

---

## 3D SEKİZGEN FREKANS SEÇİCİ YÜZEY TASARIMI VE ANALİZİ

*Ahmet Yahya TEŞNELİ \**  
*Nigar Berna TEŞNELİ \*\**  
*Muhammet Hilmi NİŞANCI \**  
*Mustafa ANGUN \**

---

Alınma: 31.01.2018; düzeltme: 17.05.2019; kabul: 23.05.2019

**Öz:** Kablosuz haberleşme, mikrodalga ve radar sistemleri alanlarında sıklıkla kullanılmakta olan frekans seçici yüzeyler (FSY) yaygın olarak iki boyutlu (2D) düzlemsel yapılar olarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada X bandı merkez frekansı olan 10 GHz için sekizgen biçimli iletken halka içeren daha esnek özelliklere sahip yeni bir üç boyutlu (3D) FSY önerilmektedir. İletken yüksekliği değişiminin etkisi incelenmekte ve 3D FSY için birim hücre parametrelerinin analizi yapılarak sonuçlar tartışılmaktadır. Analizler elektromanyetik simülasyon programı Computer Simulation Technology (CST) ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 3D FSY'nin birim hücresinde yer alan sekizgen biçimli iletken halkanın yüksekliğinin artmasıyla yapının X bandında periyodik olarak bant durduran ve bant geçiren filtre karakteristiği sergilediği görülmüştür. Parametre analizleri iletken yüksekliği dışındaki birim hücre parametrelerindeki değer artışlarının rezonans frekansını düşürdüğünü ortaya koymuştur. TE modunda dalganın geliş açısının artması ile rezonans frekansı artmakta ve bant genişliği azalmaktadır. TM modunda ise frekans tepkisi kararlıdır ve geliş açısının artmasıyla bant genişliği artmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** 3D, Frekans seçici yüzey, X bant, Sekizgen halka, Bant durduran, Bant geçiren

### Design and Analysis of 3D Octagonal Frequency Selective Surface

**Abstract:** Frequency selective surfaces (FSS) used frequently in the areas of wireless communication, microwave and radar systems design extensively as two dimensional (2D) planar structures. In this study, a new three dimensional (3D) FSS that has flexible properties and contains octagonal shaped conductor loop is designed for X band center frequency of 10 GHz is proposed. The effect of conductor height change is examined, unit cell parameters for 3D FSY are analyzed and the results are discussed. Computer Simulation Technology (CST) that is an electromagnetic simulation program is used for the analyses. While height of the octagonal shaped conductor loop in the unit cell of the designed 3D FSS increases, the structure shows periodically band stop and band pass filter characteristic. Parameter analyses exhibit that increasing the value of the unit cell parameters except the conductor height decreases the resonance frequency. In TE mode increasing the incident angle of the wave increases the resonant frequency while decreases the bandwidth. In TM mode frequency response is stable and bandwidth increases with increasing the incident angle.

**Keywords:** 3D, Frequency selective surface, X band, Octagonal loop, Band stop, Band pass

---

\* Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54050 Serdivan, Sakarya

\* Sakarya Üniversitesi, Elektromanyetik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 54050 Serdivan, Sakarya

\*\* Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54050 Serdivan, Sakarya

İletişim Yazarı: Ahmet Yahya Teşneli (atesneli@sakarya.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Doğada sıklıkla rastlanan periyodik yapılar pek çok araştırmacının dikkatini çekmiş ve farklı alanlarda geliştirilen uygulamalar için çıkış noktası olmuştur. Bir birim hücrenin belli bir periyotta kendini tekrarlaması ile oluşturulan yapılar 1990'ların başından bu yana elektromanyetik alanında da pek çok araştırmacı tarafından incelenmektedir. Genel olarak metamalzeme adı verilen bu yapılar elektromanyetik dalga ile etkileştiğinde sıradışı karakteristik davranışlar sergilemektedirler. Bu yapılar öne çıkan davranışları ve uygulama alanlarına göre elektromanyetik bant aralığı yapılar (EBG), yapay manyetik iletkenler (AMC), frekans seçici yüzeyler (FSY) gibi isimler alırlar (Balanis, 2012). İnce bir iletken tabaka üzerindeki açıklıklar ya da metalik yamalar biçimindeki farklı birim hücrelerin periyodik olarak bir araya gelmesi ile oluşturulan FSY'ler belirli frekanslar için alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durduran özellik gösteren elektromanyetik filtreler olarak tanımlanabilir. FSY'nin tasarımında kullanılan birim hücre geometrisi ve dizilişi gelen elektromanyetik dalganın yansıtılmasını ya da iletilmesini sağlayacak biçimde düzenlenebilir. FSY'ler son zamanlarda kablosuz haberleşme, mikrodalga ve radar sistemleri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hu ve Tennant, 2012).

