

Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Eksponansiyel Hatlar ile Alçak Geçiren Filtre Tasarımı

Design Optimization of Low-Pass Filter with Exponential Transmission Lines Using Differential Evolutionary Algorithm

Aysu BELEN¹, Filiz GÜNEŞ¹, Mehmet A. BELEN², Mahdi Ranjbar Moule¹

¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
aysu.yldrm07@gmail.com, gunes@yildiz.edu.tr, mehdi_mole1@hotmail.com

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye
mehmetalibelen@artvin.edu.tr

Özetçe—Son yıllarda diferansiyel evrim algoritması (DEA) yöntemi mühendislik problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada DEA yöntemi mikroşerit hatlar kullanılarak alçak geçiren filtre tasarımına uygulanmıştır. DEA ile optimum bir mikroşerit alçak geçiren filtre tasarımı için, eksponansiyel mikroşerit iletim hatları birim hat parçalarına bölünerek genişlik ve uzunluğa göre empedans değişimi incelenmiştir. Mikroşerit hattın genişliği değiştirilerek veya değişik geometrilere başka metal şeritler kullanarak hemen hemen her türlü pasif mikrodalga devresi elde edilebilmektedir. DEA bu hatlara ait optimum genişlik ve uzunlukları ayarlanmıştır. Aday devrenin saçılma parametreleri incelenerek maliyet fonksiyonu incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda optimum sonuçları sağlayan parametreler elde edilecek şekilde belirlenmiştir.

Son olarak, DEA kullanılarak eksponansiyel hatlar ile alçak geçiren filtre tasarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler—Optimizasyon, Diferansiyel Evrim Algoritması, Eksponansiyel Hatlar, Alçak Geçiren Filtre.

Abstract— In this work, Differential Evolutionary Algorithm (DEA), a novel and commonly used optimization algorithm in engineering problems, is applied for the design optimization of a low pass filter with exponential transmission lines. Basically the principle of DEA is similar to genetic algorithms techniques, however compare to meta-heuristic algorithms it has a much simpler algorithm structure and higher stability compare to its counterpart algorithms. For design optimization of low pass filter with exponential transmission lines, each of the transmission lines width and variation with its length are taken as an optimization variable

for DEA. Firstly the unit microstrip transmission line model is chosen. After that, the optimal value of widths and lengths are obtained via DEA. The cost function of the DEA is based on the calculation of scattering parameters of candidate's solutions crossed the requested frequency bandwidth.

Keywords—Optimization, Differential Evolutionary Algorithm, Exponential Transmission lines, Low-Pass Filter.

I. GİRİŞ

Günümüzde mikrodalga filtreler, kablosuz haberleşme sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Filtre seçiminde araya girme kaybı, yüksek kalite faktörü gibi gereksinimlerden dolayı çeşitli mikrodalga filtre çeşitlerine ihtiyaç vardır; mikroşerit, dalga kılavuzları, dielektrik rezonatörler vb. Mikroşerit filtreler ucuzluk ve minyatürizasyon açısından diğerlerine göre daha avantajlıdır. Çok bandlı filtreler birden fazla bandda eş zamanlı çalışması açısından büyük bir öneme sahiptir [1]. Ayrıca frekans izgesi kalabalıklaştıkça komşu kanallar arası girişimi engellemek için daha seçici dar bant bant geçiren filtreler ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Mikrodalga devre tasarımlarında son yıllarda sezgisel yöntemler kullanılarak doğrusal olmayan problemlerin çözümüne yönelik teknikler geliştirilmektedir. Problemlerin zorluk dereceleri, özellikle veri tiplerine ve değişken sayısına bağlı olarak artabilmektedir. Deterministik yöntemler bu tip problemlerin çözümü, hem çözüm sürecinde, hem de hemde problemi modellemede zorluklar içermektedir.

