

## Dar/Ultra-geniş geçme bantlarına sahip iki bantlı bant geçiren filtre tasarımı

### Design of two-band bandpass filter having narrow/ultra-wide passbands

Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hava Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
pinar.ozturk@msu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.11.2023  
Kabul Tarihi/Accepted: 18.04.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 10.02.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.04578  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu kullanılarak dar/ultra-geniş bantlara sahip iki bantlı bant geçiren filtre tasarımı sunulmaktadır. Dar/Ultra-geniş bant genişliklerine sahip iki bant karakteristiği geleneksel dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları ile benzer alan dağılımına sahip yarı-mod rezonatörler üzerine kazınan açıklık boyutlarının ayarlanmasıyla elde edilmektedir. Önerilen rezonatörlerin bir iletim hattı aracılığıyla birbirine kaskat olarak bağlanması ile her bir bantta yer alan iletim kutuplarının sayısı iki katına çıkarılmaktadır. Sonuç olarak kompakt boyutlu bir yüzey alanına sahip, iletim bandı içerisinde oldukça düşük kayıplı ve seçiciliği yüksek bir filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen tasarım prosedürünün geçerliliği, tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları ile üretilen iki bantlı bant geçiren filtre devresi aracılığıyla yapılan deneysel çalışmada doğrulanmıştır. Deneysel çalışmada yaklaşık olarak 4.4 GHz ve 7.2 GHz merkez frekanslarına sahip birinci ve ikinci geçme bantlarının kısmi bant genişlikleri sırasıyla %12.6 ve %60.3 olarak ölçülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör, İki-Bantlı bant geçiren filtre, Dar/Ultra-geniş band, Yarı-Mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu.

#### Abstract

In this paper, a design procedure of a two-band bandpass filter having narrow/ultra-wide bands based on a half-mode substrate integrated waveguide with a complementary split ring resonator is presented. The two-band characteristic with narrow/ultra-wide bandwidth is achieved by adjusting the split aperture dimensions etched on half-mode resonators with similar field distribution as conventional substrate-integrated waveguides. The proposed resonators are consecutively connected by a transmission line to double the number of transmission poles in each passband. Finally, a filter design having a compact surface area, high selectivity, and low loss in each passband has been provided. The validation of the proposed design procedure has been verified in the experimental study of a two-band filter fabricated using a complementary split ring resonator constructed on half-mode substrate-integrated waveguide structures. In the experimental study, the fractional bandwidth of the first and the second passbands with a center frequency of approximately 4.4 GHz and 7.2 GHz has been measured to be %12.6 and %60.3, respectively.

**Keywords:** Complementary split ring resonator, Two-Band bandpass filter, Narrow/Ultra-wide band, Half-Mode substrate integrated waveguide.

## 1 Giriş

Modern kablosuz iletişim sistemlerinde yaşanan gelişmeler iletişim sistemlerinde önemli bir rol oynayan ve performansıyla tüm sistemin kalitesini doğrudan etkileyen filtre tasarımı ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Çok fonksiyonlu iletişim sistemlerinde tek bir geçme bandına sahip mikrodalga/RF bileşenlerin kullanıcıların istek ve ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalması, bant genişliği ve çalışma frekansı açısından farklı gereksinimlere sahip çok sayıda bantı destekleyebilen tasarım gerekliliklerini de beraberinde getirmiştir. Bu nedenle çok fonksiyonlu yeteneklere sahip çok bantlı RF mikrodalga filtre tasarımı güncel araştırma konuları arasında yer almakta ve bu alanda alternatif yöntemler kullanılarak çeşitli tasarımlar gerçekleştirilmektedir [1]-[4]. Bu çalışmalar arasından düşük kayıplar ve yüksek kalite faktörü gibi önemli avantajlara sahip olan dalga kılavuzlarını düzlemsel bir biçime taşıyarak diğer sistem bileşenleri ile kolay entegre edilebilir bir forma dönüştürmüş olması nedeniyle dielektrik-tabanda birleştirilmiş dikdörtgen dalga kılavuzu yapıları ile gerçekleştirilen çok bantlı RF/mikrodalga filtre tasarımları son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Tüm bu avantajlara rağmen

benzer frekans aralıklarında çalışan mikroserit devreler gibi alternatif yapılara göre daha büyük boyutlara sahip olduğundan bu alanda minyatürizasyon çalışmaları da oldukça önem kazanmaktadır. Boyut indirgeme için kullanılacak pek çok yaklaşım mevcuttur [5]-[8] ve bunlardan bir tanesi de yarı-mod dielektrik-tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzlarının kullanılmasıdır. Böylece toplam boyutunun yaklaşık olarak yarıya yarıya azalması sağlanabilmektedir. Ek olarak bu yapılar üzerine kazınacak tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör yapıları ile daha minyatür boyutlarda, geniş bant genişliğine, çoklu fonksiyonlara ve yüksek performansa sahip bant geçiren filtreler elde edilebilmesi bu devreleri RF/Mikrodalga mühendisliğinde ilgi odağı haline getirmiştir.

Bu çalışmada, biri dar diğeri ultra-geniş bant olmak üzere iki geçme bandının uygulanmasına ve filtre boyutları üzerinde önemli bir minyatürleştirmeye olanak sağlayan tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör ile yüklenmiş yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzuna dayalı yeni bir iki bantlı filtre tasarımı sunulmaktadır. Yaklaşık olarak yarıya azaltılmış yüzeyde, dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu ile aynı alan dağılımı karakteristiğine sahip olması nedeniyle yarı-mod devrelerin kullanımı devrenin oldukça kompakt boyutlara

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

ulaşmasına olanak sağlamıştır. Ek olarak, yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapısı üzerine kazınan halka rezonatör aracılığıyla geniş bir geçme bandı elde edilebilmektedir. Ayrıca, önerilen devre boyutunu daha da azaltabilmek amacıyla tek bir rezonatörle geçme bantları içerisinde çoklu rezonans modları üretilebilmekte ve böylece daha yüksek seçiciliğe sahip bantlar oluşturulabilmektedir. Önerilen iki bantlı devre gürültü bant genişliğini azaltmak ve böylece daha iyi bir hassasiyet elde edebilmek için kullanılan dar geçme bandı ile daha yüksek veri hızlarının aktarılması gereken uygulamalar için kullanılan ultra-geniş geçme bandı opsiyonlarını bir arada sunabilme özelliğiyle öne çıkmaktadır.

