

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

X-BANDI İÇİN ÜÇ BOYUTLU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ANGUN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yahya TEŞNELİ

Haziran 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

X-BANDI İÇİN ÜÇ BOYUTLU FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ANGUN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 22/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr.
Ahmet Yahya TEŞNELİ

Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr.
Nazım İMAL

Üye

Yrd. Doç. Dr.
Muhammet Hilmi NİŞANCI

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa ANGUN

13.11.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yahya TEŞNELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-036) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER.....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. FSY'lerin Tipi.....	7
2.3. FSY'lerin Geometrisi.....	8
2.4. FSY'lerde Dielektrik Malzeme Etkisi.....	10
2.5. FSY'lerde Birim Hücre.....	11
2.6. FSY'lerde Analiz Teknikleri.....	12
2.6.1. Mometler metodu (MoM).....	13
2.6.2. Ortak empedans metodu (MIM).....	14
2.6.3. Sonlu elemanlar metodu (FEM).....	14
2.6.4. Zamanda sonlu farklar metodu (FDTM).....	15
2.6.5. Analitik eşdeğer devre metodu (EC).....	15
2.7. FSY Ölçüm Tekniği.....	16

2.8. Elektromanyetik Dalga Yayılımı ve Polarizasyon	17
2.8.1. Maxwell denklemleri ve dalga denklemi.....	17
2.8.2. Düzlem elektromanyetik dalgalar ve polarizasyon.....	21
2.8.2.1. Doğrusal polarizasyon.....	23
2.8.2.2. Dairesel polarizasyon.....	24
2.8.2.3. Eliptik polarizasyon.....	26
2.8.3. Düzlem dalgaların sınırlara gelişi.....	27
2.8.3.1. Düzlem dalganın düzlem sınıra dik gelişi.....	28
2.8.3.2. Düzlem dalganın düzlem sınıra eğik gelişi.....	29
2.8.3.2.1. Dik polarizasyon (TM modu).....	31
2.8.3.2.2. Paralel polarizasyon (TE modu).....	33
BÖLÜM 3.	
RADARLAR VE RADOM YAPILARI.....	36
3.1. Radarların Özellikleri ve Çalışma Frekansları.....	36
3.2. Radom Yapıları.....	38
BÖLÜM 4.	
X – BANDI İÇİN 3D FSU TASARIMI.....	44
4.1. Silindirik Model.....	46
4.1.1. Dielektrik dolgulu silindirik model.....	53
4.1.2. Dielektriğe gömülü silindirik model.....	50
4.2. Sekizgen Model.....	56
4.3. Kare Model.....	62
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	68
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	74

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ω	: Açısal hız (rad/s)
λ	: Dalga boyu (m)
k	: Dalga sayısı
$\vec{\nabla}$: Del operatörü
\perp	: Diklik
S	: Duran dalga oranı
\vec{D}	: Elektrik akı yoğunluğu (C/m.m)
\vec{J}	: Elektrik akım yoğunluğu (A/m.m)
\vec{E}	: Elektrik alan şiddeti (V/m)
ϵ	: Elektrik geçirgenlik (F/m)
ρ_e	: Elektrik yük yoğunluğu (C/m ³)
$e^{j\theta}$: Exponansiyel fonksiyon
ϑ_p	: Faz hızı (m/s)
β	: Faz sabiti (Rad/m)
j	: Fazör gösterim
$\theta_i, \theta_r, \theta_t$: Gelme, yansıma ve iletim açısı
c	: Işık hızı
τ	: İletim katsayısı
a_x, a_y, a_z	: Kartezyen koordinatlarda birim vektör
n	: Kırılma indisi
$\partial/\partial x$: Kısmi türev
\vec{B}	: Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m.m)

\vec{M}	: Manyetik akım yoğunluğu (V/m.m)
\vec{H}	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
μ	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
ρ_m	: Manyetik yük yoğunluğu (Wb/m ³)
η	: Öz empedans (ohm)
σ	: Öz iletkenlik (S/m)
\parallel	: Paralellik
π	: Pi sayısı
γ	: Propagasyon sabiti (1/m)
Γ	: Yansıma katsayısı
α	: Zayıflama sabiti (Np/m)
EMD	: Elektromanyetik dalga
FSY	: Frekans seçici yüzey
HF	: Yüksek frekans
IEEE	: Institute of electrical and electronic engineering
LAN	: Yerel alan ağı
NATO	: Kuzey atlantik paktı
PEC	: Mükemmel elektrik iletkeni
RADAR	: Radyo ile tespit etme ve menzil tayini
RADOM	: Radar dome
RCS	: Radar kesit alanı
RF	: Radyo frekansı
UHF	: Ultra yüksek frekans

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sümer çivi yazısı ve Telgraf.....	1
Şekil 1.2. (a): İlk telefonlardan biri, (b): Marconi radyoyu kullanırken.....	2
Şekil 1.3. Parabolik çanak anten.....	2
Şekil 1.4. Bir füze için çeşitli frekanslarda RCS.....	3
Şekil 1.5. Grating Lobes oluşumu.....	4
Şekil 1.6. Basit bir FSY.....	5
Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum ve kullanım alanları.....	6
Şekil 2.2. FSY'lerin farklı tipleri için filtre karakteristikleri (a): alçak geçiren, (b): yüksek geçiren, (c): bant – durduran ve (d): bant – geçiren filtre	7
Şekil 2.3. Yama ve oyuk tipinde FSY.....	7
Şekil 2.4. İki ve üç boyutlu FSY'ler.....	8
Şekil 2.5. Farklı geometrilere sahip FSY'ler.....	9
Şekil 2.6. Şerit dipole ve dairesel döngü FSY yapılarına ait iletim karakteristiği....	10
Şekil 2.7. Çift ve tek katmanlı dielektrik kullanılan FSY'ler.....	11
Şekil 2.8. Örnek bir birim hücrenin çeşitli açılardan görünümü.....	12
Şekil 2.9. Örnek bir saçılım örüntüsünün 3 boyutlu gösterimi.....	12
Şekil 2.10. Bir FSY'in eşdeğer devresi.....	16
Şekil 2.11. Örnek ölçüm düzenekleri.....	16
Şekil 2.12. Doğrusal polarize olmuş düzlem EMD.....	22
Şekil 2.13. Düzlem dalganın polarizasyon tipleri.....	23
Şekil 2.14. Doğrusal polarizasyon.....	23
Şekil 2.15. $\varphi_x = 0$, $\varphi_y = -\pi/2$ için CW (sağ el) dairesel polarizasyon.....	24
Şekil 2.16. $\varphi_y = 0$, $\varphi_x = -\pi/2$ için CW (sağ el) dairesel polarizasyon.....	25
Şekil 2.17. $\varphi_x = 0$, $\varphi_y = \pi/2$ için CCW (sol el) dairesel polarizasyon.....	26
Şekil 2.18. $\varphi_y = 0$, $\varphi_x = -\pi/2$ için CCW (sol el) dairesel polarizasyon.....	26

Şekil 2.19. (a): $E_R > E_L$ CW (sağ el) eliptik,	
(b): $E_L > E_R$ CCW (sol el) eliptik polarize.....	27
Şekil 2.20. Düzlem dalganın düzlem sınıra dik gelişi.....	28
Şekil 2.21. Düzlem dalganın düzlem sınıra eğik gelişi.....	29
Şekil 2.22. Kritik açının oluşması.....	30
Şekil 2.23. Dik polarizasyon.....	31
Şekil 2.24. Paralel polarizasyon.....	34
Şekil 2.25. Brewster açısı.....	35
Şekil 3.1 Radar frekans bantları	36
Şekil 3.2. Bazı Radar türlerinin çalışma frekansları.....	37
Şekil 3.3. Örnek bir Radom.....	39
Şekil 4.1. Program arayüzü.....	40
Şekil 4.2. Referans çalışmanın ölçüm ve simülasyon sonuçları	41
Şekil 4.3. Referans çalışmadaki FSY yapısı için CST ortamında elde edilen simülasyon sonuçları	41
Şekil 4.4. Süperiletkende Meissner ve kuantum etkisi.....	42
Şekil 4.5. İki kapılı devrede S parametresi.....	43
Şekil 4.6. 2D halka FSY ve birim hücre ölçüleri.....	44
Şekil 4.7. Halka yüksekliği $h=0.035$ mm için S parametresi.....	44
Şekil 4.8. 3D silindirik FSY	45
Şekil 4.9. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($h = 1$ mm - 6mm).....	45
Şekil 4.10. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($h=7$ mm - 14mm).....	46
Şekil 4.11. İletim ve yansımaya parametreleri ($h=14$ mm).....	46
Şekil 4.12. İletim ve yansımaya parametreleri ($h=21.5$ mm).....	47
Şekil 4.13. İletim ve yansımaya parametreleri ($h=29$ mm).....	47
Şekil 4.14. İletken kalınlığı ile değişim ($h=14$ mm).....	48
Şekil 4.15. Ortalama iletken halka çapı ile değişim ($h=14$ mm).....	48
Şekil 4.16. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim ($h=14$ mm).....	48
Şekil 4.17. Alttaşın dielektrik sabiti ile değişim ($h=14$ mm).....	49
Şekil 4.18. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TE modu).....	49
Şekil 4.19. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TM modu).....	49
Şekil 4.20. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu).....	50

Şekil 4.21. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu).....	50
Şekil 4.22. Dielektrik dolgulu 3D silindirik FSY	51
Şekil 4.23. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm - 6mm).....	51
Şekil 4.24. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1=7mm - 14mm).....	51
Şekil 4.25. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=14 mm).....	52
Şekil 4.26. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=21.5 mm).....	52
Şekil 4.27. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=29 mm).....	52
Şekil 4.28. Dielektriğe gömülü 3D silindirik FSY	53
Şekil 4.29. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm - 3mm).....	53
Şekil 4.30. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 4mm - 8mm).....	54
Şekil 4.31. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 9mm – 12.5mm).....	54
Şekil 4.32. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 13mm – 17mm).....	54
Şekil 4.33. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=8 mm).....	55
Şekil 4.34. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=12.5 mm).....	55
Şekil 4.35. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=17 mm).....	56
Şekil 4.36. 3D sekizgen FSY	56
Şekil 4.37. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm – 6mm).....	57
Şekil 4.38. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 7mm – 14mm).....	57
Şekil 4.39. Filtre karakteristiği değişimi	57
Şekil 4.40. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=13.8 mm).....	58
Şekil 4.41. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=21.5 mm).....	58
Şekil 4.42. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=29 mm).....	59
Şekil 4.43. İletken kalınlığı ile değişim (l1=13.8 mm).....	59
Şekil 4.44. Ortalama iletken halka çapı ile değişim (l1=13.8 mm).....	60
Şekil 4.45. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim (l1=13.8 mm).....	60
Şekil 4.46. Alttaşın dielektrik sabiti ile değişim (l1=13.8 mm).....	60
Şekil 4.47. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TE modu).....	61
Şekil 4.48. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TM modu).....	61
Şekil 4.49. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu).....	61
Şekil 4.50. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu).....	62
Şekil 4.51. 3D kare FSY	62
Şekil 4.52. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm – 6mm).....	63

Şekil 4.53. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($l_1 = 7\text{mm} - 14\text{mm}$).....	63
Şekil 4.54. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=14\text{ mm}$).....	63
Şekil 4.55. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=21.5\text{ mm}$).....	64
Şekil 4.56. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=29\text{ mm}$).....	64
Şekil 4.57. İletken kalınlığı ile değişim ($l_1=14\text{ mm}$).....	65
Şekil 4.58. Ortalama iletken halka çapı ile değişim ($l_1=14\text{ mm}$).....	65
Şekil 4.59. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim ($l_1=14\text{ mm}$).....	65
Şekil 4.60. Alttaşın dielektrik sabiti ile değişim ($l_1=14\text{ mm}$).....	66
Şekil 4.61. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TE modu).....	66
Şekil 4.62. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TM modu).....	66
Şekil 4.63. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu).....	67
Şekil 4.64. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu).....	67
Şekil 5.1. Tasarlanan 2D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması	69
Şekil 5.2. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($l_1 \cong \lambda_r/2$).....	69
Şekil 5.3. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($l_1 \cong 3\lambda_r/4$).....	70
Şekil 5.4. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($l_1 \cong \lambda_r$).....	70

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Silindirik 2D model için parametre listesi.....	44
Tablo 4.2. Silindirik 3D model için parametre listesi.....	45
Tablo 4.3. Dielektrik dolgulu silindirik 3D model için parametre listesi.....	51
Tablo 4.4. Dielektriğe gömülü silindirik 3D model için parametre listesi	53
Tablo 4.5. Sekizgen 3D model için parametre listesi.....	56
Tablo 4.6. Kare 3D model için parametre listesi.....	62

ÖZET

Anahtar kelimeler: 3D, Frekans seçici yüzey (FSY), X band, Bant durdurucu, Bant geçiren, Filtre karakterizasyonu, İletim, Yansıma, Radome

Doğada sıklıkla rastlanan periyodik yapılar pek çok araştırmacının dikkatini çekmiş ve farklı alanlarda geliştirilen uygulamalar için çıkış noktası olmuştur. Bir birim hücrenin belli bir periyotta kendini tekrarlaması ile oluşturulan yapılar 1990'ların başından bu yana elektromanyetik alanında da pek çok araştırmacı tarafından incelenmektedir. İnce bir iletken tabaka üzerindeki açıklıklar ya da metalik yamalar biçimindeki farklı birim hücrelerin periyodik olarak bir araya gelmesi ile oluşturulan Frekans Seçici Yüzeyler (FSY) belirli frekanslar için alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durdurucu özellik gösteren elektromanyetik filtreler olarak tanımlanabilir. FSY'nin tasarımında kullanılan birim hücre geometrisi ve dizilişi gelen elektromanyetik dalganın yansıtılmasını ya da iletilmesini sağlayacak biçimde düzenlenebilir. FSY'ler son zamanlarda kablosuz haberleşme, mikrodalga ve radar sistemleri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geleneksel iki boyutlu (2D) FSY'lere göre nispeten daha yeni olan üç boyutlu (3D) yapılar, 2D yapılarda karşı karşıya kalınan problemler için iyileştirme sağlayabilme potansiyeline sahiptir ve frekans tepkisinin kontrolünde 2D yapılara göre daha esnek imkanlar sağlamaktadır. Bu çalışmada X-bandı merkez frekansı olan 10 GHz için silindirik, sekizgen ve kare olmak üzere üç farklı geometride iletken içeren bant durdurucu 2D FSY tasarımı yapılmakta ve daha sonra iletken yüksekliği artırılarak ulaşılan üç farklı yeni 3D FSY yapı önerilmektedir. İletken yüksekliği değişiminin etkisi incelenmekte ve elektromanyetik simülasyon programı Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite ile 3D FSY'ler için birim hücre parametrelerinin analizi yapılarak sonuçlar tartışılmaktadır. Tasarlanan 3D FSY'lerin birim hücrelerinde yer alan iletken halkaların yüksekliğinin artmasıyla yapıların X-bandında periyodik olarak bant durdurucu ve bant geçiren filtre karakteristiği sergilediği görülmüştür. Parametre analizinde iletken yüksekliği dışındaki birim hücre parametrelerinin artışı rezonans frekansını düşürmüştür. TE modunda dalganın geliş açısıyla rezonans frekansı artmakta ve bant genişliği azalmaktadır. TM modunda ise frekans tepkisi kararlıdır ve geliş açısıyla bant genişliği artmaktadır.

THREE DIMENSIONAL FREQUENCY SELECTIVE SURFACE DESIGN FOR X-BAND

SUMMARY

Keywords: 3D, Frequency selective surfaces (FSS), X band, Band stop, Band pass, Filter characterization, Transmission, Reflection, Radome

Periodic structures, which are frequently encountered in nature, have attracted the attention of many researchers and have been the starting point for applications developed in different fields. Structures created by repetition of a unit cell over a period of time have been studied by many researchers in the electromagnetic field since the early 1990s. Frequency Selective Surfaces (FSY), which are formed by periodic assembly of different unit cells in the form of metallic patches on openings on a thin conductive layer, can be defined as electromagnetic filters with low-pass, high-pass, band-pass or band stop characteristics for certain frequencies. The unit cell geometry used in the design of the FSY and array of this may be arranged to provide for the reflection or transmission of the incoming electromagnetic wave. FSY's have recently been widely used in the fields of wireless communications, microwave and radar systems.

Relatively recent three dimensional (3D) structures compared to conventional two dimensional (2D) FSYs have the potential to provide improvements for problems encountered in 2D structures and provide more flexibility in controlling frequency response than 2D construction. In this study, a 2D FSY design with three different geometry conductors containing cylindrical, octagonal and square, is designed for 10 GHz, which is the X band center frequency, and then three new 3D FSY structures are proposed, which are achieved by increasing the conductor height. The effect of conductor height change is investigated and the results are analyzed by analyzing the unit cell parameters for the 3D FSYs with the electromagnetic simulation program Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite. The designed 3D FSY's ara seen periodically band-stop and band-pass filter characteristics of the structures with increasing height of the conductive rings in the unit cell. In parameter analysis, the increase in unit cell parameters outside the conductor height reduces the resonance frequency. In the TE mode, the resonance frequency increases and the band width decreases with the angle of incidence. In the TM mode, the frequency response is stable and the band width increases with the angle of incidence.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

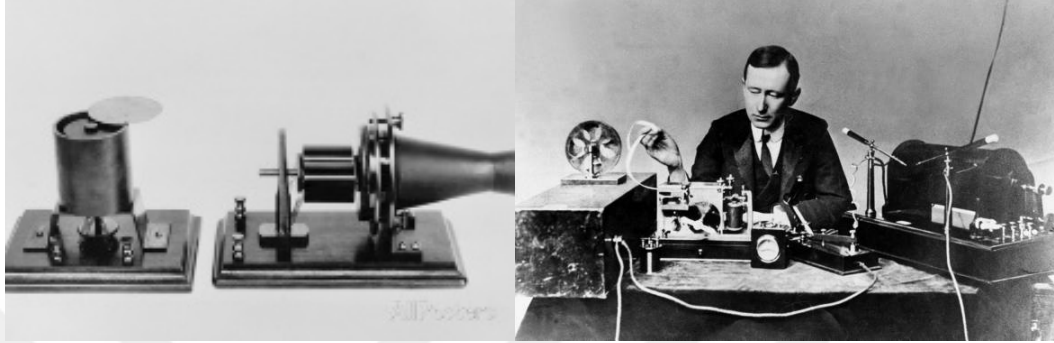
Evrenimizde yaşamın başladığı andan itibaren tüm canlılar fizyolojik gereksinimler ve hayatta kalma içgüdüleriyle kendi duyu organlarının algılayabileceği çeşitli iletişim şekilleri geliştirmişlerdir. İnsanlar da aynı süreçlerin içinde bilgi ve tecrübelerini kullanma ve alt nesillere aktarma adına dili icat etmiş ve uzun yıllar sonra bunu yazılı hale getirmeyi başarmışlardır. Yazı haline gelen bilginin, sözlü iletişimden daha etkili ve kalıcı olarak kullanılıp aktarılmasıyla insan medeniyetinin gelişimi daha da hızlanmıştır.



Şekil 1.1. Sümer çivi yazısı ve Telgraf

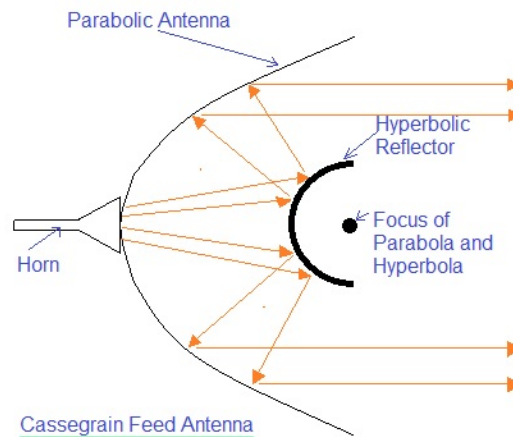
Mezopotamya’da kendi çağının ötesinde bir gelişim gösteren Sümerlerin yazıyı (Şekil 1.1.) icat etmelerinden yaklaşık 4800 yıl sonra Joseph Henry’nin geliştirdiği telgrafın ilk prototipi olan cihazı, bir ressam olan Samuel Morse’un kendi adını taşıyan Morse alfabesini de kullanarak geliştirmesini müteakip 1843 yılında ABD’nin Washington ve Baltimore şehirleri arasında ilk telgraf (Şekil 1.1.) hattının kurulmasıyla yazı, elektriksel sinyal şeklinde taşınarak iletişimde yeni bir çığır açıldı. Bunu 1880 yılında Graham Bell’in, Thomas Watson ve Antonio Meucci’nin çalışmalarından da yararlanarak telefonun (Şekil 1.2.) patentini almasıyla sesin elektriksel sinyal halinde yine bir hat üzerinde taşınması takip etti. Ama asıl devrim

İtalyan mühendis Guglielmo Marconi'nin bir telsiz telgraf sistemi olan radyoyu (Şekil 1.2.) icat etmesiyle gerçekleşti ve bu çalışma G. Marconi'ye 1909'da Nobel Fizik Ödülünü getirdi.



Şekil 1.2. (a): İlk üretilen telefonlardan biri, (b): Marconi radyoyu kullanırken

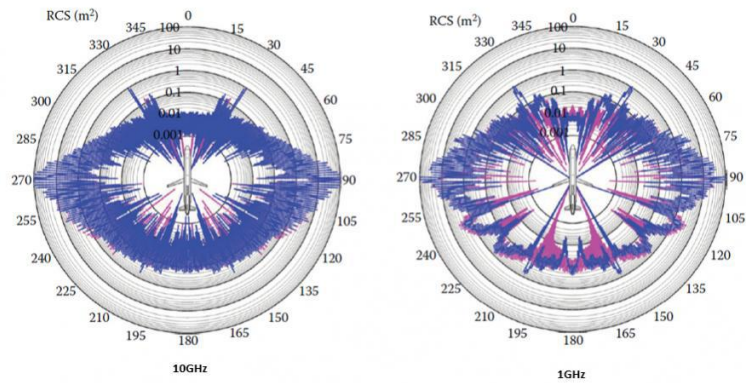
İletişimin radyo dalgaları kullanılarak hatsız olarak yapılmaya başlaması çeşitli frekans bantlarını kullanıma açmıştır. Bilindiği üzere Heinrich Hertz'in, çalışmalarıyla Maxwell denklemlerini radyo dalgalarının üretimi ve alımı için uyarlanması sonucu radyo dalgalarının saniyedeki salınım sayısı (frekans) Hertz (Hz) birimi tanımlanmıştır. Bu tanımlamaya uygun olarak da bantlar tanımlanmıştır. Tabii ki burada EMD'nin tanecik özelliğinden ziyade dalga formu esas alınır.



Şekil 1.3. Parabolik çanak anten

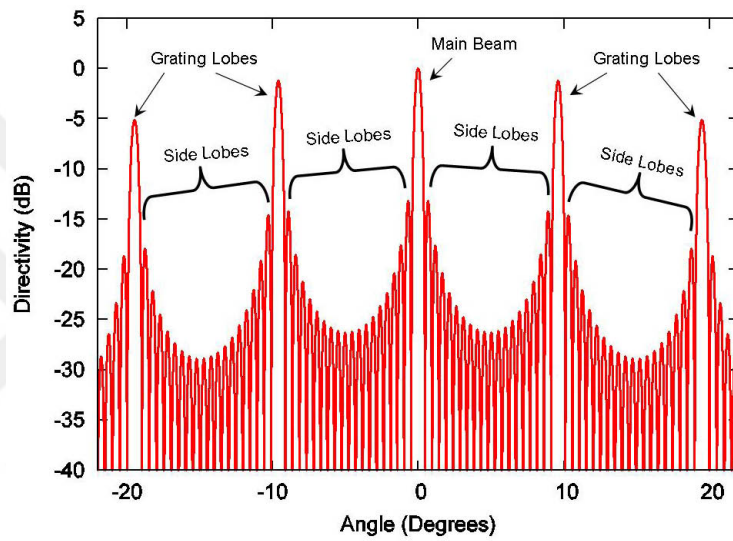
Tüm bu bilimsel gelişmelerin ışığında haberleşme için alıcı, verici ve yansıtıcı antenlerin de ortaya çıkmasını müteakip 1919 yılında Guglielmo Marconi ve Charles S. Franklin periyodik yansıtıcı yüzeylerle ilgili bir patent [1] almış olsalar da FSY'ler 1960'lı yıllarda askeri sistemlerde kullanımı ile yoğunlaşmış, ilk makaleler de bu zamanlar ortaya çıkmaya başlamıştır. 1970'lerden itibaren de FSY'ler üzerine çalışmalar artarak devam etmiştir. Bunlardan bazıları açığa bağımlı periyodik yüzeyler [2] ve Cassegrain alt reflektör parabolik çanak antenler (Şekil 1.3.) üzerine yoğunlaşmıştır [3].

Amerikalı astronom David Rittenhouse'un basit bir gözleminden yola çıkılarak oluşturulan FSY'in temeli bilindiği üzere optikteki kırınım olayıdır. Elektromanyetik spektrumun mikrodalga boyu için FSY etkili yansıtıcı antenler dizaynı için de kullanılmıştır. Burada amaç bazı bantlarda iletimi sağlarken bazı bantlarda yansıma yapmasını sağlamaktır. Bu durum uydu iletişiminin de temelidir. Radom uygulamalarında da hem aynı amaçla hem de fiziksel özelliğine göre meteorolojik etkilerden korunma için kullanılır. Kullanılan radom FSY özelliği göstererek radar çalışma frekansının dışındaki frekanslarda yansıma yapar. Fiziksel yapısıyla da radar sinyallerini farklı yönlere dağıtarak geri yansıma yönünde sinyal zayıflatarak RCS'nı (Şekil 1.4.) küçültmek için kullanılabilir. ABD ordusunun büyük bombardıman uçak sınıfından olan F-117A, RCS'nın küçük olması nedeniyle radar sistemlerine yakalanmadığından hayalet uçak diye bilinir.



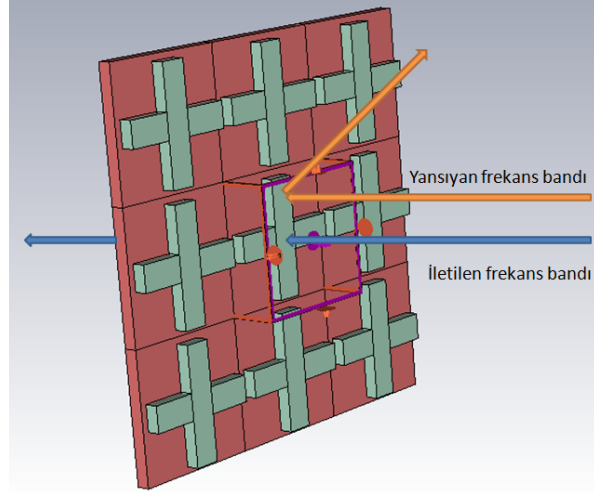
Şekil 1.4. Bir füze için çeşitli frekanslarda RCS

FSY'lerin analizi, ilk olarak yarıklı problemlerinde Mod – Eşleme tekniğinin kullanılmasıyla herhangi bir şekilde polarize olmuş ve rastgele bir geliş açısına sahip düzlemsel EMD'nın, serbest halde veya bir dielektrik ile desteklenmiş bir FSY'den saçılımının hesaplanmasıyla başlamıştır. Çoklu halka yamalı ve çoklu bant geçiren FSY 'ler için kullanılmasıyla devam etmiştir. Tasarımda yüksek frekansta Grating Lobes (Şekil 1.5.) oluşumunu engellemek için birim hücrelerde yer alan silindirik elementlerin geometrisiyle oynanarak istenilen verimli sonuçlar alınmıştır.



