

C-BANDINDA FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI VE ANALİZİ

Yağmur BARIŞ ALTAY *^{ID}
Uğur YALÇIN **^{ID}

Alınma:29.04.2022; düzeltme:31.03.2023; kabul: 28.07.2023

Öz: Belirlenen frekans aralığında yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların iletim, yansıma veya soğurma özelliği göstermesini sağlayan periyodik yapılara frekans seçici yüzeyler (FSY) denir. Çalışmada üç farklı geometrik şekle sahip FSY tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların temel iletim karakteristiğini bozmadan, birim hücreleri üzerinde optimizasyon çalışmaları yaparak, kullanılan parametrelerin değiştirilmesinin, s parametreleri, rezonans frekansı, bant genişliği ve maksimum soğurma değerine etkisi incelenmiştir. C-bandında (4 GHz–8 GHz) gerçekleştirilen çalışmalarda -10 dB kazanç değerinde bant genişliğini arttırabilmek için tasarlanan iki yapının üst üste birleştirilmesiyle yeni bir ultra geniş bantlı (UGB) FSY elde edilmiştir. Elde edilen yeni UGB FSY ile radar kesit alanının (RKA) azaltılması amaçlanmıştır. Tasarıma ait benzetim ve analizler CST Studio Suite 3D programı ile gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: C-Bandı, Frekans Seçici Yüzey (FSY), Radar Kesit Alanı (RKA), Bant Durduran Filtre, Ultra Geniş Bant (UGB)

Frequency Selective Surface Design and Analysis in C-Band

Abstract: Frequency selective surfaces (FSS) are periodic structures that allow electromagnetic waves incident on the surface to transmit, reflect or absorb in a specified frequency range. In the study, three different geometric shapes of FSY were designed. The effect of changing the parameters used on the s parameters, resonance frequency, bandwidth and maximum absorption value by performing optimization studies on the unit cells withoutIn the C-band (4 GHz-8 GHz), a new ultra-wideband (UGB) FSY was obtained by combining two structures designed to increase the bandwidth at -10 dB gain. disturbing the basic transmission characteristics of the designed structures has been studied. The resulting new UGB FSM aims to reduce the radar cross-sectional area (RCSA). Simulation and analysis of the design were carried out with CST Studio Suite 3D program.

Keywords: C-Band, Frequency Selective Surface (FSS), Radar Cross Section (RCA), Band Stop Filter, Ultra-Wide Band (UWB)

* R&D Department, Durmazlar Rail Systems, TR-16110, Bursa, TURKEY

** Bursa Uludağ Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TR-16059, Bursa, TÜRKİYE

İletişim Yazarı: Yağmur Barış Altay (ygm_r_brs@hotmail.com)

1. GİRİŞ

Yüzeye gelen elektromanyetik dalgaların belirlenen frekans aralığına bağlı olarak, iletim veya yansımaya özelliği göstermesini sağlayan periyodik yapılara frekans seçici yüzey (FSY) denir (Topcuoğlu, 2018). FSY'ler, "kalkanlama etkinliği" ile istenen frekanslarda sistemin çalışmasını sağlayıp, istenmeyen frekansları engelleyerek filtre özelliği göstermektedir (Munk, 2000; O'Nians ve diğ., 1966).

FSY'ler, radyo frekansı ile tanımlama (RFID) uygulamaları, mikrodalga ve anten sistemleri, uzay-uydu haberleşmesi, kablosuz ağ güvenliği gibi pek çok alanda filtreleme amacıyla kullanılmaktadır (Munk, 2000; Mittra ve diğ., 1988; Hu ve Tennant, 2012). Ayrıca radar kesit alanını (RKA) geniş frekans aralığında kontrol edebildiği için RKA azaltma işlemlerinde de pek çok avantaj sağlamaktadır. RKA azaltımında, iletim ve alma için tek anten kullanan monostatik radarlarda, dalganın geri yansımalarını engellemek için gelen dalga farklı yönlere dağıtılır (Kim ve diğ., 2008; Choi ve diğ., 2014). Fakat bistatik, multistatik ve pasif radarlar gibi iletim ve alma işlemlerini ayrı antenler üzerinden gerçekleştiren çok alıcılı radarlarda, gelen dalgayı farklı yönlere dağıtmaktan ziyade yansıtma olmadan gelen dalganın enerjisini soğurup, duvarın diğer tarafına iletimi engellenmelidir. Bu işlem FSY içeren yapılar ile emici yüzey tasarımı yaparak gerçekleştirilir.

Kiermeier ve Biebl (2007) çalışmalarında frekans seçici yüzeylerin, dielektrik tabakalar üzerine yerleştirilmiş iletken malzemelerden oluşan tek ya da çift katmanlı yapılar olduğunu ifade etmiştir. Bu yapılar iletken yamalar veya iletken üzerindeki periyodik yarıklar şeklinde meydana gelmektedir. Yama kullanılarak oluşturulan yapılar alçak geçiren filtre özelliği gösterirken, periyodik yarıklar şeklinde oluşturulan yapılar ise yüksek geçiren filtre özelliği göstermektedir. Zamanla yapılan araştırmalar ve geliştirmeler doğrultusunda FSY tasarımı için daire, kare, altıgen ve fraktal gibi çok sayıda farklı geometrik şekillerin kullanılmasıyla, bant durduran ve bant geçiren periyodik elemanlarda ortaya çıkarak toplamda dört farklı filtre karakteristiği meydana gelmiştir (Göksel, 2018; Taylor ve diğ., 2011; Li ve diğ., 2011; Zheng ve diğ., 2010).

Munk (2000) yaptığı çalışmada yansımaya-iletim karakteristiğini ve frekansın özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerin, tasarımda kullanılan birim hücre geometrisi, elemanların iletkenliği, dielektrik levhaların etkileri, elemanlar aralarındaki boşluk mesafesi, yüzeye gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı olduğunu belirtmiştir.

FSY'ler ile ilgili literatür araştırması yapıldığında birçok tasarıma rastlanmaktadır. Örneğin; Seven ve diğ., (2022) çalışmalarında tasarladığı halka geometrik şekilli FSY ile rezonans frekansı 4,85 GHz, bant genişliği yaklaşık olarak 750 MHz ve maksimum soğurması değeri yaklaşık olarak -53 dB elde edilmiştir. Kocakaya ve Çakır (2018) çalışmalarında tasarladığı halka geometrik şekilli FSY ile rezonans frekansı 8,34 GHz olarak elde edilmiştir. Bant genişliğini arttırmak için halka şeklini çapraz dipol ile birleştirerek elde ettikleri FSY ile rezonans frekansı 7,72 GHz ve bant genişliği yaklaşık olarak 3,5 GHz elde edilmiştir. Literatürde tasarlanan halka geometrik şekilli FSY'ler zayıflama düzeyleri bakımından incelendiğinde; Azemi ve Rowe (2011) -60 dB, Azemi ve diğ. (2012) -54 dB, Angun (2017) -59 dB ve Seven ve diğ. (2022) -53 dB olduğu görülmektedir.

Araştırmalar doğrultusunda halka geometrik şeklini kullanarak tasarlanan FSY'lerin fazla olduğu fakat bu tasarımlar arasında C bandında çalışan yapıların az olduğu görülmektedir. Bu çalışmada C bandında çalışan, -10 dB kazanç değerinde, literatür araştırmalarındaki yapılardan daha yüksek bant genişliğine sahip olan yeni bir UGB FSY tasarlanmıştır. Tasarlanan bu FSY ile RKA değeri azaltılarak, görünmezlik teknolojilerinde kullanılabilen bir yapının elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bölüm 1'de FSY'nin tanımı, kullanım alanları, RKA azaltma yöntemlerindeki önemi ve literatürdeki bazı çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 2'de tasarımda kullanılacak dielektrik malzeme belirlenmiştir ve birim hücreler tasarlanırken CST programının nasıl kullanılacağı ifade edilmiştir. Bölüm 3'te ise halka ve çizgi-kare şekilleriyle oluşturulan yapılar, tek tek analiz edilip, tasarlanan yapıların temel parametreleri değiştirilerek, bant genişliğini arttırmak için çalışmalar

yapılmıştır. Son olarak elde edilen en verimli iki yapı, üst üste gelecek şekilde birleştirilerek, daha yüksek verimli, daha geniş bant aralığı ve iyi zayıflama düzeyine sahip, dalganın geliş açısından bağımsız yeni bir UGB FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve analizler CST Studio Suite 3D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. MODELLEME VE ANALİZ

2.1. Modellenen Frekans Seçici Yüzeyin Özellikleri

Tasarımın, yüksek verim ve geniş bant aralığı sağlayabilmesi için taban malzemesinin dielektrik sabiti (ϵ_r) düşük değerlerde olmalıdır ve $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığında seçilmelidir (Balanis, 2005; Pozar, 1992). Bu doğrultuda önerilen yapılarda iletken malzeme olarak bakır, dielektrik taban malzemesi olarak RT5885 ($\epsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$) kullanılmıştır (Barış Altay, 2022).

