



ÇOK AMAÇLI EVRİMSEL ALGORİTMALAR İLE FİLTRE TASARIMI

Ahmet ULUSLU*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Alçak Geçiren Filtre,
ABA,
ÇAEA/A
DEA,
GKAA,
Çok Amaçlı Optimizasyon.

Öz

Birçok iletişim sistemi, radyo frekans (RF) filtreleriyle sinyal işleyen bir radyo frekans ön ucuna ihtiyaç duyar. Mikroşerit filtreler bunu gerçekleştirebilmenin oldukça düşük maliyetli ve kolay bir yöntemidir. Filtreler, mikrodalga teknolojisini kullanan uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda mikroşerit filtreler, GSM (900MHz,1800MHz), WLAN (2,45GHz), WİMAX (3,5GHz) vb. kablosuz ve mobil haberleşme sistemlerindeki gelişmelerle beraber yoğun olarak kullanılmaktadır. Kullanılabilir boyut, yüksek performans ve düşük maliyet gibi ortaya atılan kriterleri karşılamak için milimetre ve mikrodalga sistemlere artan büyük bir ilgi vardır. Bu makalede, dizi (filtre kat sayısı) $n = 8-12$ arası değişen değerler için 1,6 mm dielektrik yüksekliğine sahip, geçirgenlik 4,4 değeri için WLAN (2,45GHz) ve WİMAX (3,5GHz) frekansında çalışan mikroşerit düzeni kullanılarak düşük maliyetli ve düşük ekleme kayıplı S-bant alçak geçiren filtrenin (AGF) tasarımını evrimsel algoritmalar ile kolaylaştırılmasını göstermektedir. Bu çalışmada standart yapılanlara ek olarak değişken filtre kat sayısı ve simetri durumu problemin zorluk derecesini bir basamak daha ileri götürmektedir. Tasarım simülasyonu, MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tasarım sonucunda algoritmaların başarı grafiklerinin yanı sıra her algoritma için tasarlanan filtrenin S_{11} ve S_{21} (dB) parametreleri MATLAB programı ile çizdirilmiştir. En başarılı sonuç olan diferansiyel evrim algoritması ile yapılan optimizasyon ile elde edildiği görülmüş ve farklı bir frekans bandı için ayrıca bir yapılmıştır.

FILTER DESIGN WITH MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Keywords

Low Pass Filter,
FFA,
MOEA/D
DEA,
CSA,
Multi-Objective Optimization.

Abstract

Many communication systems require a radio frequency front end that processes signals with radio frequency (RF) filters. Microstrip filters are a very low cost and easy way to do this. Filters have an important place in applications using microwave technology. Also, microstrip filters, GSM (900MHz, 1800MHz), WLAN (2.45GHz), WİMAX (3.5GHz) etc. It is used extensively with the developments in wireless and mobile communication systems. There is a growing interest in millimeter and microwave systems to meet the criteria put forward such as usable size, high performance and low cost. In this article, the array (filter coefficient) has a dielectric height of 1.6 mm for values ranging from $n = 8-12$, using a microstrip scheme operating at WLAN (2.45GHz) and WİMAX (3.5GHz) frequencies for a transmittance value of 4.4. It shows that the design of a low cost and low insertion loss S-band low-pass filter (LPF) is facilitated by evolutionary algorithms. In this study, in addition to the standard ones, the variable filter coefficient and symmetry situation take the difficulty level of the problem one step further. Design simulation is carried out using the MATLAB program. As a result of the design, the S_{11} and S_{21} (dB) parameters of the filter designed for each algorithm, as well as the success graphs of the algorithms, were drawn with the MATLAB program. It was seen that the most successful result was obtained with the optimization made with the differential evolution algorithm and another one was made for a different frequency band.

Alıntı / Cite

Uluslu, A., (2022). Çok Amaçlı Evrimsel Algoritmalar ile Filtre Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 201-216.

* İlgili yazar / Corresponding author: auluslu@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Uluslu, 0000-0002-5580-1687	Başvuru Tarihi / Submission Date	09.05.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	26.08.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	01.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

İlerleyen teknoloji ile birlikte mikrodalga iletişim sistemleri daha büyük bant genişliği ve daha küçük cihaz boyutu gibi geleneksel kablosuz bağlantılara göre birçok avantaj sağlayabilmek için S-bandı gibi daha yüksek frekanslara doğru ilerlemektedir. Bu tür sistemler için filtreler ise mikroşerit hatlar ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı farklı evrimsel algoritmalar ile en optimum sonucu veren filtrenin boyutlarını tespit edebilmektir. Bir diğer amacımız ise gerekli tasarlanmış parametrelerin (kesme frekansı ve dönüş kaybı gibi) elde edilmesinde yüksek doğruluk elde etmektir. Filtreler, bir mikrodalga sisteminin birincil ve gerekli bileşenlerinden biridir. Mikroşerit serisi, düşük maliyeti, kompakt boyutu, hafifliği, düzlemsel yapısı ve tek bir kart üzerindeki diğer bileşenlerle kolay entegrasyon avantajları nedeniyle filtre tasarımı için iyi bir adaydır. Eşit dalgalanma ve butterworth düşük geçişli filtreler gibi geleneksel filtre yapıları, özel üretim yöntemlerinin bir gereğidir. Üretim için geleneksel düşük frekans teknikleri, ilişkili çok yüksek kayıplar nedeniyle bu frekanslara uymamaktadır. Tasarım ve simülasyon, MATLAB programı kullanılarak belirlenen giriş parametreleri ile optimize edilen çok amaçlı evrimsel algoritmalar ile yapılmıştır. Bir sonraki bölümde kaynak araştırması yapılacaktır. Akabinde önerilen yöntem başlığı altında filtre tasarımı için kullanılan matematiksel model gösterilerek optimizasyonda kullanılacak olan evrimsel algoritmalar tanıtılacaktır. Aynı başlık altında amaç ve maliyet fonksiyonlarının belirlenmesinden sonra yapılan çalışma kısmı sunulacaktır. Sonuçlarımız, tüm filtre tiplerinde kullanılacak bazı önerilerle birlikte sonuç ve tartışma bölümünde özetlenecektir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Mikrodalga filtreler, GSM (900MHz,1800MHz), WLAN (2.45GHz), WİMAX (3.5GHz) vb. mobil iletişim için birçok yeni radyo frekansı (RF) bandı 3GPP'de standart hale geldi ve bununla birlikte, mobil terminallerdeki RF filtrelerinin ve çoklayıcıların daha yüksek performans gereksinimlerini güçlendirdi. Örneğin düşük kayıp, yüksek seçicilik, iyi sıcaklık kararlılığı, geniş çalışma frekans aralığı vs. son yıllarda, Uzun Vadeli Evrim (LTE) bantlarının merkez frekansları, 2,7 GHz'in altındaki geleneksel bantlardan mobil iletişim endüstrilerinde ultra yüksek bant (UHB) olarak adlandırılan daha yeni 3 GHz aralığına uzanmaktadır (Kale vd., 2013). UHB filtreleme cihazları olarak, şu anda mobil terminallerde çok katmanlı düşük sıcaklıkta birlikte pişirilen seramik (LTCC) teknolojisi ve entegre pasif cihazlar (IPD) kullanan LC filtreleri kullanılmaktadır (Liu vd., 2009). Ancak UHB bandındaki frekans sıklığına göre kompakt boyutta daha dik etekli ve daha düşük ekleme kayıplı yüksek performanslı filtrelere ihtiyaç duyulmuştur. Son zamanlarda, çok ince bir piezoelektrik katmanlar kullanan yeni tip yüzey akustik dalgası cihazlarının bir yüzey enerjisi sınırlama etkisi gösterdiği ve toplu akustik dalgadan daha büyük veya ona eşit olan son derece yüksek bir kalite gerçekleştirdiği bildirilmiştir. Ultra geniş bantlı (UWB) sistemler, düşük güç tüketimi ve yüksek veri iletim hızları ile kısa mesafeler için çok geniş frekans bant seçenekleri üzerinden veri iletimini başarı ile gerçekleştirebilmektedir. Bu uygulamaların tasarımı karmaşık olması sebebi ile ve gelişen iletişim sistemlerine artan talep nedeni ile endüstriyel uygulamalarda ve dolayısı ile akademik çalışmalarda popülerliğini sürdürmektedir (Wells vd., 2009). Son yıllarda evrimsel optimizasyon algoritmaları mühendislik alanında tasarım optimizasyon problemleri için sıklıkla kullanılmaktadır (Güneş vd., 2014; Güneş vd., 2015). Özellikle giriş parametre sayısının fazla olduğu ve bu parametreler arasındaki ilişkinin karmaşıklığı doğadan esinlenen pek çok meta-sezgisel optimizasyon algoritması türemesine neden olmuştur. Bunlar arasında oldukça yaygın olarak kullanılan ateş böceği, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama algoritmaları birçok farklı problem için kullanılmıştır (Storn vd., 1997; Yıldırım vd., 2016). Filtrelerin yanı sıra anten optimizasyonu, transistor parametrelerinin optimizasyonu vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Yıldırım vd., 2017; Güneş vd., 2017). Bir çalışmada bu çalışmadakine benzer geometriye sahip sabit 10 katmanlı bant geçiren filtrenin yalnızca bir algoritma ile optimizasyonu konusu işlenmiştir (Yıldırım vd., 2017). Burada katman sayısının sabit olması daha optimum sonuçların bulunmasına engel teşkil edebileceği düşünülerek bu çalışmada katman sayısı da değişken olarak eklenmiştir. Ayrıca sadece bir algoritma kullanılmış olması kıyaslama yapılmasına engeldir. Yine güncel bir çalışmada farklı geometrik yapıya sahip bant geçiren filtrenin modellenmesi konusu işlenmiştir (Mahouti vd., 2021). Bu çalışmadaki maliyet fonksiyonları seçimi bu yapılan çalışmadaki maliyet fonksiyon seçiminin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Yapılan çalışmada WLAN (2,45GHz) ve WİMAX (3,5GHz) alçak geçiren bir filtrenin farklı optimizasyon algoritmalarıyla modellenmesi üzerine çalışılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Alçak geçiren filtrelerin tasarımı iki ana adımdan oluşur. İlki, uygun bir düşük geçiş prototipi seçmektir. Geçiş bandı dalgalanması ve reaktif elemanların sayısı (filtrenin sırası) dahil olmak üzere yanıt türünün seçimi, gerekli özelliklere bağlı olacaktır. Genellikle bir kaynak empedansı $g_0 = 1$ ve bir kesme frekansı $\Omega_c = 1.0$ yapmak için normalize edilen düşük geçişli prototip filtrelerin eleman değerleri, daha sonra istenen kesme frekansı ve istenen kaynak empedansı için LC elemanlarına dönüştürülür. Mikroşerit filtreler için normalde 50 ohm. Mikroşerit alçak geçiren filtrelerin (Pozar vd., 2000) tasarımındaki bir sonraki ana adım, topaklanmış eleman filtresine yaklaşan uygun bir mikroşerit gerçekleştirme bulmaktır. Geçiş bandı dalgalanma faktörü $LAR = 0.1dB'$ de maksimum düz yanıt düşük geçişli prototip için eleman değerleridir. Karakteristik empedans kaynağı / yük $Z_0 = 50$ ohm, g_i ($g_1, g_2, g_3, g_4 \dots g_n$) normalleştirilmiş değerlerden alınmıştır. Filtrenin, dielektrik sabiti ϵ_r ve alt tabaka kalınlığı (h) mm olan bir substrat üzerinde imal edildiği varsayılır (JiaShen vd., 2001).