Şekil 1.5. Grating Lobes oluşumu

Uzak kızılötesinde FSY, lazerlerde ışın ayırıştırıcı olarak kullanılabilir. FSY ayrıca güneş enerjisinin güneş pillerinde depolanması için de kullanılabilir. Bant geçirme özeliğine sahip bu FSY'ler solar hücrelerin üzerine kaplanarak istenilen spektrumdaki frekansı alıp istenmeyeni yansıtır. Aynı mantıkla uzay araçlarının ısı ve sıcaklık kontrolü için FSY'ler güneş kalkanlama sistemi olarak kullanılırken istenmeyen güneş enerjisini bloke eder. Haberleşmesi için gerekli RF sinyallerinin kullanılmasına ise izin verir.



Şekil 1.6. Basit bir FSY

FSY (Şekil 1.6.) tekniği kullanılarak WLAN uygulamaları ve kişisel telsiz telefon sistemleri uygulamaları için kalkanlama etkinliği (Shielding Effectiveness) yüksek olan filmler de tasarlanmıştır. Bu teknikle ısıtma amacıyla enerji koruyan cam da tasarlanabilir. Bu camlar kışın ısıyı içeride, yazın dışarıda tutarken mikrodalga frekans bandı ve görünür ışık için herhangi bir problem de oluşturmazlar.

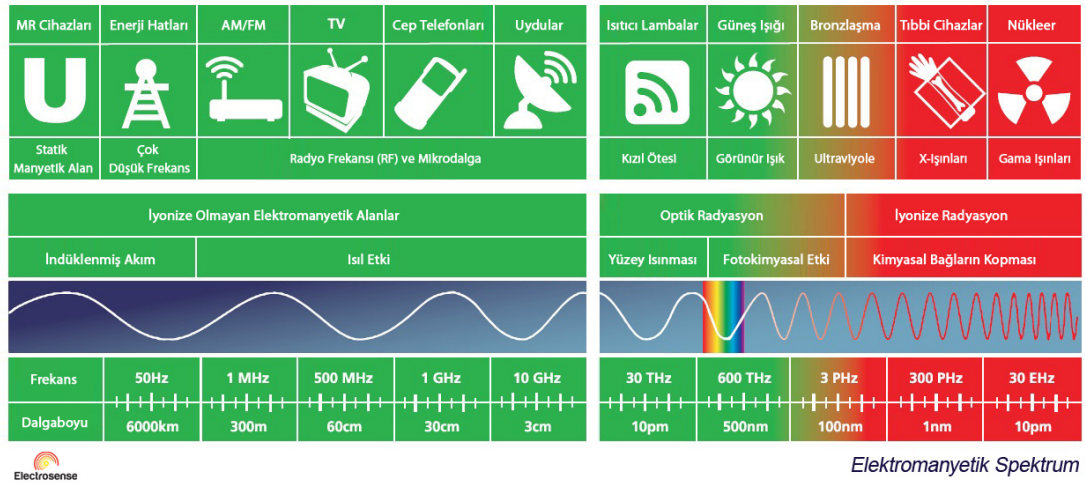
İnsanların ancak hikâyelerde ve filmlerde rastladıkları görünmezlik fenomeni de bu tekniğin nanoteknoloji ile birleştirilerek yapılabileceğini gösteren bazı teorik ve deneysel çalışmalar da mevcut olup çalışmalar devam etmektedir [4].

Literatürde yer alan yukarıda saydığımız çalışmalardan da anlaşılacağı üzere FSY tekniği artık günümüz teknolojisinin vazgeçilmezleri arasına girmektedir. Görüldüğü gibi askeri ve havacılık sanayiden iletişime kadar pek çok alanda kullanımı her geçen gün yaygınlaşmakta ve geliştirilmesi bir zaruret halini almaktadır.

BÖLÜM 2. FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLER

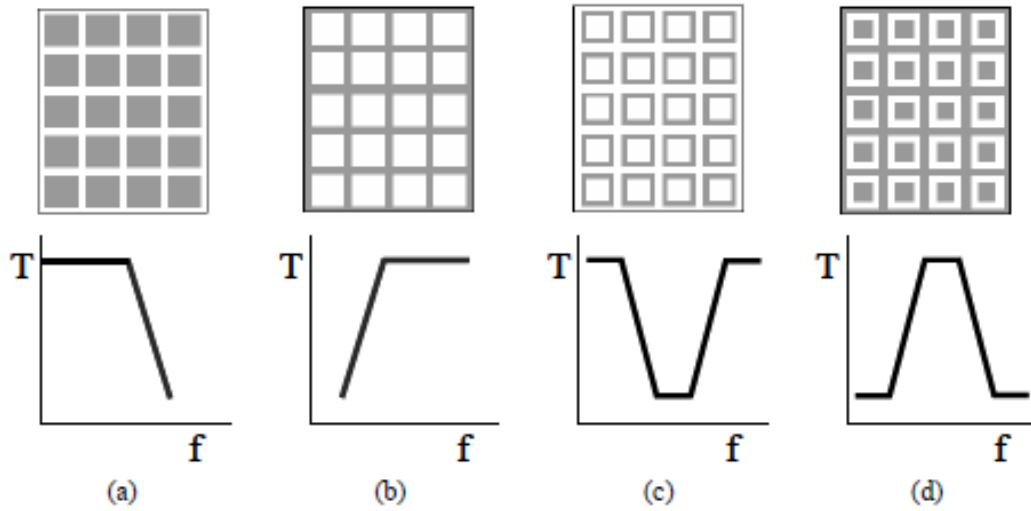
2.1. Giriş

Adından da anlaşılacağı üzere frekans seçici yüzeyleri, genel anlamda gelen EMD'nın frekansına (Şekil 2.1.) bağlı olarak iletim, yansıma veya soğurma özellikleri gösteren bir filtre veya polarizasyon dönüştürücü görevi gören tek veya çok katmanlı periyodik yapılar olarak tanımlayabiliriz [5].



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum ve kullanım alanları

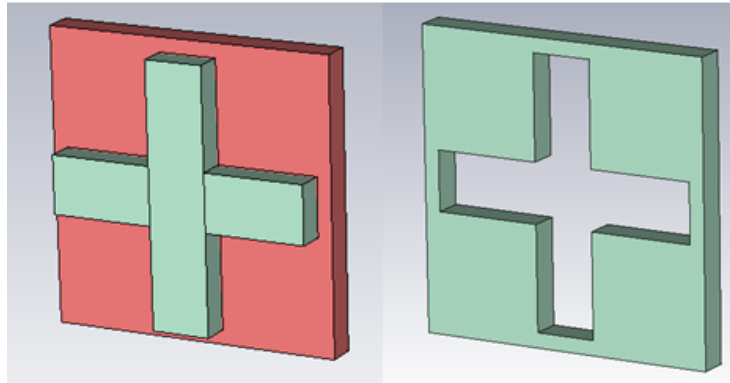
Bu periyodik yapılar kullanılan malzemenin elektriksel, fiziksel, kimyasal özellikleri ve birim hücrenin geometrisi gibi birçok parametreye bağlı olarak tasarlanıp istenilen özelliklere sahip yapı elde edilmeye çalışılır. FSY filtreleme çeşidine göre alçak geçiren, yüksek geçiren, bant – durduran ve bant – geçiren filtre olmak üzere 4 ana grupta (Şekil 2.2.) sınıflandırılabilir.



Şekil 2.2. FSY'lerin farklı tipleri için filtre karakteristikleri (a): alçak geçiren, (b): yüksek geçiren, (c): bant – durduran ve (d): bant – geçiren filtre [6].

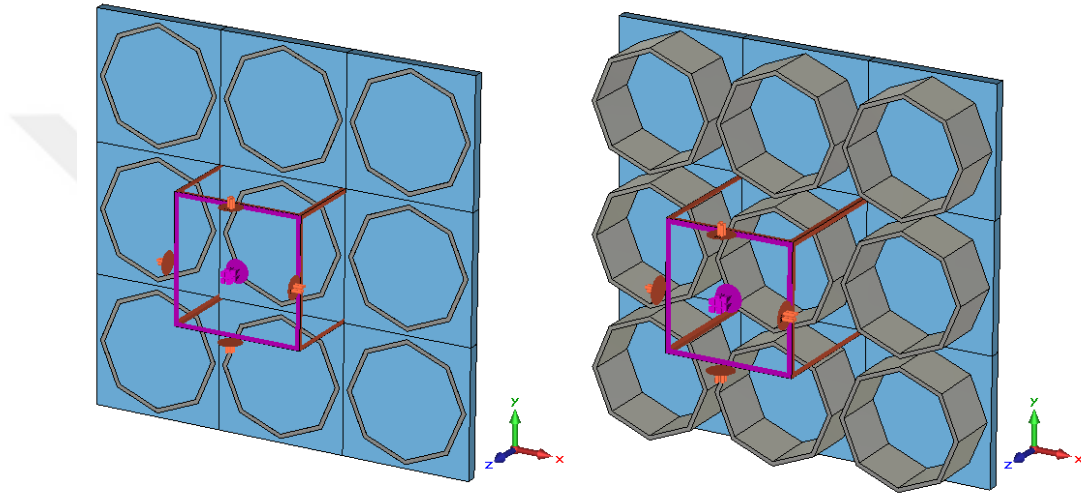
2.2. FSY'lerin Tipi

FSY'ler genel olarak ya periyodik dielektrik tabakalar üzerine iletken yamaların yerleştirilmesiyle ya da iletken üzerine periyodik oyuklar açılmasıyla oluşturulur (Şekil 2.3.). İletken yama şeklinde olan yapılar kapasitif etki yaparken, oyuk (aperture) şeklinde olanlar endüktif etki yapar. İletken yamalarla oluşturulan basit bir yapı alçak geçiren filtre özelliğine sahipken periyodik açıklıklar şeklinde oluşturulanlar yüksek geçiren filtre özelliği gösterir. Bu filtrelerin zaman içinde geliştirilmesiyle farklı tasarımlara sahip bant durduran ve bant geçiren periyodik elemanlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.3. Yama ve oyuk tipinde FSY

FSY'ler kullanılan yüzey malzemesinin kalınlığına göre kalın ekran ya da ince ekran FSY diye de adlandırılabilirler. İki boyutlu ve üç boyutlu tasarım da denilmektedir [8]. Şekil 2.4.'de iki ve üç boyutlu FSY örnekleri görülmektedir. İnce ekran FSY, metalik kalınlığın $0,001 \lambda_0$ 'dan küçük olması halinde kabul edilen tasarımdır. λ_0 simgesi rezonans frekansındaki dalga boyunu ifade eder. Genel olarak ince ekranlı FSY'ler hafif ve küçüktür. Ayrıca bu yapının baskı devre usulünce yapımı da kolay ve düşük maliyetlidir [7].



Şekil 2.4. İki ve üç boyutlu FSY'ler

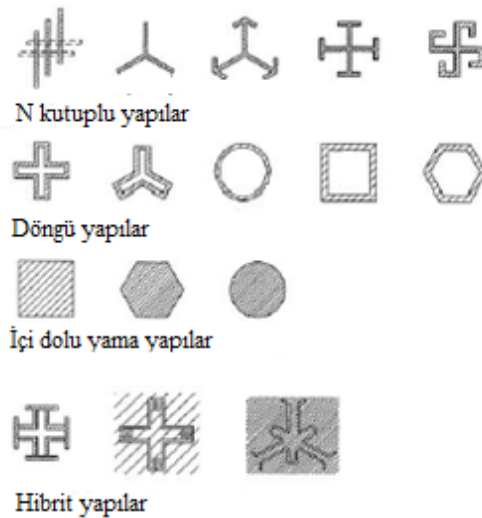
Yüksek geçiren FSY uygulamalarında kalın ekranlı metalik malzemeler kullanılır. Bu filtrede alçak geçirenin tam tersi olarak malzeme kalınlığının, kesim frekansındaki dalga boyundan büyük olması sağlanır. Fakat bu şekilde oluşturulan blokların kalınlığı sebebiyle ağır olmasından dolayı imalatı oldukça maliyetli ve fabrikasyonları hassastır. Bu yapılar çoklu frekans uydu haberleşmesinde bant ayrımının (iletim frekansı/yansıma frekansı) azaltılmasında avantaj sağlar [7].

2.3. FSY'lerin Geometrisi

FSY'lerin geometrisi filtrenin frekans cevabını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Bazıları EMD'nın gelme açısına veya polarizasyonuna duyarlı olurken, bazıları rezonans frekansının bant genişliğine daha duyarlıdır. Bir kısmı da

birden çok rezonans frekansına sahip olup çoklu bant özelliği gösterebilirler. Geometrik şekillerine göre FSY'ler genel olarak 4 temel grupta (Şekil 2.5.) toplanır.

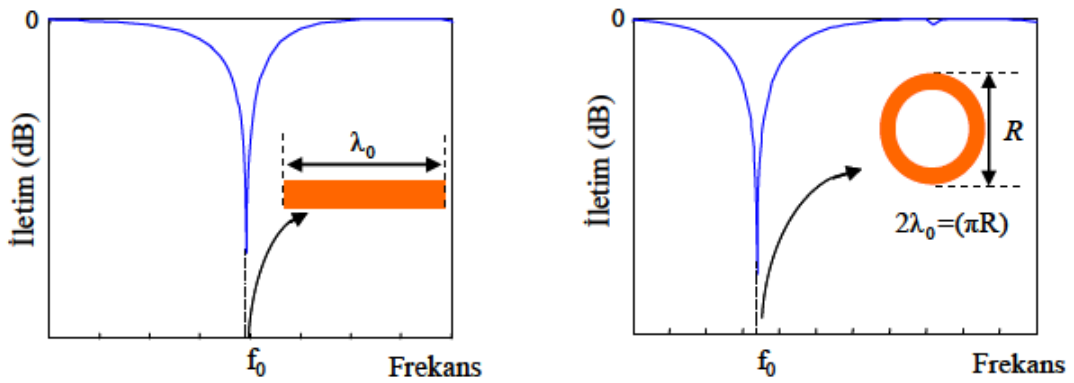
1. N kutuplu ya da merkeze bağlı dipol, tripoles ve köşeli çapraz kutuplu (Jusalem Cross) gibi geometrik yapılardan oluşur. Bunlardan bazıları tek veya çift katmanlı FSY üretmek için diğer çeşitlerle birleştirilmiştir. Genelde dar bantlı bant – durduran özelliğe sahiptir.
2. Halka tipi döngülü yapıdadırlar. Dairesel, kare ve üçgen halkalar bu grubun en çok kullanılanlarıdır. İlk gruba nazaran daha geniş bantlı bant – durduran filtre özelliğine sahiptir.
3. İçi dolu yama tipi olarak da bilinir. Çeşitli yamalar bu gruba dahildir. Daire ve kare yamalı FSY'ler bu grupta en çok kullanılan yapılarıdır. Bu yapının önemli avantajı EMD'nin gelme açısındaki değişime göre daha kararlı davranmasıdır.
4. Kompleks bir geometrik yapıya sahip periyodik elemandır. Farklı geometrilere sahip yapıların birleştirilmesiyle oluşur. Genelde ilk üç grubun bir nevi karıştırılmış halidir. Bu yapılara hibrit model de denir. Bu şekilde istenilen özelliklere sahip özgün yapıda FSY'ler üretilebilir.



Şekil 2.5. Farklı geometrilere sahip FSY'ler

Bu gruplardan herhangi birine dahil olmayan bir diğer FSY türü ise burkumlu FSY'dir. FSY'ler genelde düzlem yüzeyli olarak tasarlanır. Fakat eğri bir yüzey kullanıldığında geometrik bir bozulma meydana gelir. Bu yüzden aynı element geometrisi kullanarak alt katman eğriliklerini azaltmak için birim hücre boyutu azaltılarak avantaj sağlanmaya çalışılır.

FSY'nin boyutları da frekans bandını etkileyen bir diğer önemli parametredir. Uzunluğu $\lambda_0/2$ olan bir dipol FSY rezonans frekansında (f_0) EMD'yi tamamen yansıtıcı karakteristik gösterir. Dairesel döngü FSY elemanı içini ise çevre uzunluğunun yarısı $\lambda_0/2$ 'nin tam katı olduğunda (Şekil 2.6.) aynı özelliği gösterir. Buradan her bir yarım halkanın dipol elemanı gibi davrandığı görülebilir [7].



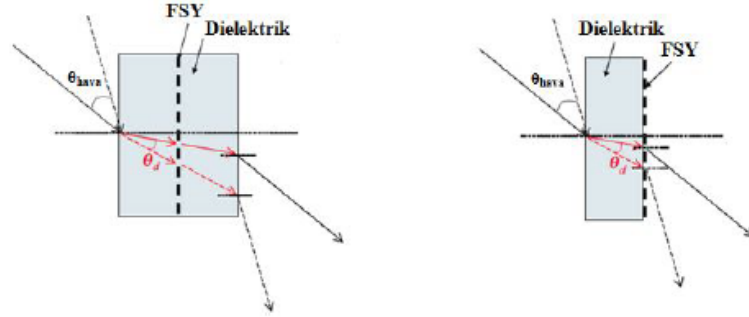
Şekil 2.6. Şerit dipol ve daireSEL döngü FSY yapılarına ait iletim karakteristiği [9].

2.4. FSY'lerde Dielektrik Malzeme Etkisi

Metalik FSY'lerin elemanlarına destek sağlamak için dielektrik malzemeler kullanmak, farklı geliş açılarında yapının rezonans frekansında meydana gelebilecek kaymaları dengede tutmak için önemlidir. Mesela dielektrik malzemenin elektrik geçirgenliğinin artması rezonans frekansının düşmesine sebep olabilir [7].

Tek katmanlı FSY için dielektrik katman tasarımları genel olarak 2 farklı (Şekil 2.7.) şekilde imal edilir.

İlki dielektrik tabakanın tek yüzüne yerleştirilen periyodik elemanlarla oluşturulan tasarımlar, ikincisi ise dielektrik iki tabakanın arasına periyodik elemanların yerleştirilmesiyle elde edilen tasarımlardır.



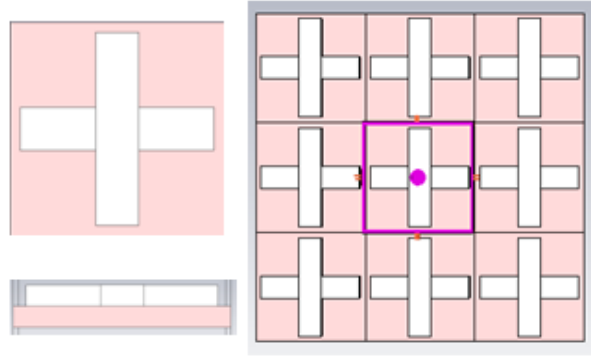
Şekil 2.7. Çift ve tek katmanlı dielektrik kullanılan FSY'ler [10].

Şekil 2.7.'de de görüldüğü üzere dalganın optik kırınıma uğrayarak periyodik yüzeye geldiği görülür. Geliş açısının artırılıp azaltılmasının periyodik yüzeye gelen dalganın açısına olan etkisi önemli bir detaydır. Bu yüzden gelme açısı artırılarak yapının duyarlılığı değiştirilebilir. Bunların yanında dielektrik malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri de yapının davranışını etkileyen önemli faktörlerdendir.

Bazı FSY'ler polarizasyon değiştirici (Polarizer) olarak da kullanıldığından daha önce de bahsetmiştik. Yüzeye 45 derecelik bir açı ile gelen doğrusal polarizasyonlu EMD için yüzeyin davranışı farklı olmaktadır. Gelen EMD'nın düşey bileşeni için topraktan kısa devre edilen endüktif eleman, yataydaki bileşeni de aynı şekilde kapasitif eleman karakteristiğindedir. Bu sayede yüzeyi geçen EMD'nın yatay – düşey bileşenleri arasında 90 derecelik faz farkı oluşarak doğrusal olan polarizasyon, dairesel polarizasyonlu EMD'ya dönüşür [5].

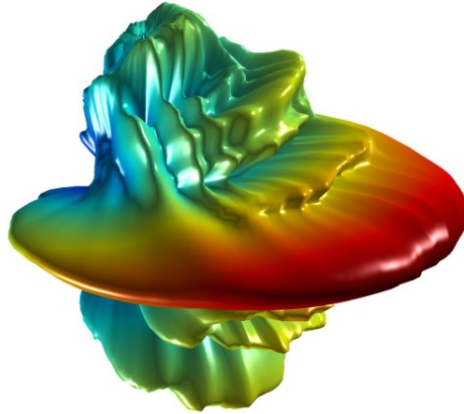
2.5. FSY'lerde Birim Hücre

FSY'nin karakteristiği yerleştirilen birim hücrelerin (unit cell) birbirleriyle olan mesafelerine (Şekil 2.8.) de bağlıdır. Periyodik elemanlar arasındaki bu uzaklık gelen dalganın açısına ve elemanların birbirine karşı uyguladığı elektriksel ilişkiyi etkilediğinden dikkatli bir şekilde tasarımı yapılmalıdır.



Şekil 2.8. Örnek bir birim hücrenin farklı açılardan görünümü

Bu durum aynı zamanda saçılım örüntülerini de (Şekil 2.9.) etkileyerek istenilen karakteristiği bozar. Birim hücre boyutu çalışma frekansındaki dalga boyuyla uyumlu olmazsa Grating Lobes denilen istenmeyen ikincil hüzmelerin oluşmasına neden olur.



Şekil 2.9. Örnek bir saçılım örüntüsünün 3 boyutlu gösterimi

FSY'ler klasik devre elemanlarının endüktif, kapasitif ve resistif özelliklerini gösterdiğinden aynı zamanda bir elektrik devresi gibi davranır (Şekil 2.10.).

2.6. FSY'lerde Analiz Teknikleri

FSY'ler üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla elektromanyetik saçılmaların analizi için birçok teknik geliştirilmiş ve devam eden süreçte gerekli iyileştirmeler yapılarak geliştirilmeye devam etmektedir. Sık kullanılan teknikler [11]:

1. Momentler Metodu (Method of Moments (MoM))
2. Ortak Empedans Metodu (Mutual Impedance Method (MIM))
3. Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Elements Method (FEM))
4. Zamanda Sonlu Farklar Metodu (Finite Difference Time Domain (FDTD))
5. Analitik Eşdeğer Devre Metodu (Equivalent Circuit (EC))

Periyodik yapıların saçılma analizi için belirttiğimiz bu metotları matematiksel ifadelerle başvurmadan açıklamaya çalışılacaktır.

2.6.1. Momentler metodu (MoM)

FSY analizlerinde en çok kullanılan metottur [12]. Momentler metodu genel olarak fiziksel bir problemin sonlu bir alanda integral fonksiyonlarının formüle edilmesi ve bilinmeyenleri tanımlı fonksiyon serilerine açılımından sonra direkt veya iteratif MoM ile bilgisayar destekli çözümü içeren nümerik çözümleme tekniğidir. Direkt MoM yönteminde problem matrise dönüştürülür. Sonra doğrudan veya iteratif matris yöntemiyle çözümlenir. İteratif MoM ise direkt MoM'ndaki gibi kesin matrisler olmaz.

Elektromanyetik problemler için MoM, Maxwell denklemleri ve sınır şartları ile tanımlı problemi diferansiyel denkleme dönüştürerek problemi daha sınırlı bir alana taşımayla çözüme giden bir metottur. MoM ile sınırlanan bu alanda FSY'e gelen EMD, FSY'de akım indüklenmesine neden olur. MoM tekniğini bu tip elektromanyetik problemlere uygulayabilmek için cismin yüzeyinde indüklenen bu akımı temel fonksiyonlar kullanarak modellemek gerekmektedir. İletken yapının elektrik alanının teğet bileşeni bu akımın bir fonksiyonu olup bu fonksiyon Floquet harmoniklerine açılması yardımıyla indüklenen akımın ifadesi integral ifadesi olarak elde edilir. MoM tekniği bu integrali çözülebilen bir nümerik eşitliğe indirgemeye

yardımcı olur. Periyodik yapılarda eleman sayısı yapının özelliklerine göre çok fazla olabileceği ve bu elemanların birbirine etki yaptığı düşünülünce böyle bir hesaplama ancak işlem kabiliyeti ve belleği yüksek analiz bilgisayarlarıyla çözülebilir.

MoM tekniği, dielektrik homojen yapıli tabakaların desteklediği periyodik yapıların analizi için bayağı kullanışlıdır. Fakat geometri karmaşıklaşıp yapı homojen olmadığında bu teknik tercih edilmez. Ayrıca dalga kılavuzları gibi sınırlı ortamlarda bu yöntem yerine FEM ve FDTD kullanılması daha uygundur.

2.6.2. Ortak empedans metodu (MIM)

Ortak empedans metodu, A. Munk tarafından EMD saçılım analizi için geliştirilen bir metottur. Bu metot gelen EMD'nin periyodik yapı üzerinde indüklediği gerilim ve yapı elemanlarının birbiri üzerinde indükledikleri gerilimleri temel alarak ortak bir empedansın hesaplanmasıyla analizin yapılmasını sağlar [13].

2.6.3. Sonlu elemanlar metodu (FEM)

FEM çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözümleme tekniğidir. Bu yöntemin matematiksel uygulama alanının daha önceden var olmasına rağmen elektromanyetiğe uygulanması 1960'ların sonuna doğru olmuştur [11]. Frekans domeninde karmaşık geometrili ve homojen olmayan periyodik yüzeylerin analizinde etkili sonuçlar veren bir tekniktir. Yapının geometrisini basitleştirmeye gerek duymaz. Sınır koşulları sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra oldukça basit işlemlerle denklem sistemine dahil edilebilir. Doğru sonuçları elde etmek için mesh analiz işlemi (ayırıklaştırma) yapılır. Sonucun doğruluğu için fiziksel problem çok iyi incelenmeli ve sonuç kestirimler yapılarak test edilip yorumlanmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi yapısından dolayı çeşitli problemleri çözmeyi kolaylaştıracak bilgisayar analiz programı geliştirilmesi için uygun bir yöntemdir [14].

2.6.4. Zamanda sonlu farklar metodu (FDTD)

FDTD yöntemi, MoM ve FEM tekniklerinden farkı saçılma analizlerini frekans domeninde yapmak yerine zaman domenini standart almasıdır. Bu yöntem James C. Maxwell'in zamana bağımlı rotasyonel eşitliklerinin direkt olarak çözümünü verir. Bir tam dalganın çözümü için kullanışlı bir yöntemdir. Bir zaman aralığı metodu olduğundan çözümler zaman aralığını yeterince küçük tutarak Nyquist – Shannon teoremini sağlayarak arzu edilen yüksek frekans çözümü için tek bir simülasyonda geniş bir frekans menziline kapsayabilir.

