



## Polarization and angle independent ultra wideband frequency selective surface design

Aybike Kocakaya<sup>1</sup>, Gonca Çakır<sup>2</sup>, Sibel Çimen\*<sup>3</sup>

Department of Electronics and Communication Engineering, Kocaeli University, Kocaeli, 41380, Turkey

### Highlights:

- The design of single layer frequency selective surface for ultra wide band applications
- To obtain angularly stable and polarization independent transmission characteristics
- Compact and unit cell with small dimension design

### Keywords:

- Ultra wide band
- Frequency selective surface
- Angular stability
- Polarization independence

### Article Info:

Research Article  
Received: 24.09.2018  
Accepted: 22.02.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.463231

### Acknowledgement:

This study was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK), Project No: 215E101

### Correspondence:

Author: Sibel Çimen  
e-mail:  
sibelgunduz@kocaeli.edu.tr  
phone: +90 262 303 3353

### Graphical/Tabular Abstract

In this paper, design of a new single layer ultra-wide band (UWB), band-stop frequency selective surface (FSS) with polarization independent and angular stability is presented. The designed FSS consists of a circle-shaped conductive strip and a ring-shaped cross-dipole conductive strip. The unit cell size that forms the UWB-FSS is  $0.07\lambda \times 0.07\lambda$ , where  $\lambda$  is free-space wavelength corresponding to the lowest frequency of the UWB band. The -3 dB bandwidth of proposed FSS is between 3.5 GHz and 11 GHz (at normal incidence) frequencies, which covers the entire UWB band that is defined by The U.S. Federal Communications Commission (FCC). Due to compact size of unit cell, the presented UWB-FSS has good angular stability up to  $60^\circ$  incident angles both perpendicular (TE) and parallel (TM) polarization. The designed UWB-FSS was simulated. Afterall, simulation results was confirmed with the measurements.

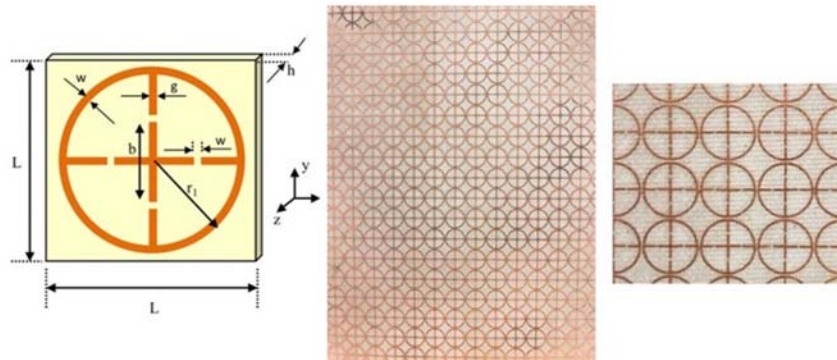


Figure A. Proposed unit cell and fabricated FSS layer.

**Purpose:** A new type single-layer band-stop frequency selective surface is designed for UWB applications.

### Theory and Methods:

In literature it is possible to find single layer FSS designs. The frequency ranges of the few existing single-layer UWB-FSS designs do not cover the range defined by the FCC. Thus, a single layer FSS design for UWB band is important. For this purpose the resonance frequencies of the elements constituting the unit cell are set to be in the UWB band. Thereby, -3 dB bandwidth of proposed FSS is between 3.5 GHz and 11 GHz frequencies.

### Results:

The simulated and measured results are as follows: 3 dB bandwidth of proposed FSS is between 3.5 GHz and 11 GHz (at normal incidence) frequencies, which covers the entire UWB band that is defined by The U.S. Federal Communications Commission (FCC). Also the simulated and measured results are in a good harmony.

### Conclusion:

The small size and symmetrical structure of the unit cell of the proposed structure provided angle stability and polarization independence up to  $60^\circ$ . The structure was simulated by CST Microwave Studio. The transmission coefficient was measured at different angles for TE and TM polarizations and compared with the simulation results. Simulation results and measurement results are compatible with each other. Because of these properties, the designed FSS structure is a candidate for a part of UWB systems.



## Açı ve polarizasyondan bağımsız ultra geniş bantlı frekans seçici yüzey tasarımı

Aybike Kocakaya<sup>ID</sup>, Gonca Çakır<sup>ID</sup>, Sibel Çimen\*<sup>ID</sup>

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İzmit-Kocaeli, 41380, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ultra geniş-bant uygulamaları için tek katmanlı frekans seçici tasarımı
- Açılabilir kararlılık ve polarizasyondan bağımsız iletim karakteristiği elde etmek
- Kompakt ve küçük boyutlu birim hücre tasarımı

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.09.2018

Kabul: 22.02.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.463231

#### Anahtar Kelimeler:

Ultra geniş bant,  
frekans seçici yüzey,  
açılabilir kararlılık,  
polarizasyon bağımsızlığı

#### ÖZET

Bu çalışmada, tek katmanlı, Ultra Geniş Bantlı (UGB), açılabilir kararlı ve polarizasyondan bağımsız özgün bir bant durdurucu frekans seçici yüzey (FSY) tasarımı sunulmaktadır. Tasarlanan UGB-FSY'nin birim hücre geometrisi, halka şeklindeki iletken şerit ile halka açıklıklı çapraz dipol şeklindeki iletken şeritlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Birim hücre boyutu, UGB bandının en düşük frekansına karşılık gelen serbest uzay dalga boyu cinsinden  $0,07\lambda \times 0,07\lambda$ 'dir. Önerilen UGB-FSY'nin -3 dB bantı, Federal İletişim Komisyonu (FİK) tarafından tanımlanan UGB bandını kapsayan, 3,5 GHz ve 11 GHz (dik geliş) frekansları arasındadır. Birim hücrenin çok küçük olmasından dolayı, hem TE hem de TM polarizasyonunda 60 dereceye kadar geliş açılabilir kararlılık göstermektedir. Tasarlanan UGB-FSY'nin bilgisayar benzetimleri yapılmıştır. Ardından, benzetim sonuçlarının doğruluğunu test etmek için FSY üretilerek ölçümleri yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları birbiriyle uyumludur.

