



## A review of substrate integrated waveguide (SIW) filter architecture and filter design technologies

Kemal Güvenli<sup>1\*</sup>, Sibel Yenikaya<sup>2</sup>, Mustafa Seçmen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Automation, Osmancık Ömer Derindere, Vocational School, Hitit University, 19500, Osmancık, Çorum, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Bursa Uludağ University, Görükle Campus, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Yaşar University, 35030, Bornova, İzmir, Türkiye

### Highlights:

- SIW filter architecture and design rules
- Comparison of SIW filter design technologies in terms of quality factor
- Harmonic suppression in SIW filter design

### Keywords:

- Transmission lines
- Filter design technologies
- SIW filter
- Filter performance
- Harmonic suppression

### Article Info:

Review Article

Received: 17.12.2022

Accepted: 20.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1220575

### Correspondence:

Author: Kemal Güvenli

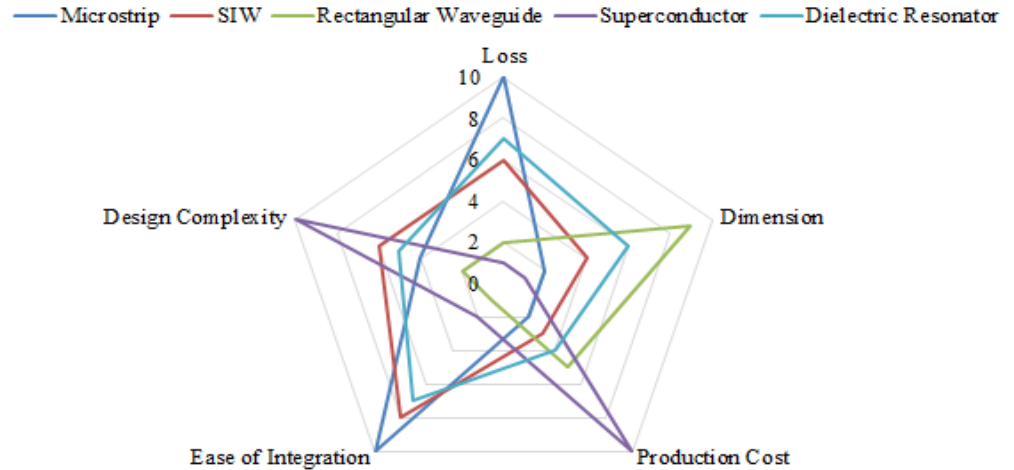
e-mail:

kemalguvenli@hitit.edu.tr

phone: +90 506 986 2454

### Graphical/Tabular Abstract

The comparison of SIW transmission line technology used in satellite, automotive radar and 5G applications with other transmission line technologies in terms of loss, dimension, production cost, ease of integration and design complexity is given in Figure A. Due to its advantages in Figure A, SIW filter production techniques studies in the literature have been examined on the basis of quality factor and harmonic suppression criteria.



**Figure A.** Comparison of transmission line technologies with each other in terms of loss, dimension, production cost, design complexity, ease of integration and dimension

**Purpose:** In this review article, it is aimed to make a comparison between the applied techniques by calculating the filter quality factors of the sample studies in the literature using different SIW filter production technologies and to evaluate the results of the design of the method applied in the elimination of harmonic effects.

**Theory and Methods:** Microstrip-based SIW filter, ceramic-based SIW filter, inductive conductor pin/iris window addition SIW filter, tunable SIW filter with active circuit element, and layered/3D SIW filter design technologies are investigated in this study.

**Results:** When the studies are evaluated; Armendariz et al. [97]'s filter design has the best quality factor value (41.70), and Zhang et al. [92]'s filter design has the smallest filter volume (4.64 mm<sup>3</sup>). The substrate material with the smallest dielectric coefficient (1.58) are used in the filter design of Moro et al. [99]. Zhou et al. [103]'s filter design has the highest center frequency (18.22 GHz) and the second best quality factor value (40.49). In the filter design of Liu et al. [117], harmonic suppression in the widest band ( $8 \times f_{center}$ ) is done without increasing the volume. The highest volume increase (63.10 mm<sup>3</sup>) was experienced for harmonic suppression in the filter design of Jia et al. [114].

**Conclusion:** Considering that 6th generation mobile communication (6G) is gaining momentum and 100 GBit/s wireless data communication speed will be offered to end users, it is thought that the demand for microwave broadband transmission systems will increase and the use of SIW filter technologies in these systems will increase.



## Yüzey tümleşik dalga kılavuzu (YTD) filtre mimarisi incelemesi ve filtre tasarım teknolojileri

Kemal Güvenli<sup>1\*</sup>, Sibel Yenikaya<sup>2</sup>, Mustafa Seçmen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hitit Üniversitesi, Osmancık Ömer Derindere MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 19500, Osmancık, Çorum, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059, Nilüfer, Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35030, Bornova, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Filtre mimarisi ve tasarım kuralları
- Kalite Faktörü (Q) açısından YTD filtre tasarım teknolojilerinin karşılaştırılması
- Filtre tasarımında harmonik baskılama

### Makale Bilgileri

Derleme Makalesi

Geliş: 17.12.2022

Kabul: 20.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1220575

### Anahtar Kelimeler:

İletim hatları

Filtre tasarım teknolojileri

YTD filtre

Filtre performansı

Harmonik baskılama

### ÖZ

Bu derleme makalesinde iletim hattı teknolojilerinin kayıp, boyut, üretim maliyeti, entegrasyon kolaylığı ve tasarım kompleksliği açısından karşılaştırılması yapılmıştır. İletim hatları arasında avantajları ile ön plana çıkan Yüzey Tümleşik Dalga Kılavuzu (YTD) filtrenin temel tasarım aşamaları çalışmada verilmiştir. Literatürde farklı YTD filtre teknolojilerinin kullanıldığı güncel çalışmalar incelenmiştir. İncelenen YTD filtrelerin kalite faktörleri hesaplanmış ve uygulanan teknikler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca YTD filtre performansını olumsuz etkileyen harmonik ve yüksek mod etkilerinin giderilmesi için literatürde uygulanan yöntemler incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

## A review of substrate integrated waveguide (SIW) filter architecture and filter design technologies

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

- SIW filter architecture and design rules
- Comparison of SIW filter technologies in terms of quality factor
- Harmonic suppression in SIW filter design

### Article Info

Review Article

Received: 17.12.2022

Accepted: 20.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1220575

### Keywords:

Transmission lines

Filter design technologies

SIW filter

Filter performance

Harmonic suppression

### ABSTRACT

In this review article, transmission line technologies are compared in terms of loss, dimension, production cost, ease of integration and design complexity. The basic design stages of the Substrate Integrated Waveguide (SIW) filter, which stands out with its advantages among transmission lines, are given. Current studies using different SIW filter technologies have been examined in the literature. The quality factors of the examined SIW filters were calculated and a comparison was made between the applied techniques. In addition, the methods applied in the literature to eliminate the harmonic and high mode effects that adversely affect the SIW filter performance are examined and the results are evaluated.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*kemalguvenli@hitit.edu.tr, sguler@uludag.edu.tr, mustafa.secmen@yasar.edu.tr /  
Tel: +90 506 986 2454

## 1. Giriş (Introduction)

Günümüzde Nesnelerin İnternet'inin (IoT) oldukça yaygınlaşması; uygun maliyetli, bütünlük ve çoklu işlevleri yerine getirecek bir mikrodalga sistemi olan mevcut Kablosuz Sensör Ağları'nın (KSA) geliştirilmesine olan talebi artırmıştır [1]. KSA; giyilebilir cihaz teknolojileri [2], Beşinci nesil teknolojileri [3], otomotiv radar sensör teknolojileri [4], İnsansız Hava Aracı (İHA)- İnsansız Kara Aracı (İKA)- İnsansız Deniz Aracı (İDA) sürü teknolojileri [5] vb. teknolojilerinin gelişiminde önemli bir yer işgal etmektedir.

Mikroşerit hat ile dikkörtgen dalga kılavuzunun artılarını barındıran Yüzey Tümlşik Dalga Kılavuzu (YTD) yapısı, birer mikrodalga devresi olan KSA'nın üretiminde kullanılan yaygın teknolojiler arasında yer almaktadır [6]. Dikkörtgen dalga kılavuzlarının düzlemsel formu olarak değerlendirilebilen YTD yapılar, düzlemsel iletim hatları ile dalga kılavuzu iletim hatları arasındaki teknolojik boşluğu gidermek için geliştirilmiş modern bir iletim hattıdır. Düşük üretim maliyeti olan YTD yapıların diğer mikrodalga devreleriyle entegrasyon kolaylığı bulunmaktadır. Bu özelliklerinin yanında, mikrodalga devresinde minyatürleşme kolaylığı sağlarken düşük radyasyon kayıplarına sahip olması, basit tasarım kurallarının olması ve mikrodalga frekanslarında kullanılabilmesi önemli avantajlarıdır [7].

Mikroşerit yapıların dezavantajı yüksek kayıpları ve yüksek elektromanyetik girişimleri, dikkörtgen dalga kılavuzu yapılarının ise diğer düzlemsel mikrodalga devrelerle entegrasyon sorunu ve yüksek maliyeti bulunmaktadır. Dikkörtgen dalga kılavuzlarının dezavantajı da diğer düzlemsel mikrodalga devreleriyle entegrasyon sorunu ve üretiminin çok pahalı olmasıdır. YTD teknolojisi sayesinde bu dezavantajlar büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. YTD yapıları, mikroşerit ve dikkörtgen dalga kılavuzunun avantajlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş yapılarıdır.

YTD mimarilerin tasarımında, değeri önceden belirlenen dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) bir baskı devre kartına (PCB) pasif ve aktif devrelerin yerleştirilmesiyle karmaşık devre yapılarından kurtulmak ve elektromanyetik girişimin (EMI) en aza indirilmesiyle elektromanyetik uyumluluğu (EMC) sağlamak temel alınır [8]. 1 Ocak 2010-1 Nisan 2023 arası baz alınarak YTD filtre üzerine yapılmış ieeexplore.ieee.org web adresindeki veri tabanında yer alan akademik çalışma sayılarını içeren istatistik Şekil 1'de verilmiştir. 1

Nisan 2023 tarihli bu istatistiğe göre, araştırmacıların YTD mimarisine olan eğiliminin 2019 yılına kadar arttığı ve 2019 sonrasında yıllık yayın sayısı biraz azalsa da ilginin devam ettiği görülmektedir.

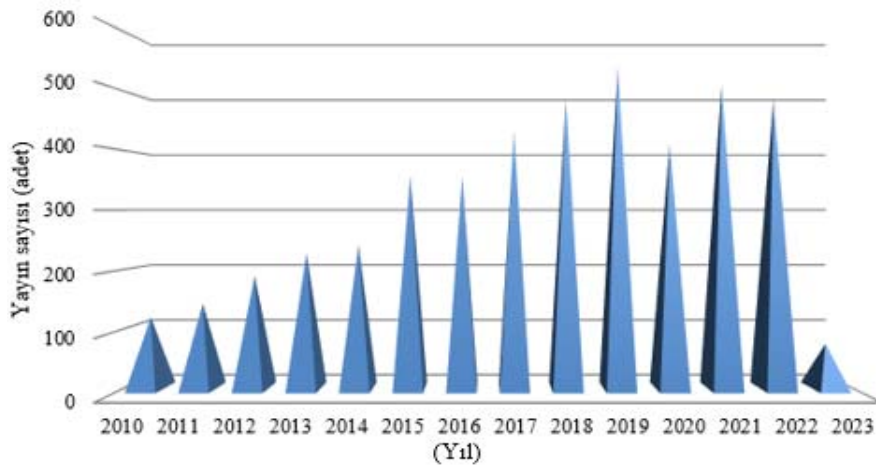
Ayrıca YTD mimarisi ile beraber ieeexplore.ieee.org web adresindeki veri tabanında yer alan farklı iletim hattı teknolojilerini içeren akademik çalışmalar da incelenmiştir. Yüksek atf almış (patent atfları dâhil) dikkörtgen dalga kılavuzu [9-12], mikroşerit hat [13-16], YTD [17-20], süper iletken [21-24] ve dielektrik rezonatör [25-28] teknolojilerini içeren araştırma çalışmaları kayıp, üretim maliyeti, entegrasyon kolaylığı, tasarım kompleksliği ve boyut açısından birbirleriyle karşılaştırılmalı incelenmiştir. Bununla birlikte dikkörtgen dalga kılavuzu [29-32], mikroşerit hat [33-36], YTD [37-40], süper iletken [41-44] ve dielektrik rezonatör [45-48] teknolojileri ile ilgili derleme çalışmaları da araştırmaya dâhil edilmiştir. Çalışmalardaki iletim hattı teknolojileri arasındaki kayıp, boyut, üretim maliyeti, entegrasyon kolaylığı ve tasarım kompleksliği temel özellikleri dikkate alınarak yapılan karşılaştırma, Şekil 2'de niteliksel olarak sunulmuştur.

Şekil 2'ye göre mikroşerit hat yapıları, iletim hatları arasında en yüksek kayba sahip iken boyut açısından süper iletkenlerden sonra en küçük yapılarıdır. Dalga Kılavuzu yapıları, diğer mikrodalga devrelerine entegrasyonu en zor, hacim olarak en büyük yapılar iken kayıplar açısından süper iletkenlerden sonra en iyi iletim hattıdır. Süper iletken iletim hatları en pahalı ve tasarım kompleksliği en yüksek yapılarıdır. Entegrasyon kolaylığı oldukça düşük iken kayıplar açısından en iyi iletim hatlarıdır. Dielektrik rezonatörler ise kayıplar açısından süper iletkenlerden sonra en iyi, boyut noktasında dalga kılavuzlarından sonra en kötü yapılarıdır. Entegrasyon kolaylığı orta seviyededir. YTD ise Şekil 2'de görüldüğü gibi kıyası yapılan beş parametre dikkate alındığında en optimum sonuca sahip iletim hattı teknolojisidir.

