



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.10.2025  
Kabul Tarihi : 12.01.2026

Received Date : 03.10.2025  
Accepted Date : 12.01.2026

## TELEMETRİ İLETİŞİMİ İÇİN KARBON FİBER KOMPOZİTE GÖMÜLÜ FSS BANT GEÇİREN FİLTRE

### BANDPASS FILTER BASED ON FSS EMBEDDED IN CARBON FIBER COMPOSITE FOR TELEMETRY COMMUNICATION

*Emin ÜNAL*<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-4088-8353)  
*Sena TÜRKER*<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0003-7801-2618)  
*İlknur KESKİN*<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0009-4321-3510)  
*Olca ALTINTAŞ*<sup>2,\*</sup> (ORCID: 0000-0003-3237-4392)

<sup>1</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya 42090, Türkiye

<sup>2</sup> Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, Hatay 31200, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Olca ALTINTAŞ, olca.altintas@iste.edu.tr

#### ÖZET

Günümüzde hava araçları teknolojisi giderek ilerlemekte ve buna paralel olarak kullanım alanları da artmaktadır. Hava araçlarının gövde yapısında karbon fiber malzeme, yüksek dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, bu malzeme aşırı kayıplıdır. Karbon fiber gövdeli hava araçlarında, 868-900 MHz frekans bandında haberleşmeyi sağlayabilmek için karbon fiber gövde üzerine belirli boyutlarda dikdörtgen yarıklar açılarak, merkez frekansı 900 MHz olan, bant geçiren filtre özelliği gösteren FSS tasarlanmıştır. Tasarım FIT tabanlı bir simülasyon programı ile gerçekleştirilmiş, boyutlar optimize edilmiş, karbon fiber levhanın üretimi gerçekleştirilmiş ve üzerine optimize edilen boyutlarda yarıklar açılmıştır. Üretilen numunelerin ölçümleri PNA-L Vektör Ağ Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yarık açılmadan 900 MHz’de, bant durduran filtre gibi davranan karbon fiber yapı, yarıklar açıldıktan sonra 900 MHz’de bant geçiren filtre özelliği göstermeye başlamıştır. Yarıksız karbon fiber levha için 900 MHz’de maksimum -6,57 dB olan IL değeri, yarıklar açıldıktan sonra -1,66 ‘ya düşmüştür. Ayrıca, yarıksız karbon fiber levha için 900 MHz’de maksimum -4,66 dB olan RL değeri, yarıklar açıldıktan sonra -23,84 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Önerilen bant geçiren filtre, 820 ile 1100 MHz (kesirli bant genişliğinin %31,11’i) arasında değişen -3 dB’lik bir iletim bandı sergiledi.

**Anahtar Kelimeler:** Frekans seçici yüzey, karbon fiber, s-parametreleri, telemetri

#### ABSTRACT

The rapid advancement of aerospace technology has increased the use of lightweight and durable materials in aircraft structures. Carbon fiber composites are widely preferred due to their high strength-to-weight ratio, although their inherently lossy nature limits their electromagnetic performance. To ensure reliable telemetry communication in the 868–900 MHz frequency band, a frequency selective surface (FSS)–based bandpass filter was designed by etching rectangular slots onto a carbon fiber composite plate. The design, centered at 900 MHz, was optimized using a finite integration technique (FIT)–based simulation tool. A prototype carbon fiber plate was fabricated, and the optimized slots were machined onto it. Measurements were performed using a PNA-L Vector Network Analyzer. Before slotting, the carbon fiber plate exhibited bandstop filter characteristics at 900 MHz. After slotting, it demonstrated bandpass behavior with a maximum insertion loss of -1.66 dB and a return loss of -23.84 dB, compared to -6.57 dB and -4.66 dB for the unslotted plate, respectively. The proposed filter provided a -3 dB transmission bandwidth from 820 MHz to 1100 MHz, corresponding to a 31.11% fractional bandwidth.

**Keywords:** Frequency selective surface, carbon fiber, s-parameters, telemetry

## GİRİŞ

Günümüzde hava araçları teknolojisi giderek ilerlemekte ve buna paralel olarak kullanım alanları da artmaktadır. Askeri ve ulaşım amacıyla kullanımlarına ek olarak tarım, haberleşme, eğlence gibi yeni kullanım alanları da bulunmaktadır. Hava araçlarının yer istasyonu ile kesintisiz haberleşmesi, hava aracının etki kullanımı ve kontrolü açısından önemlidir. Hava araçlarının gövdeleri alüminyum alaşımlı metallere, kompozit materyalden ya da karbon fiber malzemeden üretilmektedir. Haberleşmede kullanılan anten hava araçlarının içerisine monte edildiğinde, gövde yapısı elektromanyetik dalgaları geçirmediğinden haberleşme sağlanamamakta, gövde dışına monte edildiğinde ise aerodinamik akış etkilenmektedir. Havacılık endüstrisinde, hava aracının ağırlığını azaltma ve aynı zamanda benzer metal alaşımlarının sağladığı elektromanyetik koruma seviyesinin yanında güvenilir mekanik özellikler sağlama ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu sebeple, kompozit malzeme olarak karbon fiberin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır (Jose vd., 2002; Rea vd., 2005; Mehdipour vd., 2010; Mehdipour vd., 2011).

Karbon fiber malzeme, yüksek dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle insansız hava araçları (İHA) üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. Ancak, karbon fiber levha, özellikle X ve S bantlarında alüminyum alaşımlarında olduğu gibi yüksek düzeyde etkili elektromanyetik kalkanlama sağlamaktadır (Rea vd., 2005). Karbon fiberin RF (radyo frekansı) ve mikrodalga frekanslarında sinyalleri büyük ölçüde zayıflatması, özellikle telemetri sistemlerinde haberleşme sorunlarına yol açmaktadır. Telemetri sistemleri, İHA'ların yer kontrol istasyonlarıyla sürekli iletişimde kalmasını sağlarken, karbon fiber gövde bu sinyallerin iletimi zorlaştırmaktadır. Geleneksel yöntemlerle telemetri antenin gövde dışına yerleştirilmesi tercih edilse de bu durum, antenlerin çevresel faktörlerden zarar görme riskini arttırmaktadır. Karbon fiber gövdeli hava araçlarında telemetri sistemleri kullanarak 900 MHz'de haberleşme sağlayabilmek için, karbon fiber gövde üzerinde yarıklar açarak bant geçiren filtre özelliği gösteren bir tür frekans seçici yüzey (FSS) oluşturulacaktır (Neo & Varadan, 2001; Sha vd., 2002; Tellakula vd., 2003).

