

**Bina İçi Kablosuz İletişimde Amaca Uygun İşaret İletimini
Sağlayan Yapısal Yüzey Malzemesi Tasarımı**

Proje No: 110E104

Doç.Dr. Mesut KARTAL (yürütücü)
Prof. Dr. Sedef KENT (araştırmacı)
Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN (danışman)

EYLÜL 2012
İSTANBUL

ÖNSÖZ

Projede bina içi kablosuz iletişimde 2.4 - 2.4835GHz ISM serbest frekans bandında ortaya çıkan girişim etkilerini en aza indirmek için bu frekans bandındaki gelen RF işaretleri söndüren, diğer frekanslarda ise iyi bir iletim karakteristiğine sahip olan yapısal yüzey malzemesi tasarımı hedeflenmiştir. Bu araştırma TÜBİTAK 1001 (proje no:110E104) projesi olarak desteklenmektedir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER: FSY'ler İçin Elektromagnetik Dalga – Ortam Etkileşiminin İncelenmesi.....	3
2.1 Genel yapıdaki periyodik iletken yama veya açıklık dizilerinden oluşan frekans seçici yüzeylerin frekans davranışlarının analizleri.....	3
2.2 Temel frekans seçici yüzey geometrilerinin eşdeğer devre modelleri ile analizi.....	4
2.3 Temel periyodik yüzey geometrileri.....	5
2.4 FSY'lerin üzerine monte edildikleri dielektrik yüzeylerin frekans karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi.....	6
2.5 Frekans seçici yüzeylerin bina içi davranış etkilerinin incelenmesi.....	8
2.6 Maksimum geliş açısı.....	9
2.7 Genel yapıdaki FSY'ler için ortaya çıkan istenmeyen yayınımların (yan loblar) incelenmesi.....	9
3. GEREKÇE.....	10
4. YÖNTEM.....	10
5. BULGULAR.....	17
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	68
REFERANSLAR.....	71

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1: $\theta = 45$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda FSY geometrilerinin, farklı θ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri ($\phi=0$ derece)	20
Çizelge 2: $\theta = 45$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda $\theta = 45$ için FSY geometrilerinin farklı ϕ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri	20
Çizelge 3: $\theta = 30$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda FSY geometrilerinin, farklı θ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri ($\phi=0$ derece)	21
Çizelge 4: $\theta = 30$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda $\theta = 45$ için FSY geometrilerinin farklı ϕ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri	21
Çizelge 5: TE ve TM modları için ölçüm sonuçları	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1 : Boşlukta duran frekans seçici yüzeyler: (a) Yama tipi (b) Yarık tipi	3
Şekil 2 : FSY’i oluşturan periyodik iletken yama geometrisi ve gelen dalga’nın yönü	4
Şekil 3 : FSY ve eşdeğer devre modelinin belirlenmesi	5
Şekil 4 : Grup1: n kutuplu, merkeze bağlı yapılar.	5
Şekil 5 : Grup2: Döngü yapılar.	6
Şekil 6 : Grup3: Yama yapılar.....	6
Şekil 7 : Grup4: Hibrid yapılar.....	6
Şekil 8 : Dielektrik tabaka ve üzerine monte edilmiş FSY.	7
Şekil 9 : Sonsuz uzunluktaki dielektrik yüzey kalınlığının etkisi (Munk, 2000).	7
Şekil 10 : Dalga’nın geliş açısının elemanlar arası boşluğa etkisi (Sung, 2006).....	8
Şekil 11 : Dielektrik tabaka üzerinde FSY (Sung, 2006).	8
Şekil 12 : Periyodik bir yüzeye gelen düzlemsel dalga ve istenmeyen yayınımların meydana gelişi (MUNK, 2000).	9
Şekil 13 : FSY geometrileri.....	12
Şekil 14 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (Ölçüm).....	14
Şekil 15 : Amaca en uygun olarak seçilen dört adet FSY geometrisi	17
Şekil 16 : G1 geometrisi için TE modunda iletim katsayısının kollar arasındaki açığa göre (40, 60 ve 80 derece için) frekansla değişimi.....	18
Şekil 17 : G1 geometrisi için TE ve TM modlarına iletim katsayısının frekansla değişimi	18
Şekil 18 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^0$	22
Şekil 19 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=45^0$	22
Şekil 20 : TM modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^0$	23
Şekil 21 : TM modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=45^0$	23
Şekil 22 : (a) Üç Kollu yapı, (b) Dört Kollu yapı	24
Şekil 23 : Teslin kâğıt üzerine gerçekleştirilen FSY baskısı.....	27
Şekil 24 : Asetat kâğıt üzerine gerçekleştirilen FSY baskısı	27
Şekil 25 : Baskısı yapılmış FSY’ler	28
Şekil 26 : Horn anten BBHA.....	29
Şekil 27 : Horn antenin uzak alanda aydınlattığı S bölgesi.....	29
Şekil 28 : Yansımasız odada ölçüm düzeneğinin hazırlanması	30
Şekil 29 : Yansımasız odada ölçüm düzeneğinin hazırlanması	30
Şekil 30 : Ölçüm düzeneği	31
Şekil 31 : Elektromagnetik dalga’nın farklı geliş açıları için ölçümlerin gerçekleştirilmesi	32
Şekil 32 : Dört kollu yapı	33
Şekil 33 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ ’de FSY’e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)	35
Şekil 34 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ ’de FSY’e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	35
Şekil 35 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ ’de FSY’e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)	36

Şekil 36 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	36
Şekil 37 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)	38
Şekil 38 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	38
Şekil 39 : İçi boş üçlü yapı (120 derece)	39
Şekil 40 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)	40
Şekil 41 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	40
Şekil 42 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)	41
Şekil 43 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	41
Şekil 44 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)	43
Şekil 45 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	43
Şekil 46 : Dört kollu yapı	44
Şekil 47 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)	46
Şekil 48 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)	46
Şekil 49 : TE modunda iletim katsayısının (s_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)	45
Şekil 50 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)	45
Şekil 51 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)	48
Şekil 52 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	48
Şekil 53 : İçi boş üçlü yapı (120 derece)	49
Şekil 54 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)	50
Şekil 55 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)	50
Şekil 56 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)	51
Şekil 57 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)	51
Şekil 58 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)	53
Şekil 59 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm).....	53
Şekil 60 : Yutucu FSY tasarımı 1	54
Şekil 61 : Yutucu FSY tasarımları	55
Şekil 62 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (HFSS) ...	56
Şekil 63 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (HFSS) .	56
Şekil 64 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (HFSS) ..	57
Şekil 65 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (HFSS)	57
Şekil 66 : Yutucu FSY tasarımı 2.....	58
Şekil 67 : 100 Ω 'luk dirençler ile imal edilen sonlu iletken FSY	59

Şekil 68 : Gerçekleştirilmiş çift katmanlı yutucu FSY	59
Şekil 69 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (HFSS) ...	61
Şekil 70 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (Ölçüm) ..	61
Şekil 71 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (HFSS)...	62
Şekil 72 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (Ölçüm) ..	62
Şekil 73 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (HFSS) .	63
Şekil 74 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (Ölçüm)	63
Şekil 75 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (HFSS).	64
Şekil 76 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (Ölçüm)	64
Şekil 77 : Üç katmanlı yutucu FSY tasarımı	66
Şekil 78 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$	67
Şekil 79 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$	67

BİNA İÇİ KABLOSUZ İLETİŞİMDE AMACA UYGUN İŞARET İLETİMİNİ SAĞLAYAN YAPISAL YÜZEY MALZEMESİ TASARIMI

ÖZET

Günümüzde kablosuz iletişim sistemlerinin yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanması ile aşağıda bir kısmını sıraladığımız problemler ortaya çıkmıştır:

- İzin verilen frekans bantları sınırlı olduğundan birçok haberleşme sistemi aynı frekans bandını kullanmak zorunda kalmış ve sistemler arası girişim önemli bir problem haline gelmiştir.
- Güçlü elektromagnetik dalgalar insan sağlığına zarar verebilmektedir.
- İşaretin istenmeyen mesafelere iletimi bilgi güvenliğinin sağlanması açısından önemli bir problem olmaktadır.

Bina (ofis) içi kablosuz ağlarda RF işaretlerin genellikle bina dışına iletilebilmesi ağa istenmeyen erişimleri mümkün kılmaktadır. Tam tersi olarak dışarıdan ofis içine giren RF işaretleri de girişime neden olmakta, haberleşme kalitesini ve hızını düşürmektedir. Binaların metal kafesler ile kaplanması bütün işaretleri engellediğinden FSY'ler bir çözüm olarak düşünülmüştür. Dielektrik ortam üzerine yerleştirilmiş periyodik iletken yama veya açıklık dizileri ile oluşturulan Frekans Seçici Yüzeyler (FSY) frekansa göre değişen yansıma ve iletim özellikleri göstermektedirler. Ancak bu FSY'ler rezonans frekansında güçlü yansıtma karakteristiği gösterdiklerinden RF işaretlerinde çok yolluluğa ve bundan kaynaklanan sönümlemelere ve girişime sebep olmaktadır. Çözüm olarak emici FSY tasarımı gündeme gelmiştir.

Bu projede, bina içi kablosuz haberleşme frekansı olan 2.45GHz merkez frekansında 100MHz bant genişlikli bir bölgede (ISM bandı) bant söndüren emici birFSY tasarımının yapılması hedeflenmiştir.ve FSY'in emici bir özeliğe sahip olması ile bina içinde çok yolluluğun artmasının engellenmesi sağlanacaktır.

Proje kapsamında 2.4GHz ISM frekans bandında proje isterlerine uygun olarak tek katmanlı bant söndüren FSY'lerin ve çift katmanlı yutucu FSY'lerin prototiplerinin tasarımları, üretimi ve laboratuvarında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçların proje isterlerini sağladığı ve projenin amacına ulaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Periyodik Yapılar, emici yüzeyler, Frekans Seçici Yüzey (FSY), çok yollu sönümleme, kablosuz iletişim sistemleri (WLAN)

DESIGN FOR THE STRUCTURAL SURFACE MATERIAL ENABLING SIGNAL TRANSMIT APPROPRIATE FOR THE FUNCTION IN WIRELESS COMMUNICATION WITHIN THE BUILDING

SUMMARY

Wireless communication systems have been widely used nowadays. This has brought many problems; because of the limited frequency bandwidths, communication systems have to use same frequency bands. The interference among the systems has constituted a crucial problem. The use of cellular phones, may affect the operation of many sensitive electronic devices and systems. Strong electromagnetic waves can damage human health. RF transmission of unsolicited distance may cause security problems. Advanced signal processing techniques and antenna designs can be used to solve these problems. Another important approach to solve this problem is to modify the physical indoor propagation environment by transforming the building walls into a frequency-selective (FS) filter, which deliberately filters (blocks) out unwanted interference, while still allowing desired radio services to pass through.

Frequency selective surfaces (FSS) are periodic structures, which have low pass, high pass, band pass and band stop filter characteristics when interacting with electromagnetic waves. This project is proposed to design frequency selective surface at the unlicensed 2.4GHz ISM (Industrial, scientific and medical) band. An attenuation of 10dB on the transmission (s_{21}) parameter and reflection parameter (s_{11}) is desired for this frequency band. Attenuation of 10dB on the transmission (s_{21}) parameter is for shielding for interference mitigation and network security within the buildings. Attenuation of 10dB on the reflection (s_{11}) parameter is to reduce mutual interference, additional multipath effect and resultant fading.

In the project, the design, production and laboratory measurements of the frequency selective surfaces are achieved. The results show that the desired frequency response of the FSSs are obtained successfully.

Keywords: Periodic structures, absorbing surfaces, frequency selective surfaces (FSS), multipath fading, wireless local area network (WLAN)

1. GİRİŞ

Bu projede bina içi kablosuz iletişimde amaca uygun yansıma ve iletim özellikleri gösteren yapısal yüzey malzemesi tasarımı hedeflenmiştir. Yüzeylerin istenmeyen frekans bandına sahip işaretleri söndüren, istenilen frekans bantlı işaretleri geçiren frekans seçici filtreye (FSY: frekans seçici yüzey) dönüştürülebilmesi ile bina içi kablosuz iletişimde karşılaşılan girişim, bilgi güvenliği gibi problemlere çözümler getirilmesi amaçlanmıştır.

FSY tasarımında dielektrik ortam üzerine yerleştirilmiş periyodik iletken yama veya açıklık dizilerinin frekansa göre değişen yansıma ve iletim özellikleri dikkate alınmıştır.

Ülkemizde ve Dünyada 2.4 - 2.4835GHz frekans bölgesi ISM (Industrial, Scientific and Medical) serbest frekans bandı olarak kullanılmaktadırlar. Bu frekans bandında ortaya çıkan girişim etkilerini en aza indirmek için bu projede, güncel bir araştırma konusu olarak, önerilen frekans bandında farklı geliş açılarının da bir parametre olarak ele alındığı önerilen değişik FSY geometrileri için, gelen RF işaretleri söndüren, diğer frekanslarda ise iyi bir iletim karakteristiğine sahip olan yapısal yüzey malzemesi tasarımı hedeflenmektedir. Bu malzemenin söndürme bandında (2.4 - 2.4835GHz) iletim katsayısının (S_{21}) minimum -10dB, yansıma katsayısının (S_{11}) minimum -10dB olması, iletim bandında iletim katsayısının (S_{21}) 0dB'e yakın bir değerde olması ve ayrıca işaretlerin farklı geliş açılarında, polarizasyonlarında ve FSY'lerin farklı yapısal malzemeler üzerine montajı (ahşap, tuğla, beton vs.) durumunda da amaçlanan frekans karakteristiklerini sağlaması hedeflenmektedir

Proje çalışma süreci içinde ilk olarak mevcut FSY geometrilerinin frekans davranışları ve ayrıca geometrik ve elektriksel parametrelerin FSY davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Proje isterlerine uygun olan FSY geometrileri belirlenerek ve yeni FSY geometrileri geliştirilerek amaçlanan karakteristikleri sağlayacak parametrik eniyileme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Projenin ürün geliştirme sürecinde **literatüre katkı sağlayacak özgün çalışmalar** aşağıda özetlenmiştir:

1. İncelenen temel FSY geometrileri için elde edilen sonuçlardan yararlanılarak daha dar bantlı bir frekans karakteristiğine sahip “içi boş üç kollu” FSY geometrisi

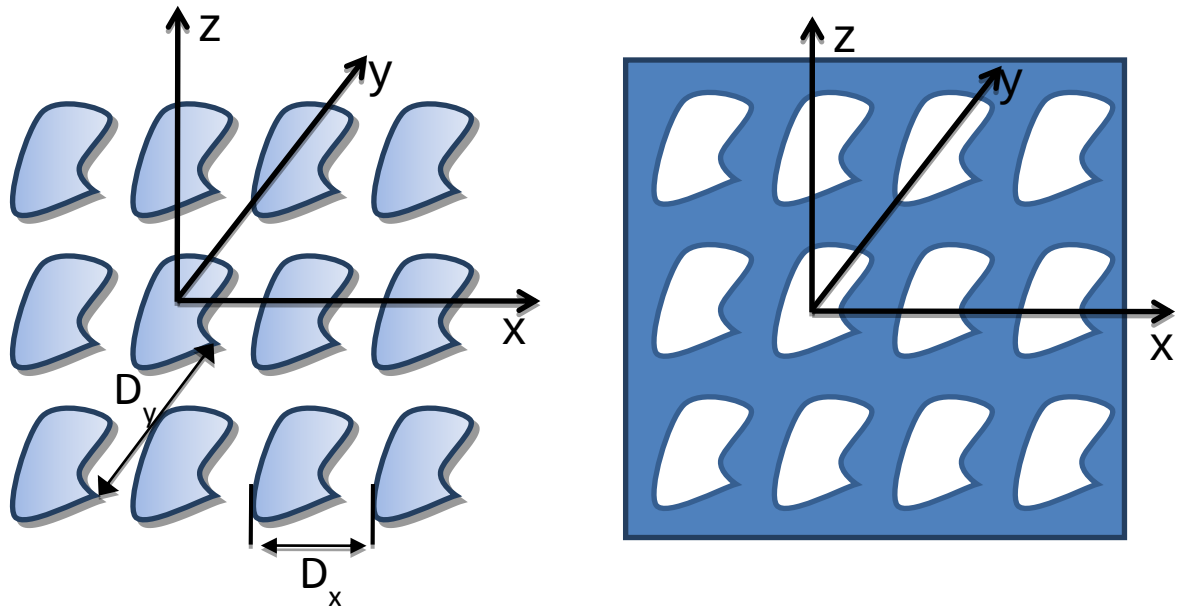
geliştirilmiştir. Literatürde var olan simetrik üç kollu geometri için iki kol arasındaki 120 derecelik açı küçültülerek “Y” harfi biçiminde bir geometri ile daha dar frekans bandına sahip bir FSY elde edilebilmiştir. Bu yeni geometride rezonans frekansı değişmeden bant genişliğini kollar arasındaki açıyı değiştirerek ayarlayabilmek mümkün olmaktadır. Bu geometri lineer polarizasyonda ve TE modunda çok iyi sonuçlar vermekte, çapraz polarizasyon ve diğer modlarda ise mevcut geometrilere göre daha iyi sonuçlar vermemektedir.

2. Bant yutucu FSY tasarımını yönelik olarak literatürde 5.2GHz bandı için gerçekleştirilen tasarımlara rastlanmaktadır. Proje kapsamında bu tasarımlarda kullanılan sonlu iletkenliğe sahip yüzeylerin kullanılması fikrinden yararlanılarak bant yutucu frekans karakteristiğine sahip üç farklı çift katmanlı yeni FSY geometrisi geliştirilmiş ve 2.4GHz ISM bandı için geometrik ve parametrik eniyilemeleri gerçekleştirilmiştir.
3. Sonlu iletkenliğe sahip yüzeyler kullanılarak tasarlanan bant yutucu FSY’lerin imalat maliyetlerinin çok yüksek olması sebebi ile proje kapsamında 100Ω’luk dirençler kullanılarak mükemmel iletkenliğe sahip yeni bir bant yutucu FSY tasarımı ortaya konmuştur. 2.4GHz ISM bandı için geometrik ve parametrik eniyilemeleri gerçekleştirilmiştir. İmalatları tamamlanan prototiplerin laboratuvarında ölçümleri yapılmış ve proje isterlerine uygun sonuçlar elde edilmiştir.
4. Toplu parametrelili elemanların FSY tasarımlarında kullanılmasına yönelik olarak endüktif ve kapasitif elemanların literatürde çok az kullanıldığı görülmektedir. Proje kapsamında 50Ω’luk yüzey direncine sahip FR4 dielektrik tabakalar ve 0.04pF değerinde kapasiteler kullanılarak 2.4GHz ISM bandı için üç katmanlı bant yutucu yeni bir FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın eniyileme çalışmaları neticesinde literatürde yapılan benzer çalışmalara göre çok iyi benzetim sonuçları elde edilmiştir. İmalat maliyetlerinin çok yüksek olması sebebi ile imalatı proje kapsamında gerçekleştirilmemiştir.

Proje kapsamında 2.45GHz bandında bant söndüren ve bant yutucu FSY tasarımları, imalatları ve laboratuvarında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların proje isterleri karşıladığı görülmektedir.

2. GENEL BİLGİLER: FSY'ler İçin Elektromagnetik Dalga – Ortam Etkileşiminin İncelenmesi

Dielektrik ortam üzerine yerleştirilmiş periyodik iletken yama veya açıklık dizileri frekansa göre değişen yansıma ve iletim özellikleri göstermektedirler. Periyodik dizilerden oluşan yüzeyler Frekans Seçici Yüzeyler (FSY) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu yüzeylerin anten ve mikrodalga alanlarındaki uygulamalarına, çok bantlı mikrodalga antenler, hibrit radomlar, dalga kılavuzu uygulamaları, yansıtıcı antenler, yapay magnetik iletkenler, dichroic yapılar, kutuplayıcılar, demet bölücüler, emici yüzey tasarımları vs. örnek olarak verilebilir. Şekil 1'de yama ve yarık tipi iki adet FSY görülmektedir.

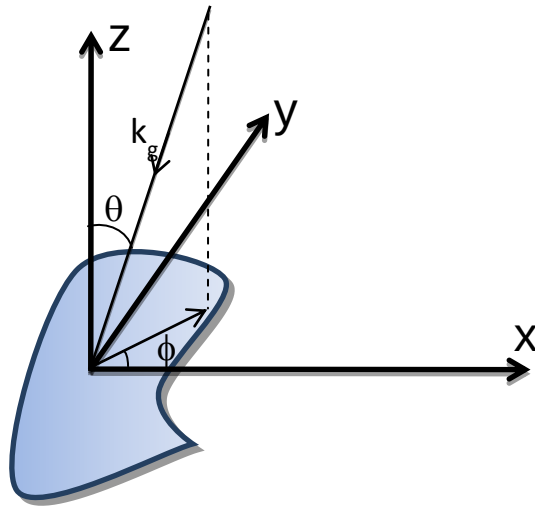


Şekil 1 : Boşlukta duran frekans seçici yüzeyler: (a) Yama tipi (b) Yarık tipi

2.1 Genel yapıdaki periyodik iletken yama veya açıklık dizilerinden oluşan frekans seçici yüzeylerin frekans davranışlarının analizleri

Şekil 2'de görüldüğü gibi iletken bir yama üzerine ("z" eksenine ile " θ " ve "x" eksenine ile de " ϕ " açısı yapan) bir elektromagnetik dalga geldiğinde, iletkende akım indüklenecek ve indüklenen bu akım nedeniyle saçılan dalgalar meydana gelecektir. FSY'lerin her iki yönde de sonsuz uzunlukta olduğu ve sonsuz sayıda periyodik eleman içerdiği varsayılmaktadır. Floquet teoremin bu yüzeylere uygulanması ile FSY'lerden saçılan dalgaların dalga denklemi elde edilmektedir. (WU, 1995).Elde edildikten dalga denklemi, frekans seçici yüzeylerinin üzerine

elektromagnetik dalga geldiği zaman sonsuz sayıda düzlemsel dalganın saçıldığını ve bu dalgalardan bazılarının yayılım yaparken bazılarının da sönümlü dalgalar olduğunu ifade etmektedir. Dalga denkleminin istenilen FSY geometrisine uygun çözümü ancak dipol gibi basit FSY geometrileri için analitik olarak incelenebilmekte bunun dışında ise sayısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Proje kapsamında amaca uygun belirlenen FSY'lerin analizleri “Sonlu Elemanlar Metodu” ile bu tür yapıların analizlerini yapabilen Ansoft HFSS programı ile gerçekleştirilmiştir.



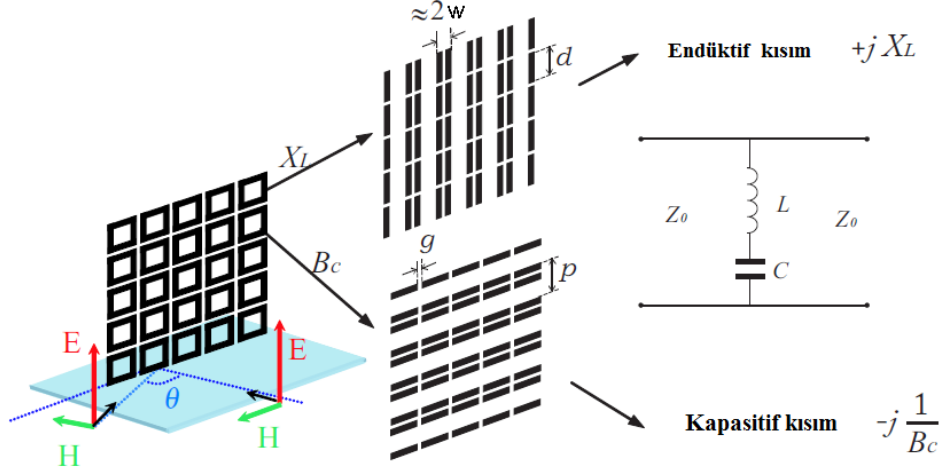
Şekil 2 : FSY’i oluşturan periyodik iletken yama geometrisi ve gelen dalganın yönü

2.2 Temel frekans seçici yüzey geometrilerinin eşdeğer devre modelleri ile analizi

FSY davranışlarını incelemek için kullanılabilen bir diğer yöntem ise eşdeğer devre modeli yaklaşımıdır. Eşdeğer devre modeli temel FSY’ler için kullanılan analitik ve basit bir hesaplama tekniğidir ve yaklaşık sonuçlar vermektedir. Güçlü bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duymamakta ve FSY’lerin çalışması hakkında kabaca bir bilgi verebilmektedir. Bu analiz yönteminde FSY’lerin iletim karakteristikleri iletim hatları eşdeğer devre modelleri kullanılarak belirlenmektedir. FSY’ler iletim hattındaki eşdeğer endüktif ve kapasitif elemanlarla modellenmektedirler.

Şekil 3’de FSY ve eşdeğer devre modeli görülmektedir. Elektrik alan vektörü yönünde periyodik yapıya baktığımız zaman endüktif davranış gösteren iletken yollar ve kapasitif davranış gösteren iletkenler arası boşluklar görülmektedir. Periyodik yapı birbirine seri bağlı endüktif ve kapasitif elemanlar ile modellenebilmektedir. Eşdeğer devre modeli, Marcuwitz tarafından ortaya konan, periyodik ızgaraların modellenmesi teorilerine dayanmaktadır

(MARCWITZ, 1951). Proje kapsamında eşdeğer devre modellerinden elde edilen ön bilgiler kullanılarak aktif olarak yararlanılmıştır.

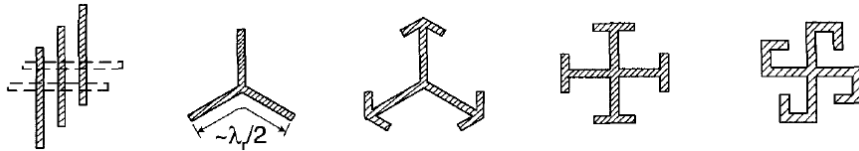


Şekil 3 : FSY ve eşdeğer devre modelinin belirlenmesi

2.3 Temel periyodik yüzey geometrileri

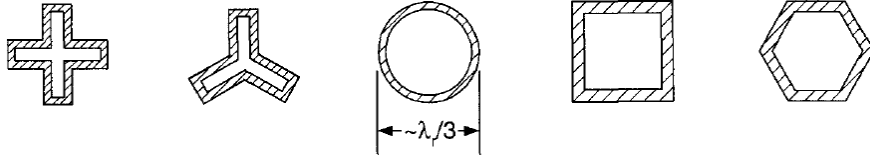
FSY'lerin frekans özellikleri baskın olarak periyodik yapıyı oluşturan elemanların geometrik şekilleri tarafından belirlenmektedir. Seçilen geometrik yapıya bağlı olarak, dalgaın geliş açısı ve polarizasyonuna olan duyarlılık, etkili olunan bant genişliği, çok bantlı frekans yanıtı gösterme gibi davranışlar değişecektir.

FSY'i oluşturan eleman geometrileri ile ilgili her hangi bir kısıtlama yoktur, her geometrik şekle sahip olabilirler. Konu ile ilgili öne çıkan araştırmacılar olan B. A. Munk tarafından, FSY geometrileri temelde dört adet kategoriye ayrılmışlardır (Munk, 2000); merkeze bağlı yapılar (Şekil 4), döngü yapılar (Şekil 5), yama yapılar (Şekil 6), hibrid yapılar (Şekil 7).



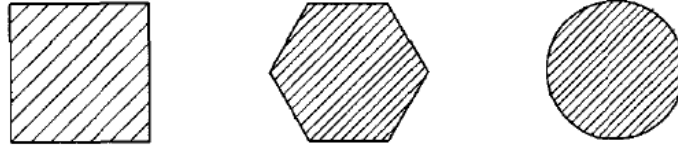
Şekil 4 : Grup1: n kutuplu, merkeze bağlı yapılar.

Merkeze bağlı yapılar, tek başına bir dipolden veya bir merkez üzerinde toplanan dipollerden oluşmuş yapılardır. λ_r (rezonans frekansındaki dalga boyu) yaklaşık olarak dipol boyunun iki katı mertebesinde (Munk, 2000).



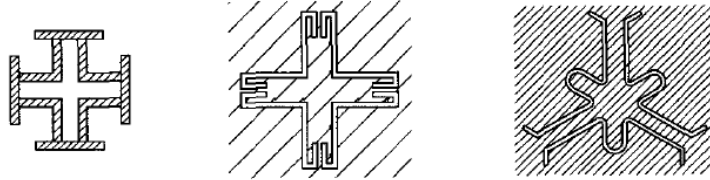
Şekil 5 : Grup2: Döngü yapılar.

Döngü yapılarda rezonans frekanstaki dalga boyu yaklaşık olarak elemanın çevre uzunluğuna eşittir. Periyodik elemanlar $\lambda_r/3$ aralıklarla yerleştirilebilirler. Bu sebeple istenmeyen dalga yayınımları elektromagnetik dalganın ancak çok daha büyük geliş açılarında mümkün olacaktır ve yapının açısallıkararlılığı yüksek olacaktır (MUNK, 2000).



Şekil 6 : Grup3: Yama yapılar.

Yama yapılarda rezonans frekanstaki dalga boyu yaklaşık olarak elemanın en büyük boyutunun iki katı mertebesinde olacaktır. Periyodik elemanlar minimum $\lambda_r/2$ aralıklarla yerleştirilebilirler. Bu sebeple açısallıkararlılıkları çok iyi değildir (Munk, 2000).