FSY'ler ile ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun birim hücrenin bir ya da iki boyutta kendini tekrarlaması ile elde edilen düzlemsel tasarımlar üzerine yoğunlaştığı, üç boyutlu (3D) FSY'ler ile ilgili araştırmaların daha az olduğu görülebilir. Ancak geleneksel iki boyutlu (2D) FSY'lerde zayıf filtre tepkisi, zayıf seçicilik, kararsız açılmalı tepki ve dar bant genişliği gibi problemler ile karşılaşılabilir (Thakur ve diğ., 2015). 2D tasarımlara göre nispeten daha yeni olan 3D yapılar, 2D yapılarda karşı karşıya kalınan problemlere yönelik önemli iyileştirme sağlayabilme potansiyeline sahiptir (Azemi ve Rowe, 2011). 3D FSY'ler aktif bileşenler kullanılmaksızın frekans tepkisinin kontrolünde 2D yapılara göre daha esnek imkanlar sağlamaktadır (Azemi ve diğ., 2013).

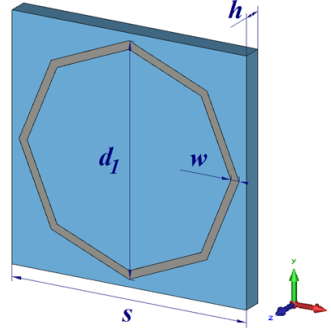
Bu çalışmada özellikle güvenli haberleşme ve yüksek hassasiyet sağlanması gereken askeri ve hükümetlere ait uygulamalar için ayrılmış frekans bandı olan X bandı (8-12 GHz) için, sekizgen iletken halka içeren birim hücre yapısına sahip bir FSY tasarımı sunulmaktadır. Yapının daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyacak kapsamlı bir parametre analizi yapılmıştır. Yapıya ait analizler yüksek performanslı bir elektromanyetik simülasyon programı olan Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio Suite ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 2D olarak tasarlanan sekizgen iletkenli birim hücre yapısına sahip FSY'nin analizi yapılmış ardından iletken yüksekliği artırılarak FSY'ye 3D özelliği kazandırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları iletken yüksekliğinin FSY'nin frekans tepkisini önemli şekilde etkilediğini göstermektedir. Sadece iletken yüksekliği değiştirilerek bant geçiren ya da bant durduran FSY davranışı elde edilebilmektedir. FSY'lerin elektromanyetik dalganın farklı geliş açılarında frekans tepkilerini değiştirmeleri istenmeyen bir özelliktir. Ancak açılmalı kararlılığın sağlanması kolay değildir. Bu çalışmada önerilen 3D sekizgen FSY'nin geliş açısı değişimine bağlı frekans tepkisi de incelenmiştir.

## 2. 2D SEKİZGEN FSY TASARIMI

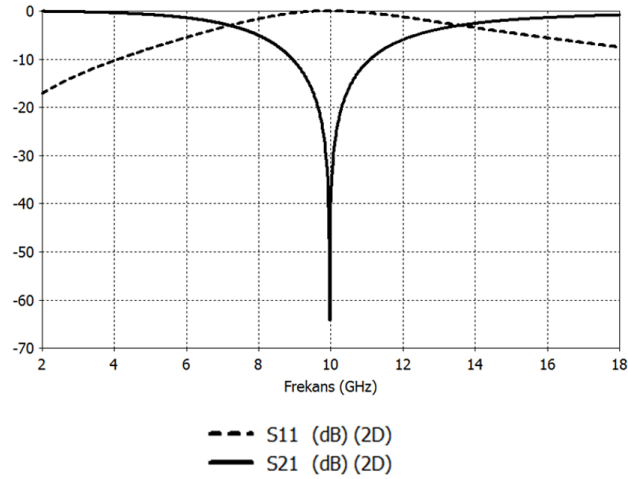
2D FSY'nin sekizgen iletken halka içeren birim hücre tasarımında kullanılan parametrelerin belirlenmesinde en yaygın FSY yapılarından biri olan dairesel halkaya ait temel halka rezonatör denkleminde yararlanılmıştır. Elemanı dairesel iletken halka olan yapılarda ortalama halka çapı,  $\lambda_0$  FSY için rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyu olmak üzere yaklaşık olarak  $\lambda_0/\pi$ 'ye eşit olmaktadır (Bogaerts ve diğ., 2012 ve Munk, 2000). Buna göre, rezonans frekansı olarak seçilen X bandının merkezindeki 10 GHz frekansı için ortalama halka çapı belirlenmiş ve tasarlanan 2D sekizgen FSY modeli üzerinde yapılan optimizasyonlar ile temel geometrik parametreler Tablo 1'deki gibi elde edilmiştir.