Frekans seçici yüzeyler gelen elektromanyetik dalganın frekansına göre yansıma ya da iletim sağlayan aynı zamanda elektromanyetik filtreleme ya da elektromanyetik dalga polarizasyonunu etkileyerek polarizasyon dönüştürme görevi gören bir yapı olarak tanımlanabilir. İki veya üç boyutlu kafeslerden oluşan FSS'ler, son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Wu, 1995; Munk, 2005). Periyodik olarak düzenlenmiş metalik yamalar veya açıklık elemanlarından oluşan FSS, belirli frekans aralıklarında geniş bant kapasitesi sağlayabilir. Elektromanyetik dalgalarla etkileşime girdiğinde, FSS belirli bant geçişli veya bant durdurma filtreleme özellikleri gösterebilir (Munk, 2003; Zhu vd., 2014; Kumar, Pasha ve Guha, 2016; Anwar, Mao ve Ning, 2018; Altıntaş, 2021; Li vd., 2024; Zhu, Wang ve Jin, 2024; Dahima, Mishra ve Kapoor, 2025; Pascarella, Brizi ve Monorchio, 2025). Geniş bant özellikleri nedeniyle, FSS'ler son zamanlarda uzamsal filtreler (Yong vd., 2018; Omar, Huang ve Shen, 2019; Kapoor, Mishra ve Kumar, 2021; Kim vd., 2022; Yong & Glazunov, 2023; Tariq & Zahid, 2023), polarizasyon dönüştürücüler (Lundgren vd., 2021; Lin vd., 2023) ve yansıtıcı/iletici dizi antenleri olarak birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, FSS, elektromanyetik kalkanlama uygulamaları için popüler seçeneklerden biridir (Celozzi & Araneo, 2005; Unal, Gokcen ve Kutlu, 2006; Ghosh & Srivastava, 2017; De Sabata vd., 2022). Son yıllarda, literatürde kalkanlama ve filtreleme uygulamaları için bildirilen birçok geniş bant geçişli iki ve üç boyutlu FSS tasarımları bulunmaktadır (Ghosh vd., 2022).

Yama şeklinde tasarlanan yapılarda kapasitif etki oluşurken, oyuk şeklinde tasarlanan yapılarda ise endüktif etki oluşmaktadır. FSS'deki yüklü düzlem dalgası rezonans frekansı çevresinde yansıtılır ya da iletilir. İletken yamalar içeren FSS'ler, rezonans frekansta değilken hemen hemen tüm yüzeyde EM dalgalarını yansıtırken, rezonansta yarıklardan neredeyse tüm elektromanyetik dalgalarını iletir. FSS'ler, yüksek geçiren, düşük geçiren, bant durduran ve bant geçiren filtreler olarak tasarlanabilir (Wu, 1995; Munk, 2005).

Frekans seçici yüzey kullanım amacına bağlı olarak bant durduran, bant geçiren, yüksek geçiren, alçak geçiren özelliklerine sahip yapılar olarak tasarlanabilir. Ancak, bu tasarımların istenilen özelliklerde çalışması için tasarımında kullanılan malzemenin fiziksel, kimyasal, elektriksel özelliklerinin yanı sıra birim hücre geometrisine kadar birçok parametreyi dikkate alarak tasarlanmalıdır. Bu çalışmada bant geçiren özelliğine sahip bir frekans seçici yüzey tasarımı yaparak uçaklarda ve hava araçlarında haberleşmeyi kolaylaştırmak ve daha kullanışlı hale getirmek hedeflenmiştir. FSS'ler genellikle, metalik bir ekran içindeki yamalar gibi açıklık elemanlarına sahip, keyfi geometrilere sahip periyodik olarak düzenlenmiş metalik yamalar veya bunların tamamlayıcı geometrilerinden oluşturulur (Sousa vd., 2023). İstenilen bir FSS'nin tasarım sürecindeki en önemli adım, dizi için oluşturucu elemanların doğru seçilmesi ve yapının periyodikliğinin uygun şekilde belirlenmesidir. Eleman tipi ve geometrisi, alt tabaka parametreleri, üst tabakaların varlığı veya yokluğu ve elemanlar arası boşluk, bant genişliği, transfer

fonksiyonu ve geliş açısına ve polarizasyona bağımlılığı gibi yapının genel frekans tepkisini belirleyecek en önemli parametrelerdir (Wu, 1995; Munk, 2005).

Bu çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan yüksek iletkenlikli ve kayıplı karbon fiber gövde üzerine, telemetri frekans bandında (868–900 MHz) etkin çalışan, düşük kayıplı bir iletim kanalı önermektedir. Literatürdeki çalışmaların çoğu daha yüksek frekans bölgelerinde veya metalik alt tabanlı yapılarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada düşük frekans bandında (sub-GHz) karbon fiber malzemenin elektromanyetik geçirgenliğini arttırmak üzere fiziksel modifikasyon temelli bir çözüm önerilmektedir. Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Bölüm II'de, önerilen FSS katmanı, FIT tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Ayrıca, açılacak yarıkların önerilen FSS'nin filtreleme performansı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir değerlendirme yapılmış ve boyutlar optimize edilmiştir. Bölüm III'de, karbon fiber levha üretilmiş, optimize edilmiş boyutlar kullanılarak üretilen levha üzerinde yarıklar açılmış ve üretilen prototipin deneysel doğrulaması yapılmıştır. Son olarak, Bölüm IV'te, tasarlanan FSS yapısının işlevselliğini doğrulamak için simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve makale tamamlanmıştır.

## FSS YAPININ TASARIM VE SİMÜLASYONU

Bu çalışmada, 900 MHz de haberleşme yapan karbon fiber gövdeli İHA'larda haberleşme sorununa çözüm getirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, karbon fiber gövde üzerinde belirli boyutlarda açılan yarıklar aracılığıyla RF sinyallerinin gövde içerisine geçmesini sağlamayı ve telemetri cihazlarını gövde içerisine yerleştirilmesi de amaçlanmaktadır. Karbon gövde üzerinde endüktif etki yaratacak ve 868-900 MHz frekans bandında haberleşmeyi sağlayacak nitelikte yarıklar açılarak bant geçiren filtre özelliğine sahip frekans seçici yüzeyler gibi davranmasını sağlanacaktır. Bu yarıklar FSS'nin özellikleri sayesinde bant geçiren filtre işlevi görecek, böylece iletişim kayıpları minimuma indirilecektir. Bu sayede yer istasyonu hava aracı arasında kusursuz bir haberleşme sağlamak hedeflenmiştir. Ayrıca hava aracı gövdesinden 900 MHz merkez frekanslı bir frekans bandı geçecek ve diğer sinyalleri durduracak şekilde tasarlanmıştır. Bu yeteneği sayesinde diğer sinyalleri hava aracındaki alıcı-verici kaynağa ulaşamayarak bir noktada sisteme elektromanyetik girişimi engelleyerek sistemin daha düzgün ve güvenilir çalışmasını sağlayacaktır.