Özellikle popülasyon temelli sezgiseller çok noktalı arama prosedürleriyle, hızlı bir şekilde sonuç verebilmektedirler. Bunlardan bazıları; bulanık mantık,

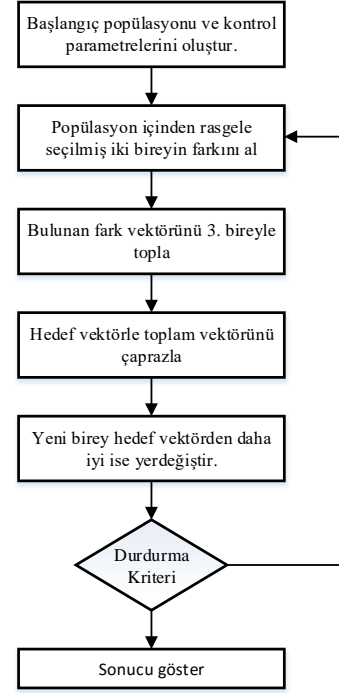
karınca kolonisi algoritması, genetik algoritma vb. dir.. En popüler optimizasyon tekniklerinden biri genetik algoritmadır [3]. Ayrıca yeni genetik algoritmalar gerçek parametrelili problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilmiştir [4]. Price ve stron tarafından 1995 yılında sürekli problemlerin çözümüne yönelik olarak diferansiyel evrim algoritması (DEA) geliştirilmiştir [5]. DEA popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritmadır. Özellikler düzenlenmiş uzayda gerçek değerli ve tanımlı tasarım parametrelerini içeren fonksiyonları optimize etmek için kullanılmaktadır [6]. DEA üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmı algoritmanın iyileştirilmesi üzerinedir [7]. Bir çok DEA geliştirilerek farklı problemlerin çözümüne uygulanmaktadır. DEA farklı problemlere uygulanarak geliştirilmeye devam etmektedir. Doğadan esinlenilerek geliştirilen algoritmalar anten tasarımı, hüzme yönlendirme, mikrodalga devrelerin optimizasyonu gibi çalışmalarda kullanılmaktadır [8].

Bu çalışmada öncelik ile çok geniş bantlı filtre optimizasyon problemi anlatılmıştır. Probleme ait maliyet fonksiyonu ve filtrenin mimari özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bölüm 3' de, diferansiyel evrim algoritması kısaca anlatılmıştır. Bölüm 4' de ise DEA algoritması ile elde edilen mikroşerit filtrenin performansı 3B elektromanyetik simulator ile karşılaştırılarak elde edilen sonuçların doğruluğu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar son bölümde özetlenmiştir.

II. DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI

Özellikle DEA kullanılarak sürekli parametrelili problemlerin çözümüne yönelik yöntemler geliştirilmiştir [9-24]. Kromozomlar operatörlere tabi tutularak yeni bir birey elde edilmektedir. Böylelikle popülasyona dayalı çalışmamaktadır. Yeni birey elde edilirken mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılmaktadır. Yeni birey elde edildikten sonra uygunluğu karşılaştırılır. Eğer yeni birey eskisinden iyi ise yeni birey bir sonraki nesile aktarılır. Aksi takdirde eski birey bir sonraki nesile aktarılır. Ayrıca diferansiyel evrim (DE) algoritması meta-sezgisel yöntemdir ve iterasyonlar kullanarak belli bir uygunluk fonksiyonu ile çözümleri geliştirmektedir [8]. Çok boyutlu reel değerli optimizasyon problemlerinin çözümü için DE algoritması kullanılmaktadır. Diğer tekniklere göre az sayıda kontrol parametresine sahip olması, hızlı çalışma ve karmaşık problemlere uygulanabilmesi gibi avantajları mevcuttur. Ancak lokal optimuma takılma ve kararsız yakınsama gibi dezavantajları vardır.

