

## HİBRİT MİKROŞERİT-YTED BANT GEÇİREN FİLTRENİN X-BANT'TA TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

*Kemal GÜVENLİ* \*<sup>ID</sup>  
*Sibel YENİKAYA* \*\*<sup>ID</sup>  
*Mustafa SEÇMEN* \*\*\*<sup>ID</sup>

Alınma: 31.05.2021 ; düzeltme: 07.12.2021 ; kabul: 31.01.2022

**Öz:** Bu makalede, X-Bant 'ta hibrit Mikroşerit-YTED (Yalıtkan Taban Entegreli Dalga Kılavuzu) bant geçiren filtrenin optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yüksek geçiren bir YTED filtre ile alçak geçiren bir mikroşerit filtrenin seri entegrasyonu ile elde edilen hibrit bant geçiren filtrenin geometrisindeki asimetrik bölümler düzeltilmiştir. Optimizasyon çalışmasında, CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite simülasyon programındaki 5 farklı optimizasyon algoritma tekniği hibrit M-YTED bant geçiren filtreye uygulanmıştır. Filtreye uygulanan bu tekniklerin sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Metodlar karşılaştırıldığında, geçiş bandındaki  $S_{11}$  değerleri toplamının en düşük değerde olması nedeniyle Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması seçilmiştir. Filtrenin  $w_4$  parametresinin değeri 6,165 mm olarak elde edilmiştir. Filtrenin kalite faktörü, optimizasyon çalışmasıyla Güvenli ve diğ., (2021)'nin çalışmasına göre 3,21 kat artırılmıştır. Hibrit Mikroşerit-YTED bant geçiren filtrenin geçiş bandı  $[\omega_1-\omega_2]$  7,60 GHz ile 8,40 GHz frekans aralığında, filtrenin merkez frekansı ( $\omega_0$ ) 7,90 GHz, filtrenin bant genişliği de 0,80 GHz (%10,01) olacak şekilde tasarlanmıştır. M-YTED bant geçiren filtrenin simülasyon sonuçlarına göre, merkez frekansı 8,15 GHz ve bant genişliği 0,92 GHz'dir (%11,29). Analitik ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, analitik sonuçlara göre simülasyon merkez frekansındaki frekans değişimi %1,98 ve bant genişliği değişimi %15'dir. Analitik ve simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Bant Geçiren Filtre, YTED, Optimizasyon, Mikroşerit, X-Bant, Hibrit Tasarım

### Design and Optimization of Hybrid Microstrip-SIW Bandpass Filter on X-Band

**Abstract:** In this article, the optimization study of hybrid Microstrip-SIW (Substrate Integrated Waveguide) band-pass filter in X-Band has been carried out. Asymmetrical sections in the geometry of the hybrid band-pass filter obtained by serial integration of a high-pass SIW filter and a low-pass microstrip filter are corrected. In the optimization study, 5 different optimization algorithm techniques in the CST (Computer Simulation Technology) Studio Suite simulation program were applied to the hybrid M-SIW bandpass filter. The results of these techniques applied to the filter are given comparatively. Particle Swarm Optimization Algorithm was chosen because the sum of the  $S_{11}$  values in the passband was the lowest when the methods were compared. The value of the  $w_4$  parameter of the filter was obtained as 6.165 mm. The quality factor of the filter was increased by 3.21 times with the optimization study according to the study

\* Hitit Üniversitesi, Osmaniye Ömer Derindere MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Eymir Mahallesi, Burhan Uludağ Caddesi, No:160, 19500, Osmaniye, Çorum  
İletişim Yazarı: Kemal GÜVENLİ (kemaiguvenli@hitit.edu.tr)

\*\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Görükle Kampüsü, 16059, Nilüfer, Bursa

\*\*\* Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Üniversite Caddesi, No: 37- 39, Ağaçağlı Yol, 35030, Bornova, İzmir

of Guvenli et al. (2021). The passband  $[\omega_1-\omega_2]$  of the hybrid Microstrip-SIW bandpass filter is designed in the frequency range of 7.60 GHz to 8.40 GHz, the center frequency of the filter ( $\omega_0$ ) is 7.90 GHz and the bandwidth of the filter is 0.80 GHz (10.01%). According to the simulation results of M-SIW bandpass filter, the center frequency is 8.15 GHz and the bandwidth is 0.92 GHz (11.29%). When analytical and simulation results are compared, it is seen that frequency change in the simulation center frequency is 1.98% and change in bandwidth is 15%. It is seen that analytical and simulation results are compatible with each other.

**Keywords:** Bandpass Filter, SIW, Optimization, Microstrip, X-Band, Hybrid Design

## 1. GİRİŞ

6G teknolojisine doğru ilerlediğimiz şu günlerde haberleşme ve uydu teknolojilerinde artan yüksek bant ihtiyacı, yüksek seçicilikli filtre tasarlamanın önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Haberleşme ve uydu sistemlerinde kullanılan bu filtrelerin bant-dışı frekans baskılaması, kalite faktörü ve araya girme kaybı değerlerindeki iyileştirme optimizasyon çalışmalarının en önemli konularıdır (Celis ve diğ., 2020). YTED yapı; düşük radyasyon kayıpları, düşük üretim maliyetleri, yüksek güçlü devrelerde kullanımı ve tasarımların küçük hacimli olması gibi avantajları nedeniyle filtre çalışmasında tercih edilmiştir.

Filtre optimizasyonu, bir filtrenin kalite faktörü değerinin artırılması için uygulanan iyileştirme çalışmasıdır. Literatürde Palecek ve diğ., (2011) Diferansiyel Fark Algoritması ile mikroşerit filtre boyutlarının iyileştirilmesini; Sun ve diğ., (2019) yapay sinir ağlarını kullanarak rezonatör YTED filtrelerinde iyileşmeyi; Palecek ve diğ., (2012) Genetik Algoritma'yı kullanarak RF bant geçiren filtrenin optimizasyonunu; Dai ve diğ., (2021) Derin Öğrenme'yi kullanarak yüksek seçicilikli mikroşerit bant geçiren filtrelerin doğrudan sentez yaklaşımı ile tasarımını ve Dong ve diğ., (2020) model tabanlı sapma tahmini ve Jacobian Matris güncellemesini kullanılarak YTED filtre optimizasyonunu yapılmışlardır. Chen ve diğ., (2018) yaptığı SSPP-YTED filtrenin 100 mm×20 mm boyutu; 11,20 GHz merkez frekansı ve 7,30 GHz bant genişliği vardır. Hussein ve diğ., (2020)'nin tasarladığı FVVHW-YTED filtrenin 40 mm×12,70 mm boyutu; 11,65 GHz merkez frekansı ve 2,50 GHz bant genişliği vardır. Weiping ve diğ., (2017)'nin DGS-YTED filtre çalışmasının 10 mm×17 mm boyutu; 10,10 GHz merkez frekansı ve 5,40 GHz bant genişliği vardır. Wu ve diğ., (2021)'nin Hava Boşluklu-YTED filtre çalışmasının 25 mm×26,90 mm boyutu; 32,27 GHz merkez frekansı ve 0,90 GHz bant genişliği vardır. Xu ve diğ., (2016)'nin tasarladığı Rezonatör-YTED filtre 51,78 mm×30 mm boyuta; 12,25 GHz merkez frekansına ve 0,50 GHz bant genişliğine sahiptir.

Bu çalışma, Guvenli ve diğ., (2021)'nin teorik, simülasyon ve ölçüm değerleriyle ortaya koyduğu hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin geçiş bandı değerlerinin iyileştirilmesi üzerinedir. X-Bant uygulaması olarak çalışmada bant geçiren filtreyi YTED ve mikroşerit yapıları kullanarak tasarlamışlardır. Tasarımda hibrit yaklaşım benimsenmiş, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreleri aynı modelde bir araya getirerek bant geçiren filtre olarak sunmuşlardır. Bu filtre modeli kolaylıkla geliştirilebilen ve modüler yapıda bir tasarımdır. Optimizasyon çalışmasıyla  $S_{11}$  değerlerinin en az -15 dB ve  $S_{21}$  değerlerinin en fazla -1 dB olması öngörülmüştür. Merkez frekansının 8,01 GHz'e ve bant genişliğinin de %9'a çekilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede daha kararlı bir geçiş bandı ve daha baskın bir durdurma bandı elde etmek amaçlanmıştır.