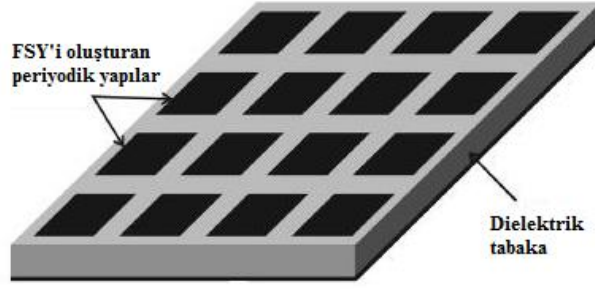


Şekil 7 : Grup4: Hibrid yapılar.

Hibrid yapılarda rezonans frekansındaki dalga boyu eleman geometrisine göre farklılıklar göstermektedir.

2.4 FSY'lerin üzerine monte edildikleri dielektrik yüzeylerin frekans karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi

FSY'leri oluşturan periyodik yama ve açıklık diziler destek amacıyla dielektrik tabakalar üzerine monte edilirler (Munk, 2000). Şekil 8'de dielektrik tabakalar ile FSY'lerin kullanımının bir örneği görülmektedir.

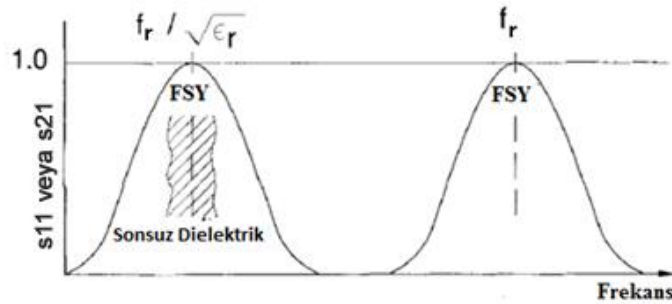


Şekil 8 : Dielektrik tabaka ve üzerine monte edilmiş FSY.

Periyodik bir yapı dielektrik tabaka üzerine monte edildiği zaman iki önemli etki meydana gelir (Munk, 2000):

a) Rezonans frekansı değişir:

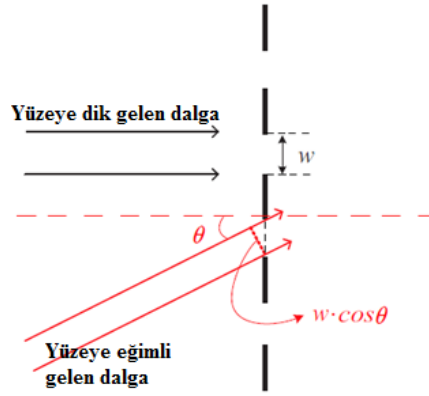
Eğer bir periyodik yapı her iki yönde de sonsuz genişlikte, ϵ_r bağıl dielektrik sabitli dielektrik tabakalar ile kaplanırsa Şekil 9’de görüldüğü gibi rezonans frekansı $f_{yeni} = f_r / \sqrt{\epsilon_r}$ olacaktır. Eğer FSY’in tek tarafı sonsuz genişlikte dielektrik tabaka ile kaplıysa bu durumda rezonans frekansı $f_{yeni} = f_r / \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}$ olacaktır. f_r ve f_{yeni} terimleri FSY’in tek başına rezonans frekansını ve dielektrik tabakanın eklenmesi durumundaki yeni rezonans frekansını ifade etmektedir. Eğer dielektrik tabakaların kalınlığı sonsuz uzunlukta olmayıp sonlu d kalınlığına sahipse bu durumda f_{yeni} yeni rezonans frekansı f_r ile $f_r / \sqrt{\epsilon_r}$ arasında değişecektir.



Şekil 9 : Sonsuz uzunluktaki dielektrik yüzey kalınlığının etkisi (Munk, 2000).

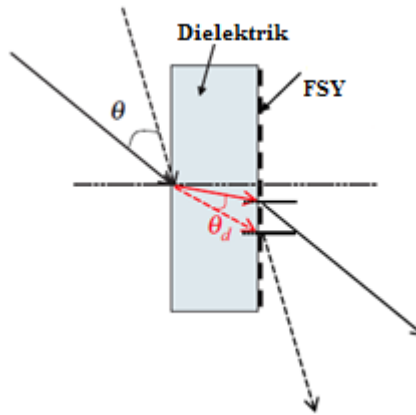
b) FSY’in gelen dalganın farklı geliş açılarına karşı olan karahlığı artar:

FSY’lerde rezonans frekansını belirleyen önemli etmenlerden birisi periyodik yapıdaki elemanlar arası mesafedir. Şekil 10’da görüldüğü gibi bu mesafe dalganın geliş açısına bağlı olarak $w \cdot \cos \theta$ şeklinde değişecektir.



Şekil 10 : Dalganın geliş açısının elemanlar arası boşluğa etkisi (Sung, 2006).

FSY'ler, Şekil 11'de görüldüğü gibi dielektrik yüzeye gelen dalgalar Snell kanunu ile ifade edildiği gibi kırılacaklar ve FSY'e daha dar bir açı ile geleceklerdir. Geliş açısının küçülmesi sebebiyle FSY'lerin farklı geliş açılarına olan kararlılığı artacaktır.



Şekil 11 : Dielektrik tabaka üzerinde FSY (Sung, 2006).

2.5 Frekans seçici yüzeylerin bina içi davranış etkilerinin incelenmesi

Minimum zayıflatma oranı

Konu ile ilgili literatürde incelenen çalışmada 2.4GHz bandında bant söndüren FSY'lerin kapalı mekânlarda kullanılması durumunda elde edilebilecek zayıflama oranlarının belirlenebilmesi için iç mekânın duvarları FSY'ler ile kaplanmış ve ölçümler yapılmıştır (RASPOPOULOS, 2006). Ölçüm sonuçları incelendiğinde bina içinde FSY'ler ile kaplı odalar arasında 10dB'lık bir zayıflamanın elde edilebildiği, açık kapıların ve pencerelerin sonuç üzerinde büyük etkisi olduğu görülmüştür.

2.6 Maksimum geliş açısı

Elektromagnetik dalga alıcıya ulaşana kadar çeşitli derecelerde yansıma ve kırılmalara uğramaktadır. Her yansımada enerjisinin bir kısmını yüzeye bırakmakta ve kat ettiği mesafe alıcıya direkt gelen dalgaya göre daha uzun olduğu için daha fazla yayılım kayıplarına uğramaktadır. Literatürde ofis içindeki radyo dalgalarının yayılımı konusunda incelenen araştırmalardan çıkarılan sonuç kapalı mekânları ayıran yüzeylere gelen dalganın enerjisinin minimum %70'inin yüzey normali ile maksimum 60^0 derecelik bir açı içinde yüzeye geldiğidir (PHILIPPAKIS, 2004). Bu sebeplerden dolayı proje kapsamında yutucu FSY tasarımlarının eniyileme çalışmaları elektromagnetik dalganın 45^0 derecelik geliş açısına göre gerçekleştirilmiştir.

2.7 Genel yapıdaki FSY'ler için ortaya çıkan istenmeyen yayınımların (yan loblar) incelenmesi

Şekil 12'de görüldüğü gibi periyodik elemanlardan oluşan bir yüzeye elektromagnetik dalga geldiği zaman o yüzeyden uzaya bir ışıma ortaya çıkar. Periyodik yüzeylerin komşu elemanları arası mesafe belli bir değerden büyük olursa, komşu elemanlardan yayılan dalgalar arasındaki faz farkı 2π ve katı olduğu zaman, ana ışıma demeti yanında istenmeyen yönlerde yan demet yayınımları meydana gelmektedir. Bu yayınımların hangi koşullarda ve geliş açılarında ortaya çıktığı literatürde detaylı açıklanmıştır (MUNK, 2000).



Şekil 12 : Periyodik bir yüzeye gelen düzlemsel dalga ve istenmeyen yayınımların meydana gelişini (MUNK, 2000).

3. GEREKÇE

Bu projede bina içi kablosuz iletişimde 2.4 - 2.4835GHz ISM serbest frekans bandında ortaya çıkan girişim etkilerini en aza indirmek için belirlenen frekans bandında gelen RF işaretleri söndüren, diğer frekanslarda ise iyi bir iletim karakteristiğine sahip FSY tasarımı hedeflenmiştir. Bu hedefe yönelik olarak belirlenen FSY geometrilerinin karmaşıklığı nedeni ile eşdeğer devre yöntemi ile desteklenmiş bir sayısal analiz yönteminin kullanılması uygun bulunmuştur. Gerçek uygulamalarda karşılaşılabilecek dalga geliş açısı, polarizasyonu gibi parametreler dikkate alınarak geniş geliş açılarını ve çapraz polarizasyonu destekleyen bir tasarım geliştirilmiştir. Ayrıca tasarlanan FSY'lerin üzerine kaplanacağı yapısal malzemelerin frekans karakteristiği üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Buna yönelik olarak proje çalışmalarında çeşitli yüzey malzemeleri göz önüne alınarak karşılaşılabilecek frekans kayma etkileri incelenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur.

4. YÖNTEM

FSY'lerin frekans karakteristiğini belirleyen yüzey geometrisi, tabakanın dielektrik özelliği ve dalga geliş açısı gibi etkenler önceki bölümde incelenmişti. Proje çalışmaları sırasında literatürde verilen ve ayrıca bu proje çalışmasında geliştirilen FSY geometrilerinin analizleri yapılmış ve proje isterlerine en uygun sonuçlar veren iki FSY geometrisi üzerinde eniyileme çalışmaları yürütülmüştür. Tasarım süreci ve seçilen bu iki geometri üzerindeki parametrik tasarım aşamaları aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

A) Frekans seçici yüzeylerin bina içi davranış etkilerinin incelenmesi:

FSY'lerin bina içlerinde kullanılmalarının elektromagnetik dalga yayılımı üzerine etkilerini belirleyebilmek için bu konuda yapılan çalışmalar proje kapsamında incelenmiştir. 2.45GHz ISM bandında bant söndüren FSY'lerin kapalı mekânlarda kullanılması durumunda bina içinde FSY'ler ile kaplı odalar arasında 10dB'lik bir zayıflamanın elde edilebildiği, açık kapıların ve pencerelerin sonuç üzerinde büyük etkisi olduğu göz önüne alınarak (Bölüm 2.5) bant söndüren FSY tasarımlarında iletim yönünde minimum 10dB'lik bir zayıflama değeri hedeflenmiştir.

B) Bina içi kullanımlarında FSY'lere elektromagnetik dalgaların olası geliş açısı aralığı

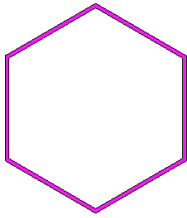
belirlenmesi:

Bina içindeki elektromagnetik dalgalarının mekânları ayıran yüzeylere yüzey normali ile kaç derecelik bir açı aralığı içinde geldiğini belirleyebilmek için bu konuda yapılan çalışmalar proje kapsamında incelenmiştir. Gelen dalganın enerjisinin minimum %70'inin yüzey normali ile maksimum 60^0 derecelik bir açı içinde yüzeye geldiği görülmüştür. Buna yönelik olarak proje kapsamında FSY tasarımlarının eniyileme çalışmaları elektromagnetik dalganın 45^0 derecelik geliş açısına göre gerçekleştirilmiştir.

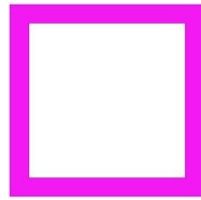
C) Genel yapıdaki frekans seçici yüzeylerin incelenmesi:

1. Temel periyodik yüzey geometrileri belirlenerek eşdeğer devre modeli ve HFSS programı aracılığı ile FSY'lerin frekans davranışlarının analizleri yapıldı:

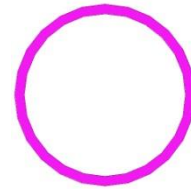
Projede yapılan çalışmalar sonucu proje isterlerine uygun frekans davranışı sergileyebilecek Şekil 13'de görülen 11 adet FSY geometrisi ortaya konmuştur. Bu geometrilerin bazıları proje kapsamında geliştirilmiş, bazıları ise temel FSY geometrileri arasından seçilmiştir. Bu geometrilerin geometrik ve parametrik eniyileme çalışmaları proje isterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen FSY geometrinden literatürde yer alan Geometri 4 ve Geometri 11 ve proje kapsamında geliştirilen Geometri 5 ve Geometri 6 proje isterlerine en iyi şekilde karşılayan geometriler olmuş ve eniyileme çalışmalarında incelenmek üzere seçilmişlerdir.



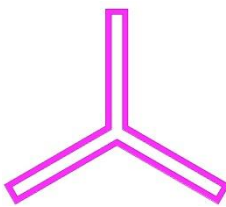
Geometri 1



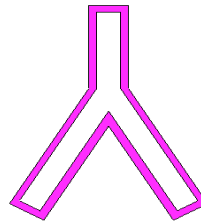
Geometri 2



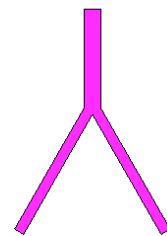
Geometri 3



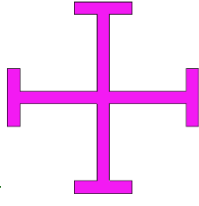
Geometri 4



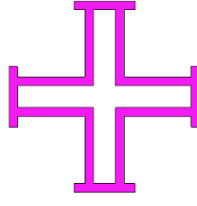
Geometri 5



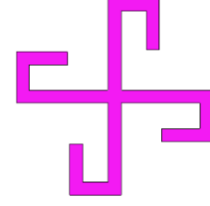
Geometri 6



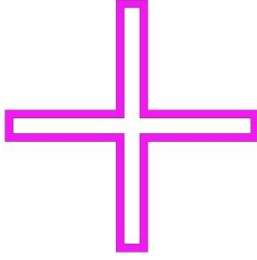
Geometri 7



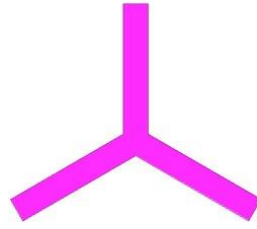
Geometri 8



Geometri 9



Geometri 10



Geometri 11

Şekil 13 : FSY geometrileri

2. Temel yapıdaki FSY'ler için ortaya çıkan istenmeyen yayınımlar (yan loblar) incelendi:

İstenmeyen yan lobların meydana gelme koşulları belirleyebilmek için bu konuda yapılan çalışmalar incelendiği zaman periyodik yüzeylerde komşu elemanlardan yayılan dalgalar arasındaki faz farkının 2π ve katı olduğunda ana ışına demeti yanında istenmeyen yönlerde yan demet yayınımlarının meydana geldiği görülmüştür. Elektromagnetik dalganın yüzey normali ile yaptığı geliş açısı ve periyodik elemanlar arası mesafe istenmeyen yayınımların ortaya çıkmaya başlayacağı minimum frekansı belirlemektedir. Proje kapsamında yapılan tasarımlarda periyodik elemanlar arası mesafe minimum seviyede tutularak istenmeyen yayınımların proje sonuçlarını etkilemeyecek çok yüksek frekanslarda ortaya çıkması sağlanmıştır.

3. FSY'lerin sonlu sayıda periyodik elemana sahip olmaları durumundaki davranışları incelendi:

Sonlu sayıda periyodik elemana sahip FSY'lerin sonsuz sayıdaki elemana sahip FSY'lere yakın davranış sergileyebilmeleri için minimum kaç adet periyodik elemana sahip olmaları gerektiği proje kapsamında araştırılmıştır. Tasarımları tamamlanan FSY'lerin imalatlarında laboratuvar ölçüm koşulları ve proje bütçesi göz önüne alındığında imal ettirilecek FSY'lerin en fazla belirli bir sayıda periyodik elemana sahip olmaları gerekmektedir. Bu konuda yapılan araştırmalar incelendiğinde periyodik elemanların sayıları 15x15 veya daha büyük olduğu zaman sonlu FSY'lerin frekans

karakteristiklerinin sonsuz FSY'lere çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bilgi ışığında FSY'lerin imalatları gerçekleştirilmiştir. (CHEN, 2008)

4. FSY'lerin üzerine monte edildikleri dielektrik yüzeylerin frekans karakteristiklerine etkilerinin analizi yapıldı:

Dielektrik tabakaların FSY'lerin üzerine etkilerini belirleyebilmek için proje kapsamında bu konuda yapılan çalışmalar incelenerek HFSS programı ile benzetim çalışmaları yapıldı. Elde edilen sonuçlara göre dielektrik tabakalar bağıl dielektrik sabitlerinin değerine ve Snell kanununa bağlı olarak üzerine monte edildikleri FSY'lerin elektromagnetik dalga'nın geliş açısına bağlılığını azaltmakta ve aynı zamanda dielektrik tabakanın kalınlığı ve bağıl dielektrik sabitinin değerine bağlı olarak da FSY'in rezonans frekansının değiştirmektedirler. Buna yönelik olarak proje çalışmamızda benzetim ve eniyileme çalışmalarını gerçekleştirebilmek için FSY'lerin imalat yöntemleri araştırılmış ve imalat yöntemine uygun olarak üzerine monte edilecekleri dielektrik tabakalar belirlenmiştir.

5. FSY'lerin bina içlerine nasıl monte edilebilecekleri araştırıldı:

Proje kapsamında FSY'lerin bina içlerinde monte edilmelerinde destek malzemesi olarak EPS (Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük) malzemeden yararlanılması düşünülmüştür. EPS köpükler binalarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmakta ve bina içi kullanım standartlarını (yangın vs.) sağlamaktadırlar.

EPS (Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük), petrolden elde edilen, köpük halindeki, termoplastik, kapalı gözenekli, tipik olarak beyaz renkli bir ısı yalıtım malzemesidir. Malzemenin % 98'i durgun havadır; %2'si ise polistrendir. Polistren malzemenin bağıl dielektrik sabiti 2.4 – 3 arasında ve kayıp tanjant değeri 100MHz için 0.0001 ve 3 GHz için 0.00033 değerindedir. EPS'nin (Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük) dielektrik sabitinin belirlenebilmesi iki farklı üreticiden alınan numunelerin ölçümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

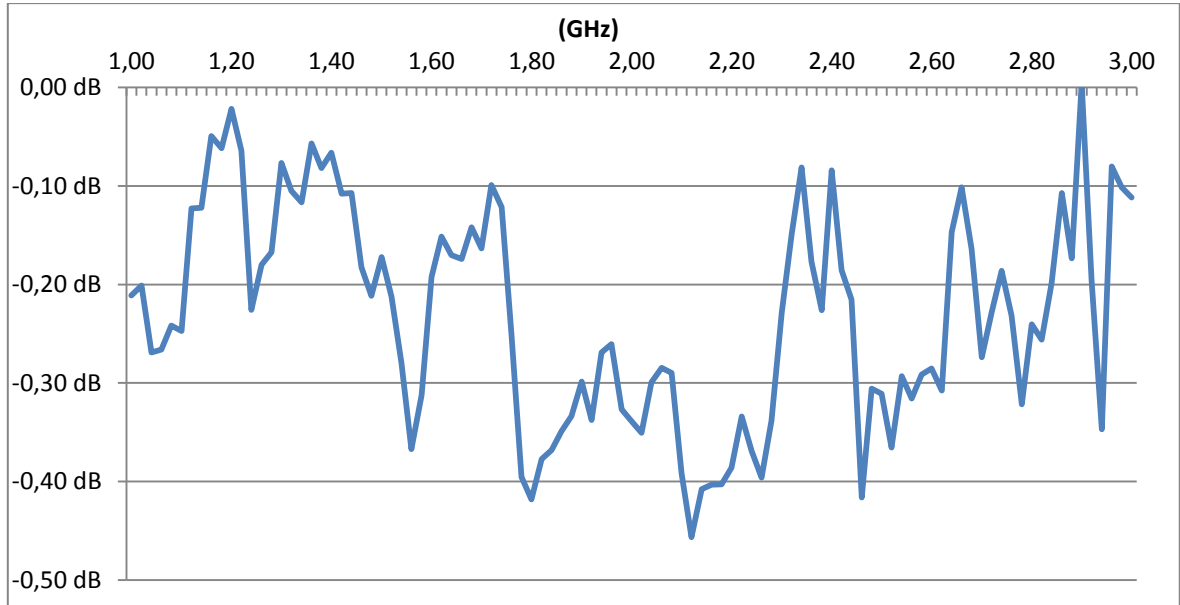
Ölçüm için kısa devre plakası ile sonlandırılan içi boş dalga kılavuzu kullanılmıştır. Dalga kılavuzunun içinde meydana gelen duran dalga'nın minimumlarının yerleri laboratuvarında ölçülmüş ve dalga boyu belirlenmiştir. İkinci aşamada ölçümü yapılacak numune kesilerek dalga kılavuzuna yerleştirilmiş ve meydana gelen duran dalga'nın minimumlarının yerleri tekrar ölçülmüştür. Dielektrik malzeme içindeki dalga'nın boyu daha kısa olduğu için duran dalga'nın minimumların yerleri değişmiştir. Bu değişim dalga kılavuzu içine yerleştirilen dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabiti ile orantılıdır. Bu değişim miktarından yararlanılarak iki numunenin bağıl dielektrik sabitleri

numune1= 1.0315 (mavi numune)

numune2= 1.027 (beyaz numune)

olarak ölçülmüştür. Bağlı dielektrik sabitinin bire çok yakın olması sebebiyle EPS köpük malzemenin üzerine FSY monte edildiği zaman FSY'lerin frekans karakteristiğinde de bir değişiklik meydana gelmeyecektir.

EPS malzemesinin gelen elektromagnetik dalgayı zayıflatma etkisini incelemek üzere 2cm kalınlığındaki EPS (numune1) malzeme, asetat tabaka üzerine basılmış “4 kollu” FSY'in arkasına monte edilmiş, EPS bulunmayan ölçüm sonuçları ile yapılan karşılaştırma sonuçları Şekil 14'deki gibi elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi EPS köpükler gelen dalga üzerinde 0.5dB'den çok daha az zayıflatmaya sebebiyet vermektedirler. Bu nedenle geçirme bandı üzerinde negatif bir etkisi olmayacaktır. Bu sonuçlar EPS köpüklerin bina içlerinde FSY'ler birlikte kullanılmaya uygun malzemeler olduklarını göstermektedir.



Şekil 14 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (Ölçüm)

6. FSY'lerin imalat yöntemleri üzerinde araştırmalar yapıldı:

Yapılan çalışmalar sonucu üç farklı imalat yöntemi belirlendi.

- A. Nano teknoloji ile mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılmak üzere tasarlanmış iletken mürekkep ile Teslin ve benzer plastik kâğıtların üzerine baskıların gerçekleştirilmesi. Nano teknoloji ile mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılmak üzere tasarlanmış iletken mürekkep yurt dışından getirtilerek plastik kâğıtların üzerine test FSY baskıları gerçekleştirildi. Baskı kafalarındaki mürekkeplerin çabuk kuruması, dolayısıyla baskı maliyetinin yükselmesi nedeni ile bu baskı tekniğinden vazgeçildi.

“C” şıkında anlatılan baskı tekniği daha uygun gerçekleştirme koşulları nedeni ile tercih edildi.

- B. Üzerleri bakır kaplı FR4 dielektrik tabakalar üzerine Serigrafi baskı tekniği ile FSY baskılarının gerçekleştirilmesi.
- C. Serigrafi baskı tekniğinde gümüş tabanlı iletken boyalar kullanılarak çeşitli dielektrik tabakalar üzerine FSY baskılarının gerçekleştirilmesi.

7. FSY’lerin davranışlarını belirlemek için gerekli olan ölçüm yöntemleri incelendi ve ölçümler için gerekli ekipman listesi oluşturuldu:

Yapılan çalışmalar sonucu üç farklı imalat yöntemi belirlendi. Ölçümler serbest uzay ölçüm tekniği ile fakülte olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer iki yöntem maliyetlerin yüksek olması ve gerekli ekipmanın bulunmaması sebebi ile tercih edilmemiştir.

a) Serbest uzay ölçüm tekniği:

Yansımasız odada antenlerin uzak alan koşulu sağlanarak ve FSY’lerin etrafının yutucu malzemeler ile çevrilmesi ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında imalatı gerçekleştirilen FSY’lerin ölçümü serbest uzay tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Daha detaylı açıklamalar dördüncü bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

b) Dalga kılavuzları ile ölçüm tekniği:

Serbest uzay ölçüm tekniğinde ölçüm yapılan ortamların antenlerin uzak alan koşullarını sağlayabilecek biçimde büyük ve ölçüm sonuçlarının da hatasız olabilmesi için yansımasız özelliğe sahip olması gerekmektedir. Dalga kılavuzlarından yararlanarak FSY’lerin frekans karakteristiklerinin ölçülmesi hem ölçüm sonuçlarındaki kararlılık, hem pratik ve çabuk olması ve hem de istenilen her ortamda gerçekleştirilebilmesi açısından önem kazanmaktadır.

c) Sonu açık dalga kılavuzları ile ölçüm tekniği:

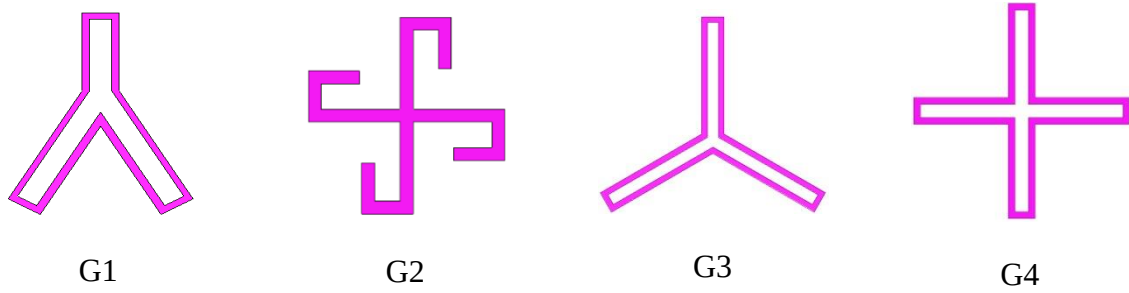
Uzak alan koşulu ve büyük demet genişlikleri sebebi ile standart boynuz antenler ile gerçekleştirilen ölçümlerde, kenarlarda meydana gelen kırınımın sebebiyet verdiği hatalı ölçüm sonuçlarından kurtulmak için, büyük ebatlı FSY’lere ihtiyaç duyulmaktadır. Büyük ebatlı FSY’lerin imalatlarında güçlüklerle karşılaşmakta ve maliyetler de daha yüksek olmaktadır. Maliyetlerin daha düşük olması için açık sonlu dalga kılavuzu ölçüm tekniği iyi bir alternatif olarak gözükmektedir. Dalga kılavuz antenlerin kesit alanları küçük olduğundan uzak alan mesafeleri kısa ve demet

genişlikleri dardır. Bu ölçüm tekniğinde küçük ebatlı FSY'lerin ölçümleri geniş olmayan laboratuvar ortamlarında rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir.

5. BULGULAR

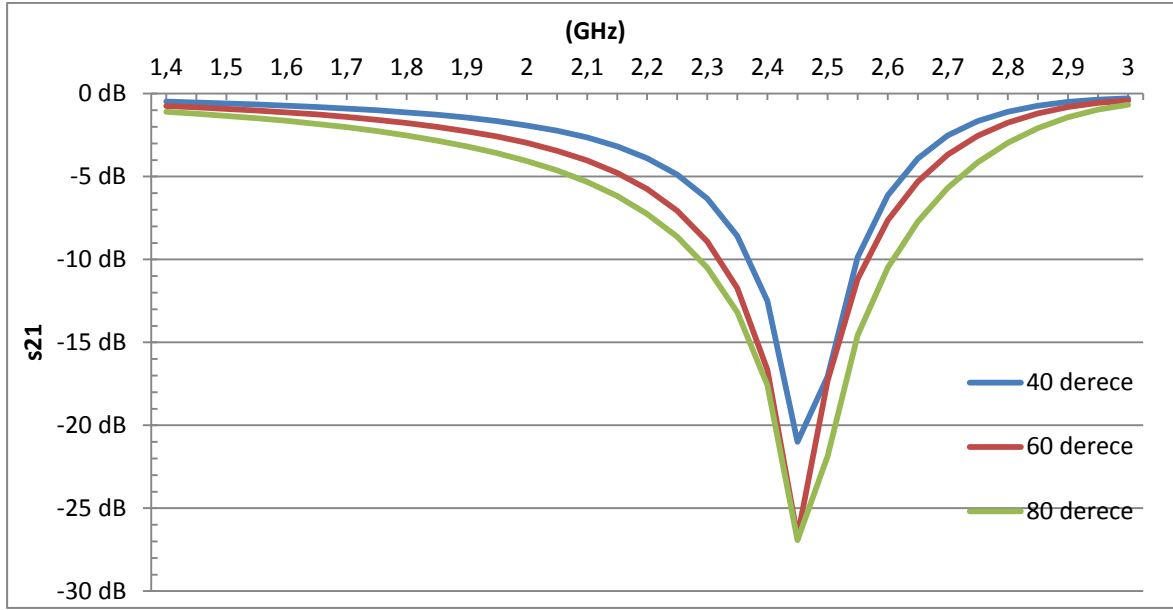
Proje kapsamında tasarlanacak yapısal yüzey malzemelerinin 2.45GHz ISM frekans bandında iletim ve yansıma katsayılarının -10dB'den küçük olması hedeflenmektedir. Bu hedefi gerçekleştirebilmek için ilk aşamada bant söndüren (iletim katsayısının değeri -10dB'den küçük) FSY tasarımları, ikinci aşamada ise bant yutucu FSY (iletim ve yansıma katsayılarının değerleri -10dB'den küçük) tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu proje isterlerine uygun frekans davranışı sergileyebilecek önceki bölümde incelenen (Şekil 13) 11 adet FSY geometrisi arasından dar bir söndürme bandına sahip olma ve elektromagnetik dalganın farklı geliş açılarında ve polarizasyonlarındaki kararlılık kriterlerine en uygun olan dört tanesi belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir.