## 2 Tasarım ve analiz

Dar/ultra-geniş iki geçme bandına sahip olacak şekilde tasarlanan bant geçiren filtre Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatör (TBHR) ve Yarı-mod Dielektrik-tabanda Birleştirilmiş Dalga-kılavuzlarına (YDBD) dayalı bir konfigürasyon kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle tasarım adımları öncelikle hedeflenen gereksinim ve spesifikasyonlara bağlı olarak TBHR ve YDBD yapılarının geometrik olarak düzenlenmesini ve boyut seçimlerini içermektedir.

### 2.1 Yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu

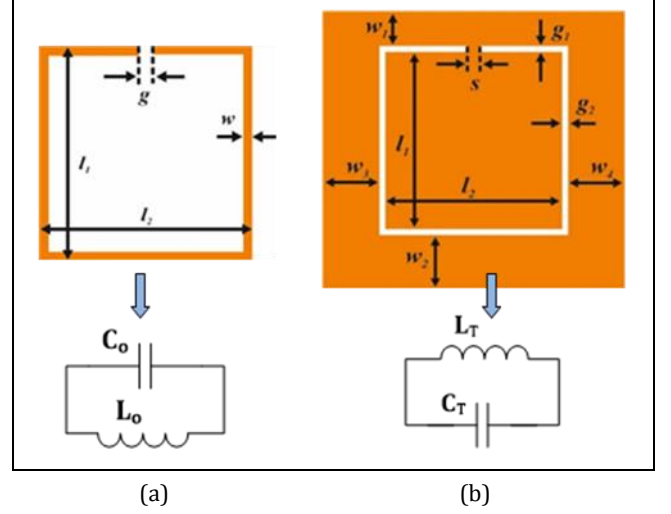
Dielektrik-tabanda Birleştirilmiş Dalga kılavuzları (DBD), bir tür dalga kılavuzu yapısı olarak, düşük kayıp, kolay entegrasyon ve yüksek kalite faktörü (Q) özelliklerine sahip olması nedeniyle mikrodalga ve milimetrik dalga uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Literatürden de iyi bilindiği üzere DBD'ler hayali bir manyetik duvar aracılığıyla ikiye bölündüğünde ana yapıdaki alan dağılımı herhangi bir değişim olmaksızın korunarak her bir yarı devre yarı-mod dielektrik-tabanda birleştirilmiş dalga-kılavuzu haline gelmektedir [9],[10]. Bu nedenle geleneksel DBD'ler ile karşılaştırıldığında benzer karakteristik özelliklere sahip olmanın yanında yarı boyutlarda gerçekleştirilebiliyor olması nedeniyle oldukça büyük devre boyutlarının önemli ölçüde minyatürleştirilmesini de sağlamaktadır. Yarı-mod DBD'lerin prensipleri ve tasarım konsepti ilk olarak [9]'da tanıtılmış iken yarı-mod DBD'lerin içindeki ve dışındaki alan dağılımının belirlenmesi, faz sabitinin hesaplanması ve zayıflamanın karakterizasyonu ile ilgili incelemeler ise [11]'de teorik ve deneysel çalışmalar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

### 2.2 Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu

YDBD'ler belirtilen avantajları nedeniyle mikrodalga bileşen tasarımları için oldukça yaygın kullanılmakla birlikte dalga kılavuzu yüzeyine açık halka rezonatörlerin kazınmasıyla elde edilebilecek özellikler bu yapıların daha da öne çıkmasını sağlamaktadır [12]-[14]. Bu bölümde öncelikle Açık Halka Rezonatör (AHR) ve tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör konfigürasyonları sunulmakta, ardından Tamamlayıcı Bölünmüş Halka Rezonatörlü Yarı-mod Dielektrik tabanda Birleştirilmiş Dalga kılavuzu (YDBD-TBHR) birim hücresi tasarımı ile ilgili iletim davranışı ve tasarım parametrelerinin bu davranış üzerine etkileri araştırılmaktadır.

Şekil 1'de geleneksel açık halka rezonatör ve dualite teoremine dayalı olarak bu rezonatörlerden türetilmiş tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör yapısı ve eşdeğer devre modelleri gösterilmektedir. Literatürden de bilindiği üzere [15], düzlemsel bir yapının tümleyeni orijinal yapının iletken

kısımlarının açıklıklarla ve açıklıkların da iletken plakalarla değiştirilmesiyle elde edilebilmektedir.



Şekil 1(a): Açık halka rezonatör. (b): Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör konfigürasyonları ve eşdeğer devre modelleri.

Figure 1. Configuration and equivalent circuit of (a): The open loop resonator. (b): The complementary split ring resonator.

Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör yapıları genellikle hizalama ve simetri sağlanabilmesi gibi amaçlar nedeniyle kare olacak şekilde seçilmektedir. Şekil 1'de sırasıyla geleneksel ve tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörler için tasarım konfigürasyonunu belirleyecek olan temel devre parametreleri ve toplu elemanlar ile oluşturulan eşdeğer devre modelleri verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere eşdeğer devre modelleri paralel LC rezonans devreleri ile temsil edilmektedir. Şekil 1(a)'da gösterilmekte olan eşdeğer devre modelinde  $C_o$  geleneksel açık halka rezonatörün açık devre sonlandırılmış uçları arasındaki kapasite etkisini temsil etmektedir ve literatürde mevcut süresizlik formülü ile hesaplanabilmektedir [16].  $L_o$  iletken halkanın eşdeğer indüktans değeri olup iletim hattı prensibine göre toplu parametrelili devre elemanları için verilen analitik model yaklaşımı kullanılarak belirlenebilmektedir [17]. Şekil 1(b)'de gösterildiği üzere mikroşerit bir AHR'nin iletken şeridinin hemen altındaki düzlemde bulunan iletken halkaların aşındırılıp, açıklıkların da iletken şeritler ile doldurularak TBHR'nin elde edilmesi durumunda eşdeğer devre modeli dualite teoremine dayalı olarak düzenlenir. Eşdeğer devre modelinde  $L_o$  indüktansı, etrafı iletken düzlem ile çevrilmiş kare açıklığın kapasitansı  $C_T$  ile benzer şekilde AHR modelinde  $C_o$  kapasitesi aralıkları birbirine bağlayan indüktif hat parçasının  $L_T$  indüktansı ile değiştirilir. Bu parametrelerin birbiriyle ilişkisi Denklem (1) ve Denklem (2)'de verilmektedir [18].

$$C_T = 4(\epsilon_0/\mu_0)L_o \quad (1)$$

$$L_T = (\mu_0/4\epsilon_0)C_o \quad (2)$$

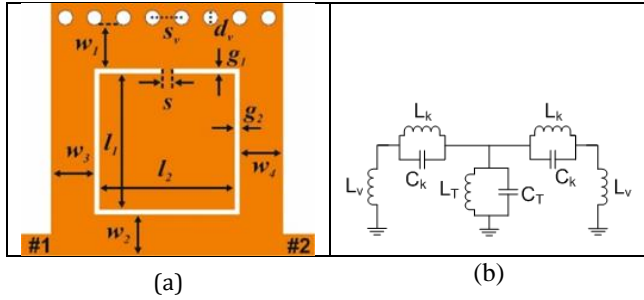
LC parametrelerinin belirlenmesiyle ilgili rezonatörlerin rezonans frekansları

$$f_{0,AHR} = 1/2\pi\sqrt{L_o C_o} \quad (3)$$

$$f_{0,T AHR} = 1/2\pi\sqrt{L_T C_T} \quad (4)$$

aracılığıyla hesaplanmaktadır. Dualite teoreminden beklendiği üzere Denklem (3) ve Denklem (4)'te ilgili LC değerlerinin yerine koyulması durumunda her iki rezonatör (AHR ve TBHR) için rezonans frekansının aynı olduğu açıkça görülmektedir.