**Tablo 1. 2D FSY birim hücre parametreleri**

Parametre	Değer (mm)	Tanım
$s$	10,7	Birim hücre boyu
$l$	0,035	Halka yüksekliği
$d_{ort} (= d_1 - w)$	10,5	Halka ortalama çapı
$d_1$	10,9	Halka dış çapı
$d_2$	10,1	Halka iç çapı
$w$	0,4	Halka kalınlığı
$h$	1	Altaş yüksekliği



**Şekil 1:**  
2D FSY birim hücre geometrisi

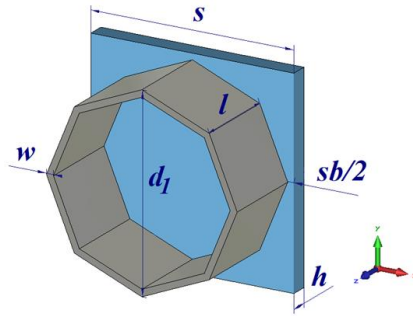


**Şekil 2:**  
2D sekizgen FSY yapı için iletim ve yansımaya karakteristikleri

Birim hücre geometrisi Şekil 1’de verilen 2D yapıda mükemmel elektriksel iletken (PEC) sekizgen halka ve dielektrik sabiti 1 olan 1 mm yüksekliğindeki altta kullanılmıştır. Tasarlanan FSY için elde edilen yansıma ve iletim karakteristikleri Şekil 2’de verilmektedir. Frekans tepkisi incelendiğinde tasarlanan yapının X bandında 9,968 GHz rezonans frekansı ve 2,16 GHz bant genişliği ile bant durdurucu filtre özelliğine sahip olduğu görülmektedir.

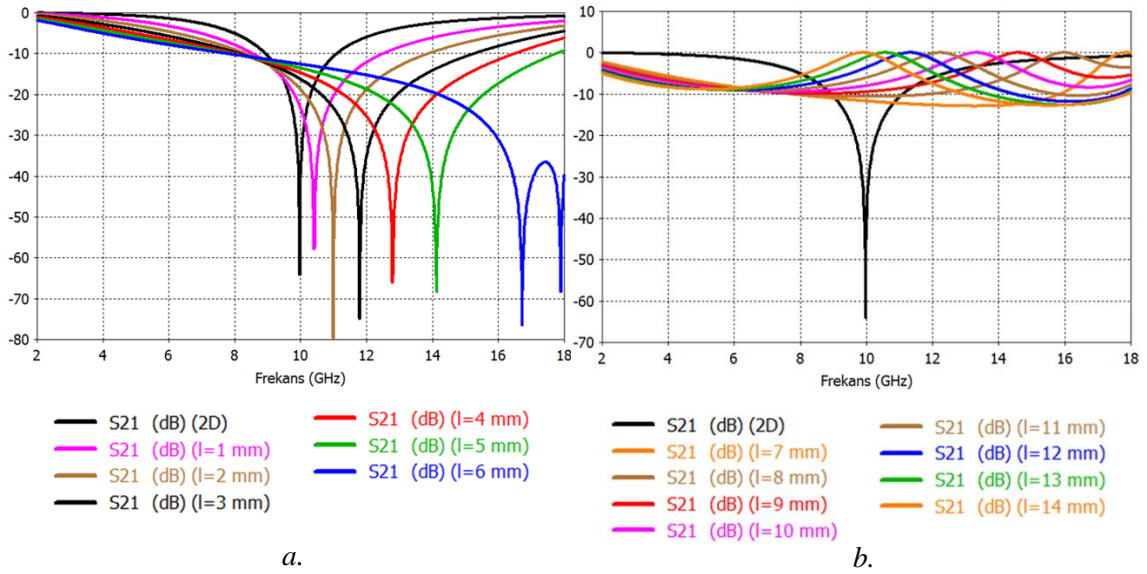
### 3. 3D SEKİZGEN FSY TASARIMI

Tasarlanan bant durdurucu filtre özelliğindeki 2D yapının 0,035 mm olan iletken sekizgen halka yüksekliği artırılarak yapıya Şekil 3’de görüldüğü gibi 3D FSY özelliği kazandırılmıştır. 10 GHz çalışma frekansı için boşlukta ilerleyen EM dalganın dalga boyu 30 mm olarak hesaplanır. 2D yapının iletken yüksekliği birim hücre yapısına ait diğer bütün parametreler sabit tutularak dalgaboyuna kadar artırılmış ve 3D sekizgen FSY’nin frekans tepkisi incelenmiştir.