Çalışmada farklı geometrik şekiller kullanarak, üç farklı FSY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar ilk aşamada tek tek analiz edilmiştir. Analizler sonucu en verimli değerlere sahip iki tasarım üst üste gelecek şekilde birleştirilerek, -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliği sahip yeni UGB FSY elde edilmiştir.

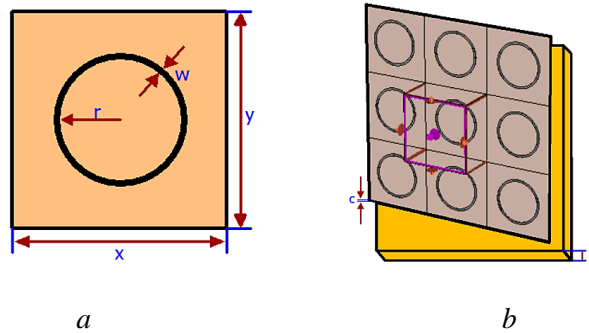
2.1.1. Birim Hücre Tasarımı

Birim hücreler tasarlanırken, gerçek ölçüm sonuçları elde etmesi ve modül çeşitliliğinin çok olmasından dolayı elektromanyetik simülasyon programı olarak CST Studio Suite 3D kullanılmıştır (Yiğit ve Duysak, 2019). CST Studio ile FSY tasarlamak için ilk adımda "MICROWAVES & RF & OPTICAL" bölümünden "PERIODIC STRUCTURES" sekmesini seçilmelidir. İkinci adımda ise tasarlanacak FSY'nin nasıl analiz edileceği, istenen çalışma frekans aralığı, kullanılacak geometrik şekil ve parametre değerleri seçilmelidir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Halka Geometrik Şekli FSY Tasarımı Ve Analizi

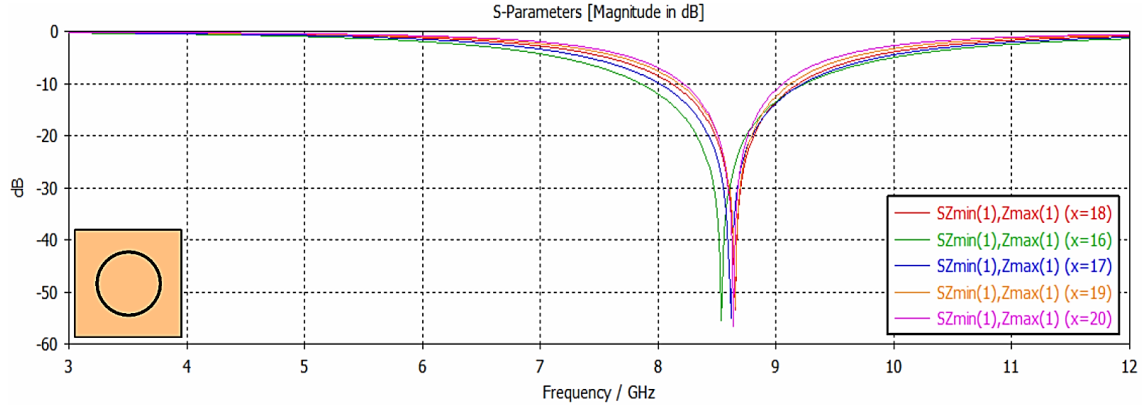
Oluşturulan ilk yapıda halka geometrik şekil kullanılmıştır. Yapının birim hücre tasarımı şekil 1a'da ve birim hücrelerin dielektrik tabaka üzerine x-y yönlerinde periyodik olarak yerleştirilmesiyle oluşan geometrik dizisi şekil 1b'de gösterilmiştir. FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $h=0.5$ mm, iletken yüzeyin et kalınlığı $c=0.035$ mm, yarıçapı $r = 5.95$ ve genişliği $w = 0.5$ mm değerindedir.



Şekil 1:

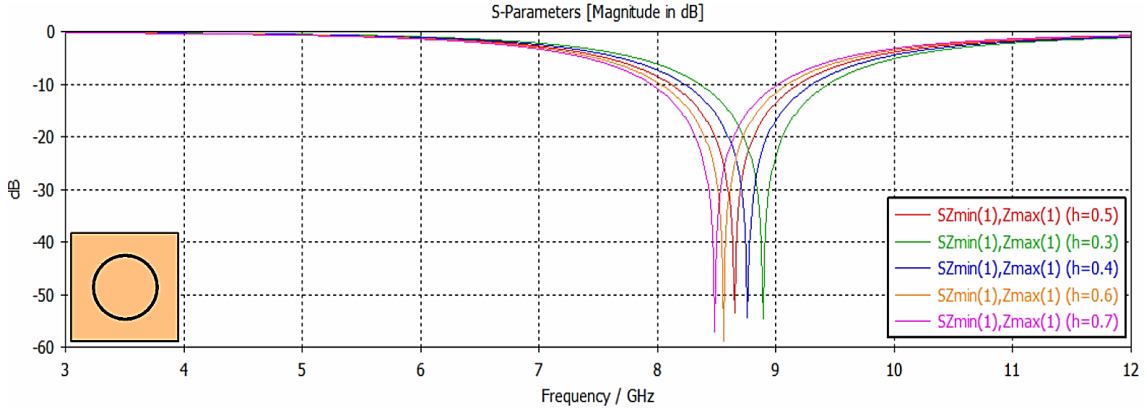
Halka geometrik şekilli FSY

a. Birim hücre görünümü b. Dizi görünümü



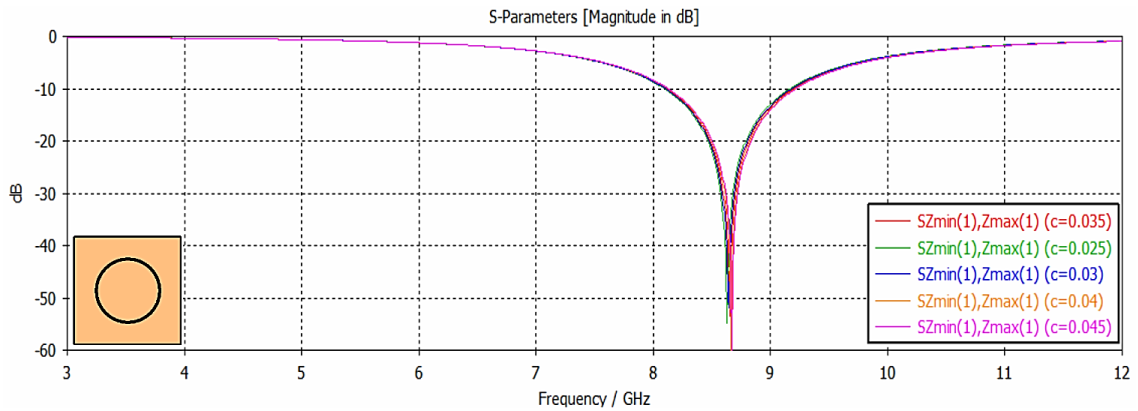
Şekil 2:

Halka geometrik şekilli FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



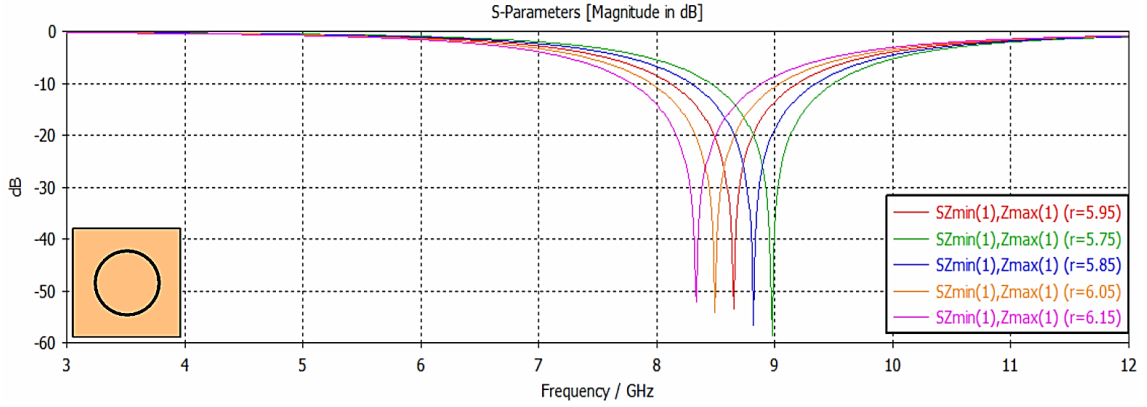
Şekil 3:

Halka geometrik şekilli FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (h) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



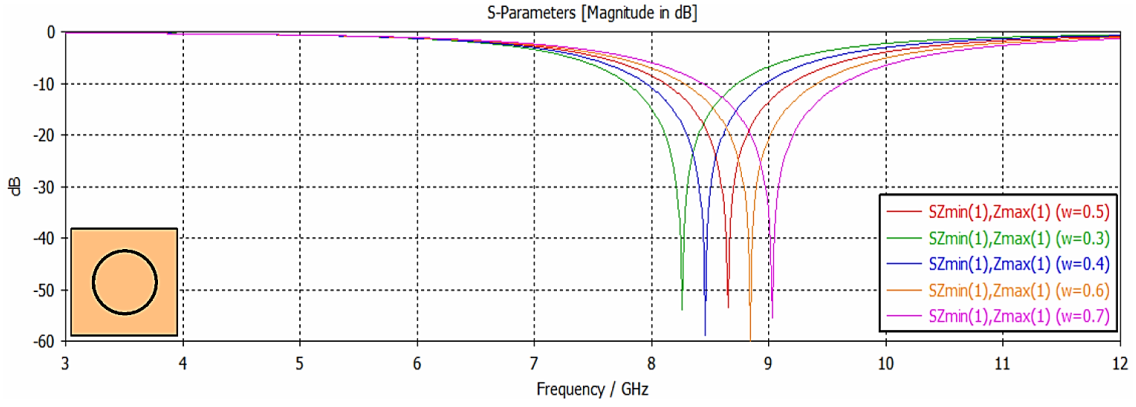
Şekil 4:

Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey et kalınlığının (c) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



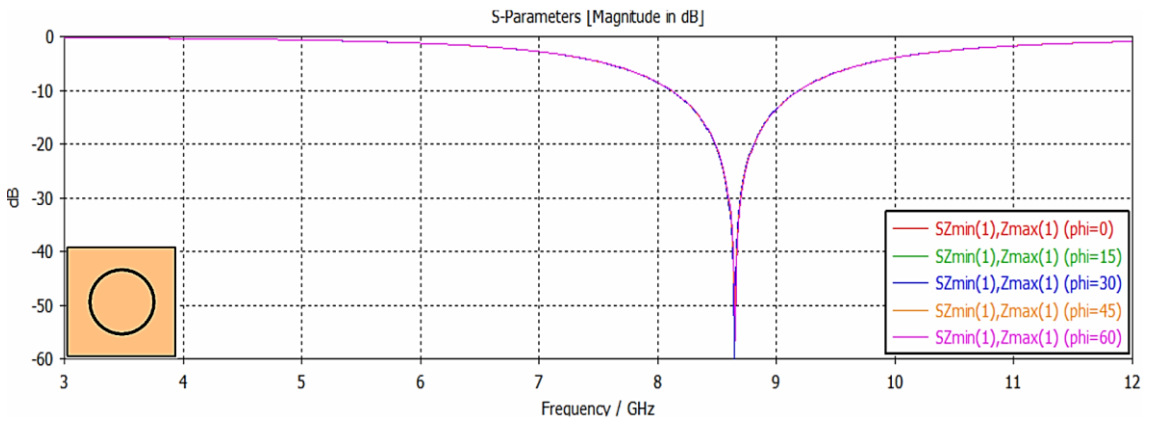
Şekil 5:

Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



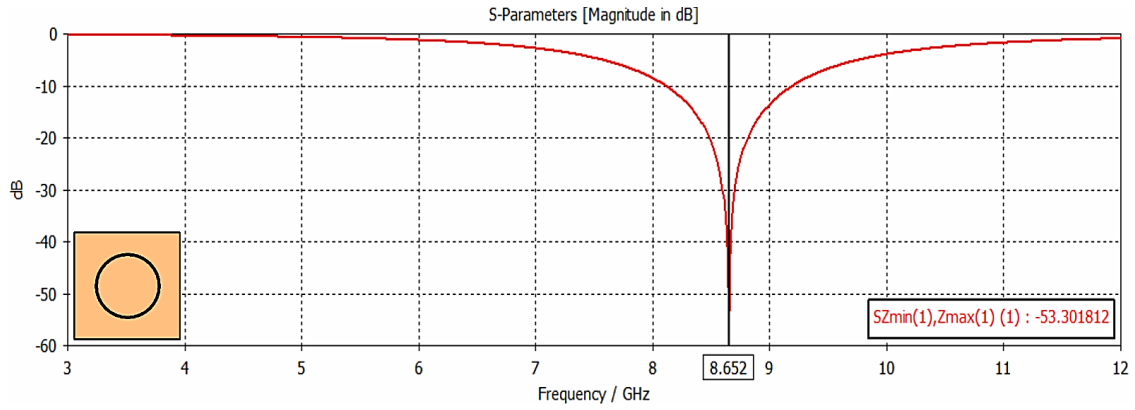
Şekil 6:

Halka geometrik şekilli FSY'nin iletken yüzey kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



Şekil 7:

Halka geometrik şekilli FSY'nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



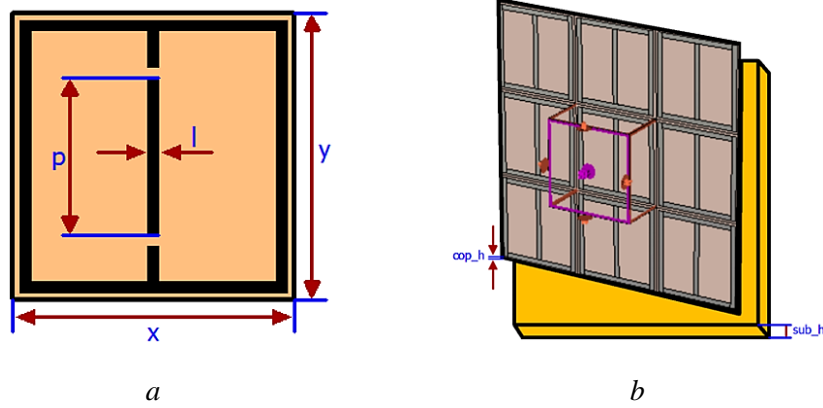
Şekil 8:

Halka geometrik şekliyle oluşan en verimli FSY'nin iletim karakteristiği

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları doğrultusunda şekil 8'de en verimli halka şeklindeki FSY'nin iletim karakteristiği verilmiştir. Bu grafikte bant genişliği 2,15 GHz, maksimum yansıtma frekansı 8,652 GHz ve maksimum soğurma değeri - 52.3018 dB olarak ölçülmektedir. Ayrıca oluşturulan FSY, dalga geliş açısından bağımsız ve bant durdurucu filtre karakteristiği göstermektedir.