Filtre Özellikleri:

Dielektrik sabiti (ϵ_r) = 4,4

Alt tabaka yüksekliği (h) = 1,6 (mm)

Kesme frekansı = 3,5 (GHz)

Kayıp teğet $\tan\delta = 0,02$

Filtre empedansı $Z_0 = 50\Omega$

En yüksek hat empedansı $Z_Y = Z_{OY} = 120\Omega$

En düşük hat empedansı $Z_D = Z_{OD} = 20\Omega$ olarak seçilir.

Seçilen parametreler literatür taramasında gösterilen ve en yaygın olarak kullanılan özelliklerdir. Bu parametreler ile geniş bantlı bir filtrenin tasarımı için her bir iletim hattının ABCD parametreleri aşağıda verilen denklem (1) ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (1)$$

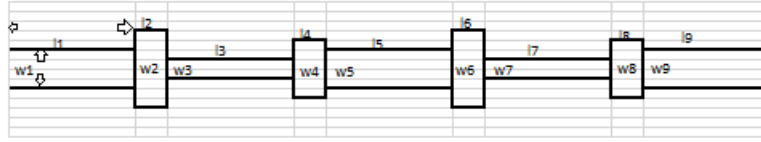
Tasarım için kullanılacak olan N adet (8-12 arası değişken) iletim hattının her bir tanesine ait ABCD parametreleri çarpılarak ABCD matris parametreleri bulunabilir. Bu bulunan eşdeğer ABCD parametreleri ile aşağıda verilen denklemler (2,3) yardımı ile bu parametrelere karşılık gelen S_{11} ve S_{21} değerleri rahatlıkla hesaplanabilir, daha sonra bulunan sonuç dB değere çevrilir.

$$S_{11} = \frac{AZ_{N2} + B - CZ_{N1}^* Z_{N2} - DZ_{N1}^*}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (2)$$

$$S_{21} = \frac{2\sqrt{\text{Re}\{Z_{N1}\} \text{Re}\{Z_{N2}\}}}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (3)$$

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada, bir ultra geniş bant mikroşerit filtresinin tasarım optimizasyon problemini çözmek için mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılan ateşböceği (AB), ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritma (MOEA/D), diferansiyel evrim (DE) ve guguk kuşu arama (GKA) algoritmaları ele alınacaktır. Bunlar literatür taramasında da belirtilen ve yaygın olarak kullanılan algoritmalarından seçilmiştir. Tasarım optimizasyon problemi için mikroşerit filtrenin elektriksel uzunluğu (g_i), kullanılacak iletim hattı sayısı (filtre kat sayısı= n) ve hattın simetrik (simetri durumu: 1. ve N., 2. ve N-1, 3 ve N-2. aynı boyuta sahip olması) olup olmaması değişkenleri kullanılır. Burada filtre kat sayısı algoritma içerisinde rastgele olarak verilen aralıkta seçilmekte ve her adımda otomatik olarak değişmektedir. Optimizasyon sonucu en başarılı sonuçtaki eleman sayısı baz alınmaktadır. Filtre şematik olarak çizilecek olursa, örnek olarak 9 elemanlı bir yapı Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak her bir hattın ABCD parametreleri elde edilir. Akabinde eşdeğer devre ABCD parametreleri kullanılarak saçılma parametreleri elde edilir. Daha sonra hep bir frekans adımı için maliyet fonksiyonu hesaplanır ve toplanır. Sonuç olarak en düşük maliyet fonksiyonuna sahip sonuç tasarım sonucu olarak simüle edilerek sonuçlar sunulur (Belen vd., 2014; Yang vd., 2009; Yang vd., 2010; Wang vd., 2012; Yang vd., 2009; Güneş vd., 2016; Storn vd., 1997; Das vd., 2009; Das vd., 2011).



Şekil 1. Ultra geniş bant 9 elemanlı mikroşerit filtrenin şematik görünümü (Schematic view of ultra-wideband 9-element microstrip filter)

Aşağıdaki alt bölümlerde ateşböceği (AB), ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel (MOEA/D), diferansiyel evrim (DE), guguk kuşu arama (GKA) optimizasyon algoritmaları kısaca özetlenmektedir.

3.2.1. Evrimsel Algoritmalar (Evolutionary Algorithms)

3.2.1.1. Ateşböceği (Firefly)

Ateşböceği (AB) algoritması, Yang (Belen vd., 2014; Yang vd., 2009) tarafından geliştirilen, doğadaki ateş böceklerinin parlama davranışından esinlenen evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır. Ateşböceği algoritmasında iki önemli özellik vardır, Bunlar: Parlaklık yani ışık yoğunluğu (I) ve çekiciliktir (β).

Ateşböceği algoritmasında üç standart kural vardır:

- (i) Bir ateş böceğinin parlaklığı, belirli bir problemin $f(x)$ amaç fonksiyonunun değeriyle belirlenir. Bir küçültme problemi için parlaklık, amaç fonksiyonu $I(x) \propto 1 / f(x)$ değeriyle ters orantılı olabilir.
- (ii) Bir ateş böceğinin çekicilik derecesi parlaklığı ile orantılıdır. Sabit ışık soğurma katsayısına sahip belirli bir ortamın üssel soğurması nedeniyle mesafe arttığında parlaklık azalacaktır:
- (iii)

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (4)$$

Herhangi iki ateşböceği arasındaki mesafe nerede ve sırasıyla

$$r_{ij} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^D (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (5)$$

Burada D , optimizasyon değişken vektörünün boyutudur; I_0 , ateş böceğinin maksimum parlaklığıdır. Bir ateş böceğinin hareket ettiği mesafe çekiciliğe göre belirlenir. Ateşböceğinin çekiciliği β şu şekilde tanımlanır:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (6)$$

β_0 $r = 0$ 'daki çekiciliktir.

- (iv) Tüm ateşböcekleri üniseks ve cinsiyetlerine bakılmaksızın daha çekici ve daha parlak olanlara doğru hareket edecekler. Belirli bir ateşböceğinden daha parlak veya daha çekici bir ateşböceği yoksa, rastgele hareket edecektir. Böylece bir ateşböceğinin hareketi i daha çekici (daha parlak) başka bir ateşböceğine çekilir yani j tarafından belirlenir.
- (v)

$$\vec{x}_i^{t+1} = \vec{x}_i^t + \beta(\vec{x}_j^t - \vec{x}_i^t) + \alpha_t \vec{\epsilon}_i \quad (7)$$

$\beta_0=1$ ve $\epsilon_i \in [-1/2, 1/2]$ şeklinde eşit olarak dağıtılmış rastgele sayıların bir vektörü ve α_t rasgele dağıtma faktörü olduğunda, genellikle (Yang vd., 2013)'de olduğu gibi her ardışık yinelemede azaltılır, ancak bu çalışmada rastgele $\alpha_t \in [0, 1]$ seçilir.