Şekil 3:  
3D sekizgen FSY

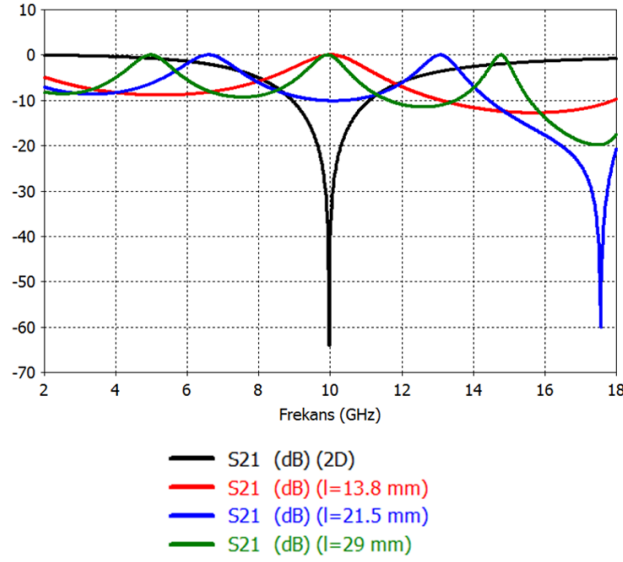
İletken sekizgenin yüksekliği 1 mm’den yaklaşık olarak  $\lambda/4$ ’e karşılık gelen 7 mm’ye kadar artırıldığında rezonans frekansının arttığı ve bant durdurucu filtre özelliğinin devam ettiği Şekil 4(a)’da görülmektedir.



Şekil 4:  
3D sekizgen FSY için iletken yüksekliğinin iletme etkisi;  
a.  $1 \leq l \leq 6$  (mm) b.  $7 \leq l \leq 14$  (mm)

İletken yüksekliği 8 mm'ye ulaştığında 3D FSY'nin bant durduran filtre özelliği Şekil 4(b)'de görüldüğü gibi yerini bant geçiren filtre özelliğine bırakmaya başlamaktadır ve iletken yüksekliği arttıkça bant geçiren FSY'nin rezonans frekansı azalmaktadır. İletken yüksekliği yaklaşık olarak  $\lambda/2$ 'ye karşılık gelen 13,8 mm olduğunda ise 9,968 GHz rezonans frekansı ile bant durduran filtre özelliği taşıyan 2D yapının aksine aynı frekans bandında 10,016 GHz rezonans frekansı ile bant geçiren filtre özelliği gösteren 3D FSY tasarımına ulaşılmaktadır.

Sekizgen yüksekliğinin 0,035 mm (2D), 13,8 mm ( $\sim\lambda/2$ ), 21,5 mm ( $\sim3\lambda/4$ ) ve 29 mm ( $\sim\lambda$ ) değerlerini aldığı durumlar için 3D FSY'nin Şekil 5'de verilen frekans tepkisi incelendiğinde, yapının 10 GHz rezonans frekansı civarında sırasıyla bant durduran, bant geçiren, bant durduran ve tekrar bant geçiren filtre karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. 3D sekizgen FSY, iletken yüksekliği arttıkça dönüşümlü olarak belirli bir frekans için bant durduran ve bant geçiren filtre karakteristiğine sahip olmaktadır. İletken yüksekliğinin değişimi 3D FSY'in frekans tepkisini belirgin şekilde etkilemekte ve 3D FSY tasarımları için önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 5:**

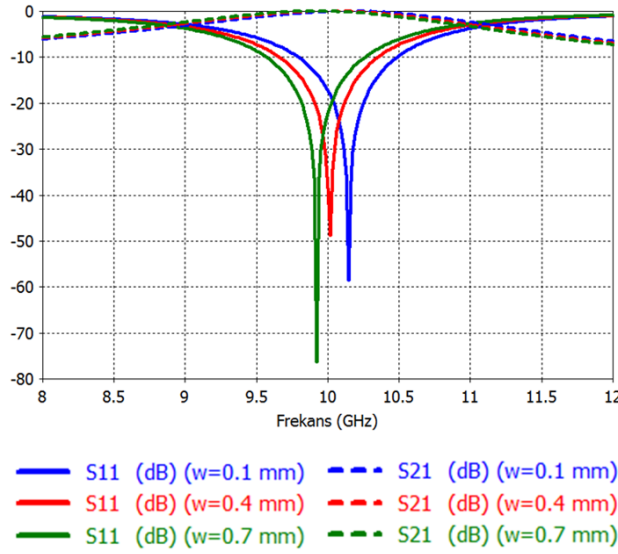
*3D sekizgen FSY için iletken yüksekliğinin iletme etkisi ( $l\sim\lambda/2$ ,  $l\sim3\lambda/4$  ve  $l\sim\lambda$  için)*