Çalışma planında, önce X-Bant'ta çalışacak hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin analitik çözümü eşdeğer devresiyle ortaya konulmuştur. CST'deki filtre modelinde dalga yayılım doğrultusuna göre tam simetri sağlanmıştır. Silindirik iletken ince çubuklar yerine kare prizma iletken ince çubuklar tercih edilmiştir. Bu çalışmada CST Studio Suite simülasyon programının tercih edilme sebebi, filtre tasarımları için farklı optimizasyon metotları sunması nedeniyle filtrenin optimizasyon süresinde kısaltma sağlamasıdır. Simülasyon programındaki Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması, Genetik Algoritma, Klasik-Powell Algoritması, Kovaryans Matris Uyarılama Evrimsel Stratejisi (KMU-ES), Nelder-Mead (NM) Algoritması olmak üzere 5 farklı optimizasyon algoritma metodu çalışmada kullanılmıştır. Uygulanan optimizasyon tekniklerinin

çözüm süreleri verilmiştir. Bu metotlar, filtrenin geçiş bandındaki (7,00 GHz – 9,00 GHz)  $S_{11}$  değerlerinin toplamının maksimum olması seçeneği aktif edilerek çalıştırılmıştır. Örnekleme frekansı 6 kHz alınarak daha iyi değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır. Literatürde farklı yapay zeka optimizasyon teknikleri mevcuttur (Karaboğa, 2020). Çalışmada sonuçları birbiriyle karşılaştırılacak olan metotların tercih edilenleri şunlardır: Parametre uzayındaki noktaları hareketli parçacıklar olarak ele alan bir algoritma olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO); parametre uzayında noktalar oluşturan ve ardından bunları rastgele parametre mutasyonu ile birden çok nesil boyunca rafine eden evrimsel bir yaklaşım kullanan Genetik Algoritma; Quasi-Newton İnterpolasyonu'ndan daha yavaş olmasına rağmen tek parametrelili problemler için basit olmasına karşın oldukça iyi bir teknik olan Klasik-Powell Algoritması; optimumu bulmak için parametre alanı boyunca dağıtılmış birden çok noktayı kullanan bir optimizasyon tekniği olan Nelder-Mead (NM) Algoritması ve optimizasyon için nispeten hızlı yakınsamaya sahip ve önceki yinelemeleri hatırlayabilen algoritma Kovaryans Matrisi Uyarlama Evrimsel Stratejisi (KMU-ES) (Optimizasyon Teknikleri, Erişim Tarihi:22.05.2021).

Alçak geçiren mikroşerit filtre ile yüksek geçiren YTED filtrenin art arda bağlanmasıyla oluşturulan hibrit M-YTED bir bant geçiren filtreye, CST Studio Suite simülasyon programındaki 5 farklı optimizasyon metodu uygulayarak filtrenin kalite faktörünü iyileştirilmek bu çalışmanın konusudur. Bu optimizasyon metotlarını  $w_d$  parametresine uygulayarak Güvenli ve diğ., (2021)'nin çalışmasına göre geçiş bandında düşük araya girme kaybı hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde filtre eşitlikleri ve optimizasyon metotları ortaya konulmuştur. Üçüncü bölümünde hibrit bant geçiren filtreye uygulanan optimizasyon metotlarının karşılaştırılması olarak sonuçlarına ve dördüncü bölümde de elde edilmiş sonuçların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

## 2. FİLTRE TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

YTED filtre, genel olarak dikdörtgen dalga kılavuzu davranışı sergiler. Dikdörtgen dalga kılavuzu gibi düşük kayıplı ve yüksek geçiren filtredir. Bunun yanında YTED filtre, dikdörtgen dalga kılavuzunun aksine düzlemsel yapıdadır. Dikdörtgen dalga kılavuzuna kıyasla üretim maliyeti oldukça düşük olan YTED filtre, düzlemsel devrelere kolaylıkla entegre edilebilmektedir (Deslandes ve Wu, 2001).

### 2.1. Optimize Edilecek Hibrit M-YTED Bant Geçiren Filtrenin Eşitlikleri ve Önceki Çalışmada Elde Edilmiş Sonuçlar

#### 2.1.1 Yüksek Geçiren YTED Yapı Eşitlikleri

YTED yüksek geçiren filtrenin kesim frekansı ifadesi, dalga boyu, araya girme kaybı, geri dönüş kaybı, dalga empedansı, yansıma katsayısı ve yayılma sabiti Eşitlik (1-10)'de yer almaktadır (Pozar, 2012; Alburaikan, 2016).

Yüksek geçiren YTED filtrenin kesim frekansı:

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

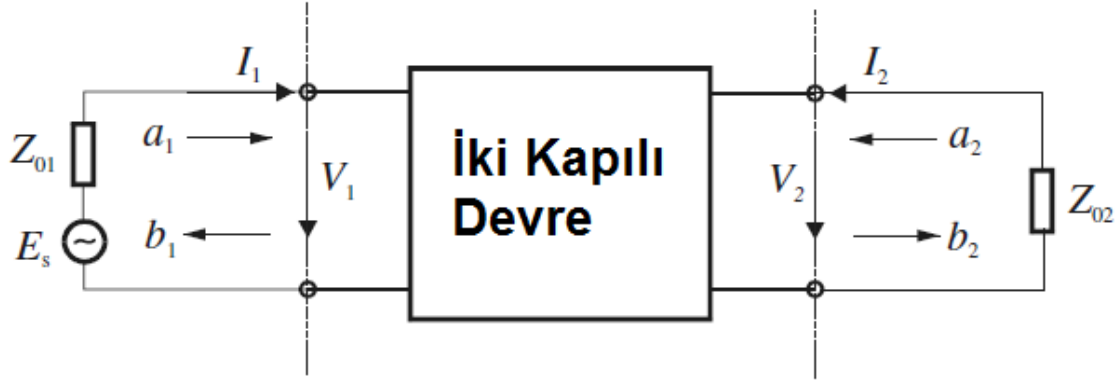
olarak ifade edilmektedir. Burada  $m$  ve  $n$  TE mod değerlerini;  $a$  filtrenin genişliğini;  $b$  filtrenin yüksekliğini;  $\epsilon$  dielektrik katsayısını ve  $\mu$  manyetik geçirgenliği sembolize etmektedir.

Filtrenin kılavuz dalga boyu:

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

olarak ifade edilmektedir. Burada  $c$  ışık hızını;  $f$  kesim frekansını;  $\epsilon_r$  bağıl dielektrik katsayısını ve  $a$  filtrenin genişliğini göstermektedir.

Şekil 1'de iki kapılı devre yer almaktadır:



**Şekil 1:**  
İki kapılı mikrodalga devre (Alburaikan, 2016)

Şekil 1'de görülen iki kapılı devredeki gerilim ve akım eşitlikleri:

$$V_n = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n) \quad (3.a)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_{0n}}}(a_n + b_n) \quad (3.b)$$

$$a_n = \frac{1}{2} \left( \frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} + \sqrt{Z_{0n}} I_n \right) \quad (3.c)$$

$$b_n = \frac{1}{2} \left( \frac{V_n}{\sqrt{Z_{0n}}} - \sqrt{Z_{0n}} I_n \right) \quad (3.d)$$

şeklinde tanımlanır ( $n = 1,2$ ). Burada  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  ve  $E_s$  akım-gerilim değerlerini;  $Z_{01}$  ve  $Z_{02}$  karakteristik empedansları;  $a_1$  ve  $a_2$  gelen normalize dalgaları ve  $b_1$  ile  $b_2$  yansıyan normalize dalgaları göstermektedir.

İki kapılı mikrodalga devresinin saçılma matrisi:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Saçılma matrisinin parametreleri:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (5)$$

olarak tanımlanır.

S-parametrelerinin genlikleri desibel (dB) cinsinden şu şekilde tanımlanır:

$$20\log|S_{mn}| \text{ dB} \quad m, n = 1, 2 \quad (6)$$

S-parametreleri kullanılarak filtre tasarımı için iki önemli parametre olan araya girme kaybı ( $L_A$ ) ve geri dönüş kaybı ( $L_R$ ) şu şekilde ifade edilir:

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

$$L_R = 20\log|S_{nn}| \text{ dB} \quad n = 1, 2 \quad (7.b)$$

Bant geçiren/durduran filtrenin merkez frekansı:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\omega_0$  merkez frekansını;  $\omega_1$  alt kesim frekansını ve  $\omega_2$  üst kesim frekansını göstermektedir.