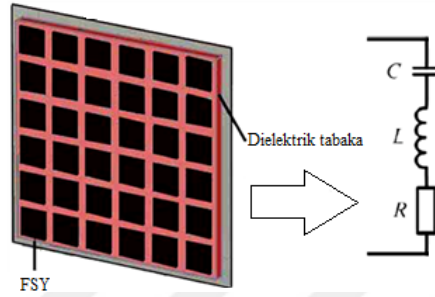
FDTD alan bazlı diferansiyel zaman aralığı modelleme sınıfında yer alır. Maxwell eşitliklerinden elde edilen denklemler dögüsel yöntemle çözülür. Elektrik alanı verilen anlık bir zamanda, manyetik alan ise ondan sonraki zamanda çözülerek işlem sürekli tekrar edilir. Bunun için de çeşitli simülasyon ve analiz programları kullanılabilir.

FDTD 1990'lardan bu yana EMD'ların madde yapılarıyla etkileşimlerini konu edinen bilimsel ve mühendislikle ilgili sorunlarda başlıca yöntem olarak etkin bir şekilde kullanılmaktadır. FDTD modelleme şimdi ultra düşük frekanslardan mikrodalgalara ve görünür ışığa kadar uzanan spektrumda görülebilir. Homojen olmayan dielektrik tabakaların kullanılarak 3D FSY yapılarının modellenmesinde bu teknik çok uygun çözümler vermektedir [10].

2.6.5. Analitik eşdeğer devre metodu (EC)

Yukarıda açıklanan ve bilgisayar analizi gerektiren 4 farklı metodun aksine EC modeli FSY'deki saçılmaları daha da basitleştirerek analitik olarak hesaplamaya yarayan kullanışlı bir yöntemdir [6]. Bu yöntemle periyodik yapının iletim karakteristikleri bir iletim hattının indüktif ve kapasitif elemanları olarak modellenir [11]. EC modelinin uygulama alanı, doğrusal polarizasyonlar ve basit geometriye sahip periyodik elemanların analizi için uygun bir yöntem oluşturur. Dielektrik tabaka özelliklerinin ve EMD'nın farklı geliş açılarının hesaplanabilmesi sayesinde

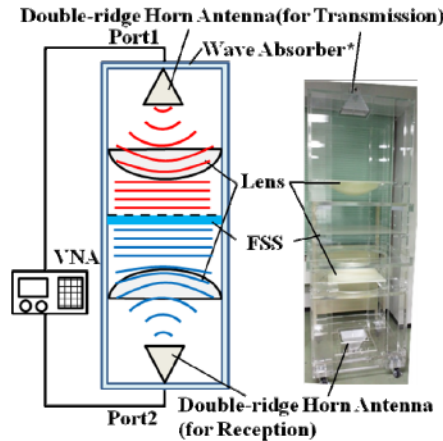
uygun sonuçlar verebilir. FSY tasarımı için basit geometriye sahip periyodik elemanlar kullanılırsa EC modeli gerçekten çok başarılıdır. Diğer yaklaşımlar karmaşık hesaplamalara sahip olup kesin sonuçlar verse de EC modeli (Şekil 2.10.) çabuk modellenebilme ve yeterli sonuçları hesaplayabilme özelliği sayesinde çok kullanışlıdır.



Şekil 2.10. Bir FSY'in eşdeğer devresi

2.7. FSY Ölçüm Tekniği

FSY'lerin iletim ve yansıma ölçümleri, yansısız mekânlarda standart kazançlı alıcı ve verici horn antenlerden oluşan test düzeneği oluşturulur. Sonra bu iki anten arasına yerleştirilen FSY'in enine elektrik alan (TE) ve enine manyetik alan (TM) iletim – yansıma karakteristiği anten polarizasyonlarının dikeyden yataya sırasıyla değiştirilmesi suretiyle ölçüm yapılır. Bazen yansıma ölçümlerinde test düzeneğinde oluşan kenar kırınımları sonuçların hatalı çıkmasına sebep olabilir. Bu yüzden horn antenlerin önüne mercekle konularak (Şekil 2.11.) önlem alınabilir.



Şekil 2.11. Örnek ölçüm düzeneği

2.8. Elektromanyetik Dalga Yayılımı ve Polarizasyon

2.8.1. Maxwell denklemleri ve dalga denklemleri

Elektromanyetik dalgalar yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşeni oluşturarak bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda yayılım gösteren yayılmaları için herhangi özel bir ortam gerektirmeyen ve boşlukta ışık hızında hareket eden enine dalgalardır.

EMD'yı matematiksel olarak eksiksiz bir şekilde açıklayan sistemli kuram fizikçi ve matematikçi olan İskoç bilim insanı James C. Maxwell tarafından ortaya konulmuştur. Maxwell, Faraday'ın İndüksiyon Yasasını, Ampere Yasasını ve Gauss Yasasını birleştirip eklemeler yaparak kendi adıyla anılan Maxwell Denklemlerini oluşturmuştur. Maxwell denklemleri ile bunlardan türetilen dalga denklemleri ve sınır koşulları elektromanyetik teorisinin temelini oluşturur. Aşağıda Maxwell Denklemlerinden hareketle dalga denklemlerinin elde edilişi verilmektedir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M}_v, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.1)$$

İlk önce Maxwell'in (Denklemler 2.1) denklemlerinde

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_1 + \vec{J}_c, \quad \vec{J}_c = \sigma \vec{E}, \quad \vec{J} = \vec{J}_1 + \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

(Denklemler 2.2 ve 2.3) eşitlikleri yerine konursa;

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \vec{M}_v, \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} + \vec{J}_1 \quad (2.4)$$

(Denklemler 2.4) elde edilir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_e, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \rho_m \quad (2.5)$$

Maxwell'in diğer iki denklemi (Denklem 2.5) eşitliklerde (Denklem 2.2) yerine koyularak;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon}, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \frac{\rho_m}{\mu} \quad (2.6)$$

(Denklem 2.6) elde edilir.

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\mu \frac{\partial(\vec{\nabla}_x \vec{H})}{\partial t} - \vec{\nabla}_x \vec{M}_1 \quad (2.7)$$

(Denklem 2.4)'nün rotasyoneli alınır (Denklem 2.7)'ye ulaşılır.

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} = -\mu \frac{\partial \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} + \vec{J}_1 \right)}{\partial t} - \vec{\nabla}_x \vec{M}_1 \quad (2.8)$$

(Denklem 2.7)'de bulunan rotasyon işleminde (Denklem 2.4) yerine koyulduğunda (Denklem 2.8) bulunur.

$$-\vec{\nabla}^2 \vec{E} + \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) = -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \frac{\partial \vec{J}_1}{\partial t} - \vec{\nabla}_x \vec{M}_1 \quad (2.9)$$

(Denklem 2.8)'deki rotasyon eşitliğinin her iki yanı da açıldığında (Denklem 2.9)'a ulaşılır.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \frac{\partial \vec{J}_1}{\partial t} + \vec{\nabla}_x \vec{M}_1 + \vec{\nabla} \frac{\rho_e}{\epsilon} \quad (2.10)$$

Aynı işlemler manyetik alan için tekrarlandığında (Denklem 2.11)'e ulaşılır.

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial(\vec{\nabla}_x \vec{E})}{\partial t} + \sigma(\vec{\nabla}_x \vec{E}) + \vec{\nabla}_x \vec{J}_1 \quad (2.11)$$

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \vec{M}_1 \right)}{\partial t} - \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma \vec{M}_1 + \vec{\nabla}_x \vec{J}_1 \quad (2.12)$$

Yerine koyma işlemini devam ettirerek (Denklem 2.12 ve Denklem 2.13) elde edilir.

$$-\vec{\nabla}^2 \vec{H} + \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{H}) = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial \vec{M}_1}{\partial t} - \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \sigma \vec{M}_1 + \vec{\nabla}_x \vec{J}_1 \quad (2.13)$$

(Denklem 2.13) işleminin iki tarafı da açılırsa (Denklem 2.14) elde edilir.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial \vec{M}_1}{\partial t} + \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \sigma \vec{M}_1 - \vec{\nabla}_x \vec{J}_1 + \vec{\nabla} \frac{\rho_m}{\mu} \quad (2.14)$$

Eğer ortamda kaynak yok ise $\vec{J}_1, \vec{M}_1, \rho_m, \rho_e = 0$ olur ve kayıksız ortam için dalga denklemleri olan (Denklem 2.15) elde edilir.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Ortam hem kayıksız hem de kayıpsız ise $\sigma = 0$ olur ve dalga denklemleri (Denklem 2.16) olarak elde edilir.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

EMD'nın elektrik alan bileşeni zamanda harmonik biçimde fazörlerle ifade edilirse (Denklem 2.17)'ye ulaşılır. Bunun da zamana bağlı türevleri alınırsa sırasıyla (Denklem 2.18) elde edilir.

$$\vec{E}(x, y, z; t) = \vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{E}(x, y, z; t) = j\omega \vec{E}(x, y, z; t) \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(x, y, z; t) = -\omega^2 \vec{E}(x, y, z; t) \quad (2.18)$$

Aynı işlemler EMD'nın manyetik alan bileşenine uygulandığında sırasıyla (Denklem 2.19 ve 2.20)'ye ulaşırız. Buradan da (Denklem 2.21) çıkar.

$$\vec{H}(x, y, z; t) = \vec{H}(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{H}(x, y, z; t) = j\omega \vec{H}(x, y, z; t) \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{H}(x, y, z; t) = -\omega^2 \vec{H}(x, y, z; t) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega, \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} \rightarrow -\omega^2 \quad (2.21)$$

(Denklem 2.21) dönüşümü kayınsız ortam için uygulandığında (Denklem 2.22 ve 2.23) elde edilir. Eşitlikler ortak çarpan parantezlerine alınırsa (Denklem 2.24)'e ulaşılır.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\omega^2 \mu\epsilon \vec{E} + j\omega \mu\sigma \vec{E} \quad (2.22)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\omega^2 \mu\epsilon \vec{H} + j\omega \mu\sigma \vec{H} \quad (2.23)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \vec{E}(j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon), \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} = \vec{H}(j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon) \quad (2.24)$$

(Denklem 2.24)'te (Denklem 2.25) yerine konulursa (Denklem 2.26) ve (Denklem 2.27) elde edilir.

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon), \quad \gamma = \alpha + j\beta \quad (2.25)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \gamma^2 \vec{E}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} = \gamma^2 \vec{H} \quad (2.26)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \quad (2.27)$$

Ortam hem kayıpsız hem de kayınsız olduğunda (Denklem 2.22 ve 2.23)'ten (Denklem 2.28) elde edilir. Ayrıca (Denklem 2.29)'a ulaşılır.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mu\epsilon \vec{E}, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mu\epsilon \vec{H} \quad (2.28)$$

$$\beta^2 = k^2 = \omega^2 \mu \epsilon, \quad \beta = k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.29)$$

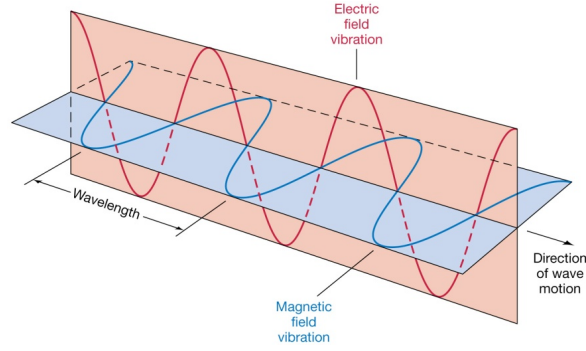
$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} + \beta^2 \vec{H} = \vec{\nabla}^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0, \quad \vec{\nabla}^2 \vec{E} + \beta^2 \vec{E} = \vec{\nabla}^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.30)$$

(Denklem 2.29)'u (Denklem 2.28)'de yerine koyarsak (Denklem 2.30) eşitliği ile verilen kayıpsız ve kaynaksız ortam için dalga denklemleri elde edilir.

2.8.2. Düzlem elektromanyetik dalgalar ve polarizasyon

Düzgün düzlem EMD (Şekil 2.12.), elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin yayılma yönüne dik birbirine paralel düzlemlerde, aynı yöne, aynı genliğe ve aynı faza sahip olduğu dalgalarlardır. Maxwell denklemleri kullanılarak çözülür. Düzgün düzlem dalgalar gerçekte yoktur. Çünkü oluşturmaları için sonsuz boyutlarda kaynaklar gerekir ve pratik dalga kaynakları her zaman sonlu boyuttadır. Eğer bir kaynaktan yeteri kadar uzakta isek, dalga cephesi (eşfaz yüzeyi) neredeyse küresel hale gelir ve dev bir kürenin yüzeyinin çok küçük bir kısmı bir düzleme çok yakındır. Düzgün düzlem dalgaların özellikleri basittir ve bunların çalışılmasının teorik ve pratik açıdan önemi büyüktür [15].

Elektromanyetik sınır değer problemleri için Maxwell denklemlerini ve sınır koşullarını sağlayan pek çok çözüm yani alan konfigürasyonu vardır. Bütün bu farklı alan konfigürasyonları (çözümler) genel olarak modlar olarak adlandırılır. En yaygın olarak bilinenler enine elektromanyetik (TEM), enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) olarak adlandırılan modlardır. Enine elektromanyetik modlar (TEM) hem elektrik alan hem de manyetik alan bileşenlerinin verilen bir yöne göre dik olduğu alan konfigürasyonlarıdır. Bu yön çoğunlukla dalganın ilerleme yönüdür. TE modları elektrik alan bileşenlerinin verilen bir yöne göre dik olduğu alan konfigürasyonları iken, TM modları manyetik alan bileşenleri dalganın verilen bir yöne dik düzlem içinde kalan alan konfigürasyonlarıdır. Örneğin verilen mod z'ye göre TM, (TM^z) ise bunun anlamı manyetik alanın z bileşeninin sıfır (H_z=0) olduğudur. Diğer manyetik alan bileşenleri (H_x, H_y) ve elektrik alan bileşenleri (E_x, E_y ve E_z) sıfırdan farklı ya da sıfır olabilir.



Şekil 2.12. Doğrusal polarize olmuş düzlem EMD

Kaynaksız ve kayıpsız ortamda düzlem EMD +z yönünde hareket ediyorsa E ve H bileşenleri (Denklem 2.31 ve 2.32)'deki gibidir. Bu eşitlikler Maxwell denklemlerinde yerine konulursa (Denklem 2.33)'e ulaşılır. Buradan da (Denklem 2.34) bağıntısı bulunur.

$$\vec{E} = a_x E_x = a_x (E_x^+ + E_x^-) = a_x (E_0^+ e^{-jkz} + E_0^- e^{jkz}) = a_x E_0^+ e^{-jkz} \quad (2.31)$$

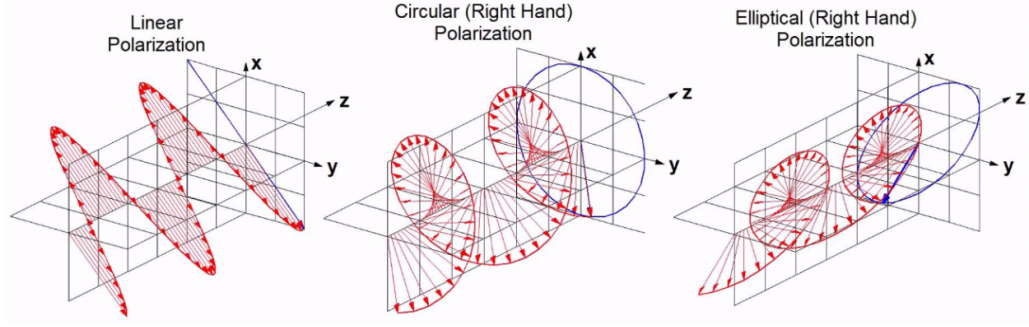
$$\vec{H} = a_y H_y = a_y (H_y^+ + H_y^-) = a_y (H_0^+ e^{-jkz} + H_0^- e^{jkz}) = a_y H_0^+ e^{-jkz} \quad (2.32)$$

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -j\omega \mu \vec{H} = -a_y j\omega \mu H_0^+ e^{-jkz} = -a_y jk E_0^+ e^{-jkz} \quad (2.33)$$

$$E_0^+ = \frac{\omega \mu}{k} H_0^+ = \eta H_0^+ \quad (2.34)$$

Yayılan elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve büyüklüğünü tanımlayan özelliği polarizasyon olarak adlandırılmaktadır [16]. Genel olarak 3 tip polarizasyon (Şekil 2.13.) vardır.

1. Doğrusal polarizasyon
2. Dairesel polarizasyon
3. Eliptik polarizasyon



Şekil 2.13. Düzlem dalganın polarizasyon tipleri

2.8.2.1. Doğrusal polarizasyon

Dalganın z yönünde ilerlediği kabul edilirse bu yönde herhangi bir elektrik ve manyetik alan bileşeni olmadığından elektrik alan değerleri,

$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y = a_x E_x^+ + a_x E_x^- + a_y E_y^+ + a_y E_y^-, \quad E_x^- = E_y^- = 0$$

$$\vec{E} = a_x E_x^+ + a_y E_y^+ = \text{Re}[a_x E_{0x}^+ e^{-j\beta z} + a_y E_{0y}^+ e^{-j\beta z}] e^{j\omega t}$$

$$\vec{E} = a_x E_{0x}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_x) + a_y E_{0y}^+ \cos(\omega t - \beta z + \phi_y) \text{ olarak bulunur.}$$

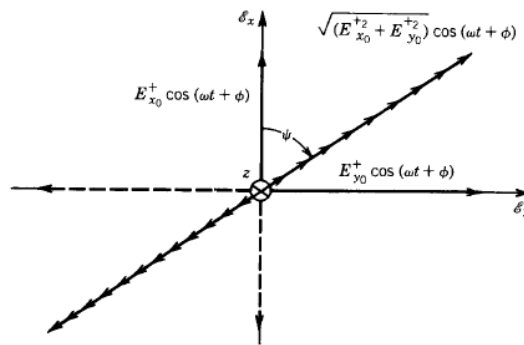
Elektrik alan bileşeninin $z=0$ 'da x yönünde lineer polarize olduğunu kabul edersek,

$$E_{0y}^+ = 0 \text{ ve } \vec{E} = \vec{E}_x = a_x E_{0x}^+ \cos(\omega t + \phi_x), \text{ y yönünde kabul edersek } E_{0x}^+ = 0 \text{ ve}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_y = a_y E_{0y}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \text{ olur. } \phi_x = \phi_y = \phi \text{ olduğundan iki denklem}$$

birleştirilerek,

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{(E_{0x}^+)^2 + (E_{0y}^+)^2} \cos(\omega t + \phi) \text{ eşitliği elde edilir.}$$



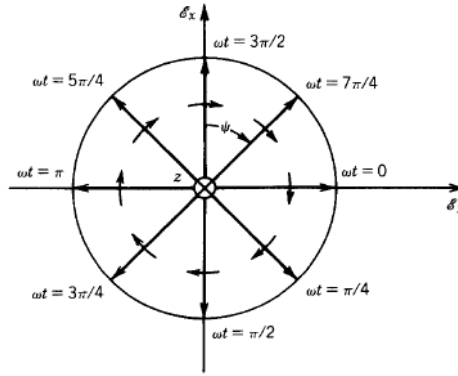
Şekil 2.14. Doğrusal polarizasyon [16].

Örnek olarak aldığımız değerleri bir de , $\varphi_y = 0$ ve $\varphi_x = \pi/2$ değerleri için tekrarlırsak, $E_x = -E_R \sin(\omega t)$ ve $E_y = E_R \cos(\omega t)$ bulunur. Bu iki denklem birleştirilerek polarizasyon açısı,

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{E_R \cos(\omega t)}{-E_R \sin(\omega t)}\right) = \tan^{-1}(-\cot \omega t) = \omega t + \frac{\pi}{2}$$

olarak bulunur. Burada da (Şekil 2.16.) 2 bileşen arasında 90 derece fark olduğu görülebilir. Elektrik alan bileşeninin anlık değerini bulmak istersek,

$$E = \text{Re} \left[a_x E_R e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} + a_y E_R e^{j(\omega t - \beta z)} \right] = E_R \text{Re} [(j a_x + a_y) e^{j(\omega t - \beta z)}] \text{ bulunur.}$$



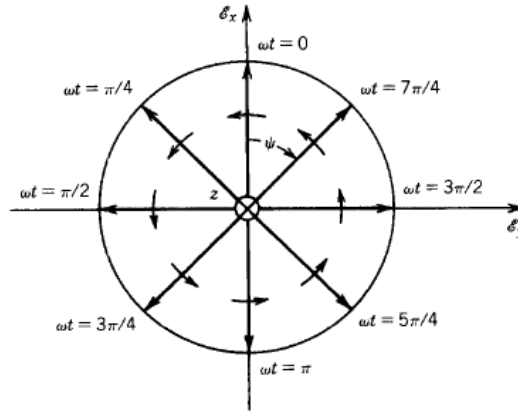
Şekil 2.16. $\varphi_y = 0$, $\varphi_x = -\pi/2$ için CW (sağ el) dairesel polarizasyon [16].

Sağ el veya saat yönünde (CW) dairesel polarizasyondan sonra sol el veya saat yönünün tersi (CCW) dairesel polarizasyonu görmek için $\varphi_x = 0$ ve $\varphi_y = \pi/2$ değerlerini alıp sol eli ifade etmek adına E_R yerine E_L ifadesini kullanırsak,

$E_x = E_L \cos(\omega t)$ ve $E_y = E_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -E_L \sin(\omega t)$ elde edilir. Buradan da $E = E_L$ olduğu görülür. Dairesel polarizasyon açısı ise,

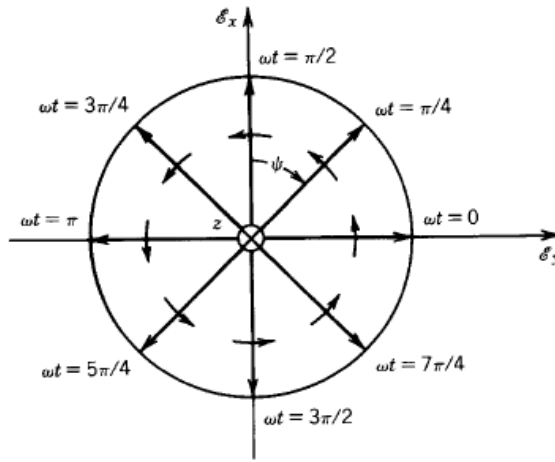
$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-E_L \sin(\omega t)}{E_L \cos(\omega t)}\right) = \tan^{-1}(-\tan \omega t) = -\omega t$$

olarak bulunur (Şekil 2.17.).



Şekil 2.17. $\varphi_x = 0$, $\varphi_y = \pi/2$ için CCW (sol el) dairesel polarizasyon [16].

Şimdi de için $\varphi_y = 0$ ve $\varphi_x = -\pi/2$ olarak işlemleri yeniden gerçekleştirirsek $E_x = E_L \sin(\omega t)$ ve $E_y = E_L \cos(\omega t)$ olur. Dairesel polarizasyonun açısı ise, $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}(\cot \omega t) = \frac{\pi}{2} - \omega t$ olarak (Şekil 2.18.) bulunur.



Şekil 2.18. $\varphi_y = 0$, $\varphi_x = -\pi/2$ için CCW (sol el) dairesel polarizasyon [16].

2.8.2.3. Eliptik polarizasyon

Eliptikte ise elektrik alan bileşenlerinin genlikleri eşit değildir ($E_{0x}^+ \neq E_{0y}^+$). Dairesel polarizasyonda olduğu gibi burada da faz farkı ($\varphi_y \neq \varphi_x$) vardır. Örnek olarak, $\varphi_x = \pi/2$, $\varphi_y = 0$, $E_{0x}^+ = E_R + E_L$, $E_{0y}^+ = E_R - E_L$ olsun.

$E_x = -(E_R + E_L) \sin(\omega t)$ ve $E_y = (E_R - E_L) \cos(\omega t)$ olur. Buradan da

$$\left(\frac{E_x}{E_R + E_L}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_R - E_L}\right)^2 = 1 \quad \text{olduğu görülür.}$$

$\omega t = (2n + 1)\frac{\pi}{2}$, $n = 0,1,2 \dots$ olduğunda $|E|_{\max} = |E_R + E_L|$ olur.

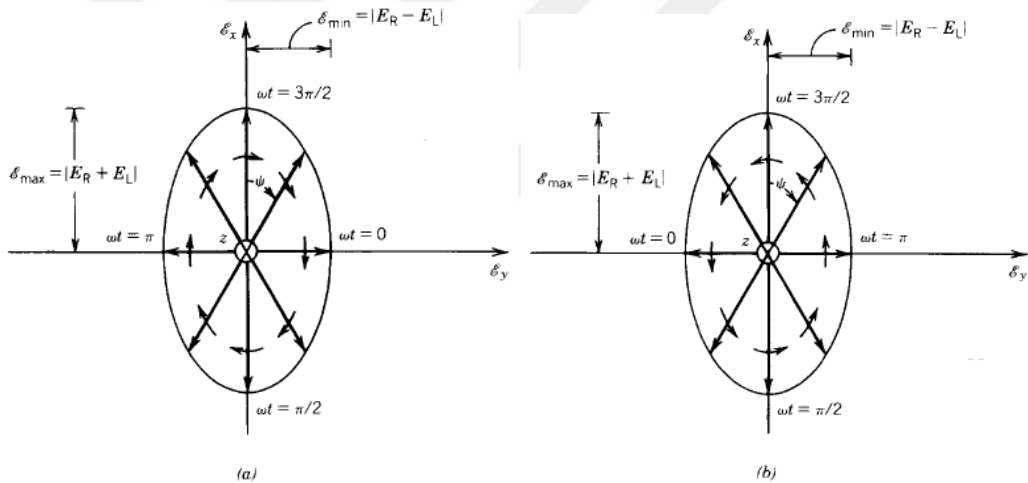
$\omega t = n\pi$, $n = 0,1,2 \dots$ olduğunda ise $|E|_{\min} = |E_R - E_L|$ olur.

Bu iki değerin oranı aksenal oran (AR) denilen bir değeri verir.

Axial ratio (AR) = $-\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = -\frac{E_R + E_L}{E_R - E_L}$ dir ve bu değer $1 \leq |AR| \leq \infty$ aralığında

tanımlanır. Anlık elektrik alan vektörü (Şekil 2.19.) ise,

$$\begin{aligned} E &= \text{Re} \left[a_x(E_R + E_L)e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} + a_y(E_R - E_L)e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \\ &= \text{Re} \left[E_R(ja_x + a_y) + E_L(ja_x - a_y)e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \text{ olarak bulunur.} \end{aligned}$$



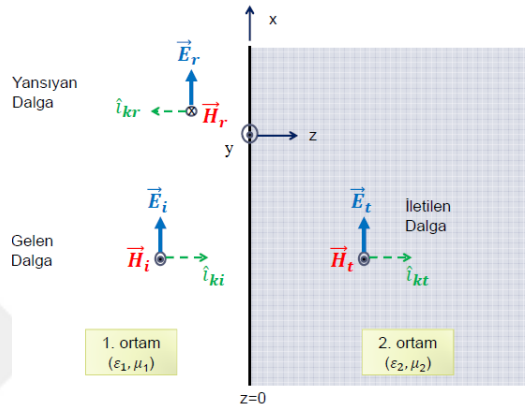
Şekil 2.19. (a): $E_R > E_L$ CW (sağ el) eliptik, (b): $E_L > E_R$ CCW (sol el) eliptik polarize [16].