Önerilen tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapısının çalışma prensibini açıklamak amacıyla kullanılan birim hücre konfigürasyonu ve eşdeğer devre modeli sırasıyla Şekil 2(a) ve 2(b)'de gösterilmektedir. Şekil 2(a)'da verilen konfigürasyondan da görüleceği üzere yarı-mod dalga kılavuzunun elektrik yan duvarını oluşturmak için metal geçiş yollarının periyodik aralıklarla doğrusal olarak sıralandığı bir dizi kullanılmakta ve açık halka rezonatör yarı-mod dalga kılavuzunun üst iletken tabakası üzerine kazanılmaktadır. Literatürden bilindiği üzere [19], yarı-mod dalga kılavuzunun elektrik yan duvarını oluşturmak için periyodik aralıklarla yerleştirilen metal geçiş yollarıyla kısa devre edilen bölümler iletim hattının bir parçasından sonra indüktif bir etki göstermekte ve eşdeğer devre modellerinde  $L_V$  indüktansı ile temsil edilmektedir. Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör, Şekil 1(b)'de bahsedildiği üzere paralel bağlı kapasitör ve indüktörden oluşan rezonans devresiyle modellenmektedir. Ayrıca, modelde elektrik duvar ile tamamlayıcı bölünmüş halka arasında oluşacak kuplajı temsilen  $L_k$  indüktansı ve  $C_k$  kapasitansı ile temsil edilen paralel rezonans devreleri kullanılmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 2. Önerilen birim hücre. (a): Yapısı. (b): Eşdeğer devre modeli.

Figure 2(a): Layout. (b): Equivalent circuit of the proposed unit cell.

### 2.3 Tasarım parametrelerinin frekans cevabına etkisi

Bu bölümde uygun tasarım konfigürasyonunu belirlemek için iletim özelliklerinde değişime yol açan iki birim hücre incelenmekte ve detaylandırılmaktadır. Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerin yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları üzerine uygulanmasıyla elde edilen birim hücre yerleşimi ile ilgili iki farklı konfigürasyon oluşan kare halka açıklığın birbirini gördüğü uçların yönüne bağlı olarak (üst bölge için YDBD-TBHR#1 ve alt bölge için YDBD-TBHR#2) elde edilebilmektedir. Şekil 2(a)'da verilen temel boyutlandırma parametreleri, Tablo 1'de verilen değerlerde kullanılarak YDBD-TBHR#1 ve YDBD-TBHR#2 devreleri bağlı dielektrik katsayısı 3.55 ve yüksekliği 0.813 mm olan Rogers RO4003C taban üzerinde tasarlanmıştır. Tablo 1'de verilen boyutlardan da anlaşılacağı üzere iki konfigürasyon arasındaki tek fark açık uçların birbirini gördüğü bağlantı noktasının üst ya da alt bölgede yer almasıdır. Buna göre tasarlanan devrelerin ilgili rezonans frekanslarındaki alan dağılımları Şekil 3(a) ve 3(b)'de gösterilmektedir.

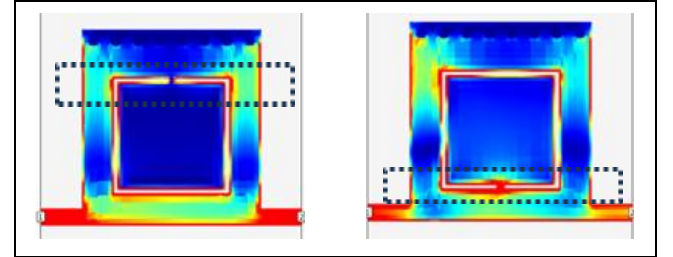
Tablo 1'de yer alan boyutlar ile oluşturulan iki farklı konfigürasyona bağlı olarak iletim ve yansıma sıfırlarının değişimi Şekil 3(c)'den gözlemlenmektedir. Frekans cevaplarından da görüleceği üzere açık uçların üst bölgede yer alması durumunda geniş bir geçme bandı içerisinde çift iletim kutbu ve üst bantta iki iletim sıfırı yer alırken, açık uçların alt bölgeye taşınmasıyla birer iletim kutbu ve iletim sıfırı ile oluşan iki ayrı geçme bandı ortaya çıkmaktadır. Bu durumda geçme bandının karakteristiğini ve bant genişliğini tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör yerleşimine bağlı olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Şekil 3(c)'de verilen iletim özellikleri incelendiğinde çalışmanın hedefleri arasında yer alan ultra geniş geçme bandının elde edilebilmesi için tasarım prosedürünün YDBD-TBHR#1 konfigürasyonu ile sürdürülmesinin uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 1. YDBD-TBHR#1 ve YDBD-TBHR#2 için boyutlandırma

Table 1. Dimensions of YDBD-TBHR#1 and YDBD-TBHR#2.

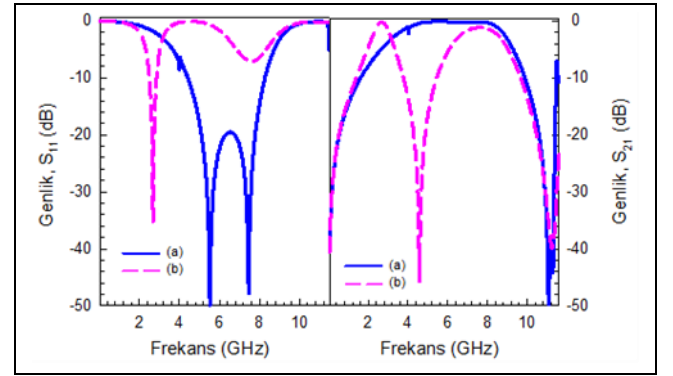
Parametreler	YDBD-TBHR#1	YDBD-TBHR#2
$l_1 = l_2$	5.8	5.8
$g_1 = g_2$	0.2	0.2
$w_1$	1.7	1.7
$w_2$	1.7	1.7
$w_3 = w_4$	1.7	1.7
$s$	0.4	0.4
$d_v$	0.6	0.6
$s_v$	1.2	1.2

(Tüm birimler mm cinsinden alınmaktadır.)