### *Bant geçiren FSS Tasarımı*

İletken bir plakaya oyulmuş ince bir dikdörtgen boşluk kullanarak bant geçiren filtre gibi davranan FSS'nin rezonans frekansını hesaplamak için, yapıyı bir alt dalga boyu dalga kılavuzu açıklık rezonatörü gibi ele alınabilir. Rezonans frekansı öncelikle dikdörtgen boşluğun boyutlarına, kalınlığına ve sınır koşullarına bağlıdır. Dikdörtgen boşluk, rezonanslı bir dalga kılavuzu bölümü gibi davranır; tıpkı bir dalga kılavuzu boşluk rezonatörü gibi. Düzlemsel bir dalga normal gelişte, boyutlar özellikle baskın mod TE<sub>10</sub> olmak üzere, duran dalga modlarını desteklediğinde rezonans meydana gelir (Mittra, Chan ve Cwik, 1988; Varikuntla & Singaravelu, 2019).

Kalınlığı  $t$  olan metal bir yüzeyde, genişliği  $a$  ve yüksekliği  $b$  olan dikdörtgen bir açıklık olduğunu varsayılırsa ( $t < a, b$ ), rezonans frekansı (bant geçiş merkez frekansı):

$$f = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

Burada,  $a$ : dikdörtgenin uzun kenarının boyu (elektrik alan yönünde), Baskın mod için,  $m = 1, n = 0$ :

$$f = \frac{c}{2a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

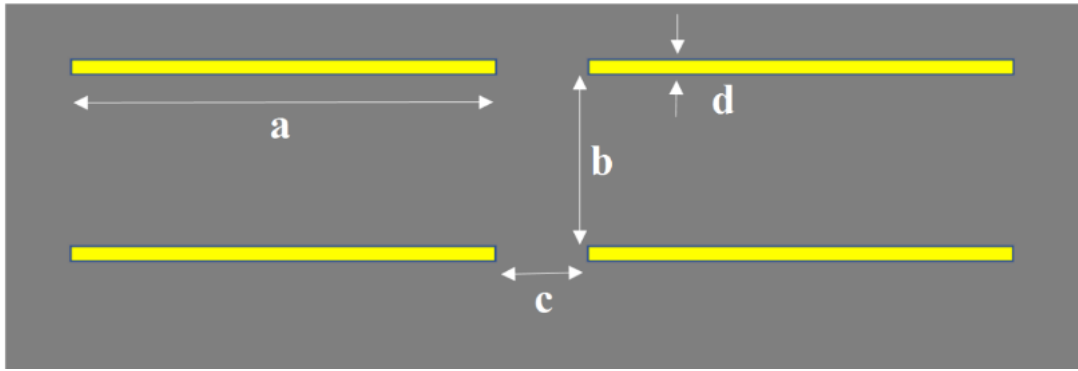
Denklem yeniden düzenlenirse, yarıklarda hava boşluğu ( $\epsilon_r = 1$ ) olursa, dikdörtgenin uzun kenarının boyu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$a = \frac{c}{2f} \quad (3)$$

Bant geçiş merkez frekansı 900 MHz alındığında, Denklem 3'de yarık boyu  $a=167$  mm olarak hesaplanmıştır. Ancak, ihmal edilemeyecek kalınlıklarda, boşluk daha çok kısa bir dalga kılavuzu kesiti gibi davranır ve rezonans frekansında kayma meydana gelir (Varikuntla & Singaravelu, 2019), simülasyon programında bu kaymanın etkisi

dikkate alınarak boyut optimize edilmiş ve  $a=172$  mm olarak alınmıştır. Ayrıca, eni  $d=1$  mm, yarıklar arasındaki yatay ve düşey mesafe sırasıyla,  $b=80$  mm,  $c=22,5$  mm alınarak üretilen yarıklı karbon fiber plaka Şekil 1'de görülmektedir. Yarık boyutları FSS'nin çalışma frekansında gelen elektromanyetik dalganın iletilmesi için endüktif etki yaratmak amacıyla tasarlanmıştır. Frekans seçici yüzeyin toplam boyutu  $470$  mm x  $470$  mm olan  $1$  mm kalınlığında, karbon fiber düzlem levhanın ağırlığı  $385$  gram, yoğunluğu ise  $1,81$  g/cm<sup>3</sup> tür. Böylece tasarım  $868$ – $900$  MHz bandında çalışan LoRa ve ISM tabanlı telemetri sistemleriyle uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Hedef frekans bandının ve bant genişliğinin ITU-R ve ETSI standartları ile uyum sağlamaktadır (Anonim, 2015; Anonim, 2017).

Simülasyon çalışmaları FIT tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirildi. Karbon fiber malzemenin kompleks dielektrik sabiti ( $\epsilon_r = 4.2 - j1.8$ ) ve yüzey iletkenliği ( $\sigma = 6.5 \times 10^3$  S/m) modele dahil edilmiştir. Sınır koşulları açık (Perfectly Matched Layer) ve portlar dalga kılavuzu portları olarak ayarlanmıştır. Karbon fiber levhalar üzerine Şekil 1'de görüldüğü gibi belirli periyotlarda ve boyutlarda yarıklar açılarak FSS yapısı elde edildi. Yarıkların en uygun kalınlıkta ve boyutta tasarlanması, karbon yapının dayanıklılığını etkilememesi ve haberleşmenin sağlanabilmesi için önemlidir. Elektromanyetik filtrenin özellikleri esas olarak Frekans seçici yüzeyin eleman türüne ve şekline bağlıdır. Karbon gövde üzerinde endüktif etki yaratacak ve  $868$ - $900$  MHz frekans bandında haberleşmeyi sağlayacak nitelikte yarıklar açılarak bant geçiren filtre özelliğine sahip frekans seçici yüzeyler gibi davranmasını sağlanacaktır. Bu sayede yer istasyonu hava aracı arasında kusursuz bir haberleşme sağlamak hedeflenmiştir.



Şekil 1. 900 MHz Merkez Frekanslı FSS'nin Tasarım Ölçüleri

Tasarlanan yapının simülasyon çalışmaları, istenen frekans aralığını kapsayan  $800$ - $1600$  MHz bandında iletim ve yansımaya katsayısı açısından incelendi. FIT tabanlı simülasyon programında ayrıca genetik algoritma yöntemleri de kullanılarak yarık boyutları optimize edildi.