## Polarization and angle independent ultra wideband frequency selective surface design

### H I G H L I G H T S

- The design of single layer frequency selective surface for ultra wide band applications
- To obtain angularly stable and polarization independent transmission characteristics
- Compact and unit cell with small dimension design

#### Article Info

Research Article

Received: 24.09.2018

Accepted: 22.02.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.463231

#### Keywords:

Ultra wide band,  
frequency selective surface,  
angular stability,  
polarization independence

#### ABSTRACT

In this paper, design of a new single layer ultra-wide band (UWB), band-stop frequency selective surface (FSS) with polarization independent and angular stability is presented. The designed FSS consists of a circle-shaped conductive strip and a ring-shaped cross-dipole conductive strip. The unit cell size that forms the UWB-FSS is  $0.07\lambda \times 0.07\lambda$ , where  $\lambda$  is free-space wavelength corresponding to the lowest frequency of the UWB band. The -3 dB bandwidth of proposed FSS is between 3.5 GHz and 11 GHz (at normal incidence) frequencies, which covers the entire UWB band that is defined by The U.S. Federal Communications Commission (FCC). Due to compact size of unit cell, the presented UWB-FSS has good angular stability up to 60° incident angles both perpendicular (TE) and parallel (TM) polarization. The designed UWB-FSS was simulated. Afterall, simulation results was confirmed with the measurements.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frekans seçici yüzeyler, yüzeye gelen elektromanyetik dalganın frekansına ve geliş açısına bağlı olarak iletim ve yansımaya karakteristiği arzu edilen şekilde tasarlanabilen iki ya da üç boyutlu yapılardır [1]. Genellikle, profillerinin hafif ve üretim maliyetinin düşük olması, entegrasyon kolaylığı gibi birçok avantajları nedeni ile mikroserit kullanılarak yapılırlar [2-4]. Bu yapılar metal yamalar ya da açıklık elemanlarının bir dielektrik tabaka üzerine basılması ile gerçekleştirilirler. Bu sayede istenen frekansları geçiren ya da durduran elektromanyetik filtre olarak çalışırlar. FSY'lerin kullanım alanları incelendiğinde, karşımıza sivil ve askeri birçok uygulama çıkar. Bazı özel frekansları filtrelemek [5], antenlerin radar kesit alanlarını düşürmek [6], anten kazançlarını arttırmak [7] bunlardan bazılarıdır. Klasik filtrelerde iletim karakteristiği yalnızca frekans ile değişirken, FSY'lerde frekans ile değişime ek olarak hem farklı polarizasyon hem de eğik geliş açıları için iletim karakteristiği değişir. Bu tipik olarak rezonans frekansının bir miktar değişmesine ve ayrıca bant genişliğinin yanı sıra iletim ve yansımaya karakteristiklerinin de değişmesine yol açmaktadır. FSY'ler teoride sonsuz periyodik dizilerdir, ancak gerçekte sonsuz uzunlukta bir dizinin gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Sonlu sayıda eleman içeren FSY'ler özellikle dalganın geliş açısının değişiminden oldukça fazla etkilenmektedirler. Frekans seçici yüzey tasarımı dikkat edilmesi gereken en önemli iki parametre açısal kararlılık ve polarizasyondan bağımsız olmasıdır. Polarizasyondan bağımsız olması, tasarlanan birim hücrenin yatay ve düşeyde simetrik olması ile sağlanabilir. Bir birim hücreyi daha küçük yapmak genellikle iyi bir fikirdir, çünkü genellikle geliş açısı ve muhtemelen daha büyük bant genişliği ile daha iyi rezonans kararlılığı sağlar. Açısal kararlılık için de birim hücrenin çok küçük olması gerekmektedir.

2002 yılında FİK, lisanssız kullanım için 3,1 GHz-10,6 GHz frekans aralığını tanımlamasıyla birlikte, belirtilen UGB bandında çalışan haberleşme teknolojileri, araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Ultra geniş bant iletişim sistemlerinde, iletim ve alım için ultra kısa darbeler kullanılır ve spektrum çok geniş bir frekans aralığına yayılır [8]. Alıcı ve verici arasındaki iletişim ultra kısa darbeler ile yapıldığı için çok geniş bir frekans bant genişliği gereklidir. Böylece, düşük güç spektral yoğunluğuna sahip UGB sistemleri, diğer iletişim sistemlerinin sinyalleri ile girişim olmadan ayrılmış olan frekans spektrumlarını kullanabilirler. Bu amaç için kullanılmak üzere UGB-FSY filtre tasarımları üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Literatürde birçok UGB-FSY çalışması bulunmaktadır. Çalışmaların birçoğunda, ultra geniş bant elde edebilmek için, çok katmanlı yapılar tercih edilmiştir. Birden fazla katman kullanılması hem yapıyı hantallaştırmakta hem de maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Ranga vd. [9] çalışmalarında, UGB anten reflektörü için iki katmanlı 3,5 GHz ve 11,45 GHz frekans aralığını bastıran FSY tasarımı

yapmışlardır. Radonić vd [10] ise çalışmalarında dört katmanlı bant durduran FSY tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan FSY'nin 10 GHz-16,1 GHz frekans aralığında bant durduran özelliği gösterebilmesi için, her bir katmana, farklı boyutlu kare çerçeve şeklinde birim hücreler yerleştirilmiştir. Bir başka çalışmada, iki dielektrik tabaka arasına birim hücreler yerleştirilerek 2,5 GHz-14 GHz frekans aralığında çalışan bant durduran FSY tasarımı yapılmıştır [11]. Tasarlanan FSY TE ve TM polarizasyonları için 40 dereceye kadar açısal kararlılık göstermektedir.