Faz sabiti şu şekilde ifade edilir:

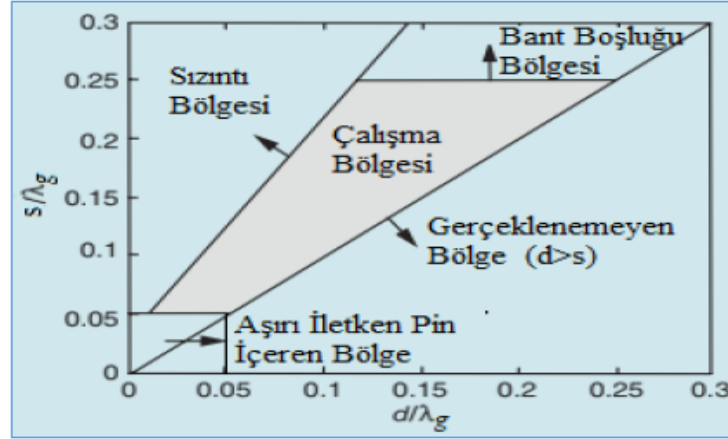
$$\beta = \sqrt{(\omega^2\mu\epsilon) - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (9)$$

$TE_{10}$  modun dalga empedansı olan  $Z_{TE}$ :

$$Z_{TE} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{\omega\mu\lambda_g}{2\pi} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\eta$  empedansı ve  $\omega_c$  kesim frekansını sembolize eder.

Düzlemsel dalga kılavuzlarında olduğu gibi YTED filtrelerde de baskın mod  $TE_{10}$  modudur. YTED geometrisinde  $s$  iki silindirik iletken ince çubuk merkezi arasındaki mesafeyi;  $d$  iletken ince çubuk çapını ve  $\lambda_g$  filtrenin kılavuz dalga boyunu göstermektedir. YTED filtre tasarımında yüksek radyasyon kayıpları yaşamamak için  $s/d \leq 2$  ve  $d < \lambda_g/5$  tasarım sınır şartları sağlanmalıdır. Şekil 2’de  $s$ ,  $d$  ve  $\lambda_g$  değerlerine göre YTED’nin tasarım bölge sınırlarına yer verilmiştir (Bozzi ve diğ., 2009; Chen ve Wu, 2014 ).



Şekil 2:

YTED yapının  $s$ ,  $d$  ve  $\lambda_g$  değerlerine göre çalışma bölgeleri (Chen ve Wu, 2014)

### 2.1.2 Alçak Geçiren Mikroşerit Yapının Eşitlikleri

Mikroşerit yapı alçak geçiren filtredir ve yüksek empedanslı şerit hat yapıdadır. Mikroşerit yapı; alt taban iletken yüzey, orta taban dielektrik malzeme ve en üst katman iletken yüzeyden oluşur. Mikroşerit hattın genel empedans ( $Z_0$ ) ifadesi şu şekildedir:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \ln\left(\frac{8h}{w}\right) \quad (11)$$

Burada  $h$  yalıtkan taban malzemenin kalınlığı;  $\epsilon_{ff}$  efektif dielektrik değer ve  $w$  mikroşerit hattın genişliğidir.

Winder, S. (2005)'de verilen mikroşerit hat tasarım şartlarına göre,  $w$  parametresinin değeri  $\lambda/4$ 'den küçük olmalı ve yalıtkan taban malzeme yüksekliği ile mikroşerit hattın genişliği arasında  $w/h > 1$  şartını sağlanmalıdır.

Eşdeğer devredeki indüktörün karşılığı, dielektrik malzemedeki mikroşerit hattın genişliği ve uzunluğunun belirlediği alandır. Bu empedans değeri, mikroşerit hattın genişliğine, efektif dielektrik değere ve yalıtkan taban malzemenin yüksekliğine bağlıdır. Eşitlik (12-14)'de bu ifadeler yer almaktadır.

Mikroşerit hattın genişliğine, efektif dielektrik değere ve yalıtkan taban malzemenin yüksekliğine bağlı olarak hattın empedans değeri:

$$Z_m = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + 0,25 \frac{w}{h}\right) \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $h$  yalıtkan taban malzemenin kalınlığı;  $\epsilon_{ff}$  efektif dielektrik değer ve  $w$  mikroşerit hattın genişliğidir.

İndüktör için efektif dielektrik ( $\epsilon_{ff}$ ) değer ise şöyle ifade edilir:

$$\epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \right) + 0,041 \left( 1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Son olarak, eşdeğer devredeki indüktörün karşılığı olan mikroşerit hat  $l$  uzunluğu:

$$l = \frac{L \times c}{Z_m \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $L$  eşdeğer devredeki indüktörün değerini;  $\epsilon_{ff}$  efektif dielektrik değerini;  $c$  ışık hızını ve  $Z_m$  hattın empedans değerini göstermektedir.

Eşdeğer devredeki kapasitörün karşılığı, yine dielektrik malzemedeki mikroşerit hattın genişliği ve uzunluğunun belirlediği alandır. Bu empedans değeri, mikroşerit hattın genişliğine, efektif dielektrik değere ve yalıtkan taban malzemenin yüksekliğine bağlıdır. Eşitlik (15-17)'de bağlantılı ifadeler yer almaktadır.

Mikroşerit hattın genişliğine, efektif dielektrik değere ve yalıtkan taban malzemenin yüksekliğine bağlı olarak hattın empedans değeri:

$$Z_m = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left[ \frac{w}{h} + 1,393 + 0,677 \ln \left( \frac{w}{h} + 1,444 \right) \right]^{-1} \quad (15)$$

Eşdeğer devredeki kapasitör ( $C$ ) için efektif dielektrik ( $\epsilon_{ff}$ ) değer şöyle ifade edilir:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-0,5} \quad (16)$$

Son olarak, eşdeğer devredeki kapasitörün karşılığı olan mikroşerit hat  $l$  uzunluğu:

$$l = \frac{C \times Z_m \times c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $C$  eşdeğer devredeki kapasitörün değerini;  $\epsilon_{ff}$  efektif dielektrik değerini;  $c$  ışık hızını ve  $Z_m$  hattın empedans değerini göstermektedir. Eşitlik (11-17), basamak hat yönteminde ilgili devre elemanına denk düşen bu şerit hattın uzunluk ve genişlik değerlerinin bulunmasını sağlar (Winder, 2005).

Filtrenin kalite faktörü:

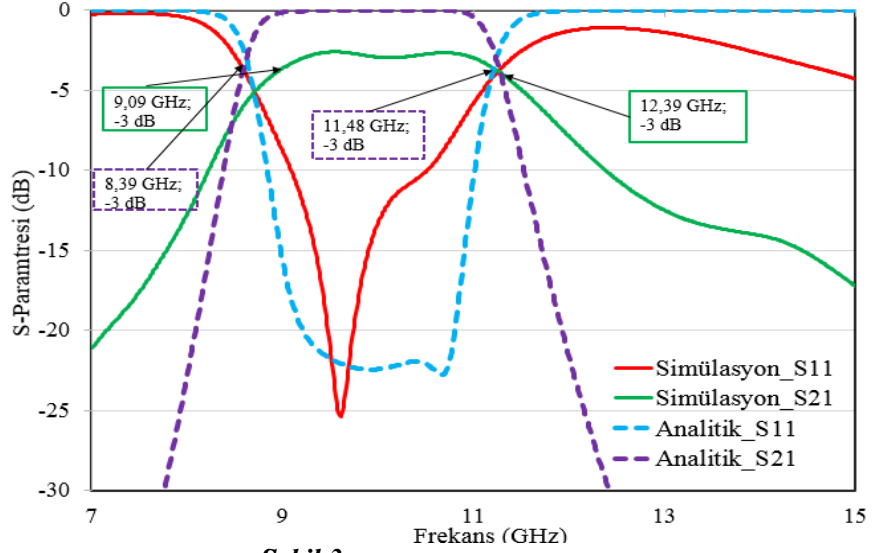
$$Q = \frac{\omega_0}{BW} \quad (18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $BW$  filtrenin bant genişliğini ve  $\omega_0$  filtrenin merkez frekansı sembolize eder. Eşitlik (18)'e göre merkez frekans sabit tutulup bant genişliği belli oranda düşürüldüğünde filtrenin kalite faktörünün artacağı görülmektedir.