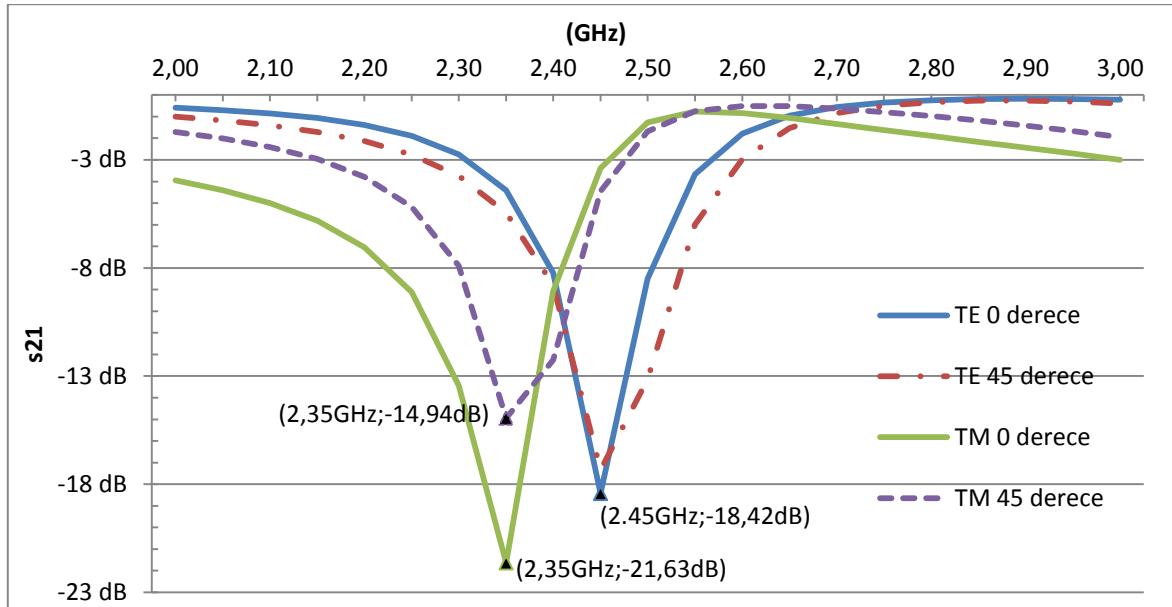


Şekil 15 : Amaca en uygun olarak seçilen dört adet FSY geometrisi

Belirlenen bu dört geometri arasında “G1” ile gösterilen ve “Y” harfi biçimindeki içi boş üç kollu FSY geometrisi bu proje çalışmaları kapsamında geliştirilmiştir. Çizelge 1-4’den anlaşılabileceği gibi bu geometri seçilen dört geometri içinde TE modunda gelen elektromagnetik dalgalar için en dar söndürme bandına sahip olan FSY geometrisidir. Bu geometri için iki kol arasındaki açı (aralarındaki açının 120 dereceden küçük olduğu iki kol) değiştirildiğinde rezonans frekansı değişmeden bant genişliği değiştirilebilmektedir. Bu sonuçlar Şekil16’da görülmektedir. TM modundaki ise performansı elektromagnetik dalganın “x” eksenine göre (Şekil 2) yaptığı farklı “ ϕ ” açılara göre değişmektedir. Bu sebepten dolayı proje isterlerine göre en uygun davranışı sergileyen iki FSY geometrisi arasında seçilmemiştir. Ancak bu tasarım TE modunda dar bandlı uygulamalar için oldukça uygun olacaktır. Şekil 17’de bu geometrinin benzetim sonuçları görülmektedir.



Şekil 16 : G1 geometrisi için TE modunda iletim katsayısının kollar arasındaki açığa göre (40, 60 ve 80 derece için) frekansla değişimi

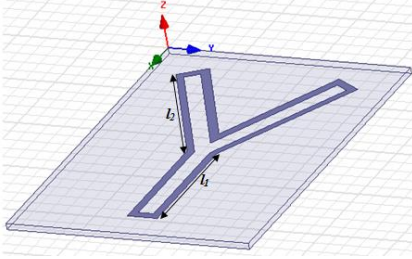


Şekil 17 : G1 geometrisi için TE ve TM modlarına iletim katsayısının frekansla değişimi

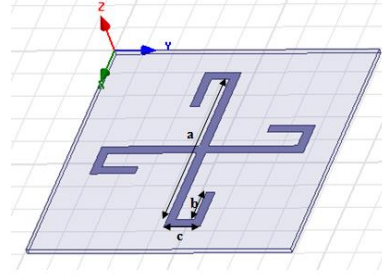
Parametrik ve geometrik eniyilemesi yapılan seçilmiş dört farklı FSY için elde edilen parametre değerleri aşağıda verilmiştir. Bu FSY geometrileri için karşılaştırmalı benzetim sonuçları Şekil 18-21’de ve karşılaştırmalı davranış incelemeleri de Çizelge 1-4’te

görülmektedir. Çizelgelerde S21 genliklerinin -10dB'nin altında kaldığı band aralıkları yanında -5dB ile -10dB arasındaki band genişlikleri de ayrıca verilmiştir.

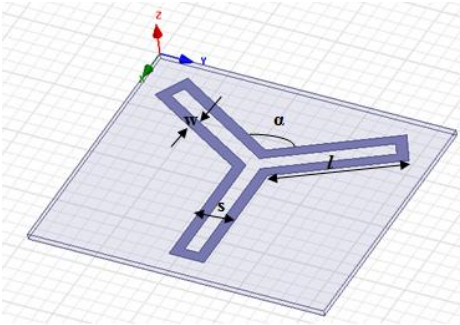
Seçilen 4 farklı FSY geometrisi:



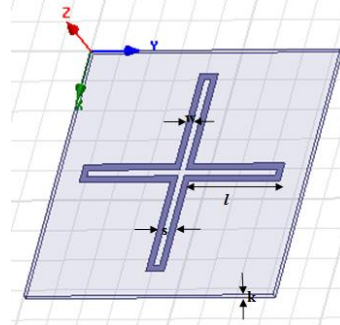
İletken kalınlığı (w): 1 mm
İletken kol genişliği (s): 4 mm
Üst iletken kol uzunluğu (l_1): 16 mm
Alt iletken kol uzunluğu (l_2): 20 mm
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 8 mm
(Alt şeritler arasındaki açı (α): 60 derece)



İletken kalınlığı (w): 1.5 mm
İletken şerit uzunluğu (a): 31 mm
İletken uç şerit uzunluğu (c): 6 mm
İletken yan şerit uzunluğu (b): 6 mm
FR4 tabakasının kalınlığı (k): 0.8 mm
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 10 mm



İletken kalınlığı (w): 1.5 mm
İletken kol uzunluğu (l): 18 mm
İletken kol genişliği (s): 5 mm
FR4 tabakasının kalınlığı (k): 0.8 mm
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 6 mm
(Alt şeritler arasındaki açı (α): 120 derece)



İletken kalınlığı (w): 1 mm
İletken kol uzunluğu (l): 15 mm
İletken kol genişliği (s): 3 mm
FR4 tabakasının kalınlığı (k): 0.8 mm
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 8 mm

θ	G	Rezonans [GHz]		Bant Genişliği (-10dB) [GHz]		(-5dB) - (-10dB) Bandı [GHz]	
		TE	TM	TE	TM	TE	TM
0	G1	2.5	2.55	0.1553	0.4309	0.06	0.25
	G2	2.4	2.4	0.2066	0.2125	0.1	0.1
	G3	2.5	2.5	0.17	0.1656	0.1	0.08
	G4	2.35	2.6	0.2916	0.3063	0.15	0.15
30	G1	2.5	2.55	0.1553	0.3708	0.06	0.2
	G2	2.45	2.5	0.2286	0.1656	0.09	0.07
	G3	2.45	2.5	0.1847	0.1378	0.15	0.07
	G4	2.35	2.6	0.3078	0.2565	0.15	0.12
45	G1	2.45	2.55	0.1847	0.3048	0.05	0.2
	G2	2.45	2.4	0.2389	0.1319	0.1	0.05
	G3	2.45	2.45	0.2081	0.1158	0.1	0.07
	G4	2.45	2.55	0.5335	0.2213	0.35	0.12
60	G1	2.45	2.5	0.1993	0.1876	0.1	0.1
	G2	2.35	2.35	0.3283	0.1026	0.15	0.02
	G3	2.45	2.45	0.3444	0.1041	0.15	0.04
	G4	2.4	2.55	0.3723	0.1172	0.18	0.07

Çizelge 1: $\theta = 45$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda FSY geometrilerinin, farklı θ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri ($\phi=0$ derece)

ϕ	G	Rezonans [GHz]		Bant Genişliği (-10dB) [GHz]		(-5dB) - (-10dB) Bandı [GHz]	
		TE	TM	TE	TM	TE	TM
0	G1	2.45	2.55	0.1744	0.2975	0.15	0.2
	G2	2.45	2.5	0.2565	0.1275	0.1	0.09
	G3	2.45	2.45	0.2096	0.1172	0.1	0.05
	G4	2.45	2.55	0.2785	0.1671	0.15	0.07
30	G1	2.5	2.45	0.2286	0.2066	0.15	0.12
	G2	2.4	2.45	0.2711	0.1363	0.15	0.05
	G3	2.5	2.45	0.2169	0.1128	0.15	0.05
	G4	2.55	2.45	0.2785	0.1597	0.15	0.1
40	G1	2.5	2.45	0.2946	0.1685	0.25	0.1
	G2	2.45	2.4	0.2609	0.1348	0.15	0.05
	G3	2.5	2.45	0.2140	0.1202	0.14	0.09
	G4	2.55	2.45	0.2741	0.1583	0.16	0.07
60	G1	2.55	2.5	0.4631	0.1334	0.35	0.05
	G2	2.45	2.35	0.2623	0.1304	0.15	0.05
	G3	2.5	2.45	0.2154	0.1216	0.12	0.1
	G4	2.55	2.45	0.2770	0.1597	0.15	0.09

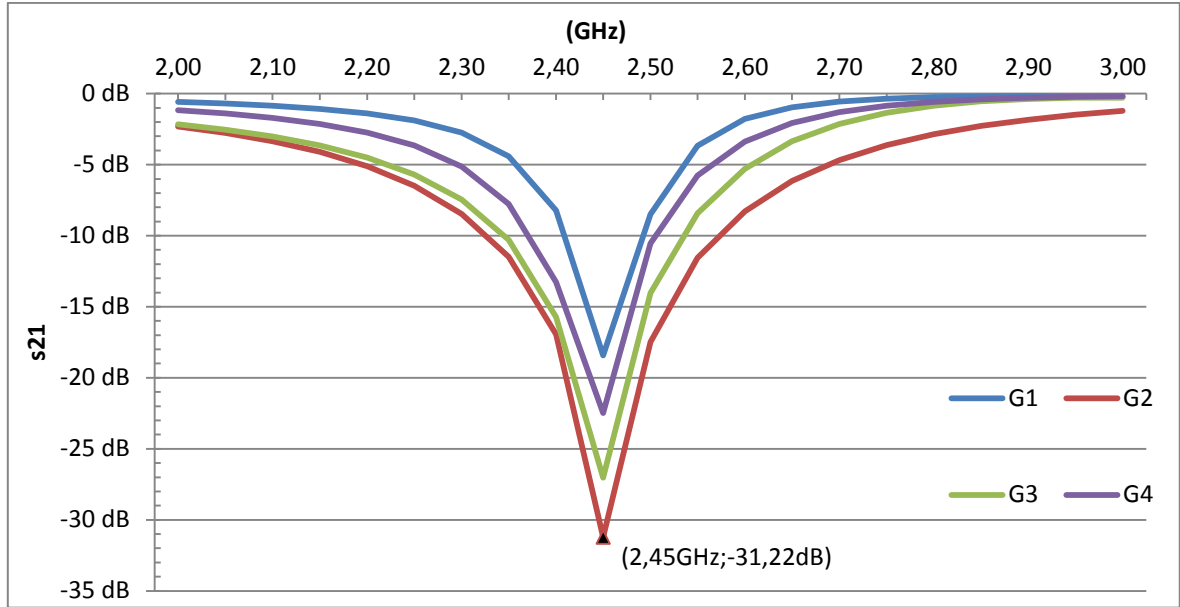
Çizelge 2: $\theta = 45$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda $\theta = 45$ için FSY geometrilerinin farklı ϕ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri

θ	G	Rezonans [GHz]		Bant Genişliği (-10dB) [GHz]		(-5dB) - (-10dB) Bandı [GHz]	
		TE	TM	TE	TM	TE	TM
0	G1	2.45	2.45	0.1172	0.2198	0.04	0.15
	G2	2.45	2.4	0.2345	0.2433	0.11	0.11
	G3	2.5	2.5	0.153	0.1522	0.1	0.08
	G4	2.45	2.65	0.3254	0.34	0.16	0.19
30	G1	2.45	2.45	0.1085	0.1861	0.05	0.15
	G2	2.45	2.4	0.2360	0.1920	0.11	0.1
	G3	2.45	2.45	0.167	0.1212	0.12	0.06
	G4	2.45	2.65	0.3107	0.2579	0.15	0.12
45	G1	2.45	2.45	0.1319	0.1524	0.05	0.13
	G2	2.35	2.35	0.2770	0.1641	0.13	0.05
	G3	2.45	2.45	0.2423	0.1028	0.1	0.06
	G4	2.45	2.6	0.3327	0.1935	0.2	0.1
60	G1	2.45	2.4	0.1436	0.1085	0.09	0.09
	G2	2.35	2.35	0.3561	0.1172	0.15	0.05
	G3	2.45	2.45	0.3201	0.1001	0.15	0.04
	G4	2.45	2.6	0.4074	0.1319	0.22	0.07

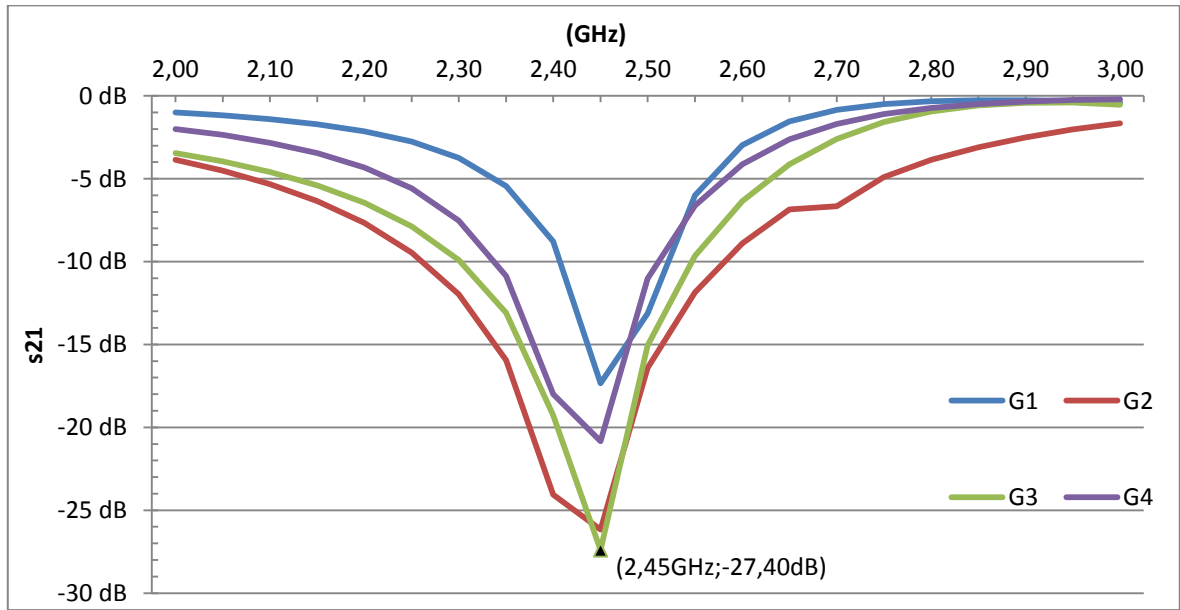
Çizelge 3: $\theta = 30$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda FSY geometrilerinin, farklı θ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri ($\phi=0$ derece)

ϕ	G	Rezonans [GHz]		Bant Genişliği (-10dB) [GHz]		(-5dB) - (-10dB) Bandı [GHz]	
		TE	TM	TE	TM	TE	TM
0	G1	2.4	2.45	0.1290	0.1534	0.05	0.1
	G2	2.4	2.55	0.2887	0.1422	0.1	0.07
	G3	2.45	2.45	0.2056	0.1132	0.1	0.05
	G4	2.65	2.75	0.23	0.2506	0.4	0.15
30	G1	2.45	2.4	0.1510	0.1216	0.1	0.05
	G2	2.35	2.35	0.3107	0.1597	0.15	0.1
	G3	2.45	2.45	0.2004	0.1108	0.12	0.05
	G4	2.75	2.65	0.3429	0.1920	0.18	0.1
40	G1	2.45	2.4	0.1759	0.1143	0.15	0.05
	G2	2.4	2.35	0.3195	0.1568	0.12	0.1
	G3	2.45	2.45	0.2110	0.1202	0.12	0.08
	G4	2.8	2.65	0.3327	0.1847	0.17	0.1
60	G1	2.45	2.45	0.2594	0.0982	0.15	0.05
	G2	2.4	2.3	0.3034	0.1553	0.12	0.08
	G3	2.5	2.5	0.3001	0.1001	0.13	0.03
	G4	2.75	2.65	0.3444	0.2052	0.18	0.1

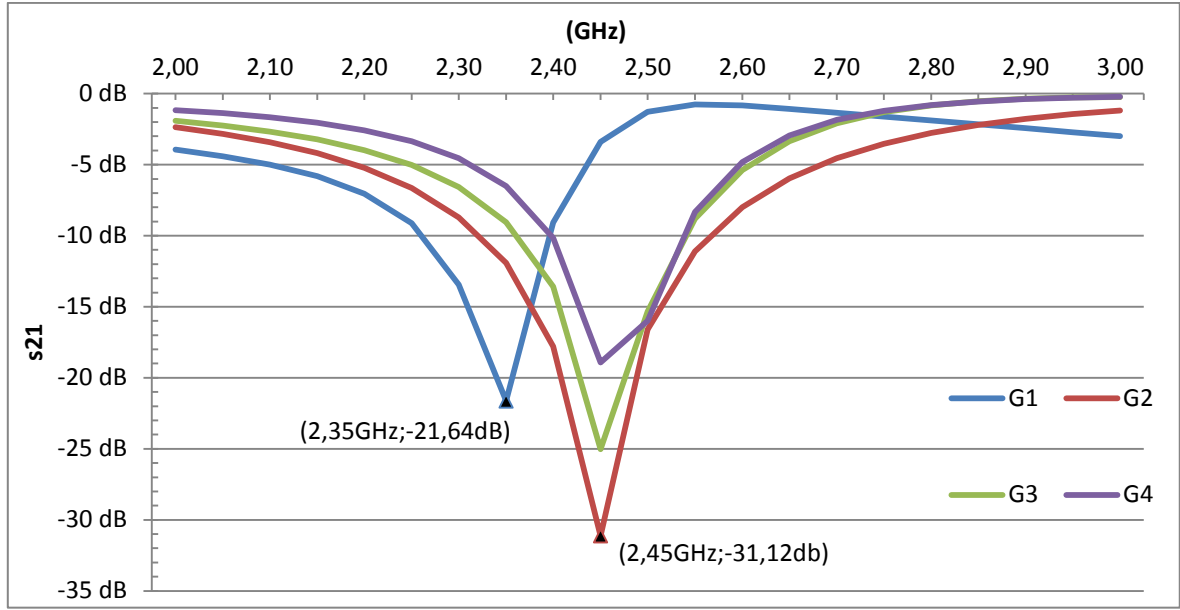
Çizelge 4: $\theta = 30$ dereceye göre yapılan eniyileme sonucunda $\theta = 45$ için FSY geometrilerinin farklı ϕ açılarına göre karşılaştırmalı davranış incelemeleri



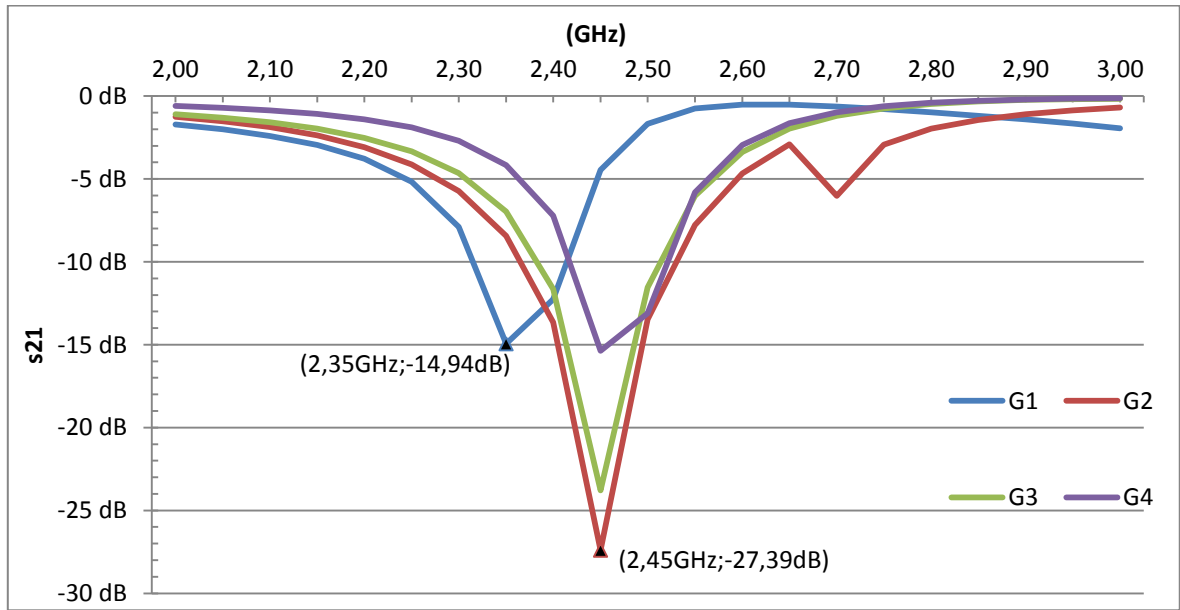
Şekil 18 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$



Şekil 19 : TE modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$



Şekil 20 : TM modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$



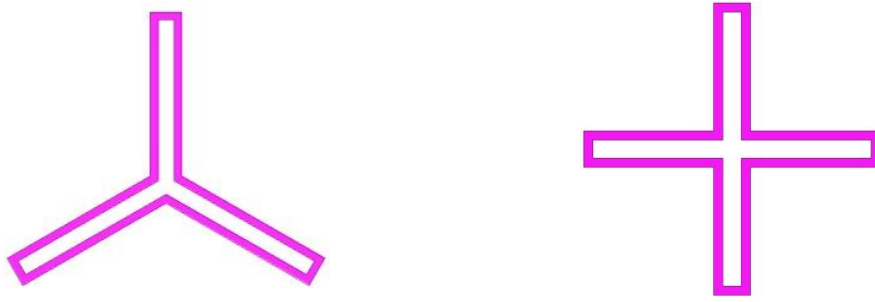
Şekil 21 : TM modunda iletim katsayısının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$

Yukarıdaki grafikler ve çizelgeler incelendiğinde aşağıdaki belirtilen sonuçlar değerlendirilmiştir:

- G1 geometrisinin TM modundaki rezonans frekansında kaymalar olduğu görülmektedir.

- b) G2 geometrisi için rezonans frekansında kaymalar olmamakta ancak söndürme bant genişliğinin proje isterlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir.
- c) G3 geometrisinde rezonans frekansında kaymalar olmamakta ve söndürme bant genişliğinin proje isterlerine göre uygun olduğu görülmektedir.
- d) G4 geometrisi için rezonans frekansında kaymalar olmamakta ve söndürme bant genişliğinin proje isterlerine göre uygun olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre iletim karakteristiği bakımından proje isterlerine göre en uygun davranışı sergileyen iki FSY geometrisi G3 ve G4 olarak belirlenmiştir. Şekil 22’de seçilen iki FSY geometrisi görülmektedir.



Şekil 22 : (a) Üç Kollu yapı, (b) Dört Kollu yapı

Proje kapsamında, imalat ve FSY’lerin bina içlerine monte edilebilme yöntemlerinin seçilmesi ile, FSY baskı tabakalarının elektriksel özellikleri, kalınlıkları ve iletken yolların iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Seçilen iki FSY geometrisinin imalat yöntemine göre geometrik parametreleri üzerinden eniyileme çalışmaları yapılarak, imalatları gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamından ölçümleri yapılmıştır. Aşağıda bu çalışmaların detayları verilmiştir:

5.1 FSY'lerin imalatlarının gerçekleştirilmesi

Üzerleri bakır kaplı FR4 dielektrik tabakalar üzerine serigrafi baskı tekniği ile FSY'lerin imalatlarının gerçekleştirilmesi:

Serigrafi (ipek baskı) metal, seramik, kumaş, cam ve plastik gibi her türlü yüzeye baskı yapılabilmeye olanak sağlayan bir tekniktir. Elektronik kart imalatı gerçekleştiren firmalar bu teknik ile bakır kaplı dielektrik tabakalar üzerine devre baskısı gerçekleştirmektedirler.

FR4, cam ipliklerin epoksi reçine ile dokunmasından elde edilen ateşe dayanıklı bir dielektrik tabakadır. Üzerine bakır kaplanması ile elektronikte baskı devre kartların imalatında kullanılmaktadır. Bağlı dielektrik sabiti üretici firmaya ve modele göre değişmekle beraber 4.4'e yakın bir değerdedir. Elektronik kart imalatı gerçekleştiren firmalarda FR4 üzerine FSY baskısının rahatlıkla gerçekleştirilebilmesi nedeniyle FSY imalatı için uygun bir malzemedir.

Kolay temin edilebilmesi ve maliyetinin ucuz olması sebebi ile üzerine FSY baskılarının gerçekleştirileceği dielektrik tabakalar FR4 olarak belirlenmiştir. Bu tabakaların uygulamadaki dezavantajları elektriksel özelliklerinin (bağıl dielektrik sabiti, kayıp tanjant) frekansla değişmesidir. Rogers, Arlon gibi büyük üreticilerin yüksek frekans uygulamaları için geliştirdikleri dielektrik tabakalar FR4'e oranla daha pahalıdır ve yurt içinde temin edilmeleri mümkün olmadığından yurt dışından getirilmeleri gerekmektedir. FR4 dielektrik tabakaların kalınlığı temin edilmelerindeki kolaylıklar göz önüne alınarak 0.8mm ve 1mm seçilmiştir.

FSY'lerin benzetim çalışmaları sonsuz sayıda periyodik elemana sahip oldukları varsayımı göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir (MITTRA, 1988). Benzer bir frekans karakteristiğine sahip olabilmeleri için FSY'lerin minimum eleman sayısının her bir koordinat eksenini için minimum 15 olduğu yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir (CHEN, 2008). 2.4GHz için elemanlar arası mesafenin yaklaşık 3cm olduğu göz önüne alınırsa laboratuvarında ölçümlerin sağlıklı olabilmesi için FSY'in boyutlarının minimum 45cmx45cm olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Büyük boyutlardaki PCB baskıları az sayıdaki firma tarafından yüksek maliyetlerle yapılmaktadır.

Baskı maliyetlerini düşürebilmek için FSY'lerin her biri $7 \times 7 = 49$ periyodik elemana sahip dokuz adet tabaka olarak basılmışlardır. Basımı gerçekleştirilen tabakaların yan yana getirilmesi ile 21×21 adet periyodik elemana sahip FSY'ler elde edilmiştir.

FSY'lerin baskısını gerçekleştirebilmek için Ansoft HFSS programından yapılan tasarımlar Agilent ADS programı yardımıyla “Gerber” dosya formatına dönüştürülerek FSY baskısını gerçekleştirecek firmaya gönderilmiştir.

FSY'lerin Baskılarının Çeşitli Dielektrik Tabakalar Üzerine Serigrafi Baskı Tekniği ve Gümüş Tabanlı İletken Boyalar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi:

Nano teknoloji kullanılarak üretilmiş iletken boyalar ve Serigrafi baskı tekniği kullanılarak frekans seçici yüzey imalatı yapılabileceği görülmüş ve ağırlıklarının çok az olması ve rulo halinde sarılabilmeleri sebepleriyle FSY baskıları asetat tabakalar üzerine gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen FSY'lerin katlanmaları veya rulo halinde sarılmaları durumunda iletken yolların en az zarar görmesi için üzerine baskının gerçekleştirildiği asetat tabakaların kalınlığı 125µm (baskıyı gerçekleştiren imalatçı bilgileri doğrultusunda) olarak seçilmiştir.

FSY'lerin baskısını gerçekleştirebilmek için Ansoft HFSS programından yapılan tasarımlar “Corel Draw” programına “DXF” dosya formatında aktarılmış ve “Corel Draw” dosya formatında FSY baskısını gerçekleştirecek firmaya gönderilmiştir.