3.2.1.2. Ayrıştırmaya Dayalı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition)

Ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritma (MOEA/D), bu yazıda kullanılan bir diğer algoritma, incelenen çok amaçlı optimizasyon problemini ayrıştırmalıdır. Herhangi bir ayrıştırma yaklaşımı bu amaca hizmet edebilir. Aşağıdaki açıklamada, Tchebycheff yaklaşımının kullanıldığını varsayıyoruz. Diğer ayrıştırma yöntemleri kullanıldığında aşağıdaki MOEA/D'yi değiştirmek çok önemsizdir. Eşit yayılmış ağırlık vektörleri kümesi olsun ve referans noktası olduğu varsayılır. MOEA/D'de, bir ağırlık vektörünün komşuluğu, içindeki en yakın birkaç ağırlık vektörünün bir kümesi olarak tanımlanır. λ alt probleminin komşuluğu, komşuluğun ağırlık vektörleri ile tüm alt

problemlerden oluşur. Popülasyon, her bir alt problem için şimdiye kadar bulunan en iyi çözümden oluşur. MOEA/D'deki bir alt problemi optimize etmek için sadece komşu alt problemlerine yönelik mevcut çözümler kullanılır. (Zhang vd., 2007)

3.2.1.3. Diferansiyel Evrim (Differential Evolution)

Diferansiyel evrim (DE) algoritması, gerçek değerli sayısal optimizasyon problemlerinin (Güneş vd., 2016; Storn vd., 1997; Das vd., 2009; Das vd., 2011) çözümü için geliştirilmiş popülasyon tabanlı evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır ve bilim ve mühendisliğin çeşitli alanlarından kaynaklanan optimizasyon problemlerine birkaç önemli uygulama bulunmuştur. Geleneksel benzerlerinden farklı olarak, amaç fonksiyon manzarasını keşfetmek için parametre vektörlerinin farkını kullanan çok etkili bir küresel optimizasyon algoritmasıdır. Diferansiyel evrim algoritması, genetik algoritmanın mutasyon, çaprazlama ve seçim stratejilerini, geçiş sabiti $C_r \in (0,1)$, mutasyon ölçek faktörü $F \in (0, 2)$ ve popülasyon boyutu olan çok az sayıda kontrol parametresi ile kullanır. Bu parametrelerin algoritmanın performansı üzerindeki etkileri iyi incelenmiştir. Daha iyi çözümler oluşturmadaki temel farklılık, genetik algoritmaların çapraz geçişe dayanması, diferansiyel evrimin ise mutasyon işlemine dayanmasıdır. Bu ana işlem, popülasyondaki rastgele örneklenmiş çözüm çiftlerinin farklılıklarına dayanmaktadır. Algoritma, aramayı arama alanındaki muhtemel bölgelere yönlendirmek için bir arama mekanizması ve seçim işlemi olarak mutasyon işlemi kullanır. D parametrelerinden oluşan bir optimizasyon görevi, D boyutlu bir vektör ile temsil edilebilir. Diferansiyel evrimde, başlangıçta rastgele bir popülasyon büyüklüğü (NP) çözüm vektörleri popülasyonu oluşturulur. Bu popülasyon, mutasyon, geçiş ve seçim operatörleri uygulanarak başarılı bir şekilde geliştirilir.

3.2.1.4. Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search)

Son zamanlarda, guguk kuşu arama (GKA) Yang ve Deb (Yang vd., 2010) tarafından doğadan ilham alan yeni bir popülasyon tabanlı algoritma olarak sunuldu ve küresel yakınsama özelliklerini garanti ettiği kanıtlandı (Yang vd., 2010; Wang vd., 2012; Yang vd., 2009; Güneş vd., 2016). Standart meta-sezgisel GKA, özellikle çok amaçlı optimizasyon problemleri için maliyetli olduğu, uygunluk fonksiyonunun tekrar tekrar değerlendirilmesini gerektirmeyen ve makul bir süre içinde bir dizi optimum çözüm sağlayabildiği durumlarda, uygunluk işlevinin tekrarlanan değerlendirmelerine ihtiyaç duyar. Guguk kuşu arama, guguk kuşlarının üreme davranışından ilham alan basit ve hızlı yakınsak bir algoritmadır.

Aşağıdaki idealleştirilmiş üç kurala dayanmaktadır:

- (i) Her guguk kuşu bir seferde bir yumurta (aday çözüm) bırakır ve yumurtasını rastgele seçilen bir yuvaya atar.
- (ii) Yüksek kaliteli yumurtalara sahip en iyi yuvalar (daha iyi çözümler) bir sonraki nesle aktarılacaktır.
- (iii) Mevcut konakçı yuvaların sayısı sabitlenir ve bir guguk kuşunun yumurtladığı yumurta, $p_a \in [0, 1]$ olasılığı ile ev sahibi kuş tarafından keşfedilir. Bu durumda, ev sahibi kuş yumurtayı atabilir veya yuvayı terk edip tamamen yeni bir yuva kurabilir.

Kısaca özetlenirse, bir yuvadaki her yumurta bir aday çözümü temsil eder; amaç, yuvalarda pek de iyi olmayan bir çözümü değiştirmek için yeni ve potansiyel olarak daha iyi çözümleri (guguklu yumurtalar) keşfetmektir. Bu çalışmada performans değerlendirme ve karşılaştırma amacıyla $N_p \in (10, 100)$ alınmıştır. Bu üç kurala dayanarak, guguk kuşu aramasının (GKA) temel adımları, Bileşik sağ sol el iletim hattı ultra geniş bant eşleştirme devrelerinin tasarım optimizasyonunda (Güneş vd., 2016)'deki PSO ve GA ile karşılaştırıldığında başarıyla uygulanmıştır.

Guguk i diyelim ki için yeni çözümler üretirken $x(t+1)$, bir Levy uçuşu gerçekleştirilir.

$$\vec{x}_i^{(t+1)} = \vec{x}_i^{(t)} + \alpha \oplus Le'vy(\lambda), \quad (8)$$

$$\vec{\alpha} = \alpha_0 \left(\begin{matrix} \vec{x}_j^{(t)} \\ \vec{x}_i^{(t)} \end{matrix} \right) \quad (9)$$

eşitliğe alternatif olarak denklem (9), eşitlikteki vektör ise denklem (8)'dir. İlgili problemin ölçekleriyle ilişkili olması gereken adım boyutu olan bir skaler ile devam edilebilir. Çoğu durumda bunu kullanabiliriz. Ürün \oplus , giriş açısından çarpımlar anlamına gelir. Lévy uçuşu ile rastgele yürüyüş, adım uzunluğu vergi dağılımına göre çizildiği için arama alanını keşfetmede daha etkilidir (Yang vd., 2009).

3.2.1.5. Amaç ve Maliyet Fonksiyonları (Objective and Cost Functions)

Filtre ölçüm fonksiyonları arasında, saçılma parametreleri S_{11} ve S_{21} (dB) referans noktaları olarak seçilmiştir. Buna göre aşağıdaki amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Eğer } f < f_{kesim} \text{ ise } AF_1 = e^{S_{11} dB} + |S_{21} dB| \quad (10)$$

$$\text{Eğer } f > f_{kesim} \text{ ise } AF_2 = e^{S_{21} dB} + |S_{11} dB| \quad (11)$$

burada f (GHz) mevcut hesaplanan frekans değerimi ve f_{kesim} (GHz) ise filtrenin kesim yapacağı rezonans frekansını göstermektedir. Amaç fonksiyonundaki hedef, geçiren kısımda S_{11} 'in (dB) maksimum, S_{21} 'in (dB) ise minimum olması hedeflenmiştir. Aynı şekilde durduran kısımda ise S_{21} 'in (dB) maksimum, S_{11} 'in (dB) ise minimum olması hedeflenmiştir. Maliyet fonksiyonu ise 0,1-8 GHz aralığında 0,1 adım aralığı ile amaç fonksiyonlarının toplamı ile oluşturulur. Amaç fonksiyonu özetle aşağıdaki gibi tek bir maliyet fonksiyonu oluşturmak için kullanılır:

$$\text{Maliyet} = \sum_{f=0,1}^{f=8,0} AF_1 + AF_2 \quad (12)$$

3,5 GHz veya 2,45 GHz kesim frekansı önceden tanımlanmış performans parametreleri için analiz yapılması gerektiğinden, optimizasyon sürecinde kullanılacak amaç fonksiyonları (10)-(11) seçilmiştir. Belirlenen hedef fonksiyonları ile 10 çalıştırma üzerinden alınan minimum maliyet (12) ile sonuç belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kullanılan amaç ve maliyet fonksiyonları literatür taramasında verilen örneklerle doğruluğu desteklenmektedir.