1960'lardan bu yana FSY'lerin analizi için pek çok analitik yöntem kullanılmıştır. Tasarlanan FSY'ler için eşdeğer devre modellerinin oluşturulması en sık kullanılan yaklaşımlardan biridir (Fernández-Martínez ve diğ., 2005). Bu yöntemde FSY periyodik dizisi seri ya da paralel bağlanmış eşdeğer kapasitans ve indüktanslar ile modellenir ve yapının frekans karakteristiği eşdeğer LC devresine göre belirlenebilir. Tasarlanan FSY için rezonans frekansı  $1/(2\pi\sqrt{LC})$  değerine eşittir. 2D FSY'ler için kullanılan eşdeğer devre modeli yaklaşımı kapasitans ve indüktans değerleri belirlenerek 3D modellere de uygulanabilir. 2D FSY yapılarının eşdeğer devre modelindeki indüktansı iletken elemanlar, kapasitansı ise bu elemanlar arasındaki boşluklar oluşturur. Buna göre 2D sekizgen FSY yapıda indüktif etki temel olarak iletken halka çapına bağlıdır ve yapının merkez frekansı değişen çap değeri ile ayarlanabilir. İletken halkanın yüksekliği artırılıp üçüncü boyut eklendiğinde indüktif değere yapının yüksekliği ile orantılı ikinci bir indüktans değeri eklenerek 3D FSY modellenebilir ve iletken yüksekliğinin artırılması FSY'nin frekans tepkisini değiştirir (Nisanci ve diğ., 2016 ve Azemi ve diğ., 2012). İletken yapının yüksekliğine bağlı olarak tanımlanan ikinci indüktans değeri çapa bağlı olarak tanımlanan birinci indüktans değerine göre baskın hale geldiğinde bant

geçiren tepki ortaya çıkmaktadır. Bu da 3D sekizgen FSY'nin frekans tepkisindeki değişimi açıklamaktadır.

#### 4. 3D SEKİZGEN FSY İÇİN PARAMETRE ANALİZİ

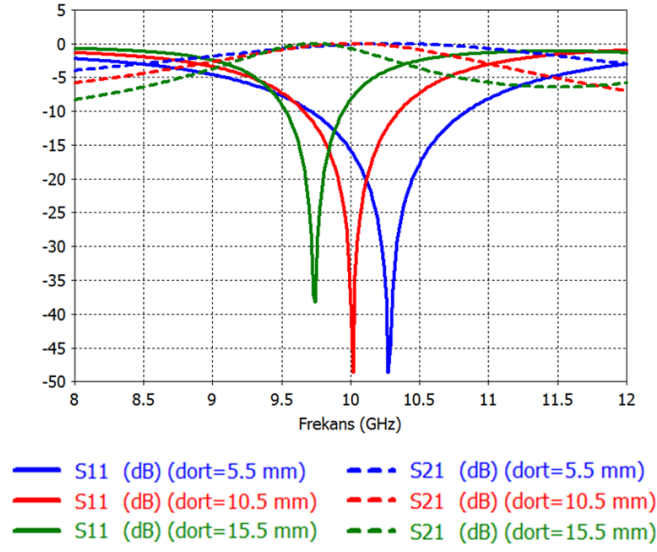
İletken yüksekliği yaklaşık olarak  $\lambda/2$ 'ye karşılık gelecek şekilde 13,8 mm olarak tasarlanan ve 10,016 GHz rezonans frekansında bant geçiren filtre özelliği gösteren 3D sekizgen FSY için parametre analizi yapılarak birim hücreyi belirleyen diğer parametrelerin yapının frekans tepkisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla incelenen ilk parametre iletken sekizgen yapının kalınlığı ( $w$ )'dır. Sekizgene ait kalınlığın 0,1 mm, 0,4 mm ve 0,7 mm değerleri için elde edilen frekans tepkileri Şekil 6'daki gibidir. Yansıma ve iletim karakteristiklerine ilişkin sonuçlar kalınlık ile rezonans frekansının ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.