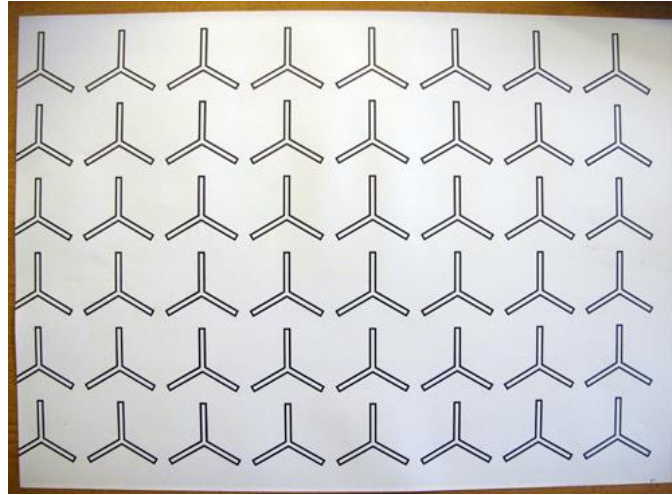
Mürekkep Püskürtmeli Yazıcıda İletken Mürekkep ile FSY Baskılarının Gerçekleştirilmesi:

Son yıllarda nano teknoloji kullanılarak mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılabilecek iletken mürekkeplerin geliştirilmesi için çalışmalar yürütülmektedir. Amerikan Methode firması tarafından mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılabilecek dağılma yapmayan iletken mürekkep tasarımı gerçekleştirilmiştir. Projenin ikinci döneminde Methode firması ile iletişim kurulmuş ve firmanın üretimini gerçekleştirdiği iletken mürekkepten 50gr satın alınmıştır. İletken mürekkep ile baskının gerçekleştirilebilmesi için A3 baskı ebadına sahip HP8600DN model yazıcı proje kapsamında satın alınmıştır.

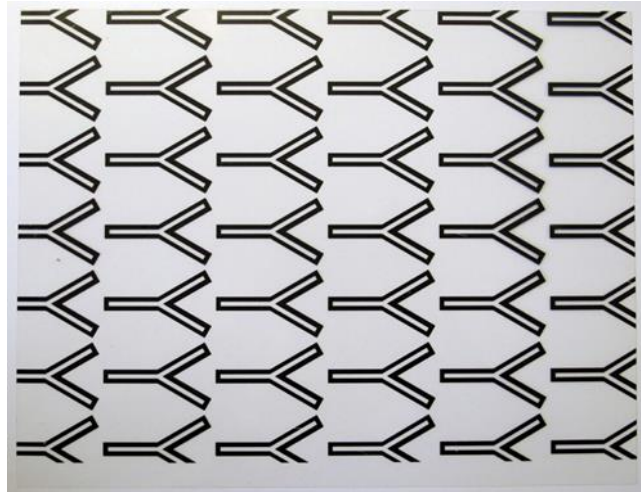
Yurt dışından getirilen iletken mürekkep ile satın alınan yazıcının kartuşları doldurulmuştur. Yazıcının doldurulan kartuşları mikrodavre kontrollü oldukları için ilk birkaç prototip baskıdan sonra yazıcı tarafından tanınmama sorunu ortaya çıkmış ve yeni baskılar alınamamıştır. Karşılaşılan bu sorunlar yurt dışında üretilmiş ve doldurulabilen özel kartuşların (proje kapsamında edinilen HP8600DN yazıcısına uygun) bulunması ve satın alınması ile çözülmüş ve deneme baskıları yapılmıştır. Yapılan baskılarda 1Ω/kare yüzey direnci elde edilmiştir. Bu direnç değeri beklenenden daha yüksek çıkmıştır. Getirilen iletken

mürekkebin yazıcı içinde kuruma süresinin (4 saat) normal mürekkeplere oranla çok daha kısa olması sebebiyle iletken mürekkep yazıcının baskı kafalarının içinde kuruması problemiyle de karşı karşıya kalınmıştır.

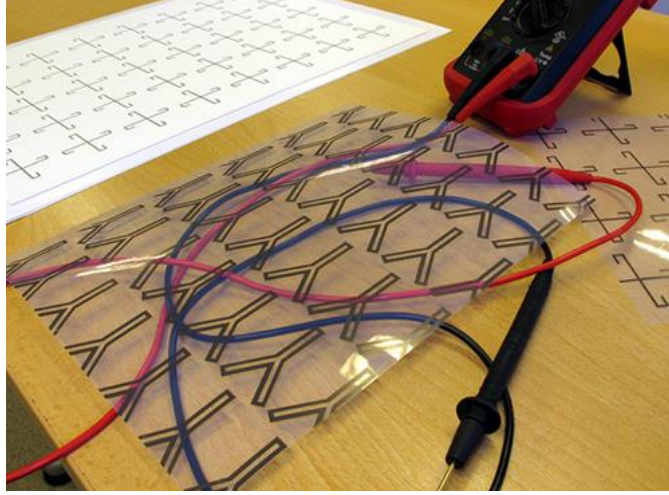
Bu baskı yönteminde karşılaşılan söz konusu problemler ve baskıda elde edilebilen yüzey direnci çok düşük olan yeni bir baskı yönteminin belirlenmesi (gümüş katkılı özel iletken boyaların serigrafi baskı tekniğinde kullanılması ile) sebebiyle bu baskı yönteminden vazgeçilmiştir. Şekil 23-25’de mürekkep püskürtmeli yazıcıda iletken mürekkep ile baskısı gerçekleştirilen prototip FSY’ler görülmektedir.



Şekil 23 : Teslin kâğıt üzerine gerçekleştirilen FSY baskısı



Şekil 24 : Asetat kâğıt üzerine gerçekleştirilen FSY baskısı



Şekil 25 : Baskısı yapılmış FSY'ler

5.2 İmalatları gerçekleştirilen FSY'lerin laboratuvar ortamında ölçümlerinin gerçekleştirilmesi

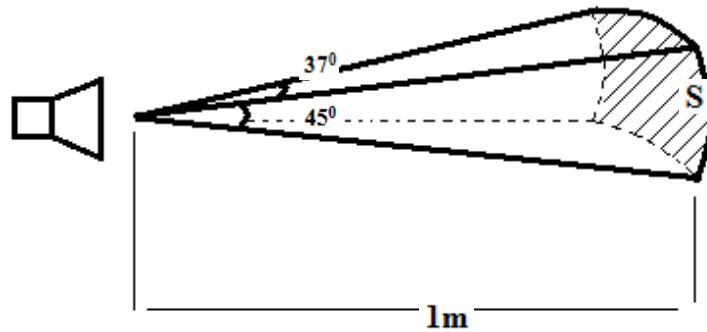
Ölçüm sisteminde laboratuvarda bulunan ve Şekil 26'de görülen lineer polarizasyonlu geniş bantlı Schwarzbeck Mess BBHA 9120D model horn anten kullanılmıştır. Antenin 2.45GHz için "Proje Gelişme Raporu 3"de hesaplanan uzak alan mesafesi yaklaşık 1m'dir. 2.45GHz çalışma frekansında antenin ışıma paterninin 3dB demet genişliği E düzlemi için yaklaşık 45° ve H düzlemi için yaklaşık 37° 'dir. Horn antenin uzak alanda (1m) aydınlattığı S bölgesinin boyutları (Şekil 27) aşağıdaki değerlere sahiptir.

E – Düzlemi (Düşey Boyut) $\approx 0.83\text{m}$

H – Düzlemi (Yatay Boyut) $\approx 0.67\text{m}$



Şekil 26 : Horn anten BBHA



Şekil 27 : Horn antenin uzak alanda aydınlattığı S bölgesi

Ölçümler yansısız odada gerçekleştirilmiştir. Şekil 28-30'de görüldüğü gibi ölçüm düzeneğinde ölçümü yapılacak FSY örnekleri tutucunun merkezine yerleştirilmiş ve etrafı piramit yutucu malzemeler ile çevrilmiştir.

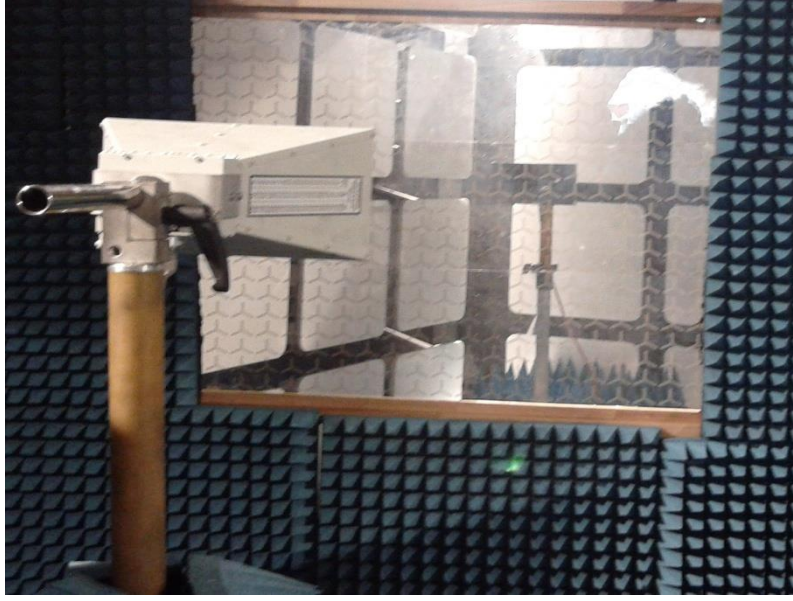
Laboratuvar ölçümlerinde horn antenler ile FSY arasındaki mesafe uzak alan koşulu ve yansısız odanın büyüklüğü göz önüne alınarak 120cm olarak ayarlanmış ve Agilent N5230A model network analizörden 0dBm çıkış gücü için 1GHz-3GHz aralığında 50MHz aralıklarla frekans taraması yapılmıştır.



Şekil 28 : Yansısız odada ölçüm düzeneğinin hazırlanması



Şekil 29 : Yansısız odada ölçüm düzeneğinin hazırlanması



Şekil 30 : Ölçüm düzeneği

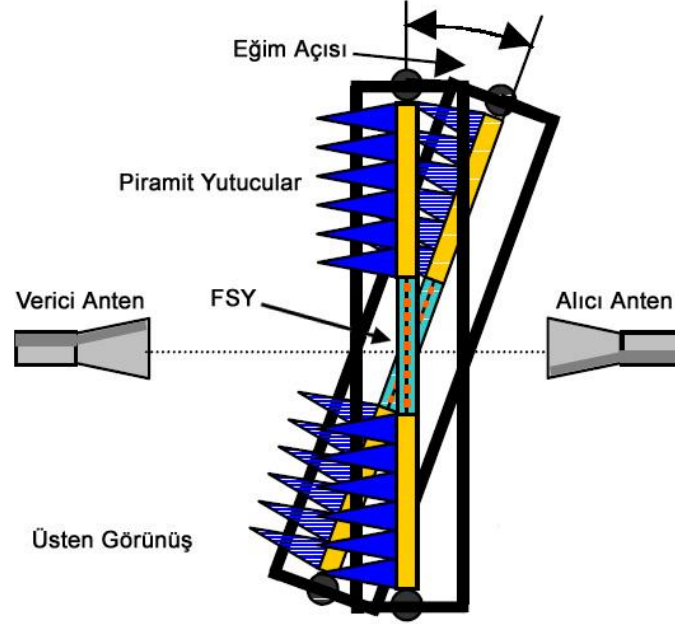
Ölçüm düzeneğinde FSY yokken yapılan ölçümlerin referans alınması ile sistemin kalibrasyonu yapılmış ve ölçüm panelinin kenarlarından meydana gelen kırınımın, zeminden ve duvarlardan yansiyarak gelen dalgaların ölçüm sonuçlarına etkisi minimize edilmiştir.

Serbest uzayda ölçüm yapılırken yapılacak kalibrasyonların önemli bir adımı **zaman pencerelemesi** işleminin gerçekleşmesidir. Ölçümü yapılacak FSY'in kenarlarından, tutucu kenarlarından, duvarlardan ve yerden yansiyarak gelen elektromagnetik dalgalar daha uzun mesafe kat edeceklerinden FSY'den geçerek gelen dalgalara göre gecikmiş olarak alıcı antene ulaşacaklardır. Bu ışınların bozucu etkileri network analizörün "time domain gating" özelliği ile elemine edilebilmektedir. Bu amaçla, ilk adımda FSY kaldırılarak, sonra da FSY yerine metal bir plaka konularak network analizörde s11 yansıma katsayısı zamanın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Her iki ölçüm karşılaştırılarak, ölçümü yapılacak FSY için zaman penceresi (ölçümün başlama ve bitiş aralığı) belirlenmiş ve böylece yansiyarak gelen dalgaların etkisi giderilmiştir.

Ölçümlerde, antenlerin karşılıklı olarak birbirlerini görmesi ve FSY paneline paralel olmaları horn antenlerin kenarlarından ölçüm panelinin kenarlarına olan mesafenin eşitlenmesi ile sağlanmıştır.

Farklı geliş açıları için yapılan ölçümlerde antenler sabit tutularak Şekil 31'de görüldüğü gibi FSY paneli ölçüm yapılacak açığa uygun olarak azimut ekseninde

döndürülmüştür. Zeminde ölçüm yapılacak açılar için kılavuz çizgileri çizilmiştir. TE ve TM modlarındaki ölçümler için antenler kendi eksenleri etrafında 90^0 döndürülmüşlerdir.



Şekil 31 : Elektromagnetik dalganın farklı geliş açıları için ölçümlerin gerçekleştirilmesi

Ölçüm sistemindeki hata kaynakları:

FSY geometrilerinin HFSS benzetimleri bütün periyodik eleman geometrileri için elektromagnetik dalganın eş fazda ve genlikte geldiği varsayımı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sistemindeki antenlerin ışıma paternlerinin şekli ve antenler ile FSY arasındaki mesafenin çok büyük yapılamaması (yansımaz oda boyutları) sebepleri ile bütün periyodik eleman geometrilerinin eş fazda ve genlikte uyarılamaması ölçüm sonuçlarındaki hata sebeplerinden birisidir.

FSY'lerin basıldığı tabakaların bağıl dielektrik sabitinin frekans bağımlılığı ölçümlerle beklenen sonuçlar arasında bir farkın ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

Ahşap tutucudan kaynaklanan saçılma ve yansımalar da ölçüm sonuçlarındaki hata için bir sebep olarak görülebilir.

Bant Söndüren FSY Baskılarının Ölçüm Sonuçları

Proje isterlerine göre tasarlanan bant söndüren FSY'lerin iletim katsayısının (S_{21}) 2.4GHz frekans bandında minimum -10dB olması hedeflenmektedir. Bu bölümde, **projede geliştirilen geometrilerin S_{21} iletim katsayılarının değerlerinin frekansa bağlı değişimi TE_{00} ve TM_{00} modlarında grafikler şeklinde gösterilecektir. HFSS analizlerinde diğer TE ve TM modlarının sönümlü oldukları izlenmiş dolayısıyla grafiklerde bu modlara yer verilmemiştir.** S_{21} iletim katsayısının gelen dalganın FSY yüzey normali (z eksen; Şekil 2 ve Şekil 32) ile yaptığı açı olan θ açısına göre değişimi grafiklerde yer alacaktır. Gelen dalganın x eksen ile yaptığı açı olan ϕ açısı değeri sıfır olarak seçilmiştir. Bant söndüren FSY tasarımlarında yansıma katsayısının (S_{11}) değeri ile ilgili bir hedef olmadığı için S_{11} analizlerine bu incelemede yer verilmemiştir.

FR4 tabakalar üzerine gerçekleştirilen baskıların ölçüm sonuçları

Tasarımları ve eniyileme çalışmaları tamamlanan iki farklı FSY geometrisinin baskıları üzerleri bakır kaplı FR4 dielektrik tabakalar üzerine serigrafi baskı tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Eniyileme çalışmaları aşağıda değerleri verilen FR4 dielektrik tabaka özelliklerine göre yapılmıştır:

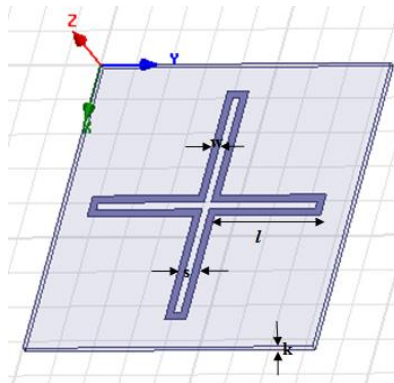
Kalınlık: 0.8mm

Bağıl dielektrik sabiti: 4.54

Kayıp tanjant: 0.022

Gerçekleştirilen tasarımların laboratuvar ölçüm sonuçları ve HFSS benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Dört Kollu Yapı



Şekil 32 : Dört kollu yapı

İletken kalınlığı (w): 1 mm

İletken kol uzunluğu (l): 15 mm

İletken kol genişliği (s): 3 mm

FR4 tabakasının kalınlığı (k): 0.8 mm

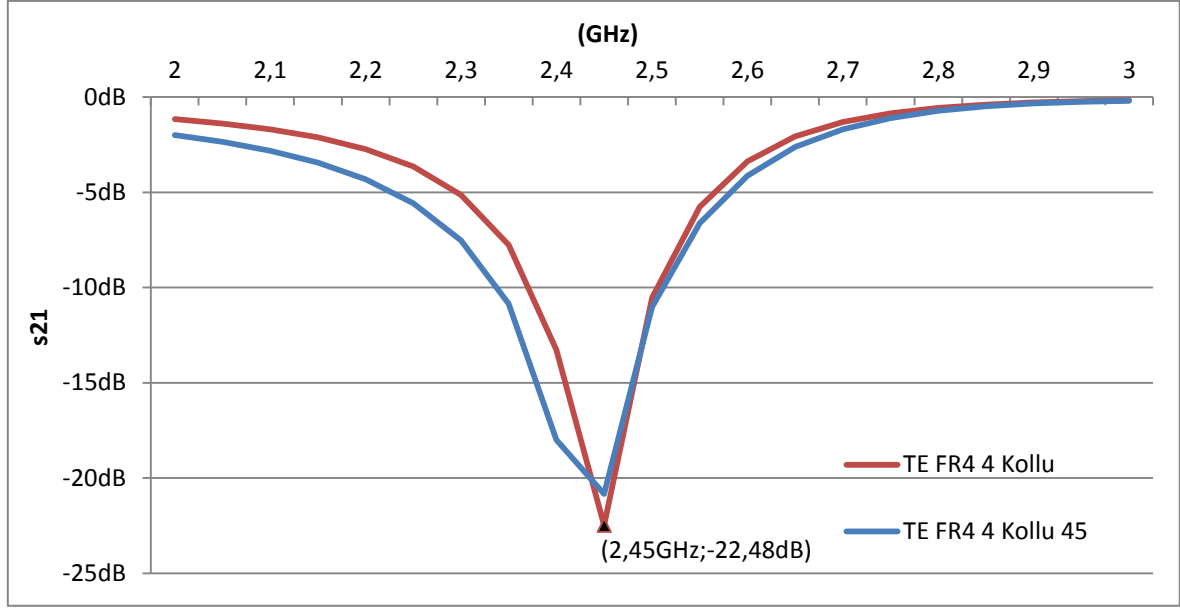
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 8 mm

Şekil 33 ve Şekil 34’de, TE modunda $\theta=0^0$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında 200MHz’lik bir kayma görülmektedir.

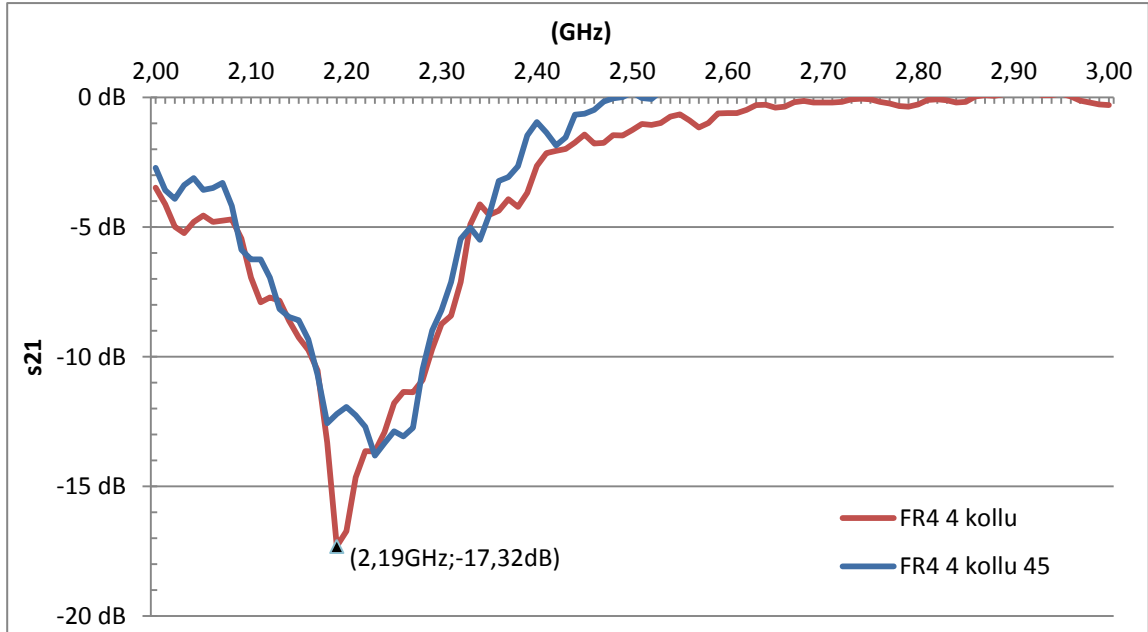
Şekil 33 ve Şekil 34’de, TE modunda $\theta=45^0$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında yaklaşık 200MHz’lik bir kayma görülmektedir.,

Şekil 35 ve Şekil 36’de, TM modunda $\theta=0^0$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında yaklaşık 200MHz’lik bir kayma görülmektedir.

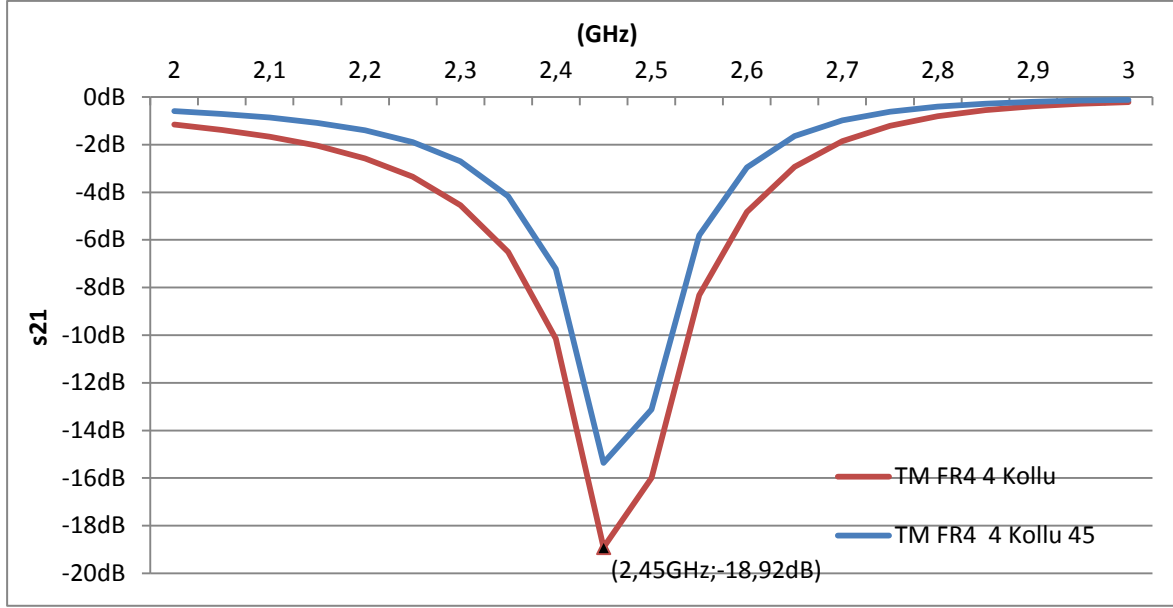
Şekil 35 ve Şekil 36’da, TM modunda $\theta=45^0$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında yaklaşık 250MHz’lik bir kayma görülmektedir.



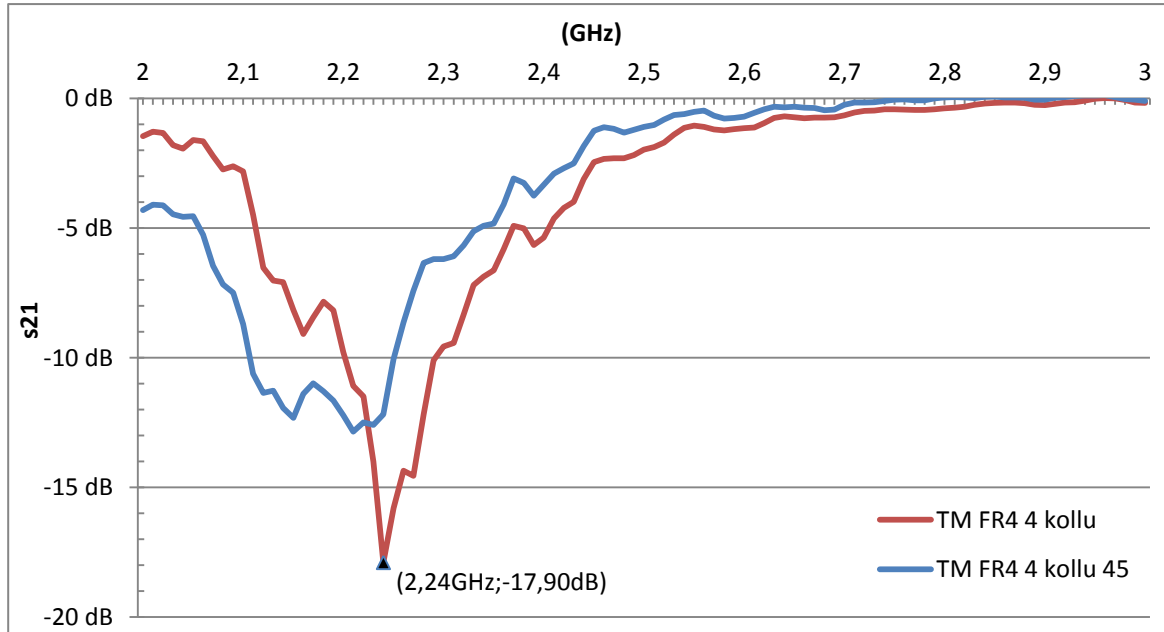
Şekil 33 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)



Şekil 34 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)



Şekil 35 : TM modunda ve $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)



Şekil 36 : TM modunda ve $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda oluşan bu farklılıkların aşağıda belirtilen sebeplerden meydana geldiği anlaşılmıştır;

1) FR4 dielektrik tabaka kalınlığı hesaplamalarda 0.8mm olarak alınmıştır. Baskı sonucu gelen FR4 tabakalarının kalınlığının 1mm civarında olduğu ve bu kalınlık değerinde küçük de olsa değişimler olduğu görülmüştür.

2) FR4 tabakaların dielektrik sabitlerinin değeri ortamın sıcaklığına, nem miktarına ve çalışılan frekans değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeplerle dielektrik sabitinin değeri hesaplamalarda yaklaşık olarak alınmıştır.

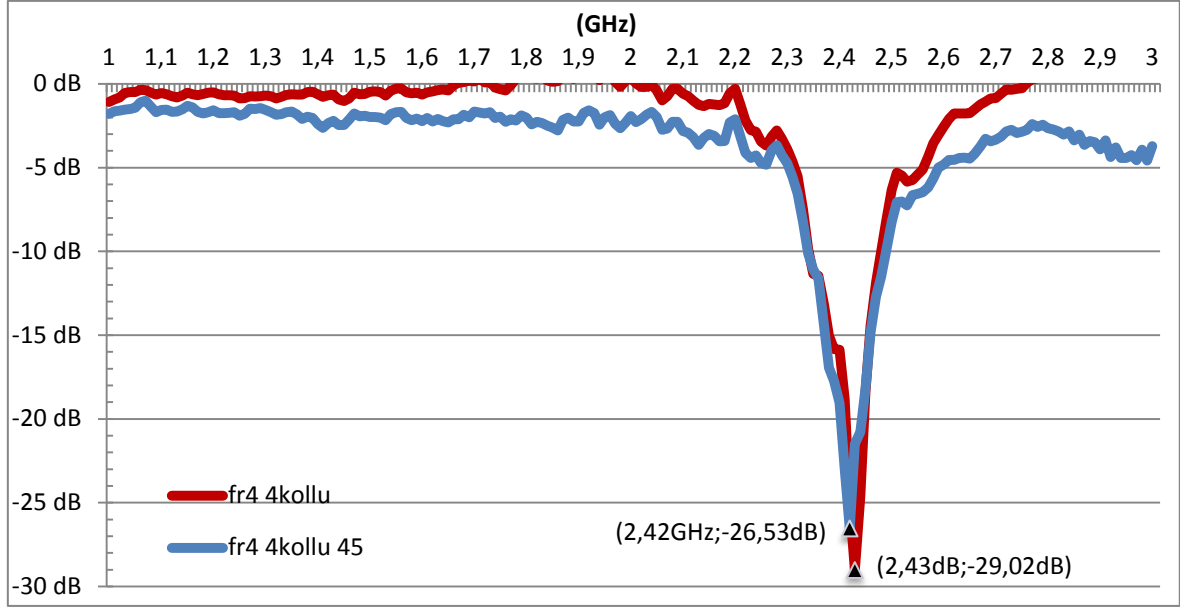
3) Periyodik eleman geometrilerinin boyutlarında baskı hataları sebebiyle küçük miktarlarda değişimler meydana geldiği anlaşılmıştır.

