmektedir. FSY plakaların kenar kısımlarına açılı şekilde FSY eklenmesinin kazanç artışı üzerinde etkisi olup olmadığını inceleyebilmek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Anten kazancı, açılı UGB FSY−3 kullanarak düz UGB FSY−3 kullanmaya göre daha fazla artırmaktadır. Benzer şekilde açılı FSY kullanmak yerine açılı MİY kullanmak aynı sonucu vermektedir.

Özellikle mikroşerit antenlerin düşük frekanslardaki kazancı yüksek frekanslardaki kazancına göre daha azdır. Sabit kazançlı ya da kazançtaki değişimin az olduğu bir anten tasarlanmak isteniyor ise kazancın düşük olduğu frekans bölgesinde bant durduran FSY'yi anten arkasına yerleştirmek bir çözüm olabilir.

KAYNAKLAR

[1] Begaud X., *Ultra Wide Bant Antennas,* 1st ed., Wiley, London, 2011.

[2] Allen B.,Dohler E., Okon E.,Malik W., Brown A., Edwards D., *Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications Radar and Imaging*, 1st ed., Wiley, London, 2007.

[3] Kumar G., Ray K.P, *Broad Band Microstrip Antennas*, Artech House, 1st ed., London, 2003.

[4] Vaidya A. R., Gupta R. K., Mishra S. K., Mukherjee J., Efficient High Gain with Low Side Lobe Level Antenna Structures Using Parasitic Patches on Multilayer Superstrate, *Microwave and Optical Technology Letters,* 2012, **54**(6), 1488-1493.

[5] Kim J.H., Kim J.-K., Kim Y.-J., Lee H.-M., High Gain Antenna Using Parasitic Shorted Annular Patch Structure, *IEEE Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, Bangkok, Thailand, 11-14 December 2007.

[6] Yıldırım B., Çetiner B.A., Enhanced Gain Patch Antenna with a Rectangular Loop Shaped Parasitic Radiator, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, **7**, 229 – 232.

[7] Elboushi A., Sebak A., High-Gain Hybrid Microstrip /Conical Horn Antenna for MMW Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, **11**, 129-132.

[8] Rahman A.A., Verma A.K., Omar A.S., High Gain Wideband Compact Microstrip Antenna With Quasi-Planner Surface Mount Horn, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium* , Philadelphia, USA, 8-13 June 2003.

[9] Saritha V., Sumanth T., Analysis and Design of an Exponential Taper Slotted Antenna with Improved Gain by Using Leaf Shaped Slots, *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, **9**(1), 1-4.

[10] Liu Y. Q., Liang J. G., Wang Y. W., Gain-Improved Double-Slot TSA with Y-Shaped Corrugated Edges*, Electronics Letters*, 2017, **53**(12), 759 -760.

[11] Ranga Y., Verma A.K., Esselle K.P., Planar-Monopole-Fed, Surface-Mounted Quasi-TEM Horn Antenna for UWB Systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, **58**(7), 2436-2439.

[12] Yeap S. B., Chen Z. N., Microstrip Patch Antennas with Enhanced Gain by Partial Substrate Removal, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, **58**(9), 2811–2816.

[13] Chen N.-W., Liang Y.-C., An Ultra-Broadband Coplanar-Waveguide Fed Circular Monopole Antenna with Improved Radiation Characteristics, *Progress In Electromagnetics Research C*, 2009, **9**, 193–207.

[14] Fereidoony F., Chamaani S, Member, Mirtaheri S.A., UWB Monopole Antenna with Stable Radiation Pattern and Low Transient Distortion, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, **10**, 302-305.

[16] Singha R.,Vakula D., Compact Ultra-Wideband Fractal Monopole Antenna with High Gain Using Single Layer Superstrate, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, **59**, 482–488.

[16] Manohar M., Kshetrimayum R. S., Gogoi A. K., Printed Monopole Antenna with Tapered Feed Line Feed Region and Patch for Super Wideband Applications, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, **8**(1), 39-45.

[17] Narayan, S., Shamala, J. B. , Nair, R.U., Electromagnetic Performance Analysis of Novel Multi-Band Metamaterial FSS for Millimetre Wave Radome Applications*, Computer Materials & Continua*, 2012, **31**(1), 1–16.

[18] Mohanna M.M., Salem D.A., Abdallah E. A. F., El-Henawy H. M. S., Novel Shape of UWB Microstrip Patch Antenna with Enhanced Gain Using EBG Structure, *PIERS Proceedings,* Suzhou, China,12-16 September 2011.

[19] Tahir F.A., Naqvi A.H., A Super Wideband Printed Antenna with Enhanced Gain Using FSS Structure, *12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology*, Islamabad, Pakistan, 13-17 January 2015.