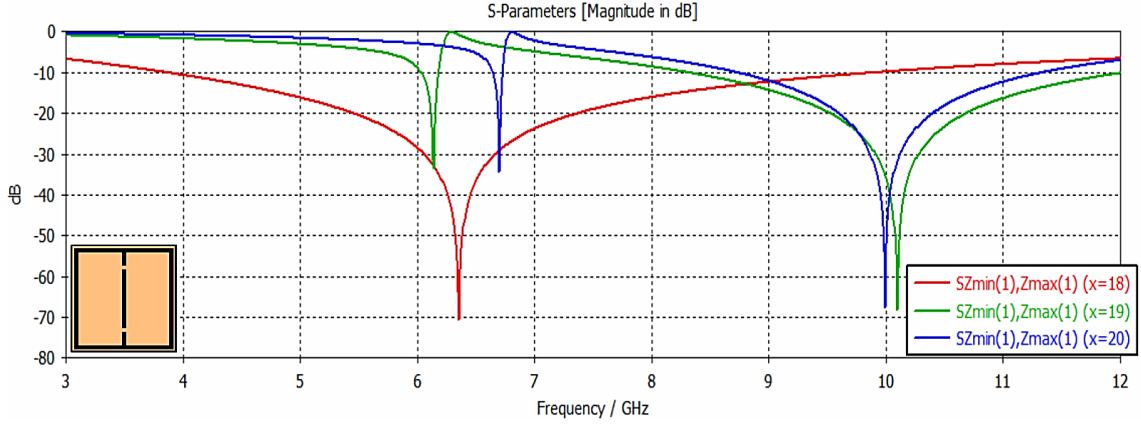
3.2. Kare ve Kesik Çizgilerden Oluşan FSY'nin Tasarımı ve Analizi

Tasarlanan ikinci yapıda kare ve kesik çizgi şekilleri kullanılmıştır. Yapının birim hücre tasarımı şekil 9a'da ve birim hücre dizisi şekil 9b'de gösterilmiştir. FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $sub_h=0.5$ mm, iletken yüzeyin et kalınlığı $c=0,035$ mm, uzunluğu $p = 1,5$ mm ve genişliği $l = 1,5$ mm'dir.

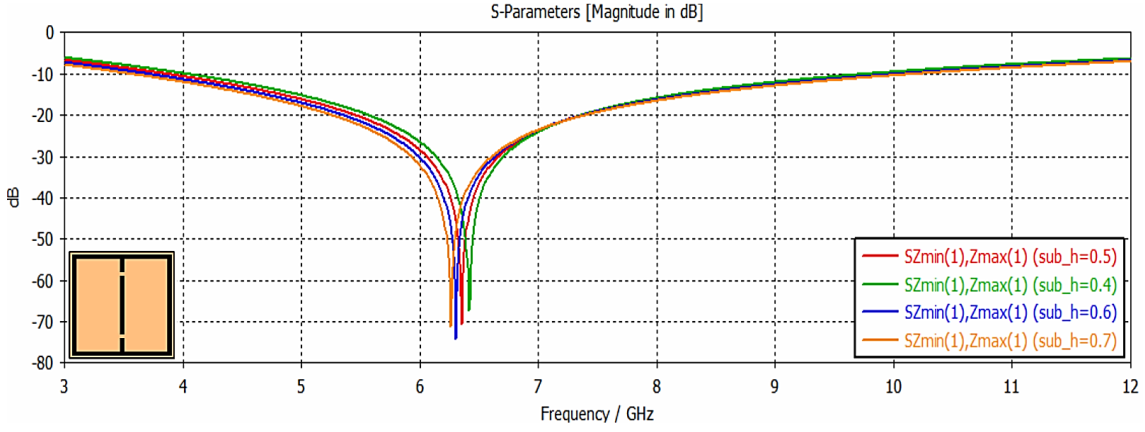


Şekil 9:

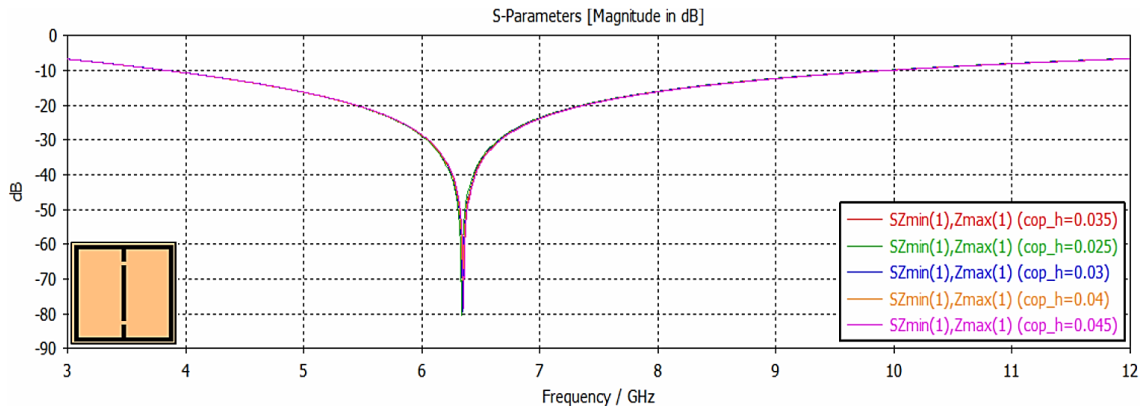
*Kare ve kesik çizgili FSY
a. Birim hücre görünümü b. Dizi görünümü*



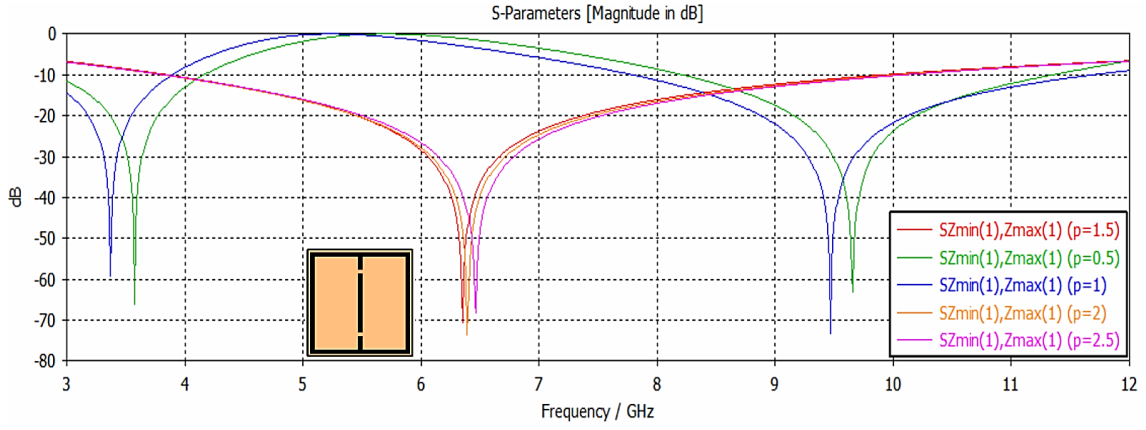
Şekil 10:
İkinci FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



Şekil 11:
İkinci FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği

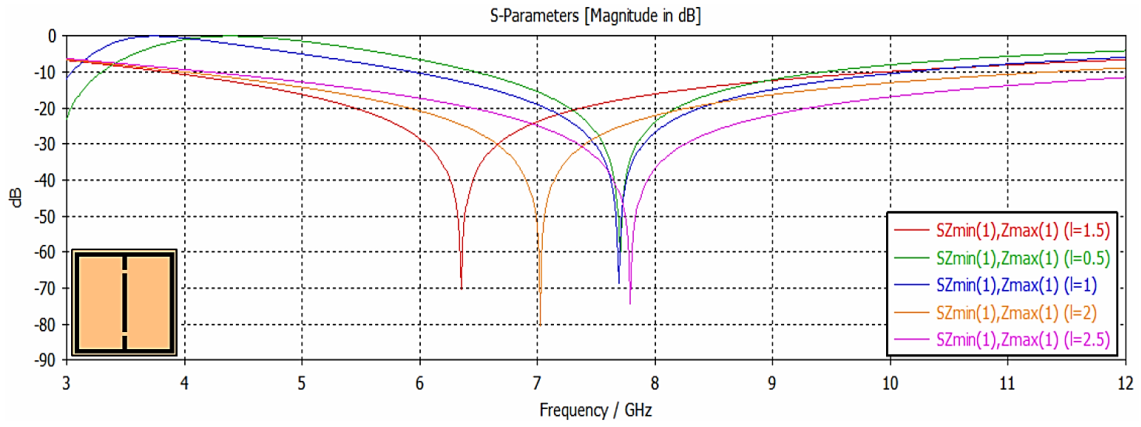


Şekil 12:
İkinci FSY'nin iletken yüzey et kalınlığının (cop_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