4) FSY'ler sonsuz sayıda periyodik elemana sahip olarak HFSS programında modellenmiş olmalarına rağmen 21x21 adet periyodik elemana sahip FSY'lerin ölçümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

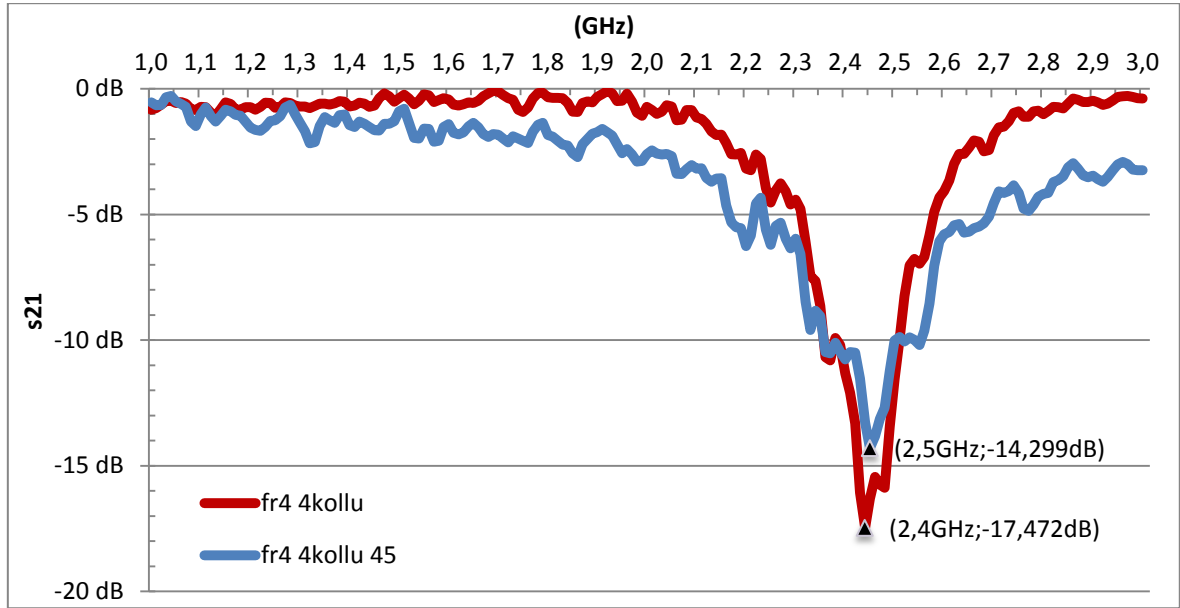
Ölçüm ile benzetim sonuçları arasındaki farklar yukarıda ifade edilen maddeler ışığında incelenmiş ve dört kollu periyodik eleman geometrisi üzerinde eniyileme çalışması buna göre yenilenmiştir. Yeni tasarımda iletken kol uzunluğu 15mm'den 14.5mm olarak değiştirilmiştir. 0.8mm'de karşılaşılan problemlerden dolayı yeni baskılar 1mm kalınlığındaki FR4 tabakalar üzerine gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda imalatları gerçekleştirilen yeni tasarımın laboratuvar ölçüm sonuçları verilmiştir.

Şekil 37 ve Şekil 38'de ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ derecelerde sırasıyla TE ve TM modları için gösterilmektedir.



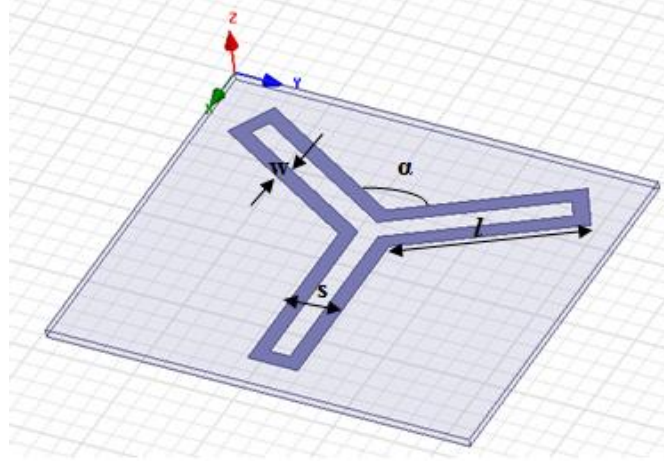
Şekil 37 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)



Şekil 38 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Ölçüm sonuçlarına göre TE ve TM modları için merkez frekansının 2.45GHz ve iletim yönünde -10dB zayıflatma için bant genişliğinin maksimum 140MHz olduğu hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının proje isterlerine uygun olduğu görülmektedir.

2. İçi Boş Üçlü Yapı (120 Derece)



Şekil 39 : İçi boş üçlü yapı (120 derece)

İletken kalınlığı (w): 1.5 mm

İletken kol uzunluğu (l): 18 mm

İletken kol genişliği (s): 5 mm

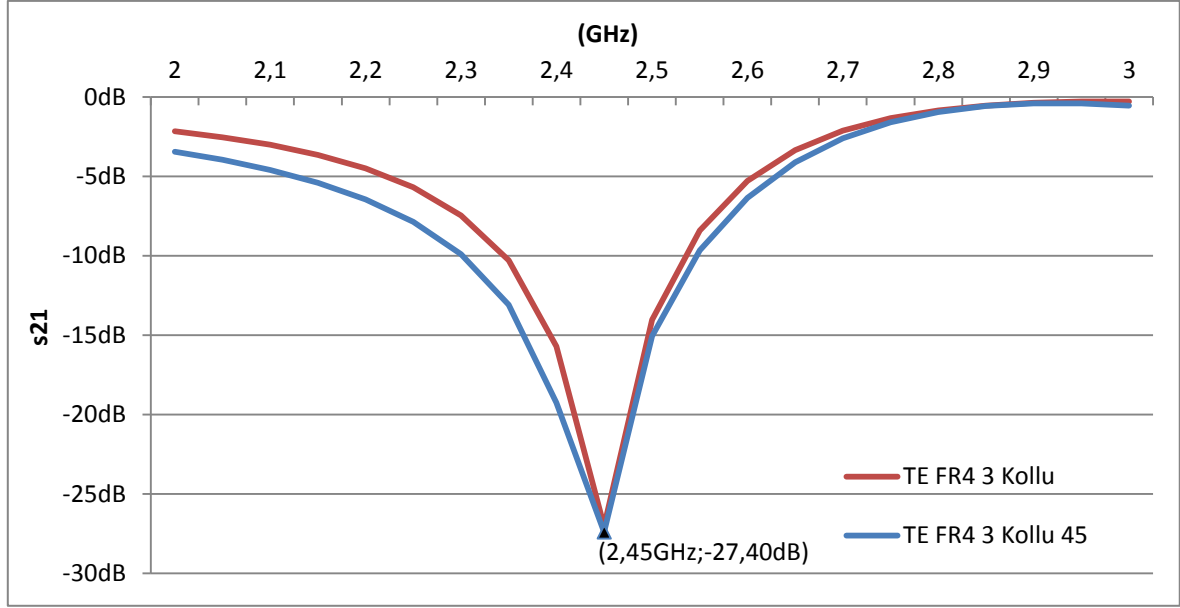
FR4 tabakasının kalınlığı (k): 0.8 mm

Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 6 mm

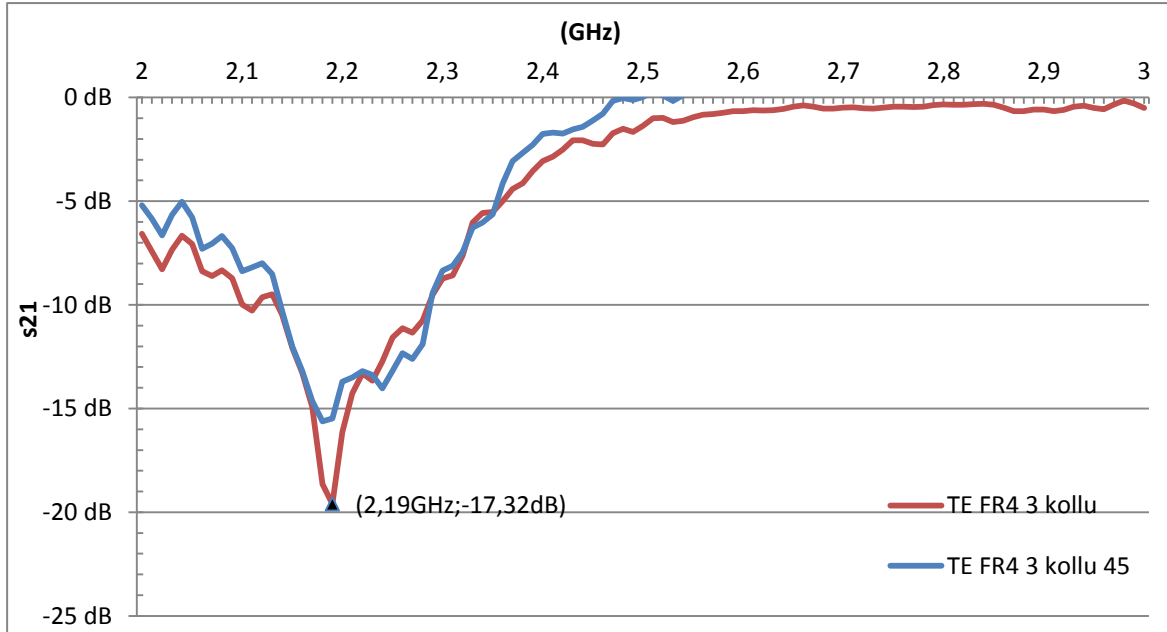
(Alt şeritler arasındaki açı (α): 120 derece)

Şekil 40 ve Şekil 41’de, TE modunda $\theta=0^\circ$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında yaklaşık 250MHz’lik bir kayma görülmektedir.

Şekil 40 ve Şekil 41’de, TE modunda $\theta=45^\circ$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında yaklaşık 230MHz’lik bir kayma görülmektedir.



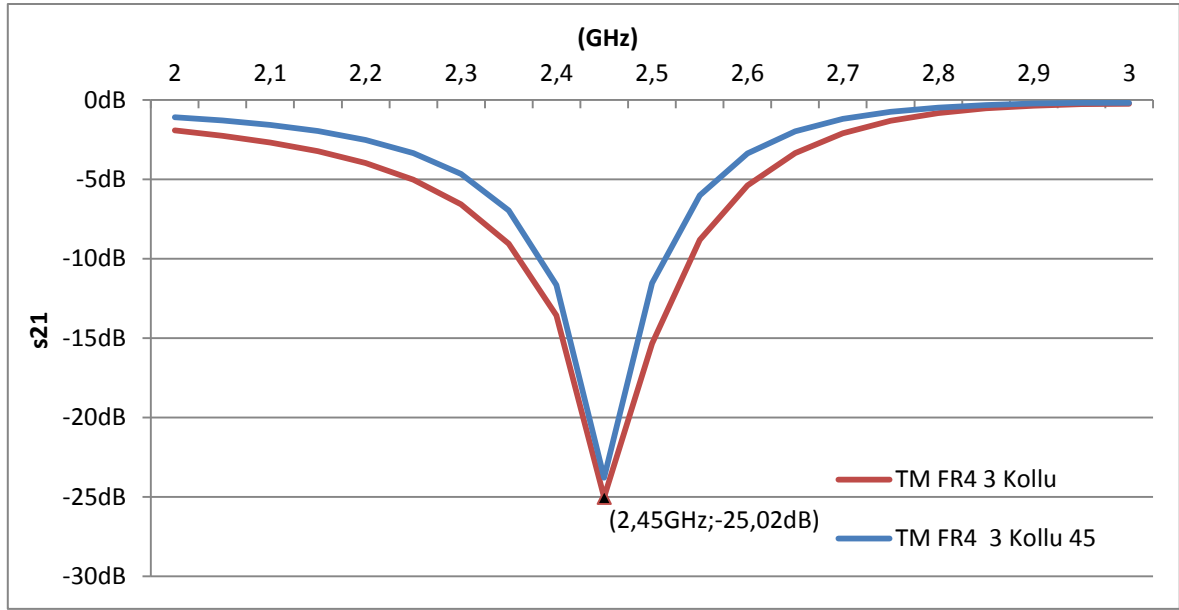
Şekil 40 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)



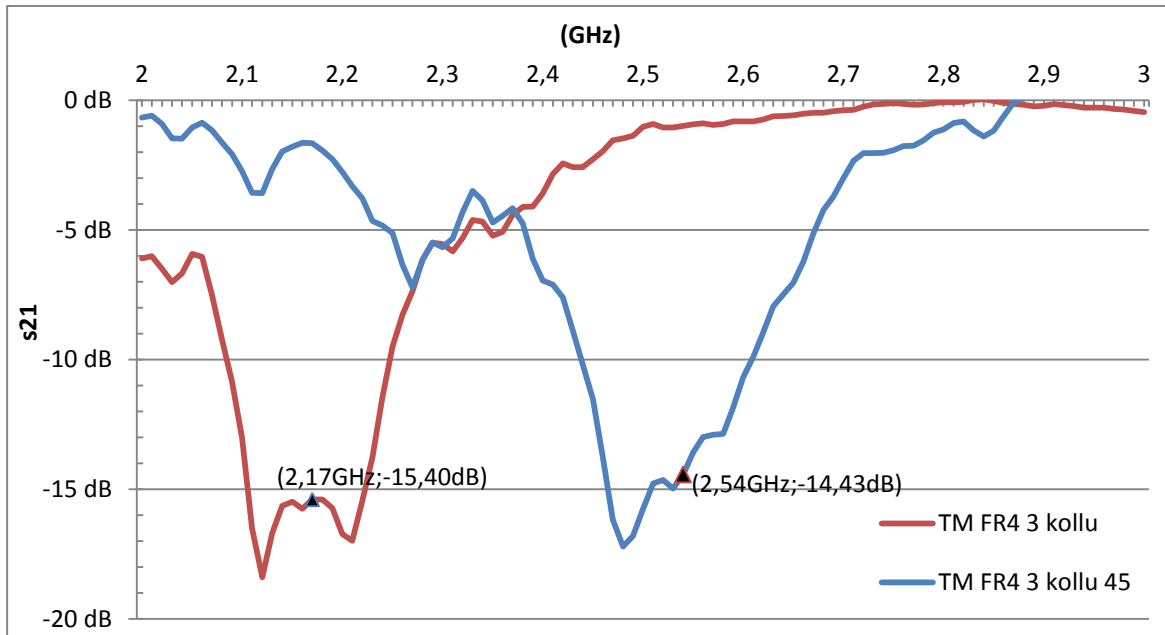
Şekil 41 : TE modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Şekil 42 ve Şekil 43'de, TM modunda $\theta=0^0$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında 270MHz'lik bir

kayma görülmektedir. Şekil 42 ve Şekil 43’de, TM modunda $\theta=45^\circ$ için ölçüm ve benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırıldığında -10dB bandının merkez frekansında 290 MHz’lik bir kayma görülmektedir.



Şekil 42 : TM modunda ve $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ de FSY’ye gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (HFSS)



Şekil 43 : TM modunda ve $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ de FSY’ye gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda oluşan bu farklılıkların aşağıda belirtilen sebeplerden meydana geldiği anlaşılmıştır;

1) FR4 dielektrik tabaka kalınlığı hesaplamalarda 0.8mm olarak alınmıştır. Baskı sonucu gelen FR4 tabakalarının kalınlığının 1mm civarında olduğu ve bu kalınlık değerinde küçük olsa değişimler olduğu görülmüştür.

2) FR4 tabakaların dielektrik sabitlerinin değeri ortamın sıcaklığına, nem miktarına ve çalışılan frekans değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeplerle dielektrik sabitinin değeri hesaplamalarda yaklaşık olarak alınmıştır.

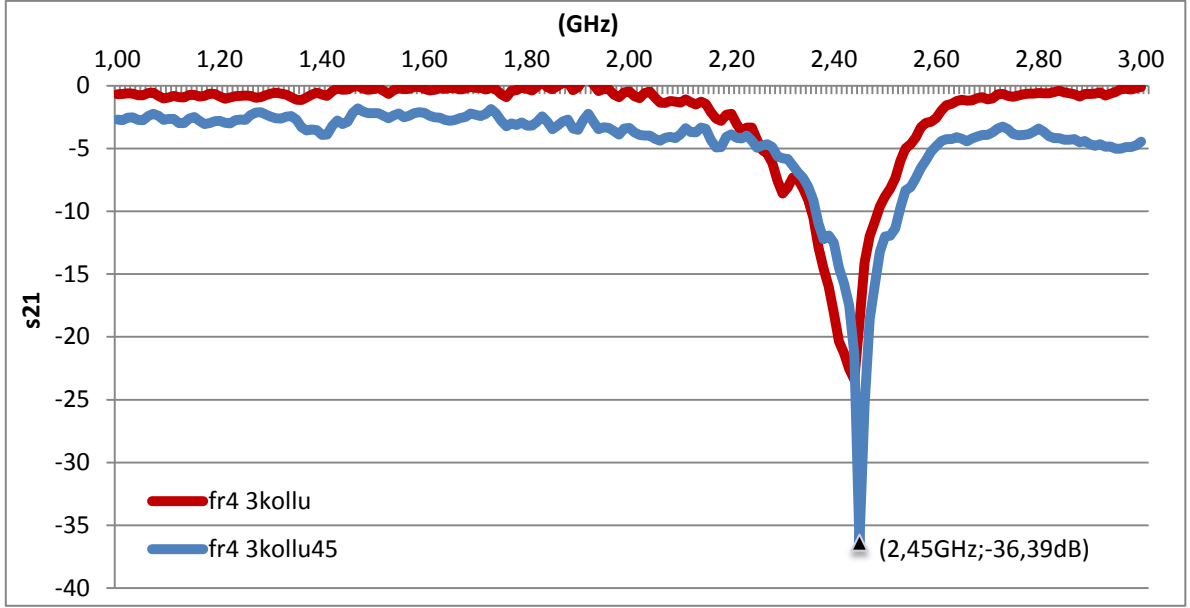
3) Periyodik eleman geometrilerinin boyutlarında baskı hataları sebebiyle küçük miktarlarda değişimler meydana geldiği anlaşılmıştır.

4) FSY'ler sonsuz sayıda periyodik elemana sahip olarak HFSS programında modellenmiş olmalarına rağmen 21x21 adet periyodik elemana sahip FSY'lerin ölçümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

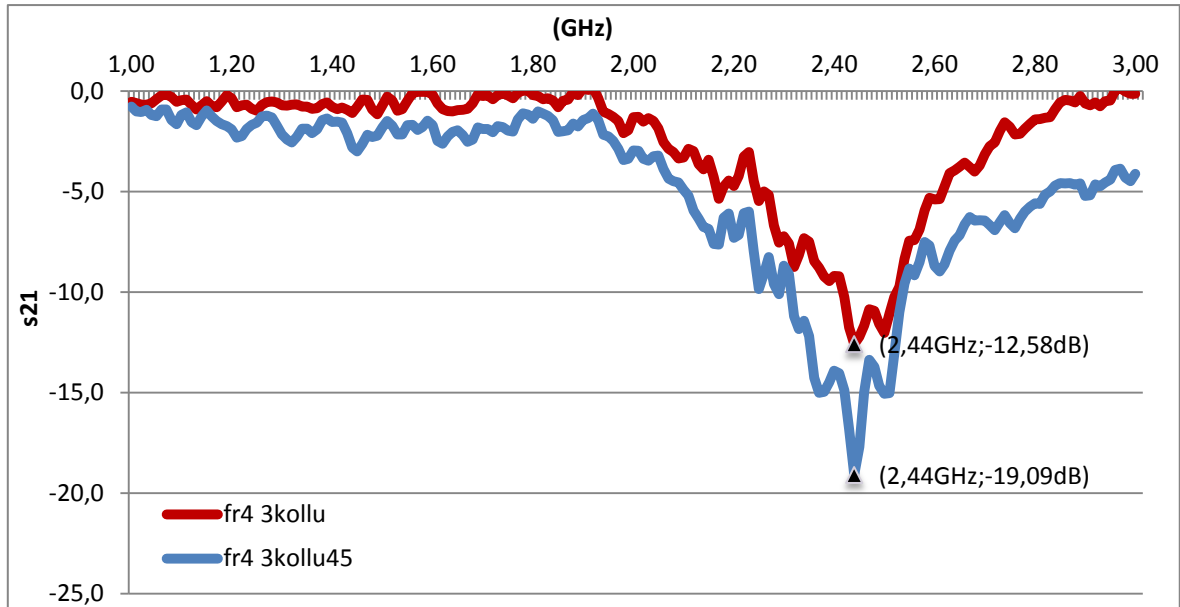
Ölçüm ile benzetim sonuçları arasındaki farklar yukarıda ifade edilen maddeler ışığında incelenmiş ve üç kollu periyodik eleman geometrisi üzerinde eniyileme çalışması buna göre yenilenmiştir. Yeni tasarımda iletken kol uzunluğu 18mm'den 17.5mm olarak değiştirilmiştir. 0.8mm'de karşılaşılan problemlerden dolayı yeni baskılar 1mm kalınlığındaki FR4 tabakalar üzerine gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda imalatları gerçekleştirilen yeni tasarımın laboratuvar ölçüm sonuçları verilmiştir.

Şekil 44 ve Şekil 45'de, ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ derecelerde sırasıyla TE ve TM modları için gösterilmektedir.



Şekil 44 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)



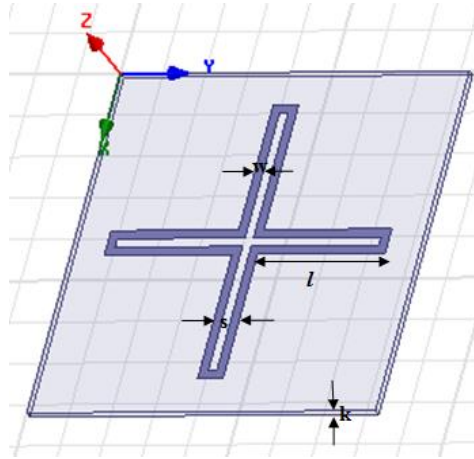
Şekil 45 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Ölçüm sonuçlarına göre TE ve TM modları için merkez frekansının 2.45GHz ve iletim yönünde -10dB zayıflatma için bant genişliğinin maksimum 140MHz olduğu hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının proje isterlerine uygun olduğu görülmektedir.

2. Asetat tabakalar üzerine gerçekleştirilen baskıların ölçüm sonuçları

Tasarımları ve eniyileme çalışmaları tamamlanan iki farklı FSY geometrisinin baskıları asetat dielektrik tabakalar üzerine serigrafi baskı tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıda baskıların ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılmaları görülmektedir.

1. Dört Kollu Yapı



Şekil 46 : Dört kollu yapı

İletken kalınlığı (w): 1 mm

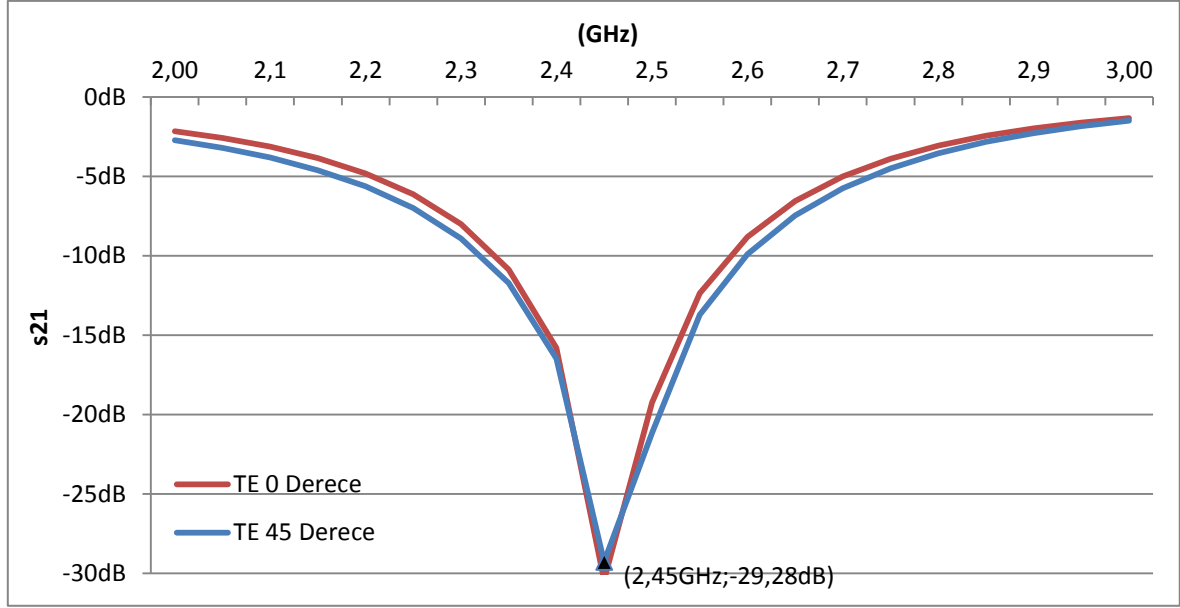
İletken kol uzunluğu (l): 15.5 mm

İletken kol genişliği (s): 5 mm

Asetat tabakasının kalınlığı (k): 125µm

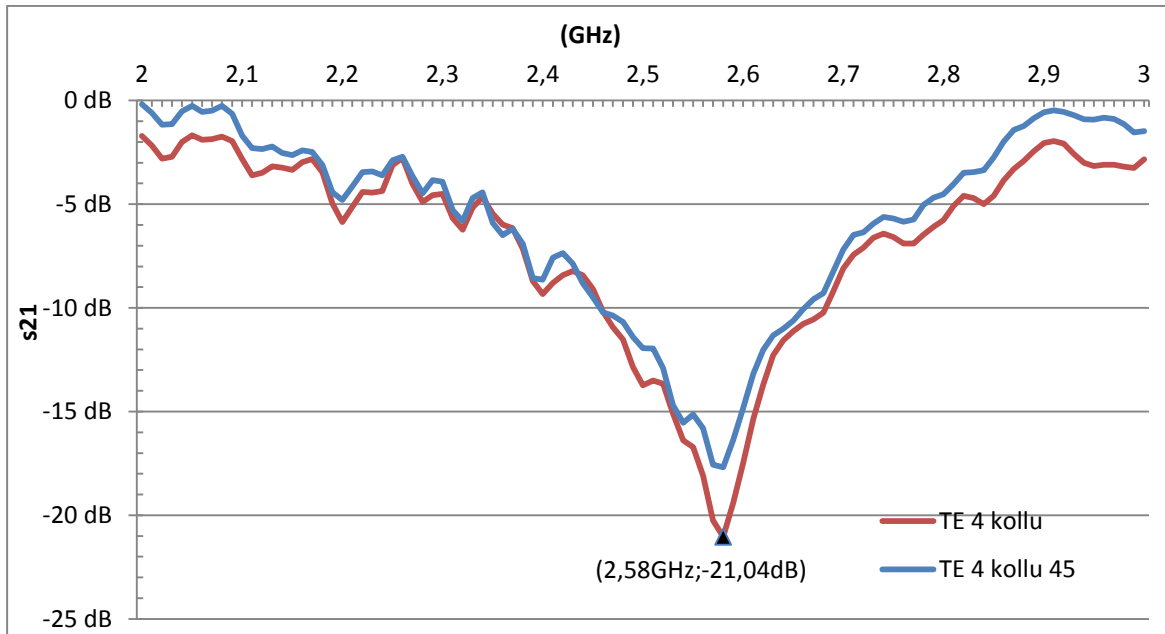
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 7 mm

Şekil 47’de $\theta=0^\circ$ ve 45° ’ler için TE modunda benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



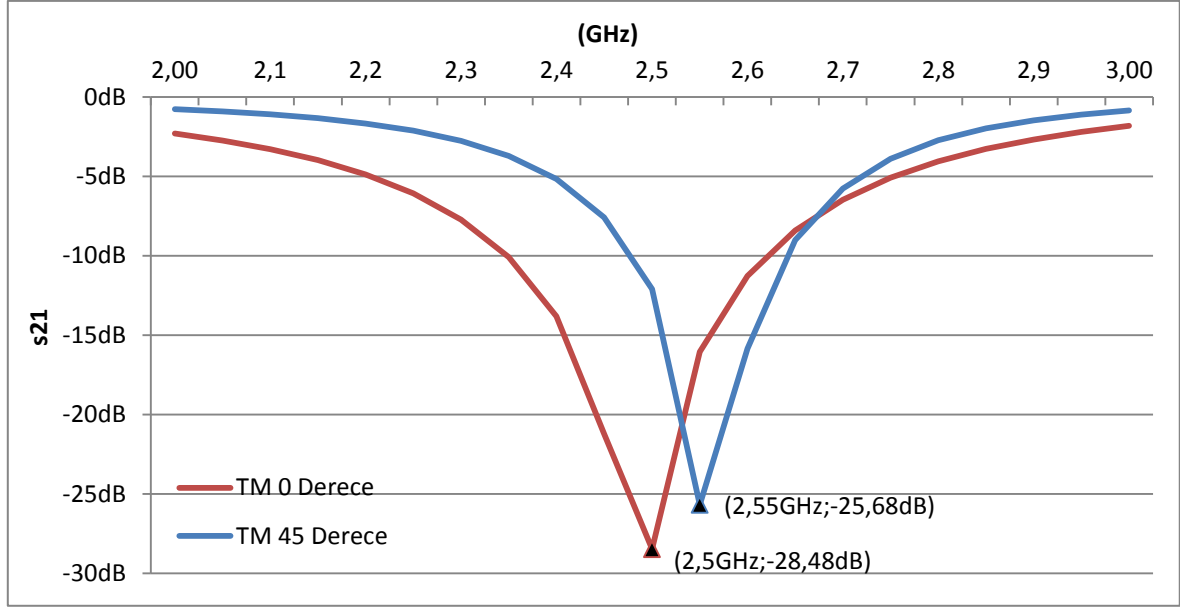
Şekil 47 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)

Şekil 48’de $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için TE modunda ölçüm sonuçları görülmektedir. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için -10dB bandının merkez frekansında sırasıyla 90MHz ve 95MHz kaymalar görülmüştür.