[20] Tahir F.A., Arshad T., Ullah S., Flint J.A., A Novel FSS for Gain Enhancement of Printed Antennas in UWB Frequency Spectrum, *Microwave Optical Technology Letters,* 2017, **59**, 2698–2704.

[21] Ranga Y., Matekovits L., Esselle K.P., Weily A.R., Multioctave Frequency Selective Surface Reflector for Ultrawideband Antennas*, IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2001, **10**, 219–222.

[22] Kushwaha N., Kumar R., Design of A Compact CPW-Feed Asymmetric Elliptical Slot Ultrawideband Antenna for High Gain*, Microwave Optical Technology Letters,* 2015, **57**, 314–319.

[23] Ranga Y, Matekovits .L, Weily A.R., Esselle KP., A Constant Gain Ultra-Wideband Antenna With Multi-Layer Frequency Selective Surface, *Progress Electromagnetics Researchs Letters*, 2013, **38,** 119–125.

[24] Kushwaha N., Kumar R., Oli T., Design of A High Gain Ultrawideband Slot Antenna Using Frequency Selective Surface, *Microwave Optical Technology Letters,* 2014, **56**, 1274–1277.

[24] Ranga Y., Matekovis L., Weily A.R., A Low-Profil Dual-Layer Ultra-Wideband Frequency Selective Surface Reflector, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, **55**, 1223–1227.

[25] Yahya R., Nakamura A., Itami M., UWB Frequency Selective Surfaces with Angular Stability and Notched Band at 5.5 GHz, IEEE *International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband*, Nanjing, China, 16-19 October 2016.

[26] Radonić V., Crnojević-Bengin V., Schoeman D., Multi-layer Frequency Selective Surfaces with Wideband Response and Their Modelling, *22nd Telecommunication Forum TELFOR*, Belgrade, Serbia, 25-27 November 2014.

[27] Sohail I., Ranga Y., Esselle K.P., Effective Electromagnetic Shielding over An Ultra-Wide Bandwidth Using A Frequency Selective Surface ,*Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Melbourne, Australia, 20-23 May 2013.

[28] Cruz R.S.M., D'Assunção A.G., Silva P.H.F., A New FSS Design Proposal for UWB Applications, *International Workshop on Antenna Technology*, Lisbon, Portugal, 1-3 May 2010.

[29] Munk BA, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, 1st ed., *John Wiley & Sons*, New York, 2000.

[30] Yang, G., Zhang, T., Li, W., Wu Q., A Novel Stable Miniaturized Frequency Selective Surface, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,* 2010, **9**,1018-1021.

[31] Xue J.Y., Gong, S. X., Zhang P.F., A New Miniaturized Fractal Selective Surface with Excellent Angular Stability*, Progress in Electromagnetics Research Letters,* 2010, **13**, 131-138.

[32] Wang W.T., Zhang P.F., Gong S.X., Compact Angularly Stable Frequency Selective Surface Using Hexagonal Fractal Configurations*, Microwave Optical Technology Letters*, 2009, **51**(11), 2541-2544.

[33] Deng F., Yi W., Wu W., Design and Performance of A Double-Layer Miniaturized-Element Frequency Selective Surface, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, **12**, 721-724.

[34] Azemi S.N., Ghorbani K., Rowe W.S.T., Angularly Stable Frequency Selective Surface with Miniaturized Unit Cell, *IEEE Antennas Wireless Component Letters,* 2015, **25**(7), 454-456.

[35] Yang H.Y., Gong S.X., Zhang P.F., A Novel Miniaturized Frequency Surface With Excellent Center Frequency Stability, *Microwave Optical Technology Letters*, 2009, **51**(10), 2513-2516.

[36] Bharti G., Jha K.R., Singh G., Design of Dual Polarized and Angular Stable New Bandpass Frequency Selective Surface In X-Band, *Telecommunication Systems*, 2016, **61**, 559-567.

[37] Rahim, T., Khan, F.A., Jiadong, X., Design of X-Band Frequency Selective Surface (FSS) with Band Pass Characteristics Based On Miniaturized Unit Cell, *13th Bhurban Conf. on Applied Sciences &Technology*, Islamabad, Pakistan, 12-16 January 2016.

[38] Bayatpur F., Sarabandi S., Single-Layer High-Order Miniaturized-Element Frequency-Selective Surface, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2*008, **54**, 774-781.

[39] Al-Joumayly M.A., Behdad N., Dual-Band Frequency Selective Surfaces with Higher-Order Band-Pass Responses, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Toronto, Canada, 11-17 July 2010.

[40] Çimen, S., Novel Closely Spaced Planar Dual-Band Frequency-Selective Surface, *IET Microwave Antennas Propagation*, 2013, **7**(11), 894–899.