(a)

(b)



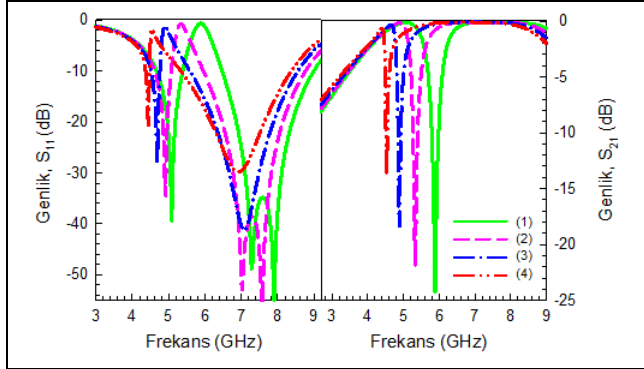
(c)

Şekil 3(a): YDBD-TBHR#1. (b): YDBD-TBHR#2 için ilgili rezonans frekansındaki alan dağılımları. (c): Frekans cevaplarının karşılaştırılması.

Figure 3. Field distributions at the relevant resonance frequency for (a): YDBD-TBHR#1. (b): YDBD-TBHR#2. (c): comparison of frequency responses.

Önerilen birim hücreler için geçme bandının bant genişliği aynı zamanda tamamlayıcı bölünmüş halka boyutunun değiştirilmesiyle de ayarlanabilmektedir. Şekil 4, YDBD-TBHR#1 için kullanılan konfigürasyonda tamamlayıcı

bölünmüş halka boyutunun farklı değerleri için tam dalga elektromanyetik simülasyonlardan elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 4. Farklı tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör uzunluklarının frekans cevabına etkisi.

Figure 4. Effect of different complementary split ring resonator lengths on frequency response.

Tamamlayıcı bölünmüş halka boyutunun değiştirilebilmesi için türlü alternatifler mevcut olmakla birlikte bu çalışmada Tablo 2'den de görüleceği üzere  $g_1$  ve  $g_2$  açıklıkları ile  $w_2$  genişliği belirli bir değerde sabit tutulup  $w_1$ ,  $w_3$  ve  $w_4$  parametrelerinin değiştirilmesiyle elde edilen  $l_1$  ve  $l_2$  uzunlukları için inceleme yapılmıştır. Bu durumda öncelikle tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörün toplam elektriksel boyutunun artırılmasından dolayı daha yüksek bir indüktif ve kapasitif etki oluştuğundan Denklem 4'te verilen eşitlikten de görüleceği üzere rezonans frekansı daha düşük frekanslarda yer alacak şekilde değişmektedir. Ayrıca tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör boşluğunun artırılmasıyla eşdeğer devre modelinde toplam elektriksel uzunluğunun artışına bağlı olarak  $L_k$  indüktans değeri, genişlik sabit tutulduğundan dolayı  $C_k$  kapasitesine oranla daha baskın olarak artacağından oluşan geçme bandından daha düşük frekanslarda bir iletim sıfırı ile birlikte bir yansıma sıfırının oluştuğu gözlemlenmektedir.

Tablo 2. YDBD-TBHR#1 için belirlenen farklı tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör boyutları (Tüm birimler mm cinsinden alınmaktadır.)

Table 2. Different complementary split ring resonator dimensions determined for YDBD-TBHR#1 (All units are in mm.)

Parametre	Boyut (Şekil 3(a))	Boyut (1)	Boyut (2)	Boyut (3)	Boyut (4)
$l_1 = l_2$	5.8	3.8	4.2	4.6	5.0
$g_1 = g_2$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$w_1$	1.7	3.8	3.4	3.0	2.6
$w_2$	1.7	1.2	1.2	1.2	1.2
$w_3 = w_4$	1.7	2.7	2.5	2.3	2.1
$s$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$d_v$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$s_v$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

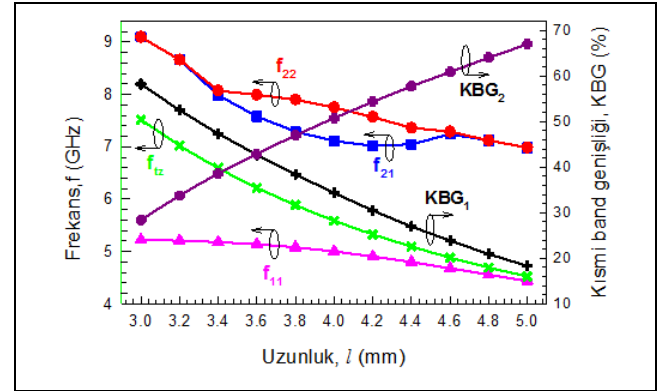
Şekil 5, YDBD-TBHR#1 için önerilen birim hücrede açıklık boyutunun değişimine bağlı olarak her bir geçme bandı içerisindeki iletim kutuplarının, iki geçme bandı arasında yer alan iletim sıfırının ve her bir geçme bandının kısmi bant genişliğinin değişimini göstermektedir. Karşılıklı ve simetrik devre özelliğinin korunması için birim hücre  $l_1 = l_2$ ,  $w_3 = w_4$ , ve  $g_1 = g_2$  olacak şekilde tasarlanmıştır. Önerilen konfigürasyonda diğer parametreler Tablo 2'den de görüleceği üzere  $g_1 = g_2 = 0.2$  mm,  $w_2 = 1.2$  mm,  $s = 0.4$  mm,  $s_v = 1.2$  mm,  $d_v = 0.6$  mm olarak alınmıştır. Şekil 5'te  $f_{11}$  ilk

geçme bandı içerisinde yer alan tek iletim kutbunu (ilk geçme bandı içerisinde yer alan tek mod frekansı),  $f_{21}$  ve  $f_{22}$  ikinci geçme bandı içerisinde yer alan ilk ve ikinci iletim kutuplarını (ikinci geçme bandı içerisinde yer alan iki mod frekansı),  $f_{1z}$  iki geçme bandı arasında yer alan iletim sıfırını,  $KBG_1$  ve  $KBG_2$  ise sırasıyla ilk ve ikinci geçme bantlarının kısmi bant genişliklerini temsil etmektedir. Burada  $l_1 = l_2 = l$  uzunluğunun 3.0 mm dolaylarında olması durumunda ilk bantın oluşmaya başladığına ve  $l$  uzunluğu arttıkça, bant genişliğinin ilk bant için azalırken ikinci bant için arttığına ve bu sırada iki bant arasında yer alan iletim sıfırının da ilk bantın yer aldığı frekans bölgesine doğru kaydığına dikkat edilmelidir. Bir başka önemli nokta da bant içerisindeki geri dönüş kaybı seviyelerinin iletim kutuplarının yerleşimine bağlı olarak değişmesidir.