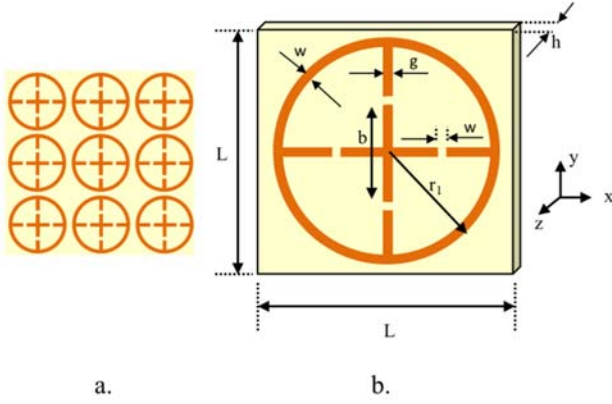
Literatürde, tek katmanlı FSY çalışmalarına rastlamak mümkündür. Ancak bunların birçoğu dar veya geniş bantlıdır. Var olan az sayıda tek katmanlı UGB-FSY tasarımlarının frekans aralıkları da FİK'nin tanımladığı aralığı kapsamamaktadır. Ayrıca, içlerinde bant durduran karakteristiğine sahip olanların sayısı da oldukça azdır. Shoial vd. [12] yapmış olduğu çalışmada, çapraz dipol ve halka şeklinde metalik şeritlerden oluşturdukları birim hücreleri kullanılarak, 6,5 GHz-14 GHz frekans aralığında çalışan tek katmanlı bant durduran FSY tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Bir başka çalışmada, kare çerçeve ve çapraz dipol şeklinde metalik şeritlerden oluşan birim hücreler kullanılarak, 7 GHz-14 GHz aralığında bant durdurma karakteristiğine sahip tek katmanlı FSY tasarımı yapılmıştır [13].

## 2. UGB FSY TASARIMI (UWB FSS DESIGN)

Bu çalışmada, FİK'in tanımladığı UGB bandı boyunca bant durduran özelliği gösteren, tek katmanlı, açısal kararlılığa ve polarizasyon bağımsızlığına sahip UGB-FSY tasarımı yapılmıştır. FSY tasarımlarında, geniş bant elde edebilmek için farklı teknikler kullanılır. Birden fazla katman kullanmak, elemanlar arasındaki mesafeyi azaltmak, dielektrik tabakanın kalınlığını arttırmak bu tekniklerden bazılarıdır. Birden fazla tabaka kullanımı ya da tabaka kalınlığını arttırmak, yapının boyutunu ve imalat maliyetini de arttırmaktadır. Bant genişliğini etkileyen en önemli unsurlardan bir diğeri ise birim hücre elemanının geometrik yapısıdır. Uygun geometrik desenlerle, katmanlı yapıya ya da kalın dielektrik tabaka kullanımına gerek kalmadan geniş bantlı FSY tasarımı yapılabilmektedir.

İstenilen frekans aralığında bant durduran filtre karakteristiğine sahip bir FSY tasarlayabilmek için halka yama geometrilerinden faydalanılır. Her ne kadar birim hücre geometrisi frekans karakteristiğini belirlese de birim hücrenin yerleşimi ve elemanlar arası uzaklığın da önemli bir etkisi vardır. Önerilen UGB-FSY birim hücre yapısı, iki rezonans elemanının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur, birincisi halka şeklinde diğeri ikincisi ise halka açıklığı olan çapraz dipol şeklinde metal şeritlerdir. Tasarlanan UGB-FSY'nin dizi yapısı Şekil 1a'da, FSY'yi oluşturan birim hücrenin tasarım parametreleri ise Şekil 1b'de verilmiştir. Koyu renkli çizgiler metalik şeritleri göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi FSY'nin birim hücrenin simetrik bir yapıya sahip olması, polarizasyon

bağımsızlığını sağlamaktadır. Tablo 1’de FSY’nin tasarımında kullanılan parametreler mm cinsinden verilmiştir.



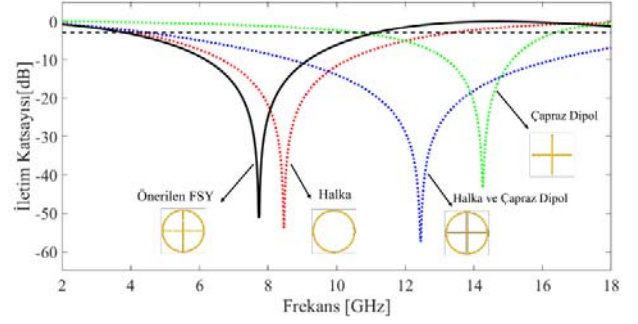
**Şekil 1.** a) FSY dizi (FSS array) b) UGB-FSY birim hücre geometrisi  
(The geometry of UWB FSS unit cell)

**Tablo 1.** Birim hücre tasarımında kullanılan parametreler  
(The parameters used in unit cell design)

L	6,4
w=g	0,2
B	2,8
r <sub>1</sub>	3,1
H	0,508

FSY tasarımında kalınlığı  $h=0,508$  mm ve bağıl dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=6.15$  olan Arlon AD600 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Birim hücre boyutu  $6.4 \times 6.4$  mm<sup>2</sup> olup, UGB bandın en düşük frekansına karşılık gelen serbest uzay dalga boyu cinsinden  $0,07\lambda \times 0,07\lambda$ ’dır. Boyutunun küçük olması açısal kararlılığını sağlamaktadır.