Güvenli ve diğ., (2021) yaptıkları çalışmada, 6.dereceden hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin eşdeğer devre eleman değerleri teorik olarak hesaplamış ve şu sonuçlara ulaşmışlardır:  $C_1 = 0,1678 \text{ pF}$ ,  $L_1 = 1,5732 \text{ nH}$ ,  $C_2 = 1,719 \text{ pF}$ ,  $L_2 = 0,1535 \text{ nH}$ ,  $C_3 = 0,044 \text{ pF}$ ,  $L_3 = 5,871 \text{ nH}$ ,  $C_4 = 2,348 \text{ pF}$ ,  $L_4 = 0,1124 \text{ nH}$ ,  $C_5 = 0,0614 \text{ pF}$ ,  $L_5 = 4,298 \text{ nH}$ ,  $C_6 = 0,629 \text{ pF}$  ve  $L_6 = 0,419 \text{ nH}$ . Bulunan devre eleman değerleri, ADS (Advanced Design System) elektriksel devre analiz programında filtrenin S-parametresi değerlerini analitik hesaplamak için kullanılmıştır (Erişim Tarihi: 09.09.2021, Konu: ADS Devre Simülasyonu). Yaşar Üniversitesi Elektrik-Elektronik

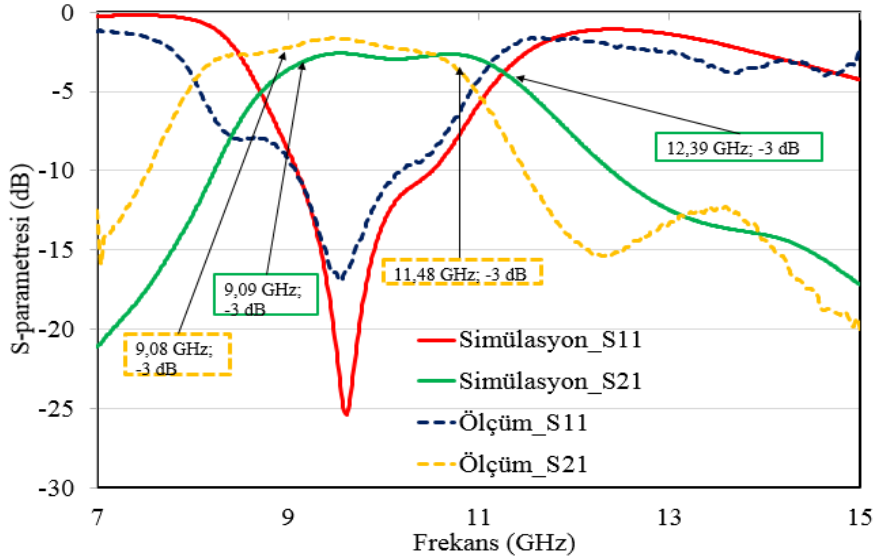
Mühendisliği Bölümü Anten ve Mikrodalga Laboratuvarı'nda Rogers 4003C ( $h = 1,52$  mm,  $\epsilon_r = 3,38$  ve  $\tan\delta = 0,0027$ ) dielektrik materyalini kullanarak filtreyi üretmişlerdir. Laboratuvarında üretilen filtreyi, Anritsu VNA Master MS2028C vektör network analizörünü kullanarak ölçmüşlerdir.

Optimizasyonu yapılacak Güvenli ve diğ., (2021)'nin hibrit M-YTED bant geçiren filtre tasarımının simülasyon ve analitik sonuçları Şekil 3'de, simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3:

Hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin simülasyon ve analitik sonuçları



Şekil 4:

Hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin simülasyon ve ölçüm sonuçları

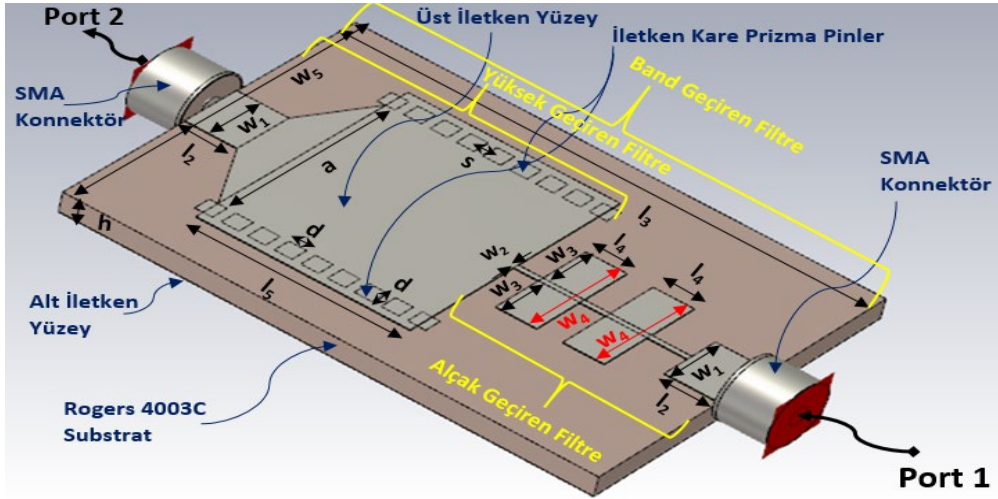
Şekil 3'deki simülasyon ve analitik sonuçları incelendiğinde alt ve üst kesim frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4'deki simülasyon ve ölçüm sonuçları incelendiğinde, geçiş bandında ölçülen  $S_{11}$  değerlerinin simülasyona göre düşük olmasının sebebinin lehimleme ve konnektörlerden kaynaklanan kayıplar olduğu düşünülmektedir.



## 2.2. Hibrit M-YTED Bant Geçiren 5. Dereceden Chebyshev Filtrenin Tasarımı ve Optimizasyonu

Daha önceki çalışmada hibrit M-YTED bant geçiren filtre ortaya konulmuştur. Hibrit M-YTED bir bant geçiren filtre, alçak geçiren mikroşerit filtre ile yüksek geçiren YTED filtre yapılarının art arda bağlanması ve bant geçiren frekans aralığının çakıştırılmasıyla elde edilir. Alçak ve yüksek geçiren filtre eşitlikleri (1)-(18) denklemleri ile ifade edilir. Filtrenin derecesi bir derece düşürülerek, geçiş bandındaki geriye dönüş kaybında yaşanacak azalma karşılığında alt ve üst kesim frekans noktalarında daha keskin geçişler ve filtrenin kalite faktörü değerinde artış hedeflenmiştir.

Bant geçiren filtre, Araya Girme Kaybı Metodu baz alınarak modellenmiştir. Optimizasyonu yapılan hibrit filtre, 5. dereceli ( $N=5$ ); dalgalanma faktörü 0,10 dB; alt kesim frekansı 7,60 GHz ( $\omega_1$ ); üst kesim frekansı 8,40 GHz ( $\omega_2$ ); merkez frekansı ( $\omega_0$ ) 7,90 GHz; bant genişliği 0,80 GHz (%10,01) bir Chebyshev filtresi olarak yeniden ortaya konmuştur ( $R_0=50 \Omega$ ). Optimize edilen hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin üç boyutlu geometrisi ve parametrik değerleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5:

Optimizasyonu yapılan hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin geometrisi ve parametreleri

Filtre optimizasyon süresini azaltmak için tasarım modelindeki çapı 1 mm olan silindirik iletken ince çubuklar yerine kenar uzunluğu 1 mm olan kare prizma iletken ince çubuklar tercih edilmiştir.

### 2.2.1. Uygulanan Optimizasyon Teknikleri

Alçak geçiren mikroşerit filtre kısmındaki kanat açıklığı ( $w_d$ ) parametresi, alçak geçiren filtrenin kesim frekansını doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı alçak geçiren filtrenin geçiş bandındaki  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  sonuçlarını iyileştirmek için  $w_d$  parametresi üzerinde çalışılmıştır. CST Studio Suite simülasyon programının optimizasyon modülü çalışmada kullanılmıştır. CST Studio Suite Simülasyon programında; Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması, Genetik Algoritma, Klasik-Powell Algoritması, Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi (KMU-ES), Nelder-Mead (NM) Algoritması olmak üzere 5 farklı optimizasyon algoritma metodu kullanılmıştır. Optimizasyonlarda  $w_d$  parametresi için minimum 6 mm, maksimum 6,5 mm olacak şekilde parametre uzayı tanım aralığı seçilmiştir.