### Simülasyon Sonuçları

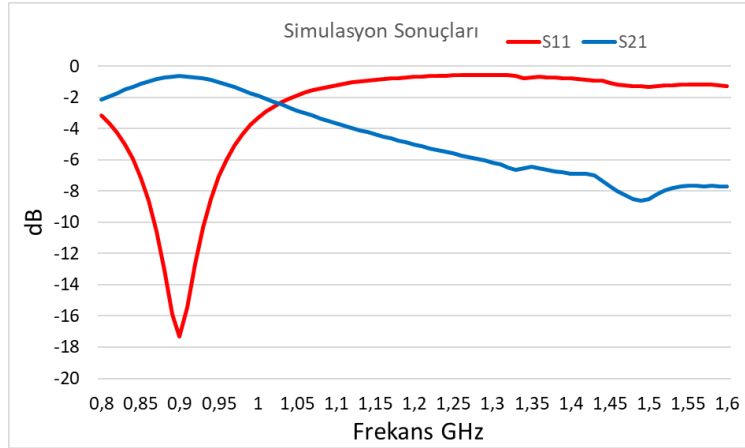
Tasarlanan yapının EM özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla, FSS yapının yansımaya ve iletim özelliklerinin frekans tepkisi birleştirilerek, Şekil 2'de gösterilmiştir. İletim ve yansımaya parametreleri incelendiğinde, FSS'nin beklendiği gibi,  $900$  MHz merkez frekanslı, bant geçiren filtre özelliği sergilediği görülmektedir. Yapı,  $0,85$  ile  $0,95$  GHz arasında yaklaşık  $100$  MHz ( $-1$  dB'den az) iletim bant genişliğine sahiptir. Yapı,  $900$  MHz'de maksimum  $-0,64$  dB IL ve maksimum  $-17,33$  dB RL değerlerine sahiptir.  $S_{11}$  tepkisi dikkate alındığında, merkez frekanstaki seçiciliğin önemli ölçüde iyileştirildiği görülmektedir (Varikuntla & Singaravelu, 2019). Ayrıca, tasarlanan yapının yansımaya ( $S_{11}$ ) ve iletim ( $S_{21}$ ) katsayıları,  $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 \approx 1$  denklemini sağlamamaktadır ve bu da karbon fiber üzerine açılan yarıklardan oluşan FSS'nin kayıplı olduğunu göstermektedir (Ghosh vd., 2022).

Simülasyon sonucunda elde edilen ve Şekil 2'de verilen verilere göre, önerilen yapı, bu çalışmanın motivasyonunu olan karbon fiber gövdeli IHA'lardaki haberleşme problemine çözüm getirebilecek niteliktedir. Böylece, karbon gövde üzerine  $868$ - $900$  MHz frekans bandında haberleşmeyi sağlamak amacıyla açılan yarıkların fonksiyonlarını yerine getirdiği anlaşılmaktadır.

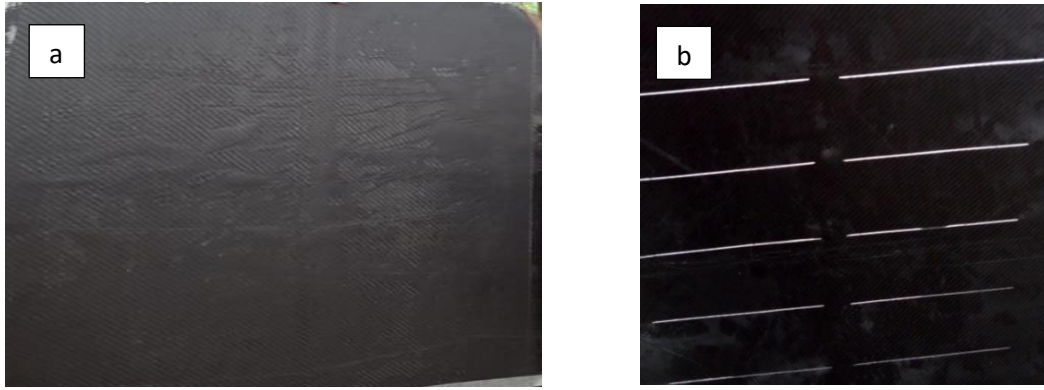
### MALZEME ÜRETİMİ VE DENEYSEL ÖLÇÜM

Epoksi ve sertleştiricinin karbon fiber ile karıştırılması sonucu elde edilen düzlem karbon fiber plaka Şekil 3.a'da görülmektedir. Frekans seçiciyi yüzey, reçine ile yapıştirılarak üst üste gelen karbon fiber kumaşı vakumlanarak üretilmiştir. Vakum sayesinde, daha sıkı bir plaka yapı elde edilmesi sağlanmıştır. Üretilen karbon fiber yapı,

sertleştikten sonra, üzerine Şekil 1’de görülen ve ölçüleri verilen yarıklar açılmıştır. Yarıklı karbon fiber yapı Şekil 3b’de görülmektedir.



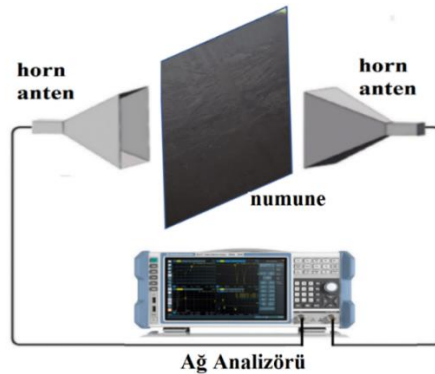
Şekil 2. Frekans Seçici Yüzeyin Simülasyon Çalışması S-Parametre Sonuçları