Şekil 2’de tasarım sürecinde kullanılan geometrilerin iletim katsayısı karakteristikleri görülmektedir. Tasarımın başlangıcında halka geometrisi kullanılmıştır. Halkanın çevresi, rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyunun yaklaşık üçte biri kadar bir değerde seçilmelidir. Ayrıca ince dielektrik tabaka kullanılması durumunda rezonans frekansındaki dalga boyunu hesaplarken, rezonans frekansı  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r+1}}$  ile çarpılır. Örneğin halka geometrisi tek başına kullanarak 8 GHz de bir rezonans frekansı elde etmek için halkanın çapı maksimum 3,75 mm seçilebilir. Halka şekli ile FİK’in tanımladığı bant aralığından daha geniş bant elde edilir. Yarıçapı 3,1 mm olan halka şekilli birim hücrenin rezonans frekansı 8,34 GHz’dir. Çapraz dipol şekilli birim hücrenin rezonans frekansı ise 14,26 GHz’dir. Çapraz dipol ve halka şekillerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen birim hücre, en büyük bant genişliğine sahiptir. Hedeflenen bant genişliğine ulaşmak için çapraz dipol üzerinde açıklıklar oluşturulmuştur. Önerilen FSY’nin rezonans frekansı 7,72 GHz’dir.



**Şekil 2.** Önerilen FSY tasarım aşamasında kullanılan geometrik yapılar ve bu yapılar için elde edilen iletim katsayısı grafikleri  
(The geometric shapes of proposed FSS design and the simulation results of transmission coefficients)

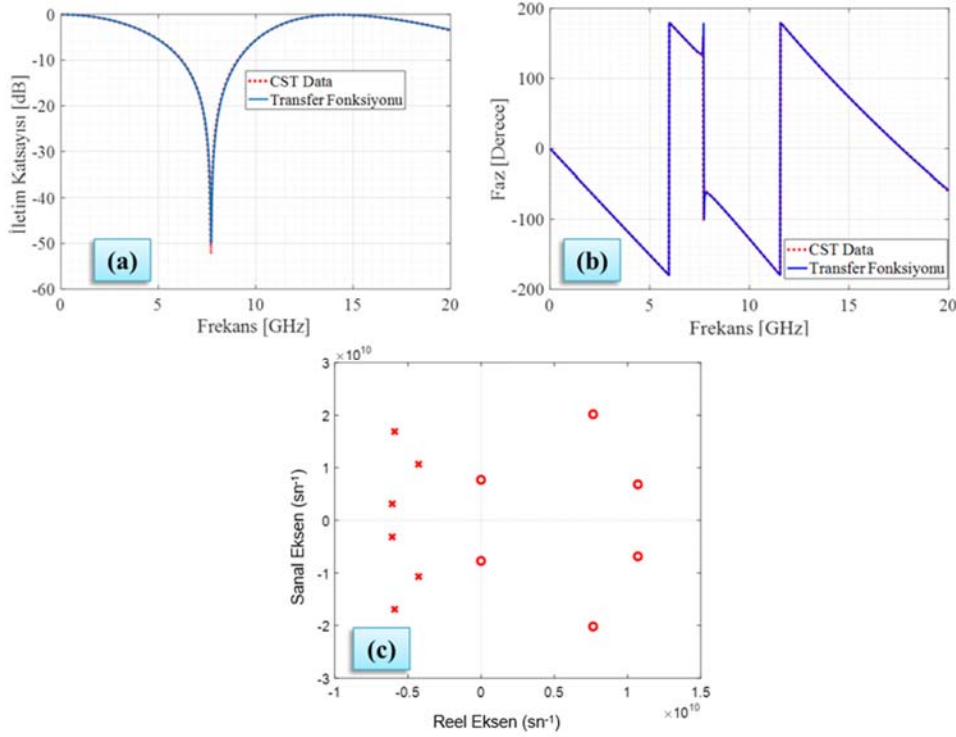
Kocakaya vd.[14] yapmış olduğu çalışmada verilen Matlab kodu ile, CST programı ile elde edilen FSY’nin  $S_{21}$  dataları (genlik, faz, reel ve sanal kısımlar) kullanılarak uygun transfer fonksiyonunu bulmak mümkündür. Verilen kodda, kutup ve sıfır sayısı 5’ten 8’e kadar değiştirilerek (bu rakam istenen aralıkta seçilebilir), FSY için en uygun transfer fonksiyonu ve derecesi tespit edilebilmektedir. Önerilen FSY yapısına en uygun transfer fonksiyonu Şekil 3’te görüldüğü gibi kutup ve sıfır sayısı 6 olduğu zaman elde edilmiştir, yani önerilen FSY yapısı altıncı dereceden bant durdurucu filtre özelliği göstermektedir. Şekil 3’te, FSY’nin CST ile elde edilen transfer katsayısı ve faz grafikleri, Matlab kodu ile elde edilen transfer fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır ve ilgili transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfırların yerleşimi verilmiştir. Altıncı dereceden filtre karakteristiği gösteren FSY yapısına ait transfer fonksiyonu ise Eş. 1’de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{0,4443 s^6 - 1,63e^{10} s^5 + 4,502e^{20} s^4 - 6,486e^{30} s^3 + 5,847e^{40} s^2 - 3,277e^{50} s + 1,985e^{60}}{s^6 + 3,253e^{10} s^5 + 8,485e^{20} s^4 + 1,199e^{31} s^3 + 1,207e^{41} s^2 + 7,173e^{50} s + 1,986e^{60}} \quad (1)$$

Transfer fonksiyonu ve kutup-sıfır diyagramı kullanılarak, FSY’nin karakteristiği ve hangi parametrelerin filtrenin hangi özelliklerini değiştirildiği tespit edilebilir. FSY yapıları, çentik filtre gibi davrandıkları için, filtre tasarım ve incelemelerinde kullanılan teknikler FSY yapılarında da kullanılabilir.