Temel tasarım parametrelerinden biri olan harici kalite faktörü kısmi bant genişliğine bağlı olarak iki kapılı bir devre için

$$Q_e = 2f_0 / \Delta f_{3dB} = 2 / KBG \quad (5)$$

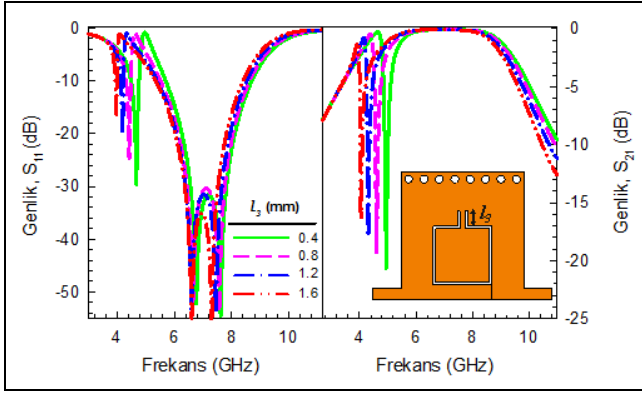
aracılığıyla hesaplanabilmektedir [16]. Burada,  $f_0$  merkez frekansı,  $\Delta f_{3dB}$  ise geçme bandının 3 dB bant genişliğini temsil etmektedir. Böylece filtreye uygun geometrik parametrelerin belirlenebilmesi için parametreler ile filtrenin fiziksel yapıları arasındaki ilişkinin elde edilebilmesi için Şekil 5'te verilen kısmi bant genişliği grafiği ile değerlendirme yapabilmek mümkün hale gelmektedir. Tasarımı kolaylaştırmak için kısmi bant genişliği veya harici kalite faktörünün birim hücrenin fiziksel boyutlarına karşı tasarım eğrilerinin oluşturulmasının ardından oluşturulacak filtrenin tamamını optimize etmek için çoğunlukla ince ayar prosedürü kullanılmaktadır.



Şekil 5. Farklı tamamlayıcı açık halka boyutu için her bir geçme bandı karakteristiğinin değişimi.

Figure 5. Variation of each passband characteristics for different complementary split ring resonator values.

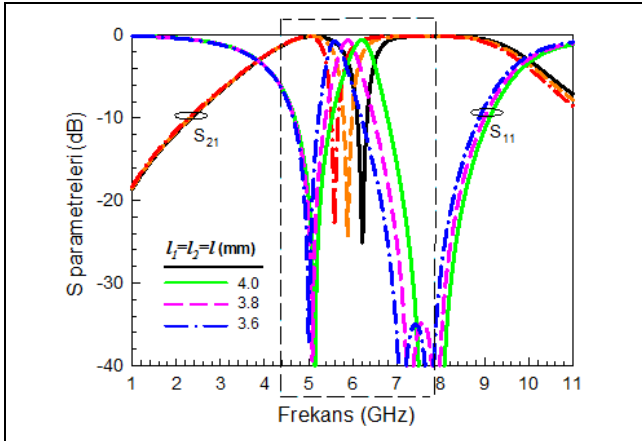
Şekil 5'te verilen grafikten tamamlayıcı bölünmüş halka boyutunun değişiminin her iki geçme bandını da aynı anda etkilediği ve hızlı bir değişim oluştuğu görülmektedir. Daha hassas bir değişim elde edebilmek amacıyla kullanılacak yöntemlerden bir tanesi tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör ile elde edilen açıklığın farklı konfigürasyonlarının Şekil 6'da gösterildiği gibi düzenlenmesidir. Bu durumda yarı-mod devre üzerinde metal geçiş yollarının bulunduğu bölgeye doğru eklenecek ekstra açıklıklarla toplam elektriksel boyut açısından daha küçük değişimler oluştuğu, ayrıca eşdeğer devre modeli üzerinden incelendiğinde de bu ince açıklıkların oluşturacağı harici indüktif ve kapasitif etki nedeniyle frekans cevabında her bir geçme bandında daha hassas ayarlamaların yapılabileceği açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 6. Farklı  $l_3$  değerlerinin frekans cevabına etkisi.

Figure 6. Effect of different  $l_3$  values on frequency responses.

Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör boyutlarının değişimi sonucunda elde edilen frekans cevaplarının gösterildiği Şekil 4 ve Şekil 6 bir başka bakış açısıyla değerlendirildiğinde ultra-geniş bir geçme bandı içinde yer alan bir durdurma bandının olduğu görülmektedir. Şekil 7'de gösterildiği üzere, açıklık boyutlarının artırılması/azaltılmasıyla durdurma bandının merkez frekansı ve bant genişliği değiştirilebilmektedir. Bu özellik birbirine oldukça yakın konumlandırılmış iki geçme bandı arasında iyi bir seçicilik sağlanabilmesi ve bu bantların kontrolü açısından da önem arz etmektedir.



Şekil 7. Geniş geçme bandı içerisinde yer alan durdurma bandı merkez frekansının tümleyen açık halka rezonatör boyutuna bağlı değişimi.

Figure 7. Center frequency variation of the stopband within the ultra-wideband depending on the complementary split ring resonator dimensions.

### 3 Dar/ultra-geniş iki geçme bandına sahip bant geçiren filtre tasarımı

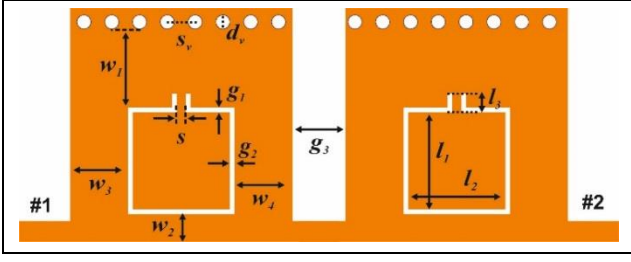
Bu bölümde tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlerin yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları üzerine uygulanmasıyla elde edilen iki özdeş birim hücreyi içeren dar/ultra-geniş iki geçme bandına sahip bir filtre tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Tasarım adımları aşağıda verilen maddeler halinde özetlenmektedir:

- Adım-1: Her bir geçme bandı için merkez frekansı, bant genişliği, seçicilik, geri dönüş kaybı veya ekleme kaybı seviyesi vb. gibi özelliklerin belirlenmesi,

- Adım-2: Adım-1'de verilen spesifikasyonlara bağlı olarak temel birim hücreyi oluşturan yarı-mod rezonatör modeli ve temel boyutlarının belirlenmesi, ardından tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörün geometrik parametrelerinin ayarlanması,
- Adım-3: Her bir geçme bandı için istenilen bant genişliğine dayalı olarak özdeş birim filtre hücreleri arasındaki kuplajın belirlenmesi,
- Adım-4: İnce ve hassas ayarlamaların yapılarak tüm filtrenin optimize edilmesi.