## 2. YTD Filtre ve Temel Tasarım Aşamaları (SIW Filter and Basic Design Stages)

### 2.1. YTD Filtre Geometrisi ve Temel Tasarım Eşitlikleri (SIW Filter Geometry and Basic Design Equations)

YTD de dalga yayılımı (propagasyon) karakteristik olarak dikkörtgen dalga kılavuzuna benzerdir. O nedenle YTD dalga kılavuzları için de aynı analiz yöntemleri kullanılır. Dikkörtgen dalga kılavuzu gibi



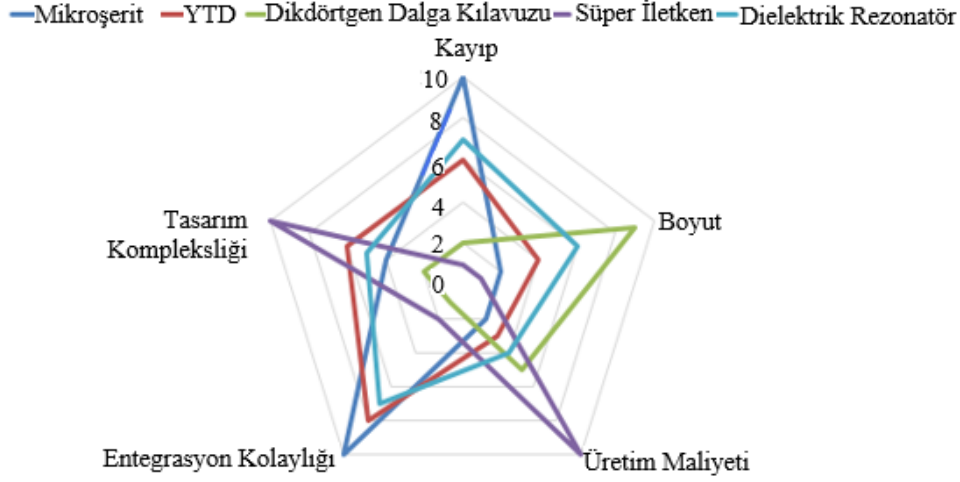
Şekil 1. 1 Ocak 2010-1 Nisan 2023 arasında YTD filtre üzerine yapılmış ieeexplore.ieee.org veri tabanındaki yayın sayısı (The number of publications in the database of ieeexplore.ieee.org on SIW filter between January 1, 2010 and April 1, 2023)

YTD'de yüksek kalite faktörüne ve yüksek güç transferi özelliklerine sahiptir. Diğer devrelerle entegrasyonda ekstra teknolojilere gerek duyulmaması nedeniyle YTD'nin iletim kayıplarında artış gözlemlenmez [49]. Literatürde ilk ortaya konan YTD Şekil 3a'da yer almaktadır [50].

Çalışma [50]'de düzlemsel dalga kılavuzu elde edebilmek için tasarımda alt ve üst iletkin katmanı dikey olarak sınırlandıran iletkin pim sıralı form ve iki iletkin oluklu form olarak iki model önerilmiştir.

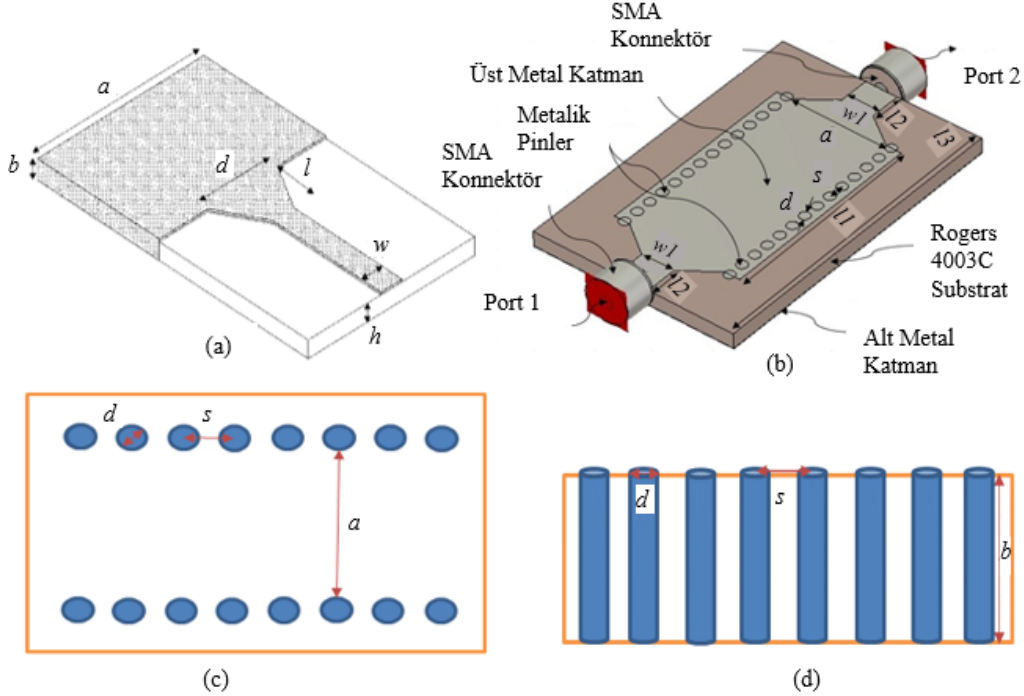
mikroserit konik geçişli olarak tasarlanmıştır. Sonraki çalışmalarda iki iletkin oluklu form yerine, hacimsel ve metal miktarını/ağırlığı azaltmak için iletkin pim sıralı form tercih edilmiştir.

Çalışma [51]'de, Şekil 3b'deki iki portlu iki silindirik iletkin pim sıralı yüksek geçiren YTD filtre tasarımı yapılmıştır. Yüksek geçiren YTD filtrede bir sırada on dört adet iletkin pim içeren iki sıra yer almaktadır. Şekil 3b'deki filtrede iletkin oluk yerine silindirik iletkin pimlerin kullanılması Şekil 3a'daki ilk YTD tasarımına göre daha



Şekil 2. İletim hatları teknolojilerinin kayıp, boyut, üretim maliyeti, entegrasyon kolaylığı ve tasarım kompleksliği açısından birbirleriyle karşılaştırılması [39]

(Comparison of transmission line technologies with each other in terms of loss, dimension, production cost, ease of integration and, design complexity)



Şekil 3. YTD mimarisi: a) Geliştirilen ilk mikroserit konik geçişli YTD [50], b) İki portlu iki iletkin pim sıralı yüksek geçiren YTD filtre geometrisinin cepheden görünümü [51], c) İki portlu iki iletkin pim sıralı yüksek geçiren YTD filtre geometrisinin üstten görünümü ve parametreleri ve d) İki portlu iki iletkin pim sıralı yüksek geçiren YTD filtre geometrisinin yandan görünümü ve parametreleri

(SIW architecture: a) Developed first SIW with microstrip conical pass, b) Front view of two-port two-conductor pin array highpass SIW filter geometry and parameters, c) Top view of two-port two-conductor pin array highpass SIW filter geometry and its parameters, and d) Side view of two-port two-conductor pin array highpass SIW filter geometry and its parameters)

hafif olmasını sağlamıştır. Şekil 3b'deki iki portlu iki silindirik iletken pim sıralı yüksek geçiren YTD filtre silindirik iletken pimlerin çapı  $d$ , iki komşu silindirik iletkenin merkezleri arasındaki uzunluk  $s$ , dielektrik malzemenin yüksekliği  $b$ 'dir. Ayrıca birbirine paralel iletken pim sırası arasındaki mesafe  $a$  ve bu mesafenin dikdörtgen dalga kılavuzundaki uzunluğuna eşit olan etkin değeri  $a_{eff}$ 'dir. Tasarımda kullanılan dielektrik alttaş malzemenin manyetik geçirgenliği  $\mu = \mu_0$  ve elektrik geçirgenliği ise  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 'dır [7].

Dikdörtgen dalga kılavuzları gibi bir yüksek geçiren filtre olan YTD'nin tasarımında temel alınan  $a_{eff}$  Eş. 1'de, kesim frekansı  $f_{c_{mn}}$  Eş. 2'de ve kılavuz dalga boyu  $\lambda_g$  ifadeleri Eş. 3'te verilmiştir [52, 53]:

$$a_{eff} = a - 1,08 \frac{d^2}{s} + 0,1 \frac{d^2}{a} \quad (1)$$

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2)$$

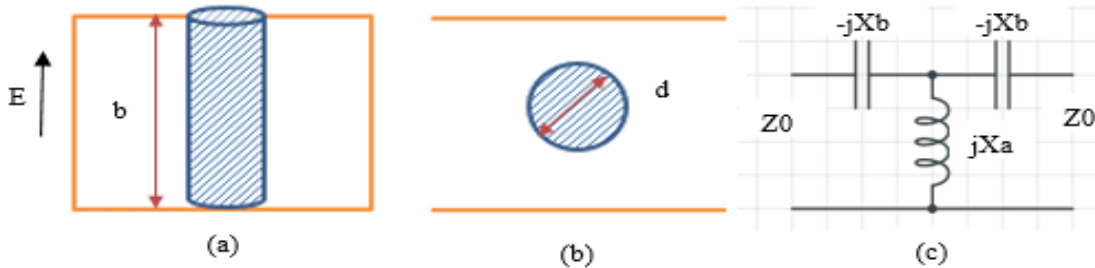
$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \epsilon_r - \left(\frac{\pi}{a_{eff}}\right)^2}} \quad (3)$$

Bir iletim hattı içerisinde elektromanyetik dalganın en az kayıpla yayılımını sağlamak, tasarımda temel alınan en önemli konulardandır. YTD'de bir dizi halinde aralıklı olarak yerleştirilen silindirik iletken delikler/çubuklar ile elektronik duvar oluşturulabilir. Altta ve üstteki iletken yüzeylere temas eden aynı sıradaki iletken silindirik delikler/çubuklar sayesinde iletken elektronik duvar meydana getirilir ve bu iletken duvar, kayıpları önemli oranda azaltır. Bu tip elektronik duvar yapısı, elektronik elemanlar arasındaki bağlantıyı (mutual coupling) azaltmak adına uzun bir süredir PCB devre üretiminde kullanılmaktadır. Tasarım şekli sebebiyle YTD yapıları, dikdörtgen dalga kılavuzunun düzlemsel boyuttaki eşdeğeri olarak kabul edilir.

Bunun yanında YTD'nin iki iletken pim dizisi aralığındaki orta bölgeye ilave olarak yerleştirilen pim(ler) YTD'nin yüksek geçiren filtre davranışını etkilemektedir. İlave edilen pim(ler)in konumu, sayısı ve çapı değiştirilerek yüksek geçiren bir filtre olan YTD'nin bant geçiren/bant durduran YTD filtreye evrilmesi sağlanmaktadır. Şekil 4'te, yüksek geçiren filtre olan YTD pim dizisinin arasında (orta bölgeye) yerleştirilen  $d$  çapında ve  $b$  yüksekliğinde alt ve üst iletken katmanlara temas edecek şekilde yerleştirilen silindirik iletken bir pim yandan ve üstten görünümü ile eşdeğer devresi yer almaktadır [54].

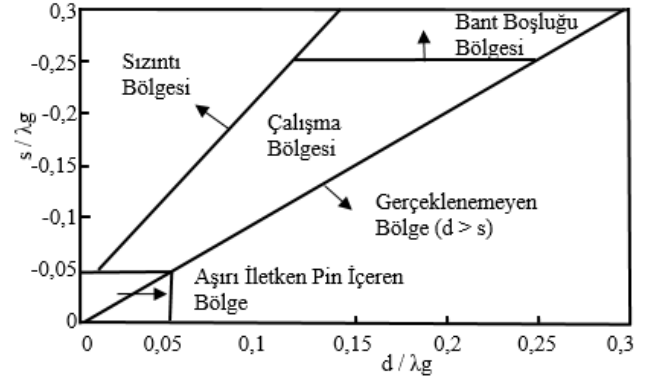
## 2.2. Çalışma Bölgesi (Operating Zone)

Şekil 5'de görülen, YTD tasarımlarındaki silindirik yapıdaki iletken pimlerin/deliklerin iç içe geçme durumu nedeniyle  $d > s$  alanı



Şekil 4. YTD iletken pim: (a) Dikey kesit, (b) Üstten görünüm ve (c) Eşdeğer devre [54]  
(SIW conductor pin: (a) Vertical cross section, (b) Top view, and (c) Equivalent circuit)

tasarımında “Gerçeklenemeyen Bölge” olarak adlandırılır. Küçük çaplı silindirik iletken pimlerin/deliklerin YTD'yi dayanıksız bırakması ve üretimdeki zorluklar nedeniyle “Aşırı İletken Pim İçeren Bölge” olarak isimlendirilen alanın tasarımda kullanılması uygun değildir [55]. (Bozzi vd. [53]) YTD yapıları için  $s/d \leq 2$  ve  $d < \lambda_g/5$  eşitsizliklerini YTD tasarım koşul ifadeleri olarak belirtmişlerdir.



Şekil 5. YTD çalışma bölgesinin tasarım sınır şartları [39]  
(Design boundary conditions of the SIW operating zone)

## 2.3. Zayıflama ve Kalite Faktörü (Attenuation and Quality Factor)

YTD yapılarındaki dielektrik ( $\alpha_d$ ), iletim ( $\alpha_c$ ) ve radyasyon ( $\alpha_r$ ) kayıplarından kaynaklı zayıflama eşitlikleri çalışmalarında aşağıda gibi verilmiştir [52, 53]. Toplam zayıflama ise bu üç eşitliğin toplamı olan  $\alpha = \alpha_d + \alpha_c + \alpha_r$  ifadesiyle belirtilmiştir. Filtre tasarım uygulamalarında göz önünde bulundurulacak kalite faktörü ise bir filtreye açılacak merkez frekansın filtrenin bant genişliğine oranıdır. YTD yapılarındaki dielektrik özelliğinden kaynaklı zayıflama ( $\alpha_d$ ) ifadesi Eş. 4 ile verilmiştir.

$$\alpha_d = \frac{k^2 \tan(\delta)}{2\beta} \quad (Np/m) \quad (4)$$

YTD yapılarındaki iletim kayıplarından kaynaklı zayıflama ( $\alpha_c$ ) ifadesi Eş. 5 ile verilmiştir.

$$\alpha_c = \frac{R_s}{a_{eff}^3 h \beta k \eta} (2h\pi^2 + a_{eff}^3 k^2) \quad (Np/m) \quad (5)$$

YTD yapılarındaki radyasyon kayıplarından kaynaklı zayıflama ( $\alpha_r$ ) ifadesi Eş. 6 ile verilmiştir.

$$\alpha_r = \frac{\left(\frac{1}{a_{eff}}\right) \left(\frac{d}{a_{eff}}\right)^{2,84} \left(\frac{s}{d}-1\right)^{6,28}}{4,85 \sqrt{\left(\frac{2a_{eff}}{\lambda_c}\right)^2 - 1}} \quad (dB/m) \quad (6)$$

Burada  $\lambda_c$  kesim dalga boyunu,  $\beta$  faz sabitini,  $k$  dalga sayısını,  $\tan \delta$  dielektrik kaybı,  $R_s$  yüzey direncini,  $\epsilon_r$  bağıl elektriksel geçirgenliğini ve  $\eta$  uzayın içsel empedansını simgelemektedir.

YTD'nin giriş-çıkış portları arasındaki total araya girme kaybı ( $IL$ ) Eş. 7'de ve YTD'nin giriş portuna geri yansıyan total geri dönüş kaybı ( $RL$ ) Eş. 8'de verilmiştir:

$$IL = -20 \log |S_{mn}| \text{ dB} \quad m, n = 1, 2 \quad (7)$$

$$RL = -20 \log |S_{nn}| \text{ dB} \quad n = 1, 2 \quad (8)$$

Burada  $S_{mn}$  değeri S-parametre değerini, göstermektedir.