Bu bölümde DE algoritması filtre denklemlerine uygulanarak 1-4 GHz frekanslarında alçak geçiren filtre tasarımı incelenmiştir. Matlab Programı kullanılarak formüller ve çıkışlar belirlenerek DEA ile kodlanmıştır. Şekil 1'de DEA akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. DEA' nın akış diagramı.

III. OPTİMİZASYON PROBLEMİ

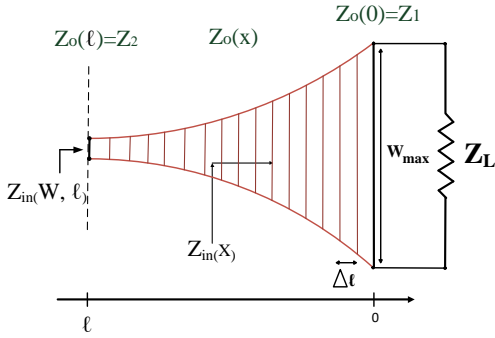
Mikroşerit hattın genişliği değiştirilerek veya değişik geometrilerde başka metal şeritler kullanarak hemen hemen her türlü pasif mikrodalga devresi elde edilebilmektedir. Düz olmayan konik hatlar, genellikle mikrodalga frekanslarında empedans transformatörleri, rezonatörler ve filtreler olarak kullanılırlar. Rezonatörler ve filtreler olarak kullanıldığında empedans transformatörleri ve daha büyük reddetme bant genişlikleri olduğundan bunların daha geniş band empedansı uyumlandırmasında avantajları vardır. Denklem 1 de verilen bağıntı ile Z_L yükü ile sonlandırılmış bir mikroşerit hattın L mesafesindeki giriş empedansı hesaplanabilmektedir.

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \frac{Z_L + j Z_0 \tan(\beta x)}{Z_0 + j Z_L \tan(\beta x)} \quad (1)$$

Diğer yandan katsal iletim hatlarında empedans değeri x 'in diğer bir değiş ile konuma bağlı bir değişken olup karakteristik empedans x cinsinden tanımlıdır $Z_0(x)$.

$$Z_0(x) = W_{\max} e^{(-\alpha |x|)} \quad (2)$$

$$Z_{in}(w_i, x) = \begin{cases} Z_L & x = 0 \\ Z_{inPredict} & x = L \end{cases} \quad (3)$$



Şekil 2. Eksponensiyel hattın karakteristik empedans tanım şeması

Eğer son derece küçük adımlar Δx ile karakteristik empedans hesaplama işlemini gerçekleştirirsek aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{Z_{in} + \Delta Z_{in}}{Z_0(w_i, x)} = \frac{Z_{in}(w_i, x) + j Z_0(w_i, x) \tan[\beta(w_i, x)]}{Z_0(w_i, x) + j Z_{in}(w_i, x) \tan[\beta(w_i, x)]} \quad (4)$$

Burada mikroşerit iletim hattının başlangıç kalınlığı W_0 , uzunluğu L ve katsayı α , hattın geometrisi ve dolayısı ile karakteristik empedansı etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin istenen performansı elde etmek için seçimi çok hedefli, çok boyutlu bir optimizasyon problemidir.

Daha önce de bahsedildiği gibi toplam iletim hatlarının sayısı, kullanılacak olan malzemenin seçimi ya toplam maliyet veya devreden istenilen performans kriterlerine bağlı olarak tercih edilir. Bu çalışmada bu parametreler, düşük maliyet, düşük boyut ve kolay üretilebilme adına 8 adet iletim hattı ve FR4 malzemesi seçilmiştir.

İletim hattı sayısı 8 seçildiği için toplam optimizasyon parametre sayısı 24 olacaktır. Ancak, optimizasyon problemini basitleştirmek adına iletim hatlarına iki şart konulmuştur:

1- tüm hatların uzunlukları l 'e eşit olacaktır bu sayede toplam optimizasyon parametre sayısı 30'dan 15'e inecektir.