Bu optimizasyon sürecinde karar değişkenleri sırasıyla S_{11} ve S_{21} (dB) dir. Filtrenin performans kriterleri Tablo 1'de detaylı gösterilmiştir.

Tablo 1. Çok geniş bantlı filtrenin performans kriterleri (Performance criteria of the multi-band filter)

Frekans (GHz)	İletim Bandı		Durdurma Bandı	
	0	3,5 veya 2,45	3,5 veya 2,45	∞
S_{11} (dB)	$f < -10$		$f = 0$	
S_{21} (dB)	$f = 0$		$f < -10$	

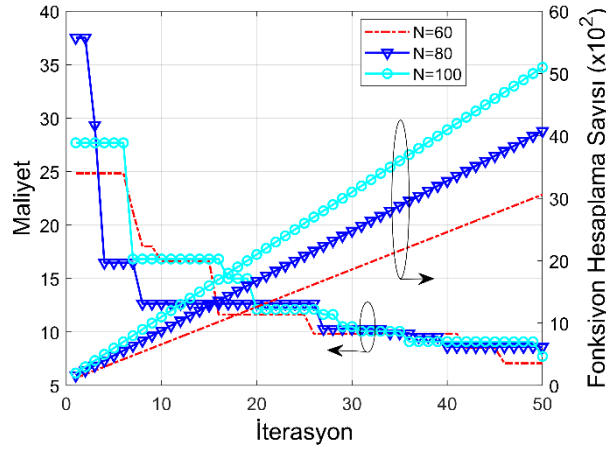
4. Çalışma Kısmı (Study Case)

Optimizasyon algoritmalarının çoğu aramaya başlamadan önce rastgele bir popülasyon üretir. Daha sonra bu popülasyon üyelerini girilen parametre değerleri doğrultusunda iyileştirir. Bu sebepten ötürü seçilen algoritma parametreleri en optimum sonucu bulma konusunda büyük bir önem arz etmektedir. Belirlenen algoritmalar ateşböceği algoritması için ışık soğurma katsayısı (γ) = 0,3, bir ateş böceğinin çekiciliği (β) = 0,5 ve istenen arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için arşiv değeri = 50, çapraz geçiş (C_r) = 0,5 olarak alınmıştır. Diferansiyel evrim algoritması için ise ölçek faktörü (F) = 0,5, çapraz geçiş (C_r) = 0,5 ve arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Guguk kuşu arama algoritması için ise yumurtlayan yumurtanın konukçu tarafından keşif olasılığı (p_a) = 0,5 ve istenen arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Bunlara ek olarak her 4 algoritma için ise maksimum iterasyon = 50 ve popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 olarak seçilmiştir. Burada maksimum iterasyon yüksek seçilerek tüm algoritmaların doyuma ulaştığı noktayı rahatlıkla görebilmek amaçlanmıştır. Algoritma elektriksel uzunluk (g_i) 0,5-2 arası rastgele bir değer olacak şekilde, hattın eleman sayısı (n) 8-12 arasında herhangi bir değeri alabilecek şekilde rastgele ve simetri durumu (simetri durumu 1. ve N ., 2. ve $N-1$, 3 ve $N-2$ aynı boyuta sahip olması) aktif veya pasif olacak biçimde toplam 14 adet giriş değerine sahiptir. Hattaki eleman sayısı ve simetri durumu her optimizasyon adımında kodun içerisinde belirtilen aralıkta herhangi biri gelecek şekilde seçilir ve her koşu esnasında tekrardan güncellenir. Çıkış değeri olarak ise maliyet fonksiyonunda da kullanılan S_{11} ve S_{21} (dB) seçilmiştir.

4.1. Algoritmalar için İdeal Parametre Seçimi (Optimal Parameter Selection for Algorithms)

Belirlenen 4 algoritma (ateşböceği, ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama) için parametre seçiminin en optimum sonucun bulunması konusundaki önemden bahsetmiştik. Bu bilgiler ışığında çalışmanın bu kısmında popülasyon = 60, 80 ve 100 değerleri için 10 bağımsız koşu (evrimsel veya genetik algoritmalar genelde 10 defa koşturularak en optimum olan tercih edilir) içerisinde seçilen en iyi performansın iterasyona göre tipik maliyet ve fonksiyon hesaplama sayısı (FHS) varyasyonları ateşböceği, ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama algoritması için sırası ile Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de sunulmuştur. Ayrıca bu grafiklere ek olarak Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de verilen maliyet ve FHS varyasyonları nümerik olarak Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'de gösterilmiştir. Bu grafik tablolarındaki sonuçlardan yola çıkarak ateşböceği ve guguk kuşu arama algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 60, diferansiyel evrim algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 80, ayrıştırmaya dayalı çok

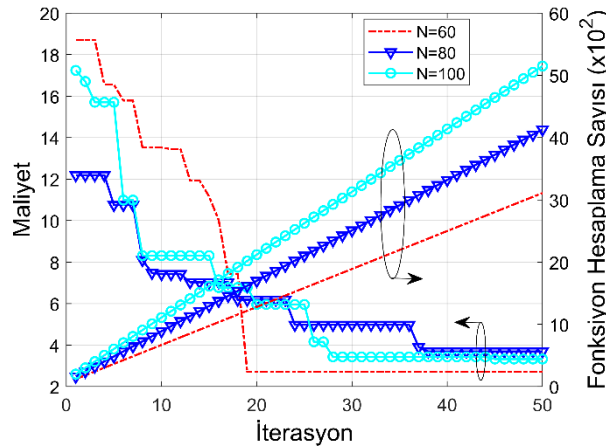
amaçlı evrimsel algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 100 olan optimizasyonunda çıktığı görülmektedir. Ayrıca bir bütün olarak bakıldığında en başarısız algoritmanın guguk kuşu arama, en başarılı olanın ise diferansiyel evrim algoritması olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Ateşböceği algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the firefly algorithm)

Tablo 2. Ateşböceği algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the firefly algorithm)

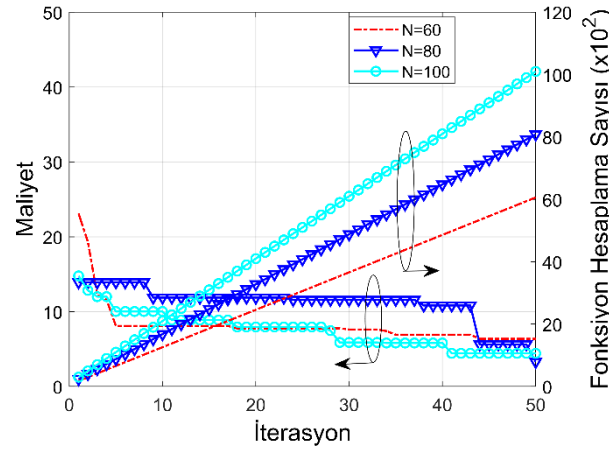
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	7,08	24,84	12,99
	FHS	2820	120	3060
80	Maliyet	8,61	37,52	12,72
	FHS	3280	160	4080
100	Maliyet	7,73	27,69	13,88
	FHS	5100	200	5100



Şekil 3. Ayrıştırılmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)

Tablo 3. Ayrıştırılmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)

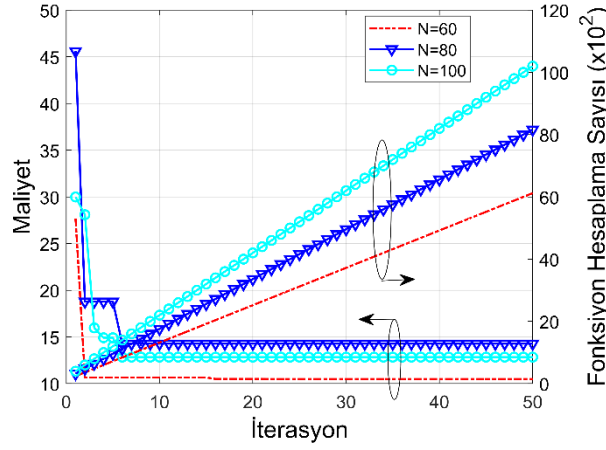
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	6,17	44,26	16,46
	FEN	2866	121	3110
80	Maliyet	6,41	56,37	14,68
	FEN	3320	161	4130
100	Maliyet	5,42	42,23	15,46
	FEN	5150	201	5150



Şekil 4. Diferansiyel evrim algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FEN varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the differential evolution algorithm)

Tablo 4. Diferansiyel evrim algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the differential evolution algorithm)

Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	6,37	23,11	8,19
	FHS	5340	180	6060
80	Maliyet	3,29	13,93	11,08
	FHS	8080	240	8080
100	Maliyet	4,43	14,78	7,51
	FHS	8300	300	10100