2.8.3. Düzlem dalgaların sınırlara gelişi

Sınırsız homojen ortamlarda yayılması incelenen düzlem dalgalar pratikte sıklıkla ortam değiştirirler. Bir ortamda ilerleyen dalga öz empedansı farklı bir ortamla karşılaştığında yansıma olur. İkinci ortam mükemmel iletken olduğu durum dışında, gelen gücün bir kısmı ikinci ortama iletilir.

2.8.3.1. Düzlem dalganın düzlem sınıra dik gelişi

Şekil 2.20.'de 1. ortamdaki gelen dalganın +z yönünde 2. ortama doğru ilerlediği düşünülürse $z=0$ düzlemi sınır düzlemi olacaktır. 2 ortamın da kayıpsız kabul edildiği durumda gelen, iletilen ve yansıyan dalgalar sırasıyla (Denklem 2.35, 2.36 ve 2.37)'deki gibi düzenlenir.



Şekil 2.20. Düzlem dalganın düzlem sınıra dik gelişi [17].

$$i_{ki} = a_z, \quad \vec{E}_i = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z}, \quad \vec{H}_i = a_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1 z} \quad (2.35)$$

$$i_{kt} = a_z, \quad \vec{E}_t = a_x E_{t0} e^{-j\beta_2 z}, \quad \vec{H}_t = a_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.36)$$

$$i_{kr} = -a_z, \quad \vec{E}_r = a_x E_{r0} e^{j\beta_1 z}, \quad \vec{H}_r = -a_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{j\beta_1 z} \quad (2.37)$$

Sınır koşullarını elde etmek için $z=0$ 'daki genlikler bulunur. Arayüzde elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin teğet bileşenleri (x – bileşenleri) sürekli olmalıdır.

$$\vec{E}_i(z=0) + \vec{E}_r(z=0) = \vec{E}_t(z=0), \quad E_{i0} + E_{r0} = E_{t0} \quad (2.38)$$

$$\vec{H}_i(z=0) + \vec{H}_r(z=0) = \vec{H}_t(z=0), \quad \frac{1}{\eta_1}(E_{i0} - E_{r0}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \quad (2.39)$$

$$E_{r0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0}, \quad \frac{E_{i0}}{E_{r0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \Gamma \quad (2.40)$$

$$E_{t0} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0}, \quad \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \tau \quad (2.41)$$

(Denklem 2.38 ve 2.39) eşitlikleri elde edildikten sonra düzenlenerek (Denklem 2.40 ve 2.41)'de ortamın öz empedansı cinsinden ifade edilerek yansımaya ve iletim katsayısını veren denklemlere ulaşılır.

$$1 + \Gamma = \tau \quad (2.42)$$

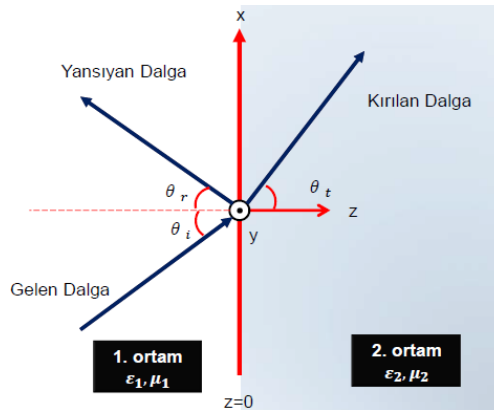
$$\vec{E}_1 = \vec{E}_i + \vec{E}_r = a_x E_{i0} e^{-j\beta_1 z} (1 + \Gamma e^{j2\beta_1 z}), \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_t = a_x \tau E_{i0} e^{-j\beta_2 z} \quad (2.43)$$

Yansımaya ve iletim katsayısı birbiri cinsinden (Denklem 2.42)'deki gibi gösterilebilir. Formüller düzenlenirse 1. ve 2. ortamdaki elektrik alan şiddetleri (Denklem 2.43)'deki gibi verilebilir.

$$S = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad |\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1, \quad 1 \leq S \leq \infty \quad (2.44)$$

Bir duran dalganın elektrik alan şiddetinin maksimum değerinin minimum değerine oranına duran dalga oranı (SWR) denir. (Denklem 2.44)'teki eşitliklerde görüldüğü gibidir.

2.8.3.2. Düzlem dalganın düzlem sınıra eğik gelişi



Şekil 2.21. Düzlem dalganın düzlem sınıra eğik gelişi [17].

Bu bölümde arayüze eğik açıyla gelen EMD incelenmektedir. Şekil 2.21.'de dalganın geliş, yansımaya ve kırılma açıları görülmektedir.

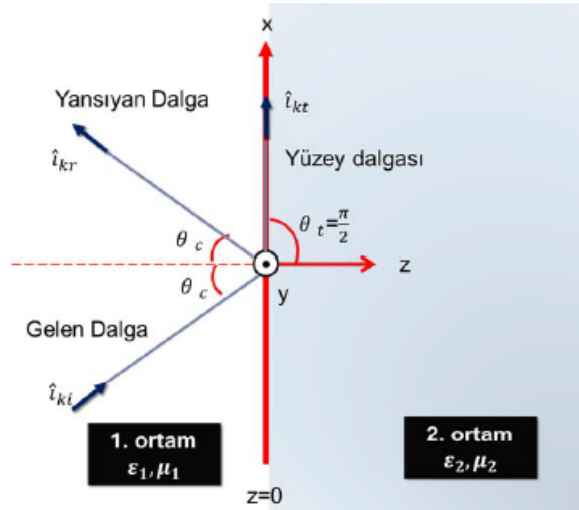
$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\vartheta_{p2}}{\vartheta_{p1}} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad n = \frac{c}{\vartheta_p}, \quad \theta_i = \theta_r \quad (2.45)$$

Snell yansıma ve kırılma kanunlarından (Denklem 2.45)'te görülen eşitlikler elde edilir. Snell yasaları sonsuz bir yüzeyde gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların ışın yollarını incelenerek çıkarılmaktadır. Bu bağıntıların çıkarılmasında dalgaların polarizasyonu dikkate alınmamıştır. Bu yüzden Snell yasaları dalgaların polarizasyonundan bağımsızdır.

$$(\mu_1 = \mu_2) \rightarrow \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad (2.46)$$

Eşit manyetik geçirgenlikli ortamlar için (Denklem 2.45) bağıntısı (Denklem 2.46)'ya dönüşür.

$$\epsilon_1 > \epsilon_2 \rightarrow \theta_t > \theta_i, \quad \theta_t = \frac{\pi}{2} \rightarrow \sin \theta_i = \sin \theta_c = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.47)$$



Şekil 2.22. Kritik açının oluşması [17].

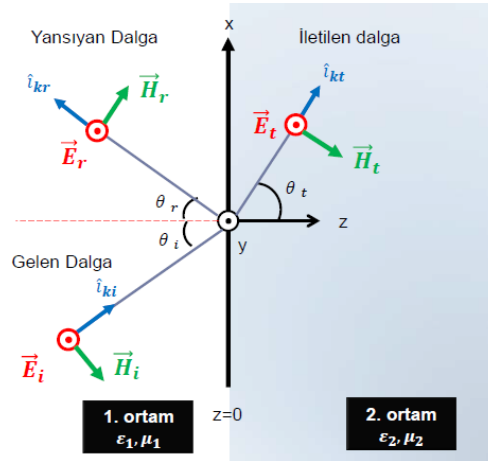
Snell yasasına göre 1. ortamdaki dalga daha az yoğun olan 2. ortama gelirse kırılma açısı gelme açısına göre daha hızlı artar ve 90 dereceye ulaştığında tam yansıma

gerçekleşir (Şekil 2.22.). Bu durumdaki gelme açısına kritik açı (Denklem 2.47) denir.

Elektromagnetik dalgalar bir ortamda ilerlerken farklı ortam sınırları, saçıcı nesnelere gibi süreksizliklerle karşılaşır. Bu nedenle alanlar, bu süreksizliklere dikkate alınarak belirlenir. Bir elektromanyetik dalga sözü edilen süreksizliklere rasgele bir geliş açısı ile geldiğinde yansıyan ve iletilen dalganın analiz edilebilmesi için geliş düzlemi tanımlanmalıdır. Geliş düzlemi elektromagnetik dalganın geldiği sınırın (arayüz) yüzey normali birim vektörü ile dalganın ilerleme yönündeki vektörün oluşturduğu düzlemdir. Arayüze eğik açıyla gelen dalgalarda yansıma ve iletimi incelemek için elektrik alanı geliş düzlemine göre paralel ve dik bileşenlerine ayırmak uygun olur ve herbiri kendi başına analiz edilir.

2.8.3.2.1. Dik polarizasyon (TM Modu)

Dik polarizasyon durumunda elektrik alan geliş düzlemine diktir (Şekil 2.23.). Bu durum TM moduna karşılık gelir. Geliş, yansıma ve iletim için kayıpsız ortamda EMD'nin davranışı aşağıda incelenmektedir.



Şekil 2.23. Dik polarizasyon [17].

Gelen EMD'nin bileşenleri (Denklem 2.48, 2.49 ve 2.50) gibi bulunur.

$$i_{ki} = a_x \sin \theta_i + a_z \cos \theta_i \quad (2.48)$$

$$\vec{E}_i(x, z) = a_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (2.49)$$

$$\vec{H}_i(x, z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1} (-a_x \sin \theta_i + a_z \cos \theta_i) e^{-j\beta_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (2.50)$$

Yansıyan EMD için (Denklem 2.51, 2.52 ve 2.53) elde edilir.

$$i_{kr} = a_x \sin \theta_r - a_z \cos \theta_r \quad (2.51)$$

$$\vec{E}_r(x, z) = a_y E_{r0} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.52)$$

$$\vec{H}_r(x, z) = \frac{E_{r0}}{\eta_1} (a_x \cos \theta_r + a_z \sin \theta_r) e^{-j\beta_1(x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.53)$$

İletilen EMD için ise (Denklem 2.54, 2.55 ve 2.56) elde edilir.

$$i_{kt} = a_x \sin \theta_t + a_z \cos \theta_t \quad (2.54)$$

$$\vec{E}_t(x, z) = a_y E_{t0} e^{-j\beta_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.55)$$

$$\vec{H}_t(x, z) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} (-a_x \cos \theta_t + a_z \sin \theta_t) e^{-j\beta_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.56)$$

Burada elektrik ve manyetik alanın teğet bileşenlerinin $z=0$ düzleminde (Denklem 2.57 ve 2.58)'de olduğu gibi sürekli olduğu düşünülürse (Denklem 2.59 ve 2.60) elde edilir.

$$E_i(x, z=0) + E_r(x, z=0) = E_t(x, z=0) \quad (2.57)$$

$$E_{i0} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_i)} + E_{r0} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_r)} = E_{t0} e^{-j\beta_2(x \sin \theta_t)} \quad (2.58)$$

$$H_i(x, z=0) + H_r(x, z=0) = H_t(x, z=0) \quad (2.59)$$

$$\frac{1}{\eta_1} (E_{i0} \cos \theta_i e^{-j\beta_1 x \sin \theta_i} - E_{r0} \cos \theta_r e^{-j\beta_1 x \sin \theta_r}) = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \cos \theta_t e^{-j\beta_2 x \sin \theta_t} \quad (2.60)$$

Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin tüm “x” değerleri için sağlanması gerektiğinden x’in fonksiyonu olan tüm üstel değerler faz uyumlamadan dolayı eşit olmalıdır.

$$\beta_1 x \sin \theta_i = \beta_1 x \sin \theta_r = \beta_2 x \sin \theta_t \rightarrow \theta_i = \theta_r, \quad \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.61)$$

$$\theta_i = \theta_r, \quad \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.62)$$

Böylece (Denklem 2.61)’de verilen eşitlikten (Denklem 2.62) elde edilir.

$$E_{i0} + E_{r0} = E_{t0}, \quad \frac{1}{\eta_1} (E_{i0} - E_{r0}) \cos \theta_i = \frac{E_{t0}}{\eta_2} \cos \theta_t \quad (2.63)$$

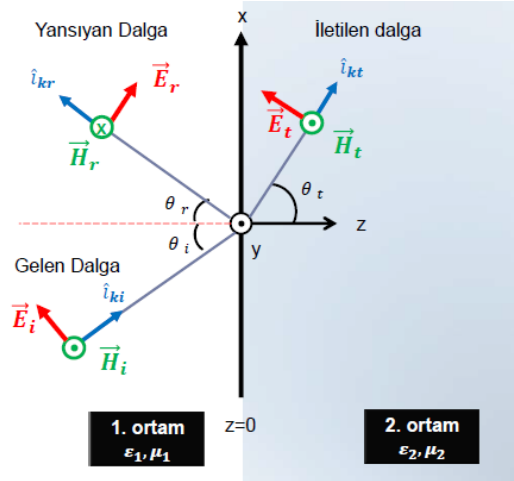
(Denklem 2.63)’teki eşitlikler kullanılarak yansıma ve iletim katsayılarının denklemleri olan (Denklem 2.64) elde edilir. Bu katsayılar arasındaki ilişki ise (Denklem 2.65)’deki gibidir.

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}, \quad \tau_{\perp} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (2.64)$$

$$1 + \Gamma_{\perp} = \tau_{\perp} \quad (2.65)$$

2.8.3.2.2. Paralel polarizasyon (TE modu)

Paralel polarizasyon durumunda elektrik alan geliş düzlemine paraleldir. Bu durum TE moduna karşılık gelir (Şekil 2.24.). Geliş, yansıma ve iletim için kayıpsız ortamda EMD’nin davranışı aşağıda incelenmektedir.



Şekil 2.24. Paralel polarizasyon [17].

$$\vec{E}_i(x, z) = E_{i0}(a_x \cos \theta_i - a_z \sin \theta_i)e^{-j\beta_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (2.66)$$

$$\vec{E}_r(x, z) = E_{r0}(a_x \cos \theta_r + a_z \sin \theta_r)e^{-j\beta_1(x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.67)$$

$$\vec{E}_t(x, z) = E_{t0}(a_x \cos \theta_t - a_z \sin \theta_t)e^{-j\beta_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.68)$$

Paralel polarizasyon için gelen, yansıyan ve iletilen elektrik alan bileşenlerinin denklemleri (Denklem 2.66, 2.67 ve 2.68)'deki gibidir.

$$\vec{H}_i(x, z) = a_y \frac{E_{i0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (2.69)$$

$$\vec{H}_r(x, z) = -a_y \frac{E_{r0}}{\eta_1} e^{-j\beta_1(x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.70)$$

$$\vec{H}_t(x, z) = a_y \frac{E_{t0}}{\eta_2} e^{-j\beta_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.71)$$

Gelen, yansıyan ve iletilen manyetik alan bileşenlerinin denklemleri ise (Denklem 2.69, 2.70 ve 2.71)'deki gibidir.

$$(E_{i0} + E_{r0}) \cos \theta_i = E_{t0} \cos \theta_t \rightarrow \frac{1}{\eta_1}(E_{i0} - E_{r0}) = \frac{1}{\eta_2} E_{t0} \quad (2.72)$$

Elektrik ve manyetik alanın teğet bileşenleri $z=0$ 'da süreklilik koşulları ve Snell Yasaları (Denklem 2.72)'yi verir.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}, \quad \tau_{\parallel} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (2.73)$$

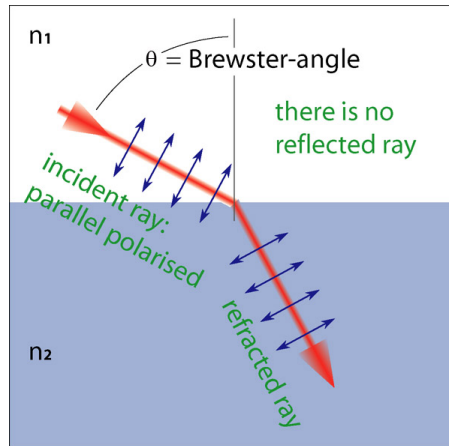
Bu denklemlerde birbiri cinsinden çözülrse yansıma ve iletim (Denklem 2.73) katsayıları bulunur. Bu iki katsayı birlikte çözüldüğünde (Denklem 2.74) çıkarılır.

$$1 + \Gamma_{\parallel} = \tau_{\parallel} \left(\frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \right) \quad (2.74)$$

Eğer yansıma olmaması istenirse yansıma katsayısını sıfır yapacak (Denklem 2.75) geliş açısı belirlenerek Brewster açısı $\theta_{B\parallel}$ (Denklem 2.76) bulunabilir (Şekil 2.25.).

$$\Gamma_{\parallel} = 0 \text{ ve } \theta_i = \theta_{B\parallel} \text{ ise } \eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i = 0 \rightarrow \frac{\eta_2}{\eta_1} \cos \theta_t = \cos \theta_{B\parallel} \quad (2.75)$$

$$\sin^2 \theta_{B\parallel} = \frac{1 - (\eta_2/\eta_1)^2}{1 - (\eta_2\beta_1/\eta_1\beta_2)^2} = \frac{1 - \mu_2\epsilon_1/\mu_1\epsilon_2}{1 - (\epsilon_1/\epsilon_2)^2} \quad (2.76)$$

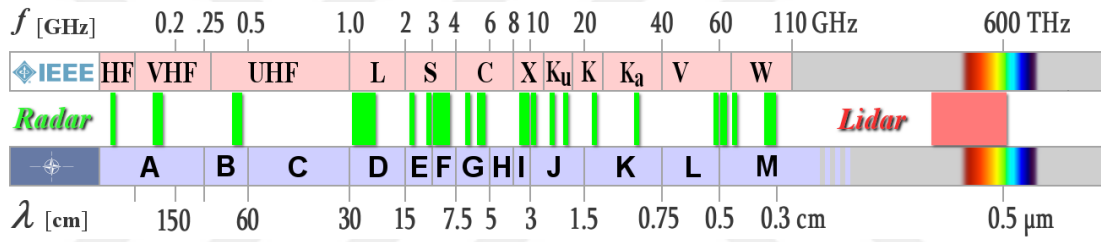


Şekil 2.25. Brewster açısı [17].

BÖLÜM 3. RADARLAR VE RADOM YAPILARI

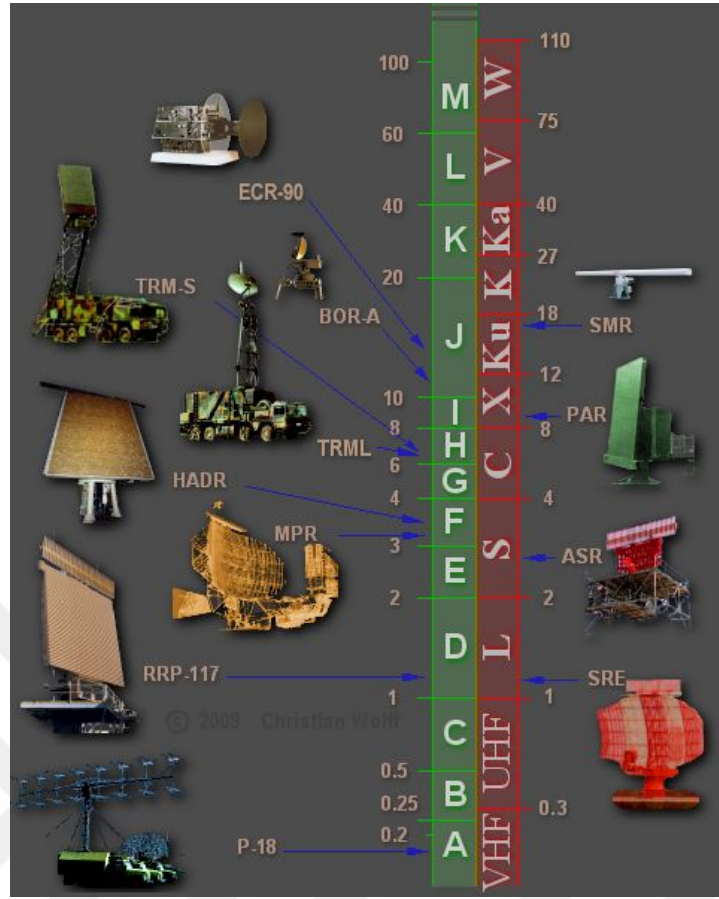
3.1. Radarların Özellikleri ve Çalışma Frekansları

Frekans bantlarını tanımlamakta bugün 2 geçerli sistem vardır (Şekil 3.1.). IEEE tarihsel kökeni olan ve II. Dünya Savaşından gelen seçimi benimsenişlerdir [17]. NATO'da bant sınırları için kendi teknoloji ve imkânlarıyla uyumlu frekans çizelgesini hazırlamıştır. Bant sınırlarını logaritmik olarak belirlemiştir.



Radarların frekans bandı 30 MHz'ten başlayıp yaklaşık 130 GHz'e kadar girmektedir. Belirli radar uygulamalarında bazı bantlar tercih edilir. Radar tesislerinin büyük bölümünde D – Bant dahil olmak üzere altındaki frekanslarda çalışmaktadır. Uçuş güvenlik radarları 3 GHz'in altında ve hassas yaklaşım radarları ise 10 GHz'in altında çalışabilirler.

A - ve B – Bandı (HF ve UHF): 300 MHz'in altındaki radar bantlarının, ilk radarların ortaya çıkmasıyla kullanılmaya başlandığından dolayı geçmişi uzundur. Bu radarlar o zamanın yüksek frekans tekniğinde kullanılmıştır. Şimdi ise çok uzun menziller için Ufuk Ötesi Radarlarda (Over the Horizon) kullanılmaktadır. Hesaplamanın duyarlılığı dalga boyunun antenin büyüklüğüne oranına bağlı olduğundan yüksek hassaslık gereksinimini karşılamazlar. Bu yüzden antenleri de çok büyüktür (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Bazı Radar türlerinin çalışma frekansları [18].

C – Band (UHF): 300 MHz – 1 GHz bandında Orta Menzilli Hava Savunma Sisteminin erken uyarı radarı ve meteorolojide rüzgâr profilersi gibi özel radarları vardır. Bu frekans bandı meteorolojik olaylardan çok az etkilendikleri için uzun menzillere ulaşmak mümkündür.

D – Band (L – Bandı): Bu frekans aralığı 400 km'ye ulaşan uzun menzilli radarlar için uygundur. Bu bantta sivil iletişim sistemlerinden kaynaklı gürültünün az olmasından dolayı radarın yüksek güçle geniş bantlı sinyallerin algılanmasını sağlar. Fakat yer yüzeyinin kıvrımına bağlı olarak hedeflerin radar ufku tarafından örtülmesinden dolayı düşük uçuş yüksekliklerinde menzili kısalmaktadır.

E/F – Bandı (S – Bandı): 2 – 4 GHz arasında atmosferik zayıflama etkisi D – Bandında olduğundan biraz daha fazlalık göstererek atmosferik olayların olumsuz etkilerinin etkisini kendisini hissettirmeye başlar. Radarlar büyük menzillere ulaşmak

isterlerse yüksek gönderim gücüne sahip olmalıdır. Örnek olarak askeri MPR (Orta Güç Radarı) için 20 MW'lık bir güç lazımdır. Tropik ve tropikal altı bölgelerde 100 km menzilli havaalanı gözetim radarı (ASR) olarak da kullanılır.

G – Bandı (C – Bandı): Kısa ve orta menzilli taşınabilir askeri amaçlı savaş alanı radarlarında kullanılır. Füze güdüm kontrolünde hızlı konumlama sağlayabilmesi için anteni küçük olmalıdır.

I/J – Bandı (X – den Ku – bandına kadar): Sivil ve askeri denizcilikte yaygın olarak kullanılır. Küçük, ucuz ve hızlı dönen antenleriyle iyi duyarlılıkla uzun menzillere ulaşabilir. Genellikle radom muhafazalıdır.

K – Bandı (K – ve Ka – bandı): Bu bantta atmosferik zayıflatma daha fazladır. Fakat olası hassasiyet ve menzil çözünürlüğü iyidir. Çok büyük menziller hedeflenemez. Havaalanı yer kontrol radarları buna örnektir.

L/M Bandı (V – ve W – Bandı): Atmosferde suyun nem etkisi gibi moleküler saçılmaların başlaması ve frekans arttıkça aratarak devam etmesi nedeniyle EMD aşırı derecede zayıflar. Menzil 10 metrenin bile altına düşer. Bu bant aralığı genellikle hassas ölçüm yapan fren ve kaza önleme sensörü gibi uygulamalarda kullanılır.

3.2. Radom Yapıları

Günlük hayatta Radom diye telaffuz ettiğimiz bu terim, Türkçesi “Radar Kubbesi” demek olan “Radar – Dome” (Şekil 3.3.) ekipmanının kısaltılarak söylenmesinden ibarettir. Radom yapılar genellikle anten sistemlerinin insan veya meteorolojik olaylardan kaynaklı yıpranmalarının önüne geçerek sisteminin ömrünü uzatmaktadır. Fakat burada önemli olan sadece ömrü uzatmak değil aynı zamanda yapının istenen çalışma frekansını sağlayarak yansıma, soğurma ve iletim gibi özellikleri de göstermesidir. İşte burada FSY'ler devreye giriyor. FSY'nin istenen kullanışa sahip, dayanıklı ve ekonomik malzemelerden üretilmesi ise aranan önemli niteliklerdendir.

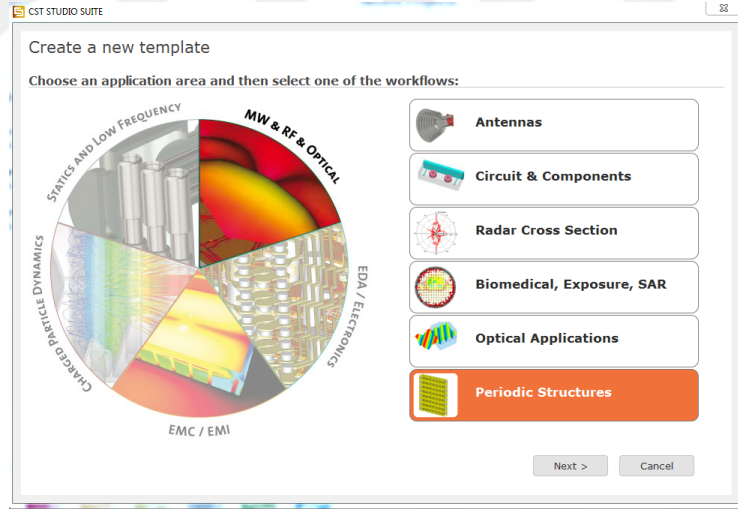


Şekil 3.3. Örnek bir Radom

Bugün artık Radom yapılar uzay ve havacılık sanayinin vazgeçilmezi olmuştur. Özellikle yüksek maliyetli olan uyduların atmosferin dışına çıkmasıyla güneşin çeşitli dalga boylarında yayılan yüksek ısı ve ışık içeren EMD'lara karşı korunma sağlaması da devletleri büyük masraflardan kurtarmaktadır.