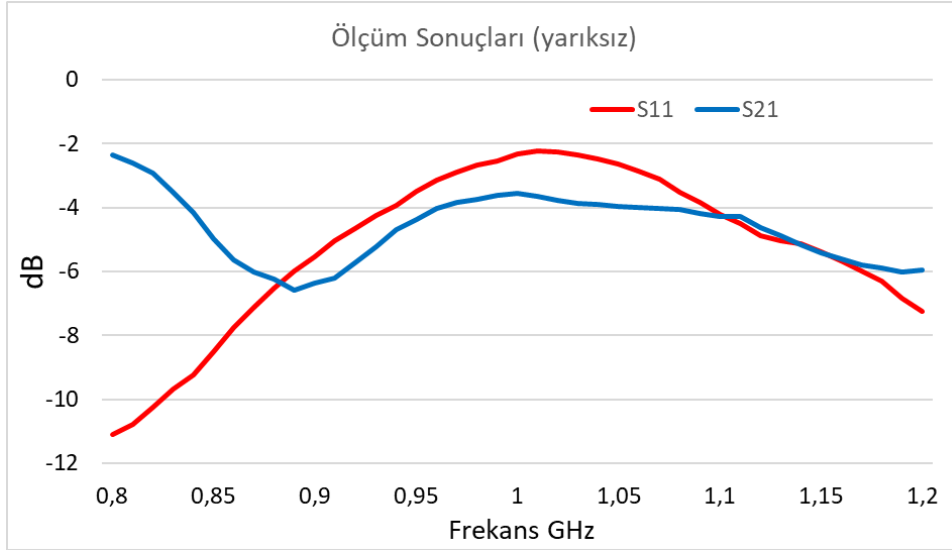
Şekil 3. a. Üretilen Düzlem Bir Karbon Fiber Plaka b. Yarıklı Karbon Fiber Plaka

Üretilen numunelerin ölçümleri 10 MHz – 43,5 GHz arasında bir çalışma frekans aralığına sahip Agilent PNA-L Vektör Ağ Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneği Şekil 4’de görülmektedir. Çalışma frekans bandı 800 MHz ile 5200 MHz arasında olan iki standart horn anten, koaksiyel kablolar aracılığıyla VNA’ya bağlanır. Güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek için iki aşamalı test gerçekleştirilmiştir; ilk aşamada, kalibrasyon yapmak amacıyla, FSS numunesi olmadan iletim ve yansıma özellikleri elde edilir, ikinci olarak, horn antenler arasında FSS numunesi yerleştirilerek iletim ve yansıma karakteristikleri ölçülür. Daha sonra, elde edilen iletim katsayısı, test düzeneğinin ve çevresel faktörlerin etkisini azaltmak için normalize edilir (Li vd., 2024).

Şekil 4’de görülen antenler arasında, uzak alan koşullarını sağlayacak şekilde, ölçülecek örnek olarak yarıksız karbon levha yerleştirildi ve  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleri elde edildi, sonuçlar Şekil 5’de görülmektedir.

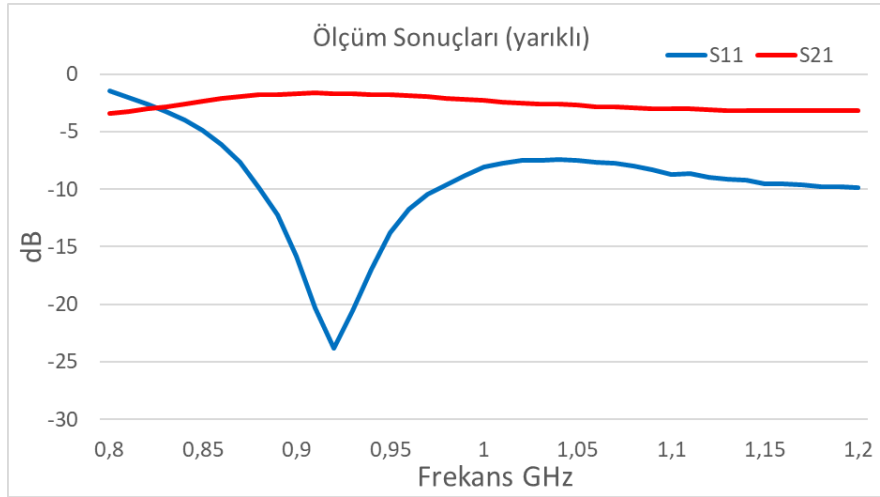


Şekil 4. Ölçüm Düzeneği



Şekil 5. Antenler Arasında Yarıksız FSS'nin Olduğu Ölçüm Sonuçları

Şekil 5 incelendiğinde, yarıksız karbon fiber yapı 850-940 MHz aralığında, 90 MHz bant genişliği ile iyi bir bant durduran filtre gibi davranmaktadır. Yapı, 900 MHz'de maksimum -6,57 dB IL ve maksimum -5,55 dB RL değerlerine sahiptir, dalganın geriye kalan kısmı ise soğurulmaktadır. Böylece, karbon gövde üzerine 868-900 MHz frekans bandında haberleşme imkanı bulunmamaktadır.

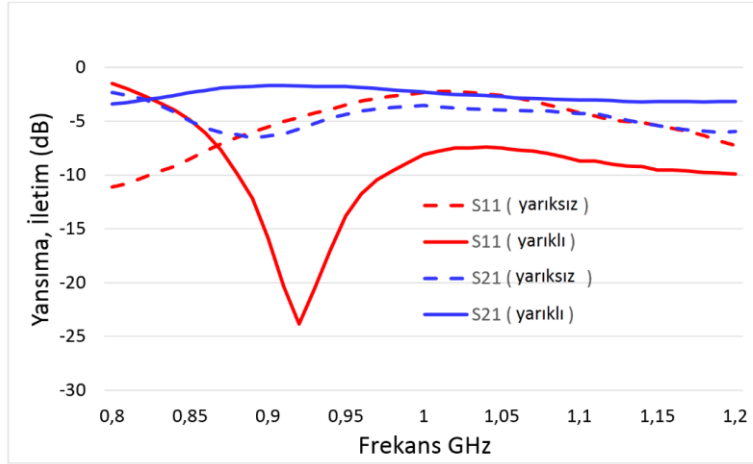


Şekil 6. Antenler Arasında Yarıklı FSS'nin Olduğu Ölçüm Sonuçları

Yarıkların etkisini değerlendirmek için, Şekil 3b'de görülen yarıklı levha, Şekil 4'te verilen düzenekte iki horn anten arasında görülen yarıksız karbon fiber levha kaldırılarak onun yerine yerleştirildi ve  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametreleri tekrar ölçüldü, ölçüm sonuçları Şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 6'da yansımaya katsayısı dikkate alındığında, 870-980 MHz aralığında ( $S_{11} < -10$  dB) 110 MHz bant genişliği ile iyi bir bant geçiren filtre gibi davrandığı görülmektedir. Yapı, 910 MHz'de maksimum -1,66 dB IL ve maksimum -23,84 dB RL değerlerine sahiptir.  $S_{11}$  tepkisi dikkate alındığında, merkez frekanstaki seçiciliğin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca, Önerilen bant geçiren filtrenin, 820 ile 1100 MHz (kesirli bant genişliğinin %31,1'i) arasında değişen -3 dB'lik bir iletim bandı sergilediği gözlemlendi (Pascarella, Brizi ve Monorchio, 2025).