2- iletim hatları karşılıklı olarak simetrik alınarak yani 1. iletim hattı ile 8. iletim hattı, 2. iletim hattı ile 7. iletim hattı ve benzeri şekilde diğer iletim hatları birbirlerine eşit seçilerek toplam optimizasyon parametre sayısı 6'ya indirgenebilecektir. İletim hatlarına ait sınır koşulları denklem (5a) ve (5b)' de verilmiştir.

$$0.3 \leq L \leq 10 \quad (5a)$$

$$0.3 \leq w_i \leq 10 \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5b)$$

Çok geniş banda sahip bir filtre tasarımının optimizasyon problemine ait maliyet fonksiyonu oluşturmak için öncelikle her bir iletim hattına ait ABCD parametrelerini denklem (6)' deki gibi elde edilmektedir [25].

$$\begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Tasarımda bulunan 8 iletim hattının her birine ait ABCD parametre matrislerinin çarpımında toplam devrenin eşdeğer ABCD matris parametreleri elde edilebilmektedir. Eşdeğer ABCD parametreleri elde edildikten sonra ise, denklem (7-10) kullanılarak bu parametrelere karşı gelen saçılma parametreleri kolaylıkla elde edilmektedir.

$$S_{11} = \frac{AZ_{N2} + B - CZ_{N1}^* Z_{N2} - DZ_{N1}^*}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (7)$$

$$S_{12} = \frac{2(AD - BC) \sqrt{\text{Re}\{Z_{N1}\} \text{Re}\{Z_{N2}\}}}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (8)$$

$$S_{21} = \frac{2 \sqrt{\text{Re}\{Z_{N1}\} \text{Re}\{Z_{N2}\}}}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (9)$$

$$S_{22} = \frac{-AZ_{N2}^* + B - CZ_{N1}^* Z_{N2} + DZ_{N1}}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (10)$$

Z_{Ni} devreye bağlanacak olan portlara ait empedans değeridir ve genellikle 50 ohm olarak alınır.

Maliyet fonksiyonları kullanılarak filtre tasarımına ait en uygun olan çözüm noktaları bulunur. Devreye ait saçılma parametreleri elde edildiğine göre artık optimizasyon probleminde ait maliyet fonksiyonları oluşturulabilir.

$$\text{Cost}_S = e^{S_{21} \text{dB}} + |S_{11} \text{dB}| \quad (11)$$

$$\text{Cost}_P = e^{S_{11} \text{dB}} + |S_{21} \text{dB}| \quad (12)$$

Elde edilen çözümler, maliyet fonksiyonu kullanılarak karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda maliyeti düşük olan çözümler kayıt edilerek bir sonraki olası çözümlerin elde edilmesinde kullanılır. Bu işlemler sonunda istenen çözüm noktasına en yakın olan, en düşük maliyete sahip olası çözüm noktası elde edilmiş olacaktır. Kullanım kolaylığı açısından maliyet fonksiyonlarındaki saçılma parametreleri dB olarak alınmışlardır. Ayrıca mikroşerit filtreler pasif ve resiprok devreler oldukları için $S_{11}=S_{22}$ ve $S_{12}=S_{21}$ eşitliği geçerli olacaktır. Denklem (11) filtreye ait sönümleme bandındaki maliyet fonksiyonunu tanımlamaktadır. İdeal olarak S_{21} dB $-\infty$ ve S_{11} dB sıfır olmalıdır.