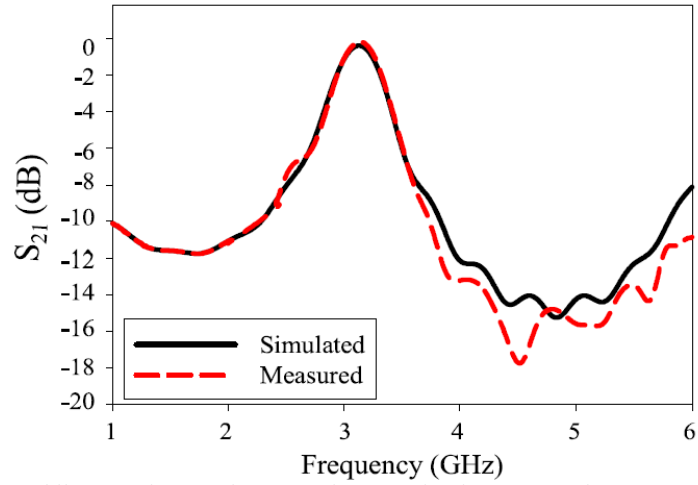
BÖLÜM 4. X-BANDI İÇİN 3D FSY TASARIMI

Frekans seçici yüzeylerin tasarımı, modellerinin oluşturulması ve analizleri için elektromanyetik simülasyon programı Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite kullanılmıştır [20]. CST programında FSY analizi için proje dosyası oluşturulurken izlenen yol şu şekildedir. Tasarımların yapılacağı frekans bandı gözönünde bulundurularak CST programı arayüzünde MW&RF&OPTICAL sekmesi (Şekil 4.1.) açılarak Periodic Structures seçilir. Bundan sonra sırasıyla gelecek sekmelerden nasıl bir yapının analizinin yapılacağı, hangi domenin ve ölçüm birimlerinin kullanılacağı ve hangi ölçüm değerlerinin elde edilmek istendiği gibi parametreler belirlenip malzeme seçimi yapılarak geometrik tasarıma başlanır.



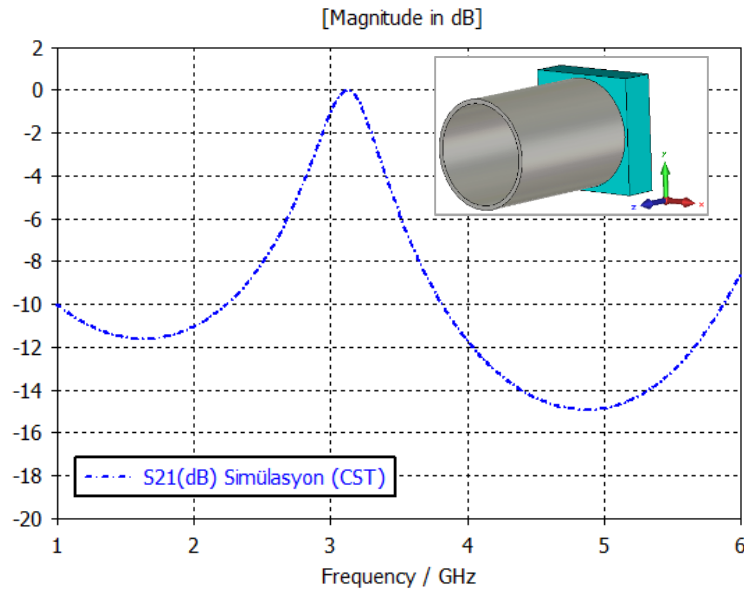
Şekil 4.1. Program arayüzü

FSY tasarımlarının modellenmesi ve analizinde CST programında izlenen yolun ve analiz sonuçlarının doğruluğundan emin olunabilmesi için çalışmamızın başında referans olarak seçilen ölçüm verisi de bulunan güvenilir bir çalışma [21] tekrarlanarak elde ettiğimiz sonuçların doğruluğu test edilmiştir. Referans alınan çalışmanın [21] ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 4.2.'de aynı yapı için çalışmamızda elde edilen simülasyon sonuçları ise Şekil 4.3.'de görülmektedir.



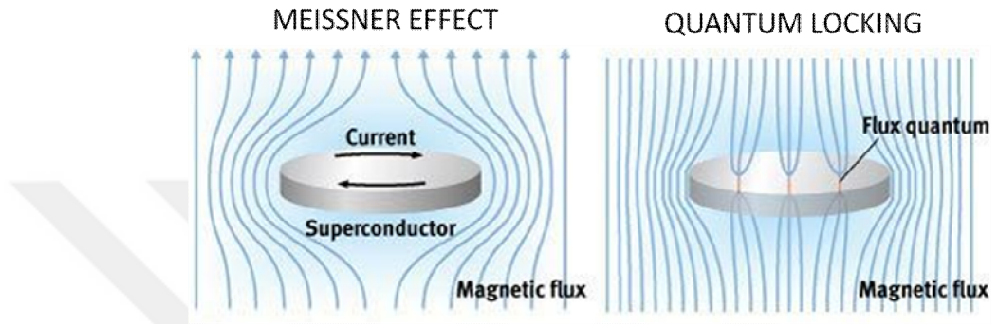
Şekil 4.2. Referans çalışmanın ölçüm ve simülasyon sonuçları [21].

S-Bandı için bir çözüm sunan referans çalışma ile aynı sonuçlar elde edilerek doğrulama yapıldıktan sonra çalışmamızın içeriğini oluşturan ve X-bandı için tasarlanan yeni silindirik, sekizgen ve kare modeller oluşturularak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 8 – 12 GHz arasında yani dalga boyu 25 mm ile 37,5 mm arasında değişen X-Bandında bant geçiren filtre özelliği gösteren yeni yapıların geliştirilmesi amaçlanmıştır ve analizler 2 – 18 GHz arasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Referans çalışmadaki FSY yapısı için CST ortamında elde edilen simülasyon sonuçları

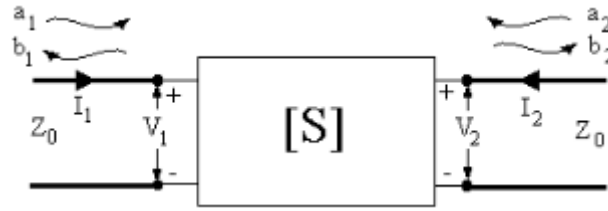
Kullanacağımız iletken malzeme mükemmel elektrik iletkenidir (Perfect electric conductor). Bu malzeme sınırsız ve kayıpsız elektrik geçirgenliğine sahip doğada bulunmayan fakat bu özellikleri sayesinde simülasyon ortamlarında sıkça kullanılan idealize edilmiş bir materyaldir. Süperiletkenlerden farklıdır. Süperiletkenlerde görülen Meissner etkisi (Akı dışarlama) ve kuantum temelli olaylar (Şekil 4.4.) vs. mükemmel elektrik iletkenlerde görülmemektedir.



Şekil 4.4. Süperiletkende Meissner ve kuantum etkisi [19].

İletkenin yerleştirildiği dielektrik tabaka vacuum olarak seçilmiştir. Periyodik yüzeyin analizi birim hücre (Unit cell) standart alınmıştır. Geometrik ölçüleri belirlememizde Bir takım kıstaslar vardır. Çalışılan frekans bandı veya dalgaboyu ile üretilebilirlik bunların en başta gelenlerindedir. Yapıların boyutları X-bandındaki dalgaboyuna da bağlı olarak milimetre mertebelerinde tasarlanmıştır. Aynı zamanda modeli belirli bir bant aralığı için önerdiğimizden en küçük geometrik bir değişimin çalışma frekansını tamamen etkileyeceği de bir gerçektir.

Analiz sonucu olarak takip edeceğimiz parametre S (Scattering) parametresidir (Şekil 4.5.). Bu parametre bize gelen EMD'nın frekansına göre yansıma ve iletim durumu hakkında bilgi veren dB cinsinden bir değerdir. S parametreleri bütün frekanslarda geçerli olsa da, daha çok bir sinyalin güç ve enerjisinin, akım ve gerilimlerden daha kolay hesaplandığı, RF ve mikrodalga frekanslarında kullanılır.



Şekil 4.5. İki kapılı devrede S parametresi

$$V_1 = V_1^+ + V_1^-, \quad I_1 = \frac{1}{Z_0}(V_1^+ - V_1^-), \quad V_2 = V_2^+ + V_2^-, \quad I_2 = \frac{1}{Z_0}(V_2^+ - V_2^-)$$

Gerilim ve akım denklemlerini kullanarak a ve b değerleri bulunup buradan da S parametresi matris olarak elde edilebilir.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1^-}{V_1^+}, \quad S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{V_2^-}{V_1^+}, \quad S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{V_2^-}{V_2^+}, \quad S_{12} = \frac{b_1}{a_2} = \frac{V_1^-}{V_2^+}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad a_{1,2} = \frac{V_{1,2}^+}{\sqrt{Z_0}}, \quad b_{1,2} = \frac{V_{1,2}^-}{\sqrt{Z_0}}$$

S parametresinin matematiksel olarak elde edilmesinde kullanılan eşitlikler yukarıda verilmiştir. S_{21} ve S_{12} iletim, S_{11} ve S_{22} ise yansımaya bağlı elektromanyetik saçılım parametreleridir. Yapıda aktif devre elemanları olmadığı için pasif ve simetrik olduğu için $S_{21} = S_{12}$ ve $S_{11} = S_{22}$ olur. $S_{11} = S_{22}$ değerinin minimum olduğu frekans değeri FSY'in rezonans frekansıdır. Yani iletimin gerçekleştiği frekanstır.

S_{11} : 1 portundan beslenip aynı porta yansıyan sinyalin saçılımı

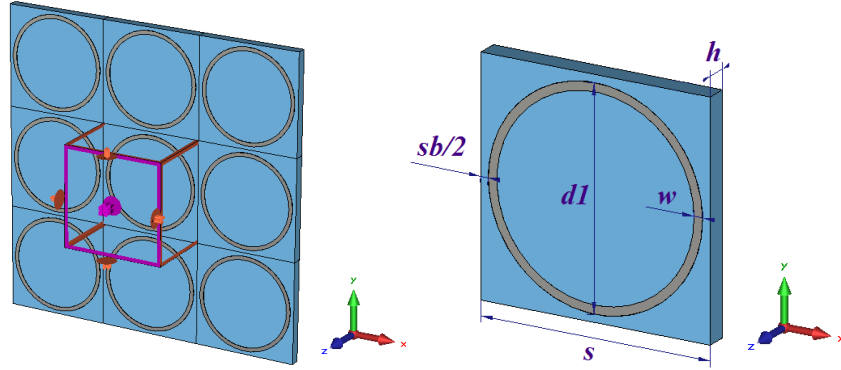
S_{22} : 2 portundan beslenip aynı porta yansıyan sinyalin saçılımı

S_{21} : 1 portundan beslenip 2. Porta iletilen sinyalin saçılımı

S_{12} : 2 portundan beslenip 1.Porta iletilen sinyalin saçılımı

Analizlerimizde silindir, sekizgen ve kare olmak üzere 3 farklı geometri kullanıldı. Bazen de elektrik geçirgenliğine ve epoxy takviye kullanılmasına bağlı olarak simülasyonları gerçekleştirildi. Tüm bunların yanında iletken yüksekliğinin bant geçirme ve bant durdurma etkisi de TE ve TM modları için test edildi.

4.1. Silindirik Model

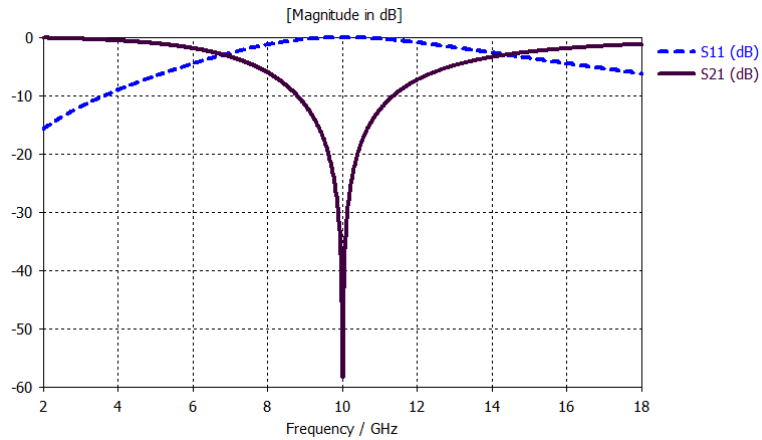


Şekil 4.6. 2D silindirik FSY ve birim ölçüleri

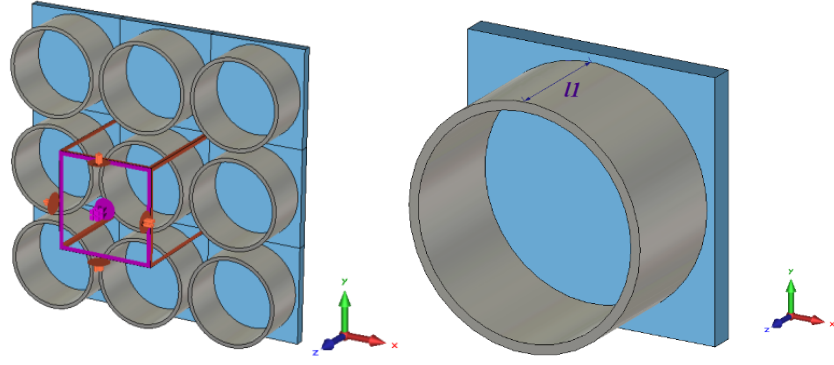
Tablo 4.1. Silindirik 2D model için parametre listesi

θ (Derece)	φ (Derece)	s (mm)	h (mm)	d1 (mm)	w (mm)	l1 (mm)	dort (d1-w) (mm)	sb (mm)
0	0	10,7	1	10	0,4	0,035	9,6	0,7

İlk olarak Şekil 4.6.'da görülen 2 boyutlu silindirik model Tablo 4.1.'deki ölçülerle tasarlanmıştır. Daha sonra bu 2D tasarım temel alınarak yüzey iletkeninin yükseklik değerinin 0,035 mm'den artırılmasıyla 3D tasarımlar elde edilmiştir. 2D tasarımın S parametresi Şekil 4.7.'deki gibi elde edildi. Model yaklaşık 10 GHz frekansında tam yansıma halindedir.



Şekil 4.7. Halka yüksekliği $l1=0.035$ mm için S parametresi

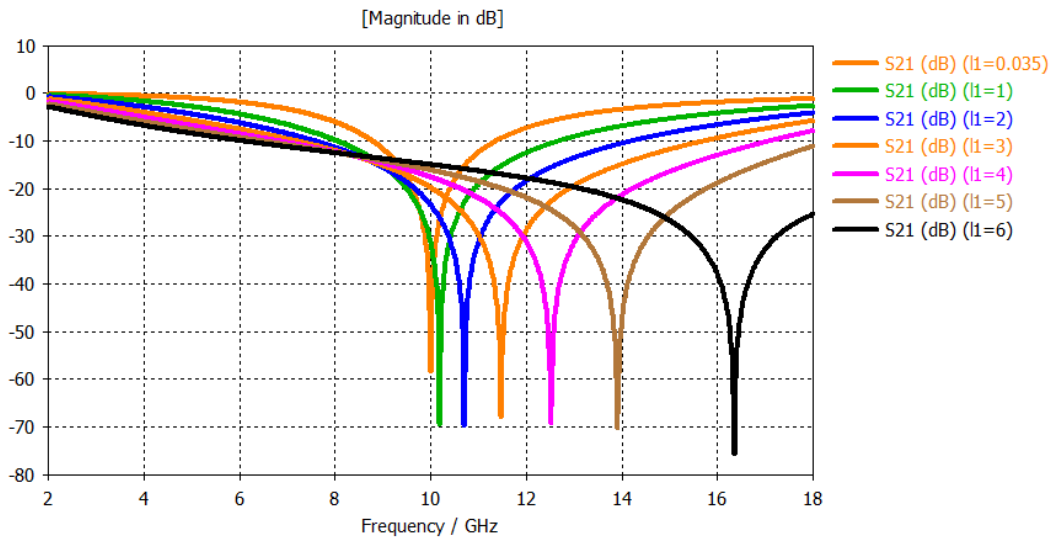


Şekil 4.8. 3D silindirik FSY

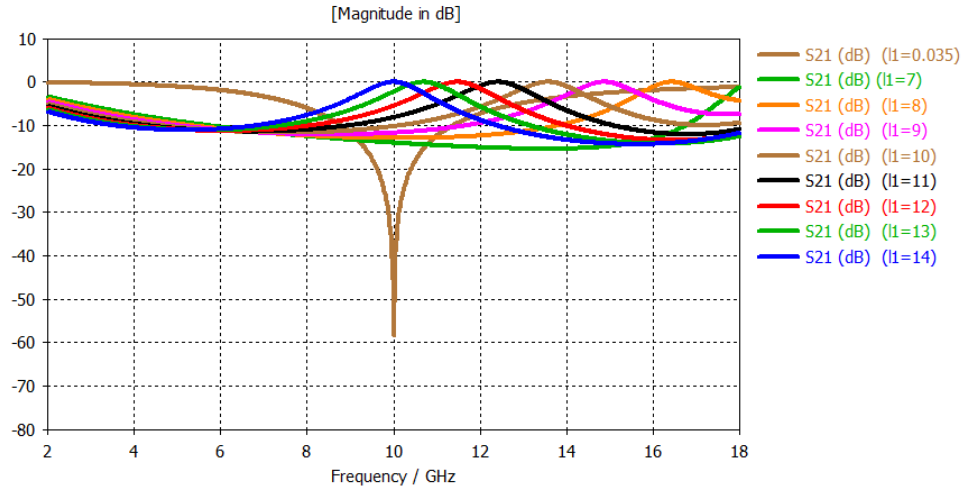
Tablo 4.2. Silindirik 3D model için parametre listesi

θ (Derece)	φ (Derece)	s (mm)	h (mm)	d1 (mm)	w (mm)	l1 (mm)	dort (d1-w) (mm)	sb (mm)
0	0	10,7	1	10	0,4	değişken	9,6	0,7

Tablo 4.2.'de verilen ölçülere sahip 3D silindirik modelin farklı iletken yükseklikleri (l1) için iletim durumunu veren S_{21} parametresi değişimleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da gösterilmiştir.

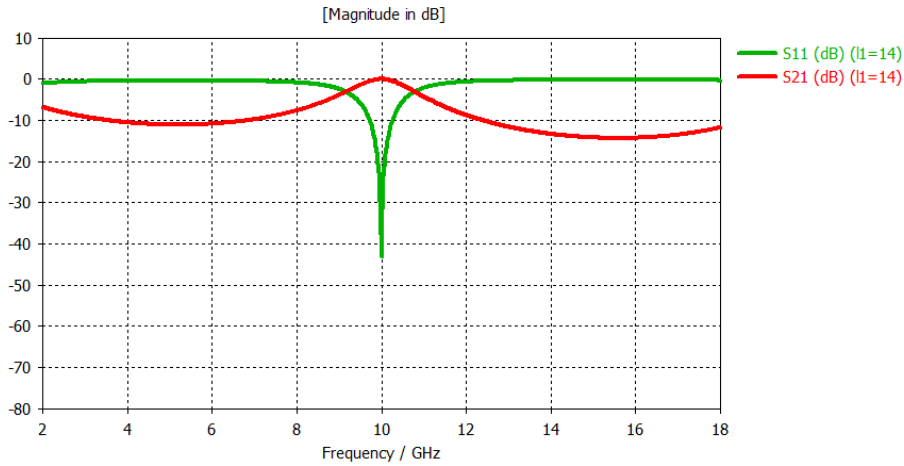


Şekil 4.9. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm - 6mm)



Şekil 4.10. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1=7mm - 14mm)

İletken yüksekliği 0,035 mm olarak alınan 2D FSY X - Bandında bant durdurma özelliği gösterirken yerini alan 3D FSY iletken yüksekliği arttıkça aynı bölgede bant geçiren hale gelmektedir. Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere iletken yüksekliği 14 mm olduğunda yapı, yaklaşık 10 GHz frekansında yansımaların olmadığı tam iletim halindedir. İletim ve yansımaya ilişkin S parametrelerinin birlikte gösterimi 14 mm iletken yüksekliği Şekil 4.11.'deki gibidir.

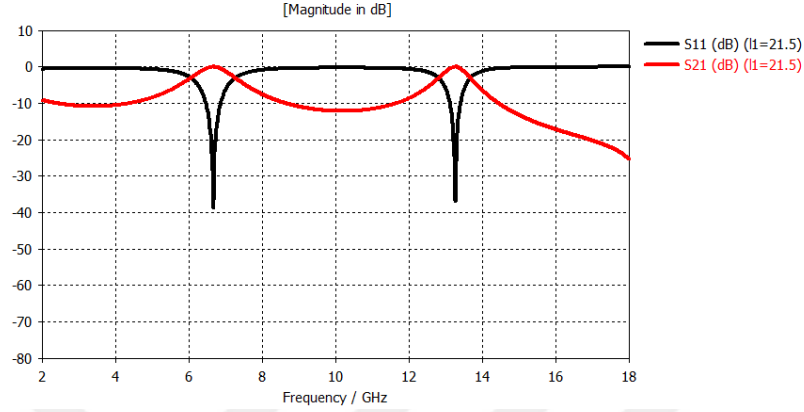


Şekil 4.11. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=14 mm)

Yapıların bant geçiren filtre özelliği göstermesi için yansımaya katsayısının değeri yaklaşık olarak $|S_{11}| = |S_{22}| < -10$ dB [21] olmalıdır. 3D FSY'nin bant geçiren özellik gösterdiği iletken yüksekliği olan 14 mm değeri yaklaşık olarak $\lambda_r/2$ 'dir.

$$\lambda_r f = c \text{ ve } \left(\frac{\lambda_r}{2}\right) \cong 14 \text{ mm} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda_r} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{28 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 10,71 \text{ GHz}$$

olduğu açıkça görülmektedir.

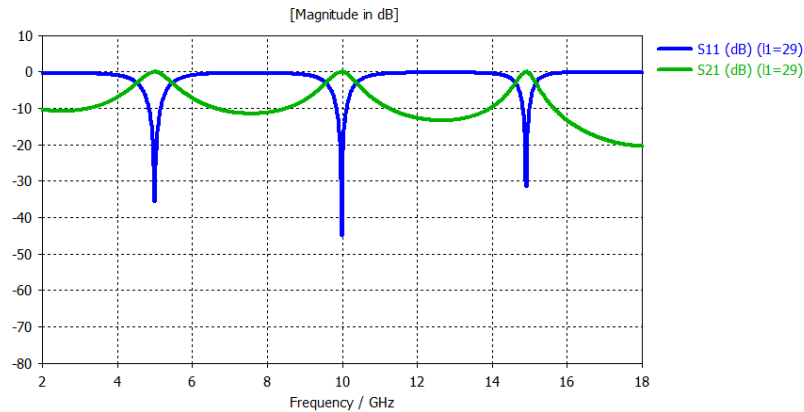


Şekil 4.12. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=21.5 mm)

İletken yükseklikleri

$$l1 = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda_r}{2}\right) \cong \frac{3}{2} (14 \text{ mm}) \cong 21,5 \text{ mm} \text{ ve } l1 = \lambda_r \cong 29 \text{ mm}$$

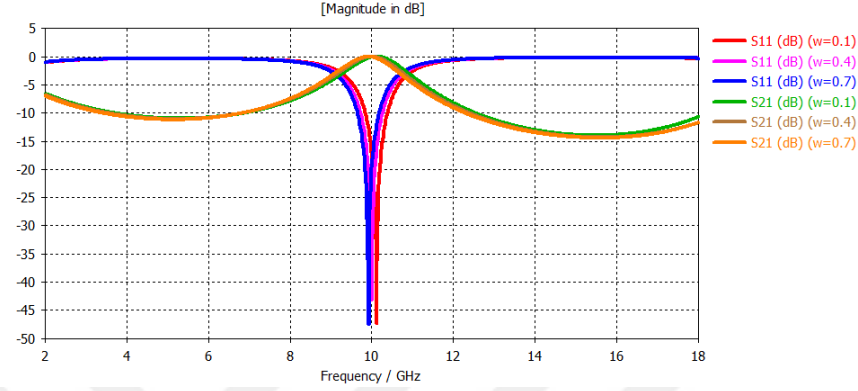
olarak alınırsa FSY'nin sırasıyla 21,5 mm için bant durduran, 29 mm için ise bant geçiren özellik gösterdiği Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'den görülebilir.



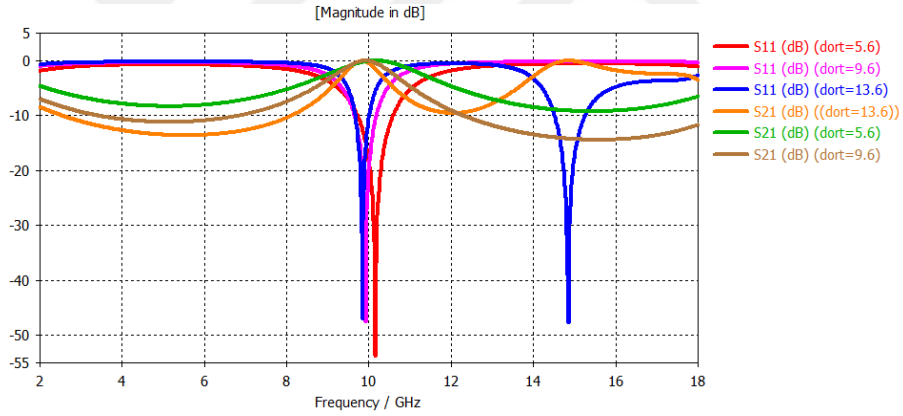
Şekil 4.13. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=29 mm)

Analizlerde elde edilen sonuçlarda bant geçiren özellik gösterilen en uygun iletken yüksekliğinin 14 mm olduğu görülmüştür. İletken yüksekliği 14 mm değerinde sabit tutularak iletken kalınlığının (w) (Şekil 4.14.), ortalama iletken halka çapının (dort)

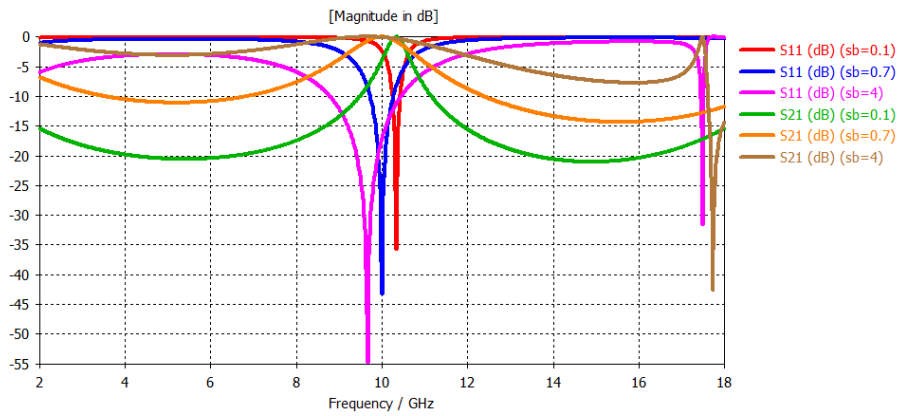
(Şekil 4.15.) ve iletken halkalar arası uzaklığın (sb) (Şekil 4.16.) S parametrelerini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Dielektrik tabakanın veya alttaşın dielektrik sabitine (ϵ_r) bağlı değişim ise Şekil 4.17.'de gösterilmiştir. Dielektrik tabaka malzemesi vacuum seçildiğinde elektrik geçirgenliği 1'e eşittir.