### 2.2.1.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Basit kurullarla hareket eden çok sayıda ajanın (parçacığın) karmaşık davranışlarını kullanma fikri, ilk olarak doğal olayları taklit eden bilgisayar animasyonlarında görüntülerin birleştirilmesi problemini çözmek amacıyla ortaya konulmuştur. PSO Algoritması, her bir parçacığın problem için muhtemel çözümü temsil ettiği parçacıkların bir sürüsü (popülasyon) ile uğraşır.  $x_i(t)$ , t zamanındaki uzaydaki  $i$ . parçacığın pozisyonunu;  $v_i(t)$  hızını ve  $y_i(t)$  bulunan en iyi pozisyonu göstermektedir.  $S.x_i$ ,  $S$  sürüsündeki  $i$ . parçacığın pozisyonunu tanımlamak için kullanılmaktadır. PSO algoritmasının temel adımları şu şekildedir (Karaboğa, 2020):

**1.Adım:**  $n_x$  boyutlu  $S$  sürüsünü oluştur ve kontrol parametreleri değerlerini ata.

**REPEAT**

**2.Adım:** Her bir parçacık için ( $i= 1, \dots, n_s$ );

Kişisel en iyi pozisyonu belirle:

Eğer  $f(S.x_i) < f(S.y_i)$  ise  $S.y_i = S.x_i$

Küresel en iyi pozisyonu belirle:

Eğer  $f(S.y_i) < f(S.\hat{y}_i)$  ise  $S.\hat{y}_i = S.x_i$

**3.Adım:** Her bir parçacık için ( $i=1, \dots, n_s$ );

$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)]$

$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$

**UNTIL (Durdurma Koşulu sağlanıncaya kadar)**

CST Studio Suite programında, Parçacık Sürü Algoritması optimizasyon modülünde başlangıç değerleri şu şekilde seçilmiştir: Başlangıç Sürü büyüklüğü, 10; maksimum nesil sayısı, 15; maksimum çözüm sayısı, 151 ve başlangıç popülasyon küme seçim türü: Latin Hypercube Dağılımı'dır. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması simülasyonunun toplam çözüm süresi 6 saat 21 dakika 38 saniyedir.  $w_4$  parametresinin Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması'nın uygulanması sonucu değeri 6,165 mm olarak bulunmuştur.

### 2.2.1.2. Genetik Algoritma

Genetik algoritma, yönlendirilmiş rastgele araştırma algoritmalarının bir çeşididir. Doğal seçim ile canlılardaki genetik yapının benzeşimini gerçekleştirmektedir. Diğer evrimsel algoritmalar gibi bir başlangıç popülasyonu kullanılmaktadır. Bu referans başlangıç popülasyonu, her nesilde doğal seçim ve tekrar çoğalma işlemleri ile tekrar tekrar geliştirilir. Son neslin en kaliteli bireyi, problem için en iyi sonuç olmaktadır. Algoritma işleyişi aşağıdaki gibidir (Karaboğa, 2020):

**1.Adım:** Bir başlangıç popülasyonu üret.

**2.Adım:** Popülasyondaki her çözümü değerlendir ve uygunluk değerini hesapla.

**3.Adım:** Sonlandırma koşulu sağlanıyorsa çalışmayı durdur.

Sağlamıyorsa, alttaki süreci takip et.

**3.1** Doğal seçim işlemini uygula.

**3.2** Çaprazlama yap (Mevcut iki durumdan iki yeni yapı üretilir)

**3.3** Mutasyon yap (Çözümlerde rastgele değişim gerçekleştirir)

**4.Adım:** 2.Adım'a yönlendir.

CST Studio Suite programında, Genetik Algoritma optimizasyon modülünde başlangıç değerleri şu şekilde seçilmiştir: Başlangıç popülasyon büyüklüğü, 16; maksimum nesil sayısı, 20; maksimum çözüm sayısı, 673; mutasyon oranı, %60 ve başlangıç popülasyon küme seçim türü Latin Hypercube Dağılımı'dır. Genetik Algoritma simülasyonunun toplam çözüm süresi 7 saat 19 dakika 45 saniyedir.  $w_4$  parametresinin Genetik Algoritma optimizasyonu sonucu değeri 6,16228 mm olarak bulunmuştur.

### 2.2.1.3. Nelder-Mead Algoritması

Nelder-Mead algoritması, türevsiz ve hesaplaması kolay olan bir metottur. Algoritma, dört tip operasyonu temel alır: Yansıma, genişleme, kısılma ve büzülme. Bu operasyonlar, sırasıyla,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  değişkenleriyle,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 1$ ,  $0 < \gamma < 1$ ,  $0 < \delta < 1$  şartlarını sağlayacak şekilde temsil edilir.  $n$  boyutlu bir simpleks oluşturacak  $n + 1$  köşe ( $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ ) kullanıcı tarafından atanır veya rastgele şekilde üretilir. Böylelikle adım adım yineleme (iteration) başlar (Arslan ve diğ., 2020).

CST Studio Suite programında, Nelder-Mead optimizasyon modülünde başlangıç değerleri şu şekilde seçilmiştir: Minimum Simpleks büyüklüğü,  $1e-6$ ; maksimum nesil sayısı, 20; maksimum çözüm sayısı, 250 ve başlangıç küme seçim türü Noisy Latin Hypercube Dağılımı'dır. Nelder-Mead simülasyonunun toplam çözüm süresi 1 saat 28 dakika 31 saniyedir.  $w_4$  parametresinin Nelder-Mead optimizasyonu sonucu değeri 6,24264 mm olarak bulunmuştur.

### 2.2.1.4. Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi (KMU-ES)

Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi Algoritması, tasarım alanını verimli bir şekilde örneklemek için istatistiksel bir model kullanır. Parametre uzayı, optimizasyon sırasında uyarlanan kovaryans matrisi dikkate alınırken çok değişkenli bir normal dağılıma yaklaşılarak örneklenir. İstatistiksel yaklaşım algoritmaya, yerel bir minimuma erken yakınsamayı önleyerek küresel bir optimizasyon yönteminin sağlamlığını verir. Algoritma, ayrıca yakınsamayı kontrol edecek bir dâhili adım boyutuna sahiptir. Böylece yöntem, yerel ve küresel optimizasyonun özelliklerini paylaşır.

CST Studio Suite programında, Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi optimizasyon algoritma modülünde başlangıç değerleri şu şekilde seçilmiştir: Popülasyon büyüklüğü, 4; maksimum nesil sayısı, 100 ve başlangıç  $\sigma$  değeri (minimum adım),  $0,2$ 'dir. Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi simülasyonunun toplam çözüm süresi 3 saat 55 dakika 38 saniyedir.  $w_4$  parametresinin Kovaryans Matris Uyarlama Evrimsel Stratejisi optimizasyon sonucu 6,16394 mm olarak bulunmuştur.

### 2.2.1.5. Klasik-Powell Algoritması

Klasik-Powell optimizasyonundaki iki ardışık hedef değerleri olan  $g_1$  ve  $g_2$ 'nin, hedef sonlandırma değeri ile arasındaki ilişki aşağıda yer almaktadır.

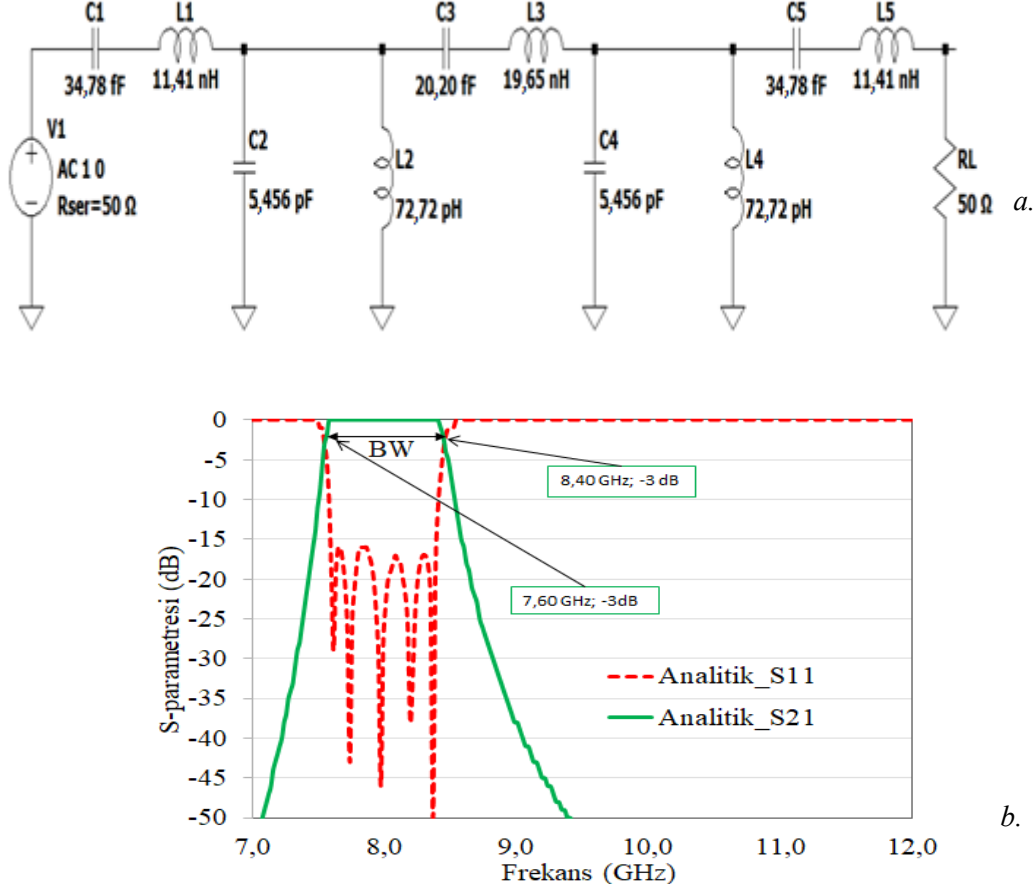
$$\frac{2(g_1 - g_2)}{\|g_1\| - \|g_2\|} < \text{Hedef Sondandırma Değeri} \quad (16)$$

CST Studio Suite programında, Klasik Powell optimizasyon algoritma modülünde başlangıç değerleri şu şekilde seçilmiştir: Hedef sonlandırma değeri, 0,01. Klasik Powell simülasyonunun toplam çözüm süresi 26 dakika 06 saniyedir.  $w_4$  parametresinin Klasik Powell optimizasyon sonucu değeri 6,19038 mm olarak bulunmuştur.