IV. FİLTRE UYGULAMASI

Bu bölümde, öncelikle DEA algoritması kullanılarak geniş bantlı bir mikroşerit filtreye ait optimum genişlik ve uzunluk değerleri elde edilmiştir. Daha sonra ise elde edilen bu değerler 3B elektromanyetik simulator programı CST kullanılarak DEA sonucu elde edilen filtrenin doğruluğu incelenmiştir. Bu tasarımda, düşük maliyet, düşük boyut ve

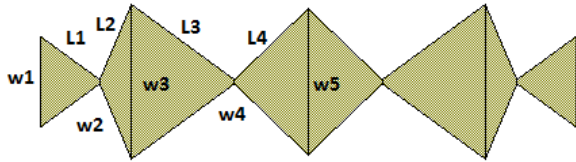
kolay üretilebilirlik adına 8 adet iletim hattı ve FR4 malzemesi seçilmiştir. Mikroşerit filtresinin tasarımında kullanılan diferansiyel evrim algoritmasının parametre değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca tablo 2’de çok geniş bantlı mikroşerit filtreye ait hedef kriterleri sunulmuştur. Tablo 2’deki kriterler ve denklem 11-12’deki maliyet fonksiyonlarına bağlı olarak şekil 4-5’deki mikroşerit yapı elde edilmiştir. Tablo 3’de elde edilen değerler kullanılarak 3B model oluşturulmuştur. DEA ve 3B modellerinin S parametresi sonuçları ise Şekil 6’da verilmiştir. 3B simülasyon sonucu ile DEA algoritması arasındaki az miktardaki fark 3B simülasyonun kuplaj, malzeme kaybı gibi birçok parametreyi de hesaba katmasından oluşmaktadır.

| | |
|-------------------------------|------------|
| Maximum iterasyon | 30 |
| Popülasyon | 60 |
| Diğer kullanıcı parametreleri | Varsayılan |

Tablo 1. DE algoritmasının parametreleri.

| Band | Durdurma bandı | | İletim bandı | |
|--------------------|----------------|---|--------------|---|
| Frekans GHz | 4 | 7 | 0 | 4 |
| S ₂₁ dB | -10< | | 0= | |
| S ₁₁ dB | 0= | | -10< | |

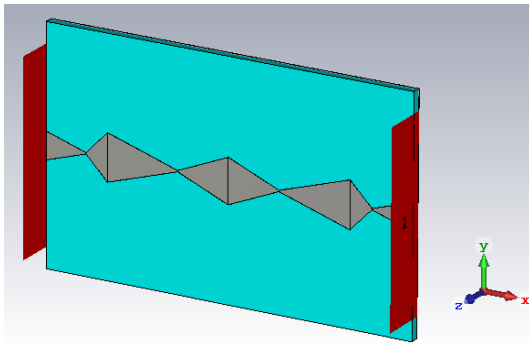
Tablo 2. Çok geniş bantlı filtrenin performans kriterleri.



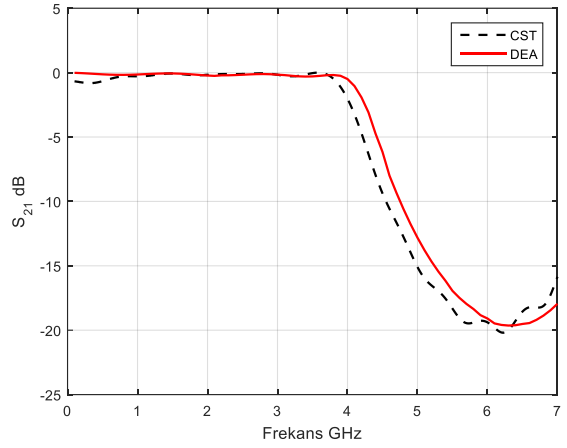
Şekil 3. Ultra geniş bantlı mikroşerit filtrenin şematik görüntüsü.