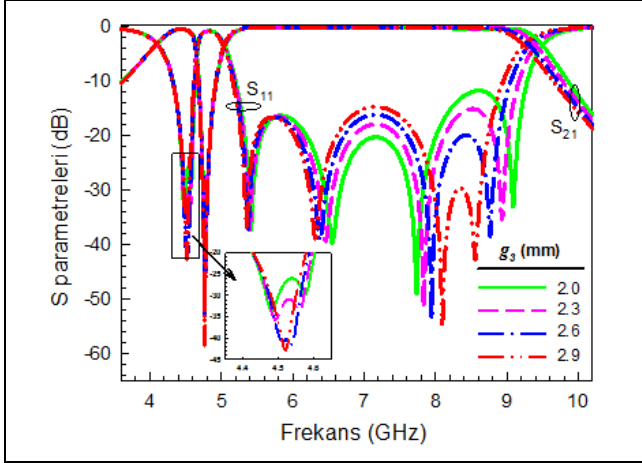
Tasarım işlemlerinin ilk adımı filtre gereksinimlerine bağlı olarak gerekli spesifikasyonlarının belirlenmesidir. Merkez frekansı, bant genişliği ve geri dönüş kaybı vb. gibi spesifikasyonların belirlenmesinin ardından bu gereksinimleri karşılayacak fiziksel devre konfigürasyonları ile temel boyutlandırılmalara karar verilebilmekte ve buna bağlı olarak tasarım parametreleriyle fiziksel yapı arasındaki ilişkiler belirlenmektedir. Önerilen filtre için dar/ultra-geniş geçme bantları sırasıyla %12.6 ve %60.3 kısmi bant genişliğine ve yaklaşık olarak 4.4 GHz ve 7.2 GHz merkez frekansına sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen frekans sahasında kullanılmak üzere seçilecek YDBD için kesim frekansı [11]'de verilen analitik formül yardımıyla hesaplanarak temel bir boyutlandırma yapılabilmektedir. Bu durumda bahsedilen frekans sahasında istenilen özelliklere sahip bir filtre devresi için toplam yüzey alanı belirlenen YDBD daha az kayıplı bir tasarım için önerilmektedir. Ayrıca yarı-mod yapı üzerine ilgili frekans sahasında etkili olabilecek tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör eklemeyle oluşturulabilecek ekstra bir bandında da kontrolü kolaylıkla sağlanabilmektedir. Bir diğer avantaj ise tamamlayıcı bölünmüş halka içeren yarı-mod yapılar aracılığıyla kompakt boyutlarda devreler tasarlanabilmesi ve böylece önemli ölçüde boyut indirgemenin de sağlanmasıdır. Şekil 2(a)'da verilen temel birim hücreden de görüleceği üzere  $l_1, l_2$  ya da  $w_1, w_2, w_3, w_4$  parametreleri değiştirildiğinde, tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörün toplam elektriksel uzunluğu değişir ve Şekil 4'te gösterildiği üzere bu değişimden iki geçme bandı da aynı anda etkilenir. Bu aşamada tamamlayıcı bölünmüş halkanın uzunluğu uygun kısmi bant genişlikleri (dar/ultra-geniş) elde edilinceye kadar ayarlanabilir. Şekil 5'te gösterilen tasarım grafiğine göre tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatöre sahip yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapısının (birim hücre) başlangıçta kullanılacak olan temel tasarım parametreleri belirlenir. Geçme bantlarının daha hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlamak amacıyla Şekil 6'da verilmekte olan  $l_3$  uzunluğunun etkisi de bu noktada dikkate alınmalıdır. Her bir geçme bandının bant genişliğini artırmak için kullanılacak yöntemlerden birisi bant içindeki iletim kutupları sayısının artırılmasıdır. Bunun için bir iletim hattı aracılığıyla kaskat olarak birbirine bağlanmış özdeş birim hücrelerden oluşan bir konfigürasyon önerilmektedir. Kaskat bağlantıyla elde edilen çoklu mod özelliği daha yüksek bir seçiciliğin elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle tasarımın son aşamasında her bir bant için bant genişliğine dolayısıyla da kalite faktörüne bağlı olarak tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü yarı-mod dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzu yapısının oluşturduğu özdeş birim hücrelerin periyodik bir şekilde uygun yerleşimi Şekil 8'de gösterilmekte olan konfigürasyon kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 8. Önerilen iki bantlı bant geçiren filtre.

Figure 8. Layout of the proposed two-band bandpass filter.

Şekil 9'da verilen frekans cevaplarından da anlaşılacağı üzere yarı-mod özdeş birim hücrelerin aralarındaki mesafeye ( $g_3$ ) bağlı olarak her bir mod arasındaki kuplaj seviyeleri değişeceğinden iletim kutuplarının bant içindeki yerleşimi ve dolayısıyla bant genişlikleri de değişim gösterecektir. Bu noktada tasarımın son aşaması olan ince ve hassas ayarlamalar geçme bandı içerisinde istenilen spesifikasyonlara bağlı olarak uygun geri dönüş kaybı seviyeleri elde edilebilecek şekilde yapılarak, nihai devre boyutları tam dalga elektromanyetik simülasyon aracılığıyla belirlenebilmektedir [20].



Şekil 9. Önerilen filtre devresinde farklı  $g_3$  değerlerinin frekans cevabına etkisi.

Figure 9. Effect of different  $g_3$  values in the proposed filter configuration.

#### 4 Üretim ve ölçüm çalışmaları

Önerilen tasarımın geçerliliğini göstermek amacıyla dar/ultra-geniş iki geçme bandına sahip bant geçiren filtre devresi 3.55 bağıl dielektrik geçirgenliğe sahip ve 0.813 mm kalınlığındaki Rogers R04003C taban üzerine üretilmiştir. Üretilen filtrenin boyutları Tablo 3'te gösterilmektedir.

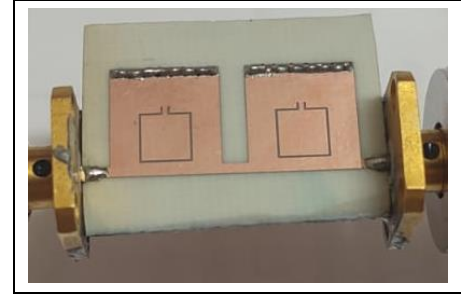
Tablo 3. Üretilen iki bantlı filtre devresinin boyutları.