Ticari eğilimler, fonksiyonelliği bir adım öne çıkarırken bunun yanında ürün hacminin düşürülmesi talebini de yaygınlaştırmış ve giderek boyutu küçültülen bütünsel devrelere ilgiyi daha da artırmıştır. İstenilen filtre değerlerini tasarımı ortaya koyabilmek için kalite faktörü çok dikkat edilen bir tasarım konusu olmuştur. Kalite faktörü ( $Q$ ) ifadesi Eş. 9 ile verilmiştir.

$$Q = \frac{\omega_0}{BW} \quad (9)$$

Burada  $\omega_0$  açılmalık merkez frekansı,  $BW$  bant genişliğini simgelemektedir.

### 3. Güncel YTD Filtre Tasarım Teknikleri ve Harmonikleri Baskılama Yöntemleri (Recent SIW Filter Design Techniques and Harmonics Suppression Methods)

İletim teknolojisi olan YTD filtre yapıları; 2000'li yılların başında ortaya çıkması ile beraber uydu yer terminali alıcı uygulamalarında [39]; otomotiv sanayisinde kısa orta ve uzun radar uygulamalarında [56]; 5. nesil mobil iletişim (5G) uygulamalarında [57] ve Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (FMSD) radarı uygulamalarında [58] olduğu gibi değişik mikrodalga frekans çalışmaları kullanılmıştır. Ayrıca 6. nesil mobil iletişimin (6G) ivme kazandığı ve son kullanıcılara 100 GBit/s kablosuz veri haberleşme hızının sunulacağı dikkate alındığında, 21. yüzyılın ikinci çeyreğinde mikrodalga geniş bant iletim sistemlerine olan talebin daha da artacağı düşünülmektedir [59].

1990 yılında üçüncü nesil fiber optik kabloların da geliştirilmesiyle beraber 2000 yılından önce şehirlerarası fiber optik ağlar fiziksel olarak tamamlanmıştır. İnternetin yaygınlaşmasıyla artan veri trafiğini karşılamada mevcut kablolu ağlar yetersiz kalmış yeni yatırımlarına ihtiyaç duyulmuştur. İlave fiber optik kablo yatırımı yapmak yerine mevcut fiber optik ağlarla çalışacak paket anahtarlama ve dalga boyu çoğullama tekniğini kullanan SDH (Synchronous Digital Hierarchy), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) vb. yeni nesil geniş bant iletim cihazları kullanmanın daha ekonomik olacağı düşünülmüştür. Fiber optik omurga (backbone) sistemlerinde 100-400 GBit/s veri haberleşme hızına sahip yeni nesil iletim geniş bant cihazları (SDH, CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) ve DWDM) yatırıma dâhil edilmiştir [60]. Fiber-optik kablo üzerinden yüksek veri iletimi sağlamak için iletim geniş bant cihazlarında kullanılan önemli teknolojilerden birisi frekans kanallarını ekleyip düşürebilen ekle/çıkır (add/drop) filtrelerdir. Bunun yanında kablosuz ağ üzerinden mobil kullanıcılara 100 GBit/s veri transferi imkânı sağlayan LTE/WiMAX teknolojisinde de ekle/çıkır filtreler kullanılmaktadır [61]. Bu yüksek veri hızı sayesinde internet ve bilgisayar teknolojileri, güvenlik, endüstriyel üretim, tekno-tarım, drone teknolojileri, sağlık hizmetleri, ev teknolojileri, enerji yönetimi

ve ulaşım hizmetleri gibi vb. alanlarda artan otomasyon kabiliyeti ile ergonomik ürün üretilebilmekte ve daha ucuz hizmet sunulabilmektedir. Literatürdeki farklı dalga kılavuzu topolojilerini içeren YTD filtre üretim teknolojisi örnekleri şunlardır:

- PCB dielektrik materyalin üst metal alanında simetrik veya asimetrik ince ve dar endüktif boşluklar bırakılarak edilen Çift Modlu YTD (ÇM-YTD) filtre [62].
- EM dalga yayılım doğrultusu boyunca YTD'nin fiziksel olarak ortadan ikiye ayrılmasıyla tasarılan küçük boyutlu Yarım Modlu YTD (YM-YTD) filtre [63].
- Baskı devre yöntemi kullanılarak üretilmiş dielektrik PCB yapıların katmanlı bir şekilde üst üste yerleştirilmesi ve bu katmanlarında hava boşlukları bırakılarak tasarılan Hava Boşluklu Katmanlı YTD (HBK-YTD) filtre [64].
- Filtre boyutunda büyük düşüş sağlayan, sinterleme tekniği ortadesinde toz halindeki elementlerin düşük sıcaklıklarda (900°C ve altı) katman pişirilerek üretilen çoklu yüzeyli seramik dielektrik taban ile altın/gümüş iletken yüzeyler içeren LTCC-YTD filtre [65].
- Mikroşerit iletim hattın YTD yapısına entegrasyonu ile tasarlanan Mikroşerit Entegreli YTD (ME-YTD) filtre [66].
- YTD'nin iletken pim sırasına simetrik/asimetrik iris pencereleri eklenerek elde edilen İris-YTD filtre [67].
- YTD mimarisinde iletken yüzünün üzerinde açılan yarık halka şeklindeki rezonatör geometrileriyle oluşturulmuş Yarık Halka Rezonatörlü YTD (YHR-YTD) filtre [68].
- Direnç değeri yüksek frekans çalışma bölgelerinde değiştirilebilen PIN, varaktör vb. diyot kullanılarak tasarlanan Diyotla Bant Genişliği Ayarlanabilir YTD (DBGA-YTD) filtre [69].
- YTD'nin taban iletkeninde boşluk bırakarak oluşturulan Kusurlu Zemin Yapısına Sahip YTD (DGS-YTD) filtre [70].
- Tekstil sektöründe 3D baskı teknolojisi ile tasarlanan Giyilebilir YTD (G-YTD) filtre [71, 72].
- YTD geometrisi içerisinde konumlandırılan ilave endüktif iletken çubuklarla (pim) oluşturulan Simetrik veya Asimetrik Pencereli YTD (ASP-YTD) filtre [73].
- 3D yazıcılarda PLA (Polylactic Acid) ve ABS (Akrilonitril Bütabiyen Stiren) gibi termoplastik özellikli filamentler kullanılarak tasarlanan 3D Baskılı YTD (3DB-YTD) filtre [74, 75].
- YTD'nin dielektrik PCB materyaline dikey şekilde saplanarak monte edilen dielektrik PCB materyal sayesinde filtre modelin üçüncü boyuta taşınmasıyla oluşturulan Üç Boyutlu YTD (ÜB-YTD) filtre [76].

Listelenen YTD filtre örnekleri mikroşerit tabanlı; seramik tabanlı; endüktif iletken pim/iris pencere ilaveli; ayarlanabilir ve aktif devre elemanı içeren; giyilebilir ve katmanlı/3D YTD filtreler olmak üzere altı ana başlık altında toplanmış ve literatürdeki bazı örnekler Bölüm 3.1-3.6'da detaylı olarak verilmiştir.

#### 3.1. Mikroşerit Tabanlı YTD filtreler (Microstrip-Based SIW Filters)

Karpuz vd. [77] çalışmalarında dikdörtgen dalga kılavuzuna göre oldukça kompakt olan endüktif slotlar içeren çift modlu iki portlu bant geçiren Mikroşerit-YTD(M-YTD) filtre tasarımı ortaya koymuşlardır. Tasarımda filtre üzerindeki slotlar filtrede pertürbasyon etkisinin oluşmasını sağlamıştır. Filtrenin üretiminde 1,27 mm kalınlığındaki ( $h$ ), 10,2 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0023 olan RT-Duroid alttaş malzeme kullanılmıştır. Şekil 6a'da gösterilen gerçekleştirilmiş bu dördüncü dereceden filtrenin ölçüm sonuçlarına göre 5,1 GHz merkez frekansında %4,5 3-dB kısmi bant genişliği elde edilmiştir. Eş. 9'a göre filtrenin kalite faktörü 23,18'dir. Konnektör besleme hatları hariç filtrenin boyutu 22,4×22,4×1,27 mm<sup>3</sup>'tür. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre en az araya girme kaybı 1,24 dB ve

bant-içi geri dönüş kaybı ise 15 dB'den daha iyidir. Simülasyon sonuçlarında ise araya girme kaybı 0,6 dB ve geri dönüş kaybı ise yaklaşık 20,3 dB'dir.

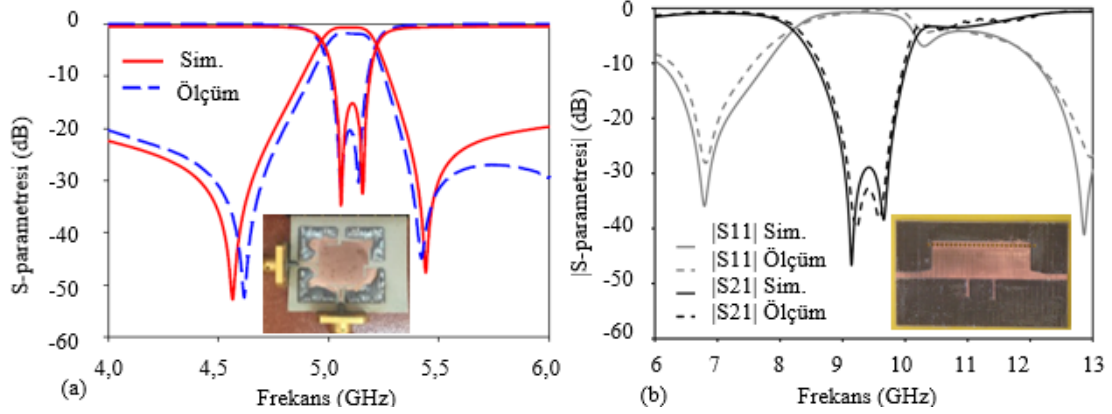
Macchiarella vd. [78] çalışmalarında, yarım modlu YTD yapıya mikroserit açık iki saplama ekleyerek dördüncü dereceden iki kutuplu bant durdurucu filtre tasarımı sunmuşlardır. Filtrenin üretiminde 0,508 mm kalınlığındaki ( $h$ ), 2,2 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0009 olan Tacocic TLY-5 alttaş malzeme kullanılmıştır. Şekil 6b'deki filtrenin boyutu  $6,5 \times 21,7 \times 2,2$  mm<sup>3</sup>'tür. Yarım modlu YTD filtrenin durdurma bandı 9,0-9,6 GHz frekans aralığındadır. Merkez frekansı 9,30 GHz'dir. Eş. 9'a göre filtrenin kalite faktörü 15,5'dir. Araya girme kaybı simülasyonda 30 dB iken, ölçüm sonucunda 35 dB'dir. Geri dönüş kaybı, simülasyon ve ölçümde 1 dB'den küçüktür.

Wang vd. [79], Şekil 7a'da gösterilen çalışmalarında zemini kusurlu dielektrik taban (DGS) kullanarak bir bant geçiren YTD filtre tasarlamışlardır. YTD filtre üretiminde 1,0 mm kalınlığında ( $h$ ), 2,65 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0035 olan PCB materyal (materyalin ismi çalışmada verilmemiştir) kullanmışlardır. Filtrenin hacmi  $11,77 \times 6,08 \times 21,00$  mm<sup>3</sup>'tür. Simülasyonda filtrenin 1.bantının merkez frekansı 4,87 GHz ve bant genişliği 510 MHz, ölçümde ise merkez frekans 4,9 GHz ve bant genişliği 600 MHz elde edilmiştir. Simülasyon ve ölçümde geri dönüş kaybı yaklaşık 20 dB civarındadır. Araya girme kaybı simülasyonda yaklaşık 1 dB iken, ölçümde 1 dB'den küçük bulunmuştur. Eş. 9'a göre kalite faktörü 8,17'dir. Li vd. [80], Şekil 7b'de görülen çalışmalarında YTD geometrisi içerisinde

dört adet tek döngülü tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörleri (CSRRs) ağız açıkları içeri ve dışarı bakacak şekilde yerleştirilerek dördüncü dereceden dual bantlı bant geçiren filtre tasarımı sunmuşlardır. C şeklindeki dört adet halka rezonatörünün filtrenin içerisine yerleştirilmesi, filtrenin boyutunu değiştirmemiştir. Filtrenin imalatında 0,508 mm kalınlığındaki ( $h$ ), 2,2 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0004 olan RT/Duroid 5880 alttaş malzeme kullanılmıştır. Filtrenin hacmi  $0,508 \times 25,3 \times 29$  mm<sup>3</sup>'tür. Filtrenin sırasıyla simülasyon ve ölçümdeki değerleri; araya girme kaybı 0,6 dB ve 0,9 dB, geri dönüş kaybı 20,5 dB ve 12,7 dB'dir. Bununla birlikte filtrenin simülasyon ve ölçüm değerlerine göre 3-dB kısmi bant genişliği %36,9 ve %25; bant genişliği 1,4 GHz ve 1,2 GHz ile merkez frekansı 3,82 GHz ve 3,78 GHz'dir (3,82 GHz merkez frekanslı 1. bant için). Eş. 9'a göre kalite faktörü 3,15'dir.

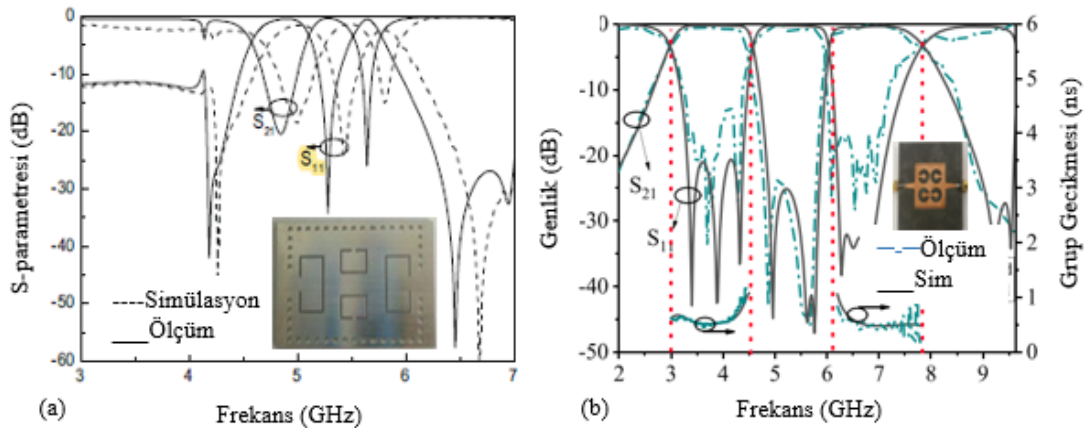
### 3.2. Seramik Tabanlı YTD Filtreler (Ceramic-Based SIW Filters)

Zhang vd. [81] uygulamalarındaki filtre yapısı, temel olarak eş düzlemlilik dalga kılavuzu (CPW) besleme yapılarından ve dört alt tabaka YTD rezonatöründen oluşmaktadır. Şekil 8a 'da gösterilen dördüncü dereceden bant geçiren filtre, kapasitif yüklü boşluklardan yararlanan bir çift iletim sıfırlı kompakt bir filtredir. Rezonatörlü seramik filtrenin üretiminde 7,8 dielektrik katsayılı ve 0,002 kayıp tanjantına sahip alttaş malzeme kullanılmıştır. Filtrenin dört katmanlı seramik teknolojiyle (LTCC) bir araya getirilmesi sayesinde boyut önemli ölçüde küçültülmüştür. İki seramik katmanın kalınlığı 0,0328 mm'dir. Şekil 8a'daki YTD filtre, 5. nesil mobil iletişim (5G)



Şekil 6. (a) Endüktif slotlar kullanan çift modlu YTD filtresinin tasarımı ve S-parametre değerleri [77] ve (b) Mikroserit saplamalı yarım modlu YTD filtre [78]

((a) Design of dual-mode SIW filter using inductive slots and S-parameter values, and (b) Half-mode SIW filter with microstrip stubs)



Şekil 7. (a) Dual bantlı bant geçiren DGS YTD filtre [79] ve (b) Tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörlü bant geçiren YTD filtre [80]

((a) Dual-band bandpass SIW filter with DGS, and (b) Bandpass SIW filter based on complementary split-ring resonator)

uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir 0,66×3,35×2,10 mm<sup>3</sup>'lük minyatür bir hacme sahiptir. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarında, bant geçiren filtrenin %8'lik 3-dB kısmi bant genişliği ile 28 GHz'lik bir merkez frekansına sahip olduğu görülmektedir. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçümlerde iletim bandında 1,26 dB'den daha küçük araya girme kaybı değeri bulunmuştur. 25,4 GHz'de 34,6 dB; 31,2 GHz'de ise 36,3 dB geri dönüş kaybı bulunmaktadır. Eş. 9'a göre LTCC YTD filtrenin kalite faktörü 12,5'dir.