[41] Kocakaya A., Çakır G., A novel Angular Independent Higher Order Band-Stop Frequency Selective Surface for X-Band Applications, *IET Microwaves Antennas & Propagation,* 2018, **12**(1), 15-22.

[42] Kocakaya A**.**, Çakır G., Dikmen C., A Novel Single Layer Frequency Selective Surface DesignfFor Ultra-Wide Band Antenna Gain Enhancement, *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa,Turkey, 30 November-2 December 2017.

[43] Kumar R., Kushwaha N., Krishna R.V.S., Design of Ultra Wideband Hexagonal Patch Slot Antenna for High-Gain Wireless Applications, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2014, **28**(16), 2034-2048.

[44] Guha D., Antar Y.M.M., *Microstrip and Printed Antennas New Trends, Techniques and Applications*, 1st ed., Wiley, London, 2011.

[45] Azim R., Islam M.T., Misran N., Compact Tapered-Shape Slot Antenna for UWB Applications, *IEEE Antennas Wireless Propagation. Lett*ers, 2011, **10**, 1190-1193.

[46] Liu Y.F., Lau K.L., Xue Q., Chan C.H., Experimental Studies of Printed Wide-Slot Antenna for Wide-Band Applications, *IEEE Antennas Wireless Propagation. Lett*ers*,* 2004, **3**, 273-275.

[47] Jan J.Y., Su J.W., Bandwidth Enhancement of a Printed Wide-Slot Antenna with a Rotated Slot, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, **53**(6), 2111-2114.

[48] Thakare Y.B., Kumar R., Design of Fractal Patch Antenna for Size and Radar Cross-Section Reduction *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 201, **4**, 175-181.

[49] Liang J,, Guo L., Chiau C.C. ve Chen X., CPW-Fed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Applications, *IEEE International Workshop on Antenna*

Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, Singapore, Singapore, 7-9 March 2005.

[50] Kim J., Jee Y., Design of Ultrawideband Coplanar Waveguide-Fed Li-Shape Planar Monopole Antennas, *IEEE Antennas Wireless Propagation. Lett*ers, 2007, **6**, 383–387.

[52] Pourahmadazar J., Ghobadi C., Nourinia J., Felegari N., Shirzad H., Broadband CPW-Fed Circularly Polarized Square Slot Antenna With İnverted-L Strips for UWB Applications, *IEEE Antennas Wireless Propagation. Lett*ers, 2011, **10**, 369-372.

[53] Qing X. ve Chen Z.N. Compact Coplanar Waveguide-Fed Ultra-Wideband Monopole-Like Slot Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* 2009, **3**, 889-898.

[54] Hatemi K., DikmenC., Çakır G.,Kocakaya A., Çimen S., Partial Gain Increase at Desired Frequency Range for UWB Microstrip Antennas Using Band Stop FSS, *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences*, İstanbul, Turkey, 9-12 May 2017.

[55] J. Liang, L. Guo, C.C. Chiau ,X. Chen, G. Parini, Study of CPW-fed circular Disc Monopole Antenna for Ultra Wideband Applications, *IEE Proceedings - Microwaves Antennas and Propagation,* 2005, **152**(6), 520-526.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Kocakaya A.**, Çakır G., A Novel Angular Independent Higher Order Band-Stop Frequency Selective Surface for X-Band Applications, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, **12(1)**, 15-22.

[2] **Kocakaya A.**, Çakır G., Dikmen C., A Novel Single Layer Frequency Selective Surface Design for Ultra-Wide Band Antenna Gain Enhancement, *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa,Turkey, 30 November-2 December 2017.

[3] **Kocakaya A.**, Çakır G., A Low Profile Miniaturized Band Pass Frequency Selective Surface with Angular Stability, *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences*, Istanbul, Turkey, 9-12May 2017.

[4] Hatemi K., Dikmen C., Çakır G.,**Kocakaya A.,** Çimen S., Partial Gain Increase at Desired Frequency Range for UWB Microstrip Antennas Using Band Stop FSS, *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences*, Istanbul, Turkey, 9-12May 2017.

[5] **Kocakaya A.**, Çakır G., Açısal Kararlılığa Sahip ve Minyatürize Edilmiş Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, *URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi*, Ankara, Türkiye, 1-3 Eylül 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Aybike Kocakaya 1978'de Adapazarı'nda doğdu. 1995 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2000 yılında mezun oldu. Aynı yıl içinde başladığı Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini 2003 yılında tamamladı. 2009 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. Frekans seçici yüzeyler ve ultra geniş bantlı mikroşerit anten tasarımı konuları üzerine çalışmaktadır. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde başladığı araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.