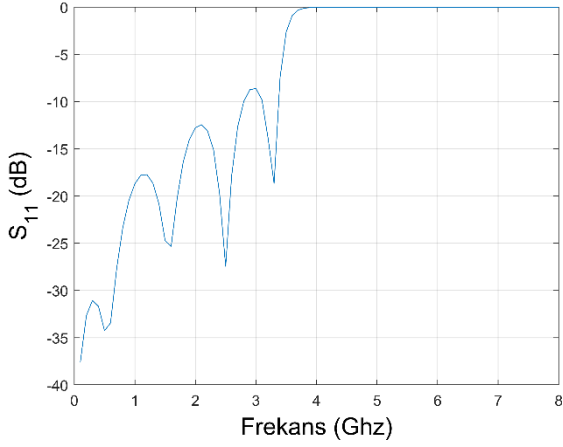
Şekil 5. Guguk kuşu arama algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the cuckoo search algorithm)

Tablo 5. Guguk kuşu arama algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the cuckoo search algorithm)

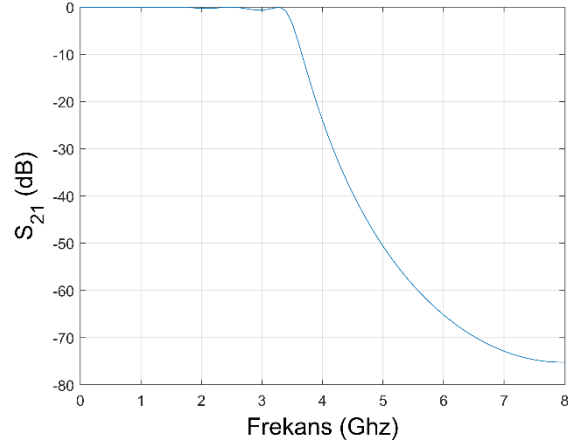
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	10,49	27,67	10,88
	FHS	2760	240	6120
80	Maliyet	14,28	45,60	15,27
	FHS	1120	320	8160
100	Maliyet	12,84	29,99	13,63
	FHS	1400	400	10200

4.2. Alçak Geçiren Filtre için S Parametrelerinin Simülasyonu (Simulation of S-Parameters for Low Pass Filter)

Bir önceki kısımdaki minimum maliyet değerine sahip sonuçların S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri 0-8 GHz bant aralığı için simüle edilecektir. Ateşböceği algoritmasının Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sırası ile popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) olarak sunulmaktadır. Belirlenen 3,5 GHz rezonans frekansında popülasyon 80 ve 100 için -10 dB lik iletim ve kesim değeri başarılı olarak sağlandığı görülmektedir. Ayırıştırma dayalı çok amaçlı evrimsel algoritmasının popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 100 için hedeflenen kesim noktasında başarılı olduğu görülmektedir. Diferansiyel evrim algoritmasının popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 80 için olmasına karşın kesim frekans olarak hedeflenen 3,5 GHz in biraz kaydığı görülmektedir. Guguk kuşu arama algoritması için ise Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de sırası ile popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerlere sahip S_{11} ve S_{21} (dB) grafikleri gösterilmektedir. Bu algoritma için ise de diğerlerine oranla daha başarısız sonuçlar elde edilmesine karşın kısmen başarılıdır. Tüm bu sonuçlardan da görüleceği üzere popülasyon değerini arttırmak optimizasyonun yükünü arttırırken her zaman en düşük maliyete sahip sonucu garanti etmediği görülmektedir.

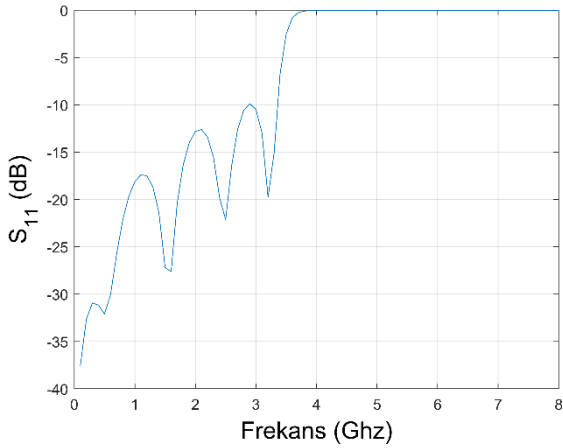


(a)

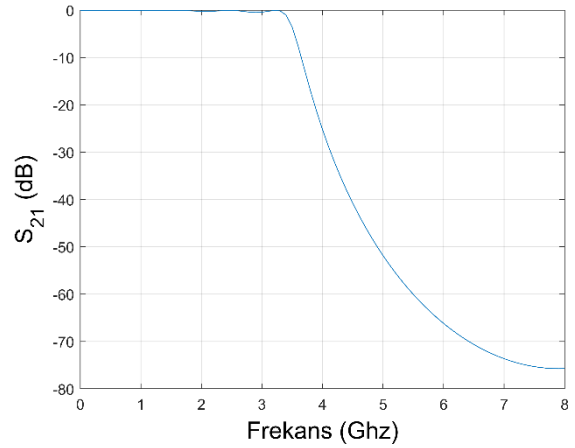


(b)

Şekil 6. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

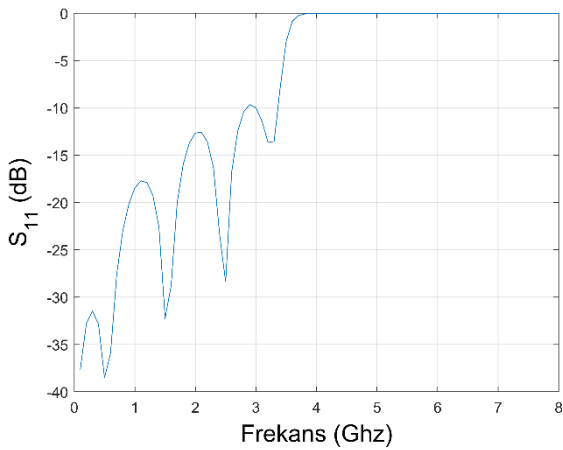


(a)

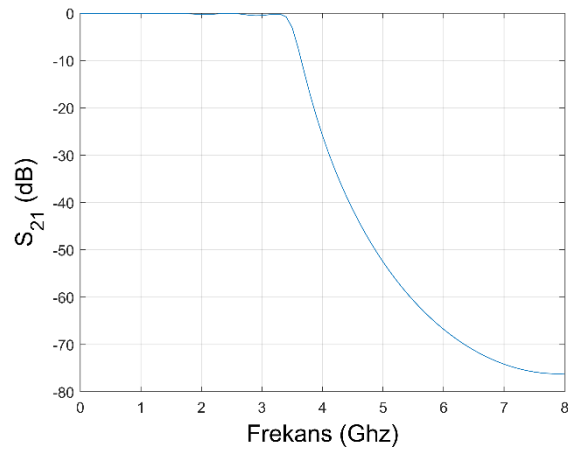


(b)

Şekil 7. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))

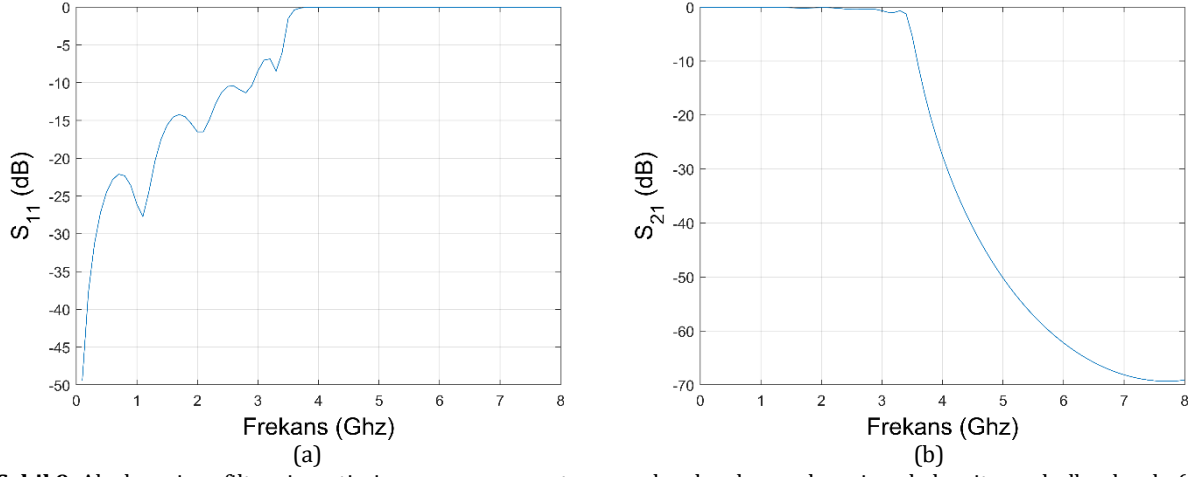


(a)

