



GİRİŞ PARAMETRELERİNİN AĞIRLIKLARINA GÖRE DEĞİŞKEN DİZİ ARALIK SEÇİMİNİN IBI MANTIK ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYON PERFORMANSINA ETKİSİNİN ÇOK BANTLI VİVALDİ ANTEN TASARIMINDA UYGULANMASI

Ahmet ULUSLU^{1*}, Enes BEYAZ²

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü,
İstanbul, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>WLAN/WiFi, Kablosuz İletişim, Çok Bant, Anten Tasarım, Ibi Mantık Algoritması, Optimizasyon, Değişken Dizi Aralık Seçimi.</i>	Tasarım parametrelerinin belirlenmesi yanı sıra bu giriş veri seti parametrelerin hangi aralıkta seçileceği optimizasyon problemlerinde hala büyük bir soru olarak en ön planda yer almaktadır. Bu nedenle böyle büyük bir soruya yanıt verebilmek amacıyla burada giriş veri setinin değer genişlik aralığının optimizasyon performansı üzerinde etkisi üzerine detaylı bir çalışma sunulmaktadır. Bu çalışmada, WLAN/WiFi kablosuz iletişim sistemleri için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz için çok bantlı bir Vivaldi anten optimizasyon problemi için giriş parametrelerinin ağırlığına göre değişken giriş veri seti değer aralığı seçilerek optimizasyon performans değişimi takip edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada giriş parametre sayısının fazla olmasının yanı sıra seçilen antenin 3 bantlı olması tasarım problemini oldukça güçleştirmiştir. Bu sorun güncel, mevcut geleneksel algoritmalar karşısında başarısını kanıtlamış ve anten optimizasyon alanında hiç kullanılmamış olan Ibi Mantık algoritması kullanılarak aşılmıştır. Tasarım sonuçları MATLAB programı yardımı ile antenin S_{11} (dB) ve Yönlülük parametrelerinin simülasyonu ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde optimizasyon maliyet değerinin düştüğü ve böylece daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Böylece herhangi bir optimizasyon probleminde değişken giriş veri seti aralığı seçiminin ne kadar önemli olduğu gösterilmiştir. Bu yöntem herhangi başka bir optimizasyon problemine kuşkusuzca uyarlanabilir.

IMPLEMENTATION OF THE EFFECT OF VARIABLE ARRAY RANGE SELECTION DEPENDING ON THE WEIGHTS OF INPUT PARAMETERS ON OPTIMIZATION PERFORMANCE WITH IBI LOGIC ALGORITHM IN MULTI-BAND VIVALDI ANTENNA DESIGN

Keywords	Abstract
<i>WLAN/WiFi, Wireless Communication, Multi-Band, Antenna Design, Ibi Logic Algorithm, Optimization, Variable Array Range Selection.</i>	In addition to determining the design parameters, the range in which the parameters of this input data set will be selected is still a big question in optimization problems. Therefore, in order to answer such a big question, a detailed study is presented here on the effect of the value range of the input data set on the optimization performance. In this study, the optimization performance change was followed by selecting the variable input data set value range according to the weight of the input parameters for a multi-band Vivaldi antenna optimization problem for 2.4 GHz, 3.5 GHz and 5 GHz for WLAN/WiFi wireless communication systems. In addition, in the study, the fact that the number of input parameters was high and the selected antenna had 3 bands made the design problem quite difficult. This problem was overcome by using the Ibi Logic algorithm, which has proven its success against current, existing traditional algorithms and has never been used in the field of antenna optimization. The design results were shown by simulating the antenna's S_{11} (dB) and Directivity parameters with the help of the MATLAB program. As a result of the obtained results, it was seen that the optimization cost value decreased and thus more successful results were obtained. Thus, it has been shown how important the selection of the variable input data set range is in any optimization problem. This method can certainly be adapted to any other optimization problem.