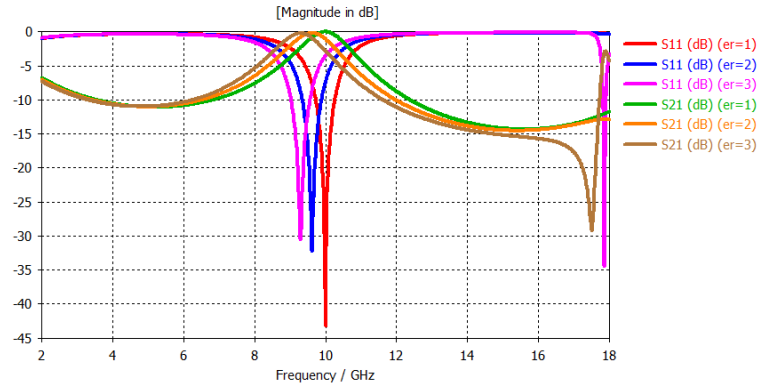
Şekil 4.14. İletken kalınlığı ile değişim (l1=14 mm)



Şekil 4.15. Ortalama iletken halka çapı ile değişim (l1=14 mm)

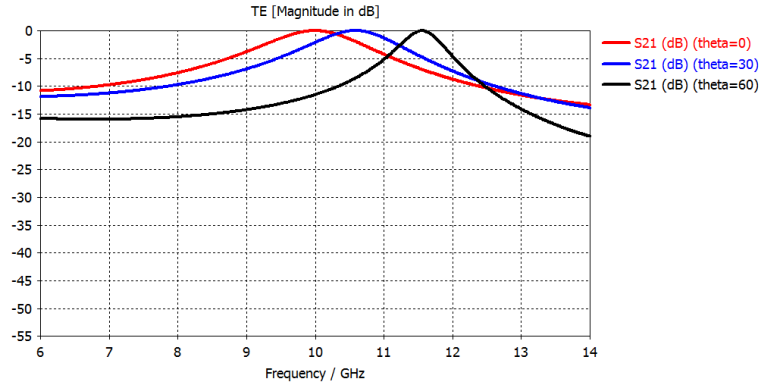


Şekil 4.16. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim (l1=14 mm)

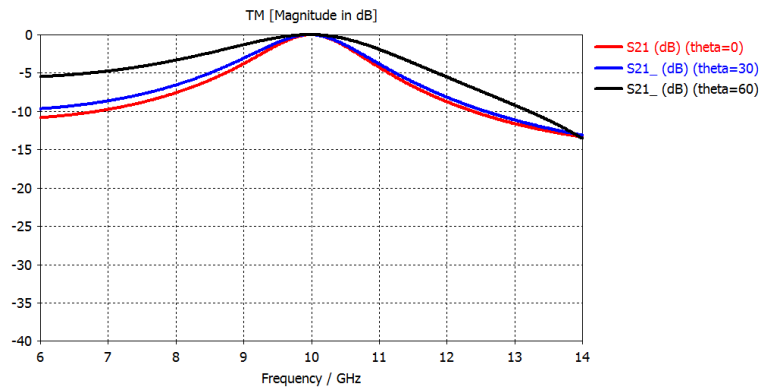


Şekil 4.17. Altaşın dielektrik sabiti ile değişim (l1=14 mm)

İletken yüksekliği haricindeki parametrelerin artırılmasıyla rezonans frekansının düştüğü görülmektedir. EMD'nın geliş açısına (θ , ϕ) göre modelin TE ve TM modları için iletim ve yansımaya parametrelerinin değişimi ise l1=14 mm için Şekil 4.18., Şekil 4.19., Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de gösterilmiştir.

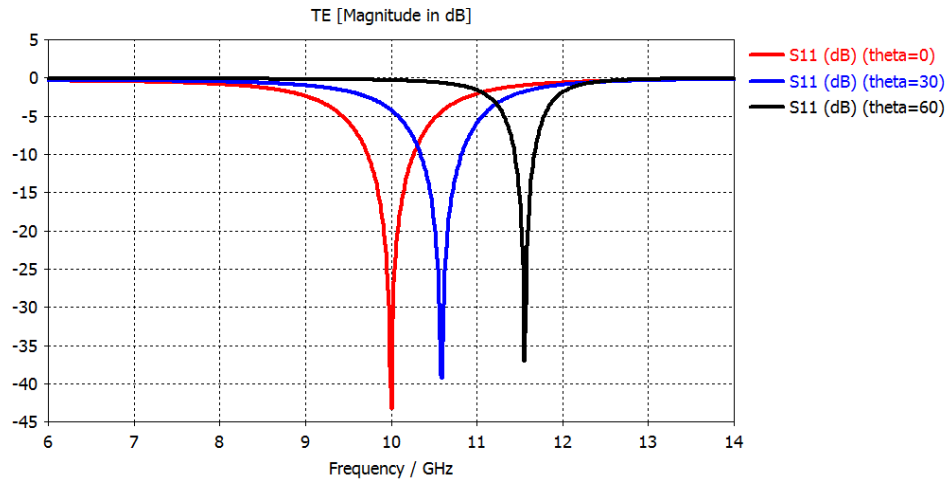


Şekil 4.18. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TE modu)

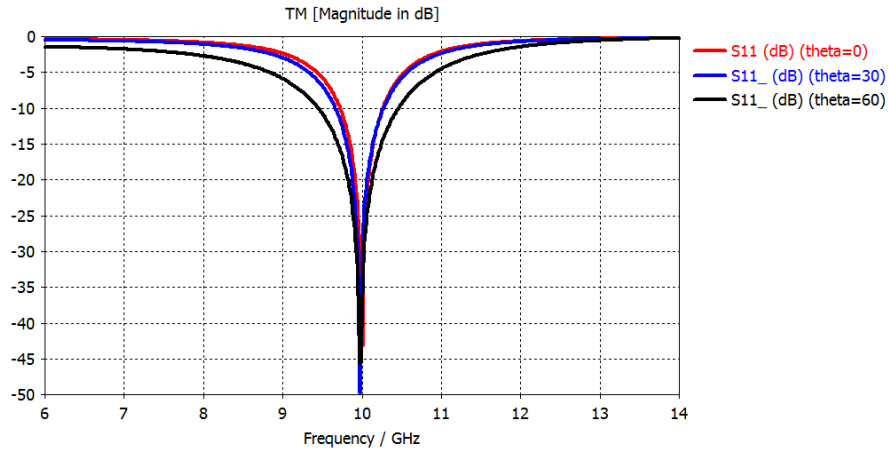


Şekil 4.19. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TM modu)

TM modunda yapının TE moduna göre daha kararlı davrandığı görülmektedir. TE modunda geliş açısının artmasıyla bant genişliği azalırken, TM modunda ise artmaktadır. Ayrıca geliş açısının artması TE modu için rezonans frekansının artmasına da neden olmaktadır.



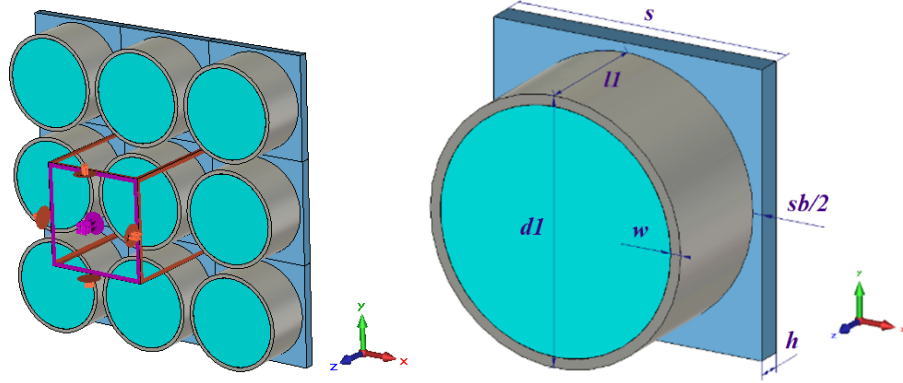
Şekil 4.20. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu)



Şekil 4.21. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu)

4.1.1. Dielektrik dolgulu silindirik model

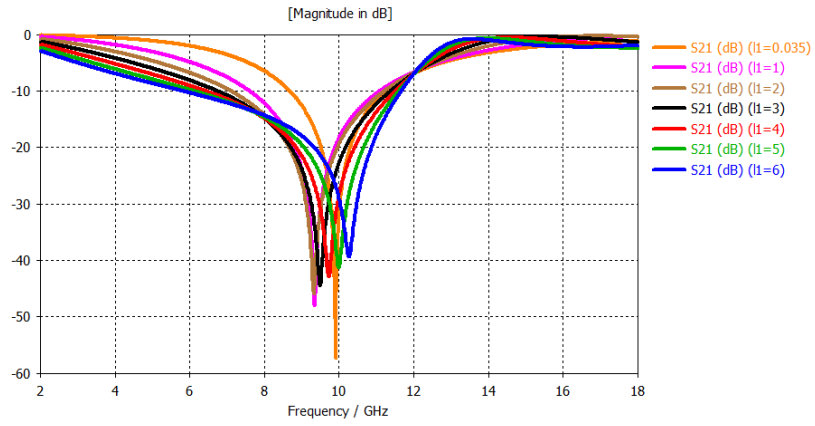
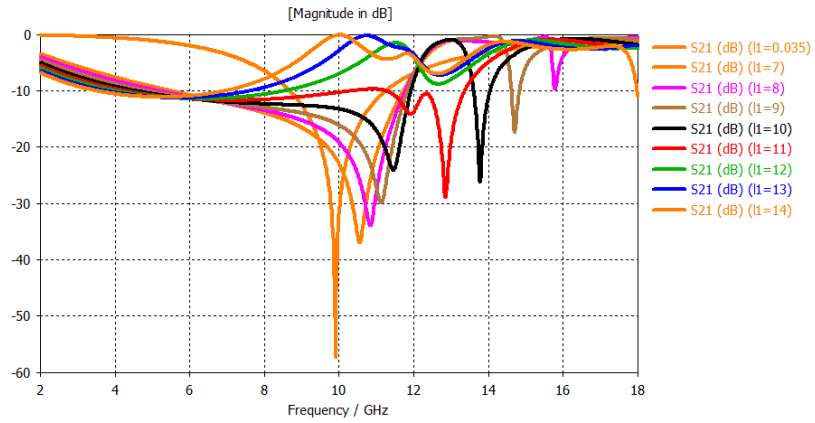
İlk model ile aynı olan Tablo 4.3.'teki ölçülere sahip 3D silindirik FSY modelde iletken halkanın içi epoxy malzeme ile doldurulduğunda (Şekil 4.22.) iletken yüksekliğinin etkisi araştırılarak sonuçlar Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.'de gösterilmiştir.



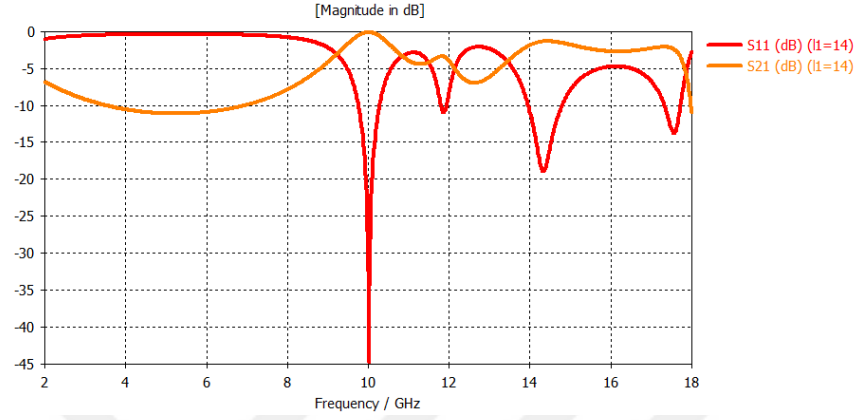
Şekil 4.22. Dielektrik dolgulu 3D silindirik FSY

Tablo 4.3. Dielektrik dolgulu silindirik 3D model için parametre listesi

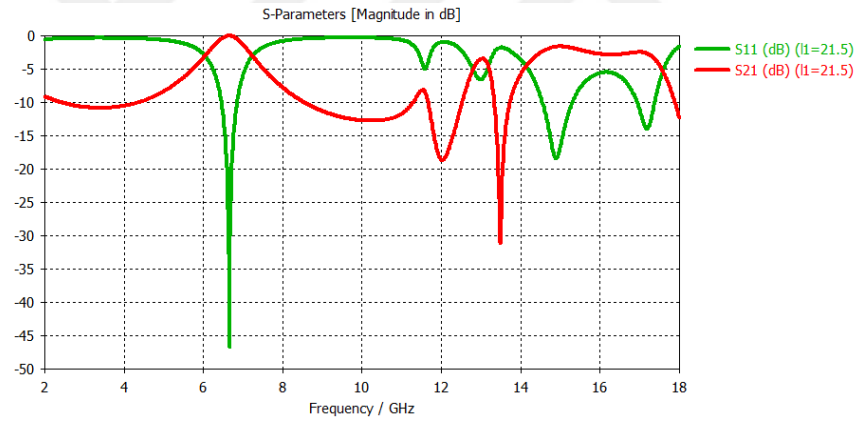
θ (Derece)	ϕ (Derece)	s (mm)	h (mm)	d1 (mm)	w (mm)	l1 (mm)	dort (d1-w) (mm)	sb (mm)
0	0	10,7	1	10	0,4	değişken	9,6	0,7

Şekil 4.23. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($l_1 = 1\text{mm} - 6\text{mm}$)Şekil 4.24. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($l_1=7\text{mm} - 14\text{mm}$)

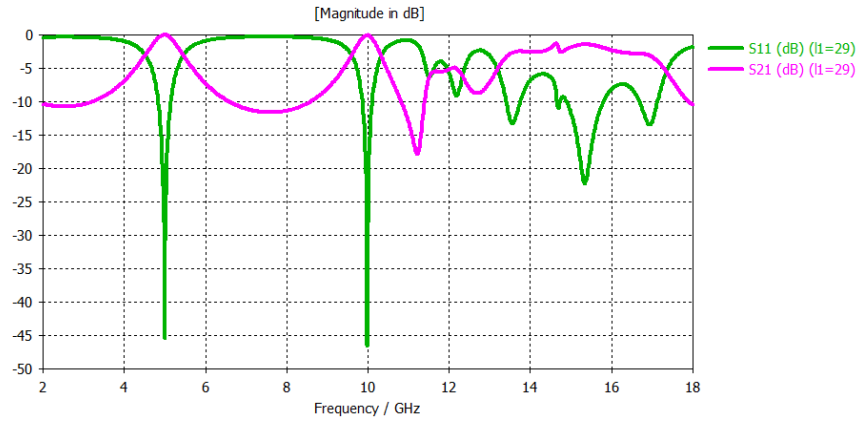
İletken yüksekliğinin $\lambda_r/2$, $3\lambda_r/4$ ve λ_r olduğu ya da 14 mm, 21,5 mm ve 29 mm değerlerini aldığı durumdaki iletim ve yansımaya parametreleri ise Şekil 4.25., Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.25. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=14 mm)



Şekil 4.26. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=21.5 mm)

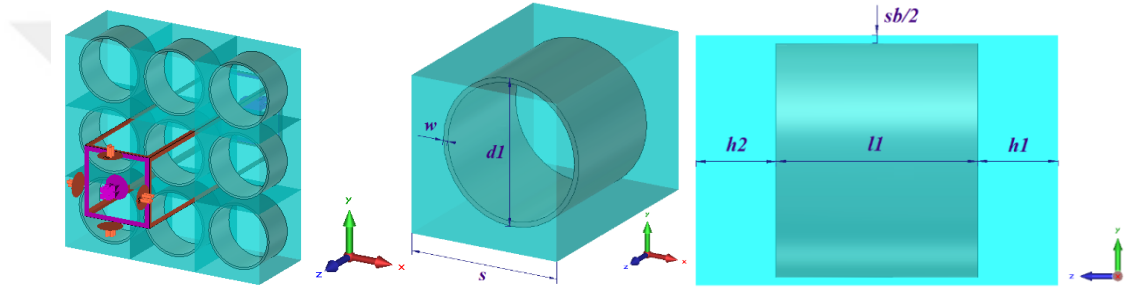


Şekil 4.27. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=29 mm)

Dielektrik dolgulu modelde de iletken yüksekliği $\lambda r/2$, $3\lambda r/4$ ve λr değerlerini aldığımda yapı periyodik olarak bant geçiren ve durduran özellik kazanmaktadır. Frekans bandının üst tarafında frekans tepkisi farklılaşmıştır.

4.1.2. Dielektriğe gömülü silindirik model

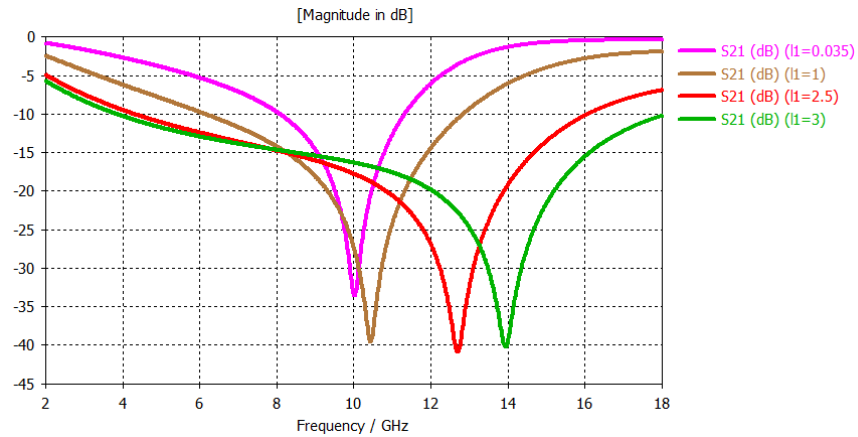
Sıradaki model Tablo 4.4.'de ölçüleri verilen silindirik iletkenin dielektrik sabiti $\epsilon_r=3$ olan epoxy içine tamamen gömülmesiyle elde edilen 3D modeldir (Şekil 4.28.). Burada vakum tabaka kaldırılmış ve karşılaştırma için yine 2D yapıya yer verilmiştir.



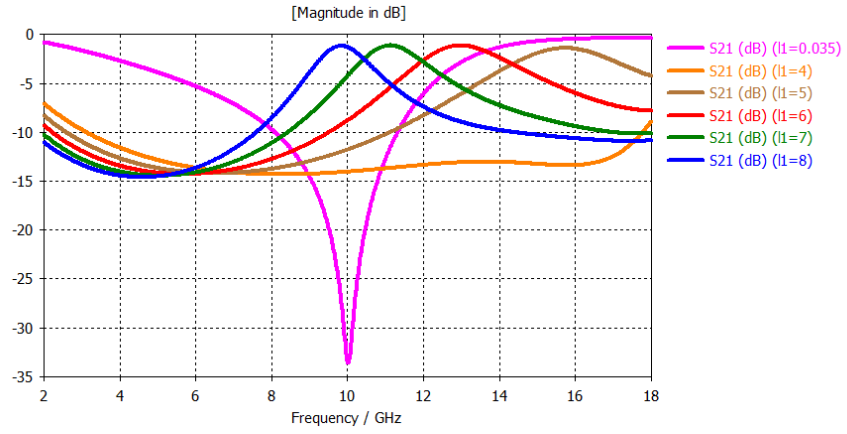
Şekil 4.28. Dielektriğe gömülü 3D silindirik FSY

Tablo 4.4. Dielektriğe gömülü silindirik 3D model için parametre listesi

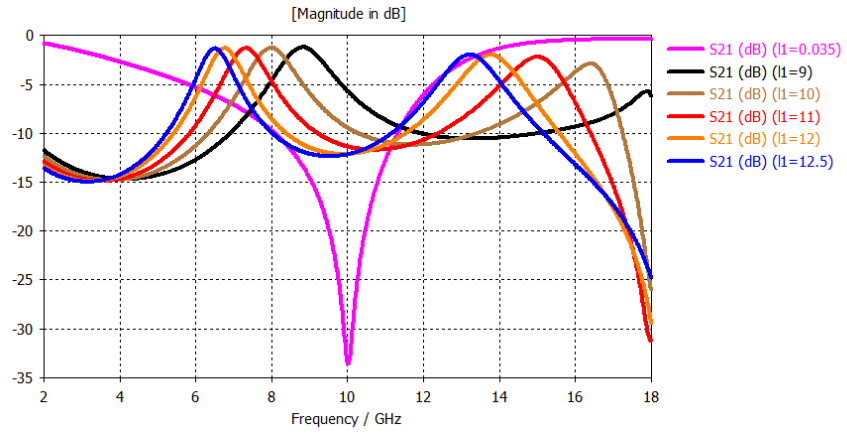
θ	φ	s	h1	h2	d1	w	l1	dort (d1-w)	sb
(Derece)	(Derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	6,2	2	2	5,8	0,2	değişken	5,6	0,4



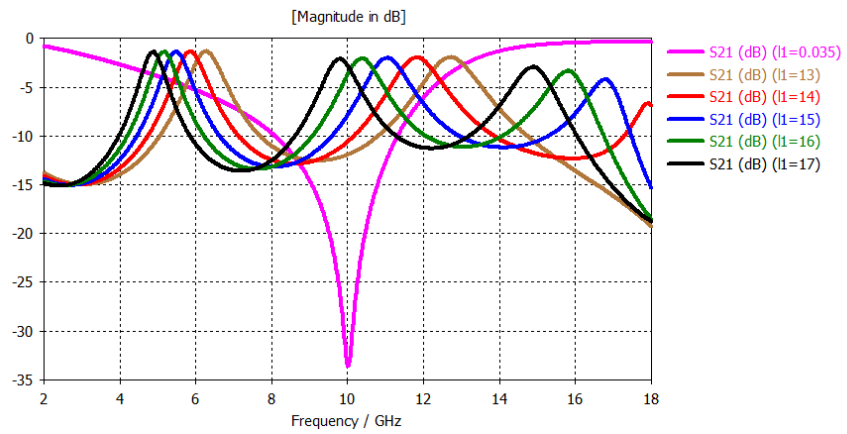
Şekil 4.29. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm - 3mm)



Şekil 4.30. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 4mm - 8mm)



Şekil 4.31. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 9mm – 12.5mm)

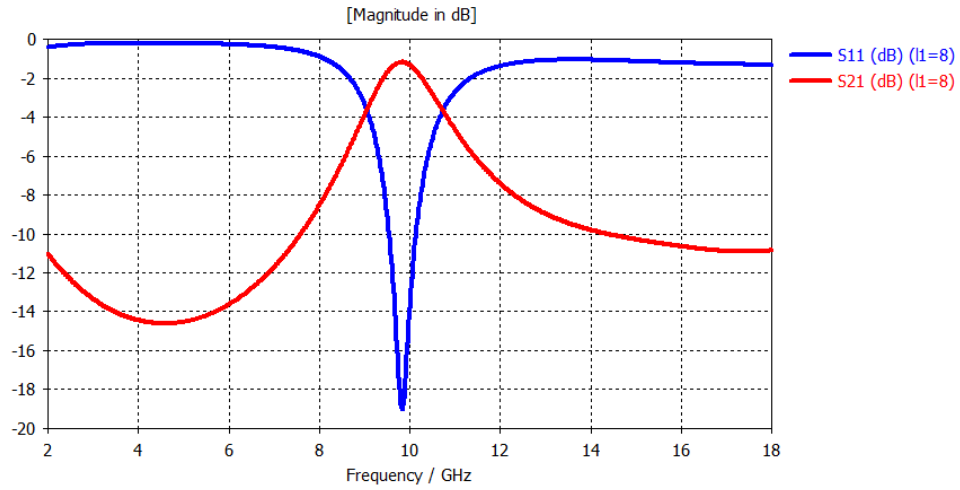


Şekil 4.32. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 13mm – 17mm)

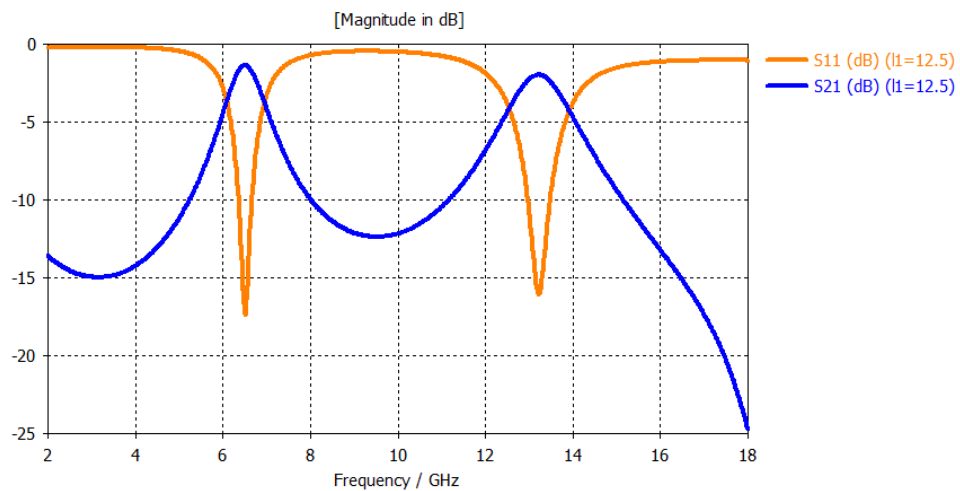
Yukarıda Şekil 4.29., Şekil 4.30., Şekil 4.31. ve Şekil 4.32.'de görüldüğü üzere dielektrik içine gömülü 3D yapının iletken yüksekliği arttıkça rezonans frekansı artmaktadır.

$$\frac{\lambda_r}{2} \cong 8 \text{ mm}, \frac{3\lambda_r}{4} \cong 12,5 \text{ mm ve } \lambda_r \cong 17 \text{ mm}$$

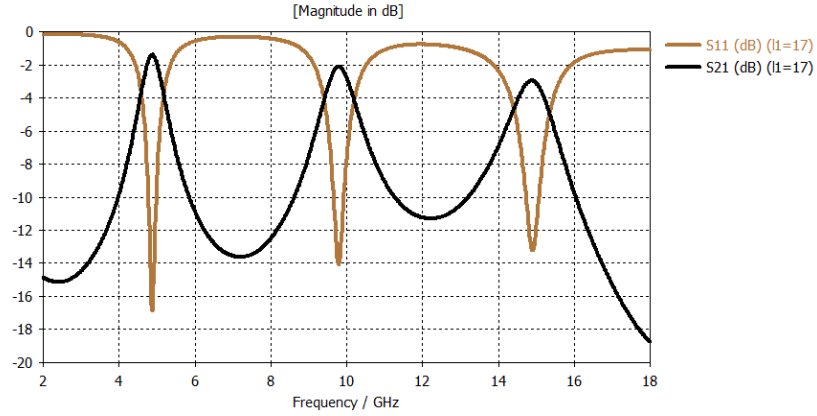
Dielektrik içine gömülü olan yapı için iletken yüksekliği 8 mm 12,5 mm ve 17 mm olduğunda iletim ve yansımaya parametrelerinin değişimleri sırasıyla Şekil 4.33., Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.'deki gibidir. Sonuçlar incelendiğinde FSY'nin sırasıyla bant geçiren, bant durduran ve tekrar bant geçiren duruma geldiği görülmektedir.