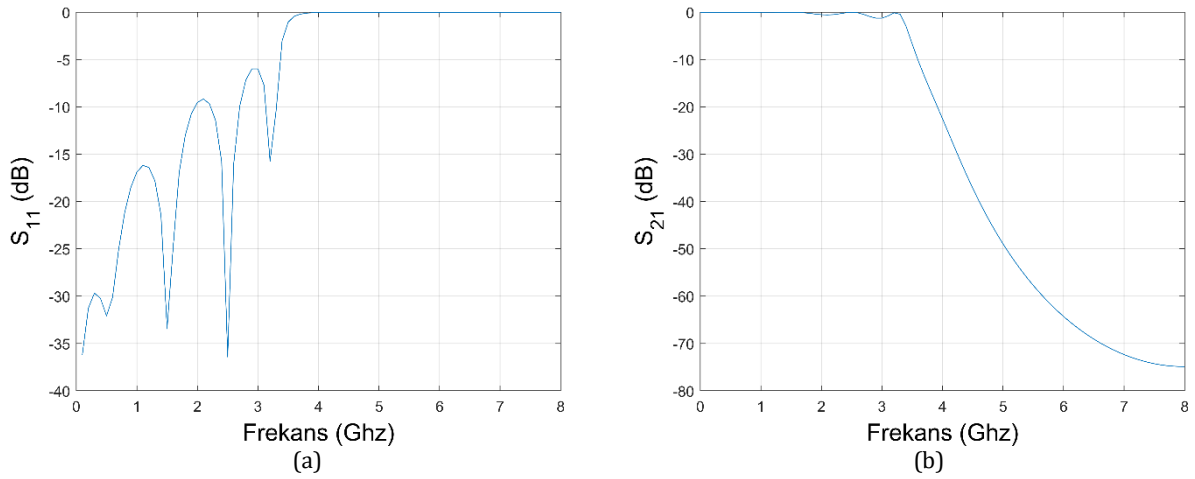


(b)

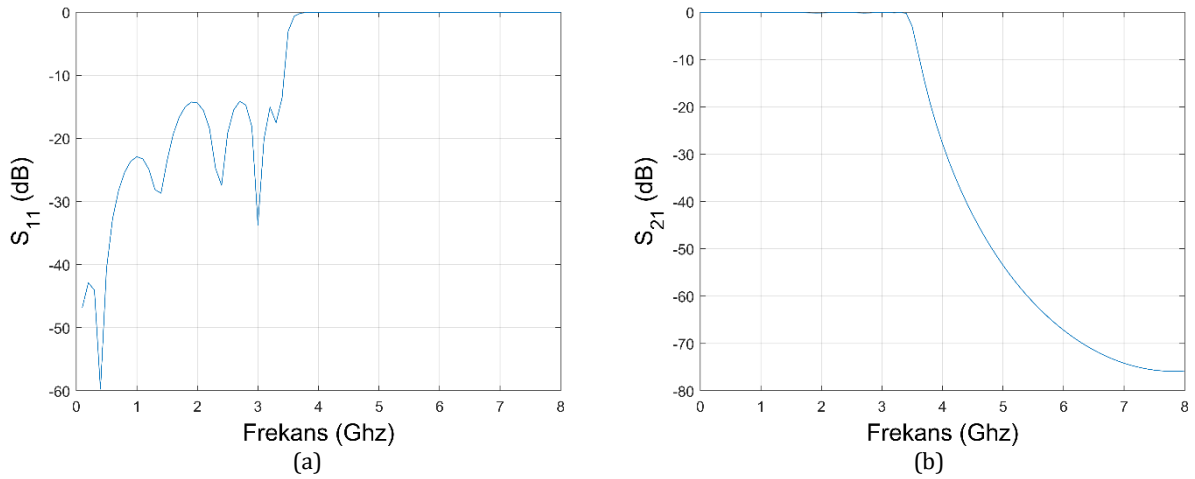
Şekil 8. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))



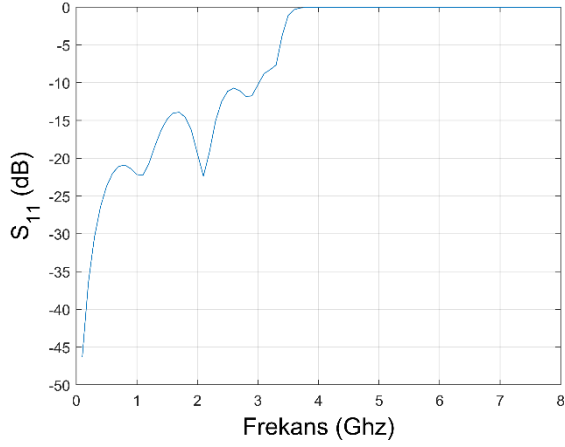
Şekil 9. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))



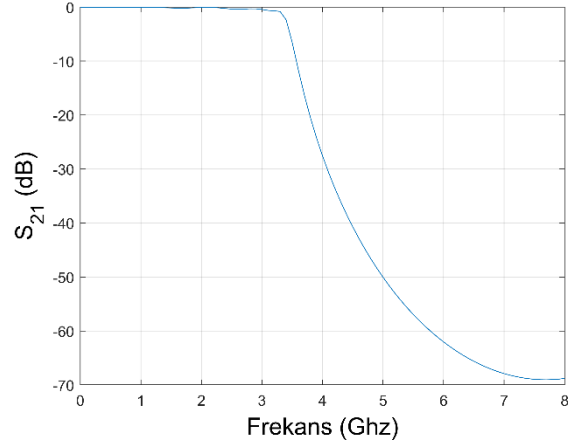
Şekil 10. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



Şekil 11. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

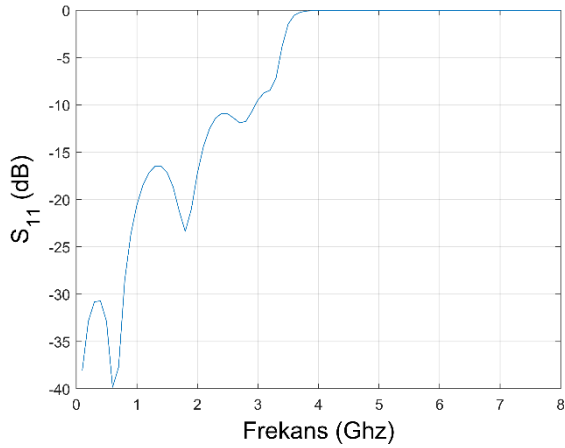


(a)

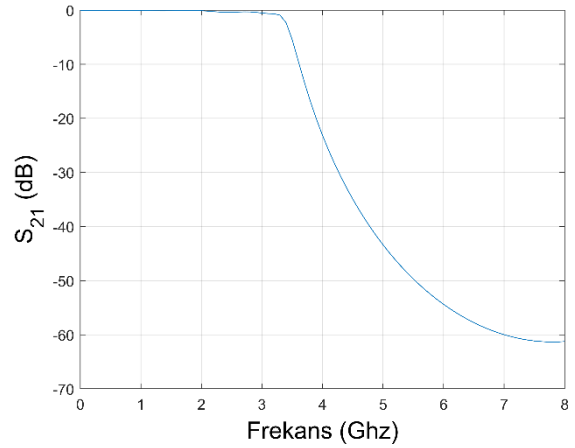


(b)

Şekil 12. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

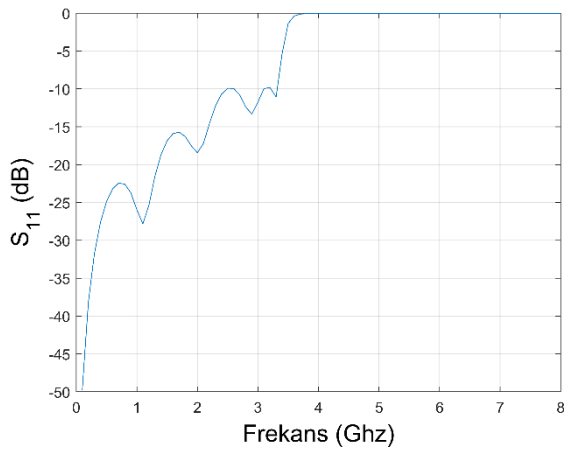


(a)

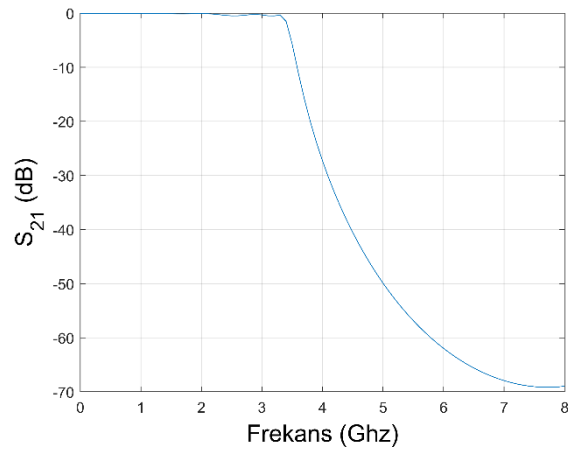


(b)