Şekil 7'de karbon fiber üzerine açılan yarıkların yansımaya ve iletme katsayılarına etkisi görülmektedir. Yarıklar olmadan, 900 MHz merkez frekanslı iyi bir bant durduran filtre işlevi gören yapı, yarıklar açıldıktan sonra yaklaşık 90 MHz bant genişliğinde bant geçiren filtre gibi davranmaya başlamıştır. Yarıkların etkisiyle 900 MHz'de maksimum -6,57 dB olan IL değerinin maksimum -1,66 dB seviyesine geldiği görülmektedir. Ayrıca, 900 MHz'de maksimum -5,55 dB olan RL değerlerinin maksimum -23,84 dB'ye gerilediği anlaşılmaktadır.

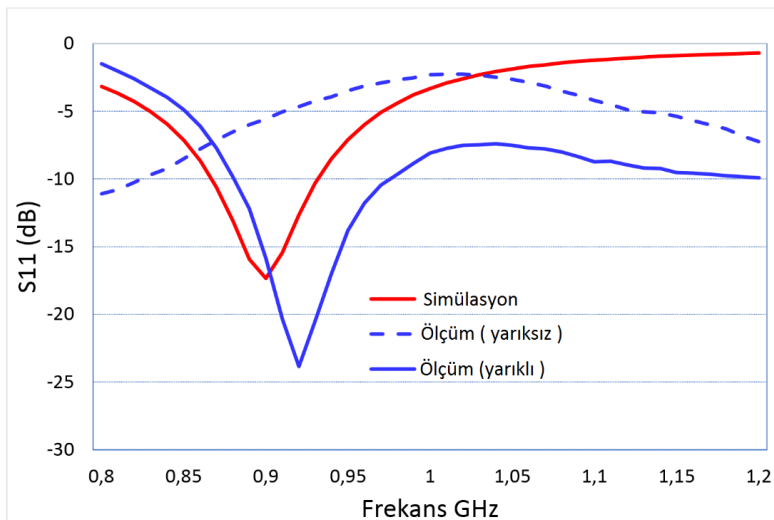


Şekil 7. Karbon Fiber Üzerine Açılan Yarıkların Yansımaya ve İletime Etkisi

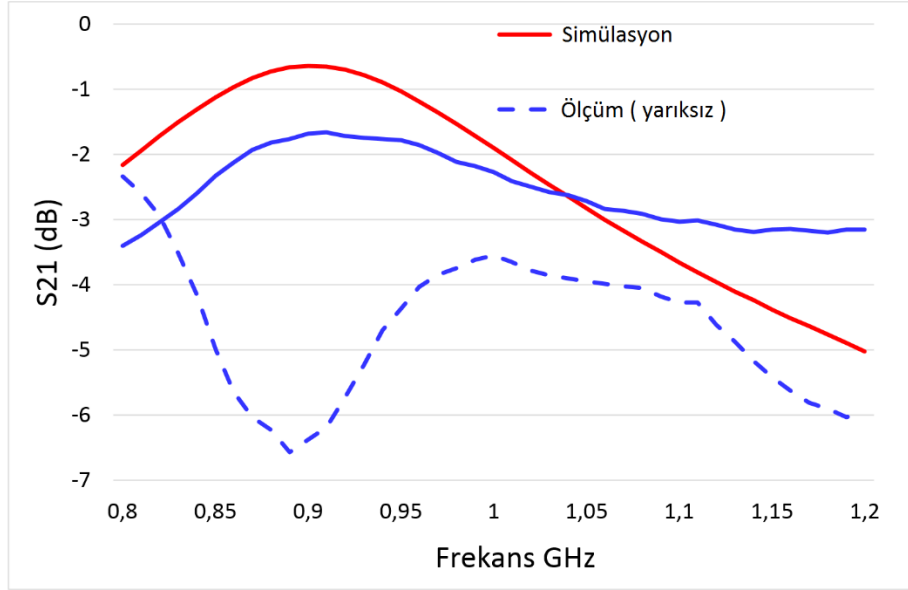
### SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde projede yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının sonuçları analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırma amacıyla aynı grafikte birlikte gösterilmiştir.  $S_{11}$  parametreleri Şekil 8'de,  $S_{21}$  parametreleri ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları yarıklı yapı için elde edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, yarıklı yapı için ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında bant genişliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarına göre bant genişlikleri sırasıyla, 75 MHz ve 110 MHz olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, simülasyon sonuçlarına göre 900 MHz'de maksimum -17,33 olan RL değeri, ölçüm sonuçlarına göre 920 MHz'de maksimum -23,84 olarak elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen merkez frekansında, Simülasyon sonuçlarına göre yukarı yönde yaklaşık olarak 20 MHz lik bir kayma görülmektedir. Bu kaymanın üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapı karbon fiber olduğundan dikdörtgen yarıklar açılırken, karbon fiber doku nedeniyle kenarlar, arzu edildiği gibi düzgün ve pürüzsüz olmamaktadır.

İletim katsayısının yarıklı yapı için elde edilen simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması Şekil 9'da görülmektedir. Yarıklı yapı için ölçüm ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Yarık yok iken 900 MHz'de iyi bir bant durduran filtre özelliği gösteren karbon fiber yapı, yarıklar oluşturulduktan sonra 900 MHz'de iyi bir bant geçiren filtreye dönüşmüştür, bu durum simülasyon sonuçları ile de desteklenmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, 900 MHz'de maksimum -0,64 dB olan IL ölçüm sonuçlarına göre -1,66 olarak elde edilmiştir.  $S_{11}$  sonuçlarının aksine,  $S_{21}$  sonuçlarında merkez frekanstaki kayma fazla belirgin değildir. Ölçülen  $S_{21}$  genliğinde belirgin bir düşüş söz konusudur. Yarıklar açılırken kenarlarda kalan pürüzler, yani üretim hataları ve ölçüm hataları ve karbon fiber levhanın kayıplı olması, simülasyon ve ölçüm sonuçlarındaki farklılığın sebepleri olarak sıralanabilir.