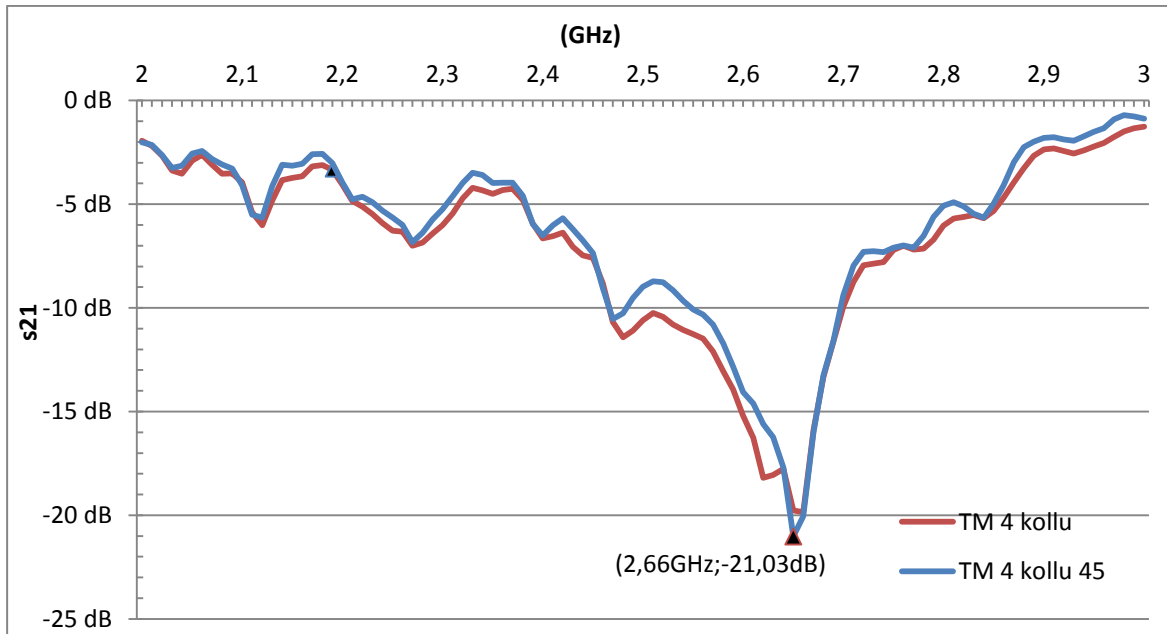
Şekil 48 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)

Şekil 49’da $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için TM modunda benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 49 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)

Şekil 50’de $\theta=0^0$ ve 45^0 dereceler için TM modunda ölçüm sonuçları görülmektedir. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında $\theta=0^0$ ve 45^0 dereceler için -10dB bandının merkez frekansında sırasıyla 90MHz ve 80MHz kaymalar görülmüştür.



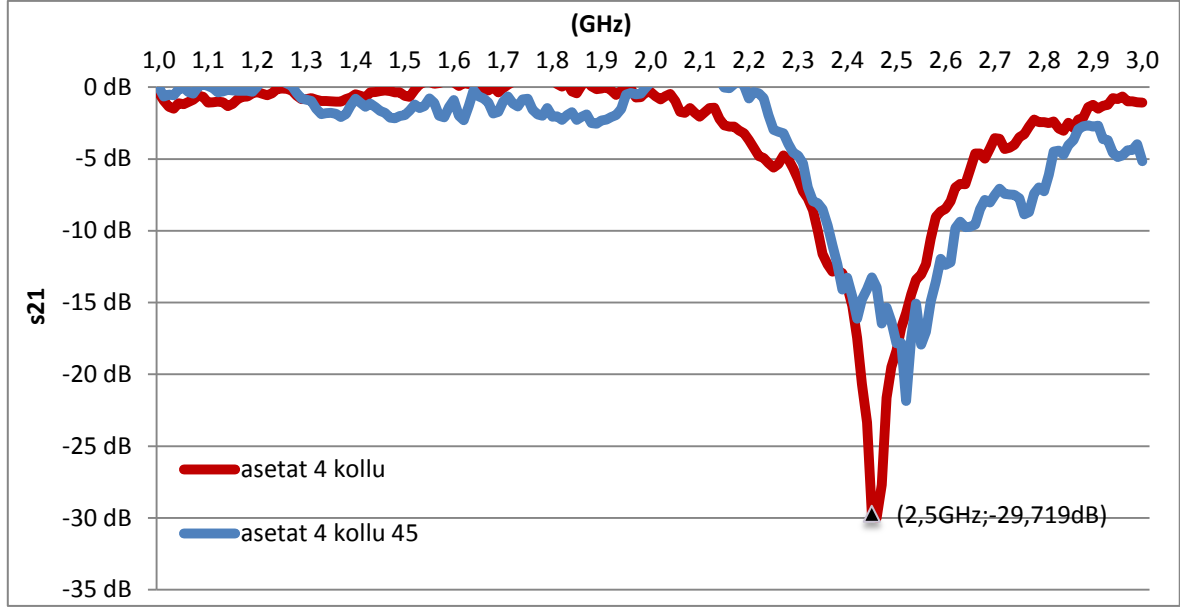
Şekil 50 : TM modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının rezonans frekansları arasında küçük farklılıklar olduğu görülmüştür. Üzerine FSY baskısının gerçekleştirildiği asetat tabakasının elektriksel özelliklerini (dielektrik katsayısı, iletkenlik değeri vs.) belirleyen parametre değerleri ölçülemediğinden HFSS benzetimlerinde literatürden elde edilen yaklaşık değerler kullanılmıştır. Bu yaklaşıklık ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları arasında küçük farklılıkların ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir.

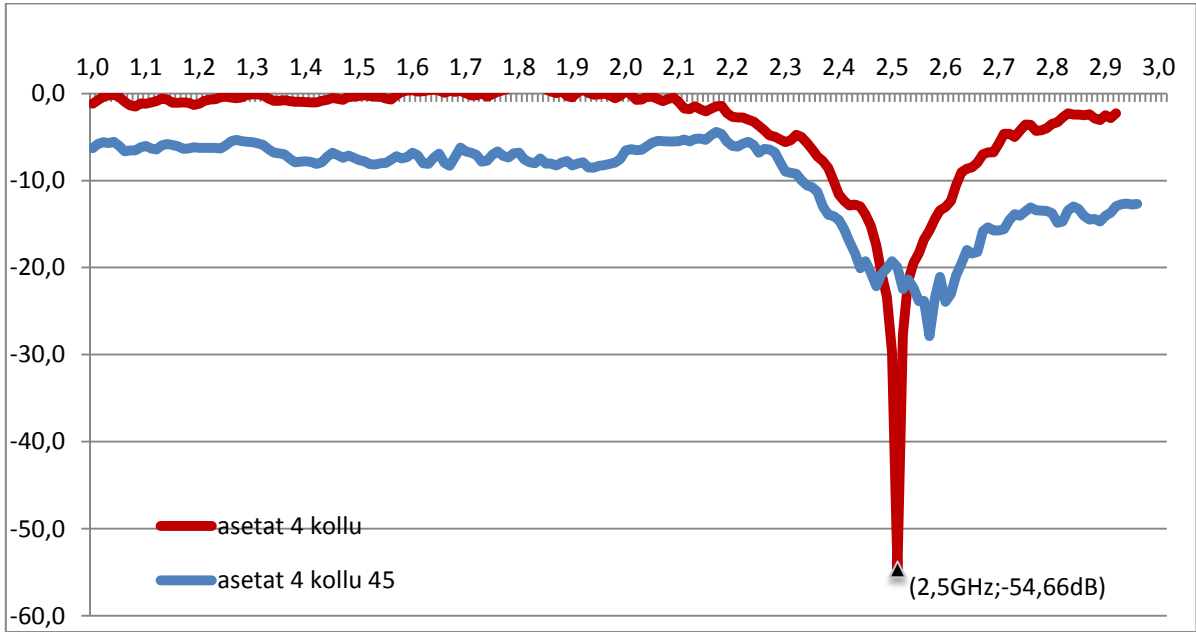
Ölçüm ile benzetim sonuçları arasındaki farklar yukarıda ifade edilen maddeler ışığında incelenmiş ve dört kollu periyodik eleman geometrisi üzerinde eniyileme çalışması yapılmıştır. Yeni tasarımda iletken kol uzunluğu 15.5mm'den 16mm'ye, iletken kol genişliği de 5mm'den 5.3mm'ye olarak değiştirilmiştir. Aşağıda imalatları gerçekleştirilen yeni tasarımın laboratuvar ölçüm sonuçları verilmiştir.

Şekil 51 ve Şekil 52'de, ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ derecelerde sırasıyla TE ve TM modları için gösterilmektedir.

Ölçüm sonuçlarına göre TE ve TM modları için merkez frekansının 2.45GHz ve iletim yönünde -10dB zayıflatma için bant genişliğinin maksimum 180MHz olduğu hesaplanmıştır. Sadece, TM modunda 45 derecelik geliş açısında bant genişliği 340MHz çıkarak proje isterlerinin biraz dışına çıkmıştır. Ölçüm sonuçlarının genel olarak proje isterlerine uygun olduğu görülmektedir.

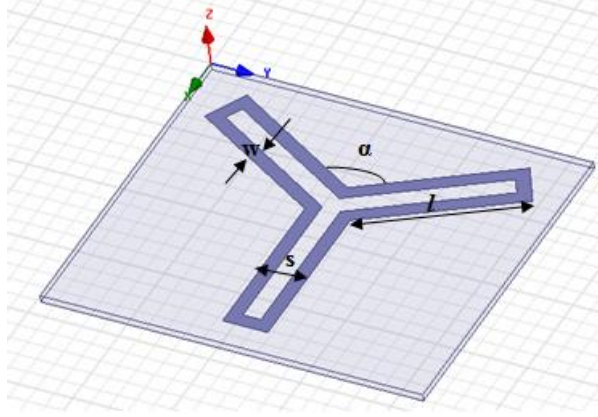


Şekil 51 : TE modunda $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)



Şekil 52 : TM modunda ve $\theta=0^\circ$ ve $\theta=45^\circ$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayısının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

2. İçi Boş Üçlü Yapı (120 Derece)



Şekil 53 : İçi boş üçlü yapı (120 derece)

İletken kalınlığı (w): 1 mm

İletken kol uzunluğu (l): 21 mm

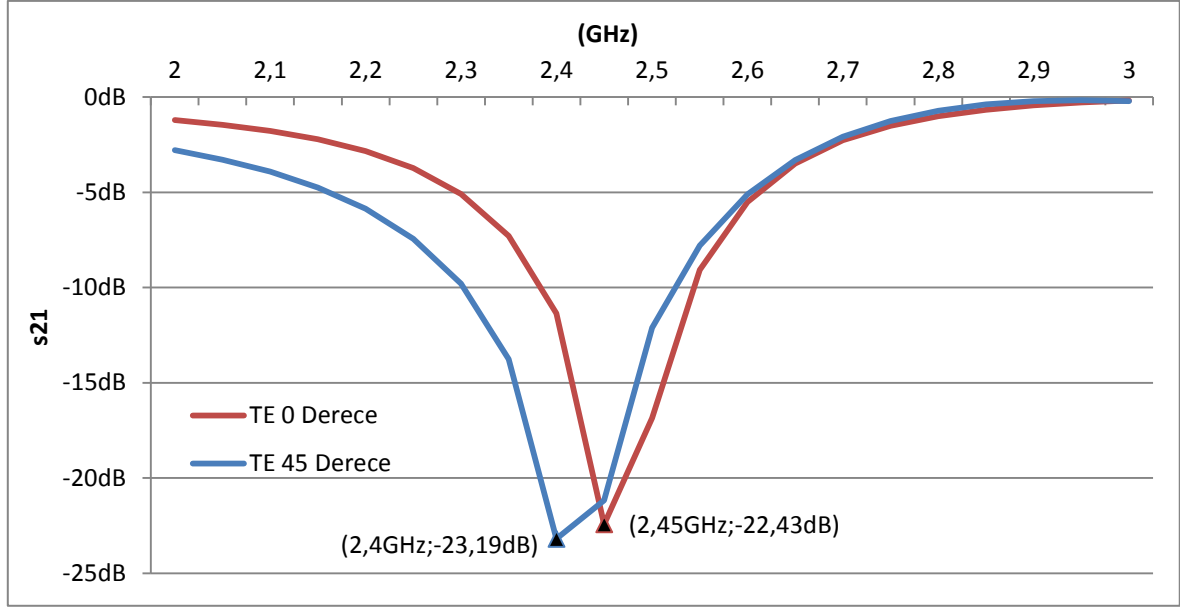
İletken kol genişliği (s): 4 mm

Asetat tabakasının kalınlığı (k): 125µm

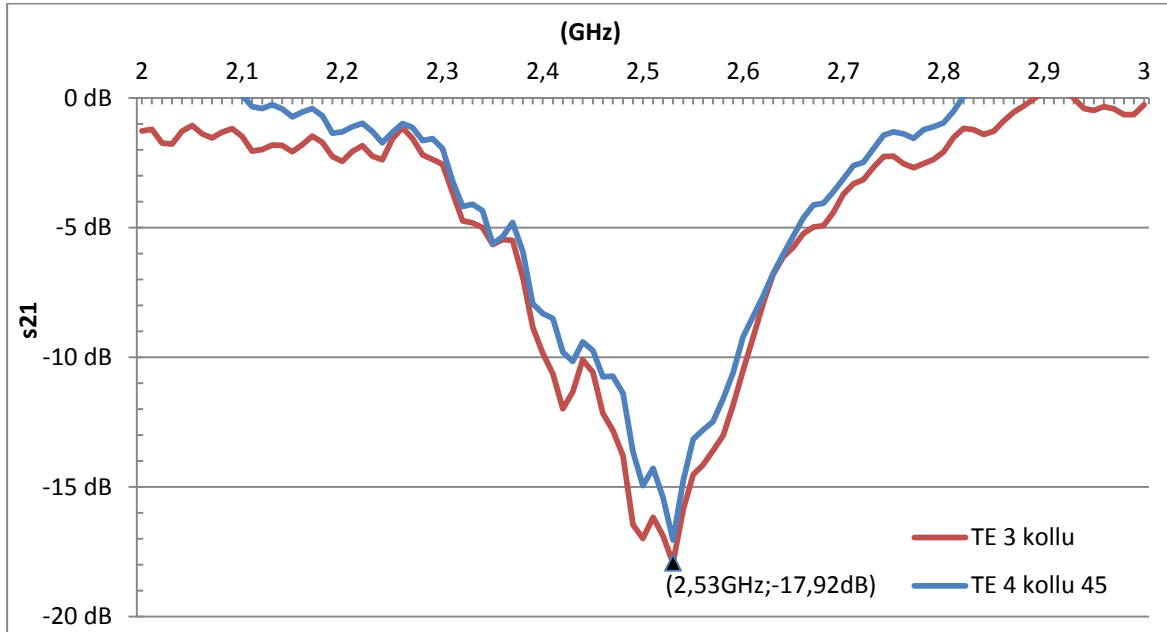
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 46 mm

Şekil 54’de $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için TE modunda benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.

Şekil 55’de $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için TE modunda ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında $\theta=0^0$ ve 45^0 ’ler için -10dB bandının merkez frekansında sırasıyla 40MHz ve 45MHz kaymalar görülmüştür.

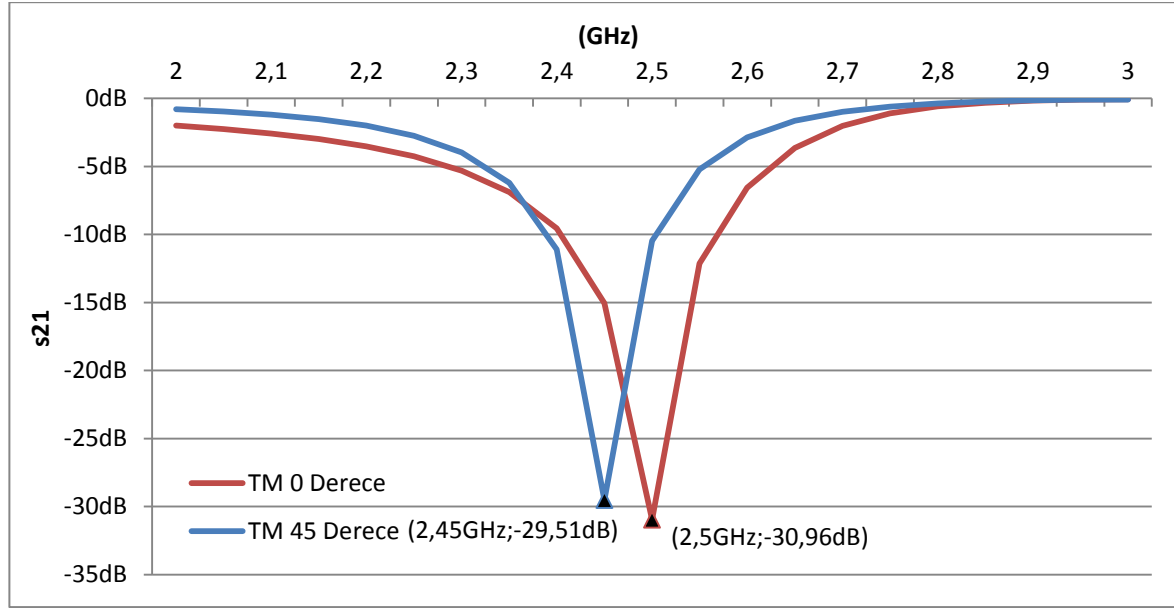


Şekil 54 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)

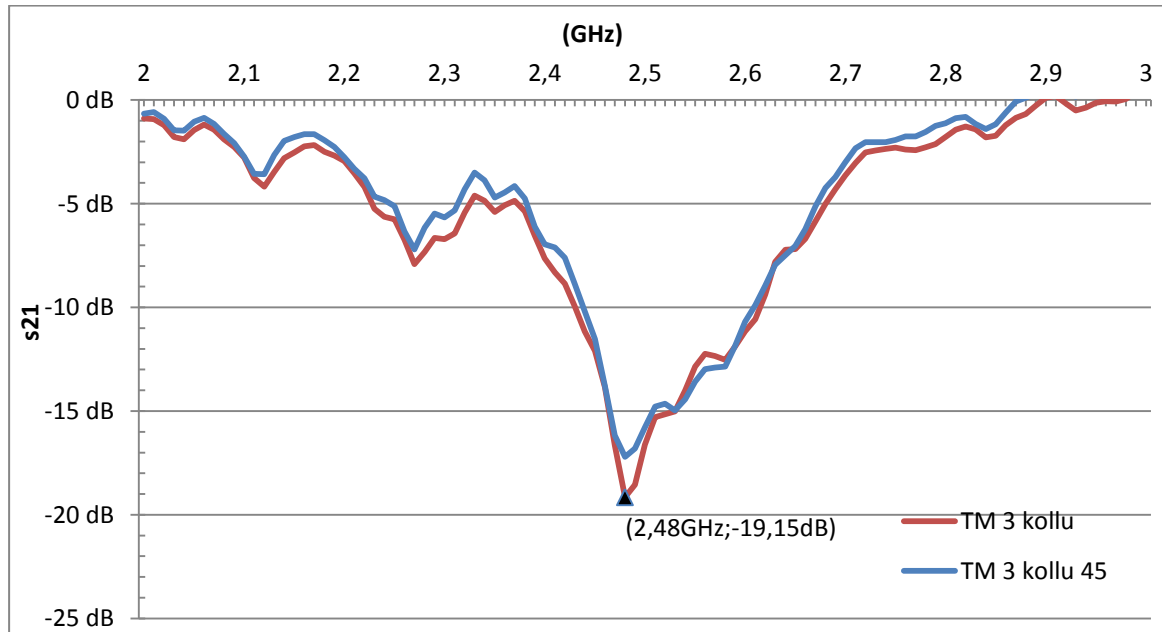


Şekil 55 : TE modunda iletim katsayısının (S_{21}) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)

Şekil 56'da $\theta=0^0$ ve 45^0 'ler için TM modunda benzetim sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Şekil 57'de $\theta=0^0$ ve 45^0 'ler için TM modunda ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında $\theta=0^0$ ve 45^0 'ler için -10dB bandının merkez frekansında ölçüm ve benzetim sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 56 : TM modunda iletim katsayısının (S21) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (HFSS)



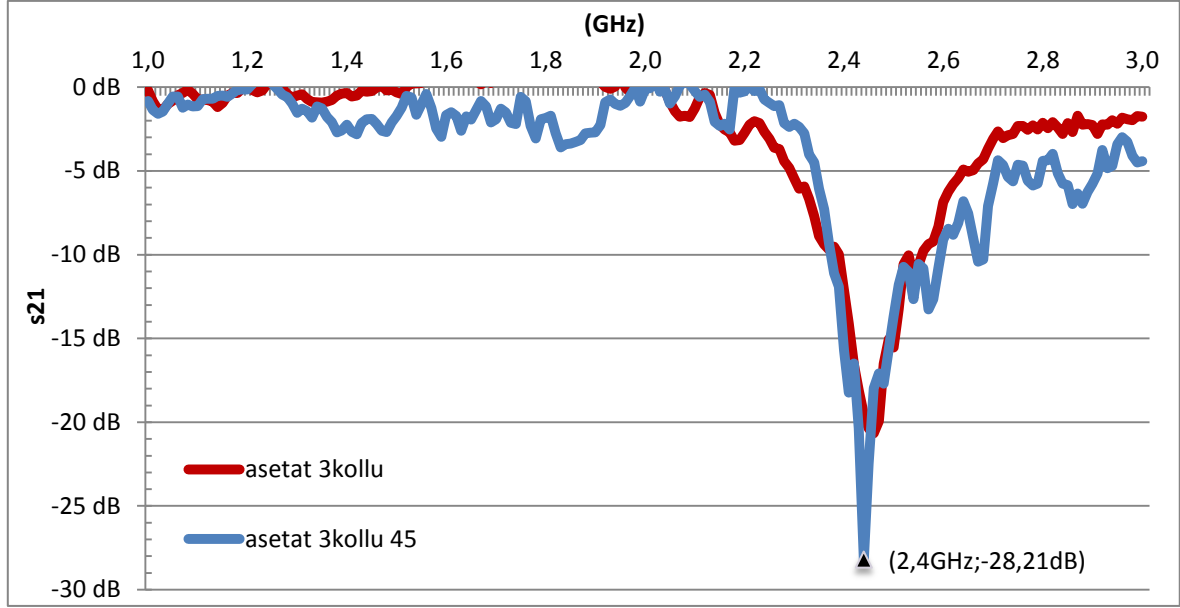
Şekil 57 : TM modunda iletim katsayısının (S21) frekansla değişimi, $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ (Ölçüm)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçlarının rezonans frekansları arasında küçük farklılıklar olduğu görülmüştür. Üzerine FSY baskısının gerçekleştirildiği asetat tabakasının elektriksel özelliklerini (dielektrik katsayısı, iletkenlik değeri vs.) belirleyen parametre değerleri ölçülemediğinden HFSS benzetimlerinde literatürden elde edilen yaklaşık değerler kullanılmıştır. Bu yaklaşıklık ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları arasında küçük farklılıkların ortaya çıkmasına sebebiyet vermiştir.

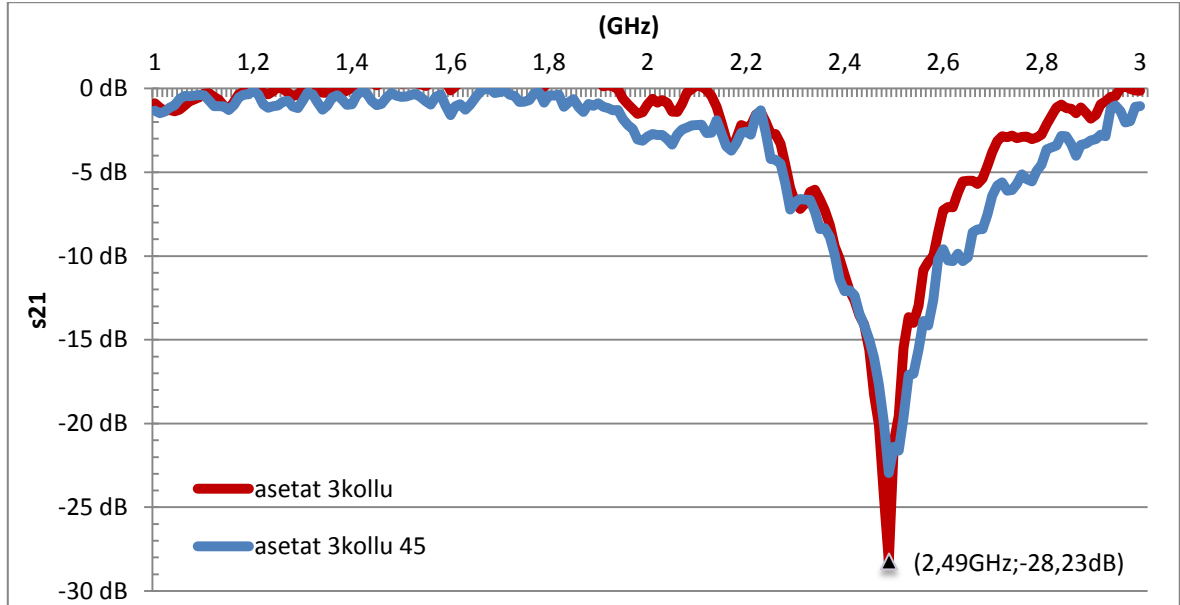
Ölçüm ile benzetim sonuçları arasındaki farklar yukarıda ifade edilen maddeler ışığında incelenmiş ve üç kollu periyodik eleman geometrisi üzerinde eniyileme çalışması yapılmıştır. Yeni tasarımda iletken kol genişliği 4mm'den 5mm olarak değiştirilmiştir. Aşağıda imalatları gerçekleştirilen yeni tasarımın laboratuvar ölçüm sonuçları verilmiştir.

Şekil 58 ve Şekil 59'da, için ölçüm sonucunda elde edilen iletim katsayısının frekansa bağlı değişim eğrileri $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ derecelerde sırasıyla TE ve TM modları için gösterilmektedir.

Ölçüm sonuçlarına göre TE ve TM modları için -10dB zayıflatma bandının merkez frekansının 2.45GHz ve iletim yönünde bant genişliğinin maksimum 160MHz olduğu hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının proje isterlerine uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 58 : TE modunda $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)



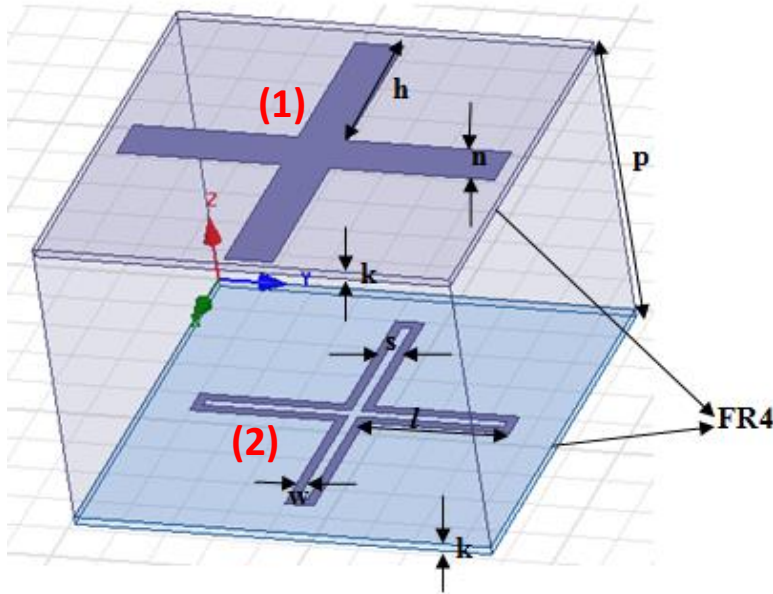
Şekil 59 : TM modunda ve $\theta=0^0$ ve $\theta=45^0$ 'de FSY'e gelen dalga ile elde edilen iletim katsayının frekansa göre değişim eğrisi (Ölçüm)

Yutucu FSY Tasarımlarının Baskılarının Ölçüm Sonuçları

Yutucu FSY Tasarımları

Proje isterlerine göre tasarlanan yutucu FSY'lerin iletim katsayısının (S_{21}) minimum -10dB ve yansıma katsayısının da (S_{11}) minimum -10dB olması hedeflenmektedir. Bu hedefi gerçekleştirmek için yapılan tasarımlar ve ölçüm sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

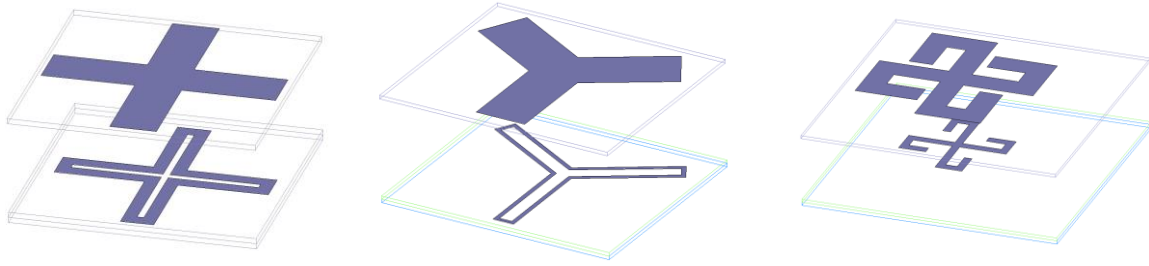
Tasarım1: Projenin başlangıcında tasarım teknikleri içinde yer almayan ancak etkin bir tasarım yöntemi olduğu görülmüş olan iki katlı FSY (ikinci katman FSY sonlu bir iletkenliğe sahiptir) tasarımına benzetim çalışmalarında yer verilmiştir. Yutucu FSY tasarımı iki adet farklı geometriye sahip FSY arasında dalga boyunun dörtte biri oranında bir boşluk (uygulamada boşluk yerine EPS(Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük) malzemesi) bırakılması ile gerçekleştirilmiştir (KIANI, 2007). Bu tasarımda, Şekil 60'da görüldüğü gibi (1) ile işaretlenmiş FSY mükemmel bir iletkenliğe sahiptir ve 2.4GHz frekansında iletim bandında bant söndüren bir davranış sergilemektedir. (2) ile işaretlenmiş olan FSY ise sonlu bir iletkenliğe (birim kare alanda 50Ω değerinde) sahiptir ve mükemmel iletken FSY'den yansıyan 2.4GHz bandındaki dalgaları söndürmektedir.