Şekil 13. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))

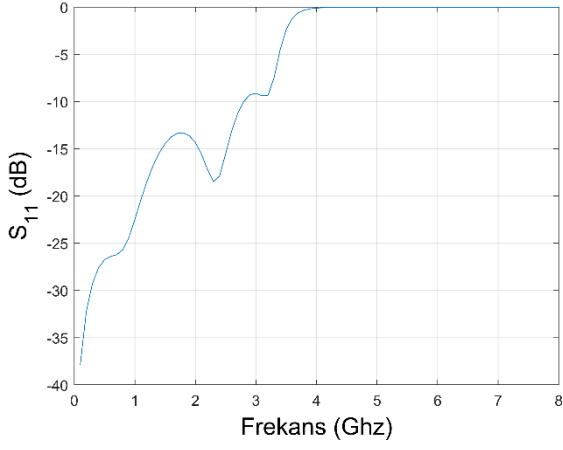


(a)

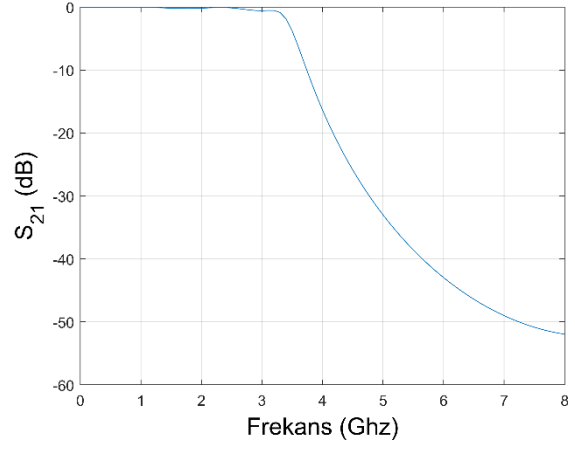


(b)

Şekil 14. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

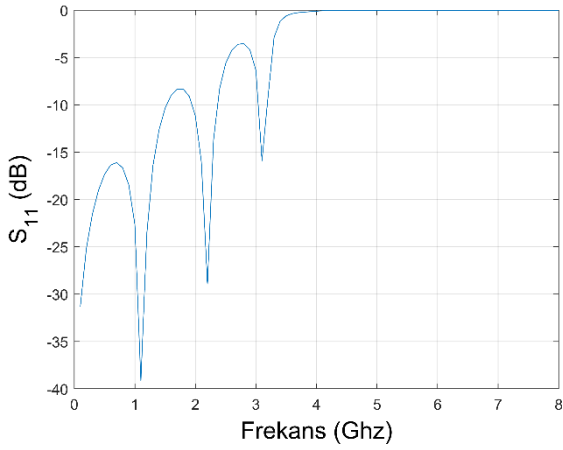


(a)

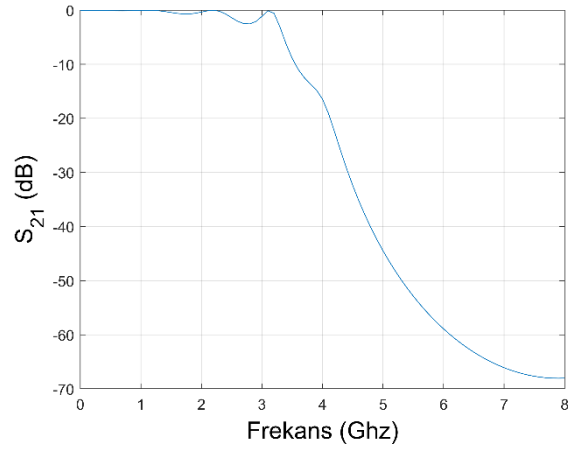


(b)

Şekil 15. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

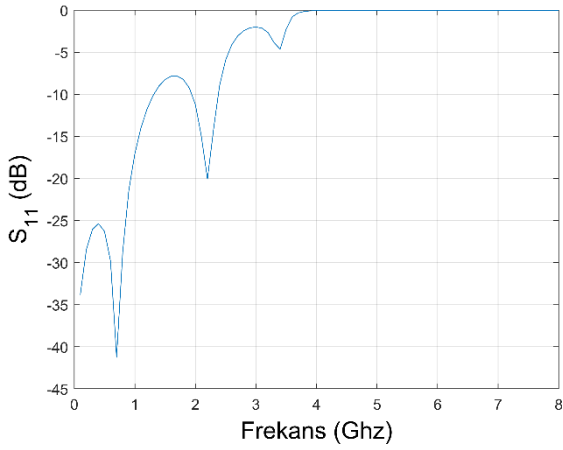


(a)

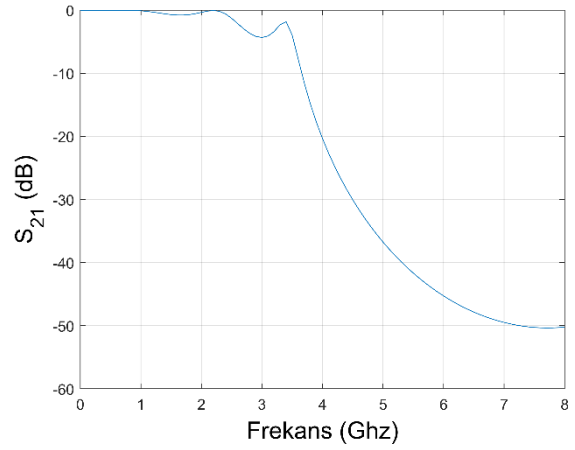


(b)

Şekil 16. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



(a)

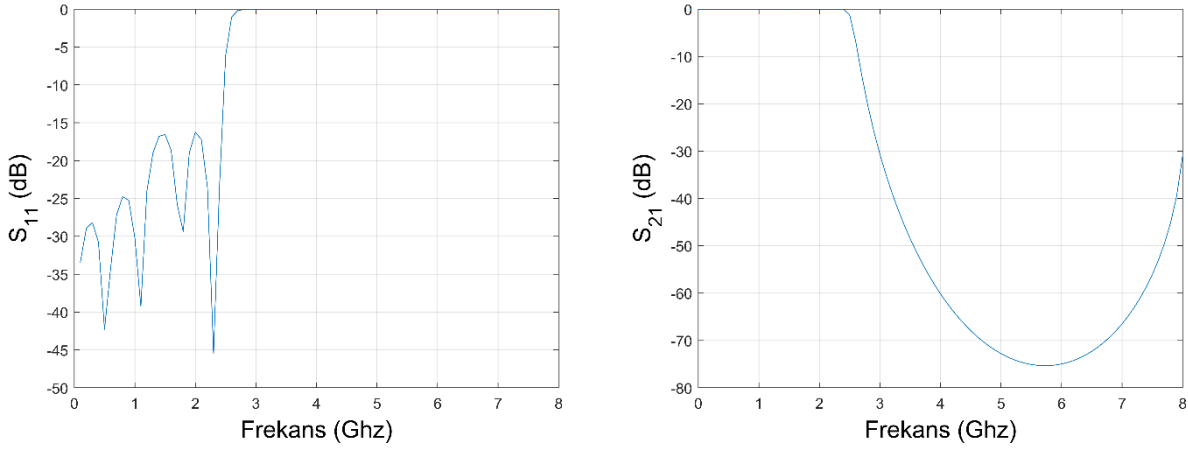


(b)

Şekil 17. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

4.3. En Başarılı Algoritma için Farklı Kesim Frekansında S Parametrelerinin Simülasyonu (Simulation of S Parameters at Different Cutoff Frequency for the Most Successful Algorithm)

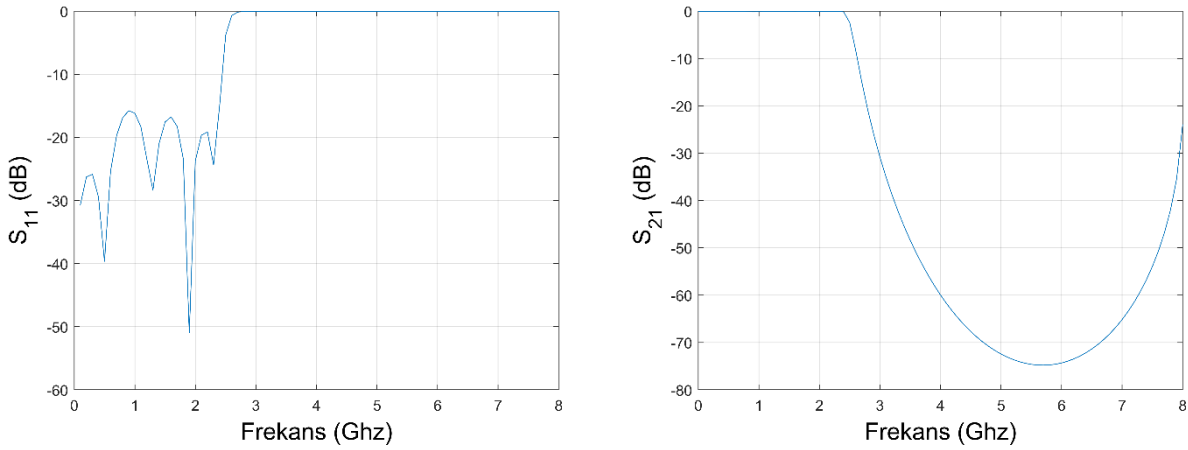
Çalışmanın bu kısmında bir önceki kısımlardaki çalışmalarda en başarılı sonuçlara sahip olan diferansiyel evrim algoritması kullanılarak 2,5 GHz kesim frekansına sahip filtre için optimizasyon yapılacaktır. Popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20’de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 100 için olduğu görülmektedir. Ayrıca kesim frekansının değiştirilmesinin algoritmanın başarısını etkilemediği görülmüştür. Böylelikle herhangi bir kesim frekansı için güvenli bir biçimde optimizasyon çalışmasının yapılabileceği görülmüştür.