## 2.1.2. Uygulanan Optimizasyon Tekniklerinin Analiz ve Simülasyon Sonuçları

Öncelikle hibrit M-YTED bant geçiren filtre derecesi 5; empedansı 50  $\Omega$ ; Chebyshev T-tipi; geçiş bantı dalgalanma faktörü 0,1 dB; alt kesim frekansı 7,60 GHz ve üst kesim frekansı 8,40 GHz olacak şekilde ele alınmıştır. Daha sonra RF-TOOLS online mikrodalga filtre devre tasarımı uygulaması kullanılarak filtrenin eşdeğer devre eleman değerleri bulunmuştur. Filtrenin eşdeğer devre eleman değerleri;  $C_1= 34,78$  fF,  $L_1= 11,41$  nH,  $C_2= 5,456$  pF,  $L_2= 72,72$  pH,  $C_3= 20,20$  fF,  $L_3= 19,65$  nH,  $C_4= 5,546$  pF,  $L_4= 72,72$  pH,  $C_5= 34,78$  fF ve  $L_5= 11,41$  nH'dir. En son aşamada

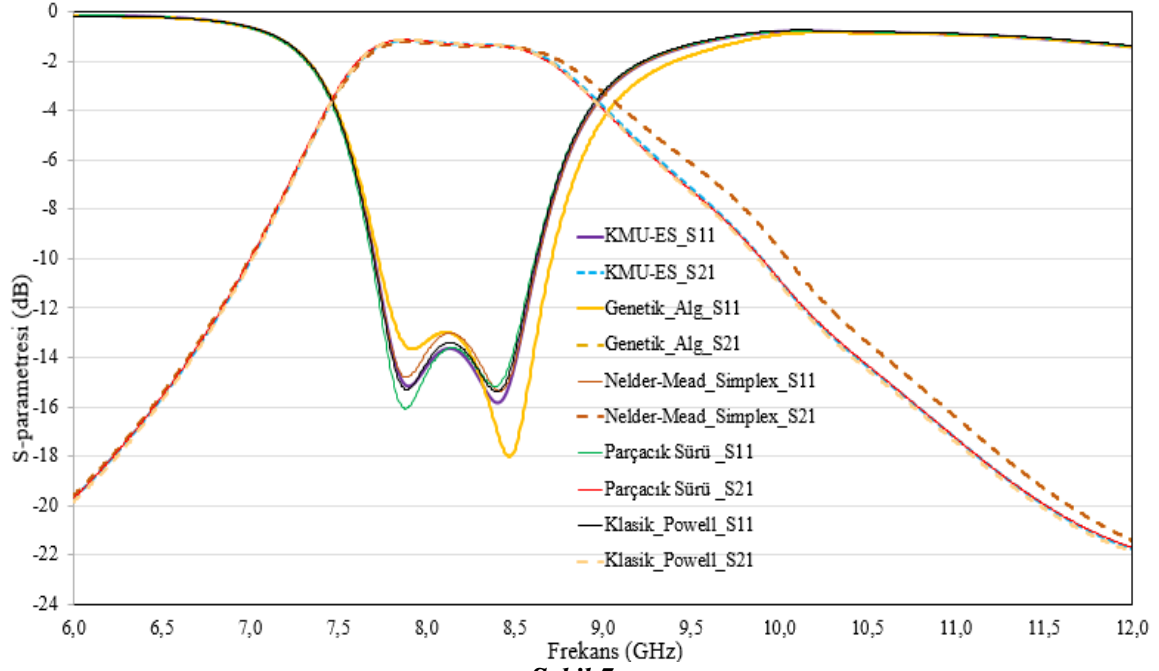
ise, LTspice XVII filtre tasarım uygulamasında bu eşdeğer devre sanal olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan eşdeğer devre simüle edilmiş ve M-YTED bant geçiren filtrenin analitik S-parametresi sonuçları elde edilmiştir. Hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin eşdeğer devresi Şekil 6 (a)'da ve S-parametre değerleri Şekil 6 (b)'de gösterilmektedir (LTspice XVII Filtre Devre Tasarım Uygulaması, Erişim Tarihi: 09.09.2021; RF-Tools Online Filtre Devre Tasarım Uygulaması, Erişim Tarihi: 09.09.2021).



Şekil 6:

5. dereceli hibrit M-YTED bant geçiren Chebyshev filtre: a. Filtrenin eşdeğer devresi  
b. S-parametresi değerleri

6 kHz örnekleme frekansı ile 5 farklı optimizasyon tekniği  $w_4$  parametresi için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar oldukça birbirine yakındır. Şekil 7'de, 7 GHz - 9 GHz frekans aralığında  $S_{11}$  değerlerinin toplamının en fazla değerde olduğu Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması metodunun daha uygun olduğu görülmektedir.  $w_4$  parametresinin uzunluğunun yeni değeri 6,165 mm olarak alınmıştır. Güncellenen parametre tablosu Tablo 1'de verilmiştir.

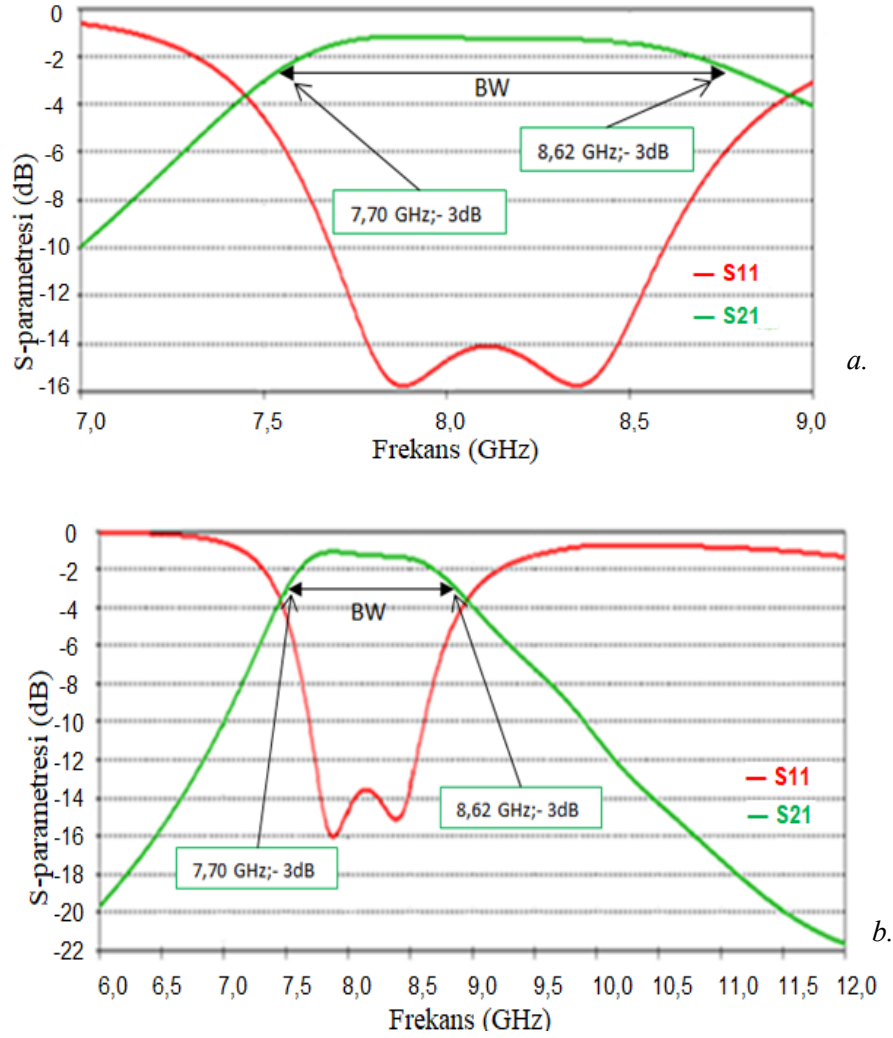


**Şekil 7:**  
CST Studio Suite 'de uygulanan 5 farklı optimizasyon metodunun sonuçları

**Tablo 1. Optimizasyon İşleminde Kullanılan M-YTED Filtrenin Parametre ve Uzunluk Değerleri**

Parametre	Uzunluk	Parametre	Uzunluk
$a$	10,5mm	$w_4 (2w_3 + w_2)$	6,165 mm
$d$	1 mm	$w_5$	20 mm
$h$	1,52 mm	$l_2$	3 mm
$s$	1,5 mm	$l_3$	30 mm
$w_1$	3,549 mm	$l_4$	2,3 mm
$w_2$	0,31 mm	$l_5$	12,05 mm
$w_3$	2,927 mm		

Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması metoduyla 6,165 mm olarak bulunan  $w_4$  parametresi, bu yeni değeriyle CST Studio Suite programında simüle edilmiştir. Şekil 8'de simülasyon sonucu yer almaktadır. Geçiş bandında  $S_{11}$  değerleri genel olarak -14 dB'den küçük ve  $S_{21}$  değerleri de -2 dB'den büyüktür.



**Şekil 8:**

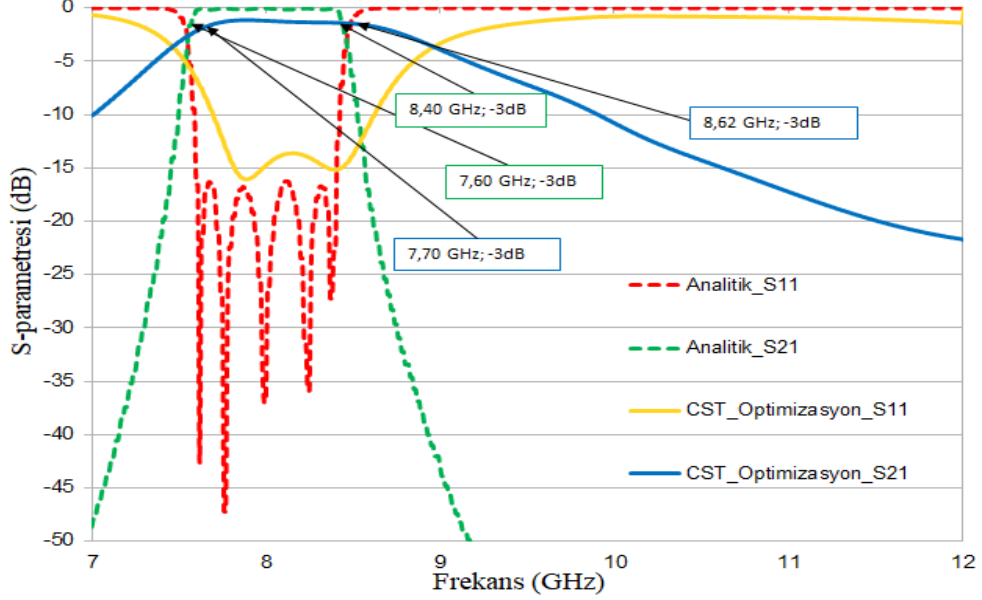
*Hibrit M-YTED bant geçiren filtre ( $w_4 = 6,165$  mm): a. 7 GHz - 9 GHz frekans aralığındaki CST Studio Suite  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  sonuçları b. 6 GHz - 12 GHz frekans aralığındaki CST Studio Suite  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  sonuçları*

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Optimize edilmiş hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin hesaplanan dalga boyu ( $\lambda_{bgf}$ ) 20,41 mm'dir. Şekil 8 (b)'de görüldüğü gibi geçiş bandı 0,80 GHz'dir (%10,01). 0,80 GHz olan analitik bant genişliği, simülasyon sonucunda ise 0,92 GHz (%11,29) olarak bulunmuştur. Merkez frekansın ( $\omega_0$ ) analitik değeri 7,90 GHz ve simülasyon sonucu ise 8,15 GHz'dir. Analitik ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında simülasyondaki merkez frekans %1,98 ve simülasyondaki bant genişliği ise %15 artmıştır.

Şekil 9'da ise 7 GHz-12 GHz frekans aralığında analitik ve simülasyon sonuçlarının S-parametresi değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyonda geçiş bandındaki  $S_{11}$  değerleri yaklaşık -15 dB, analizde geçiş bandındaki  $S_{11}$  değerleri ise yaklaşık -16 dB'dir. Simülasyon ve analiz sonuçlarına göre geçiş bandı (passband) değerleri birbirine yakındır. M-YTED filtre; simülasyondaki iletim ve kesim geçiş bölgeleri (7,00-7,75 GHz ve 8,50-10,00 GHz) incelendiğinde 0,73 GHz bant genişliğinde iletme ve 1,17 GHz bant genişliğinde kesime geçtiği görülmektedir. Analiz sonuçlarında ise filtrenin 0,14 GHz bant genişliğinde hem iletme hem de

kesime geçtiği görülmektedir. Simülasyondaki anahtarlama frekans aralığı analitik sonuca göre iletimde 0,59 GHz ve kesimde 1,03 GHz daha fazladır. Bant-dışı frekans baskılamada ise hem analitik hem de simülasyon değerleri genel olarak benzer davranışlar sergilemektedir.



**Şekil 9:**

*Hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin simülasyon ve analitik sonuçlarının karşılaştırılması*

Şekil 9'daki simülasyon çözüm sonuçlarına göre -3 dB alt kesim frekansı ( $\omega_1$ ) 7,70 GHz; -3 dB üst kesim frekansı ( $\omega_2$ ) 8,62 GHz'dir. Analitik sonuçlara göre -3 dB alt kesim frekansı ( $\omega_1$ ) 7,60 GHz ve -3 dB üst kesim frekansı ( $\omega_2$ ) 8,40 GHz'dir. Geriye dönüş kaybı geçiş-bandında -13 dB'den küçüktür. Araya giriş kaybı ise -2 dB'den büyüktür. Analitik ve simülasyon değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2. Optimize edilmiş hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin analiz ve simülasyon sonuçları**

Optimizasyon Çalışması	-3 dB Alt Kesim Frekansı ( $\omega_1$ ) (GHz)	Merkez Frekansı ( $\omega_0$ ) (GHz)	-3 dB Üst Kesim Frekansı ( $\omega_2$ ) (GHz)	Bant Genişliği (BW) (GHz)	Dalga Boyu ( $\lambda$ ) (mm)
Analitik	7,60	7,90	8,40	0,80	20,41
Simülasyon	7,70	8,15	8,62	0,92	20,02

Modüler yapıdaki X-Bant uygulaması olan hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin kalite faktörü 2,75 iken Eşitlik (7.a)'ya göre optimize edilmiş hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin kalite faktörü 8,85 bulunmuştur. Bir bant geçiren filtrenin seçicilik göstergesi olan kalite faktörü, optimizasyon işlemi sayesinde Güvenli ve diğ., (2021)'nin sunduğu çalışmaya göre 3,21 kat artırılmıştır.

Tablo 3’de bu çalışma ile literatürde sunulmuş YTED bant geçiren filtre çalışmalarının karşılaştırılması verilmiştir.

**Tablo 3. Farklı YTED bant geçiren filtre sonuçlarının karşılaştırılması**

Yapılan Çalışma	Filtre Tasarım Tipi	Merkez Frekans (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	S <sub>11</sub> (dB)	S <sub>21</sub> (dB)	Er/ tanδ	Kalite Faktörü	Boyut (mm× mm)
Chen ve diğ., (2018)	SSPP-YTED	11,20	7,30	12 <	< 2	2,20/ Veri yok	1,53	100× 20
Hussein ve diğ., (2020)	FVVHW-YTED	11,65	2,50	16 <	< 3,3	3,38/ 0,0027	4,66	40× 12,70
Weiping ve diğ., (2017)	DGS-YTED	10,10	5,40	15 <	< 1,4	3,50/ 0,0018	1,87	10×17
Wu ve diğ., (2021)	Hava Boşluklu-YTED	32,27	0,90	24 <	< 1,2	2,20/ 0,0009	35,85	25× 26,90
Xu ve diğ., (2016)	Rezonatör-YTED	12,25	0,50	17,4<	< 1	Veri yok	24,50	51,78× 30
Bu çalışma	M-YTED	8,15	0,92	13 <	< 3	3,38/ 0,0027	8,85	30×20

Tablo 3’deki sonuçlar incelendiğinde M-YTED bant geçiren çalışması, kalite faktörü değerine göre 3. sırada yer almaktadır. Filtrelerin kalite faktörü değerleri sırasıyla, Wu ve diğ., (2021)’nin 35,85; Xu ve diğ., (2016)’nin 24,50 ve bu çalışmanın da 8,85’dir. Endüstriyel üretimde ürünün boyutlarının önemi gün geçtikçe arttığı düşünüldüğünde, bu çalışmadaki M-YTED filtrenin boyutu Wu ve diğ., (2021)’nin ve Xu ve diğ., (2016)’nin çalışmalarındaki filtre boyutundan küçüktür.