Şekil 60 : Yutucu FSY tasarımı 1

Yüzey direnci $50\Omega/\text{kare}$ olan FSY'in baskılarını gerçekleştirebilmek için ihtiyaç duyulan dielektrik tabakalar ülkemizde mevcut olmadığından yurt dışından tedarik edilmesi gereği

ortaya çıkmıştır. Yurt dışındaki firmalarca talep edilen minimum dielektrik tabaka miktarı ve buna tekabül eden fiyat proje bütçesini aştığı için, bu tasarımın uygulanmasından vazgeçilmiştir. Yapılan eniyileme çalışmaları sonucunda gerçekleştirilen üç adet farklı FSY tasarımının (Şekil 61) benzetimlerinde proje isterlerini karşılayan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 61 : Yutucu FSY tasarımları

Aşağıda eniyileme çalışmaları tamamlanan ve en iyi sonuçların elde edildiği “dört kollu” yutucu FSY tasarımının (Şekil 60) parametrik değerleri ve benzetim sonuçları görülmektedir.

Katmanlar arasında 30 mm kalınlığında EPS bulunmaktadır. Bu yapının davranışı HFSS programı ile incelenmiştir.

FR4 tabakalarının kalınlıkları (k): 0.8 mm

EPS (Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük) kalınlığı (p): 30mm

1. Tabaka (Mükemmel iletken) için,

İletken kalınlığı (w): 1 mm

İletken kol uzunluğu (l): 15 mm

İletken kol genişliği (s): 3 mm

Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 10 mm

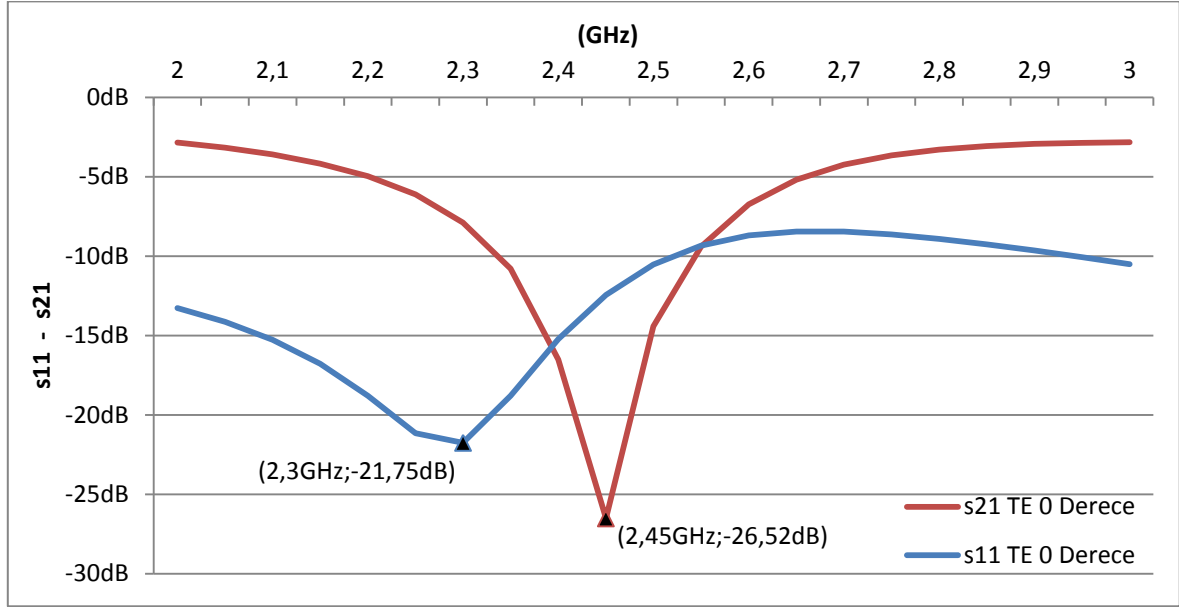
2. Tabaka (Sonlu iletken, 50Ω direnç) için,

İletken kol uzunluğu (h): 17 mm

İletken kol genişliği (n): 5 mm

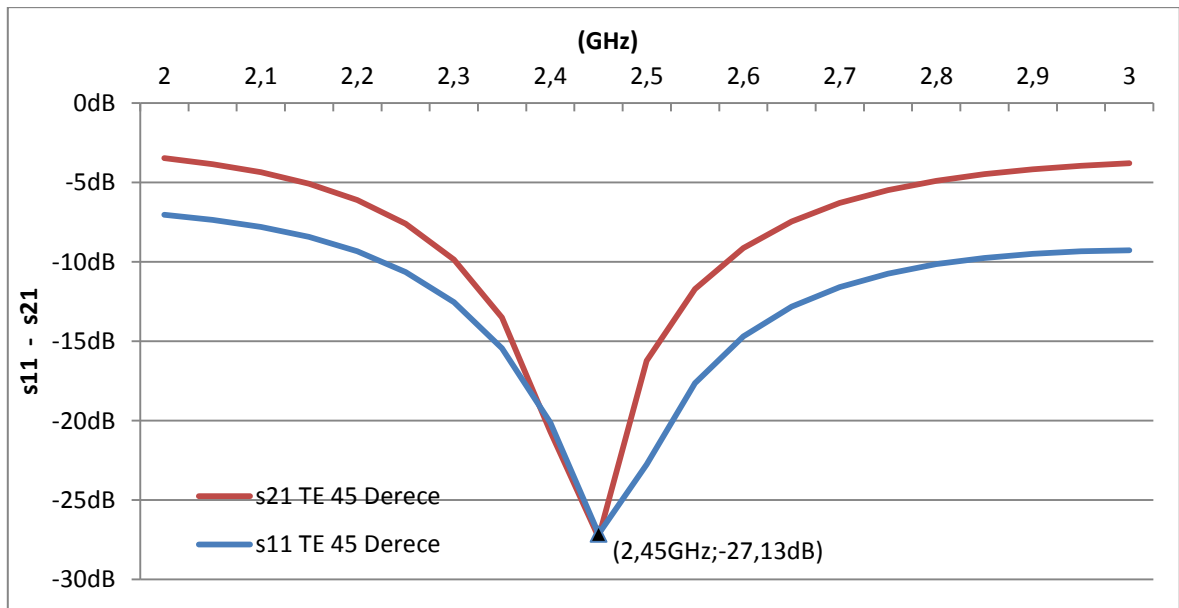
Periyodik elemanlar arasındaki mesafe: 4 mm

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, istenilen FSY davranışlarına en yakın sonuç, yukarıda belirtilen ölçülerde elde edilmiştir. Şekil 62’de $\theta=0^0$ için TE modunda HFSS analizleri sonucunda elde edilen iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. ϕ açısı değeri bütün analizlerde sıfır derece olarak alınmıştır.



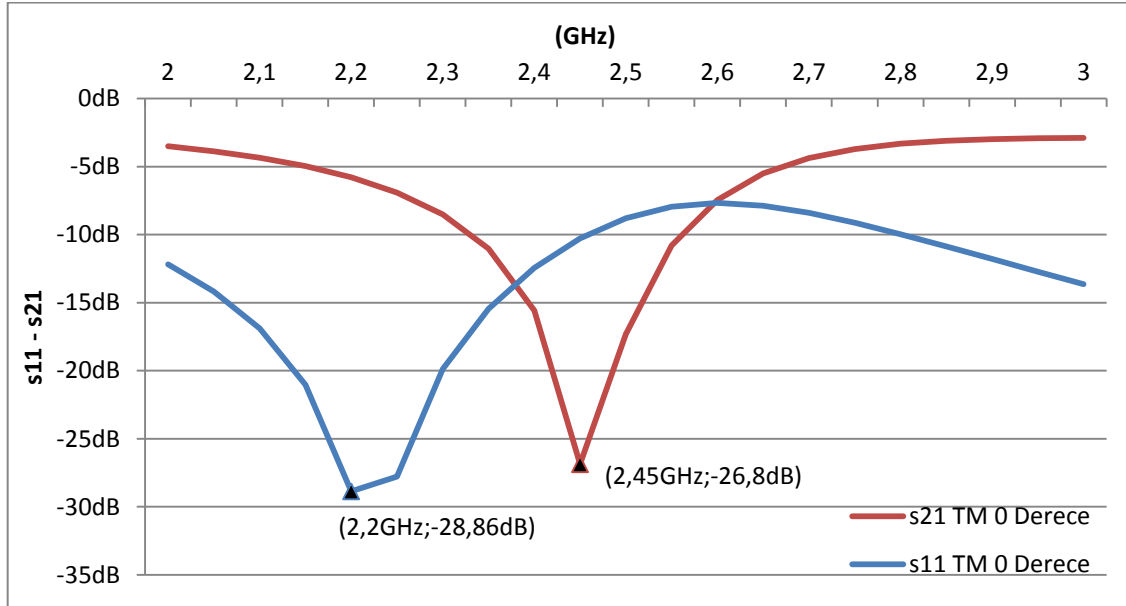
Şekil 62 : TE modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^0$ (HFSS)

Şekil 63’de $\theta=45^0$ için TE modu için HFSS analizleri sonucunda elde edilen iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



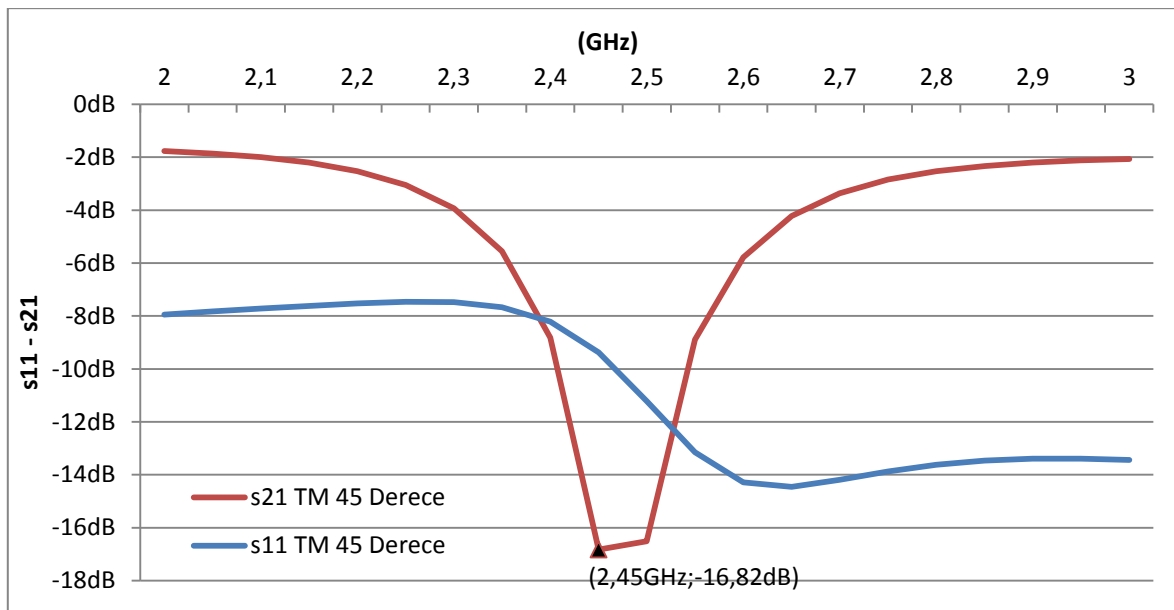
Şekil 63 : TE modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^0$ (HFSS)

Şekil 64’de $\theta=0^\circ$ için TM modunda HFSS analizleri sonucunda elde edilen iletim ve yansım katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 64 : TM modunda iletim ve yansım katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (HFSS)

Şekil 65’de $\theta=45^\circ$ için TM modunda HFSS analizleri sonucunda elde edilen iletim ve yansım katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.

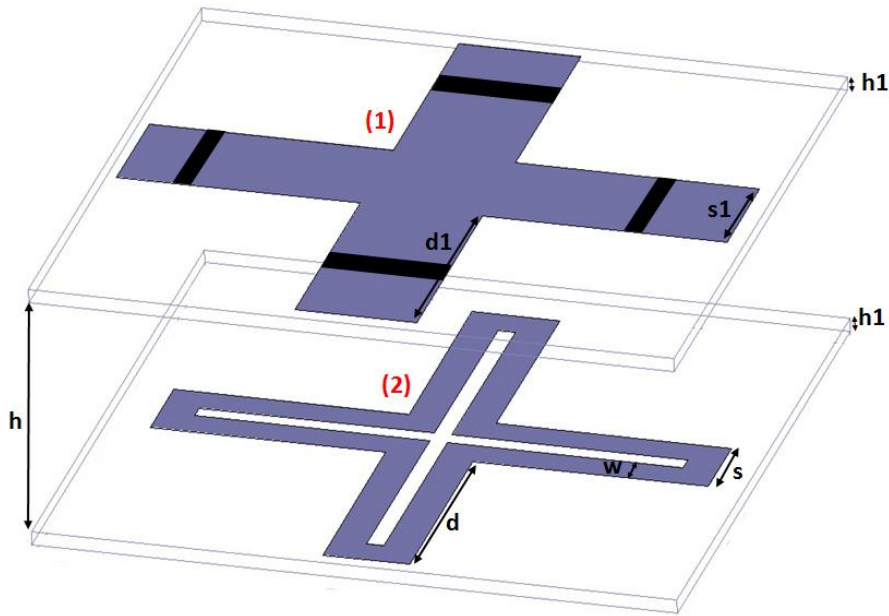


Şekil 65 : TM modunda iletim ve yansım katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$ (HFSS)

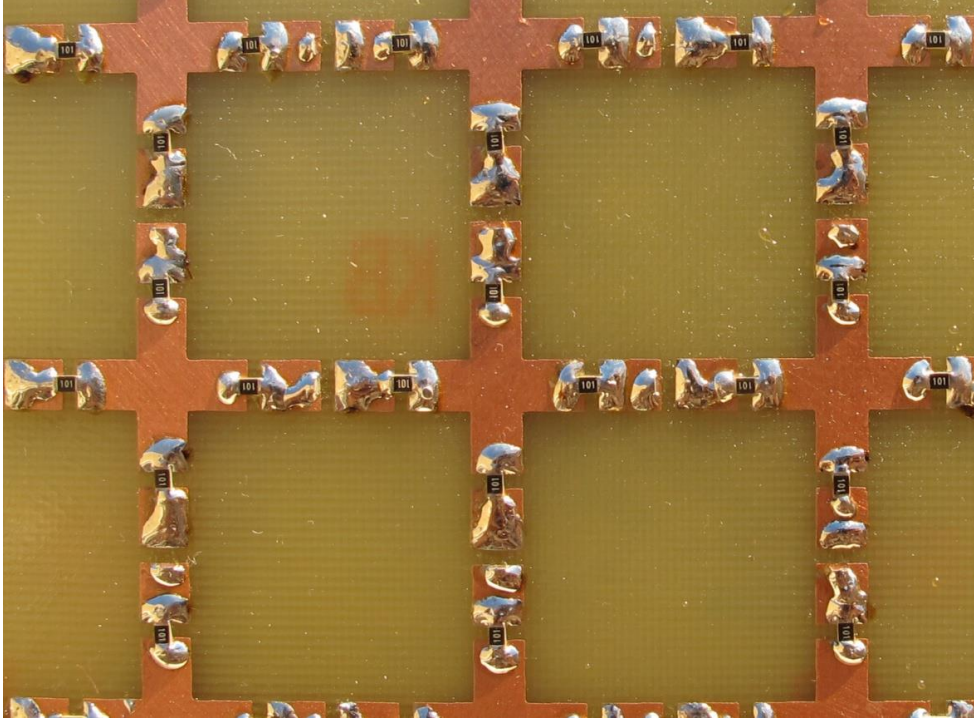
Yukarıdaki benzetim sonuçları incelendiğinde 2.45GHz frekans bandında;

TE modunda incelenen tüm geliş açıları için isterlerin sağlandığı, TM modu için ise iletim katsayısının dalganın geliş açısının (θ) 45 derece olduğu değere kadar “-10dB”den daha küçük olduğu ve proje isterlerini karşıladığı görülmektedir.

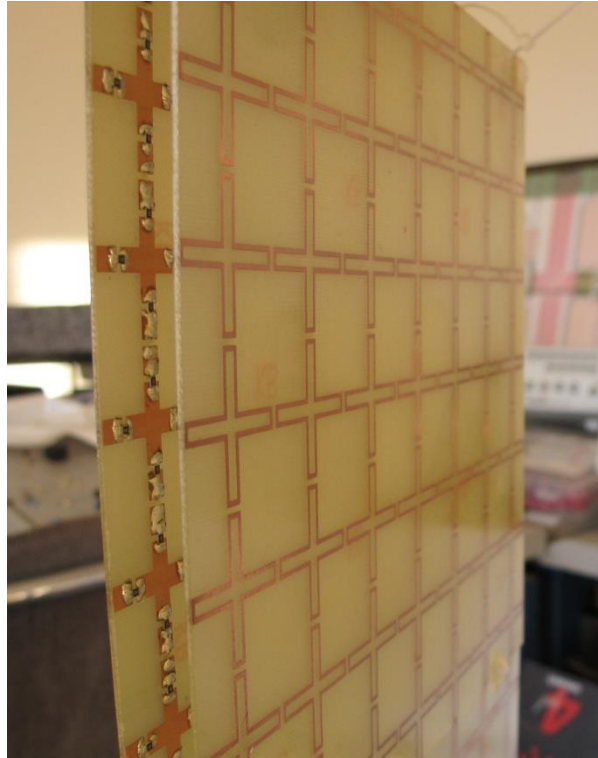
Tasarım2: Tedarik güçlüğü nedeniyle imalatları gerçekleştirilemeyen sonlu iletkenliğe sahip FSY imalatı yerine 100Ω 'luk (HFSS incelemeleri sonucunda en iyi sonuçlar 100Ω 'luk direnç değerinde elde edildi) dirençler kullanılarak mükemmel iletkenliğe sahip ikinci bir FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 66-68'de görüldüğü gibi mükemmel iletkenlerden imal edilen FSY'in sonlu iletkenliğe sahip olabilmesi için (1) nolu FSY'in mükemmel iletken kolları ortadan kesilmiş ve aralarına 100Ω 'luk dirençler yerleştirilmiştir. HFSS programında 100Ω 'luk dirençleri tanımlayabilmek için 100Ω 'luk direnç değerine sahip “Lumped RLC” yüzeyler kullanılmıştır.



Şekil 66 : Yutucu FSY tasarımı 2



Şekil 67 : 100Ω 'luk dirençler ile imal edilen sonlu iletken FSY



Şekil 68 : Gerçekleştirilmiş çift katmanlı yutucu FSY

Proje isterlerini karşılayabilmesi için eniyileme çalışmaları yapılmış ve aşağıdaki parametre değerleri elde edilmiştir.

d: Mükemmel iletken FSY bacak boyu (10.5mm)

d1: Sonlu iletken FSY Bacak boyu (10.5mm)

s: Mükemmel iletken FSY bacak kalınlığı (4mm)

s1: Sonlu iletken FSY bacak kalınlığı (4mm)

g: İki komşu mükemmel iletken FSY arasındaki mesafe (0.5mm)

g1: İki komşu sonlu iletken FSY arasındaki mesafe (0.5mm)

w: Mükemmel iletken FSY iletken yol genişliği (1mm)

θ : Gelen elektromagnetik dalganın yüzey normali ile yaptığı açı (45 derece)

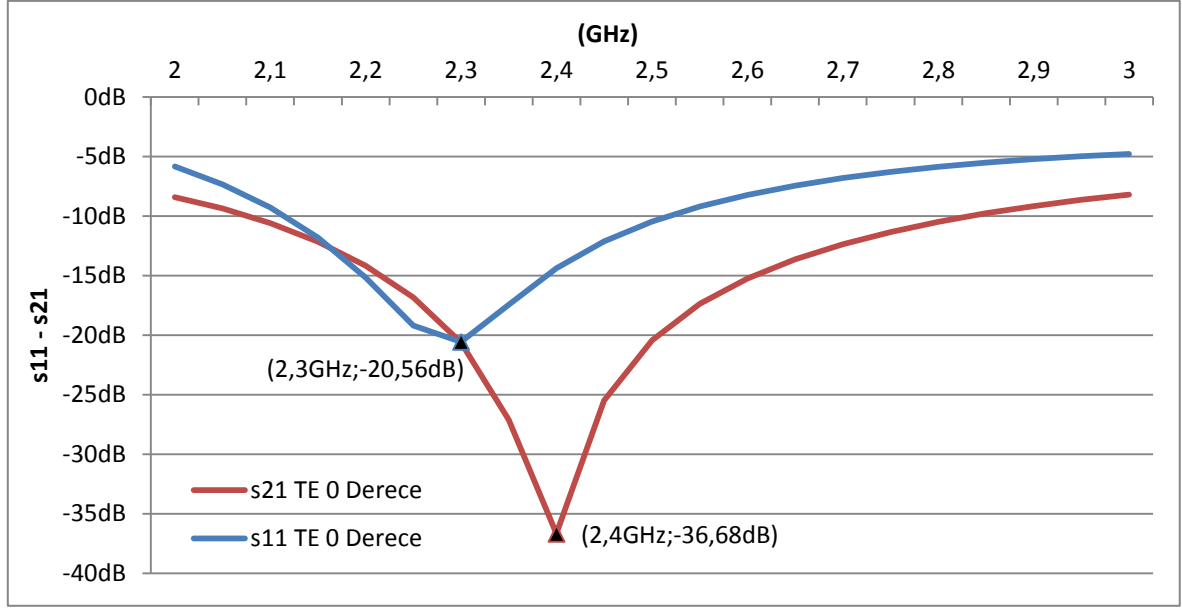
ϕ : Gelen elektromagnetik dalganın izdüşümünün x eksenine ile yaptığı açı (0 derece)

h: İki FSY arasındaki mesafe (14mm)

h1: Dielektrik tabakaların kalınlığı (1mm)

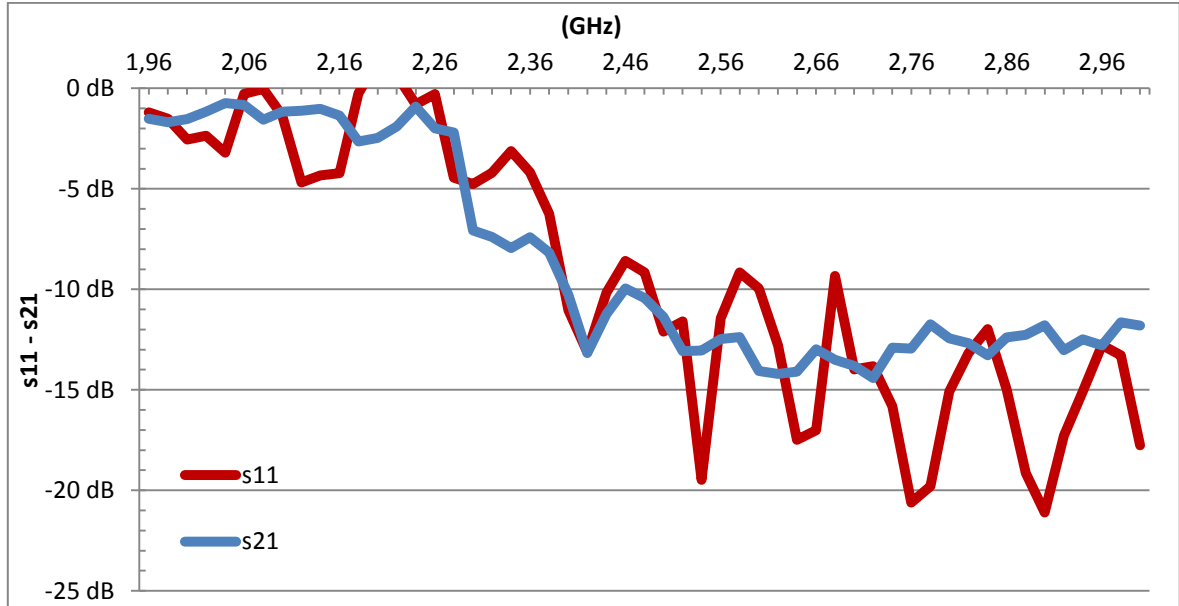
Aşağıda, bu parametre değerleri için elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçları görülmektedir.

Şekil 69'da $\theta=0^\circ$ değerinde TE modunda benzetim sonucunda elde edilen iletim ve yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



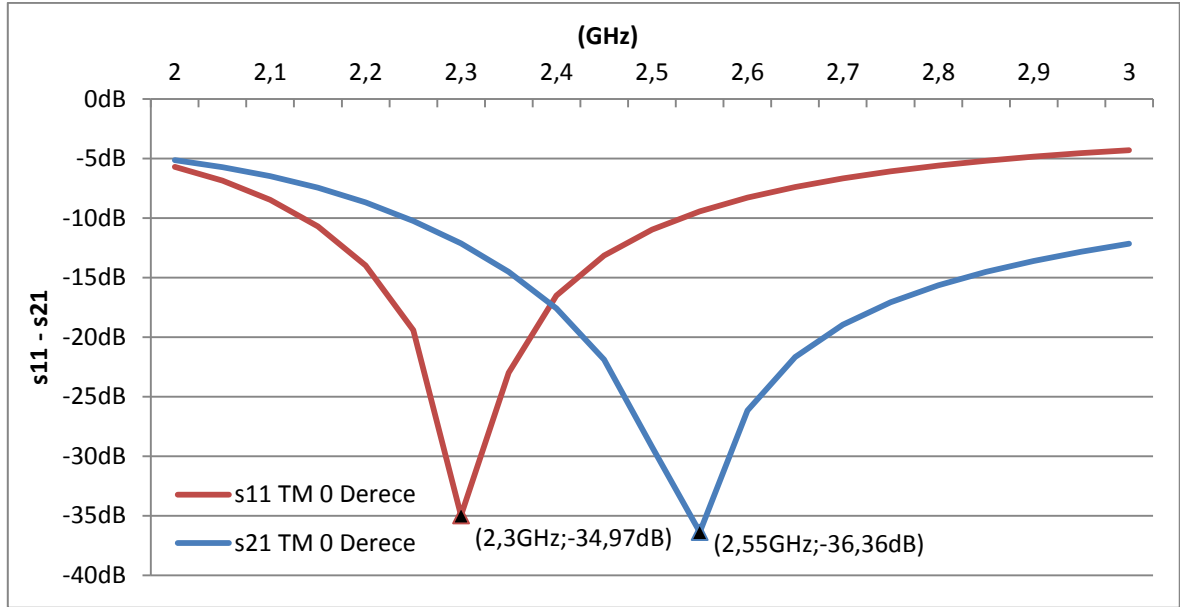
Şekil 69 : TE modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (HFSS)

Şekil 70’de $\theta=0^\circ$ için TE modunda ölçüm sonucunda elde edilen iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



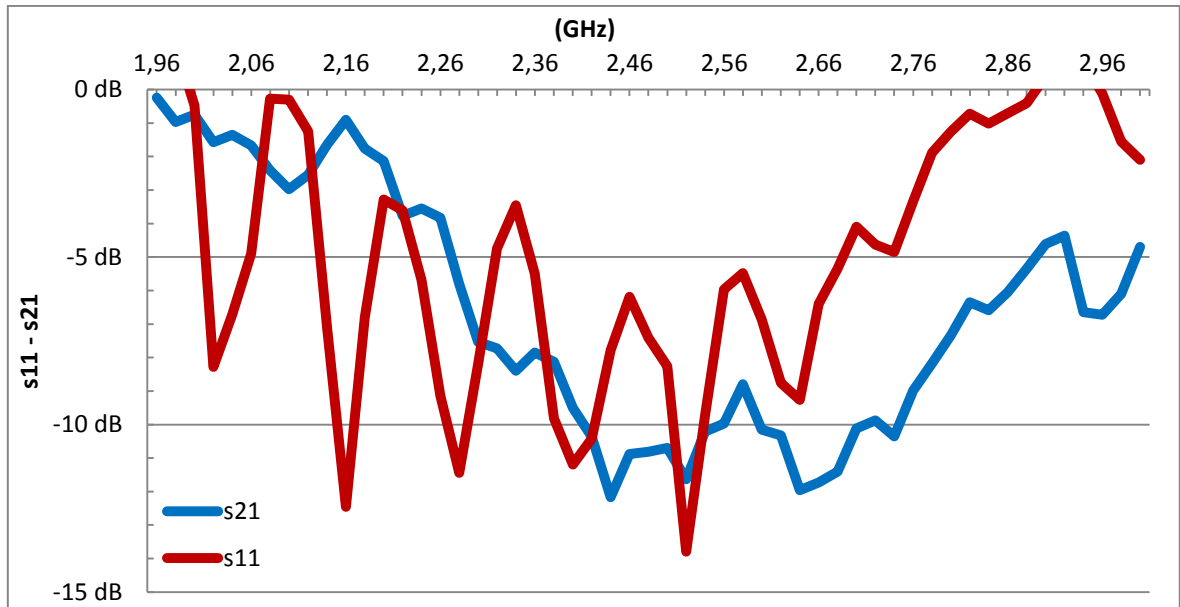
Şekil 70 : TE modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (Ölçüm)

Şekil 71’de $\theta=0^\circ$ değerinde TM modundabenzetim sonucunda elde edilen iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa b ağılı değişim eğrileri gösterilmektedir.