Şekil 8. Ölçülen ve Simüle Edilen  $S_{11}$  Parametresinin Karşılaştırılması



Şekil 9. Ölçülen ve Simüle Edilen  $S_{21}$  Parametresinin Karşılaştırılması

Tablo 1. Önerilen tasarımın literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılması

	Malzeme / Yapı	Hedef Frekans (MHz)	3 dB Bant Genişliği	Özgünlük
<b>Bu çalışma</b>	Karbon fiber levha, dikdörtgen yarıkli FSS	900 MHz (868–900 MHz)	820–1100 MHz (BW %31.1), IL = -1.66 dB, RL = -23.84 dB	CFRP gövde üzerinde deneysel bant geçiren yapı; düşük kayıp telemetri çözümü.
<b>(Arya &amp; Srikanth, 2020)</b>	Karbon fiber grid yapısı	7.0 – 13GHz	Geniş bant (-9.8 dB)	CFRP tabanlı FSS; elektromanyetik kalkanlama odaklı.
<b>(Xu, 2018)</b>	PCB tabanlı kare-yama FSS	900 / 1800 MHz	Dar bant; IL $\approx$ -2 dB, açısız kararlılık $\pm 60^\circ$	GSM900 bandında metalik yapı; ancak CFRP uygulaması yok.
<b>(Rea vd., 2005)</b>	CFRP kompozit, modifiye yüzey	500–2000 MHz	Band genişliği uygulamaya göre değişken; IL iyileşmesi %20–40	Aviyonik CFRP yapıların iletim özellikleri incelenmiş; FSS benzeri yaklaşım.
<b>(Anwar vd., 2018)</b>	PCB tabanlı çeşitli FSS türleri (derleme)	Geniş bant (0.5–30 GHz)	Genel parametre etkileri özetlenmiş	FSS performans kriterlerini (malzeme, hücre tipi, kayıplar) sınıflandıran derleme.

Literatürdeki mevcut FSS araştırmalarıyla karşılaştırıldığında alt-GHz (868–900 MHz) frekans bandında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) yüzey üzerinde deneysel olarak doğrulanmış ilk bant geçiren yapı örneklerinden

birdir. Mevcut çalışmaların çoğu metal veya PCB tabanlı FSS tasarımlarına ve daha yüksek frekans bölgelerine odaklanırken, bu çalışma hem CFRP'nin yüksek kayıplı doğasında telemetri iletişimini iyileştirmeye yönelik özgün bir çözüm önermekte hem de ölçüme dayalı IL ve RL değerleriyle somut sayısal katkı sunmaktadır. Ayrıca, önerilen yapı üretim basitliği, geniş bant genişliği (%31) ve düşük kayıplı iletim özellikleriyle literatürdeki benzer çalışmalara göre uygulama açısından daha pratik ve yenilikçi bir alternatif oluşturmaktadır.

## SONUÇ

868 – 900 MHz frekans bandında haberleşme yapan karbon fiber gövdeli İHA'larda haberleşme sorununa çözüm getirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, merkez frekansı istenen frekans aralığında olan bir bant geçiren FSS tasarlanmıştır. FSS tasarımı, karbon fiber gövde üzerine dikdörtgen yarıklar açılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımda FIT tabanlı bir simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta 900 MHz'de iyi bir bant durduran filtre özelliği gösteren karbon fiber yapının, yarıklar açıldıktan sonra 900 MHz'de iyi bir bant geçiren filtre gibi davrandığı gözlenmiştir. Ayrıca, yarıksız karbon fiber levha için 900 MHz'de maksimum -6,57 dB olan IL değeri, yarıklar açıldıktan sonra -1,66 olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, yarıksız karbon fiber levha için 900 MHz'de maksimum -4,66 dB olan RL değeri, yarıklar açıldıktan sonra -23,84 olarak ölçülmüştür.

Ölçülen sonuçlar, tam dalga simülasyonlarından elde edilen sonuçlarla iyi bir tutarlılık gösterdi ve bu da tasarım stratejisinin etkinliğini doğruladı. Önerilen bant geçiren filtre, 820 ile 1100 MHz (kesirli bant genişliğinin %31,11'i) arasında değişen -3 dB'lik bir iletim bandı sergiledi. Önerilen FSS, daha yüksek seçicilik ve daha uygun bant genişliği gereksinimleri için FSS'nin karmaşık geometrilerine ve tasarımlarına bir alternatif olarak düşünülebilir. Deneysel sonuçlar, bu yapıların gelecekteki havacılık ve uzay uygulamalarının geliştirilmesi için tatmin edici ve cesaret verici olduğunu göstermektedir.

## Teşekkür

Bu araştırmanın, KARBON FİBER GÖVDELİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA TELEMETRI HABERLEŞME SORUNUN GİDERİLMESİ başlıklı proje ile TÜBİTAK 2209a Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklendiğini kabul ederiz.

## Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

## KAYNAKLAR

Anonim (2015), International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R). Guidelines for the preparation of a national table of frequency allocations (NTFA). ITU. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-Broadcasting/Documents/Publications/Guidelines-NTFA-E.pdf>

Anonim (2017), European Telecommunications Standards Institute (ETSI). *EN 300 220-1 V3.1.1: Short range devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement*. ETSI. [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5931-introduction-to-etsi-compliance-test-at-868-mhz-srd-band-for-stm32wl33xx-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5931-introduction-to-etsi-compliance-test-at-868-mhz-srd-band-for-stm32wl33xx-mcus-stmicroelectronics.pdf)

Altıntaş, O. (2021). A bandpass frequency selective surface filter for earth observation satellite and radar applications. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 36(4), 1033-1040. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1041681>

Anwar, R. S., Mao, L., & Ning, H. (2018). Frequency selective surfaces: A review. *Applied Sciences*, 8(9), 1689. <https://doi.org/10.3390/app8091689>

Arya, A., & Srikanth, I. (2020). Design and Modelling of Carbon Fiber Grid Structure based Carbon/Epoxy Composites for Enhanced Microwave Absorbing Properties. *Advanced Materials Letters*, 11(11), 1–6. <https://doi.org/10.5185/amlett.2020.111577>

Celozzi, S., & Araneo, R. (2005). Lovat, G. *Electromagnetic shielding*. Hoboken (NJ): Wiley Online Library.