### 3. BENZETİM SONUÇLARI (THE SIMULATION RESULTS)

Tasarlanan FSY’nin benzetimleri için CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Benzetim kolaylığı için metalik yüzeyler sıfır kalınlıklı mükemmel iletken seçilmiştir. Nihai birim hücre geometrisini elde etmek için birçok parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 4’de, FSY’ye yüzey normal doğrultusunda düzlem dalga gönderilmesi durumunda TE ve TM polarizasyonları için elde edilen yansıma ve iletim katsayısı grafikleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, FSY birim hücrelerinin simetrik yapısından dolayı, TE ve TM polarizasyonları için elde edilen grafikler



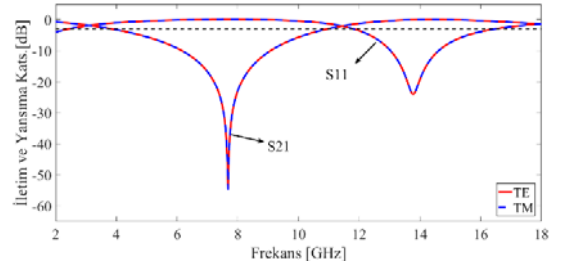
**Şekil 3.** CST dataları ve Matlab ile elde edilen önerilen FSS yapısına ait a) İletim katsayısının frekansa göre değişimi b) İletim fazının frekansa göre değişimi c) Kutup-sıfır diyagramı  
(Transfer functions comparison of CST data and Matlab for; (a) transmission coefficients (b) phase graphs (c). locations of zeros and poles of the transfer function for the proposed FSS design)

birbiri ile aynıdır. Ayrıca aynı grafikten, tasarlanan FSY'nin 3,5 GHz-11 GHz aralığında -3dB'nin altında bastırma özelliği gösterdiği de görülmektedir.

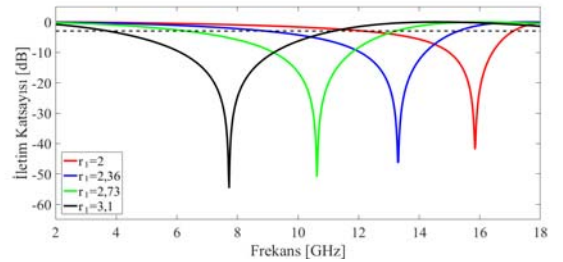
Temel iletim karakteristiğini bozmadan, merkez frekansını kaydırmak için,  $g$  ve  $r_1$  parametreleri değiştirilebilir. Bu parametrelerin değiştirilmesinin FSY'nin iletim katsayısını nasıl etkilediğini gösteren grafikler Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 5'de görüldüğü gibi  $r_1$ 'in küçülmesi ile merkez frekansı yüksek frekanslara doğru artmaktadır. 1mm'lik bir değişim, yaklaşık 8 GHz'lik kaymaya neden olmaktadır.  $g$  parametresi 4 kata kadar değiştirilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, dört kat artırım durumunda en fazla 300MHz civarı bir frekans kayması gözlenmiştir.

FSY'ler için önemli parametrelerden biri de düzlem dalganın farklı açılardan gönderimi durumunda da karakteristiğini koruyabilmesidir. Açık hassasiyetini test edebilmek için hem TE (Şekil 7) hem de TM (Şekil 8) polarizasyonlarında düzlem dalganın 60 dereceye kadar 15 derece aralıklarla gönderimi durumunda iletim ve yansımaya katsayısı grafikleri elde edilmiştir.

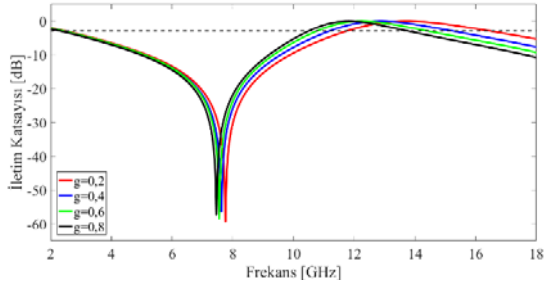
Tasarlanan FSY her iki polarizasyonda da açısal kararlılık göstermektedir. Merkez frekansı için Eş. 2 kullanılarak hesaplanan frekans sapması değerleri her iki polarizasyon için (TE ve TM), Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi her iki polarizasyon için frekans sapması yüzdesi oldukça düşüktür.