Table 3. Dimensions of the fabricated two-band filter circuit.

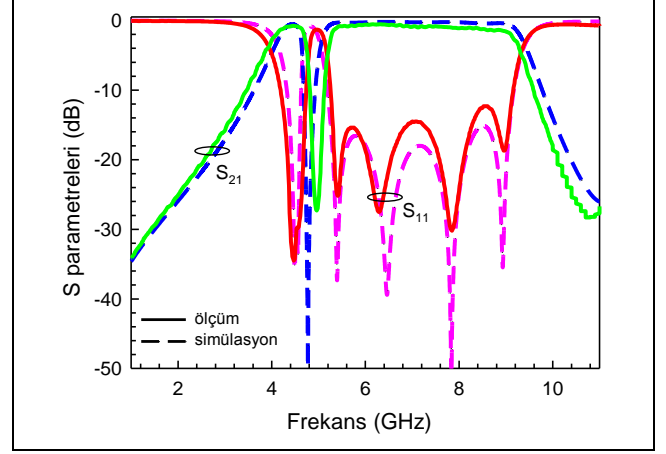
$l_1 = l_2$	$g_1 = g_2$	$g_3$	$w_1$	$w_2$	$w_3 = w_4$	$s$	$d_V$	$s_V$
4.2	0.2	2.3	3.4	1.2	2.5	0.4	0.6	1.2

(Tüm birimler mm cinsinden alınmaktadır).

Toplam devre boyutu 25.9 mm × 10.1 mm'dir. Bu boyutlar,  $\lambda_g$  ilk geçme bandının merkez frekansına göre hesaplanan dalga boyunu temsil etmek üzere yaklaşık olarak  $0.73\lambda_g \times 0.28\lambda_g$ 'ye karşılık gelmektedir. İmal edilen filtre Şekil 10(a)'da gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10. Önerilen filtre devresinin; (a): Üretim fotoğrafı. (b): Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Figure 10(a): The photograph of the produced filter. (b): Comparative results of the performance test.

Tasarlanan filtre baskı devre yöntemi kullanılarak üretilmiş olup ölçüm sonuçları Agilent E5071C Network Analizör aracılığıyla elde edilmiştir. Elektromanyetik tam dalga simülasyon [20] aracılığıyla ve ölçüm sonuçlarından elde edilen S parametreleri Şekil 10(b)'de karşılaştırılmaktadır ve sonuçların birbiriyle oldukça iyi bir uyum yakaladığı açıkça gözlemlenmektedir. Ölçülen sonuçlara göre sırasıyla %12.6 ve %60.3 kısmi bant genişliğine sahip olan birinci ve ikinci geçme bantlarının merkez frekansları yaklaşık olarak 4.4 GHz ve 7.2 GHz'dir. İlgili merkez frekansında her bir geçme bandı için araya girme kaybı (IL) seviyeleri 0.844 dB ve 0.839 dB, geri dönüş kaybı (RL) ise 30 dB ve 15 dB olarak ölçülmüştür.

Önerilen filtre, Tablo 4'te belirtildiği üzere geçme bantlarının merkez frekansı ( $f_0$ ), 3dB kısmi bant genişliği (KBG), merkez frekanslarında ölçülen araya girme kaybı (IL), her bir geçme bandı içerisinde oluşan mod sayısı (her bir geçme bandı derecesi) ve devrelerin toplam yüzey alanı gibi özellikler açısından benzer yapılar kullanılarak gerçekleştirilen filtre tasarımlarının yer aldığı çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Literatürde tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör yapıları içeren yarı-mod dielektrik dalga kılavuzları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda geniş bantlara sahip devre tasarımlarına pek rastlanmamakla birlikte mevcut daha dar bantlı çift bantlı devrelerin yer aldığı çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4'te gösterildiği üzere literatürde yer alan benzer çalışmalar ile kıyaslandığında önerilen devrenin kompakt boyut, kayıp, kolay tasarım prosedürü ve seçicilik gibi özellikleri bakımından öne çıktığı görülmektedir.

Tablo 4. Literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırma.

Table 4. Comparison with similar studies in the literature.

Ref.	$f_0$ (GHz)	3 dB KBG (%)	IL (dB)	Derece	Boyut ( $\lambda_g \times \lambda_g$ )
[21]	4.56/9.36	25.8/55.7	0.76/0.8	2/3	0.699×0.383
[22]	5.0/8.5	6.26/7.75	2.02/1.82	4/4	0.84×1.31
[23]	9.8/13.5	11.2/9.8	1.8/1.5	2/2	1.22×1.22
[24]	1.94/4.84	14.43/2.69	1.26/2.69	2/1	0.179×0.097
[25]	7.89/8.89	3.42/3.94	1.5/1.9	2/2	0.87×0.85
[26]	5.5/12.5	92/17	1.3/1.3	2/2	-
[27]	2.4/4	8/39	1.4/1	2/4	0.48×0.09
Önerilen filtre	4.4/7.2	12.6/60.3	0.84/0.84	2/4	0.73×0.28

$\lambda_g$  : İlk geçme bandının merkez frekansına göre hesaplanan dalga boyunu temsil etmektedir.

## 5 Sonuçlar

Önerilen bant geçiren filtre kompakt boyut, biri dar diğeri ultra-geniş bant genişliğine sahip iki geçme bandı, oldukça düşük düşük ekleme kaybı ve geri dönüş kaybı özelliklerine sahiptir. Filtrenin iki bantlı iletim karakteristiği, yarı-mod DBD metal yüzeyi üzerine eklenen tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatör boyutlarının ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Dielektrik tabanda birleştirilmiş dalga kılavuzları ile gerçekleştirilen geleneksel filtrelerle karşılaştırıldığında önerilen filtre daha kompakt boyutlara sahiptir ve yarı-mod DBD kullanıldığından genişliği DBD yapıların yarısı kadardır. Giriş ve çıkış portlarını birbirine bağlayan bir ana iletim hattı boyunca kaskat olarak bağlanmış özdeş birim hücreler tarafından her bir geçme bandındaki mod sayısı ikiye katlanarak bantların daha seçici olmaları sağlanmıştır. Önerilen iki bantlı filtre performans testleri ve deneysel doğrulamayı gerçekleştirmek amacıyla imal edilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen S parametrelerinin iyi bir uyum içinde olması, bu filtre tasarım prosedürünün geçerliliğini göstermektedir. Önerilen iki bantlı filtrenin çalışma frekans aralıkları uydu üzerinden sunulan modern elektronik haberleşme hizmetlerinde kullanılan frekans bantları için oldukça uygundur.