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| W ₁ : 4.7 | L ₁ : 7 |
| W ₂ : 0.2 | L ₂ : 3.7 |
| W ₃ : 8.0 | L ₃ : 12.2 |
| W ₄ : 0.22 | L ₄ : 8.7 |
| W ₅ : 7.6 | |

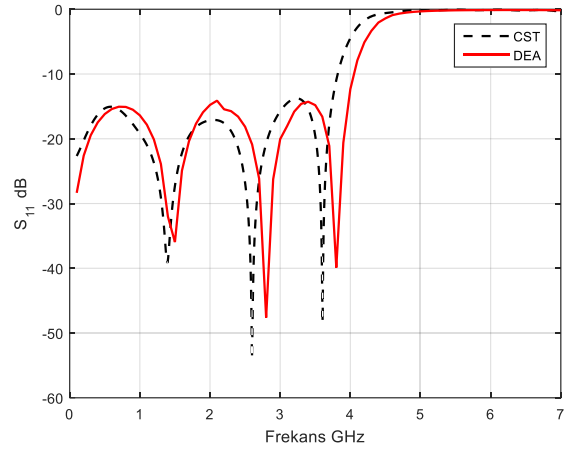
Tablo 3. Alçak Geçiren Filtrenin performans boyutları (mm)



Şekil 4. CST ortamında oluşturulan 3B mikroşerit filtre modeli.



(a)



(b)

Şekil 5. DEA ve CST ait (a) S₂₁, (b) S₁₁ Simülasyon sonuçları.

V. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar ve benzetimler sonucunda diferansiyel evrim algoritmasının istenilen çözüm aralıklarında, denklemlerin çok düşük hata payında çözümler sağladığı görülmüştür. Elde edilen çözümler ile istenilen alçak geçiren filtre tasarımının en uygun şekilde optimize edilebileceği görülmüştür. Tasarımda, düşük maliyet, düşük boyut ve kolay üretilebilirlik adına 8 adet iletim hattı ve FR4 malzemesi seçilmiştir. 3B simülasyon sonucu ile DEA algoritması arasındaki az miktardaki fark 3B simülasyonun kuplaj, malzeme kaybı gibi birçok parametreyi de hesaba katmasından oluşmaktadır.

Ayrıca DE algoritmasının bu tasarım probleminde gösterdiği başarı mikroşerit filtre tasarımı dışında birçok farklı mikrodalga devre problemine uygulanabileceği görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalar ve benzetimler sonucunda diferansiyel evrim algoritmasının istenilen çözüm aralıklarında verilen denklemleri düşük hata payında hatlarla çözümler sağlamıştır. Bu çözümlerle istenilen mikrodalga devrelerin en uygun şekilde optimize edilebileceği görülmüştür. İleri çalışmalarda DE algoritması mikrodalga anten, düşük gürültülü yükseltici, güç bölücü