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

Alıntı / Cite

Uluslu, A., Beyaz, E., (2025). Giriş Parametrelerinin Ağırlıklarına Göre Değişken Dizi Aralık Seçiminin İbİ Mantık Algoritması ile Optimizasyon Performansına Etkisinin Çok Bantlı Vivaldi Anten Tasarımında Uygulanması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 728-744.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Uluslu, 0000-0002-5580-1687

E. Beyaz, 0009-0000-9262-7422

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date

01.11.2024

Revizyon Tarihi / Revision Date

10.05.2025

Kabul Tarihi / Accepted Date

13.06.2025

Yayın Tarihi / Published Date

30.09.2025

IMPLEMENTATION OF THE EFFECT OF VARIABLE ARRAY RANGE SELECTION DEPENDING ON THE WEIGHTS OF INPUT PARAMETERS ON OPTIMIZATION PERFORMANCE WITH İBİ LOGIC ALGORITHM IN MULTI-BAND VIVALDI ANTENNA DESIGN

Ahmet ULUSLU^{1†}, Enes BEYAZ²

¹ İstanbul University-Cerrahpaşa, Technical Sciences Vocational School, Electronics and Automation Department, İstanbul, Türkiye

² İstanbul University-Cerrahpaşa, Institute of Graduate Studies, İstanbul, Türkiye

Highlights

- In the study, for a multi-band Vivaldi antenna optimization problem for WLAN/WIFI wireless communication systems, the optimization performance change was followed by selecting a variable input data set value range according to the weight of the input parameters.
- Design results were shown with the simulation of the antenna's S_{11} (dB) and Directivity parameters with the help of the MATLAB program.
- The study was carried out by working on a more up-to-date algorithm and a different problem by innovating on the method in a previously done dual-band microstrip-connected combined band-pass filter design problem.
- The study also reveals the effect of each input design parameter on the Vivaldi antenna performance.

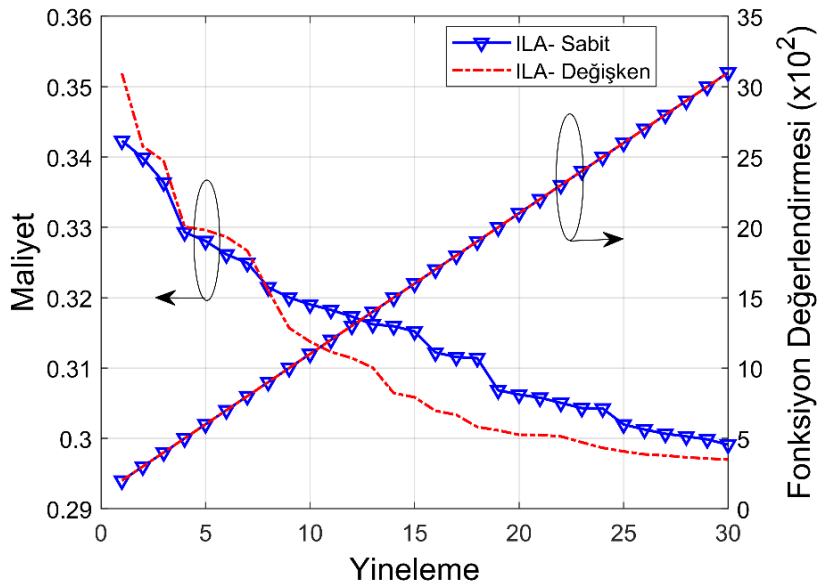
Graphical Abstract

Figure. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında İbİ Mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değer aralığı seçim tabanlı 10 koşu içerisinde seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Iterative typical cost and FD variations of the best performance of the optimization selected among 10 runs based on fixed/variable input data set value range selection with İbİ Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)

[†] Corresponding author: auluslu@iuc.edu.tr, +90-212-866-3700

Purpose and Scope

The main point of the study is to eliminate the ambiguity in the selection of the input data set value range, which occupies the minds of design optimization researchers.

Design/methodology/approach

Due to the intense demand for 5G technology, a multi-band Vivaldi antenna optimization problem for multi-band WLAN/WIFI wireless communication systems was followed by selecting a variable input data set value range and monitoring the optimization performance change. All the results obtained were interpreted in detail on figures and tables.

Findings

As a result of the study, it will shed light on future studies, as in the (Uluslu & Allaberdiyev, 2024) study, which is a pioneer of the study, and will facilitate the selection of the input data set value range for researchers.