(a)

(b)

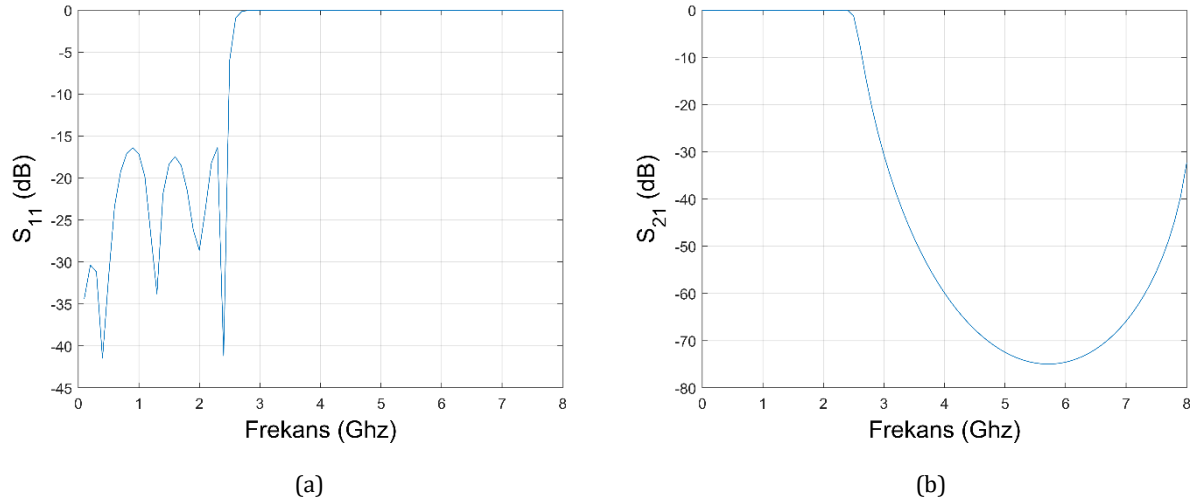
Şekil 18. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))



(a)

(b)

Şekil 19. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



Şekil 20. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, S-Bant kablosuz veya iletişim sistemlerinde kullanılacak alçak geçiren filtrenin tasarım sorunu, evrimsel algoritmalar ile bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiş ve mikroşerit filtrenin eleman sayısı, simetrik durumu ve elektriksel uzunluklarına yani dolayısı ile hatların boyutlarına göre çözümler maliyet fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kademeli empedanslı alçak geçiren mikroşerit filtreler MATLAB programı ile simüle edildi. Tüm optimizasyon algoritmaları sonucu elde edilen kesme frekansı %55 oranında hedeflenen (3,5 GHz) değere yakındır. Ayrıca ateşböceği algoritması için bulunan tüm sonuçlar bu hedefte başarılı olmuştur. Elde edilen sonuçlarından da görülebileceği gibi, önerilen dört evrimsel tasarım optimizasyon yöntemi, geometrik tasarım parametreleri ve performans kriterleri açısından bir filtrenin optimal çözümlerini oluşturmak için efekt algoritmalarıdır. Tüm çalışmalar içerisinde en başarılı sonuca sahip olan diferansiyel evrim algoritması ile farklı kesim frekansı için ekstra bir çalışma yapılarak problemin farklı frekanslarda da uyarlanabilir olduğu gösterildi. Tek tek yapılan çalışmalara karşın bu en başarılı dört algoritmanın tek bir yazıda karşılaştırılması literatüre büyük katkı sağlamaktadır. Ek olarak farklı filtre tipleri için bundan sonra yapılacak olan optimizasyon çalışmalarının öncüsü niteliğindedir. Ayrıca planlanan filtre modelleme çalışması için bir temel oluşturmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Belen, M. A., Alici, M., Çor, A., Güneş, F., 2014. Performance Characterization of a Microwave Transistor Using Firefly Algorithm. Symposium of electrical- electronics and computer engineering ELECO, 27(29), 491-493.
- Das, S., Abraham, A. Chacraborty, U.K., Konar, A., 2009. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator. IEEE Transactions on evolutionary computation, 13(3), 526-553.
- Das, S., Suganthan, P.N., 2011. Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 15(1), 4-31.
- Güneş F., Belen M. A., Mahouti P., 2017. Competitive Evolutionary Algorithms for Building Performance Database of a Microwave Transistor. Int. J. Circuit Theory Appl., 46(2), 244-258, doi: 10.1002/cta.2386.
- Güneş F., Demirel S., Mahouti P., 2014. Design of a Front-End Amplifier for the Maximum Power Delivery and Required Noise by HBMO with Support Vector Microstrip Model. Radioengineering, 23(1).
- Güneş F., Demirel S., Mahouti P., 2015. A Simple and Efficient Honey Bee Mating Optimization Approach to Performance Characterization of a Microwave Transistor for the Maximum Power Delivery and Required Noise. Int. J. Numer. Model., doi: 10.1002/jnm.2041.
- Güneş, F., Karataev, T., Demirel, S., 2016. Composite right/left-handed transmission lines in use for ultrawideband matching of front-end amplifiers with modified cuckoo search optimization. International Journal of Numerical Modelling: Electronic networks, devices and Fields, DOI: 10.1002/jnm.21441.
- JiaShen Hong G., Lancaster M.J., 2001. Microstrip Filters for RF/ Microwave Applications. John Wiley & Sons Inc.

- Kale, S. S., Jadhav, A. N., 2013. An Empirically Based Path Loss Models for LTE Advanced Network and Modeling for 4G Wireless Systems at 2.4 GHz, 2.6 GHz and 3.5 GHz. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2(9), 252-257.
- Liu, K., Frye, R., Emigh, R., 2009. Compact Balanced Band Pass Filter for 3.3GHz-3.9GHz WiMAX Applications, *Proc. IEEE Electronics Components and Technology Conf.*, 1599-1605.
- Mahouti, T., Yıldırım, T., Kuşkonmaz, N., 2021. Artificial intelligence-based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter, *International Journal of Numerical Modelling*.
- Pozar D.M., 2000. *Microwave Engineering*. John Wiley.
- Storn R., Price K., 1997. Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, Springer US, 341-359.
- Storn, R., Price, K., 1997. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- Wang, F., He, X. S., Wang, Y., Yang, S., 2012. Markov model and convergence analysis based on cuckoo search algorithm. *Jisuanji Gongcheng/ Computer Engineering*, 38(11), 180-185.
- Wells J., 2009. MM-Waves in the Living Room: The Future of Wireless High Definition Multimedia. *Microwave Journal*, 62(8), 72-84.
- Yang, X. S, Deb, S., 2009. Cuckoo Search via Levy Flights. *Proc. of world congress on nature & biologically inspired computing*, 210-214.
- Yang, X. S., Deb, S., 2010. Engineering Optimization by Cuckoo Search. *Int. J. Mathematical modelling and numerical optimization*, 1(4), 330-343.
- Yang, X.S., 2009. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. *Stochastic Algorithms: Foundations and applications, SAGA, Lecture notes in computer sciences*, 5792, 169-178.
- Yang, X-S., (2013). Multiobjective Firefly Algorithm for Continuous Optimization, *Engineering with Computers. Engineering with Computers*, 29(2), 175-184.
- Yıldırım A., Güneş F., Belen M. A., 2017. Differential Evolution Optimization applied to the Performance Analysis Of a Microwave Transistor. *Sigma J Eng & Nat Sci* 8(2), 135-144.
- Yıldırım A., Mahouti P., Güneş F., 2016. Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Mikrodalga Transistör Performans Analizi. *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU) Sempozyumu, 29Eylül-1 Ekim 2016 Düzce, Türkiye*
- Yıldırım, A., Moule, M. R., Yıldırım, T., 2017. Design Optimization of Ultra-Wide Band Microstrip Filter with Differential Evolution Algorithm. *Mugla Journal of Science and Technology*, 3(1), 69-72.
- Zhang, Q., Li, H., 2007. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731.