#### 4. SONUÇ

Bu makalede, daha önce sunulmuş hibrit M-YTED bant geçiren filtre çalışmasının optimizasyonu yapılmıştır. Art arda birbirine entegre edilmiş alçak geçiren ve yüksek geçiren filtre yapıları içeren hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin araya girme kaybı ve geri dönüş kaybı değerlerinde iyileşme sağlanmıştır. Modüler olarak tasarlanmış bant geçiren filtrede, yüksek geçiren YTED filtre yapısının simetrisi elektromanyetik dalga yayılım yönü doğrultusunda korunmuştur. Tasarımda sadelik, üretimde kolaylık anlayışıyla silindirik iletken ince çubuklar yerine kare prizma iletken ince çubuklar seçilmiş ve iletken ince çubuklar sayısı 28’den 18’e düşürülmüştür. Alçak geçiren mikroşerit filtre kısmındaki kanat açıklığı ( $w_4$ ) parametresi, alçak



geçiren filtrenin kesim frekansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle  $w_4$  parametresinin 6,00 mm - 6,50 mm aralığında 5 farklı algoritma modülü kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyonda, geçiş bandındaki  $S_{11}$  değerlerinin toplamının en düşük değerde olması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım göre metotlar karşılaştırıldığında, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması, geçiş bandındaki  $S_{11}$  değerleri toplamının en düşük değerde olması nedeniyle seçilmiş ve  $w_4$  değeri 6,165 mm olarak bulunmuştur. Önceki çalışmada kalite faktörü 2,75 olan hibrit M-YTED bant geçiren filtrenin optimizasyondan sonraki kalite faktörü değeri 8,85 olarak elde edilmiştir. Filtrenin kalite faktörü, Guvenli vd., (2021)'nin sunduğu çalışmaya göre %321,81 oranında artmıştır. 7 GHz- 12 GHz frekans aralığında analitik ve simülasyon sonuçları benzerlik göstermektedir. Geçiş bandında araya girme kaybı 2 dB'den az, geri dönüş kaybı ise 12 dB'den yüksektir. Optimize edilen filtrenin simülasyon sonucunda, iletim bölgesindeki anahtarlama bant aralığı 0,73 GHz ve kesim bölgesindeki anahtarlama bant aralığı 1,03 GHz olarak elde edilmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Bu çalışmada; Kemal GÜVENLİ veri toplama ve veri analizi; Sibel YENİKAYA çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve sonuçların yorumlanması; Mustafa SEÇMEN veri analizi ve yorumlama kısmında katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. Alburaikan A. (2016). Metamaterial Structure Inspired Miniature RF/Microwave Filters, *Doktora Tezi*, U.M. Fen Bilimleri Enstitüsü, Manchester.
2. Arslan, H., Sofyalı, A. ve Ünal, E. (2020) Genetik, Parçacık Sürü ve Nelder-Mead Simpleks Algoritmalarının Fırlatma Yörüngesi Optimizasyonu Üzerinden Karşılaştırılması, *8. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, Ankara, 1-9.
3. Bozzi, M., Pasian, M., Perregrini, L. ve Wu, K. (2009) On the Looses in Substrate Integrated Waveguides and Cavities, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1(5): 395-401. doi: <https://doi.org/10.1017/S1759078709990493>
4. Celis, S., Farhat, M., Almansouri, A. S., Bagci, H., ve Salama, K. N. (2020) Simplified Modal-Cancellation Approach for Substrate-Integrated-Waveguide Narrow-Band Filter Design, *Electronics* 2020, 9(962), 1-15. doi: 10.3390/electronics9060962
5. Chen, P., Li, L., Yang, K. ve Chen, Q. (2018) Hybrid Spoof Surface Plasmon Polariton and Substrate Integrated Waveguide Broadband Bandpass Filter With Wide Out-of-Band Rejection, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(11): 984-986. doi: 10.1109/LMWC.2018.2869290
6. Chen, X.P. ve Wu, K. (2014) Substrate Integrated Waveguide Filter: Basic Design Rules and Fundamental Structure Features. *IEEE Microwave Magazine*, 15(5): 108–116. doi: 10.1109/MMM.2014.2321263
7. Dai, X., Yang, Q., Du, H., Jianxing, L., Cheng, G. ve Zhang, A. (2021) Direct Synthesis Approach for Designing High Selectivity Microstrip Distributed Bandpass Filters Combined with Deep Learning, *Int. J. Electron. Commun.*, 131, 153499. doi: 10.1016/j.aeue.2020.153499

8. Deslandes, D. ve Wu, K. (2001) Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 11(2): 68-70. doi:10.1109/7260.914305
9. Dong, Y., Yang, B., Yu, Z. ve Zhou, J. (2020) Robust Fast Electromagnetic Optimization of SIW Filters Using Model-Based Deviation Estimation and Jacobian Matrix Update, *IEEE Access*, 8, 2708-2722. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961750
10. Ghosh, S., vd. (2012) A Differential Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Algorithm for Real Parameter Optimization, *Information Sciences* 182(1):199-219. doi: 10.1016/j.ins.2011.08.014
11. Guvenli, K., Yenikaya, S. ve Seçmen, M. (2021) 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. doi: 10.5755/j02.eie.27479
12. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/optimization/>, Erişim Tarihi: 22.05.2021, Konu: *Optimizasyon Teknikleri*.
13. <https://rf-tools.com/lc-filter/>, Erişim Tarihi: 09.09.2021, Konu: *RF-Tools Online Filtre Devre Tasarım Uygulaması*.
14. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>, Erişim Tarihi: 09.09.2021, Konu: *LTspice XVII Filtre Devre Tasarım Uygulaması*.
15. <https://www.keysight.com/zz/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html>, Erişim Tarihi: 09.09.2021, Konu: *ADS Devre Simülatorü*.
16. Hussein, O.I., Shamaileh, K.A.A., Dib, N.I., Nosrati, A., Abushamleh, S., Georgiev, D.G. ve Kumar, D.V. (2020) Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filtering With Fourier Varying Via-Hole Walling, *IEEE Access*, 8, 139706-139714, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012994
17. Karaboğa, D. (2020) Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Yayınevi, Ankara.
18. Palecek J., Vestenicky, M. ve Ticha, D. (2012) Optimization of RF band pass filter by genetic algorithm, *2012 ELEKTRO*, 79-82, doi:10.1109/ELEKTRO.2012.6225576
19. Palecek J., Vestenicky, P., Vestenicky, M. ve Spalek, J. (2011) Optimization of Microstrip Filter Dimensions by Differential Evolution Algorithm, *INES 2011*, Poprad, Slovakia. doi: 10.1109/INES.2011.5954740
20. Pozar, D. M. (2012) *Microwave Engineering*, NJ: John Wiley & Sons Inc., New York.
21. Sun, J., Sun, S., Yu, X. ve Chen, Y. P. (2019) A Deep Neural Network Based Technique of Lossy Microwave Coupled Resonator Filters, *Microw. Opt Technol. Lett.*, 61, 2169-2173, doi: 10.1002/mop.31865
22. Winder, S. (2005) Analog ve Dijital Filtre Tasarımı, Bilişim Yayınevi, İstanbul.
23. Weiping, L., Zongxi, T., ve Xin, C. (2017) Design of a SIW Bandpass Filter Using Defected Ground Structure with CSRRs, *Active and Passive Electronic Components*, 2017, 1-6, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/1606341>
24. Wu, Y., Yang, K., Chen, P., Zhang, L. ve Li, G. (2021) Novel air-filled substrate integrated waveguide bandpass filter with nonresonant node structures. *Microw Opt Technol Lett.*, 63, 2916– 2920, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.32985>
25. Xu, J., Jian B. J., Long L. Z. ve Chen, R.S. (2016) Optimisation of SIW bandpass filter with wide and sharp stopband using space mapping, *International Journal of Electronics*, 103(12): 2042-2051, doi: 10.1080/00207217.2016.1178338