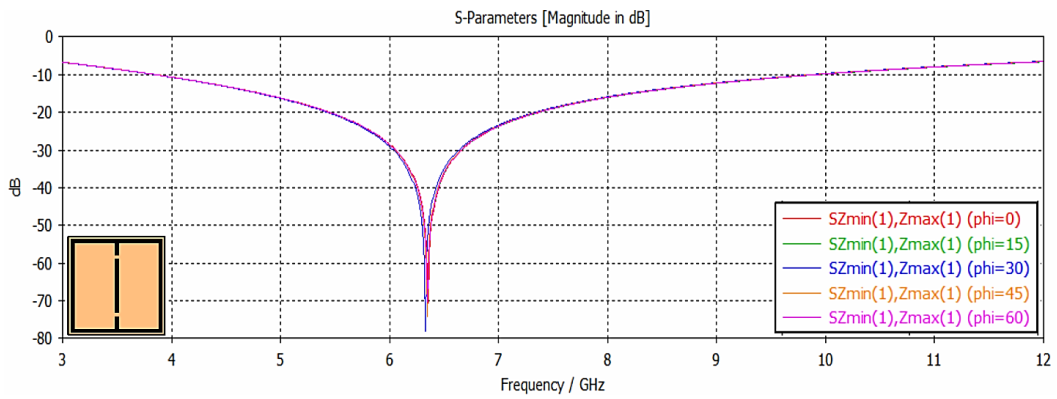
Şekil 13:

İkinci FSY'nin iletken yüzey uzunluğunun (p) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



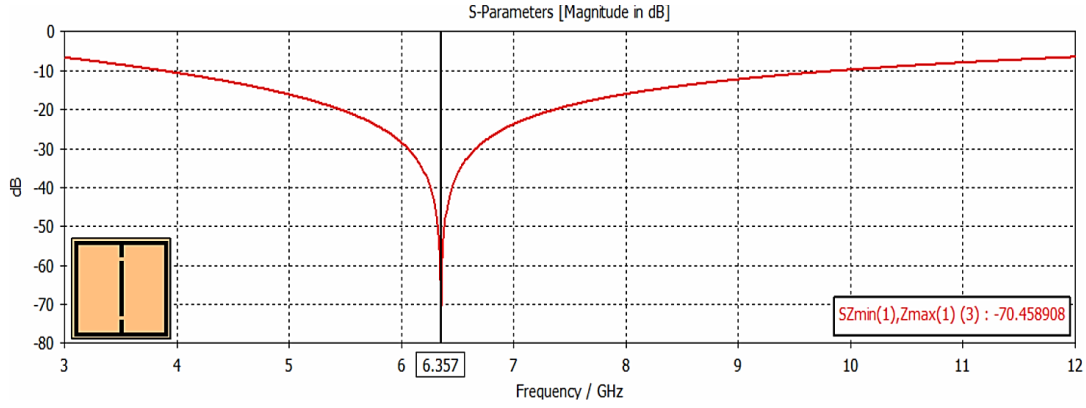
Şekil 14:

İkinci FSY'nin iletken yüzey genişliğinin (l) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



Şekil 15:

İkinci FSY'nin dalga geliş açısının (ϕ) değışmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği

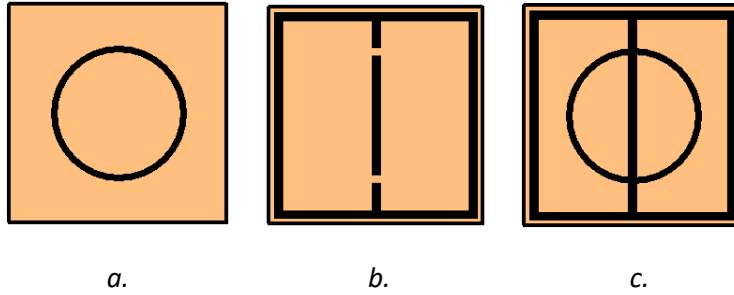


Şekil 16:

Kare ve kesik çizgilerden oluşan en verimli FSY'nin iletim karakteristiği

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları doğrultusunda şekil 16'da en verimli kare ve dik çizgilerden oluşan FSY'nin iletim karakteristik grafiği verilmiştir. Bu grafikte bant genişliği 5,83 GHz, maksimum yansıtma frekansı 6,357 GHz ve maksimum soğurma değeri $-70,4589$ dB olarak ölçülmektedir. Ayrıca oluşturulan FSY, dalga geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristik özelliği göstermektedir.

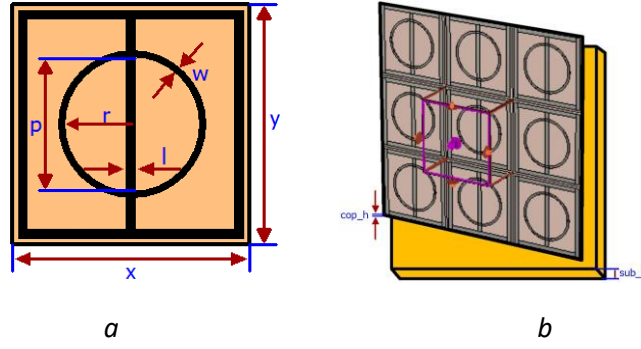
3.3. Önerilen FSY'nin Tasarımı ve Analizi



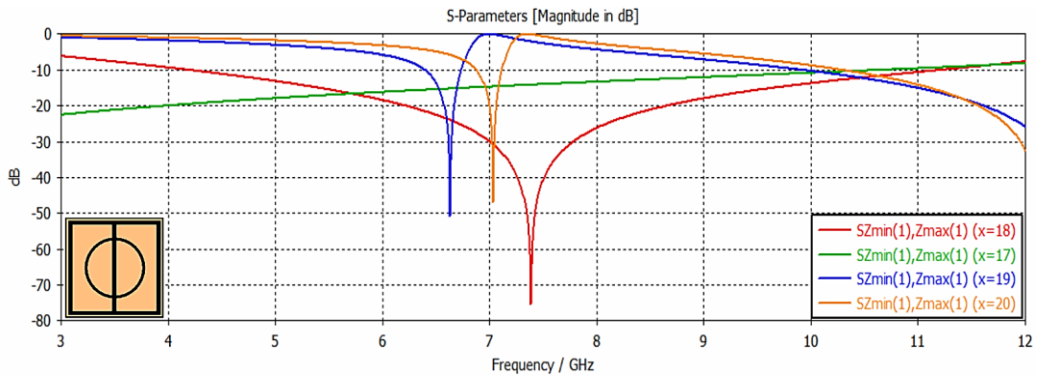
Şekil 17:

a. Halka şekilli FSY b. Kare ve kesik çizgili FSY c. Önerilen FSY

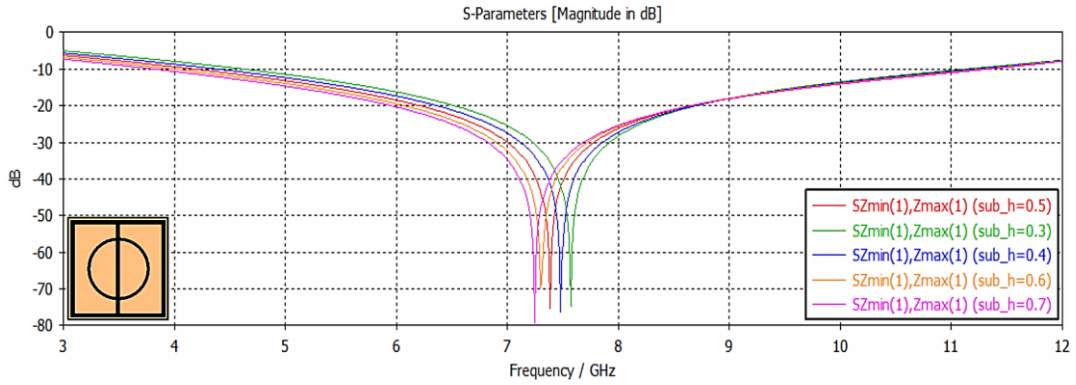
C bandında çalışan ve -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliği elde edebilmek için CST Suite Studio 3D programı yardımıyla şekil 17a ve şekil 17b'de tasarlanan iki yapının üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle, şekil 17c'de gösterilen FSY elde edilmiştir. Elde edilen FSY'nin birim hücre tasarımı şekil 18a'da ve birim hücre dizisi şekil 18b'de gösterilmiştir. FSY'nin birim hücre boyutu $x=y=18$ mm, dielektrik katman kalınlığı $sub_h=0.5$ mm, iletken yüzeyin et kalınlığı $c=0,035$ mm, uzunluğu $p = 2$ mm, genişliği $l = 1,5$, dairenin yarıçapı $r = 5,95$ ve kalınlığı $w = 0,5$ mm'dir.



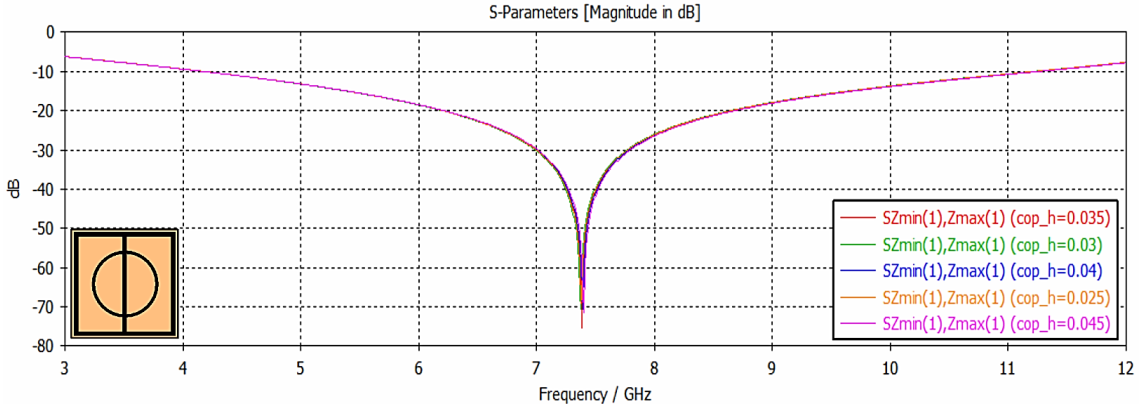
Şekil 18:
a. Önerilen FSY'nin birim hücre geometrisi b. Önerilen UGB FSY dizisi



Şekil 19:
Önerilen UGB FSY'nin birim hücre boyutunun (x) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği

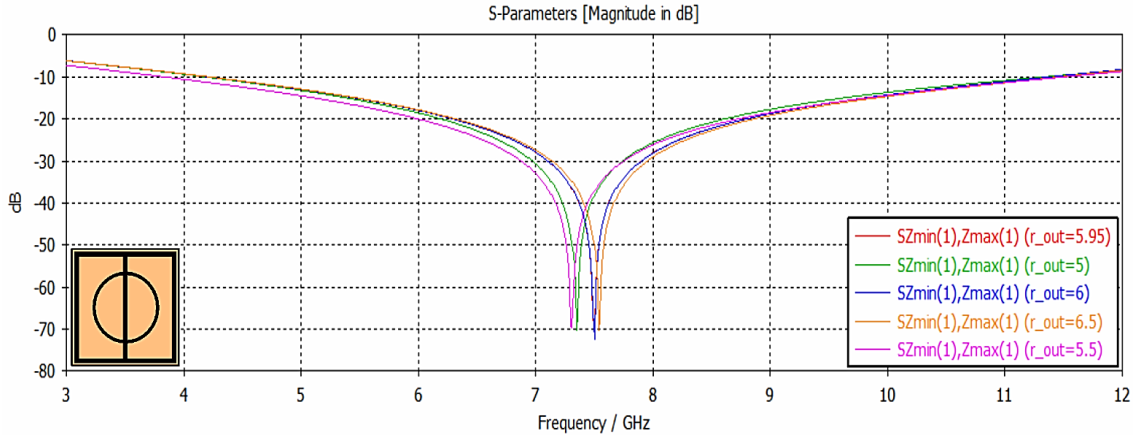


Şekil 20:
Önerilen UGB FSY'nin dielektrik katman kalınlığının (sub_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



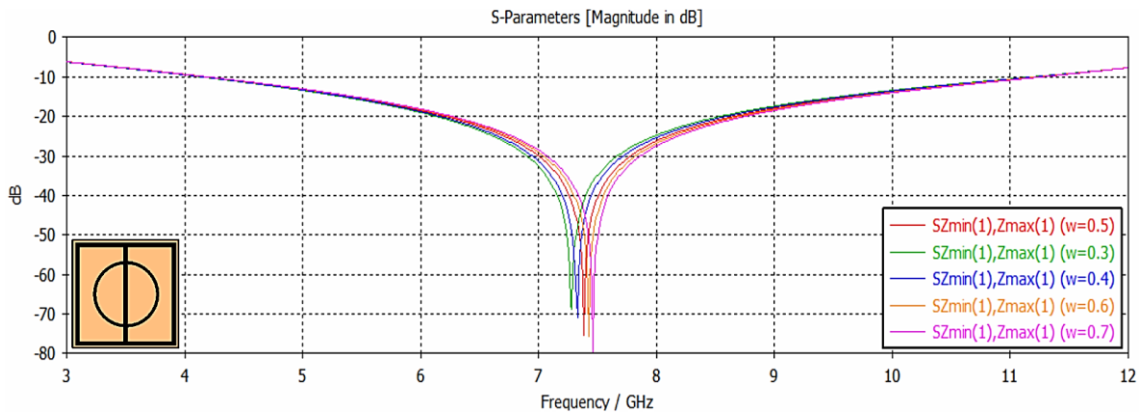
Şekil 21:

Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey et kalınlığının (cop_h) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



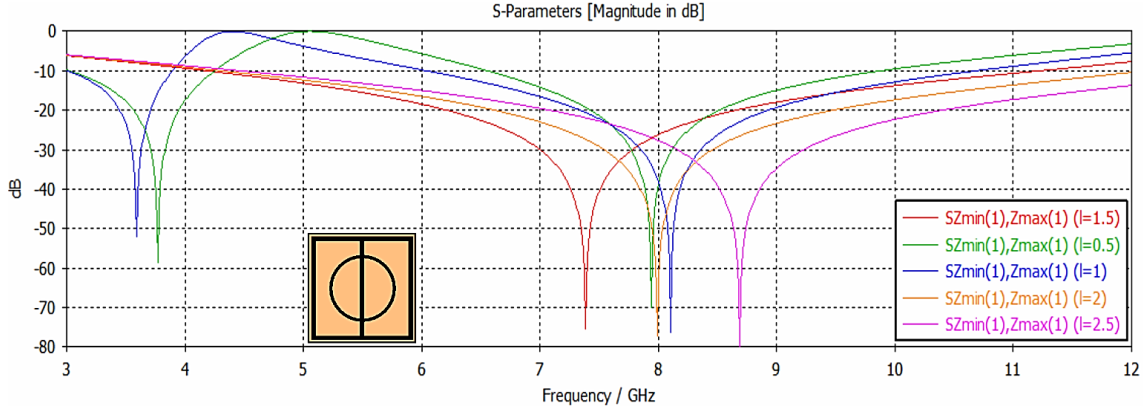
Şekil 22:

Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey yarıçapının (r_out) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



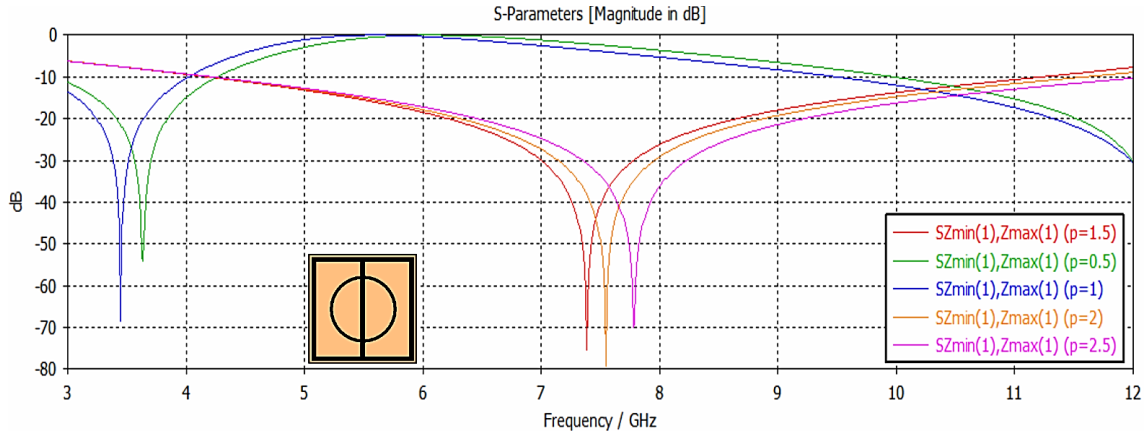
Şekil 23:

Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey halka kalınlığının (w) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



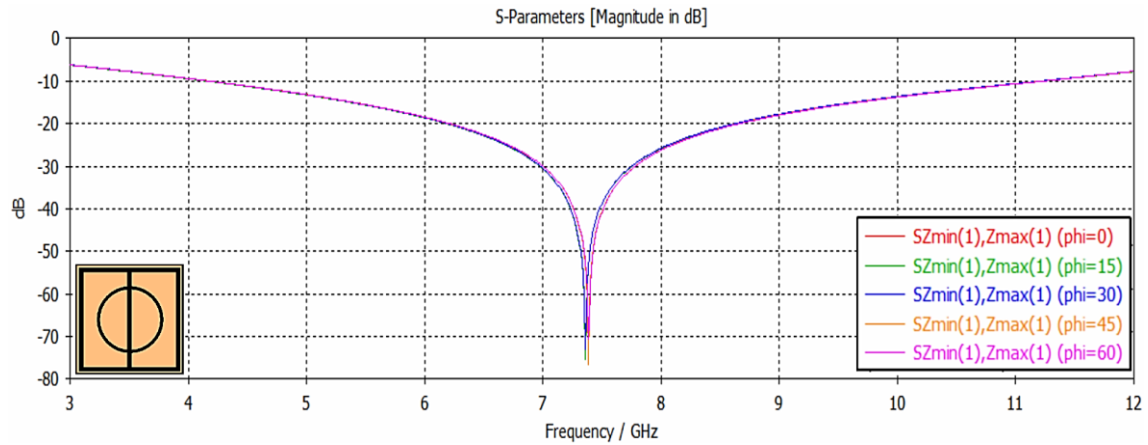
Şekil 24:

Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey genişliğinin (l) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



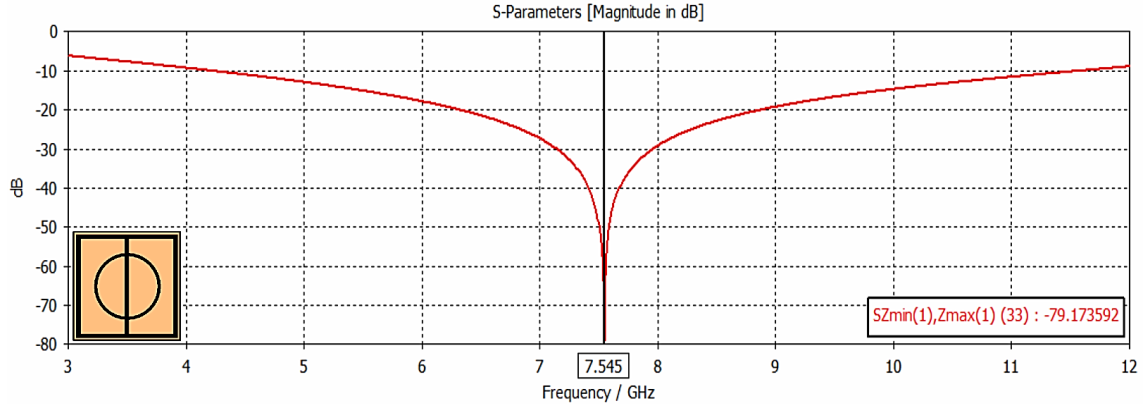
Şekil 25:

Önerilen UGB FSY'nin iletken yüzey uzunluğunun (p) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



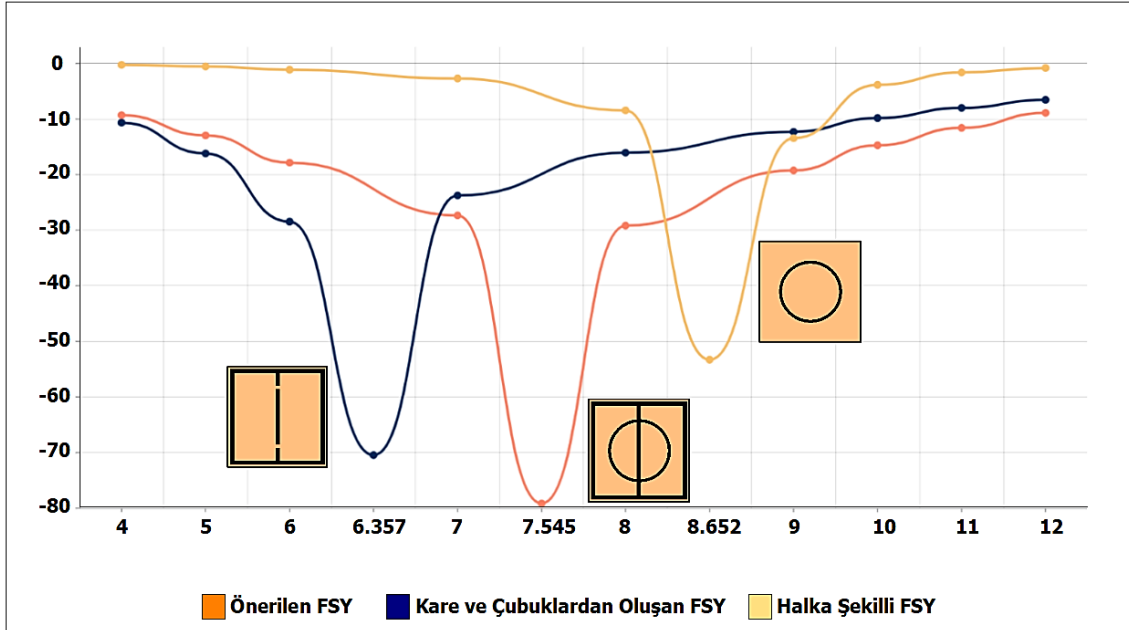
Şekil 26:

Önerilen UGB FSY'nin dalga geliş açısının (ϕ) değişmesi sonucu elde edilen iletim karakteristiği



Şekil 27:
Önerilen en verimli UGB FSY'nin iletim karakteristiği

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları doğrultusunda şekil 27'de iki şeklin birleşiminden oluşan yeni UGB FSY'nin iletim karakteristik grafiği verilmiştir. Bu yapı ile bant genişliği 7,45 GHz elde edilerek, -10 dB kazanç değerinde daha yüksek bant genişliğine ulaşıldığı görülmektedir. UGB FSY'nin maksimum yansıtma frekansı 7,545 GHz ve maksimum soğurma değeri -79,1735 dB olarak ölçülmektedir. C bandında çalışan UGB FSY, dalga geliş açısından bağımsız ve bant durduran filtre karakteristik özelliği göstermektedir.