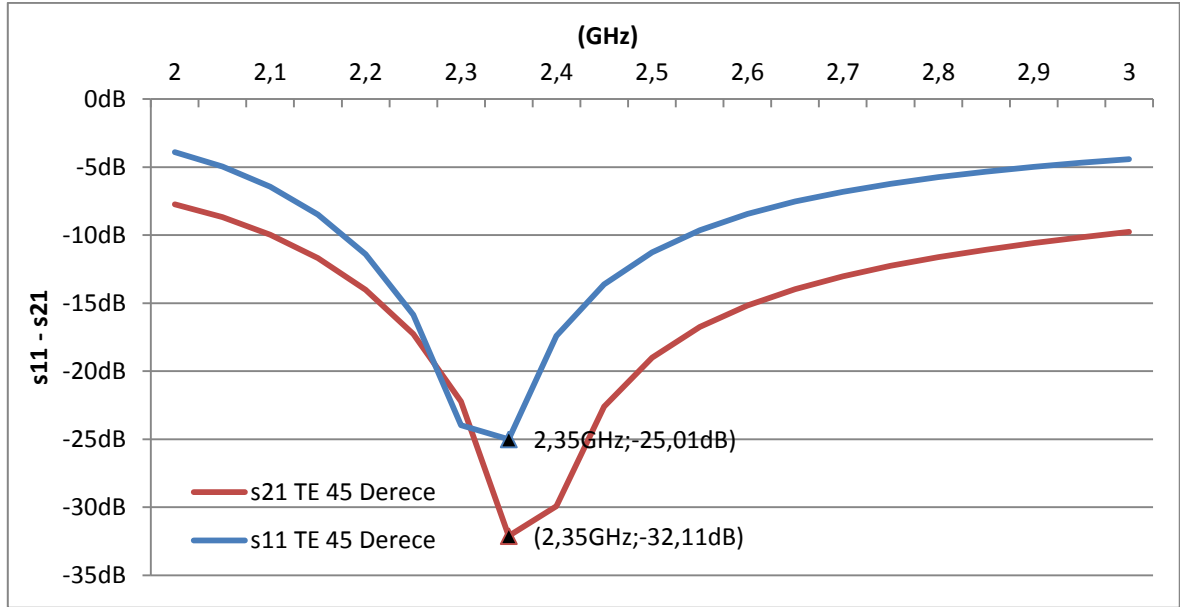
Şekil 71 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (HFSS)

Şekil 72’de $\theta=0^\circ$ için TM modunda ölçüm sonucunda elde edilen iletim ve yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



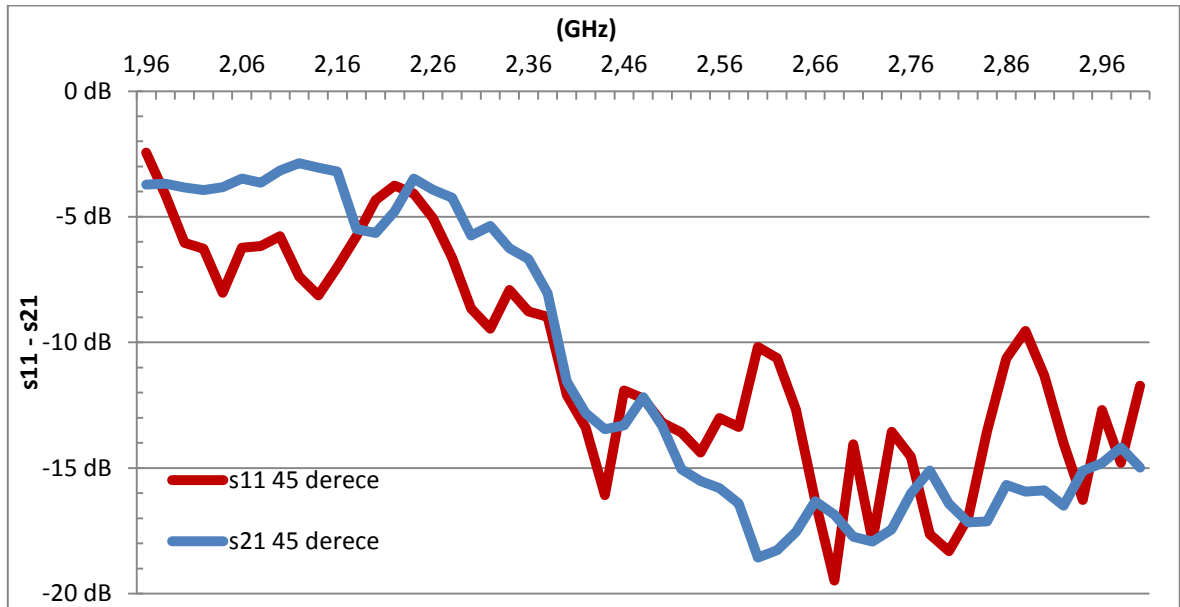
Şekil 72 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=0^\circ$ (Ölçüm)

Şekil 73’de $\theta=45^\circ$ değerinde TE modunda da benzetim sonucunda elde edilen iletim ve yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



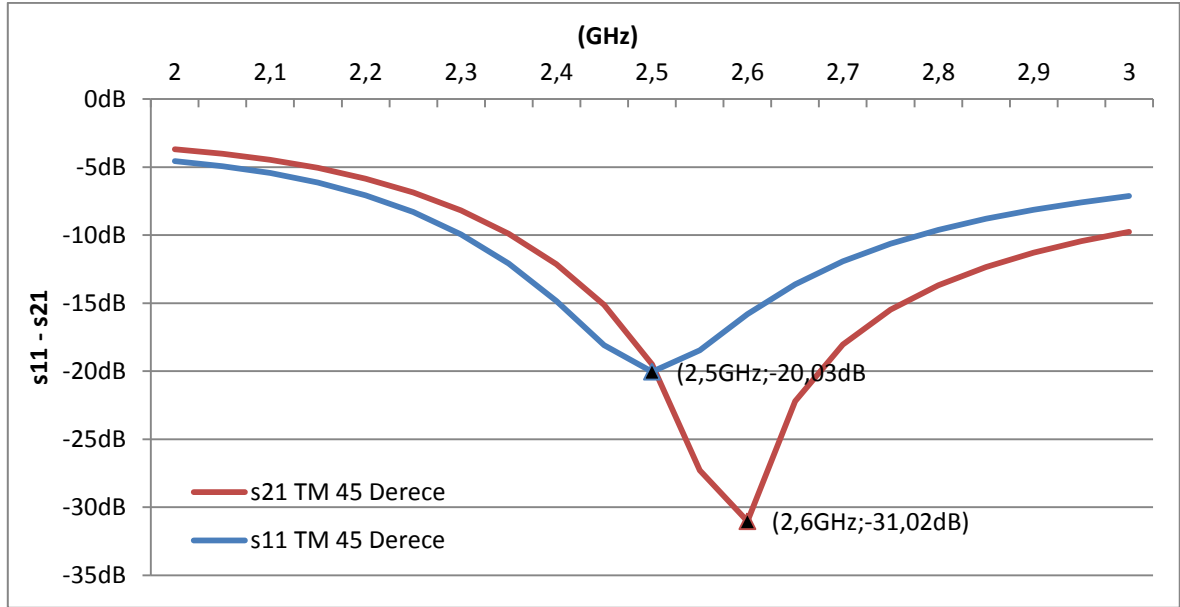
Şekil 73 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$ (HFSS)

Şekil 74’de $\theta=45^\circ$ için TE modunda da ölçüm sonucunda elde edilen iletim ve yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



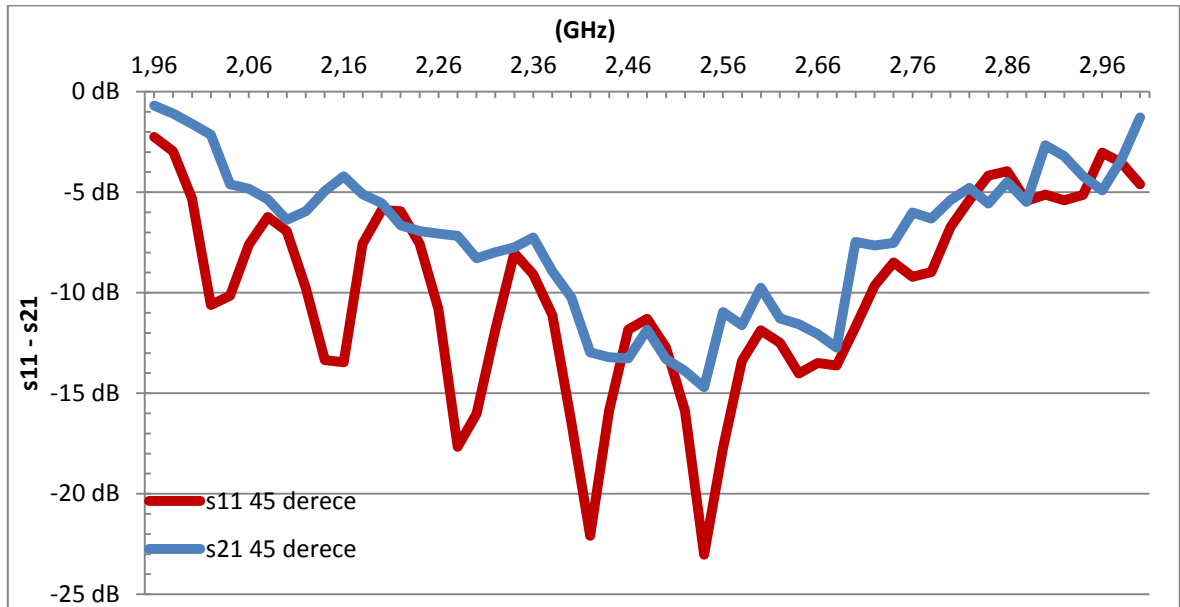
Şekil 74 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$ (Ölçüm)

Şekil 75’de $\theta=45^\circ$ değerinde TM modunda da benzetim sonucunda elde edilen iletim ve yansıma katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 75 : TM modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$ (HFSS)

Şekil 76’de $\theta=45^\circ$ için TM modunda da ölçüm sonucunda elde edilen iletim ve yansımaya katsayılarının frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 76 : TM modunda iletim ve yansımaya katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$ (Ölçüm)

Ölçüm sonuçları, tablo biçiminde, anlaşılmasının daha kolay olması amacıyla projede ilgilenilen frekans bandı için Çizelge 5’da verilmiştir.

	TE MODU				TM MODU			
Frekans GHz	s11 (0°)	s11 (45°)	S21 (0°)	s21 (45°)	s11 (0°)	s11 (45°)	S21 (0°)	s21 (45°)
2,38	-6,250	-8,985	-8,172	-8,038	-9,816	-11,114	-8,125	-8,940
2,4	-11,034	-12,089	-10,273	-11,552	-11,194	-16,428	-9,501	-10,220
2,42	-13,130	-13,387	-13,179	-12,814	-10,419	-22,085	-10,366	-12,970
2,44	-10,161	-16,074	-11,227	-13,448	-7,780	-15,885	-12,168	-13,203
2,46	-8,586	-11,914	-9,958	-13,295	-6,183	-11,840	-10,883	-13,273
2,48	-9,162	-12,225	-10,433	-12,179	-7,414	-11,301	-10,813	-11,830
2,5	-12,098	-13,202	-11,375	-13,321	-8,265	-12,724	-10,700	-13,302

Çizelge 5: TE ve TM modları için ölçüm sonuçları

Yukarıdaki ölçüm sonuçları incelendiğinde 2.45GHz frekans bandında;

TE modu için dalgaın geliş açısının (θ) 45 derece olması durumunda iletim ve yansım katsayılarının değerlerinin -10dB'den daha küçük olduğu ve proje isterlerini karşıladığı görülmektedir.

TM modu için dalgaın geliş açısının (θ) 45 derece olması durumunda iletim ve yansım katsayılarının değerlerinin -10dB'den daha küçük olduğu ve proje isterlerini karşıladığı görülmektedir.

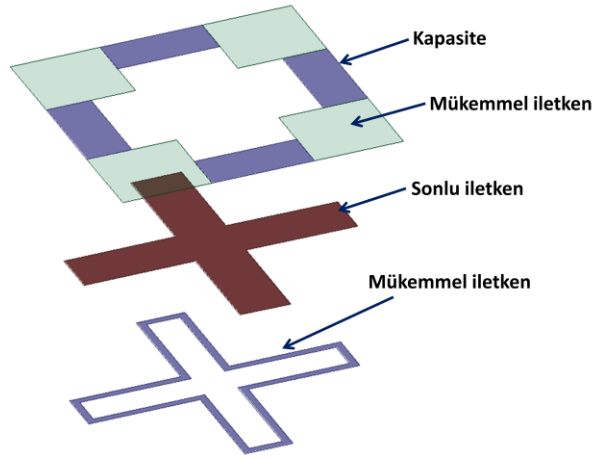
TE modu için dalgaın geliş açısının (θ) sıfır derece olması durumunda iletim katsayısının proje isterlerini karşıladığı, yansım katsayılarının değerlerinin -8.5dB'den daha küçük olduğu ve proje isterlerine çok yakın değerler aldığı görülmektedir.

TM modu için dalgaın geliş açısının (θ) sıfır derece olması durumunda iletim katsayısının proje isterlerin sağladığı, yansım katsayısının -6dB'den daha küçük değerler aldığı ve proje isterlerine yakın değerler aldığı görülmektedir.

Literatürde ofis içindeki radyo dalgalarının yayını sıkça incelenmiştir. Bu araştırmalardan çıkarılan ortak sonuç kapalı mekânları ayıran yüzeylere gelen dalgaın enerjisinin minimum %70'inin yüzeye maksimum atmış derecelik bir açı içinde geldiğidir (PHILIPPAKIS, 2004). Bu sebeplerden dolayı yutucu FSY tasarımlarının eniyileme çalışmaları kırk beş derecelik geliş açısına göre gerçekleştirilmiştir. Kırk beş derecelik geliş açısı ve bu geliş açısına yakın açılarda proje isterlerini sağlayan sonuçlar elde edilmiştir. Sıfır derece için elde edilen sonuçlardaki değişimin FSY tasarım parametrelerinin bu açıya göre değil 45 derecelik açıya göre eniyilemesinin yapılması nedeni ile olduğu anlaşılmaktadır.

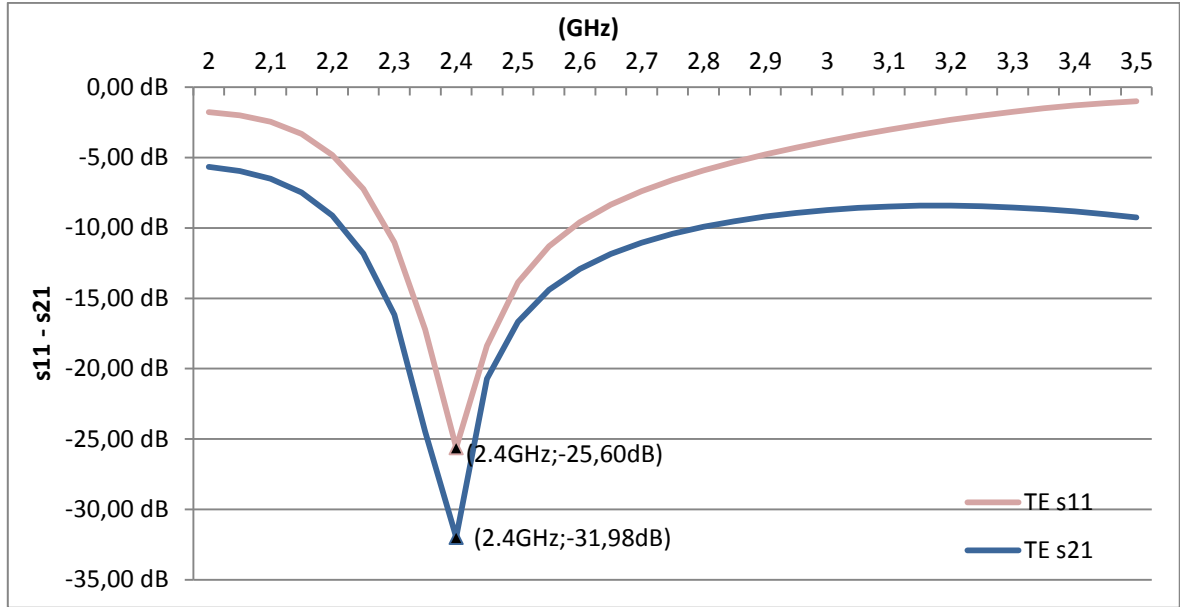
Tasarım 3:

Toplu parametrelı elemanların FSY tasarımlarında kullanılması ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalarda endüktif ve kapasitif elemanların kullanımının sınırlı kaldığı ve bu elemanları içeren proje isterlerine uygun bir tasarımın güncel ve yeni bir çalışma olarak ortaya çıkacağı değerlendirilmiştir. Proje kapsamında 50Ω 'luk yüzey direncine sahip FR4 dielektrik tabakalardan ve 0.04pF değerinde kapasitelerden yararlanılarak 2.4GHz ISM bandı için Şekil 77'de görülen üç katmanlı bant yutucu yeni bir FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın eniyileme çalışmaları gerçekleştirilmiş, imalat maliyetlerinin yüksekliği sebebi ile imalatı gerçekleştirilmemiştir.

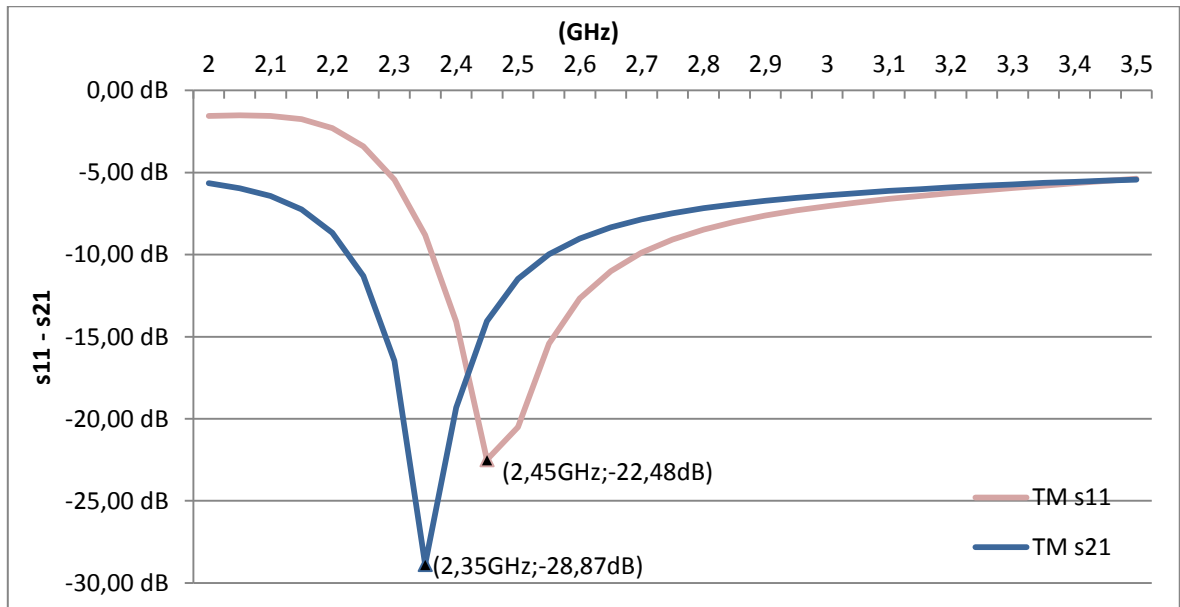


Şekil 77 : Üç katmanlı yutucu FSY tasarımı

Şekil 78 ve Şekil 79'de TE ve TM modları için benzetim sonuçları görülmektedir. Benzetim sonuçları incelendiğinde TE modundaki sonuçların çok iyi olduğu, TM modunda ise yeterli olduğu (hedef band içi değerler -10dB'den düşük) görülmektedir.



Şekil 78 : TE modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$



Şekil 79 : TM modunda iletim ve yansıma katsayılarının frekansla değişimi, $\theta=45^\circ$

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Proje isterlerine göre, tasarlanan FSY'in 2.45GHz merkez frekansında (ISM bandı) 100MHz bant genişliğine sahip, iletim katsayısının (S_{21}) minimum -10dB, yansıma katsayısının minimum -10dB değerlerinde olması ve seri imalatının mümkün olması hedeflenmiştir.

Literatürde 2.45GHz ISM frekans bandı için FSY'ler ile gerçekleştirilen çok fazla araştırma olmadığı, hemen hepsinin bant geçiren frekans karakteristiğine sahip ve genelde çok daha yüksek frekanslar için tasarlandığı görülmektedir. Daha düşük çalışma frekanslarında eleman geometrileri çok büyümekte, bu durum özellikle elektromagnetik dalganın farklı geliş açılara olan duyarlılığı arttırmakta ve rezonans frekansa daha yakın frekanslarda istenmeyen yayınımların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

2.45GHz ISM frekans bandı için proje kapsamında 11 adet FSY geometrisi için geometrik ve parametrik eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tasarımın birinci aşamasında iletim yönünde minimum -10dB değerinde iletim katsayısına sahip dar bantlı FSY geometrileri araştırılmıştır. Şekil 14'de gösterilen **bu geometrilerinden iki tanesi bu proje kapsamında önerilerek geliştirilmiştir**. Bu geometrilerden Şekil 15'te verilen G1 geometrisi ile TE modunda gelen elektromagnetik dalganın yüzey normali ile yaptığı bütün açılarında diğer geometrilere göre çok daha dar bir söndürme bandı elde edilebilmiştir. Ayrıca söndürme bant genişliğinin, rezonans frekansı değişmeden, aralarındaki açı 120 dereceden az olan iki kol arasındaki açının değiştirilmesi ile ayarlanabilme özelliğine sahip olduğu görülmüştür.

Tasarımın ikinci aşamasında, birinci aşamada tasarımları gerçekleştirilen FSY'lerden iletim katsayısı yanında yansıma katsayısının da (S_{11}) minimum -10dB değerini sağlaması için gerekli tasarım değişiklikleri yapılmıştır. **Sonlu iletkenliğe sahip yüzeylerin kullanılması ile proje kapsamında üç farklı yeni bant yutucu FSY (Şekil 61) tasarımı 2.45GHz ISM frekans bandı için gerçekleştirilmiş** ve minimum -10dB zayıflama ve söndürme değerleri benzetim ortamında elde edilmiştir.

Sonlu iletkenliğe sahip malzemenin ülkemizdeki tedarik problemleri sebebi ile gerçekleştirilemeyen FSY imalatı yerine 100 Ω 'luk dirençler kullanılarak yeni bir bant yutucu FSY tasarımı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. FSY geometrilerinde mükemmel iletken yolların arasına 100 Ω değerinde dirençler yerleştirilmiş ve sonlu bir iletkenlik değerine sahip yüzey davranışı gösteren FSY geometrileri elde edilmiştir. Bu tasarımın iletim ve yansıma

yönlerinde benzetim çalışmaları, imalatı ve laboratuvar ortamında ölçümleri gerçekleştirilmiş ve proje isterlerini karşılayan minimum -10dB zayıflama ve söndürme değerleri elde edilmiştir. **Literatürde 2.4GHz ISM bandı için benzer bir çalışma bulunmamaktadır. Toplu parametrelili elemanlar kullanılarak ülkemizde ilk defa böylesi bir FSY tasarlanmış, imalat ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir.**

Toplu parametrelili elemanların FSY tasarımlarında kullanılması ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalarda endüktif ve kapasitif elemanların kullanımının sınırlı kaldığı ve bu elemanları içeren proje isterlerine uygun bir tasarımın güncel ve yeni bir çalışma olarak ortaya çıkacağı değerlendirilmiştir. **Proje kapsamında 50Ω'luk yüzey direncine sahip FR4 dielektrik tabakalardan ve 0.04pF değerinde kapasitelerden yararlanılarak 2.4GHz ISM bandı için Şekil 77'de görülen üç katmanlı bant yutucu özelliğe sahip yeni bir FSY tasarımı benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.** Tasarımın eniyileme çalışmaları yapılmış, imalat maliyetlerinin yüksekliği sebebi ile imalatı gerçekleştirilmemiştir.

Proje kapsamında FSY'lerin imalat yöntemleri araştırılmış ve uygun görülen imalat yöntemine göre tasarımların eniyileme çalışmaları tamamlanmıştır. İmalatları tamamlanan FSY'lerin laboratuvar ortamında ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen ölçüm sonuçlarına göre FSY tasarımlarında gerekli görülen eniyileme çalışmaları yapılmıştır.

Tasarımları tamamlanan iki adet bant söndüren FSY'in imalatları iki farklı yöntem ile iki farklı dielektrik tabaka üzerinde gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamında ölçümleri yapılmıştır. **Ölçüm sonuçlarına göre bant söndüren ($S_{21} < -10\text{dB}$) FSY tasarımlarının proje isterlerini karşıladığı görülmüştür.**

Tasarımları tamamlanan yutucu FSY'lerden 100Ω değerinde dirençlerin kullanılması ile rahatlıkla imal edilebilen bir yutucu FSY'in imalatı gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ortamında ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre;

TE ve TM modlarında dalgaın geliş açısının (θ) 45^0 olması durumunda iletim ve yansıma katsayılarının değerlerinin -10dB'den daha küçük olduğu ve proje isterlerini karşıladığı görülmüştür.

TE modunda dalgaın geliş açısının (θ) 0^0 olması durumunda iletim katsayısının proje isterlerini karşıladığı, yansıma katsayılarının değerlerinin -8.5dB'den daha küçük olduğu ve proje isterlerine çok yakın değerler aldığı görülmüştür.

TM modu için dalganın geliş açısının (θ) 0^0 olması durumunda iletim katsayısının proje isterlerin sağladığı, yansıma katsayısının -6dB'den daha küçük değerler aldığı ve proje isterlerine yakın değerler verdiği görülmüştür.

Yutucu FSY tasarımlarının eniyileme çalışmaları Bölüm 2.6'da belirlendiği gibi 45^0 derecelik geliş açısına göre gerçekleştirilmiştir. 45^0 derecelik geliş açısı ve bu geliş açısına yakın açılarda proje isterlerini sağlayan sonuçlar elde edilmiştir. 0^0 için elde edilen sonuçlardaki değişimin FSY tasarım parametrelerinin bu açıya göre değil 45^0 derecelik açıya göre eniyilemesinin yapılması nedeni ile olduğu anlaşılmaktadır.

Öneriler:

Proje kapsamında 2.45GHz bandında bant söndüren ve bant yutucu FSY tasarımları gerçekleştirilmiştir. Projede elde edilen bilgiler ve tecrübeler ışığında bundan sonraki projelerde birden çok bantı söndüren veya yutan FSY tasarımları veya rezonans frekansı isteğe göre ayarlanabilir FSY tasarımları üzerinde çalışılması düşünülmektedir.

REFERANSLAR

1. MITTRA R., CHAN C. H., CWIK T., Techniques for analyzing frequency selective surfaces a review. Proc. IEEE, 76, 12, 1593-1615, (1988).
2. CHEN M., WANG S. N., Electromagnetic Analysis of Electrically Large and Finite Periodic Frequency Selective Surfaces, Microwave Conference APMC 2008 Asia-Pacific, Hong Kong, (2008), Pp: 1-4.
3. KIANI G.I., Oblique Incidence Performance of a Novel Frequency Selective Surface Absorber, Antennas and Propagation, 55, 10, 2931 – 2934, (2007).
4. MUNK, B. A., Frequency Selective Surfaces - Theory and Design, John Wiley and Sons. Inc., New York, (2000).
5. SUNG, H., Frequency Selective Wallpaper for Mitigating Indoor Wireless Interference, The University of Auckland, (2006).
6. RASPOPOULOS, M., Radio propagation in frequency selective surfaces, Wiley InterScience, 2006. Pp:407–413.
7. PHILIPPAKIS M., KEMP D., Application of FSS Structures to Selectively Control the propagation of signals into and out of buildings Annex 3: Enhancing propagation into buildings, (2004).
8. MARCUWITZ N., Waveguide Handbook, McGraw-Hill, New York, (1951).
9. WU T.K., Frequency Selective Surface and Grid Array, Wiley Interscience Publication, (1995).

TÜBİTAK

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 110E104
Proje Başlığı: Bina İçi Kablosuz İletişimde Amaca Uygun İşaret İletimini Sağlayan Yapısal Yüzey Malzemesi Tasarımı
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç. Dr. Mesut Kartal, Prof. Dr. Sedef Kent,
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, Maslak, İstanbul
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1/3/2010 - 31/8/2012
Öz (en çok 70 kelime) Projede bina içi kablosuz iletişimde 2.4 - 2.4835GHz ISM serbest frekans bandında ortaya çıkan girişim etkilerini en aza indirmek için bu frekans bandındaki gelen RF işaretleri söndüren, diğer frekanslarda ise iyi bir iletim karakteristiğine sahip olan yapısal yüzey malzemesi tasarımı hedeflenmiştir. Proje kapsamında, proje isterlerine uygun olarak FSY prototiplerinin tasarımı, üretimi ve laboratuvarında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçların proje isterlerini sağladığı ve projenin başarılı olduğu görülmüştür.
Anahtar Kelimeler: Periyodik Yapılar, emici yüzeyler, Frekans Seçici Yüzey (FSY), çok yollu sönümleme, kablosuz iletişim sistemleri (WLAN)
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet ☐ Gerekli Değil ☒ Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: 1. Doç. Dr. Mesut Kartal, Bora Döken, İsmail Güngör, "Design for the structural surface material enabling shielding for interference mitigation within the buildings in the unlicensed 2.4GHz ISM band", General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, URSI GASS 2011, Ağustos 2011, İstanbul. 2. Doç. Dr. Mesut Kartal, Bora Döken, "Frequency Selective Absorber Surface at the 2.4GHz unlicensed ISM band", Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2012 in Moscow, Ağustos 2012, Moskova.