Şekil 4.33. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=8 mm)



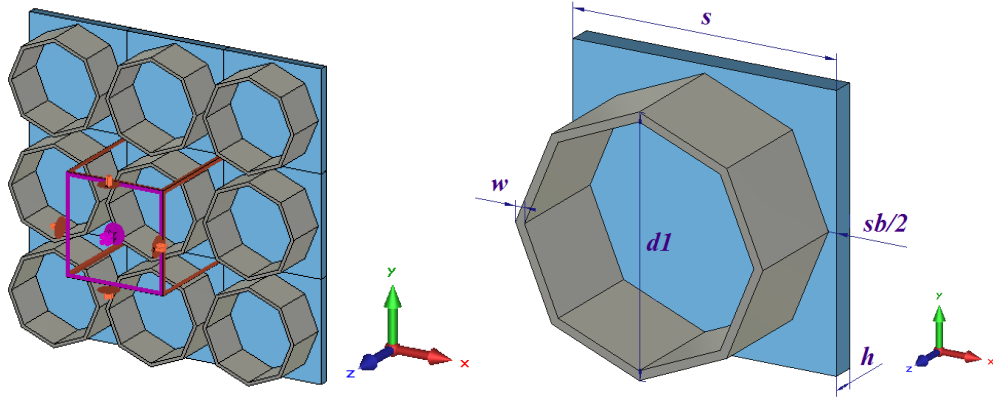
Şekil 4.34. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=12.5 mm)



Şekil 4.35. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=17 mm)

4.2. Sekizgen Model

X-Bandı için tasarlanan ikinci farklı model ise silindirik geometrinin ana hatlarına bağlı kalarak oluşturulan sekizgen biçimli 3D modeldir (Şekil 4.36.). Modelin ölçüleri Tablo 4.5.'de verilmiştir. Model vacuum ortamında Kabul edilerek analiz edilmiştir.

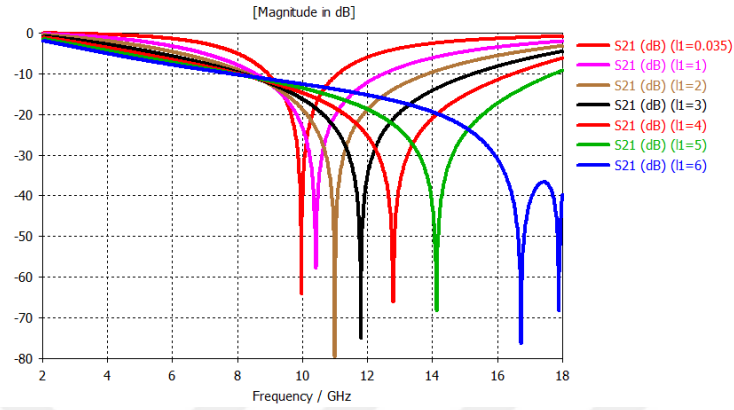


Şekil 4.36. 3D sekizgen FSY

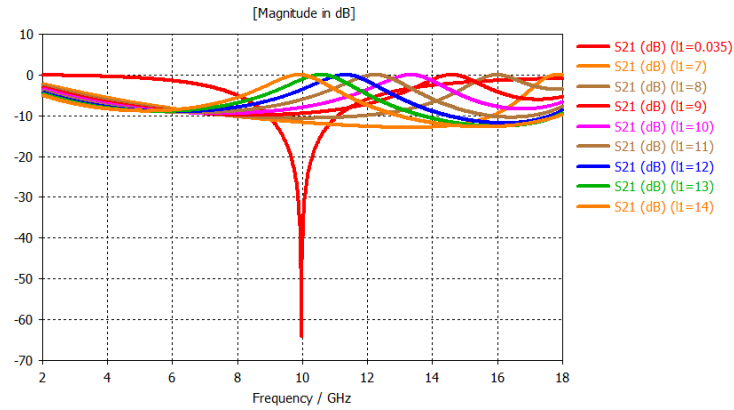
Tablo 4.5. Sekizgen 3D model için parametre listesi

θ (Derece)	φ (Derece)	s (mm)	h (mm)	d1 (mm)	w (mm)	l1 (mm)	dort (d1-w) (mm)	sb (mm)
0	0	11,6	1	10,9	0,4	değişken	10,5	0,7

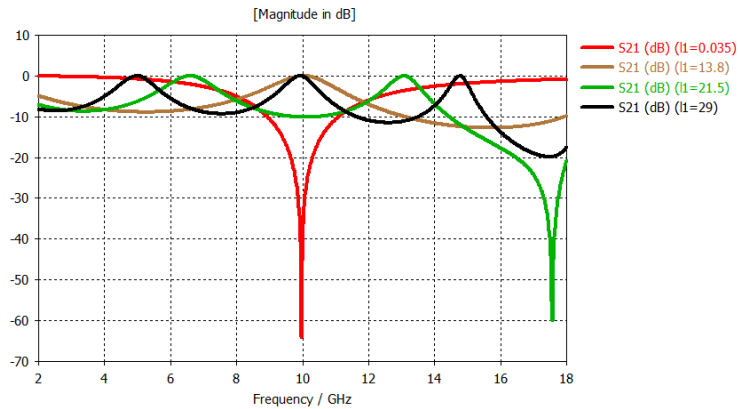
Şekil 4.37. ve 4.38.'de sekizgen iletkenin yüksekliğinin artmasıyla FSY'nin frekans cevabında ortaya çıkan değişim verilmektedir. Şekil 4.39.'da ise FSY'nin gösterdiği filtre özelliğinde değişimin gerçekleştiği noktalara ait sonuçlar sunulmaktadır.



Şekil 4.37. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($l_1 = 1\text{mm} - 6\text{mm}$)

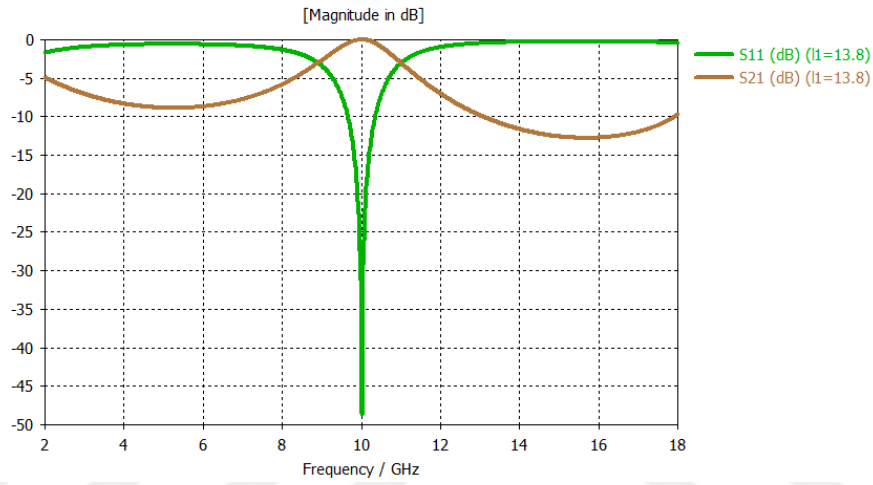


Şekil 4.38. İletken yüksekliğine bağlı değişim ($l_1 = 7\text{mm} - 14\text{mm}$)

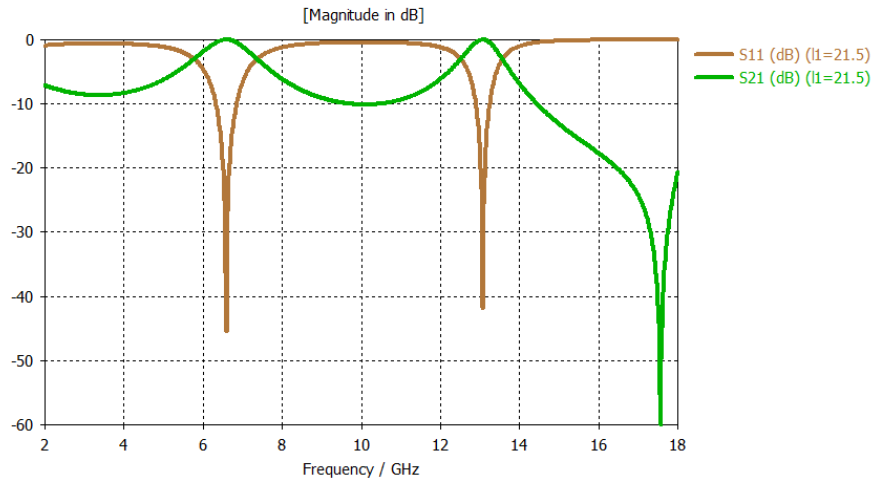


Şekil 4.39. Filtre karakteristiği değişimi

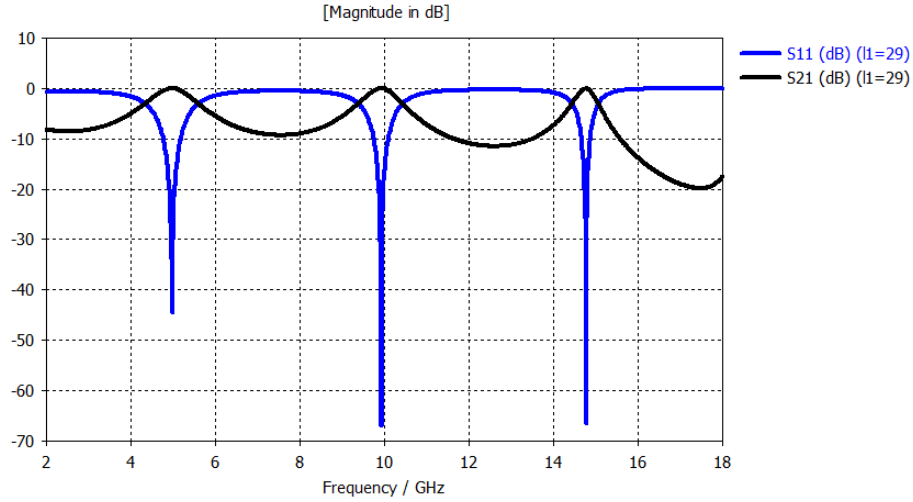
Silindirik yapıda olduğu gibi X-bandı merkez frekansı olan 10 GHz dikkate alınarak tasarlanan 3D sekizgen FSY'nin iletken uzunluğu $\lambda_r/2 \cong 13,8$ mm, $3\lambda_r/4 \cong 21,5$ mm, ve $\lambda_r \cong 29$ mm şeklinde seçildiğinde elde edilen iletim ve yansımaya parametreleri sırasıyla Şekil 4.40., Şekil 4.41. ve Şekil 4.42.'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde silindirik yapıya benzer şekilde 3D sekizgen FSY'nin iletken uzunluğu 13,8 mm iken bant geçiren, 21,5 mm iken bant durduran ve 29 mm iken bant geçiren özellikte olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=13.8 mm)

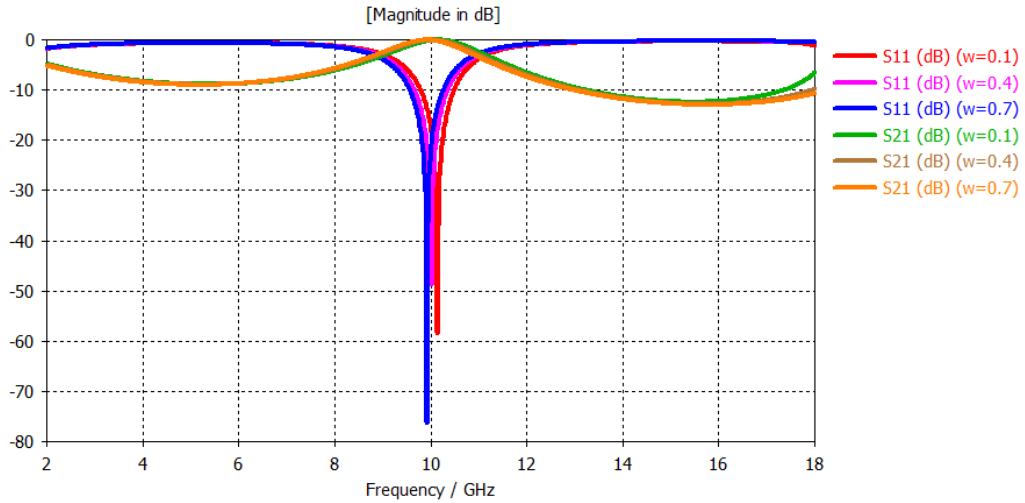


Şekil 4.41. İletim ve yansımaya parametreleri (l1=21.5 mm)

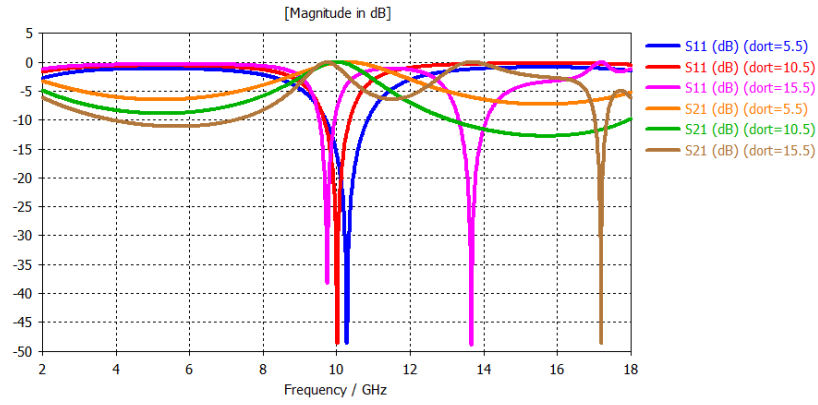


Şekil 4.42. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=29$ mm)

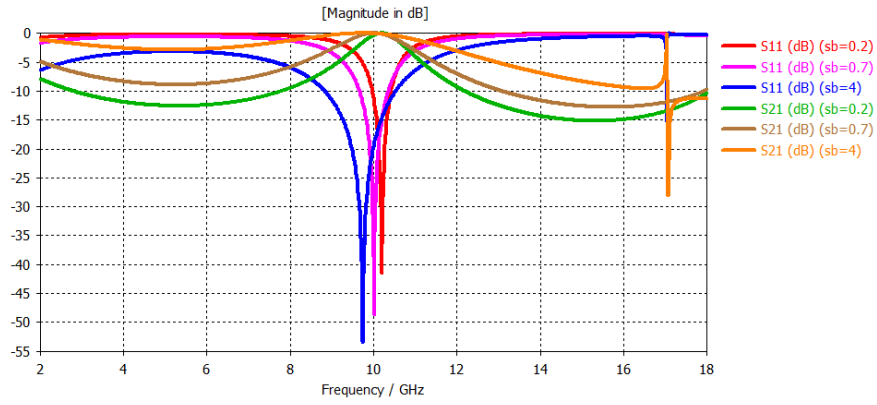
3D sekizgen FSY'nin bant geçiren özellik gösterdiği 13.8mm iletken yüksekliği sabit tutulup diğer parametreler değiştirilerek FSY'in frekans tepkisi incelenmiştir. Şekil 4.43., Şekil 4.44. ve Şekil 4.45.'de sunulan simülasyon sonuçları sırasıyla sekizgen iletkenin kalınlığı, ortalama iletken halka çapı ve iletken halkalar arası uzaklığın S parametrelerine etkisini göstermektedir. Şekil 4.46.'da ise altaşın dielektrik sabitinden S parametrelerinin nasıl etkilendiği gösterilmektedir.



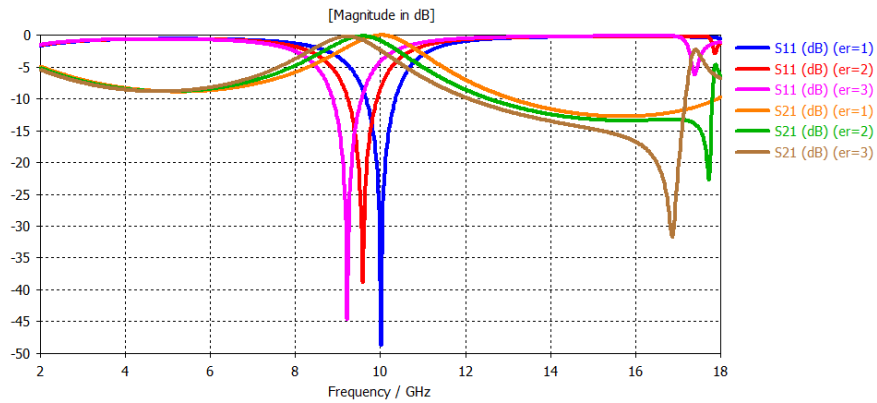
Şekil 4.43. İletken kalınlığı ile değişim ($l_1=13.8$ mm)



Şekil 4.44. Ortalama iletken halka çapı ile değişim (l1=13.8 mm)



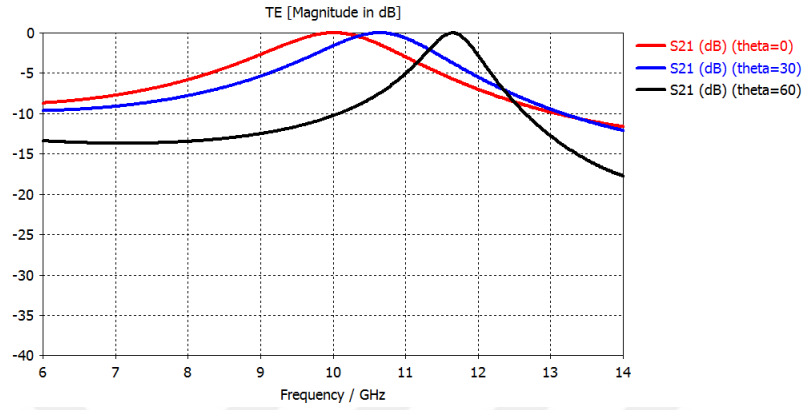
Şekil 4.45. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim (l1=13.8 mm)



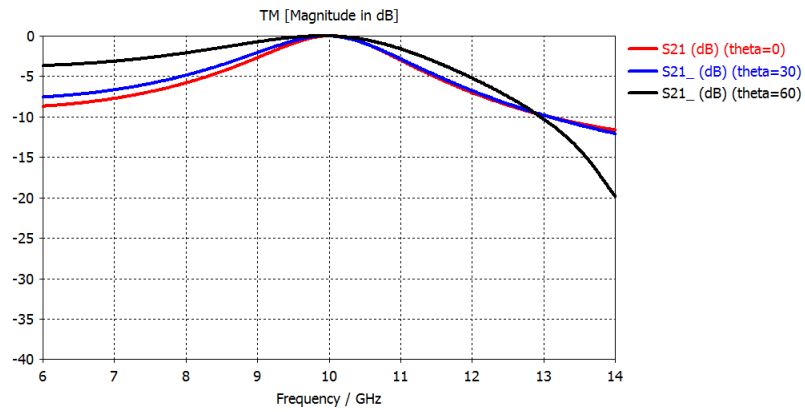
Şekil 4.46. Altaşın dielektrik sabiti ile değişim (l1=13.8 mm)

3D sekizgen FSY yapıda iletkenin kalınlığı, ortalama iletken halka çapı, iletken halkalar arası uzaklık ve altaşı oluşturan malzemenin dielektrik sabitindeki artışların FSY'nin rezonans frekansını düşürdüğü görülmektedir.

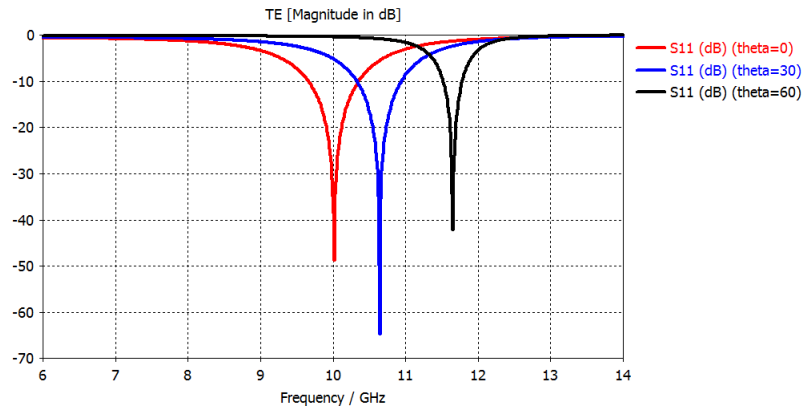
Sekizgen yapının üzerine gelen elektromanyetik dalganın geliş açısına bağlı olarak iletim ve yansımaya karakteristiklerinin değişimi $l_1=13.8$ mm iken TE modu için Şekil 4.47. ve Şekil 4.49. TM modu için ise Şekil 4.48. ve Şekil 4.50.'de verilmektedir.



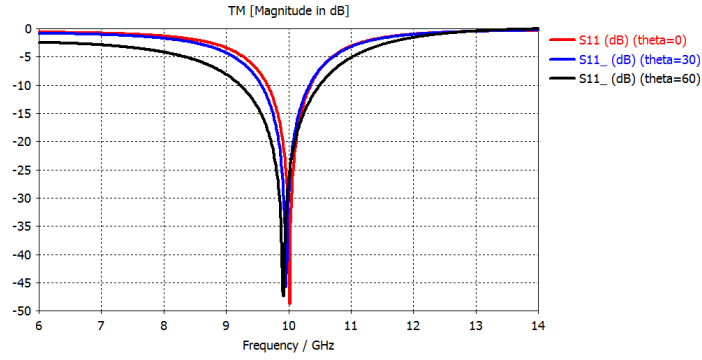
Şekil 4.47. Dalga geliş açısının iletime etkisi (TE modu)



Şekil 4.48. Dalga geliş açısının iletime etkisi (TM modu)



Şekil 4.49. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu)

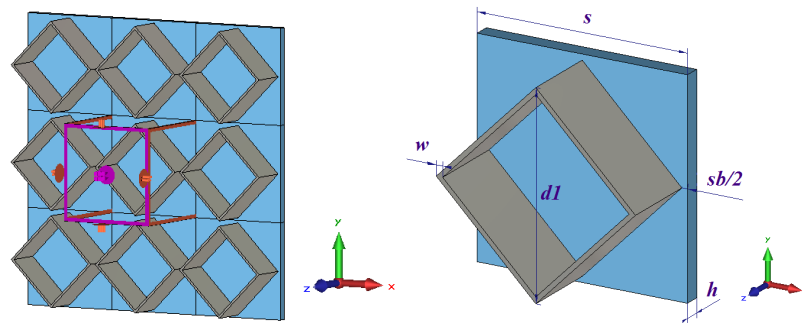


Şekil 4.50. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu)

Sekizgen yapıya ait dalga geliş açısı değişimi ile ilgili analiz sonuçları incelendiğine silindirik yapı için elde edilen sonuçlarla benzer oldukları görülmektedir. Dalga geliş açısının artmasıyla TE modunda rezonans frekansı artarken ve bant genişliği azalmaktadır. TM modunda ise dalga geliş açısı değişiminden rezonans frekansı çok etkilenmezken açının artmasıyla bant genişliği artmaktadır.

4.3. Kare Model

Silindirik ve sekizgen biçimli yapılardan sonra 3D kare FSY tasarımı yapılmıştır. Tablo 4.6.'da verilen parametrelere sahip kare FSY tasarımının 3D modeli (Şekil 4.51.) oluşturularak simülasyonları yapılmıştır ve yapı karakterize edilmiştir.

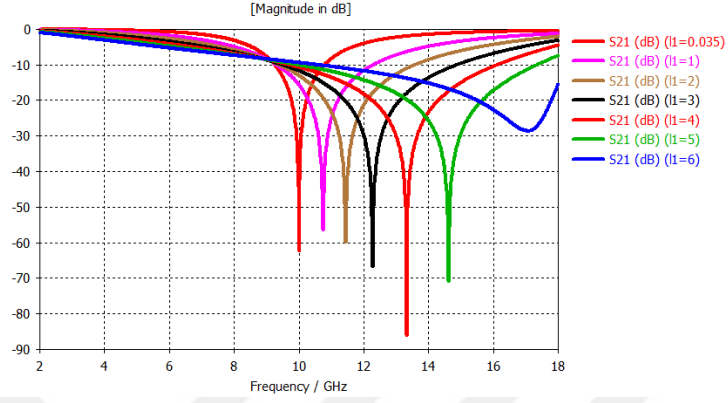


Şekil 4.51. 3D kare FSY

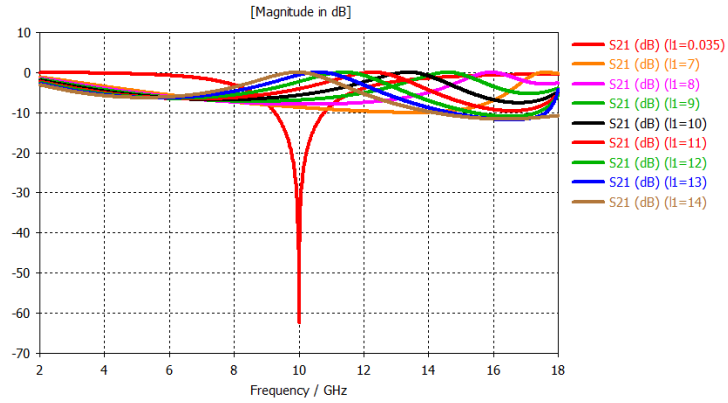
Tablo 4.6. Kare 3D model için parametre listesi

θ	φ	s	h	d1	w	l1	dort (d1-w)	sb
(Derece)	(Derece)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	13,1	1	12,4	0,4	değişken	12	0,7

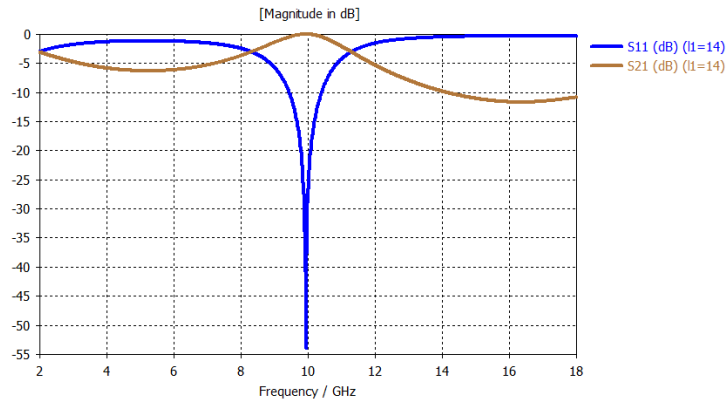
3D kare FSY'nin iletken yüksekliği değiştirildiğinde iletim karakteristiğinde ortaya çıkan değişim şekil 4.52. ve şekil 4.53.'de görülmektedir. İletken yüksekliği arttıķa rezonans frekansının da arttığı görülmektedir.