**Şekil 6:**

*3D sekizgen FSY için iletken kalınlığının iletme ve yansımaya etkisi*

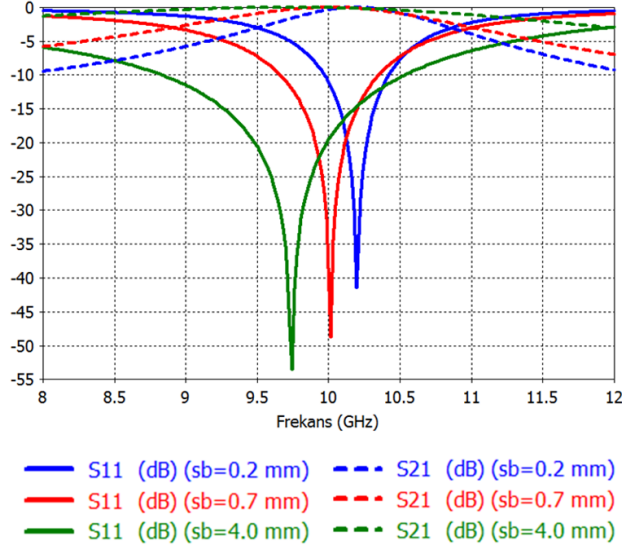
3D FSY birim hücresinde incelenen ikinci parametre iletken sekizgenin ortalama çapıdır. Birim hücre için ortalama sekizgen çapı  $d_{ort} = d_1 - w$  olarak tanımlanır ve önerilen tasarımdaki değeri 10,5 mm'ye eşittir. Bu değer 5mm artırılıp azaltılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Buradan ortalama sekizgen çapı değerinin artması ile merkez frekansının azaldığı görülmektedir. Sonuç bir önceki bölümde açıklanan eşdeğer devre yaklaşımı ile uyumludur. İletken halka çapı ile orantılı olarak modellenen ve birinci indüktans değeri olarak tanımlanan değer ortalama sekizgen çapının artması ile artar. FSY için rezonans frekansının ayarlanmasında halka çapından yararlanılabilir.



**Şekil 7:**

*3D sekizgen FSY için ortalama halka çapının iletme ve yansımaya etkisi*

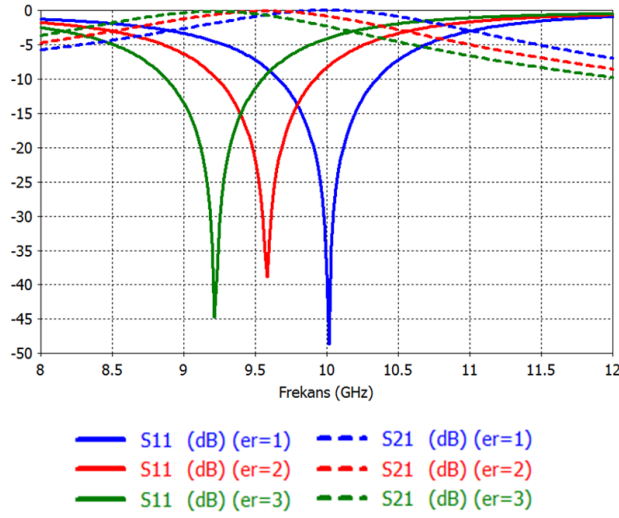
FSY dizisini oluşturan iletken sekizgen halkaların birbirlerine olan uzaklıklarının frekans tepkisine olan etkisi Şekil 8’de gösterildiği gibidir. İletken halkalar aralarındaki uzaklıklar 0,2 mm, 0,7 mm ve 4 mm olacak şekilde birbirinden uzaklaştıkça rezonans frekansı daha düşük değerlere kaymaktadır.



**Şekil 8:**

*3D sekizgen FSY için iletken halkalar arasındaki uzaklığın iletme ve yansımaya etkisi*