- Dahima, V., Mishra, R., & Kapoor, A. (2025, March). Dual-Band Single-Layered Frequency Selective Surface Filter for LTE Band with Angular Stability. *In Telecom*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.3390/telecom6010018>
- De Sabata, A., Matekovits, L., Buta, A., Dassano, G., & Silaghi, A. (2022). Frequency selective surface for ultra-wide band filtering and shielding. *Sensors*, 22(5), 1896. <https://doi.org/10.3390/s22051896>
- Ghosh, J., Dutta, R., Sarkhel, A., & Abbasi, Q. H. (2022). Design of miniaturize flexible wideband frequency selective surface for electromagnetic shielding application. *Waves in Random and Complex Media*, 35(6), 11249–11269. <https://doi.org/10.1080/17455030.2022.2121442>
- Ghosh, S., & Srivastava, K. V. (2017). Broadband polarization-insensitive tunable frequency selective surface for wideband shielding. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60(1), 166–172. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2706359>
- Jose, K. A., Sha, Y., Varadan, V. K., & Neo, C. P. (2002, June). FSS embedded microwave absorber with carbon fiber composite. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313) (Vol. 2, pp. 576-579)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/APS.2002.1016150>
- Kapoor, A., Mishra, R., & Kumar, P. (2021). Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4263–4293. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.046>
- Kim, J., Jang, H., Oh, J., & Park, J. (2022). A rational design procedure for absorbers of Square-Loop-Shaped resistive frequency selective surface placed on Glass/Epoxy laminate. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 65(1), 104–113. <https://doi.org/10.1109/temc.2022.3219378>
- Kumar, C., Pasha, M. I., & Guha, D. (2016). Defected ground structure integrated microstrip array antenna for improved radiation properties. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 310–312. <https://doi.org/10.1109/lawp.2016.2574638>
- Li, Z., Weng, X., Yi, X., Li, K., Duan, W., & Bi, M. (2024). A broadband second-order bandpass frequency selective surface for microwave and millimeter wave application. *Scientific Reports*, 14(1), 12040. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62228-3>
- Lin, B. Q., Huang, W. Z., Guo, J. X., Liu, Z., Wang, Y. W., & Ye, H. J. (2023). A band-pass frequency selective surface with polarization rotation. *Chinese Physics B*, 32(2), 024204. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac6496>
- Lundgren, J., Zetterstrom, O., Mesa, F., Fonseca, N. J. G., & Quevedo-Teruel, O. (2021). Fully Metallic Dual-Band Linear-to-Circular polarizer for K/KA-band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(11), 2191–2195. <https://doi.org/10.1109/lawp.2021.3081655>
- Mehdipour, A., Sebak, A., Trueman, C. W., Rosca, I. D., & Hoa, S. V. (2011). Performance of microstrip patch antenna on a reinforced carbon fiber composite ground plane. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(6), 1328–1331. <https://doi.org/10.1002/mop.25976>
- Mehdipour, A., Sebak, A. R., Trueman, C. W., Rosca, I. D., & Hoa, S. V. (2012). Conductive carbon fiber composite materials for antenna and microwave applications. In *2012 29th National Radio Science Conference (NRSC) (pp. 1-8)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/NRSC.2012.6208499>
- Mitra, R., Chan, C., & Cwik, T. (1988). Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review. *Proceedings of the IEEE*, 76(12), 1593–1615. <https://doi.org/10.1109/5.16352>
- Munk, B. A. (2003). *Finite Antenna Arrays and FSS*. John Wiley & Sons, NJ, USA.
- Munk, B. A. (2005). *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, NJ, USA.
- Neo, C. P., & Varadan, V. K. (2001). Design and development of electromagnetic absorbers with carbon fiber composites and matching dielectric layers. *Smart Materials and Structures*, 10(5), 1107–1110. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/5/403>
- Omar, A. A., Huang, H., & Shen, Z. (2019). Absorptive frequency-selective reflection/transmission structures: A review and future perspectives. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 62(4), 62–74. <https://doi.org/10.1109/MAP.2019.2943302>
- Pascarella, F., Brizi, D., & Monorchio, A. (2025). An Ultrathin Wideband Angularly Stable Frequency Selective Surface Bandpass Filter for SC Band Coverage. *Applied Sciences*, 15(9), 4887. <https://doi.org/10.3390/app15094887>

- Rea, S., Linton, D., Orr, E., & McConnell, J. (2005). Electromagnetic shielding properties of carbon fibre composites in avionic systems. *Mikrotalasna revija*, 11(1), 29-32.
- Sha, Y., Jose, K. A., Neo, C. P., & Varadan, V. K. (2002). Experimental investigations of microwave absorber with FSS embedded in carbon fiber composite. *Microwave and optical technology letters*, 32(4), 245-249. <https://doi.org/10.1002/mop.10144>
- Sousa, M. E. T., Da Silva, B. S., De Andrade, H. D., & Silva, M. W. B. (2023). A Complementary Frequency Selective Surface with Tri-Band Frequency Response for Applications in Wi-Fi and 5G. *Journal of Communication and Information Systems*, 38, 189–197. <https://doi.org/10.14209/jcis.2023.21>
- Tariq, M. H., & Zahid, M. N. (2023). Design and Performance Analysis of Band Pass Filter Using Frequency Selective Surface for 5G Communication, *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, vol. 23, 16, 15-22. <https://doi.org/10.46604/peti.2022.9313>
- Tellakula, R. A., Sha, Y., Vinoy, K. J., Jose, K. A., Varadan, V. K., Shami, T. C., . . . Neo, C. P. (2003). Carbon nanotubes, fillers, and FSS as potential EM absorbers. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 5055, 356. <https://doi.org/10.1117/12.497456>
- Unal, E., Gokcen, A., & Kutlu, Y. (2006). Effective electromagnetic shielding. *IEEE Microwave magazine*, 7(4), 48-54. <https://doi.org/10.1109/MMW.2006.1663989>
- Varikuntla, K. K., & Singaravelu, R. (2019). Design of SIW cavity models to control the bandwidth of frequency selective surface. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 13(14), 2515–2524. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0377>
- Wu, T.K. (1995). *Frequency selective surfaces and grid array* John Wiley & Sons, NJ, USA.
- Xu, X. (2018). A compact angularly-stable frequency selective surface for GSM 900/1800-MHz shielding using cascaded 2.5-dimension structure. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(6), e21682. <https://doi.org/10.1002/mmce.21682>
- Yong, W. Y., Rahim, S. K. A., Himdi, M., Seman, F. C., Suong, D. L., Ramli, M. R., & Elmobarak, H. A. (2018). Flexible convoluted ring shaped FSS for X-Band screening application. *IEEE Access*, 6, 11657–11665. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2804091>
- Yong, W. Y., & Glazunov, A. A. (2023). Miniaturization of a fully metallic bandpass frequency selective surface for Millimeter-Wave Band applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 65(4), 1072–1080. <https://doi.org/10.1109/temc.2023.3283352>
- Zhu, J., Wang, Q., & Jin, M. (2024). High-Order Wideband Band-Pass Miniaturized Frequency-Selective Surface with Enhanced Equivalent Inductance. *Electronics*, 13(5), 925. <https://doi.org/10.3390/electronics13050925>
- Zhu, H., Yu, Y., Li, X., & Ai, B. (2014). A Wideband And High Gain Dual-Polarized Antenna Design By A Frequency-Selective Surface For WLAN Application. *Progress in Electromagnetics Research C*, 54, 57–66. <https://doi.org/10.2528/pierc14072801>