Zhu vd. [82]'deki çalışmalarında yüksek performanslı bant geçiren filtre elde edebilmeyi amaçlamışlardır. Yüksek sıcaklıkta birlikte ateşlenen seramik (HTCC) teknolojisini kullanan yeni bir diyagonal dördüncü dereceden YTD filtre Şekil 8b'de görülmektedir. Filtrenin kapladığı hacim, 2,2×4,84×6,96 mm<sup>3</sup>'dir. Alt ve üst dielektrik yüzeylerin dielektrik katsayısı 37, kayıp tanjantı ise 0,0023'tür. Ara dielektrik yüzey ise 0,1 mm kalınlığında dielektrik katsayısı 3,0 ve yapışkanlık özelliği olan bir yüzeydir. Bant geçiren filtrenin merkez frekansı 2,25 GHz ve 3-dB kısmi bant genişliği %5,5'dir. Ölçüm ve simülasyonda araya girme kaybı sırasıyla 1,8 dB ve 1,45 dB'dir. Geri dönüş kaybı ise ikisinde de 15 dB'den daha iyidir. Eş. 9'a göre HTCC YTD filtrenin kalite faktörü 16,36'dır.

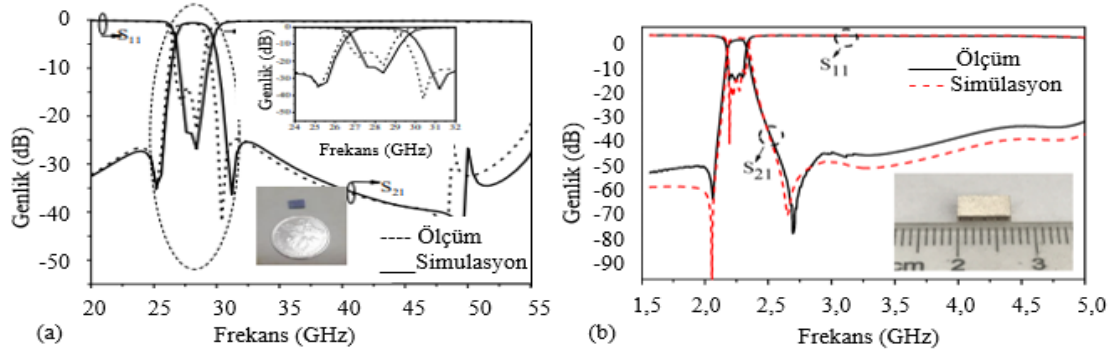
### 3.3. Endüktif İletken Pim/İris Pencere İlaveli YTD Filtreler (Inductive Conductor Pin/Iris Window Addition SIW Filters)

Nwajana vd. [83], merkez frekansı 1,684 GHz ve 3-dB kısmi bant genişliği %4 ve iletim bandında geri dönüş kaybı 20 dB olan üç kutuplu Chebyshev bant geçiren filtre hedeflemişlerdir. Şekil 9a'da görüldüğü gibi hedeflenen filtreyi elde edebilmek için endüktif iletken pimlerin YTD'nin iç kısmına ilavesiyle iki simetrik pencere oluşturulup bant geçiren YTD filtreyi üretmişlerdir. Daha iyi bir filtre

karakteristiği için YTD'deki tüm delikler Protomat C60 cihazında otomatik frezeleme ile açılmıştır. Filtrenin boyutu 111,75×37,25×1,27 mm<sup>3</sup>, dielektrik katsayısı 10,8 ve kayıp tanjantı 0,0023'tür. Filtrenin imalatında RT/Duroid 6010LM alttaş malzemesi kullanılmıştır. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçüm sonuçlarına göre araya girme kaybı 1,3 dB ve geri dönüş kaybı 16 dB'dir. Simülasyonda ise araya girme kaybı 1,3 dB ve geri dönüş kaybı 15 dB'dir. Filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarında merkez frekansı 1,68 GHz'dir. Ölçüm sonuçlarında bant genişliği yaklaşık 0,11 GHz'dir. Eş. 9'a göre YTD filtrenin kalite faktörü 15,27'dir.

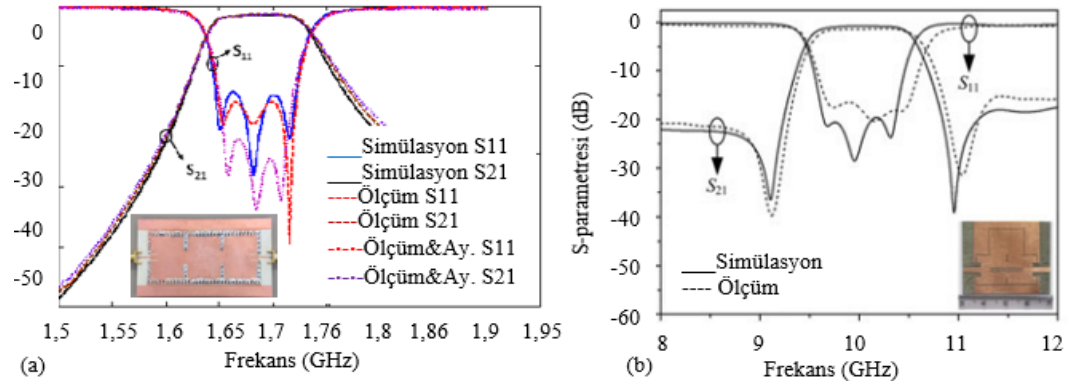
Azad vd. [84], 10 GHz merkez frekanslı ve 1 GHz bant genişliği olan dördüncü dereceden bant geçiren Chebyshev YTD filtre üretmeyi hedeflemişlerdir. Şekil 9b'de görülen iris şeklinde pencerelenmiş bant geçiren YTD filtre üretim çalışmalarında sunmuşlardır. Pencere iris YTD filtrenin hacmi 28×26,16×0,787 mm<sup>3</sup>, dielektrik katsayısı 2,2 ve kayıp tanjantı 0,0009'dur. Filtrenin imalatında Rogers RT Duroid 5880 alttaş malzemesi kullanılmıştır. Vektör ağ analizörü ile yapılan ölçüm sonuçlarına göre filtrenin merkez frekansı 10,13 GHz, 3-dB kısmi bant genişliği %10,8, iletim bandındaki geri dönüş kaybı 17 dB'den yüksek ve araya girme kaybı 1,5 dB'den düşüktür. Merkez frekans için simülasyon ile ölçüm sonuçları arasındaki kayma %1,3 (130 MHz)'dir. Eş. 9'a göre iris pencereli YTD filtrenin kalite faktörü 9,29'dur.

Zou vd. [85]'da, 9,77 GHz ile 10,27 GHz frekansları arasında (%5 3-dB kısmi bant genişliği) çalışacak beş simetrik pencereli YTD filtreyi sunmuşlardır. İris pencereli beşinci dereceden bant geçiren Chebyshev YTD filtrenin hacmi 110×18,4×1 mm<sup>3</sup>, dielektrik katsayısı 2,2 ve kayıp tanjantı 0,001'dir. Şekil 10'da görülen



Şekil 8. (a) Minyatürleştirilmiş seramik tabanlı (LTCC) bant geçiren YTD filtre [81] ve (b) Minyatürleştirilmiş seramik tabanlı (HTCC) bant geçiren YTD filtre [82]

((a) Miniaturized ceramic-based (LTCC) bandpass SIW filter, and (b) Miniaturized ceramic-based (HTCC) bandpass SIW filter)

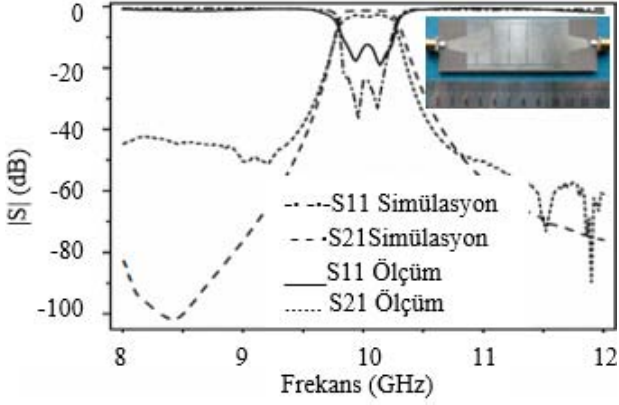


Şekil 9. (a) Simetrik pencereli bant geçiren YTD filtre [83] ve (b) İris pencereli YTD filtre [84]

((a) SIW filter based on symmetric window, and (b) SIW filter with iris window)



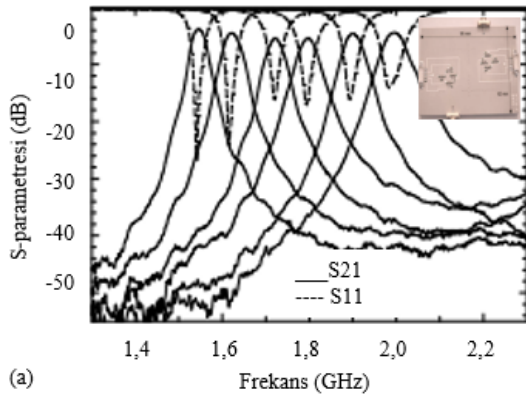
simülasyon sonuçlarına göre merkez frekans 10 GHz, 3-dB kısmi bant genişliği %5, araya girme kaybı 1,4 dB, geri dönüş kaybı ise 20 dB'den büyüktür. Ölçüm sonuçlarına göre ise 9,86 GHz-10,20 GHz frekans aralığında merkez frekansı 10,03 GHz, araya girme kaybı 2,9 dB, geri dönüş kaybı ise 13 dB'den büyüktür. Eş. 9'a göre iris pencere YTD filtrenin kalite faktörü 29,5'dir.



Şekil 10. Beş simetrik pencere YTD filtre [85] (SIW filter with five symmetric windows)

### 3.4. Ayarlanabilir ve Aktif Devre Elemanı İçeren YTD Filtreler (Tunable SIW Filters with Active Circuit Element)

Armendariz vd. [86] çalışmalarında, Şekil 11a'da görülen bant genişliği ayarlanabilir iki kutuplu yeni bir YTD filtre tasarımı yapmışlardır. Beş adet PIN diyotun anahtarlama elemanı olarak kullanıldığı bu filtrede frekans ayarı yapılabilen altı merkez frekans noktası oluşturulmuştur. PIN diyotlar; kapasitansı 0,23 pF, ters polarlama gerilimi 1,0 V ve 10 mA akımda ileri yönlü direnç değeri 1,2  $\Omega$  olan Phillips BAP55'dir. İki kutuplu filtrede, 1,55 GHz ila 2,0 GHz (%25 ayar oranı) arasında frekans ayarlaması yapılabilmektedir. Filtre fabrikasyonunda dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r$ ) 10,2, kalınlığı ( $h$ ) 2,54 mm ve kayıp tanjantı 0,0023 olan Rogers RT/Duroid 6010 ile dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r$ ) 10,2 ve kalınlığı ( $h$ ) 0,635 mm olan alt-üst iki laminant alttaş malzeme kullanılmıştır. Altı frekans pozisyonunda ayarında en yüksek kalite faktörü değerine sahip olan durum, 1,55 GHz merkez frekansa ve %2,4 kısmi bant genişliğine sahip pozisyonudur. Bütün diyot pozisyonlarında filtrenin araya girme kaybı 5,4 dB'den ve geri dönüş kaybı 14 dB'den iyidir. PIN diyotlu ayarlanabilir YTD filtrenin hacmi 34,5×64,2×3,175 mm<sup>3</sup>'tür. Eş. 9'a göre PIN diyotlu ayarlanabilir YTD filtrenin kalite faktörü 41,7'dir.



Deng vd. [87]'deki uygulamalarında 1,5 GHz merkez frekanslı bant genişliği ayarlanabilir (%10 ayar oranı) varaktör diyot temelli kapasitif halkalar kullanarak bir bant geçiren YTD filtre çalışmışlardır. Filtredeki her bir rezonatöre on altı adet Skyworks SMV1405 marka varaktör diyot radyal olarak yerleştirilmiştir (50 MHz için kapasite değeri 1,23 pF). Şekil 11b'de görülen ölçüm sonuçlarına göre 1,24 GHz ve 1,8 GHz arasında merkez frekans ayarı 1,5:1 ayar oranı, 190 ila 78 MHz arasında bant genişliği (BW) ayarı 2,44:1 ayar oranı bulunmuştur. En iyi filtre performansı 1,55 GHz'de 0,1 GHz bant genişliği olarak (3-dB kısmi bant genişliği %6,43) bulunmuştur. Filtrenin araya girme kaybı 3,18 dB'dir, geri dönüş kaybı ise 30 dB'den iyidir. Filtre üretiminde dielektrik katsayısı ( $\epsilon_r$ ) 2,94, kayıp tanjantı 0,0012 ve kalınlığı ( $h$ ) 3 mm olan Rogers RT/Duroid 6002 olan laminant alttaş malzeme kullanılmıştır. Varaktör diyotlu ayarlanabilir YTD filtrenin hacmi 118×42×2,94 mm<sup>3</sup>'tür. Eş. 9'a göre varaktör diyotlu ayarlanabilir YTD filtrenin kalite faktörü 15,5'dir.