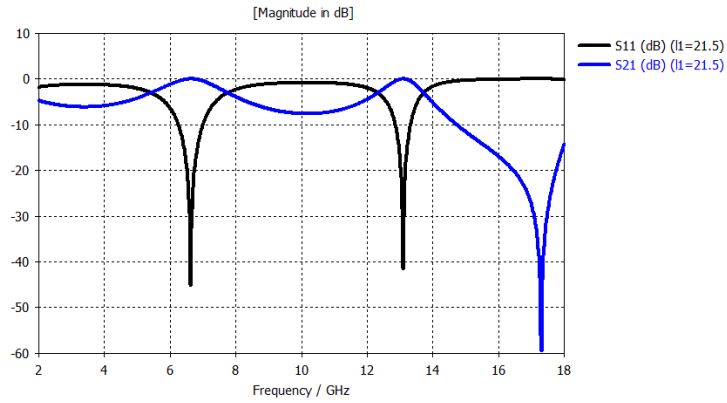
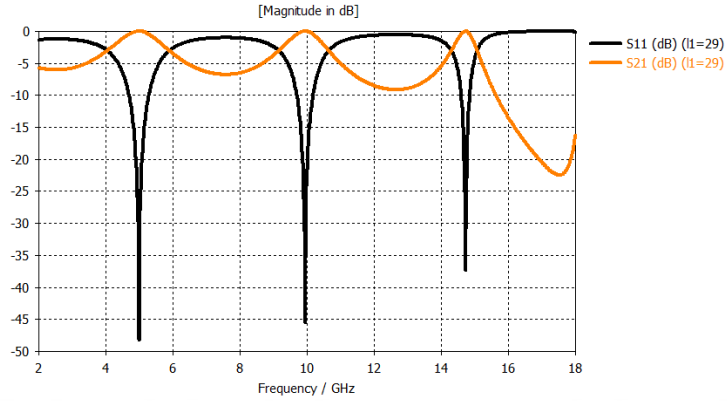
şekil 4.52. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 1mm – 6mm)



şekil 4.53. İletken yüksekliğine bağlı değişim (l1 = 7mm – 14mm)

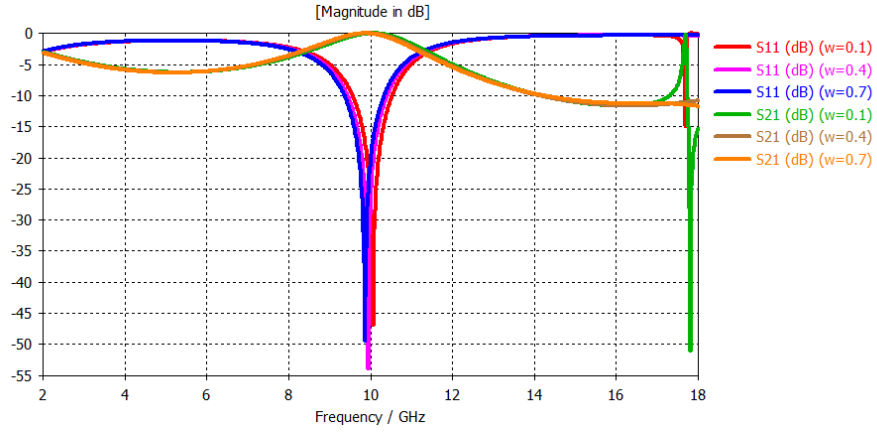


şekil 4.54. İletim ve yansıma parametreleri (l1=14 mm)

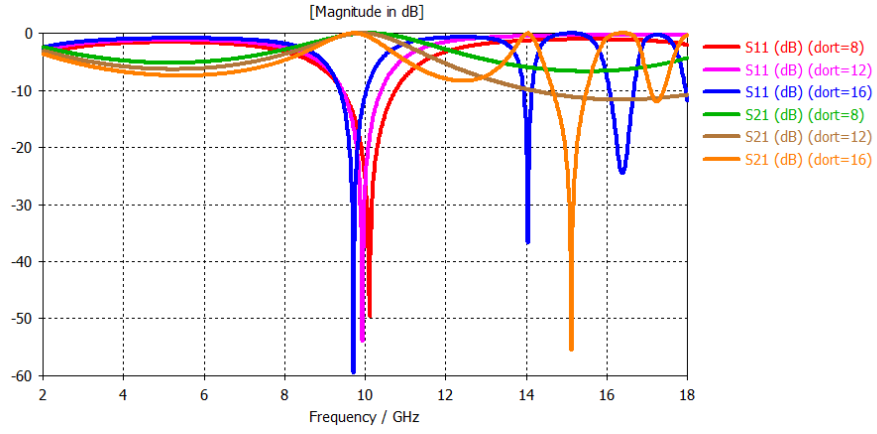
Şekil 4.55. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=21.5$ mm)Şekil 4.56. İletim ve yansımaya parametreleri ($l_1=29$ mm)

İletken yüksekliği $14 \text{ mm} \cong \lambda_r/2$, $21,5 \text{ mm} \cong 3\lambda_r/4$ ve $29 \text{ mm} \cong \lambda_r$ değerlerini aldığımda elde edilen iletim ve yansımaya parametreleri sırasıyla Şekil 4.54., Şekil 4.55. ve Şekil 4.56.'da verilmektedir. Analiz sonuçlarından 3D kare FSY'nin bu iletkin yüksekliklerinde sırasıyla bant geçiren, bant durduran ve tekrar bant geçiren özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

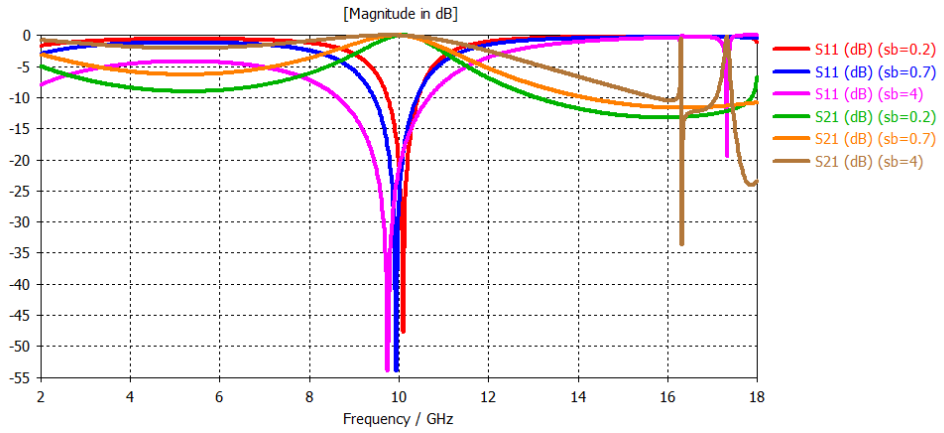
Kare yapının bant geçiren filtre karakteristiği gösterdiği 14 mm iletkin uzunluğu için 3D kare FSY'nin parametre analizi yapılarak iletkin kalınlığı, ortalama iletkin halka çapı, iletkin halkalar arası uzaklık ve iletkin yapı alttaşımın dielektrik sabiti ile iletim ve yansımaya karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir ve sonuçlar sırasıyla Şekil 4.57., Şekil 4.58., Şekil 4.59. ve Şekil 4.60.'da sunulmuştur. Parametre analizine dahil edilen parametrelerin herbirinin değerindeki artış FSY'nin rezonans frekansının düşmesine sebep olmuştur.



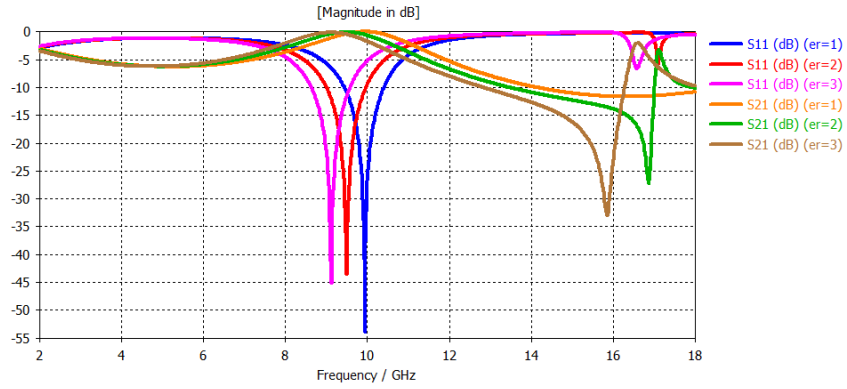
Şekil 4.57. İletken kalınlığı ile değişim (l1=14 mm)



Şekil 4.58. Ortalama iletken halka çapı ile değişim (l1=14 mm)

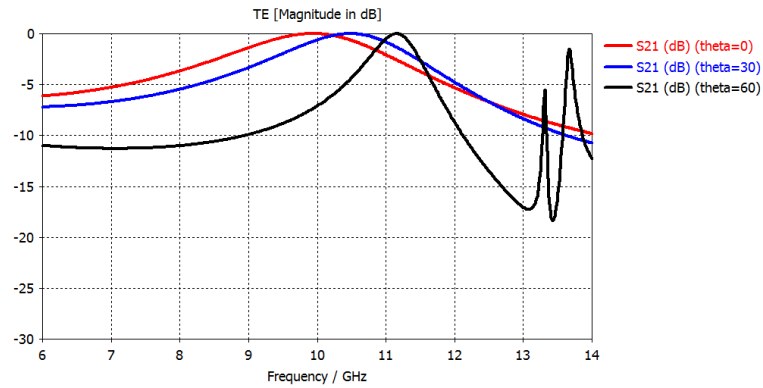


Şekil 4.59. İletken halkalar arası uzaklık ile değişim (l1=14 mm)

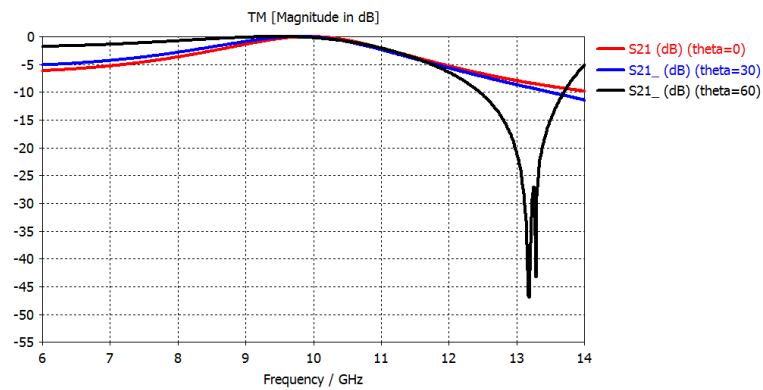


Şekil 4.60. Altaşın dielektrik sabiti ile değişim (l1=14 mm)

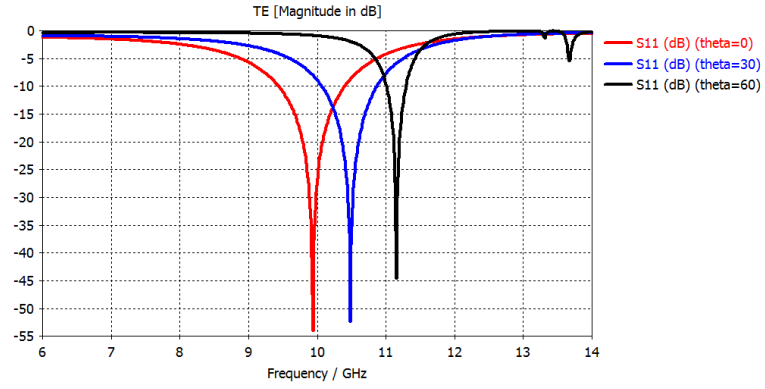
Elektromanyetik dalganın 3D kare FSY üzerine geliş açısının yapının iletim ve yansımaya karakteristiğini nasıl etkilediği araştırılmış l1=14 mm seçilerek elde edilen sonuçlar TE modu için Şekil 4.61. ve Şekil 4.63., TM modu için ise Şekil 4.62. ve Şekil 4.64.'de verilmiştir.



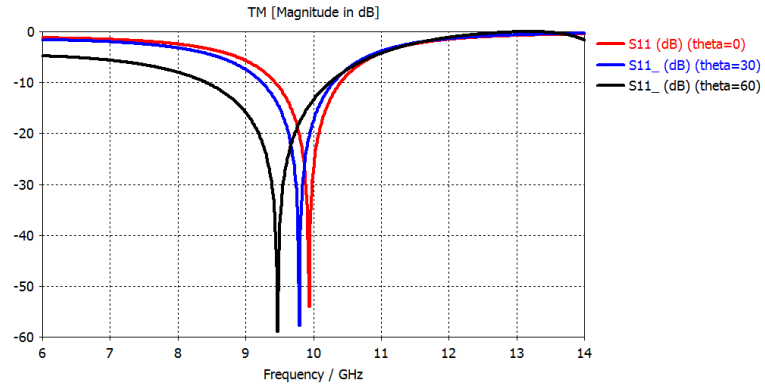
Şekil 4.61. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TE modu)



Şekil 4.62. Dalga geliş açısının ilettime etkisi (TM modu)



Şekil 4.63. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TE modu)



Şekil 4.64. Dalga geliş açısının yansımaya etkisi (TM modu)

Dalganın FSY üzerine geliş açısına bağlı olarak S parametresinin değişimi X-bandında TE ve TM modları için incelendiğinde, yapının frekans tepkisinin TM modunda TE moduna göre daha kararlı olduğu görülmektedir. TE modunda dalganın geliş açısının artmasıyla bant genişliği azalmakta TM modunda ise artmaktadır.

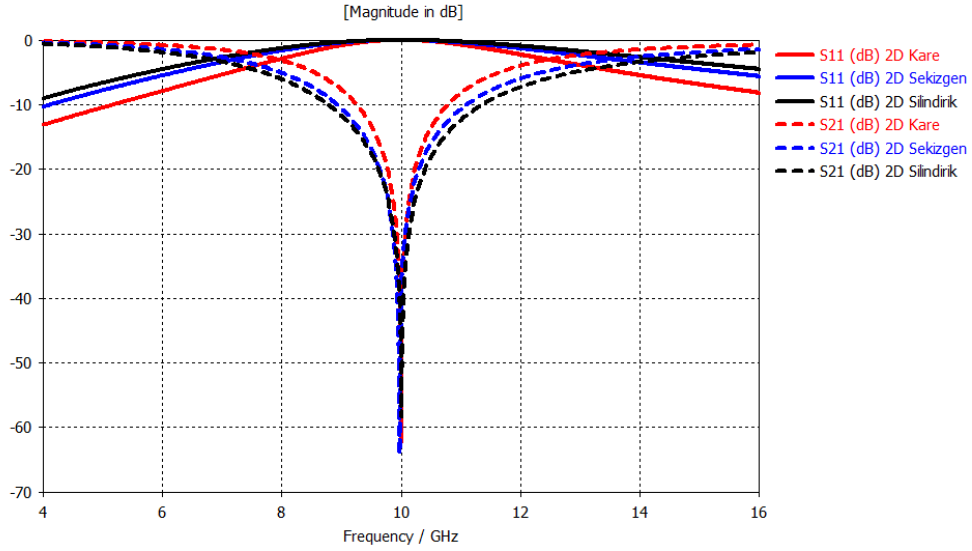
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kablosuz haberleşme, mikrodalga ve radar sistemleri alanlarında sıklıkla kullanılmakta olan frekans seçici yüzeyler (FSY) yaygın olarak iki boyutlu (2D) düzlemsel yapılar olarak tasarlanmaktadır. 2D yapılara göre daha esnek olan üç boyutlu (3D) FSY yapıları üzerindeki çalışmalar nispeten yenidir. Bu çalışmada X-bandı merkez frekansı olan 10 GHz için birim hücresi silindirik, sekizgen ve kare biçimli iletken halkalar kullanılarak tasarlanan 2D FSY yapıların iletken yüksekliği artırılarak üç farklı 3D sekizgen FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca silindirik yapıda iletken silindirin içinin dielektrik malzeme ile doldurulduğu ve yapının tamamen dielektrik malzeme içine gömüldüğü durumlar da incelenmiştir. Önerilen tüm yapıların parametre analizleri elektromanyetik simülasyon programı Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite ile yapılmıştır.

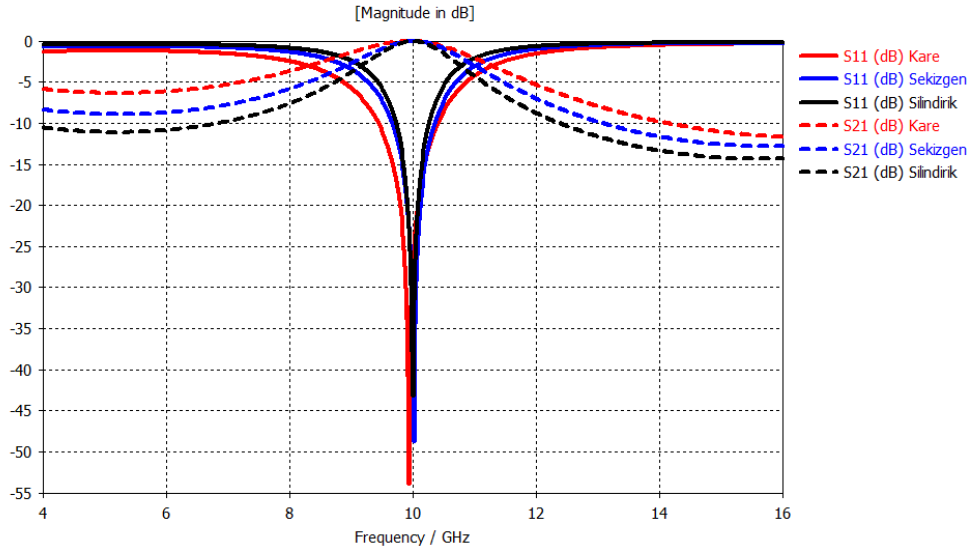
Tasarlanan yapıların hepsi X-bandında iletken yüksekliğine bağlı olarak bant durduran ve bant geçiren filtre karakteristiğine sahip olabilmektedir. 10 GHz rezonans frekansında 2D FSY yapılar bant durduran özellik gösterirken iletken yüksekliği $\lambda_r/2$ civarındayken 3D FSY yapılar bant geçiren özellik göstermektedir. İletken yüksekliği yaklaşık olarak $3\lambda_r/4$ ve λ_r değerlerini aldığı anda ise sırasıyla bant durduran ve bant geçiren filtre karakteristiği göstermektedir. İletken yüksekliğinin artmasıyla dönüşümlü olarak gösterdikleri filtre karakteristiği değişmektedir.

X-bandı merkez frekansı için silindirik, sekizgen ve kare halkalı olarak tasarlanan 2D ve 3D FSY yapıların iletim ve yansıma karakteristiklerine ilişkin sonuçlar Şekil 5.1., Şekil 5.2., Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Sonuçlar FSY'lerin bant geçiren filtre karakteristiğine sahip olduğu durumlarda silindirik yapıya göre sekizgen yapının, sekizgen yapıya göre ise kare yapının bant genişliğinin daha fazla olduğunu göstermektedir. FSY'ler bant durduran özelliğe sahip olduklarında bant genişliği silindirik yapıda en fazla iken kare yapıda en az olmuştur.

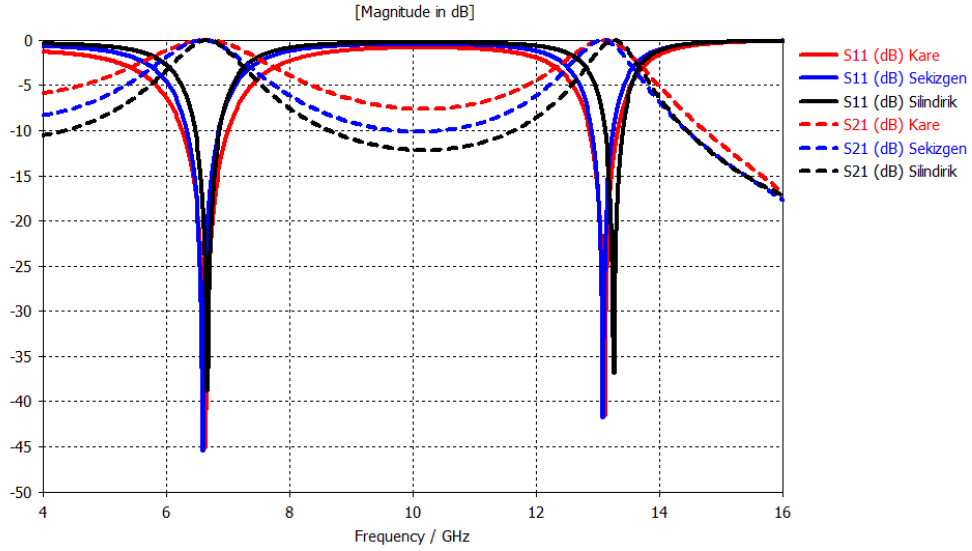
3D FSY tasarımlarının hepsi iletken yüksekliği yaklaşık olarak $\lambda_r/2$ ve λ_r değerlerini aldığı bant geçiren özellik göstermektedir ancak iletken yüksekliği arttığında bant genişliğinin düştüğü anlaşılmaktadır. Araştırılan üç farklı FSY'nin herbiri için iletken yüksekliği $\lambda_r/2$ iken λ_r olduğu duruma göre bant genişliği daha yüksektir.



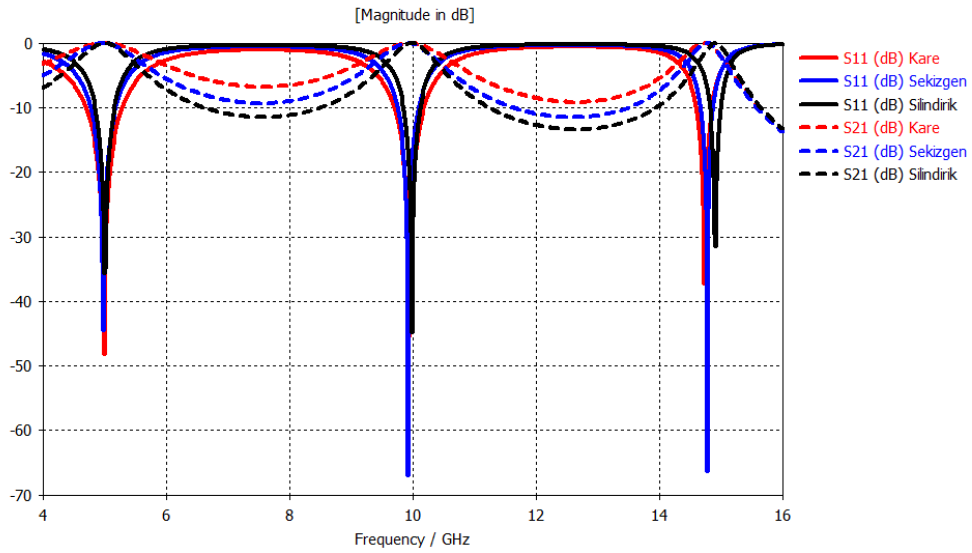
Şekil 5.1. Tasarlanan 2D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması



Şekil 5.2. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($11 \cong \lambda_r/2$)



Şekil 5.3. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($l_1 \cong 3\lambda_r/4$)



Şekil 5.4. Tasarlanan 3D FSY yapıları için iletim ve yansımaya parametrelerinin karşılaştırılması ($l_1 \cong \lambda_r$)

İletken yüksekliği $\lambda_r/2$ civarında olan yaklaşık olarak 10 GHz rezonans frekansına sahip bant geçiren filtre özelliği gösteren 3D FSY yapıların parametre analizleri sonucunda rezonans frekansının iletkenin kalınlığı, ortalama iletken halka çapı, iletken halkalar arası uzaklık, ve alttaşın dielektrik sabitinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Üzerine gelen dalganın farklı geliş açılarında TM modunda kararlı davranan 3D FSY'lerin rezonans frekansı TE modunda açının artmasıyla artmaktadır

ancak bant geçiren özelliğini her iki modda da korumaktadır. Geliş açısının artmasıyla TM modunda bant genişliği artarken TE modunda azalmaktadır.

Silindirik, sekizgen ve kare biçimli olmak üzere üç farklı geometride iletken halkaya sahip 3D FSY'lerin önerildiği bu çalışma X-bandı dışındaki frekans bantları için de genişletilebilir. Daha geniş bantlı, dalga geliş açısına göre TE ve TM modlarının her ikisinde de daha kararlı olan yeni özgün geometriler araştırılarak çalışma derinleştirilebilir. FSY üzerindeki birim elemanların farklı şekillerde konumlandırılması ve farklı geometride elemanların bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkacak sonuçlar araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Marconi, G. ve Franklin, C.S., Reflector for use in wireless telegraphy and telephony, US Patent 1-301-473, 1919.
- [2] Munk, B.A., Periodic Surface for Large Scan Angles, US Patent 3-789-404, 1974.
- [3] Agrawal, N. D., Imbriale, W. A., Design of a dichroic cassegrain subreflector, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.27, no. 4, pp. 466-473, 1979.
- [4] Kadir, Ö., Özer, A., Yücedag, O., Koçer, H., Metamalzeme tabanlı geniş band ışın emici yapılar kullanılarak Radar Kesit Alanı'nın azaltılması, Gazi Üniversitesi Müh.ve Mim. Fak. Dergisi, Cilt 31, Sayı 4, 2016.
- [5] Munk, B.A., Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [6] Mittra, R., Chan, C., H., and Cwik, T., Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review, Proc. IEEE, vol.76, pp.1593-1615, 1988.
- [7] Wu, T., K., Frequency Selective Surface and Grid Array, John Wiley & Sons, New York, 1-25, 2000.
- [8] Azemi, S.N., Rowe, W.S.T. 2011. Development and Analysis of 3D Frequency Selective Surfaces. Proceeding of the Asia – Pacific Microwave Conference. Australia, 694.
- [9] Uçar, M.H.B. 2007. Anahtarlamaalı Yarık – Halka Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek lisans tezi.
- [10] Sung, H.H. 2006. Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference, The University of Auckland, Doktora tezi.
- [11] Döken, B. 2011. Geniş bantlı kablosuz iletişime uygun yapısal yüzey malzemesi tasarımı, İTÜ, Yüksek lisans tezi.

- [12] Vardaxoglou, J.C., Frequency selective surfaces analysis and design, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1997
- [13] Güngör, İ. 2012. Frekans seçici yüzeyler kullanarak iki farklı frekansta istenilen ışım desenlerine sahip reflektör anten tasarımı, İTÜ, Yüksek lisans tezi.
- [14] Bardi. I., R. Remski, D. Perry ve Z. Cendes, Plane wave scattering from frequency – selective surfaces by the finite – element method, IEEE Transactions on Magnetics, 38(2), s. 641-644.
- [15] Cheng, David K., 2012. Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri, 2. Baskı, Palme Yayınları, Ankara, 273.
- [16] Balanis, Constantine A., 1989. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons Inc., USA.
- [17] http://ehm.kocaeli.edu.tr/web/files/48_EMDT-Ders-4.pdf, Erişim Tarihi: 04.01.2017
- [18] <http://www.radartutorial.eu>, Erişim Tarihi: 30.11.2016.
- [19] <http://i.imgur.com/ZbHwxPj.png>, Erişim Tarihi: 13.04.2017.
- [20] Computer Simulation Technology, CST Studio Suite 2017, User Guide, CST, Darmstadt, Germany, 2017, available at www.cst.com.
- [21] Azemi, S.N., Ghorbani, K., Rowe, W.S.T., 3D Frequency Selective Surfaces, Progress in Electromagnetics Research C, vol.29, 191-203, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Angun, 19.04.1989'da Ordu'da doğdu. İlköğretimi Tokat'ta 2003 yılında, lise eğitimini Sivas'ta 2007 yılında Cumhuriyet Anadolu Lisesinde tamamladı. 2008 yılında başladığı Kırıkkale Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. Iğdır'da askerlik hizmetini tamamladıktan sonra 2013 – 2014 yılları arasında Malatya'da stadyum şantiyesinde Elektrik Şantiye Şefi olarak çalıştı. Şu an ise MSB Savunma Sanayii Müsteşarlığında görev yapmaktadır. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümünde başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.