## 6 Conclusions

The proposed bandpass filter has a compact size, two-passband having narrow and ultra-wide bandwidth, low insertion, and return loss features. The two-band transmission characteristic of the filter has been performed by adjusting the length of the complementary split ring resonator etched on the half-mode SIW metal surface. Compared with traditional filters produced by SIW technology, the proposed two-band filter is more compact and covers half of the SIW structure since half-mode SIW is used. The bands have been more selective by duplicating the number of modes in each passband using identical unit cells connected in a cascade along a main transmission line linking the input and output ports. The proposed two-band filter has been fabricated for performance tests and experimental verification. The measured and simulated S parameters have agreed well, demonstrating the validity of this filter design procedure. The frequency range of the proposed two-band filter is well suited to the frequency bands that are used in modern satellite communication services.

## 7 Teşekkür

Pamukkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü RF/Mikrodalga Araştırma Grubuna gerçekleştirilen çalışmanın üretim ve ölçümü aşamasındaki katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## 8 Yazar katkı beyanı

Çalışmada sunulan tasarım, simülasyon ve deney çalışmaları, sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanması, yazım ve içerik denetimi gibi tüm başlıklar Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR tarafından gerçekleştirilmiştir.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"  
"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 10 Kaynaklar

- [1] Zheng Y, Dong Y. "Dual-band, dual-mode, microstrip resonator loaded, compact hybrid SIW bandpass filter". *2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Atlanta, GA, USA, 07-25 June 2021.
- [2] Karpuz C, Ozturk Ozdemir P, Senol H, Cengiz A, Balik HH, Gorur A. "A novel concept in design of microwave planar dual band filter having the controllable closed/isolated bands by using the simple vias and the slow wave effect for 5g/iot applications". *2021 51st European Microwave Conference (EuMC)*, London, United Kingdom, 04-06 April 2022.
- [3] Xu Z, Wu Y, Dong Q, Wang W. "Miniaturized dual-band filter using dual-mode dielectric waveguide resonator". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(12), 1411-1414, 2022.
- [4] Shankar E, Kumar KVP, Velidi VK. "Design of high selectivity compact dual-band bandpass filter with seven transmission-zeros for GPS and WiMAX applications". *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70(7), 2395-2399, 2023.
- [5] Huang YM, Shao Z, You CJ, Wang G. "Size-reduced bandpass filters using quarter-mode substrate integrated waveguide loaded with different defected ground structure patterns". *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, USA 17-22 May 2015.
- [6] Wei F, Yi Wang XX, Yi Kang H, Li B, Wei Liao D. "Wideband bandpass filter based on U-slotted SW-HMSIW cavities". *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 28, 1-7, 2018.
- [7] Jones TR, Daneshmand M. "Miniaturized folded ridged half-mode and quarter-mode substrate integrated waveguides for filter design". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67(8), 3414-3426, 2019.

- [8] Lin G, Dong Y, Luo X. "Miniaturized quarter-mode SIW filters loaded by dual-mode microstrip resonator with high selectivity and flexible response". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(6), 660-663, 2022.
- [9] Hong W, Liu B, Wang Y, Lai Q, Tang H. "Half mode substrate integrated waveguide: a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application". *2006 Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics*, Shanghai, China, 18-22 September 2006.
- [10] Liu B, Hong W, Wang Y, Lai Q, Wu K. "Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) 3-dB coupler". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17(1), 22-24, 2007.
- [11] Lai Q, Fumeaux C, Hong W, Vahldieck R. "Characterization of the propagation properties of the half-mode substrate integrated waveguide". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57(8), 1996-2004, 2009.
- [12] Rogla LJ, Carbonell J, Boria VE. "Study of equivalent circuits for open-ring and split-ring resonators in coplanar waveguide technology". *Microwaves, Antennas & Propagation*, 1(1), 170-176, 2007.
- [13] Yan T, Tang XH, Xu ZX, Lu D. "A novel type of bandpass filter using complementary open-ring resonator loaded HMSIW with an electric cross-coupling". *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(4), 998-1001, 2016.
- [14] Öztürk Özdemir P, Karpuz C, Us E. "Tümleyen açık halka rezonatör içeren kaskat bağlı yarı-mod dielektrik tabanda bütünleştirilmiş dalga kılavuzu yapıları kullanılarak ultra geniş-band filtre tasarımı". *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Türkiye, 24-26 Kasım 2022.
- [15] Booker HG. "Slot aeriars and their relation to complementary wire aeriars (Babinet's principle)". *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 93(4), 620-626, 1946.
- [16] Hong JS, Lancaster MJ. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York, USA, Wiley, 2001.
- [17] Bahl I. *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*. London, Artech House, 2003.
- [18] Baena JD, Bonache J, Martin F, Sillero RM, Falcone F, Lopetegui T, Laso MAG, Garcia-Garcia J, Gil I, Portillo MF, Sorolla M. "Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(4), 1451-1461, 2005.
- [19] Dong YD, Yang T, Itoh T. "Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57(9), 2211-2223, 2009.
- [20] Sonnet User's Manual, Version 16, *Sonnet Software*, North Syracuse, NY, June 2016.
- [21] Fu W, Li Z, Liu P, Cheng J, Qiu X. "Modeling and analysis of novel CSRRs-loaded dual-band bandpass SIW filters". *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(7), 2352-2356, 2021.
- [22] Zhou K, Zhou CX, Wu W. "Dual-mode characteristics of half-mode siw rectangular cavity and applications to dual-band filters with widely separated passbands". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(11), 4820-4829, 2018.
- [23] Shi LF, Sun CY, Chen S, Liu GX, Shi YF. "Dual-band substrate integrated waveguide bandpass filter based on CSRRs and multimode resonator". *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 28(9), 1-6, 2018.
- [24] Yin B, Lin Z. "A novel dual-band bandpass SIW filter loaded with modified dual-CSRRs and Z-shaped slot". *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 121, 1-7, 2020.
- [25] Zhang H, Kang W, Wu W. "Dual-band substrate integrated waveguide bandpass filter utilising complementary split-ring resonators". *Electronics Letters*, 54, 85-87, 2018.
- [26] Hugar SI, Mungurwadi V, Baligar JS. "Dual band microstrip BPF with controlled wide and narrow pass bands". *2019 10<sup>th</sup> International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kanpur, India, 6-8 July 2019.
- [27] Weng MH, Lan SW, Chang SJ, Yang RY. "Design of dual-band bandpass filter with simultaneous narrow-and wide-bandwidth and a wide stopband". *IEEE Access*, 7, 147694-147700, 2019.