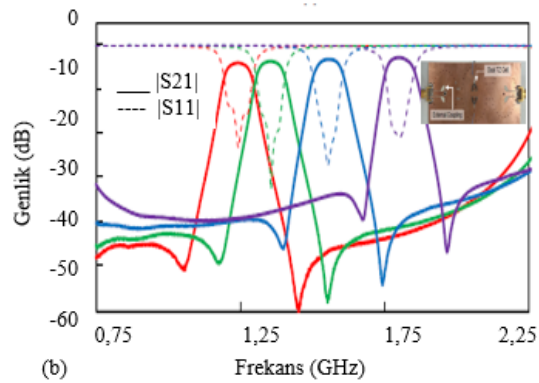
### 3.5. Giyilebilir YTD Filtreler (Wearable-based SIW Filters)

Moro vd. [88]'de çevre dostu giyilebilir mikrodalga devreler üzerinde çalışma yapmışlardır. Ortaya koydukları tekstil bazlı, esnek bant geçiren YTD filtre Şekil 12a'da görülmektedir. Giyilebilir materyalin dielektrik katsayısı 1,575, kayıp tanjantı 0,0238 ve yüksekliği 3,94 mm'dir. Tekstil temelli bant geçiren filtrenin ölçüm sonuçlarına göre bant genişliği 725 MHz, merkez frekansı 2,45 GHz, araya girme kaybı 2,3 dB, geri dönüş kaybı da 22 dB'den iyidir. Giyilebilir YTD filtrenin hacmi 56,3×45,2×3,94 mm<sup>3</sup>'tür. Eş. 9'a göre tekstil bazlı filtrenin kalite faktörü 3,38'dir.

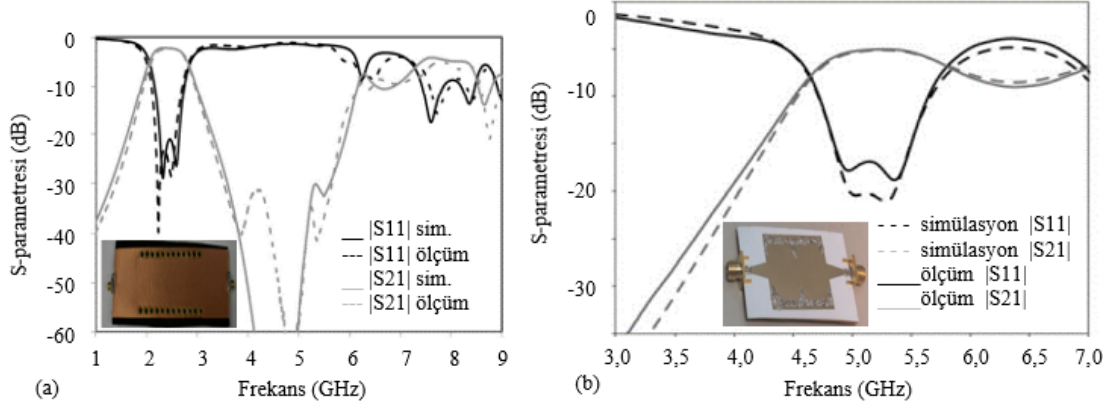
Moro vd. [89]'deki çalışmalarında çevre dostu, düşük maliyetli, giyilebilir esnek bant geçiren YTD filtre sunmuşlardır. Şekil 12b'de dielektrik katsayısı 2,8-3,1 arasında değişen ve kayıp tanjantı 0,055-0,065 aralığında değişen Kodak fotoğraf kâğıdının üzerine iletken mürekkep püskürtme Dimatix DMP2800 yazıcıda basılarak elde edilmiş YTD filtre görülmektedir. Mürekkep püskürtmeli baskılı esnek YTD filtrenin hacmi 24×39,34×0,69 mm<sup>3</sup>'tür. Ölçüme göre filtrenin 5 GHz'de araya girme kaybı 5 dB'dir. Geri dönüş kaybı 16 dB'den iyidir. Filtrenin bant genişliği de yaklaşık 0,8 GHz'dir. Eş. 9'a göre Mürekkep püskürtme baskılı temelli esnek giyilebilir YTD filtrenin kalite faktörü 6,25'dir.

### 3.6. Katmanlı/3D YTD Filtreler (Layered/3D SIW Filters)

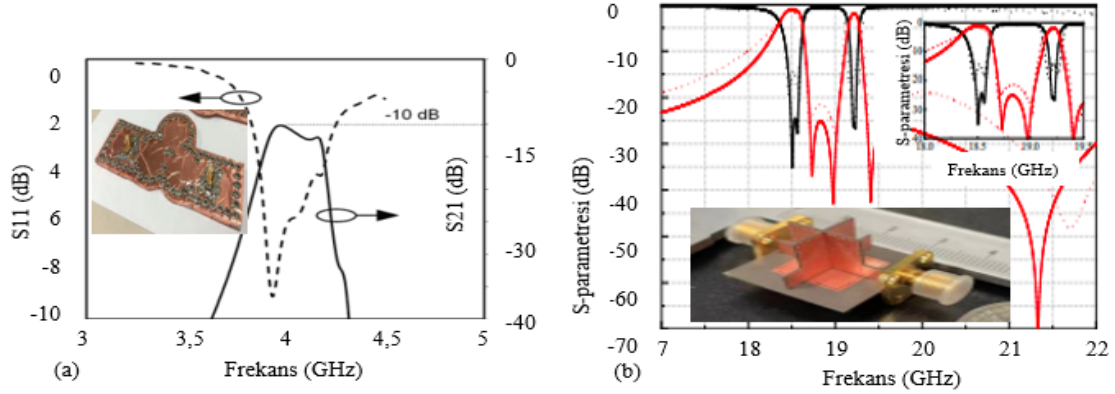
Tomassoni vd. [90]'deki çalışmalarında, ABS filament ile %100 doluluklu 3D baskı yöntemi kullanarak basılmış ve 3D baskılı dalga kılavuzuna [91] göre daha minyatür olan 3D baskılı düzlemsel bant



Şekil 11. (a) PIN diyotlarla ayarlanabilir bant geçiren YTD filtre [86] ve (b) Varaktör diyotlarla ayarlanabilir bant geçiren YTD filtre [87] ((a) Tunable SIW bandpass filters with PIN diodes, and (b) Tunable SIW bandpass filters with varactor diodes)



Şekil 12. (a) Tekstil bazlı giyilebilir YTD filtre [87] ve (b) Mürekkep püskürtme baskılı esnek giyilebilir YTD filtre [88]  
(a) Textile-based wearable SIW filter, and (b) Flexible wearable SIW filter based on inkjet printing)



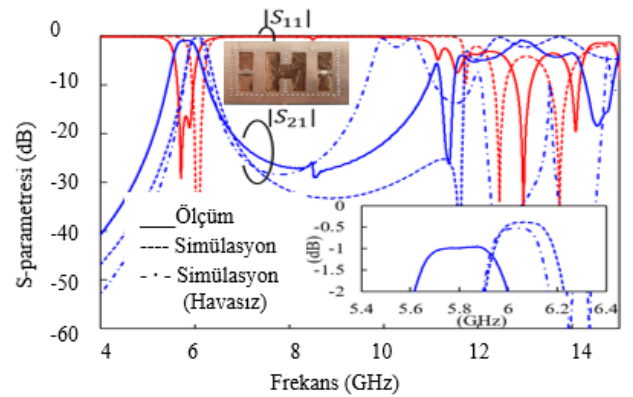
Şekil 13. (a) 3D Baskılı YTD Filtre [90] ve (b) Parçalı tip 3D bant geçiren YTD filtre [92]  
(a) 3D printed SIW filter, and (b) Split type 3D bandpass SIW filter)

geçiren bir YTD filtre üzerinde çalışmışlardır. ABS filamentle basılmış malzemenin kayıp tanjantı 0,02 ve dielektrik katsayısı 2,7'dir. Simülasyonda merkez frekans 3,86 GHz ve araya girme kaybı 7,3 dB'dir. Geri dönüş kaybı 20 dB'den iyidir. Şekil 13a'daki ölçüm sonuçlarına göre 3,96 GHz merkez frekans ve 3,70-4,25 GHz bant genişliği elde edildiği görülmektedir. Filtrenin araya girme kaybı 10 dB, geri dönüş kaybı 8 dB civarındadır. Resimdeki çap uzunluğu verilen daireye göre 3D YTD filtre yaklaşık olarak 76,8×19,2×2 mm<sup>3</sup> boyutundadır. Eş. 9'a göre 3D baskılı filtrenin kalite faktörü 1,07'dir.

Zhou vd. [92] uygulamalarında Şekil 13b'de yer alan LEGO tarzı montaj edilen 3D boyutlu çok bantlı bant geçiren ikinci dereceden YTD filtre sunmuşlardır. Filtrenin fabrikasyonunda dielektrik katsayısı 2,2, kayıp tanjantı 0,0009 ve yüksekliği 0,508 mm olan Rogers RT/Duriod 5880 alttaş malzeme kullanılmıştır. Parçalı tip 3D YTD filtrenin geri dönüş değeri 24,88 dB ve araya girme kaybı değeri 2,55 dB olarak ölçülmüştür. 1. bantı 18,22 GHz merkez frekanslı ve 0,45 GHz bant genişliğindedir. Filtrenin hacmi 12,2×12,2×13,016 mm<sup>3</sup>'tür. Eş. 9'a göre parçalı tip 3D bant geçiren filtrenin kalite faktörü 40,49'dir.

Shishido vd. [93], Şekil 14'de verilen çalışmalarında YTD'nin üst iletken katmanında ve dielektrik alttaş malzemesinde diyagonal fiziksel hava boşlukları bırakarak bant geçiren filtreyi elde etmeyi hedeflemişlerdir. Filtrenin fabrikasyonunda 0,75 mm kalınlığındaki ( $h$ ) 3,37 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,003 olan Panasonic substrate Megtron6 R-5775 (N) alttaş malzeme kullanılmıştır. Tasarımın hacmi 2,8×4,2×0,75 mm<sup>3</sup>'tür. Filtre 6,0-11,7 GHz arası iletim bandına sahiptir. Simülasyonda araya girme kaybı 0,3 dB ve

geri dönüş kaybı 42 dB'dir. 6,0 GHz merkez frekansında 3-dB kısmı bant genişliği %0,9'dur. Ölçüm sonuçlarına göre iletim bandı 5,8 GHz ve 3-dB kısmı bant genişliği %4,4 iken araya girme kaybı 1,0 dB, geri dönüş kaybı 16 dB'dir. Eş. 9'a göre filtrenin kalite faktörü değeri 22,74'dir.



Şekil 14. Hava boşluklu YTD filtre [93] (Air-filled SIW Filter)

Altı ana başlık altında değerlendirilmiş olan literatürdeki güncel örnek YTD filtre teknolojileri filtre parametreleriyle beraber Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'deki sonuçlar incelendiğinde, Armendariz vd. [86]'nin çalışmalarındaki filtre tasarımı en iyi kalite faktörü değerine (41,70)

**Tablo 1.** YTD filtre tasarımlarının karşılaştırılması (Comparison of SIW filter design)

Referans	YTD Filtre Tasarımı	Merkez Frekans/ Bant Genişliği (GHz)	Kayıp Tanjant ( $\tan(\delta)$ )	Yansıma Katsayı-sı ( $S_{11}$ ) (dB)	İletim Katsayı-sı ( $S_{21}$ ) (dB)	$\epsilon_r$	Kalite Faktörü (Q)	Boyut (mm×mm×mm)	Hacim (mm <sup>3</sup> )
Karpuz vd. [77]	M-YTD	5,10/0,23	0,0023	-15,0<	<-1,24	10,2	23,18	22,40×22,4×1,27	637,24
Macchiarella vd. [78]	M-YTD	9,30/0,60	0,0009	<-1,0	-35	2,20	15,50	6,50×21,70×2,20	310,31
Wang vd. [79]	M-YTD	4,90/0,60	0,0035	-20,0	-1,0	2,65	8,17	11,77×6,80×21,00	1680,76
Li vd. [80]	M-YTD	3,78/1,20	0,0004	-12,7	-0,9	2,20	3,15	0,51×25,30×29	372,72
Zhang vd. [81]	Seramik-YTD	28,00/2,24	0,002	-34,6<	<-1,3	7,80	12,50	0,66×3,35×2,10	4,64
Zhu vd. [82]	Seramik-YTD	2,25/2,24	0,0002	-15,0<	-1,8	37,0	16,36	2,20×4,84×6,96	74,11
Nwajana vd. [83]	End./İris İlaveli-YTD	1,68/0,11	0,0023	-16,0	-1,3	10,8	15,27	111,8×37,2×1,27	5286,61
Azad vd. [84]	End./İris İlaveli-YTD	10,13/1,09	0,0009	-17,0<	-1,5<	2,20	9,29	28×26,16×0,787	576,46
Zou vd. [85]	End./İris İlaveli-YTD	10,03/0,34	0,001	-13,0<	-2,9	2,20	29,50	110×18,40×1,00	2024,00
Armendariz vd. [86]	B.G. Ayarlı-YTD	1,55(%25)/0,08	0,0023	-14,0<	-5,4	10,2	41,70	34,50×64,20×3,175	7032,31
Deng vd. [87]	B.G. Ayarlı-YTD	1,55/0,10	0,0012	-30,0<	-3,2	2,94	15,50	118×42,00×2,94	14471,5
Moro vd. [88]	Giyilebilir-YTD	2,45/0,73	0,0238	-22,0<	-2,3<	1,58	3,38	56,30×45,2×3,94	10026,4
Moro vd. [89]	Giyilebilir-YTD	5,00/0,80	(0,055-0,065)	-16,0<	-5,0	2,8-3,1	6,25	24×39,34×0,69	651,47
Tomassoni vd. [90]	Katmanlı/ 3D-YTD	3,96/(3,7-4,25)	0,02	-8,00-	-10,0	2,7	1,07	76,80×19,2×2,00	2949,12
Zhou vd. [92]	Katmanlı/ 3D-YTD	18,22/0,45	0,0009	<-24,9	-2,6<	2,20	40,49	12,20×12,20×13,02	1964,69
Shishido vd. [93]	Katmanlı/ 3D-YTD	5,80/0,26	0,003	-16,0	-1,0	3,37	22,74	2,80×4,20×0,75	8,82

ve Zhang vd. [81]'nin çalışmalarındaki filtre tasarımı da en küçük filtre hacmine (4,64 mm<sup>3</sup>) sahiptir. Eşdeğer bir iletkenlik kaybı olarak Pozar [52]'de belirtilen kayıp tanjantın değeri en küçük (0,0002) olduğu alttaş malzeme Zhu vd. [82]'nin çalışmasında kullanılmıştır. Zhou vd. [103] [92]'nin filtre tasarımı en yüksek çalışma frekansına (18,22 GHz) ve en iyi ikinci kalite faktörü değerine (40,49) sahiptir.