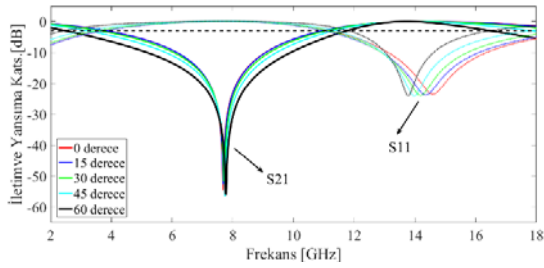
**Şekil 4.** Yüzey normalı doğrultusunda dalga gönderimi durumunda elde edilen TE ve TM polarizasyonları için iletim ve yansımaya katsayıları.  
(Transmission and reflection coefficients for normal incidence at TE and TM polarizations)



**Şekil 5.** Farklı  $r_1$  değerleri kullanılması ve yüzey normalı doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE polarizasyonu için iletim katsayısı.  
(Transmission coefficients of different  $r_1$  parameters for TE polarization)



**Şekil 6.** Farklı g değerleri kullanılması ve yüzey normali doğrultusunda dalga gönderimi durumunda TE polarizasyonu için iletim katsayısı.  
(Transmission coefficients of different g parameters for TE polarization)



**Şekil 7.** TE polarizasyonunda farklı gönderim açıları için elde edilen iletim ve yansımaya katsayısı grafikleri  
(Transmission and reflection coefficients at different incidence angles for TE polarization)

$$\Delta f = \left| \frac{f_s - f_{açı}}{f_s} \right| \times 100 \quad (2)$$

- $f_s$  :Yüzey normali doğrultusunda dalga gönderiminde elde edilen merkez frekansı  
 $f_{açı}$  :İlgili açıdaki merkez frekansı  
 $\Delta f$  :Bağlı frekans sapması

Elde edilen bu sonuçların literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırmasına Tablo 3’de yer verilmiştir.

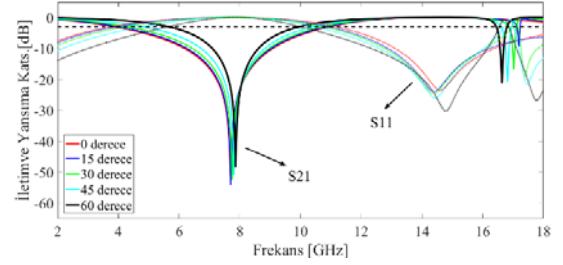
**Tablo 2.** TE ve TM polarizasyonları için geliş açısına bağlı frekans sapması  
(The frequency deviation based on angle of incidence for TE and TM polarizations)

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

**Tablo 3.** Önerilen UGB-FSY ve literatürdeki benzer FSY karşılaştırması.  
(Comparison of proposed UGB-FSS and similar FSS structures in literature.)

Referans	Birim hücre boyutu	$\epsilon_r$	Katman Sayısı	Bant genişliği [GHz]	Açı
9	0,17 $\lambda$ ×0,17 $\lambda$	4,4	2	3,5–11,45	–
11	0,046 $\lambda$ ×0,046 $\lambda$	10,6	2	2,5–14	40°
15	0,66 $\lambda$ ×0,66 $\lambda$	4,4	1(Çift-yüz)	6,5–14	-
16	0,19 $\lambda$ ×0,19 $\lambda$	4,3	1(Çift-yüz)	7,04–10,55	60°
17	0,067 $\lambda$ ×0,67 $\lambda$	2,2	1(Çift-yüz)	3,25–3,38	80°
18	0,10 $\lambda$ ×0,10 $\lambda$	4,3	1(Çift-yüz)	3,1–13,3	45°
19	0,064 $\lambda$ ×0,064 $\lambda$	3–6,15	2	2,98–10,86	60°
Önerilen FSY	0,07 $\lambda$ ×0,07 $\lambda$	6,15	1(Tek-yüz)	3,05–10,73	60°

Buradan, UGB FSY çalışmaları arasında önerilen FSY’nin boyutunun küçük, açılal kararlılığın yüksek olduğu görülmektedir.

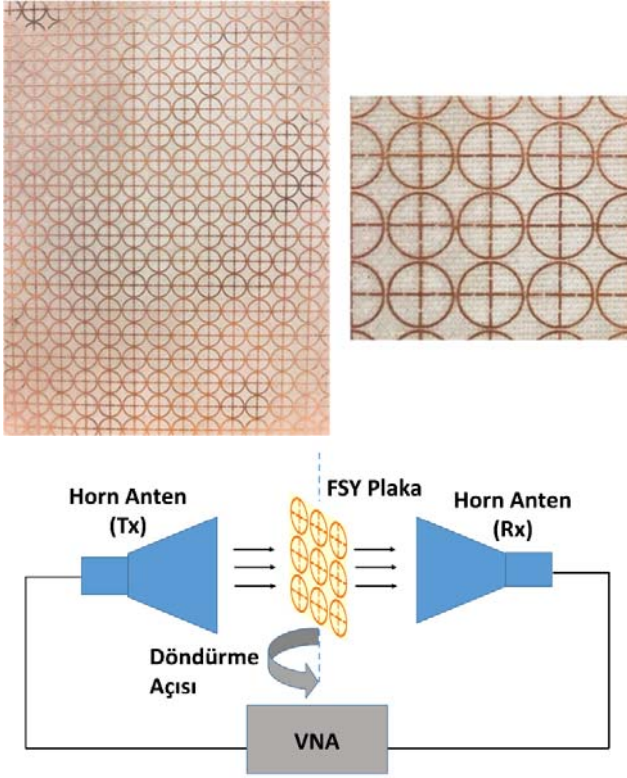


**Şekil 8.** TM polarizasyonunda farklı gönderim açıları için elde edilen iletim ve yansımaya katsayısı grafikleri  
(Transmission and reflection coefficients at different incidence angles for TM polarization)