Research limitations/implications

According to the results obtained as a result of the study, it was observed that the optimization performance increased when the variable input data set value range was selected according to the weight of the input parameters. The most successful results obtained from the design were demonstrated by simulating the antenna's S_{11} (dB) and Directivity parameters with the help of the MATLAB program.

Practical implications

An independent input data set range selection can be made as a result of determining the importance of input parameters at the beginning of the study.

Social Implications

A detailed analysis was presented on the selection of the correct input data set that may arise in optimization problems.

Originality

Successful results have been obtained because the selected algorithm has proven its success against current, existing traditional algorithms. In addition, it has not yet been used in the field of antenna design and brings a different perspective to the selection of the optimization input data set, which will create a pioneering literature source for researchers who will work in similar fields. Due to the selected topic, it is a reference source for many studies.

1. Giriş (Introduction)

Son birkaç yılda, kablosuz iletişim sistemlerinin geliştirilmesi antenler alanında büyük bir ilgi ve ilerleme görmüştür. Akıllı yaşamın talebini karşılamak için çok sayıda kablosuz cihaza ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, sınırlı alanı dikkate alarak, bu cihazların belirli özelliklere sahip olması gerekir, yani kompakt boyut, büyük bant genişliği, yüksek verimlilik, uygun maliyet ve orta derecede yüksek kazanç bunlardan birkaçıdır. Mikroşerit antenler bu özelliklerin çoğuna sahiptir ve bu nedenle son birkaç üç yılda büyük ilgi görmüştür (Truong vd., 2015; D. Yang vd., 2018). Kablosuz cihazların WLAN, Bluetooth, ITS, RFID, 5G ve nesnelerin interneti (IoT) gibi birçok uygulaması vardır. IoT cihazları uzaktan izleme, takip, veri toplama, üretim ve medya ve eğlence uygulamalarını içerir. Bu belirli uygulamalar, radyo frekansı ile uzak alan ve yakın alan iletişimine sahiptir ve iletim gecikmesini azaltmak için büyük bant genişliği ve yüksek veri hızı gerektirir. Bunlar, Vivaldi antenini IoT uygulamaları için potansiyel adaylardan biri yapan başlıca nedenlerdir. Literatürde, arızalı toprak yapısı, yarıklı radyasyon yaması vb. gibi geniş bant antenleri tasarlamak için çeşitli teknikler bildirilmiştir (Prasad vd., 2018). Vivaldi anteni, üstün özellikleri nedeniyle duvardan görüntüleme sistemi için en iyi seçimlerden biri olarak kabul edilir: yüksek kazanç, geniş bant, basit yapı ve imalatı kolaydır. Ek olarak, bu anten türü dizi tasarımı için de uygundur. Vivaldi anteni ilk olarak 1979'da Gibson tarafından sunuldu, geniş bant karakteristiği sağlayabilen üstel parlama şekline ve düzlemsel yapıya sahiptir (Gibson, 1979).