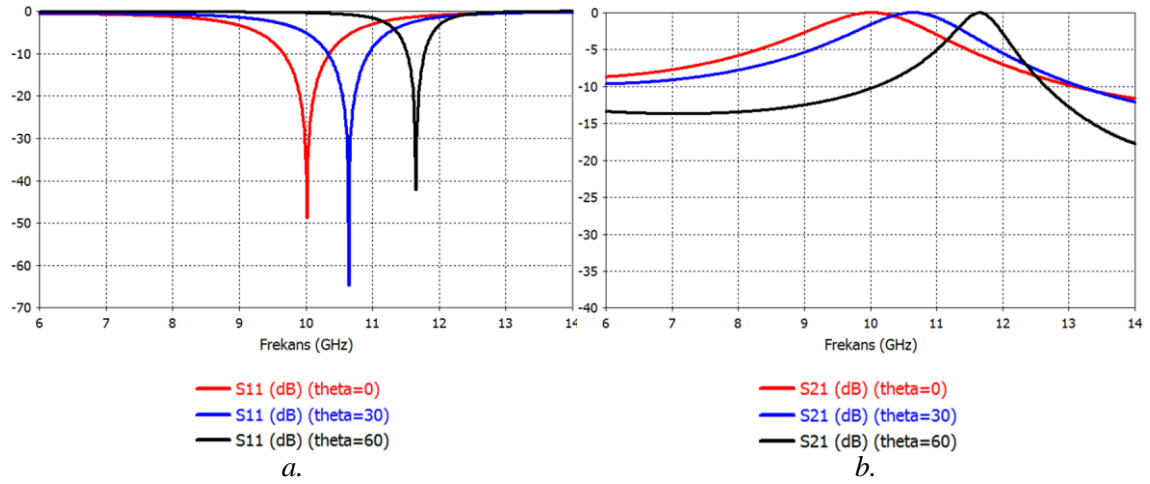
3D FSY birim hücresinde yer alan sekizgen biçimli iletken halkanın tabanına yerleştirilen alttaş katmanının dielektrik özelliği de FSY karakteristiği üzerinde etkilidir. Bu durumu analiz etmek amacıyla 1, 2 ve 3 olarak seçilen farklı dielektrik sabiti değerleri için FSY’nin frekans tepkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 9’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tabakanın dielektrik sabitinin artması ile FSY’nin rezonans frekansının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 9:**

*3D sekizgen FSY için altaşın dielektrik sabitinin iletme ve yansımaya etkisi*

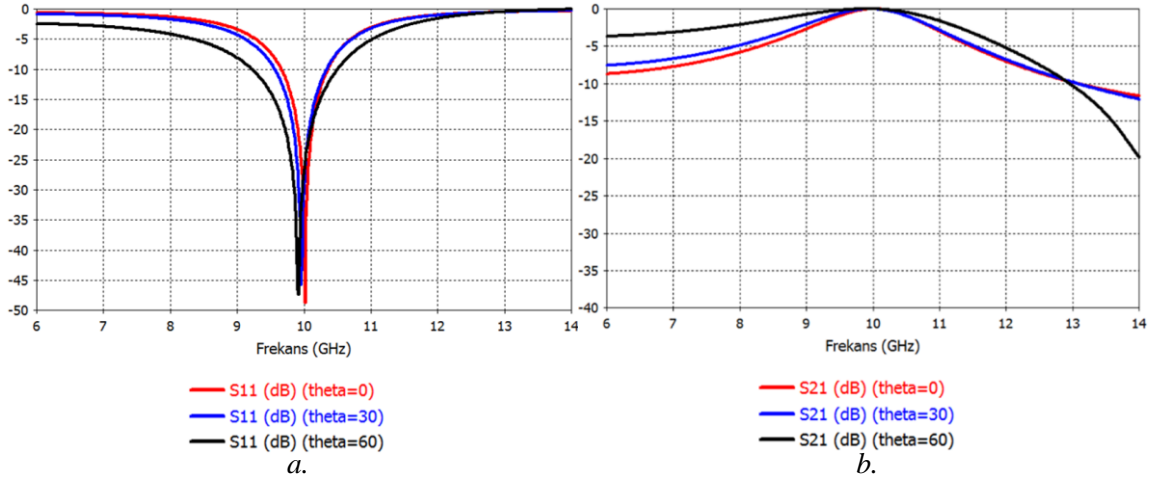
Rezonans frekansının yapı üzerine gelen düzlem dalganın geliş açısına karşı kararlılığı da önemli FSY karakteristiklerinden biridir. Yapı üzerine gelen dalganın geliş açısı ( $\theta$ ) değiştirilerek FSY'nin frekans tepkisi incelenip yapının geliş açısına göre davranışı yorumlanabilir. Şekil 10'da TE ve Şekil 11'de TM modları için rezonans frekansının geliş açısına bağlı değişimi verilmektedir. Geliş açısının değişimi ile 3D sekizgen FSY'nin bant geçiren karakteristiği değişmezken TE modu için geliş açısı arttıkça bant geçirme bölgesi rezonans frekansı değerinde yukarıya doğru kayma gözlenmiştir.