devre gibi birçok tasarım probleminde kullanılarak meta-sezgisel algoritmalarla kıyaslanması yapılacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] M. A. Belen, A. Kaya, "Pasif Elemanlar Eklenecek 2.4 GHz ISM Bandı Uygulamaları İçin Mikroserit Band Geçiren Filtre Tasarımı", SDU Teknik Bilimler Dergisi, vol.1, 2011, 10-15.
- [2] R. J. Cameron, General Coupling Matrix Synthesis Methods for Chebyshev Filtering Functions, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, No. 4, 1999, 433-442.
- [3] T. Kesintürk, "Diferansiyel Gelişim Algoritması", İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Yıl: 5 Sayı: 9 Bahar 2006/1 s.85-99.
- [4] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs", A.B.D., Springer & Verlag, 1992.
- [5] Storn, R., Price, K., "Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces", Technical Report TR-95-012, International Computer Science Institute, Berkeley, 1995.
- [6] D. Karaboga, "Yapay Zeka Optimizasyonu Algoritmaları", İstanbul, Atlas Yayın Dağıtım, 2004.
- [7] P.K. Bergey, C. Ragsdale, "Modified Differential Evolution: A Greedy Random Strategy for Genetic Recombination", Omega, 33, 2005, 255-265.
- [8] M. A. Belen, M. Alıcı, A. Çor, F. Güneş, "Ateşböceği Algoritması ile Mikrodalga Transistör Performans Karakterizasyonu", Eleco Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 27 – 29 Kasım 2014.
- [9] O. Hrstka, A. Kucerova, "Improvements of Real Coded Genetic Algorithms Based on Differential Operators Preventing Premature Convergence", Advances in Engineering Software, 35, 2004, 237-246.
- [10] R.E. Collin, "Foundation for Microwave Engineering" McGraw-Hill, 1992, p 334-339.
- [11] R. Storn, K. Price, "Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces", Journal of Global Optimization, Springer US, 1997, s.341-359.
- [12] X. Yuan, L. Wang, Y. Zhang, Y. Yuan, "A hybrid differential evolution method for dynamic economic dispatch with valve-point effects", Expert systems with applications, Vol.36, No.2, Part. 2, 2009, pp.4042- 4048.
- [13] X. Yuan, L. Wang, Y. Yuan, Y. Zhang, B. Cao, B. Yang, "A modified differential evolution approach for dynamic economic dispatch with valve-point effects", Energy Conversion and Management, Vol.49, No.12, 2002, s.3447-3453.
- [14] C. Yaşar, H. Temurtaş, S. Özyön, "Diferansiyel gelişim algoritmasının termik birimlerden oluşan çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması", ELECO'2010, 6. Ulusal Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, BURSA, TÜRKİYE, 26-2-5 Aralık 2010. T. Kesintürk, "Diferansiyel gelişim algoritması", YA/EM 2006 - XXVI. Ulusal Kongresi, KOCAELİ, 3-5 Temmuz 2006, s.214-217.
- [15] N. Noman, H. Iba, "Differential evolution for economic load dispatch problems", Electric Power Systems Research Vol.78 No.8, 2008, s.1322-1331.
- [16] X. Qiu, J. Xu, K.C. Tan, H.A. Abbass, "Adaptive Cross-Generation Differential Evolution Operators for Multiobjective Optimization", Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, April 2016, page(s): 232 - 244 Volume: 20, Issue: 2.
- [17] Y. Hongwen, L. Xinran, "A Novel Attribute Reduction Algorithm Based Improved Differential Evolution", Intelligent Systems (GCIS), Second WRI Global Congress on, 16-17 Dec. 2010, page(s): 87 - 90 Volume: 3.
- [18] H. Liouane, I. Chiha, A. Douik, H. Messaoud, "Probabilistic Differential Evolution for optimal design of LQR weighting matrices", Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMS), IEEE International Conference on, 2012, page(s): 18 – 23.
- [19] E. Zorarpacı, S.A. Özel, "Nitelik Seçme Problemi İçin Diferansiyel Gelişim Algoritması ve Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Tekniğini Kullanan Melez Yöntem", DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:16 Sayı:48, Eylül 2004, sh. 49-60.
- [20] P. Rocca, G. Oliveri, A. Massa, "Differential Evolution as Applied to Electromagnetics", Antennas and Propagation Magazine, IEEE, Feb. 2011, page(s): 38 - 49 Volume: 53, Issue: 1.
- [21] A. Yıldırım, M. Ranjbar Moule, T. Yıldırım, "Çok Geniş Bantlı Mikroserit Bandgeçiren Filtre Tasarımına Yönelik Diferansiyel Evrim Algoritması Uygulaması", Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU) Sempozyumu, 29 Eylül-1 Ekim 2016 Düzce, Türkiye
- [22] A. Yıldırım, P. Mahouti, F. Güneş, "Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Mikrodalga Transistör Performans Analizi", Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU) Sempozyumu, 29 Eylül-1 Ekim 2016 Düzce, Türkiye
- [23] Aysu Yıldırım, Filiz Güneş, Mehmet Ali Belen, Differential Evolution Optimization Applied To The Performance Analysis Of a Microwave Transistor, Sigma J Eng & Nat Sci 8 (2), 2017, 135-144.
- [24] J. A. Dobrowolski, "Microwave Network Design Using the Scattering Matrix", Artech House, 2010.