Şekil 28:
Tasarlanan üç FSY'nin iletim karakteristiğinin karşılaştırılması

Şekil 28'de tasarlanan üç FSY'nin ölçümleri karşılaştırılmıştır. FSY'ler incelendiğinde açıkça görülüyor ki, halka FSY ve kare + çubuk (kesik çizgi) FSY'nin birleştirilmesiyle oluşturulan FSY, -10 dB kazanç değerinde daha geniş bant aralığına sahiptir.

4. SONUÇ

Literatür incelendiğinde, C bandında çalışan FSY'lerin az olduğu görülmektedir. Dolayısıyla hem C bandında çalışan hem de -10 dB kazanç değerinde, literatürde araştırılan yapılardan daha fazla bant aralığına sahip yeni bir UGB FSY elde edilmiştir.

İlk olarak halka şekil ile kare + kesikli çizgiden oluşan iki farklı FSY tasarlanıp, analiz edilmiştir. FSY'ler, tek tek incelendiğinde halka şekilli yapının X bandında, kare + kesikli çizgilerden oluşan yapının C bandında çalıştığı görülmektedir. Tasarlanan iki yapı da bant durduran filtre karakteristik özelliği göstermektedir. İki yapının üst üste gelecek şekilde birleştirilmesiyle, yeni bir tasarım oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni tasarım incelendiğinde karakteristik özelliğinin değişmediği, çalışma frekansının istenildiği gibi c bandında olduğu ve -10 dB kazanç aralığında daha geniş bir bant aralığına sahip olduğu görülmektedir.

Halka şekilli FSY'nin bant genişliği 2,15 GHz ve maksimum soğurma değeri - 53,30 dB, kare + kesik çizgilerden oluşan FSY'nin bant genişliği 5,83 ve maksimum soğurma değeri - 70,45 dB olarak elde edilmiştir. Önerilen yapıda ise bant genişliği 7,45 GHz ve maksimum soğurma değeri - 79,17 dB 'e çıkartılmıştır. Sonuç olarak iki yapının birleştirilmesiyle -10 dB kazanç değerinde bant genişliği artırılarak, çalışmanın amacına uygun olduğu görülmüştür.

Bant genişliğini arttırmak için yapılan optimizasyon çalışmalarında; birim hücre boyutunun, dielektrik katman kalınlığının, iletken yüzey yarıçapının, yüksekliğinin ve genişliğinin artırılmasının, bant genişliğine pozitif etkisi olduğu görülmüştür. Fakat iletken yüzey genişliğinin 2 mm'den daha fazla artırılması durumunda istenilen çalışma frekansı dışına çıktığı görülmüştür. Dalga geliş açısının ise bant genişliğine ve rezonans frekansına bariz bir etkisi olmadığından, tasarlanan FSY'ler dalga geliş açısından bağımsız olarak kalkan ve soğurucu gibi işlevini yerine getirebilmektedir. Optimizasyonlar sonucunda, tasarlanan FSY'lerin temel parametrelerini değiştirerek amaca uygun iletim ve yansıma katsayısı değerlerinin sağlanabileceği benzetimler ile kanıtlanmıştır.

Önerilen UGB FSY, sağanak yağışa eğilimli bölgelerde, büyük bant genişliğine ihtiyaç duyulan yerlerde, askeri sistemlerde, birçok uydu iletişimlerinde ve görünmezlik teknolojilerinde kolaylıkla kullanılabilir.

Çalışmanın sonucunda önerilen yeni UGB FSY ile C bandında çalışan, literatürde incelenen diğer yapılardan daha geniş bantlı aralığına ve daha iyi seviyede zayıflamaya sahip yeni bir yapı elde edilerek literatüre katkı sağlanmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Yağmur Barış Altay çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetilmesi, makale taslağının oluşturulması, veri toplama, veri analizi, bulguların değerlendirilmesi ve sonuçların yorumlanması aşamalarında katkı sağlamıştır. Uğur Yalçın tasarım süreçlerinin belirlenmesi, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi aşamalarında katkı sağlamıştır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Angun, M. (2017) X-Bandı İçin Üç Boyutlu Frekans Seçici Yüzey Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. <https://hdl.handle.net/20.500.12619/79128>
2. Azemi S. N., Ghorbani K., Rowe W. S. T. (2012) 3D Frequency Selective Surfaces, *Progress In Electromagnetics Research*, (29), 191–203. doi:10.2528/PIERC12033006
3. Azemi, S.N., Rowe, W.S.T. (2011) Development and Analysis of 3D Frequency Selective Surfaces, *Proceeding of the Asia – Pacific Microwave Conference*, 694. doi:10.2528/PIERC12033006
4. Barış Altay, Y. (2022) Radar kesit alanının azaltılması için ultra geniş bantlı frekans seçici yüzey tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/30967>
5. Choi, I., Lee, D., Lee, D. G. (2014). Hybrid Composite Low-Observable Radome Composed of E-Glass/Aramid/Epoxy Composite Sandwich construction and Frequency Selective Surface. *Composite Structures*, 117 (11), 98-104.
doi: 10.1016/j.compstruct.2014.06.031
6. Göksel, F. (2018) Geniş bant durduran frekans seçici yüzeyin tasarımı, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırklareli. <https://hdl.handle.net/20.500.11857/675>
7. Hu D. ve Tennant A. (2012) 3D Saw-tooth Frequency Selective Surfaces, *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 1-4. doi: 10.1109/LAPC.2012.6403068
8. Kiermeier, W., Biebl, E. (2007) New dual-band frequency selective surface for gsm frequency shielding, *37th Eur. Microwave Conference*, 222-225.
doi: 10.1109/EUMC.2007.4405166
9. Kim, P. C., Lee, D. G., Seo, I. S., Kim, G. H. (2008). Low-Observable Radomes Composed of Composite Sandwich Constructions and Frequency Selective Surface. *Composite Science Technology*, 68 (9), 2163-2170. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.03.016
10. Kocakaya, A. ve Çakır, G. (2018) Novel angular-independent higher order band-stop frequency selective surface for X-band applications, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(1), 15-22. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0907>
11. Li, L., Qiang, C., Qiaowei, Y., Sawaya, K., Maruyama, T., Furuno, T. ve Uebayashi, S. (2011) Frequency selective reflect array using crossed dipole element with square loops for wireless communication applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 1, 89–99. doi:10.1109/TAP.2010.2090455
12. Mittra, R., Chan, C.H. ve Cwik, T. (1988) Techniques for analyzing frequency selective surfaces: A review, *Proc. IEEE*, 76, 1593-1616. <https://doi.org/10.1109/5.16352>
13. O’Nians, F. ve Matson, J. (1966) Antenna feed system utilizing polarization independent frequency selective intermediate reflector, *US Patent* 3,231,892.
14. Seven S. Z., Günaydın Ö. F., Öztürk M., Can S., (2022) Design of Dual-Band Circular Frequency Selective Surface for S-Band And C-Band Applications, *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal, Bursa*. ID 49
15. Taylor, P. S., Bathelor, J. C. ve Parker, E. A. (2011) A passively switched dual-band circular FSS slot array, *IEEE Conference on Antenna and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 648–651. doi:10.1109/APWC.2011.6046791

16. Topcuoğlu, C., (2018) X bant frekans seçici yüzeyle random tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Tez No: 514739
17. Yiğit, E., Duysak H. (2019). Determination of optimal layer sequence and thickness for broadband multilayer absorber design using double-stage artificial bee colony algorithm. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67 (8). doi:10.1109/TMTT.2019.2919574
18. Zheng, S. F., Yin, Y. Z. ve Ren, X. S. (2011) Interdigitated hexagon loop unit cells for wideband miniaturized frequency selective surface, *9th International Symposium Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 770–720. doi:10.1109/ISAPE.2010.5696582