### 3.7. YTD Filtredeki Harmonikler ve Harmoniklerin Baskılanması (Harmonics in SIW Filter and Suppression of Harmonics)

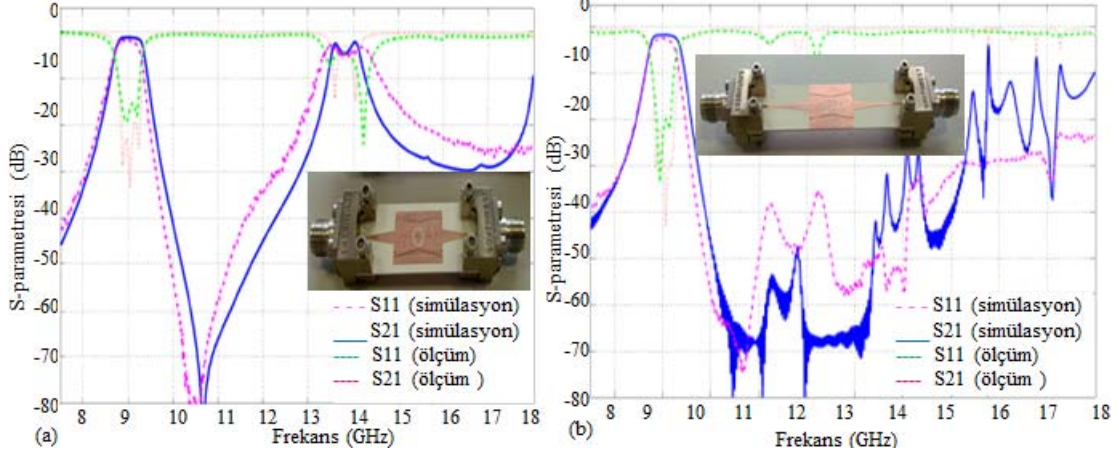
YTD yapıları; filtre tasarımlarında kullanıldığı gibi anten [94], güç yükselteç [95], güç bölücü [96], rezonatör [97], yönlü kuplör [98] ve sirkülör [99] uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu YTD uygulamalarında dikkat edilmesi gereken önemli bir konu da harmonik etkilerdir. YTD yapıları da harmoniklerin etkisine maruz kalmakta ve iletim kayıplarına ( $\alpha_c$ ) neden olmaktadır [100]. Harmonikler, doğrusallıktan uzak (nonlineer) devreler nedeniyle oluşur. Gerilim ve akımın sinüs eğrisi formu bozulur. Bu duruma sebep olan elemanlara mikrodalga devrelerine entegre çalışan frekans dönüştürücüler, anahtarlamalı güç üniteleri, transformatörler, çeviriciler gibi devre elemanları örnek gösterilebilir [101]. YTD filtrelerdeki üst modları ve harmonikleri baskılamak için filtre tasarımına pasif devreler ekleme, etkin bir çözüm metodu olarak kullanılmaktadır. Şekil 15'deki simülasyon ve ölçüm sonuçlarına göre DGS'li YTD filtrenin harmonik bantı büyük oranda baskılandığı görülmektedir.

Çalışma [102]'de, Şekil 15a'da görülen merkez frekansı 9 GHz ve bant genişliği 500 MHz olan üçüncü dereceden YTD bant geçiren YTD filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarında yaklaşık 13-15 GHz frekans aralığındaki TM (Transverse magnetic) üst modu ( $1,5 \times f_{\text{merkez}}$ ) görülmektedir. Bu üst modun baskılanması için filtrenin alt iletken katmanına üç adet dambil şeklinde yarık ilave edilerek bir DGS oluşturulmuştur. Filtrenin üretiminde 0,635 mm kalınlığında ( $h$ ), 9,8 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,002 olan Rogers TMM10i alttaş malzeme tercih edilmiştir. Şekil 15b'deki simülasyon ve ölçüm sonuçlarına göre DGS'li YTD'nin filtrenin harmonik bantı büyük oranda baskılandığı görülmektedir. Üst modun baskılanması için uygulanan metodun filtrenin boyutunu artırmadığı görülmektedir.

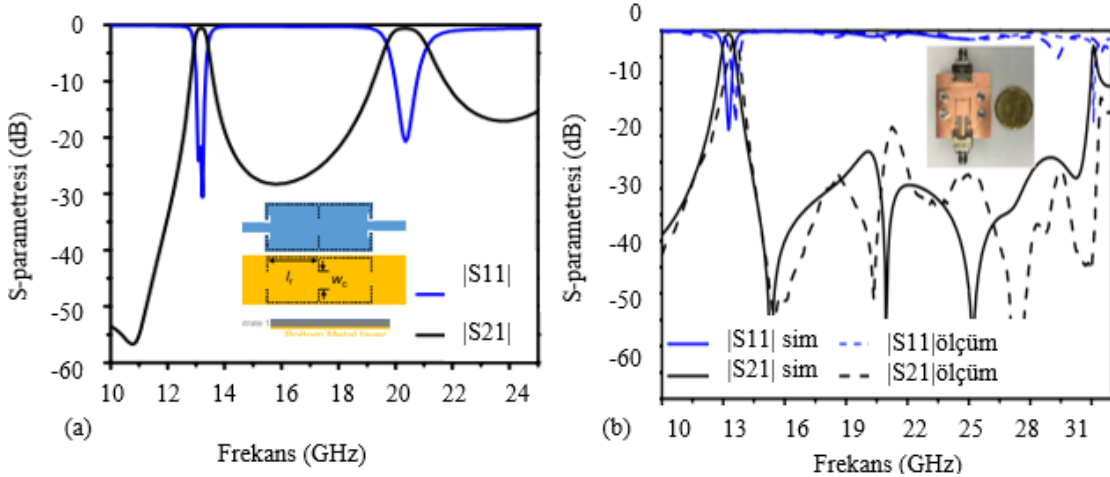
Jia vd. [103]'de katmanlı bir YTD filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. 13,00 GHz merkez frekanslı 600 MHz bant genişliğe sahip filtrenin 20,5 GHz merkez frekanslı TM üst modu ( $1,58 \times f_{\text{merkez}}$ ) Şekil 16'da görülmektedir. İkinci dereceden YTD filtrenin üretiminde 0,762 mm kalınlığında ( $h$ ), 2,94 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0012 olan Rogers RT/Duroid 6002 alttaş malzeme tercih edilmiştir ve bu üst modu yok etmek için tasarıma bir orta katman ilave edilmiştir. Eklene katman üzerinde iki adet  $d_{r1}$  ve bir adet  $d_{r2}$  çaplı üç adet dairesel boşluk konulmuştur. Şekil 16b'de görüldüğü gibi harmonik bant baskılanmıştır. Uygulanan metotla filtrenin boyutu  $9,1 \times 9,1 \times 0,762$  mm<sup>3</sup> (63,10 mm<sup>3</sup>) artmıştır.

Ramalingam vd. [104]'de, kare yarık halkaya sahip DGS temelli bant geçiren iki adet YTD filtre tasarlanmıştır. Filtrenin üretiminde 0,5 mm kalınlığında ( $h$ ), 3,5 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0037 olan Rogers alttaş malzeme tercih edilmiştir. 11,63 GHz merkez

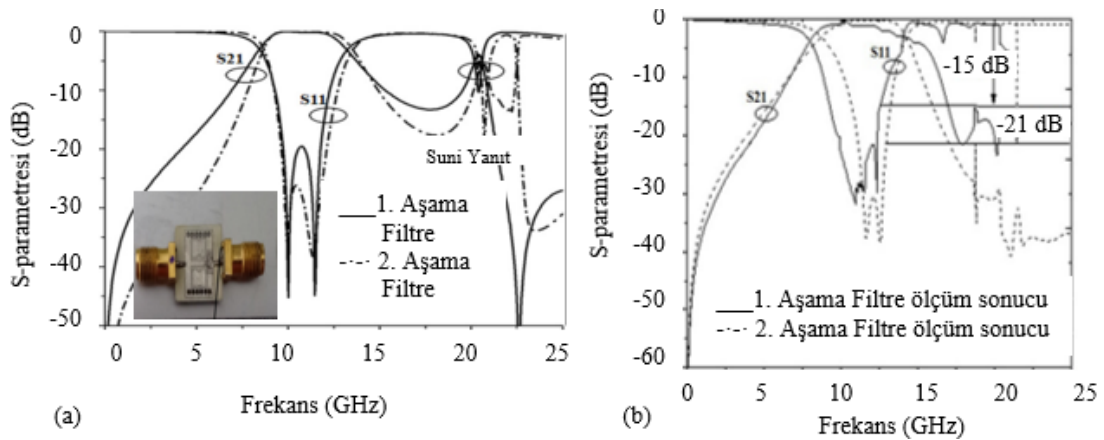
frekanslı ve 5,108 GHz bant genişlikli filtrenin frekans yanıtı Şekil 17'de yer almaktadır. Bu filtrelerdeki 22 GHz merkez frekanslı ( $1,89 \times f_{\text{merkez}}$ ) TM üst modu, filtrenin giriş ve çıkış portlarına yakın noktadaki iletim hattına  $90^\circ$  dik olarak açık iki saplama eklenerek



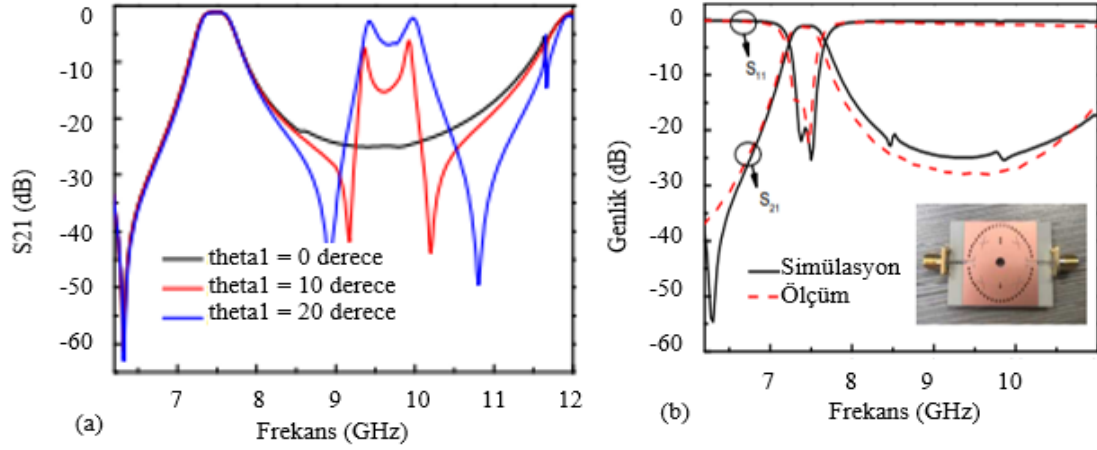
Şekil 15. Bant geçiren YTD filtre: a) DGS'siz S-parametre sonucu ve b) DGS'li S-parametre sonucu [102]  
(Band pass SIW filter: a) S-parameter result without DGS, and b) S-parameter result with DGS)



Şekil 16. Katmanlı bant geçiren YTD filtre: a) Dairesel boşluksuz filtre yanıtı ve b) Dairesel boşluklu filtre yanıtı [103]  
(Layered bandpass SIW filter: a) Filter response without circular gap, and b) Filter response with circular gap)



Şekil 17. Kare halka yarıklı bant geçiren YTD filtre: a) Harici saplamasız S-parametre sonucu ve b) Harici saplamalı S-parametre sonucu [104]  
(Square ring slit bandpass SIW filter: a) S-parameter result without external stubs, and b) S-parameter result with external stub)



**Şekil 18.** Frekans ayarlanabilir bant geçiren YTD filtre: a) İlave iletken deliksiz S-parametre sonucu ve b) İletken delikli S-parametre sonucu [105] (Frequency adjustable bandpass SIW filter: a) S-parameter result without additional conductor holes, and b) S-parameter result with conductive holes)

**Tablo 2.** YTD filtrelerde üst modları baskılama (Suppressing high modes in SIW filters)

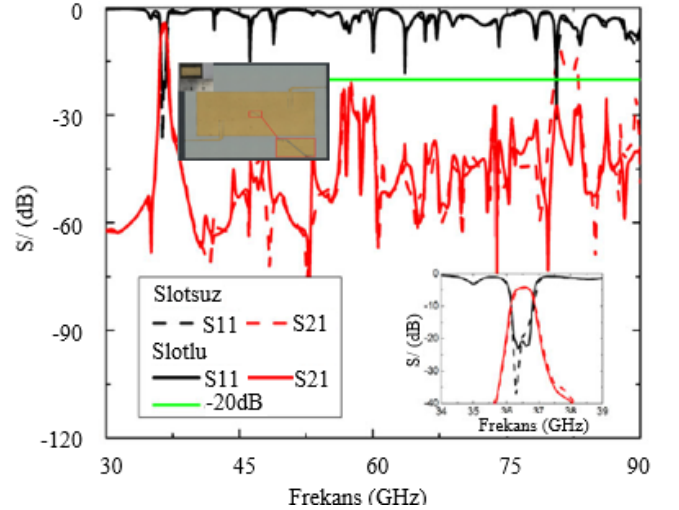
Referans	YTD Filtre Tasarımı	Merkez Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Kayıp Tanjant ( $\tan(\delta)$ )	$\epsilon_r$	Üst modlar	Boyut (mm×mm×mm)	Üst Modları Baskılama Kaynaklı Hacim Artışı (mm <sup>3</sup> )
Kurudere vd. [102]	M-YTD	9,00	0,50	0,002	9,8	$1,5 \times f_{\text{merkez}}$	20,3×7,1×0,635	-
Jia vd. [103]	Katmanlı-YTD	13,00	0,60	0,0012	2,94	$1,58 \times f_{\text{merkez}}$	9,1×18,3×1,524	63,10
Ramalingam vd. [104]	M-YTD	11,63	5,108	0,0037	3,50	$1,89 \times f_{\text{merkez}}$	11,5×11,5×0,5	25,03
Li vd. [105]	M-YTD	7,5	1,00	0,0027	3,55	$1,6 \times f_{\text{merkez}}$	3,14 × 169 × 0,51	-
Liu vd. [106]	Seramik-YTD	36,48	0,65	0,0001	3,8	$8 \times f_{\text{merkez}}$	12,5×19,7×0,23	-

Şekil 17b'de görüldüğü gibi baskılanmıştır. TM üst modun baskılanması için uygulanan metod filtrenin boyutunda  $11,5 \times 4,4 \times 0,5$  mm<sup>3</sup> (25,03 mm<sup>3</sup>) bir hacim artışı getirmiştir.

Li vd. [105]'de 7,5 GHz merkez frekanslı 1 GHz bant genişliğine sahip frekans ayarlanabilir rezonatörlü YTD bant geçiren filtre sunulmuştur. Filtrenin üretiminde 0,508 mm kalınlığında ( $h$ ), 3,55 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0027 olan Roger RO4003 alttaş malzeme tercih edilmiştir. Şekil 18a'da yer alan filtrenin 9 GHz sonrasındaki TM üst modu ( $1,6 \times f_{\text{merkez}}$ ), bu filtreye üç adet iletken delik ilavesi yapılarak baskılanmıştır. Şekil 18b'de filtrenin frekans tepkisinde harmonik bantların baskılanması görülmektedir. Filtrenin TM üst modunun baskılanması için uygulanan metod filtrenin boyutunu artırmamıştır.