#### 4. ÖLÇÜM SONUÇLARI (THE MEASUREMENT RESULTS)

Tasarlanan UGB-FSY’nin benzetimlerle elde edilen sonuçlarını doğrulamak için, üretimi gerçekleştirildi ve Kocaeli Üniversitesi Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı bünyesinde bulunan yansımaz odada ölçümleri yapıldı. UGB-FSY üretiminde kalınlığı  $h=0,508$  mm ve bağlı dielektrik katsayısı  $\epsilon_r=6,15$  olan Arlon AD600 mikrodalga kartı kullanılmıştır. Baskı devre çıkartma tekniği ile üretilen UGB-FSY yapısının fotoğrafı ve ölçüm düzeneği Şekil 9’da verilmiştir. UGB-FSY’nin ölçümlerinde çalışma frekansı 2 GHz – 18 GHz, 244 mm ×164 mm açıklığa ve 204 mm uzunluğa sahip, kazancı 11 dB olan iki adet geniş bantlı horn anten kullanılmıştır. İki anten düşük kayıplı eş-eksenli kablolar ile Rohde & Schwarz ZVB 20 vektör network analizör’e (VNA) bağlanmıştır. Horn antenler, FSY’den eşit mesafede birbirlerini görece şekilde yerleştirilmiştir. Horn antenler ile FSY arasındaki mesafe uzak alan şartını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. UGB ölçümü gerçekleştirileceği için, her frekansta uzak alan şartını sağlamalıdır, bu sebeple en düşük frekans değeri (2 GHz)

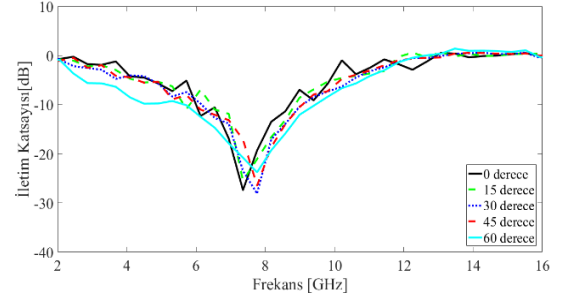
dikkate alınarak uzak alan mesafesi hesaplanmış ve bu şartı sağlayan 1 metre uzaklığa FSY yapısı yerleştirilmiştir.



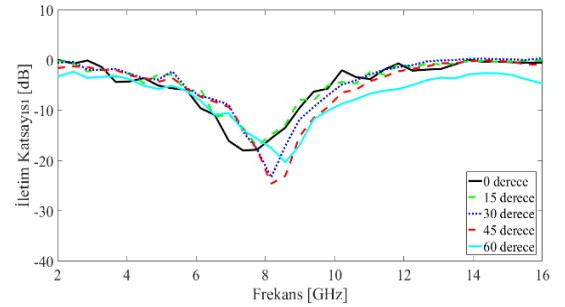
**Şekil 9.** Üretimi gerçekleştirilen UGB-FSY'nin fotoğrafı ve ölçüm düzeneği  
(Photograph of fabricated FSS and measurement set-up)

FSY'nin, hem TE hem de TM polarizasyonunda düzlem dalga ile yüzey normalini arasında  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $60^\circ$  açı yapacak şekilde yerleştirilerek iletim katsayısı ölçümleri alınmıştır. Şekil 10 'da TE polarizasyonu, Şekil 11'de ise TM polarizasyonu için alınan iletim katsayısı ölçümleri verilmiştir. Benzetimlerle elde edilen sonuçları doğrulamak için,  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  ile gelen dalga için benzetim ve ölçüm yolu ile elde edilen iletim katsayısı grafikleri karşılaştırılmıştır.

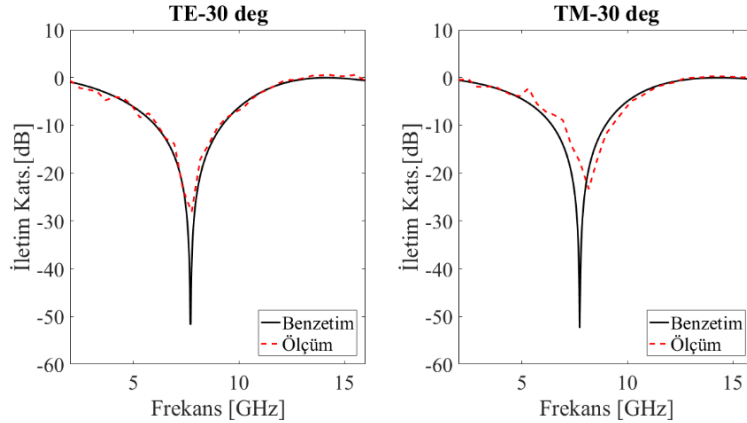
Şekil 12'de TE ve TM polarizasyonunda  $30^\circ$ 'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 13'de TE ve TM polarizasyonunda  $60^\circ$ 'lik geliş açısı için iletim katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Ölçümde kullanılan verici-alıcı horn anten boyutunun FSY boyutundan büyük olması saçılmaya neden olan bir faktördür. Şekillerden de görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları birbiri ile büyük oranda uyumludur, aradaki farkların başta saçılma olmak üzere üretim ve ölçüm hassasiyetiyle ilgili olduğu söylenebilir.