**Şekil 10:**

*3D sekizgen FSY için TE modunda dalga geliş açısının; a. yansımaya ve b. iletme etkisi*





**Şekil 11:**  
3D sekizgen FSY için TM modunda dalga geliş açısının;  
**a.** yansımaya ve **b.** iletme etkisi

TM modunda yapının geliş açısı değişimine göre kararlı olduğu görülmektedir. Hem 2D hem de 3D FSY'ler için geliş açısına bağlı kararlılık elde etmek oldukça güçtür. Bu çalışmada önerilen 3D sekizgen FSY TM polarizasyonunda geliş açısı değişime karşı kararlı davranırken, bant genişliğinin de arttığı görülmektedir. TM modunda normal geliş durumunda bant genişliği değeri 688,3 MHz iken, geliş açısı 60° olduğunda 1270,7 MHz'e çıkmıştır. TE modunda ise bant genişliğinde daralma gözlenmiştir.

## 5. SONUÇ

Birim hücresi sekizgen biçimli iletken halka içeren 2D FSY ve ardından iletken yüksekliği artırılmak suretiyle 3D sekizgen FSY tasarımlarının yapılması ile önerilen 3D yapının parametre analizleri bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Tasarlanan yapı X bandında iletken yüksekliğine bağlı olarak bant durduran veya bant geçiren filtre karakteristiğine sahiptir. 10 GHz rezonans frekansında 2D FSY bant durduran özellik gösterirken iletken yüksekliği  $\lambda/2$  civarındayken bant geçiren özellik göstermektedir. İletken yüksekliği yaklaşık olarak  $3\lambda/4$  ve  $\lambda$  değerlerini aldığı anda ise sırasıyla bant geçiren ve bant durduran filtre karakteristiği göstermektedir. İletken yüksekliğinin artmasıyla dönüşümlü olarak gösterdiği filtre karakteristiği değişmektedir. İletken sekizgen yüksekliği yaklaşık  $\lambda/2$  civarında 13,8 mm olan 10,016 GHz rezonans frekansına sahip bant geçiren filtre özelliği gösteren 3D sekizgen FSY için yapılan parametre analizi sonucunda rezonans frekansının iletkenin kalınlığı, ortalama iletken halka çapı, iletken halkalar arası uzaklık ve alttaşın dielektrik sabitinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Üzerine gelen dalganın farklı geliş açılarında TM modunda kararlı davranan 3D FSY'nin rezonans frekansı TE modunda açının artmasıyla artmaktadır ancak bant geçiren özelliğini her iki modda da korumaktadır. Geliş açısının artmasıyla TM modunda bant genişliği artarken TE modunda azalmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2017-50-01-036)

## KAYNAKLAR

1. Azemi, S. N. and Rowe W. S. T. (2011) Development and Analysis of 3D Frequency Selective Surfaces, *Asia-Pacific Microwave Conference*, Melbourne, Australia, 693-696.
2. Azemi, S. N., Ghorbani, K. and Rowe, W. S. T. (2012) 3D Frequency Selective Surfaces, *Progress In Electromagnetics Research C*, 29, 191-203. doi:10.2528/PIERC12033006
3. Azemi, S. N., Ghorbani, K. and Rowe W. S. T. (2013) 3D Frequency Selective Surface with Incident Angle Independence, *43rd European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, 928-931.
4. Balanis, C. A. (2012) *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Bogaerts, W., De Heyn, P., Van Vaerenbergh, T., DeVos, K., Selvaraja, S. K., Claes, T., Dumon, P., Bienstman, P., Van Thourhout, D. and Baets R. (2012) Silicon Microring Resonators, *Laser Photonics Rev.*, 1, 47-73. doi:10.1002/lpor.201100017
6. Fernández-Martínez, L., García, E., Castro-Galán, D. and Segovia-Vargas, D. (2005) Equivalent Circuit Model Proposal Applied to Frequency Selective Surfaces, *18th International Conference; Applied Electromagnetics and Communications, ICECom 2005*, Dubrovnik, Croatia, 1-4. doi:10.1109/ICECOM.2005.2050248
7. Hu D. and Tennant A. (2012) 3D Saw-tooth Frequency Selective Surfaces, *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, Loughborough, UK, 1-4. doi: 10.1109/LAPC.2012.6403068
8. Munk, B. A. (2000) *Frequency Selective Surface: Theory and Design*, Wiley-Interscience, New York.
9. Nisanci, M. H., Tesneli, A. Y., Tesneli, N. B. and Tek, E. (2016) Parameter analysis of a novel single layer 3D Band-pass FSS designed by combination of continuous and discontinuous conductive rods, *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, 3329-3332. doi:10.1109/PIERS.2016.7735300
10. Thakur, V., Dutta, B. R. and Kanaujia B. K. (2015) Design and Analysis of Band-Reject 3-D Frequency Selective Surface with Multiple Transmission Zeros and Pseudo-Elliptic Response, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(7), 6321-6329. doi:10.15662/ijareeie.2015.0407047