Liu vd. [106]'de, Şekil 19'da görülen 36,48 GHz merkez frekanslı %1,78 3-dB kısmi bant genişliğine sahip bir bant geçiren seramik tabanlı YTD filtre sunulmuştur. Filtrenin üretiminde 230 µm kalınlığında ( $h$ ), 3,8 dielektrik katsayılı ( $\epsilon_r$ ) ve kayıp tanjantı 0,0001 olan quartz alttaş malzeme tercih edilmiştir. Bu üst modun baskılanması için dördüncü dereceden Chebyshev YTD filtrenin alt ve üst iletken katmanına yarı ilave edilerek bir DGS oluşturulmuştur. Bu sayede 110 GHz'e ( $8 \times f_{\text{merkez}}$ ) kadar TM üst modu baskılanmıştır. Filtrenin TM üst modlarının baskılanması için uygulanan metod filtrenin boyutunu artırmamıştır.

Literatürdeki YTD filtre üretim teknolojilerinde güncel harmonik baskılama örnekleri Tablo 2'de verilmiştir.



**Şekil 19.** Seramik tabanlı bant geçiren YTD filtre [106] (Ceramic-based bandpass SIW filter)

Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde, Liu vd. [106]'nin çalışmalarındaki seramik filtrede en geniş bantta harmonik baskılama ( $8 \times f_{\text{merkez}}$ ) yapılmıştır. Bunun yanında filtre hacmi artmamıştır. Jia vd. [103]'nin çalışmalarındaki katmanlı filtrede üst mod baskılama için en yüksek hacim artışı (63,10 mm<sup>3</sup>) yaşanmıştır.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu makalede, düzlemsel dalga kılavuzu olan YTD'nin yapısı, YTD filtre teknolojileri ve bu teknolojiler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Araştırmacılar YTD teknolojisine olan ilgiyi artırmak ve YTD tabanlı filtre devrelerinin daha fazla geliştirilmesi için temel tasarım kuralları ortaya konulup tartışılmıştır. YTD, mikroserit veya dikdörtgen dalga kılavuz temelli filtrelerin eksiklikleri telafi etmekte ve tasarımda ergonomiklik sağlamaktadır. Geleneksel dalga kılavuzu yapılarına göre daha az karmaşıktır ve yüksek frekansta kullanılan son teknolojidir.

Farklı YTD filtre teknolojisi kullanan literatürdeki bazı çalışmalar Tablo 1'de listelenmiş ve bu YTD filtre teknolojileri kalite faktörü, yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ), iletim katsayısı ( $S_{21}$ ) ve hacim açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de listelenmiş literatürdeki güncel YTD filtre üretim teknolojileri filtre parametreleriyle kıyaslandığında PIN/Varaktör diyot kullanarak bant genişliği ayarlanabilen YTD filtrelerin en iyi kalite faktörü değerine sahip olduğu ve bu nedenle üretim teknolojileri içerisinde bir adım öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca günümüzde oldukça önemli olan filtre tasarımlarının diğer devrelerle entegrasyonu açısından da seramik tabanlı S-YTD filtreler en küçük hacim ile ön plana çıkmaktadır.

Tablo 1'de en yüksek kalite faktörü değeri olarak ikinci sırada yer alan Katmanlı/3D-YTD filtre çalışmalarının, hacim olarak en küçük hacimli seramik tabanlı S-YTD filtrelerin hacimlerine oldukça yakın olduğu (1,9 kat) görülmektedir. Katmanlı/3D-YTD filtrelerin, 3D baskı teknolojisindeki ilerlemeler ile seramik tabanlı S-YTD filtrenin hacmine inebileceği bu nedenle filtre tasarımı oldukça yaygın olarak kullanacağı öngörülmektedir. Bunun yanında giyilebilir tekstil temelli sensörlerin gelişiminin ilerleme kaydetmesi nedeniyle [107] başta endüstriyel sporlarda profesyonel sporcuların performanslarının artırılmasında, hastaların önemli sağlık verilerine anlık erişebilme ve monitörleme kolaylığında [108], giyim sektöründe daha fonksiyonel giysi tasarımlarında [109] vs. kendine yer bulacağı düşünülmekte, giderek artan veri transfer hızı talebi için yüksek frekanslarda Giyilebilir-YTD filtre teknolojisinin kullanımının daha da artacağı düşünülmektedir.

Mürekkep püskürtmeli baskı temelli giyilebilir YTD yapıları, esnekliği nedeniyle anten teknolojisi tasarımlarında kullanılmaktadır [110]. Bu mürekkep püskürtmeli baskı temelli giyilebilir YTD antenlerin, gündelik yaşamda giderek yaygınlaşan kablosuz cihazların tasarımına katacağı esneklikler düşünüldüğünde cihaz tasarımlarında bu anten teknolojisine eğilimin de giderek artacağı düşünülmektedir [111]. Ayrıca hacim artışına gidilmeden seramik tabanlı filtre ileten katmanlarına yarıklar açılarak üst mod baskılama ( $8 \times f_{merkez}$ ) gerçekleştirilmiştir [106]. Bu filtre tekniğinin çalışmalarda giderek yaygınlaşacağı düşünülmekte ve 5. nesil mobil iletişim (5G) uygulamalarında filtre/anten yapılarının öneminin daha da artacağı öngörülmektedir [112].

#### Kaynaklar (References)

- Moscato, S., Silvestri, L., Delmonte, N., Pasian, M., Bozzi, M., Peregrini, L., SIW components for the Internet of Things: Novel topologies, materials, and manufacturing techniques, 2016 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), TX- USA, 78-80, 24-27 Jan, 2016.
- Moradi, B., Fernández-García, R., Gali, I.G., E-Textile Metamaterials: Stop Band Pass Filter, Appl. Sci., 11 (22), 2021.
- Nguyen, N.H., Parment, F., Ghiotto, A., Wu, K., Vuong, T.P., A fifth-order air-filled SIW filter for future 5G applications, 2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Amsterdam-Netherlands, 20-22 September, 2017.
- Waldschmidt, C., Hasch, J., Menzel, W., Automotive Radar-From First Efforts to Future Systems, IEEE J. Microwaves, 1, 135-148, 2021.
- ASELSAN A.Ş. Sürü Teknolojileri. <https://m.aselsan.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/suru-teknolojileri-3146>. Yayın tarihi Ocak 7, 2022. Erişim tarihi Ağustos 6, 2022.
- Nwajana, A.O., Obi, E.R., A Review on SIW and Its Applications to Microwave Components, Electronics, 11 (7), 2022.
- Güvenli K., Mikrodalga frekanslarında kullanılacak yüzey tümleşik dalga kılavuzu filtrelerinin tasarımı, gerçekleştirilmesi ve optimizasyonu, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2022.
- Hwang, R.B., Chin, C.Y., Lin, Y.D., Kitazawa, T., Wu, C.W., Electromagnetic interference in substrate-integrated waveguides circuit and its suppression technique, 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, April 12-16, 2010.
- D'Auria, M., Otter, W.J., Hazell, J., Gillatt, B.T.W., Long-Collins, C., Ridler, N. M., Lucyszyn, S., 3-D Printed Metal-Pipe Rectangular Waveguides, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Tech., 5 (9), 1339, 2015.
- Mohamed, I., Sebak, A., Broadband Transition of Substrate-Integrated Waveguide-to-Air-Filled Rectangular Waveguide, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 28 (11), 966-968, 2018.
- Mineo M., Paoloni, C., Double-Corrugated Rectangular Waveguide Slow-Wave Structure for Terahertz Vacuum Devices, IEEE Transactions on Electron Devices, 57 (11), 3169-3175, 2010.
- Zhang, B., Zirath, H., Metallic 3-D Printed Rectangular Waveguides for Millimeter-Wave Applications, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 6 (5), 796-804, 2016.
- Verma, A.K., Singh, P., Matekovits, L., Strip-Width and Slot-Gap Dependent Equivalent Isotropic Substrate and Dispersion Characteristics of Asymmetric Coplanar Waveguide, Symmetric Coplanar Waveguide and Micro-Coplanar Strip Line on Anisotropic Substrates, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 62 (10), 2232, 2014.
- Lee, Y.C., Guo, J.C., Wang, C.L., Compact and Broadband Microstrip Line-to-Rectangular Waveguide Transition Using Magnetic Coupling Resonator and Ground Resonators, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 69 (12), 5300-5304, 2021.
- Chen, C.J., Design of Artificial Transmission Line and Low-Pass Filter Based on Aperiodic Stubs on a Microstrip Line, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 4 (5), 922-928, 2014.
- Nandi, U., Zaman, A.U., Vosoogh, A., Yang, J., Novel Millimeter Wave Transition From Microstrip Line to Groove Gap Waveguide for MMIC Packaging and Antenna Integration, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27 (8), 691-693, 2017.
- H. Wang, H., Fang, D.G., Zhang, B., Che, W.Q., Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 58 (3), 640-647, 2010.
- Çelenk E., Türker Tokan N., Frequency Scanning Conformal Sensor Based on SIW Metamaterial Antenna, IEEE Sensors Journal, 21 (14), 16015-16023, 2021.
- Zhang, H., Kang, W., Wu, W., Miniaturized Dual-Band SIW Filters Using E-Shaped Slotlines With Controllable Center Frequencies, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 28 (4), 311-313, 2018.
- Li, M., Chen, C., Chen, W., Miniaturized Dual-Band Filter Using Dual-Capacitively Loaded SIW Cavities, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27 (4), 344-346, 2017.
- Herbst, H.F., Roux, P.I., Jackman, K., Fourie, C.J., Improved Transmission Line Parameter Calculation Through TCAD Process Modeling for Superconductor Integrated Circuit Interconnects, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 30 (7), 1-4, 2020.
- Okai, D., Kusunoki, M., Mukaida, M., Ohshima, S., New surface resistance measurement technique of high-temperature superconductors using a probe coupling microstrip line resonator, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 11 (1), 3078-3081, 2001.
- Mansour, R.R., Microwave superconductivity, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 50 (3), 2002.
- Heng, Y., Guo, X., Cao, B., Wei, B., Zhang, X., Zhang, G., Song, X., Dual-Band Superconducting Bandpass Filter Using Stub-Loaded Resonators With Controllable Coupling and Feeding Structures, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 23 (8), 400-402, 2013.

25. Baena, J.D., Bonache, J., Martin, F., Sillero, R.M., Falcone, F., Lopetegui, T., Laso, M. A. G., Garcia-Garc, J., J 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.
26. Vélez, P., Su, L., Grenier, K., Mata-Contreras, J., Dubuc, D., Martín, F., Microwave Microfluidic Sensor Based on a Microstrip Splitter/Combiner Configuration and Split Ring Resonators (SRRs) for Dielectric Characterization of Liquids, *IEEE Sensors Journal*, 17 (20), 6589-6598, 2017.
27. Ebrahimi, A., Scott, J., Ghorbani, K., Differential Sensors Using Microstrip Lines Loaded With Two Split-Ring Resonators, *IEEE Sensors Journal*, 18 (14), 5786-5793, 2018.
28. Naqui, J., Martín, F., Transmission Lines Loaded With Bisymmetric Resonators and Their Application to Angular Displacement and Velocity Sensors, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61 (12), 4700-4713, 2013.
29. Ridler, N.M., Ginley, R.A., A review of the IEEE 1785 standards for rectangular waveguides above 110 GHz, 2017 89th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), Honolulu-USA, 1-4, 09-09 June, 2017.
30. Kildal, P.S., Kehn, M.N.M, The ridge gap waveguide as a wideband rectangular hard waveguide, *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 1-4, 12-16 April, 2010.
31. Rajo-Iglesias, E., Ferrando-Rocher, M., Zaman, A.U., Gap Waveguide Technology for Millimeter-Wave Antenna Systems, *IEEE Communications Magazine*, 56 (7), 14-20, 2018.
32. Lomakin, K., Herold, S., Simon, D., Sippel, M., Sion, A., Vossiek, M., Helmreich, K., Gold, G, 3D Printed Slotted Rectangular Hollow Waveguides, 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, MA, USA, 342-345, 02-07 June, 2019.
33. Lu, G., Wang, J., Xie, Z., Yeow, J. T. W., Carbon-Based THz Microstrip Antenna Design: A Review, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, 3, 15-23, 2022.
34. S. Akinola, S., Hashimu, I., Singh, G., Gain and Bandwidth Enhancement Techniques of Microstrip Antenna: A Technical Review, 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE), Dubai, United Arab Emirates, 175-180, 11-12 December, 2019.
35. Pozar, D.M., Microstrip antennas, *Proceedings of the IEEE*, 80 (1), 79-91, 1992.
36. Kakaria, P., Nema, R., Review and survey of compact and broadband Microstrip Patch Antenna, 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR - 2014), Unnao, India, 1-5, 1-2 August, 2014.
37. Wu, K., Bozzi, M., Fonseca, N.J.G., Substrate Integrated Transmission Lines: Review and Applications, *IEEE Journal of Microwaves*, 1 (1), 345-363, 2021.
38. Iqbal, A., Tiang, J.J., Wong, S.K., Alibakhshikenari, M., Falcone F., Limiti, E. Miniaturization Trends in Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filters: A Review, *IEEE Access*, 8, 223287-223305, 2020.
39. Chen, X.P. Wu, K., Substrate Integrated Waveguide Filter: Basic Design Rules and Fundamental Structure Features, *IEEE Microwave Magazine*, 15 (5), 108-116, 2014.
40. Bozzi, M., Perregrini, L., Tomassoni, C., A Review of Compact Substrate Integrated Waveguide (SIW) Interconnects and Components," 2019 IEEE 23rd Workshop on Signal and Power Integrity (SPI), Chambéry, France, 1-4, 18 June, 2019.
41. Shen, B., Grilli, F., Coombs, T., Overview of H-Formulation: A Versatile Tool for Modeling Electromagnetics in High-Temperature Superconductor Applications, *IEEE Access*, 8, 100403-100414, 2020.
42. Maeda, H., Yanagisawa, Y., Recent Developments in High-Temperature Superconducting Magnet Technology (Review)," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24 (3), 1-12, 2014.
43. Willis, J.O. Superconducting transmission cables, *IEEE Power Engineering Review*, 20 (8), 10-14, 2000.
44. Levy, R., Snyder, R.V., Matthaei, G., Design of microwave filters, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50 (3), 783-793, 2002.
45. Pillai, G., Li, S.S., Piezoelectric MEMS Resonators: A Review, *IEEE Sensors Journal*, 21 (11), 12589-12605, 2021.
46. Delmonte, N., Silvestri, L., Perregrini, L., Bozzi, M., Substrate Integrated Waveguide (SIW) Cavity Resonators: A Review of Technologies and Applications, 2021 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), Hualien, Taiwan, 1-3, 25-27 August, 2021.
47. Reddy, A.N., Raghavan, S., Split ring resonator and its evolved structures over the past decade: This paper discusses the nuances of the most celebrated composite particle (split-ring resonator) with which novel artificial structured materials (called metamaterials) are built, 2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN), Tirunelveli, India, 625-629, 25-26 March, 2013.
48. Wong, S.W., Lin, J.Y., Yang, Y., Guo, Z.C., Zhu, L., Chu, Q.X., Waveguide Components Based on Multiple-Mode Resonators: Advances in Microwave Multiple-Mode Waveguide Components, Including Multiplexers, Three-State Diplexers, Crossovers, and Balanced/Unbalanced Elements, *IEEE Microwave Magazine*, 22 (2), 33-45, 2021.
49. 60 ama 49 olmalı Berksoy, Z., SIW Dalga Kılavuzlarının Analizi ve Tasarım Uygulamaları. Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2013.
50. Deslandes, D., Wu, K., Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 11 (2), 68-70, 2001.
51. Guvenli, K., Yenikaya, S., ve Seçmen, M., Analysis, Design, and Actual Fabrication of a Hybrid Microstrip-SIW Bandpass Filter Based on Cascaded Hardware Integration at X-Band, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 27 (1), 23-28, 2021.
52. Pozar, D.M., *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2011.
53. Bozzi, M., Pasian, M., Perregrini, L., Wu, K., On the Looses in Substrate Integrated Waveguides and Cavities, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1 (5), 395-401, 2009.
54. Wu, L., Substrate Integrated Waveguide Antenna Applications. Doktora Tezi, KU Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İngiltere, 2015.
55. Bozzi, M., Perregrini, L., Wu, K., Arcioni, P., Current and Future Research Trends in Substrate Integrated Waveguide Technology, *Radioengineering*, 18 (2), 201-209, 2009.
56. Yu, Y., Hong, W., Zhang, H., Xu, J., Jiang, Z. H., Optimization and Implementation of SIW Slot Array for Both Medium- and Long-Range 77 GHz Automotive Radar Application, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (7), 3769-3774, 2018.
57. Sun, X., Ma, J., Feng, Y., Shi, J., Xu, Z. Compact Substrate Integrated Waveguide Filtering Antennas: A Review, *IEEE Access*, 10, 91906-91922, 2022.
58. Keyur, M., Mewada H., Substrate Integrated Waveguide Based Bandpass Filter with Defected Ground Structure for FMCW Radar Application, *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*; 10 (3), 2020.
59. Alsabah, M., Naser, M.A., Mahmmod, B.M., Abdhussain, S.H., Eissa, M.R., Ahmed Al-Baidhani, A., Noordin, N.K., Sait, S.M., Al-Utaibi, K.A., Hashim, F., 6G Wireless Communications Networks: A Comprehensive Survey, *IEEE Access*, 9, 148191-148243, 2021.
60. Fiber Altyapının Geliştirilmesine Uluslararası Uygulamalar. <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/arastirma-raporlari/fiber-altyapi-raporu-son-rev.pdf>. Yayın tarihi Temmuz 7, 2020. Erişim tarihi Ekim 26, 2022. <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/arastirma-raporlari/fiber-altyapi-raporu-son-rev.pdf>
61. Shishkin, I., Baranov, D., Slobozhanyuk, A., Filonov, D., Lukashenko, S., Samusev, A., Belov, P., Microwave platform as a valuable tool for characterization of nanophotonic devices, *Scientific Reports*, 6, 35516, 2016.
62. Azad, A.R., Mohan, A., Single- and Dual-Band Bandpass Filters Using a Single Perturbed SIW Circular Cavity, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 29 (3), 1-3, 2019.
63. Xie, H.Y., Wu, B., Xia, L., Chen, J.Z., Su, T., Miniaturized Half-Mode FanShaped SIW Filter With Extensible Order and Wide Stopband, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30 (8), 749-752, 2020.
64. Mendez-Jeronimo, G., Wu, K., Effects of Unshielded Air Holes Periodically Perforated in Substrate Integrated Waveguides. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30 (11), 1049-1052, 2020.
65. Zheng, P., Liu, Z., Li, Y., Wu, L., Wang, Y., Zheng, P., LTCC based substrate integrated waveguide (SIW) bandpass filters with CPW transitions, 2017 International Workshop on Electromagnetics:

- Applications and Student Innovation Competition, London, UK, 30 May - 01 June, 97-99, 2017.
66. Hussein, O.I., Shamaileh, K.A.A., Dib, N.I., Nosrati, A., Abushamleh, S., Georgiev, D.G., Devabhaktu, V.K., Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filtering With Fourier-Varying Via-Hole Walling, *IEEE Access*, 8, 139706, 2020.
  67. Yun, T., Nam, H., Kim, K., Lee, J., Iris Waveguide Bandpass Filter Using Substrate Integrated Waveguide (SIW) for Satellite Communication, 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Suzhou-China, 4-7 December, 4, 2005.
  68. Liu, Z., Xiao, G.B., Zhu, L., A novel method to design triple-mode SIW filter based on the complementary split ring resonators (CSRRs), 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), CA, USA, 22-27 May, 2016.
  69. Iqbal, A., Ahmad, A.W., Smida, A., Mallat, N.K., Tunable SIW Bandpass Filters with Improved Upper Stopband Performance, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 1-1, 2019.
  70. Pelluri, S., Fasil, M., Mondal, D., Kartikeyan, M. V., Dual-band Bandpass filter using SIW cavity with E-shaped DGS, 2020 URSI Regional Conference on Radio Science (URSI-RCRS), Varanasi-India, 1-3, 12-14 February, 2020.
  71. Bozzi, M., Moscato, S., Silvestri, L., Delmonte, N., Pasian, M., Perregrini, L., Innovative SIW components on paper, textile, and 3D-printed substrates for the Internet of Things, 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, China, 6-9 December, 2015.
  72. Su, W., Wu, Z., Fang, Y., Bahr, R., Raj, P.M., Tummala, R., Tentzeris, M.M., 3D printed wearable flexible SIW and microfluidics sensors for Internet of Things and smart health applications, 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, USA, 04-09 June, 2017.
  73. Amina, O., Bouchra, R., Amina, A., Hadjira, B., The Design of Filter Based on Substrate Integrated Waveguide with Symmetrical Inductive Iris, 2018 9th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC), Rabat, Morocco, 22-26, 27-30 November, 2018.
  74. Kim, Y., Lim, S., Low Loss Substrate-Integrated Waveguide Using 3D-Printed Non-Uniform Honeycomb-Shaped Material, *IEEE Access*, 8, 191090-191099, 2020.
  75. Massoni, E., Silvestri, L., Alaimo, G., Marconi, S., Bozzi, M., Perregrini, L., Auricchio, F., 3-D Printed Substrate Integrated Slab Waveguide for Single-Mode Bandwidth Enhancement, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27 (6), 536-538, 2017.
  76. Ghiotto, A., Doghri, A., Parment, F., Djeraj, T., Vuong, T.P., Wu, K., Three-dimensional SIW and high-performance air-filled SIW for millimeter-wave substrate integrated circuits and systems, *Global Symposium on Millimeter-Waves (GSMM)*, Montreal, QC, Canada, 1-3, 25-27 May, 2015.
  77. Karpuz, C., Fırat, G.B., Özdemir, P.Ö., Özek, A., Görür, A.K., Design of dualmode substrate integrated waveguide filter using inductive slots, 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), New Delhi-India, 5-9 December, 2016.
  78. Macchiarella, G., Tomassoni, C., Massoni, E., Bozzi, M., Perregrini, L., A novel class of half-mode SIW filters with extracted poles, 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg-Germany, 10-12 October, 2017.
  79. Wang, Z.D., Wei, F., Zhang, L., Shi, X.W., Design of dual-band bandpass SIW filter with DGS, 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, China, 05-08 May, 2012.
  80. Li, D., Wang, J., Yu, Y., Liu, Y., Chen, Z., Yang, L., Substrate integrated waveguide-based complementary split-ring resonator and its arrays for compact dual-wideband bandpass filter design, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31 (2), 2020.
  81. Zhang, X., Yan, J., Zhang, H., Chen, Y., Miniaturized substrate integrated waveguide 5G LTCC bandpass filter exploiting capacitive loaded cavities, *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 29 (7), 1-5, 2019.
  82. Zhu, Y.Y., Yang, Y.J., Chen, J.X., High-performance bandpass filter using HTCC stepped-impedance resonators, *IET Microw. Antennas Propag.*, 12, 56-62, 2018.
  83. Nwajana, A. O., Dainkeh, A., Yeo, K. S. K., Substrate Integrated Waveguide (SIW) Bandpass Filter with Novel Microstrip-CPW-SIW Input Coupling, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16 (2), 393-402, 2017.
  84. Azad, A.R., Jhariya, D.K., Mohan, A., Substrate-integrated waveguide cross-coupled filters with mixed electric and magnetic coupling structure, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1-8, 2018.
  85. Zou, X., Tong, C., Yu, D., Design of an X-band symmetrical window bandpass filter based on Substrate Integrated Waveguide, *Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, Harbin, China, 571-574, 26-30 July, 2011.
  86. Armendariz, M., Sekar, V., Entesari, K., Tunable SIW bandpass filters with PIN diodes, *The 40th European Microwave Conference*, Paris, France, 28-30 September, 2010.
  87. Deng, M., Psychogiou, D., Tune-All Substrate-Integrated-Waveguide (SIW) Bandpass Filters, 49th European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, 01-03 October, 2019.
  88. Moro, R., Agneessens, S., Rogier, H., Dierck, A., Bozzi, M., Textile Microwave Components in Substrate Integrated Waveguide Technology, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63 (2), 422-432, 2015.
  89. Moro, R., Kim, S., Bozzi, M., Tentzeris, M., Inkjet-printed paper-based substrate-integrated waveguide (SIW) components and antennas, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 5 (03), 197-204, 2013.
  90. Tomassoni, C., Bahr, R., Tentzeris, M., Bozzi, M., Perregrini, L., 3D printed substrate integrated waveguide filters with locally controlled dielectric permittivity, 46th European Microwave Conference, London, UK, 253, 4-6 October, 2016.
  91. Genç A., Göksu T., Helhel S., Investigation of the performance of waveguide bend components fabricated with 3D printing and copper plating, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 801-810, 2009.
  92. Zhou, X., Gang Zhang, G., Feng, S., Tam, K.W., Zhang, Z., Tang, W., Yang, J., Design of Three Dimensional Integrated SIW Multiband Bandpass Filter With Split Type Extended Doublet Topology, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 12 (10), 1681-1691, 2022.
  93. Shishido, D., Tamura, M., Development of an Air-filled SIW Filter with Wideband Spurious Suppression, 2020 IEEE International Symposium on Radio Frequency Integration Technology (RFIT), Hiroshima-Japan, 2-4 September, 2020.
  94. Sun, X., Ma, J., Feng, Y., Shi, J., Xu, Z., Compact Substrate Integrated Waveguide Filtering Antennas: A Review, *IEEE Access*, 10, 91906-91922, 2022.
  95. Diatta, D.T.J., Park, C.W., Substrate Integrated Waveguide (SIW) Power Amplifier using SIW Bandstop Filter for Harmonic Control Working at 3.55 GHz, 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Hong Kong, Hong Kong, 08-11 December, 2020.
  96. Chen, K., Yan, B., Xu, R., A novel W-band ultra-wideband substrate integrated waveguide (SIW) T-junction power divider, 2010 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, Nanjing, China, 17-20 September, 2010.
  97. Chu, P., Zheng, K.L., Xu, F., Wu, K., Substrate integrated waveguide resonator with harmonic suppression, *Electron. Lett.*, 54 (24), 1388-1389, 2018.
  98. Parment, F., Ghiotto, A., Vuong, T.P., Duchamp, J.M., Wu, K., Broadband directional Moreno coupler for high-performance air-filled SIW-based Substrate Integrated Systems, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, USA, 22-27 May, 2016.
  99. Jiang, X., You, C.J., Shao, Z., A compact X-band circulator with embedded feed line based on substrate integrated waveguide, *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, Jiuzhai, China, 26-28 October, 2013.
  100. Yun, T.S., Nam, H., Kim, J.Y., Lee, B., Choi, J.J., Kim, K.B., Lee, J.C., Harmonics suppressed substrate-integrated waveguide filter with integration of low-pass filter, *Microwave and Optical Technology Letters*, 50 (2), 447-450, 2008.
  101. Özer E., Düşük Güçlü Uygulamalar İçin Aktif Harmonik Filtre Tasarımı, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
  102. Kurudere, S., Ertürk, V.B., Novel SIW based interdigital bandpass filter with harmonic suppression, 44th European Microwave Conference, Rome, Italy, 2014, 06-09 October, 2014.
  103. Jia, D., Feng, Q., Xiang, Q., & Wu, K., Multilayer Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filters With Higher-Order Mode Suppression, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 26 (9), 678-680, 2016.



104. Ramalingam, S., Hyder Ali, U.H., Chenniappan, S., Compact dual mode X-band SIW bandpass filter with wide spurious suppression using split square ring slot resonator, *Circuit World*, 48 (1), 1-13, 2022.
105. Li, S. L., Wang, Z.B., Wang, P.C., Zang, P.Y., Compact Multi-Mode Substrate Integrated Waveguide Filter With Controllable Frequency And Harmonic Suppression, *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Nanjing, China, 23-26 May, 2021.
106. Liu, X., Liu, N., Fan, C., Liu, Y., Yang, Y., Zhu, Z., SIW Band-pass Filter with Wide-Stopband Using Harmonic Interleaving and Orthogonal Transmission Techniques, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2022.
107. Zhou, Z., Chen, N., Zhong, H., Zhang, W., Zhang, Y., Yin, X., He, B., Textile-Based Mechanical Sensors: A Review. *Materials (Basel)*, 14 (20), 6073, 2021.
108. Blachowicz, T., Ehrmann, G., Ehrmann, A., Textile-Based Sensors for Biosignal Detection and Monitoring, *Sensors*, 21 (18), 6042-6061, 2021.
109. Hardy, D.A., Moneta, A., Sakalyte, V., Connolly, L., Shahidi, A., Hughes-Riley, T., Engineering a Costume for Performance Using Illuminated LED-Yarns, *Fibers*, 6 (2), 35, 2018.
110. Kirtania S.G., Elger, A.W., Hasan, M.R., Wisniewska, A., Sekhar K., Karacolak, T., Sekhar P.K., Flexible Antennas: A Review, *Micromachines*, 11 (9), E847, 2020.
111. Sun, X., Ma, J., Feng, Y., Shi, J., Xu, Z., Compact Substrate Integrated Waveguide Filtering Antennas: A Review, *IEEE Access*, 10, 91906-91922, 2022.
112. Demiral B., Ertuğ Ö., Performance analysis of downlink MIMO-NOMA systems in Rayleigh channels with max max-max and max-min-max antenna selection algorithms, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1675-1687, 2023.