**Şekil 10.** TE polarizasyonu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları  
(The measured transmission coefficients at different angles of incident for TE polarization)

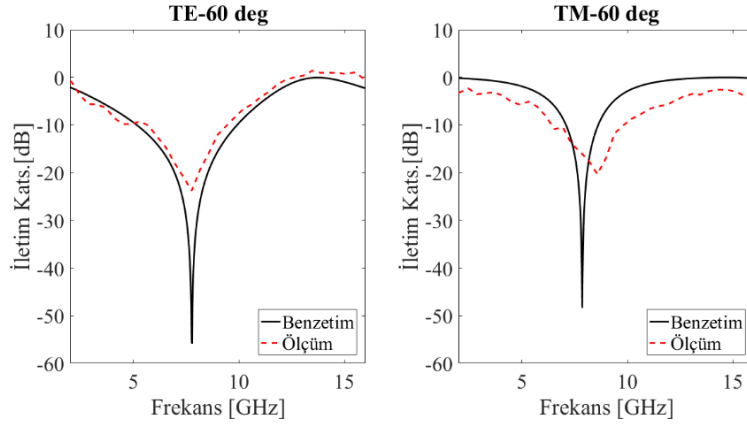


**Şekil 11.** TM polarizasyonu için farklı açılarda ölçülen iletim katsayıları  
(The measured transmission coefficients at different angles of incident for TM polarization)



**Şekil 12.** TE ve TM polarizasyonunda  $30^\circ$ 'lik geliş açısı için iletim katsayısının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

(The comparison measured and simulated transmission coefficients results at  $30^\circ$  angles of incident for TE and TM polarization)



**Şekil 13.** TE ve TM polarizasyonunda 60°'lik geliş açısı için iletim katsayısının benzetim ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

(The comparison measured and simulated transmission coefficients results at 60° angles of incident for TE and TM polarization)

## 5, SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 3,5 GHz-11 GHz frekans bandında çalışan, tek katmanlı, ultra geniş bantlı, bant durdurucu frekans seçici yüzey tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan UGB-FSY birim hücre boyutu, UGB bandın en düşük frekansına karşılık gelen serbest uzay dalga boyu cinsinden  $0,07\lambda \times 0,07\lambda$ 'dır. Önerilen yapının birim hücrenin boyutunun küçük olması ve simetrik yapısı, 60°'ye kadar açı kararlılığı ve polarizasyon bağımsızlığını sağlamıştır. Yapının benzetimleri CST Microwave Studio programı ile yapılmıştır. İletim katsayısının TE ve TM polarizasyonları için farklı açılarda ölçümleri alınarak, benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları birbirleriyle uyumludur. Elde edilen bu özelliklerinden dolayı, tasarımı yapılan FSY yapısı UGB sistemlerin bir parçası olarak etkin bir şekilde kullanılmaya adaydır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 215E101 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Munk BA., Frequency selective surfaces: theory and design, John Wiley & Sons, New York, 2000.
2. Özenç K., Aydemir M. E., Öncü A., 1,26 Ghz Rezonans Frekansında Çalışan Çift Tabakalı Yüksek Kazançlı Mikroserit Dikdörtgen Yama Anten Tasarımı, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28(4), 743-750, 2013.
3. Çiydem M., Geniş Bantlı Çift Kutuplu Anten, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29(4), 817-821, 2014.
4. Akçelik, H, Tuna, Ç, Saraydemir, Ş, Durna, Y, Koçer, H., Karıştırma Duyarsız Frekans Atlamalı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Çit Uygulaması Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(2), 531-539, 2017.
5. Hong T., Xing W., Zhao Q., Gu Y., Gong S., Single-Layer Frequency Selective Surface with Angular Stability Property, IEEE Antenna and Wireless Propag. Lett., 17 (4), 547-550, 2018.
6. Pazokian M., Komjani N., Karimipour M., Broadband RCS Reduction of Microstrip Antenna Using Coding Frequency Selective Surface, IEEE Antenna and Wireless Propag. Lett., 17 (8), 1382-1385, 2018.
7. Tahir F.A., Arshad T., Ullah S., Flint J.A., A novel FSS for gain enhancement of printed antennas in UWB frequency spectrum, Microw Opt Technol Lett, 59, 2698-2704, 2017.
8. Federal Communications Commission First report and order Revision of part 15 of the commission's rule regarding ultra-wideband transmission systems, Washington (DC), 2002.
9. Ranga Y., Matekovis L., Weily AR., A Low-profil dual-layer ultra-wideband frequency selective surface reflector Microwave and Optical Technology Letters, 55, 1223-1227, 2013.
10. Radonić V., Crnojević-Bengin V., Schoeman D., Multi-layer Frequency Selective Surfaces with Wideband Response and Their Modelling 22nd Telecommunication Forum, TELFOR, Belgrad-Serbia, 2014.
11. Yahya R., Nakamura A., Itami M., UWB frequency selective surfaces with angular stability and notched band at 5,5 GHz. IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Nanjin- China, 2016.
12. Sohail I., Ranga Y., Esselle KP., Effective electromagnetic shielding over an ultra-wide bandwidth using a frequency selective surface. Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Melbourne-Australia, 2013.
13. Cruz RSM., D'Assunção AG., Silva PHF., A new FSS design proposal for UWB applications, International Workshop on Antenna Technology, Lisbon-Portugal, 1-4, 2010.
14. Kocakaya A., Çakır G., Novel angular-independent higher order band-stop frequency selective surface for X-band applications, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 12(1), 15-22, 2018.



15. Lii W., Zhang T., Yangi G., Novel frequency selective surfaces with compact structure and ultra-wideband response, Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2012.
16. Baisakhiya S, Sivasamy R., Novel compact UWB frequency selective surface for angular and polarization independent operation, Progress In Electromagnetics Research Letters, 40, p. 71-79, 2013.
17. Azemi S. N., Ghorbani K., Rowe W. S. T., Angularly stable frequency selective surface with miniaturized unit cell, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 25(7), 454–456, 2015,
18. Sampath S.S, Sivasamy R., A Single-Layer UWB Frequency-Selective Surface With Band-Stop Response, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1-4, 2018.
19. S. Ünaldı, N. B. Teşneli, S. Çimen, A Novel Miniaturized Polarization Independent FSS with UWB Response, Radioengineering, 7(4), 1012–1017, 2018.