Klasik optimizasyon yöntemlerinin, problemin içsel karmaşıklığı, boyutları, arama alanı ve mevcut zaman gibi çeşitli faktörler nedeniyle en iyi çözümü bulamadığı birçok problem vardır (S. Li vd., 2020; G.-G. Wang vd., 2014). Bazı durumlarda, klasik bir yöntem kullanılarak kesin çözümün bulunması onlarca yıl sürebilir. Yumuşak bilişimdeki birçok ilerleme, daha yüksek hız ve kabul edilebilir doğrulukla optimizasyon yöntemlerinin yeni bir tanımına yol açmıştır (Dhiman vd., 2021; Faramarzi vd., 2020; Hayyolalam & Pourhaji Kazem, 2020). Optimizasyon algoritmalarının çeşitli bilimlerdeki önemi ve uygulanabilirliği nedeniyle, araştırmacılar tarafından en iyi çözümü bulma yetenekleri değerlendirilmiştir (Uluslu, 2023). Optimizasyon amaçları için yenilikçi algoritmaların kullanımı artmaktadır (Jain vd., 2019). Bu algoritmalar bazen tam olası çözümü bulamasa da klasik algoritmalarından daha kısa sürede neredeyse optimum yanıtları belirleyebilirler. Günümüzde, farklı sınıflara ayrılabilen çeşitli optimizasyon algoritmaları tanıtılmıştır. Genel olarak, doğadan ilham alan ve doğadan ilham almayan algoritmalar olmak üzere iki grup tanımlanabilir (X.-S. Yang, 2020). Doğaya dayalı olarak tanımlanan ilk ve en ünlü algoritma, evrim teorisine dayanan genetik algoritmadır. Uyum araması gibi algoritmalar da doğadan alınmayan kategoriye aittir. Bu organizasyon yöntemine ek olarak, sürü zekâsı algoritmaları sınıflandırılabilir (Kennedy, t.y.). Yani, bir üyenin performansının tek başına bir rol oynamadığı algoritmalar vardır (J. Li & Han, 2020). Ancak tüm nüfusun ortak hareketleri, en iyi olası çözümü bulabilen karmaşık bir davranış yaratır. Sürü zekâsına dayalı en yaygın algoritmalar makale sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritmalarıdır (Hang & Li, 2018; Karaboga & Basturk, 2008). Günümüzde, farklı referanslarda farklı algoritmalar bulunabilir. Optimizasyon problemlerinin doğası gereği ve karmaşıklıkları nedeniyle, hiçbir algoritma mevcut tüm problemler için en uygun çözümü bulamaz. Bu nedenle, araştırmacılar her yıl farklı optimizasyon algoritmaları sunarlar (Gao vd., 2020; Gu & Wang, 2020; Yi vd., 2020; Y. Zhang vd., 2020). Önerilen algoritmaları kullanarak, araştırmacılar kafes optimizasyonu (Pierezan vd., 2021), sismik kırılma ve kam takipçisi mekanizması (Abderazek vd., 2020) gibi çeşitli konuları incelemişlerdir. Optimizasyonun yapay zekada da birçok uygulaması vardır. Örneğin, karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için uygun bir araç olan makine öğreniminde (Mirrashid & Naderpour, 2021; Naderpour vd., 2021; Naderpour & Mirrashid, 2020c, 2020a, 2020b), verimli bir optimizasyon algoritması eğitim sürecini iyileştirebilir ve birkaç yinelemede oldukça doğru sonuçlar sunabilir. Tüm bunlara dayanarak son yıllarda lbi Mantık teorisine dayalı bir optimizasyon algoritması, yani lLA sunulmaktadır (Mirrashid & Naderpour, 2023). Ayrıca bu çalışmada kullanılan algoritmanın performansı 73 kısıtlı ve kısıtsız kıyaslama problemi üzerinde değerlendirilmiş ve çalışmada elde edilen sonuçlar bir dizi optimizasyon algoritmasıyla karşılaştırılarak başarısı kanıtlanmıştır (Mirrashid & Naderpour, 2023).

Bu çalışma kapsamında, lbi Mantık algoritması ile güncel amaç fonksiyonları (Uluslu, 2023) kullanılarak kablosuz cihazlar için çok bantlı bir Vivaldi antenin tasarımı üzerine başarılı bir çalışmada sunulmaktadır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar giriş parametrelerinin ağırlığına göre değişken giriş veri seti değeri seçilerek bu durumun optimizasyon performansına katkısı gösterilmiştir. Yapılabilecek benzer çalışmalar için referans sağlayacak olan bu çalışmadaki yöntem sayesinde gelecekteki birçok çalışmada mevcuttan daha başarılı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Özetle çalışmada öne çıkanlar:

- Yapılan çalışmada WLAN/WiFi kablosuz iletişim sistemleri için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz için çok bantlı bir Vivaldi anten optimizasyon problemi için giriş parametrelerinin ağırlığına göre değişken giriş veri seti değeri seçilerek optimizasyon performans değişimi takip edilmiştir.

- Tasarım sonuçları MATLAB programı yardımı ile antenin S_{11} (dB) ve Yönlülük parametrelerinin simülasyonu ile gösterilmiştir.
- Çalışma daha önce yapılan bir çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarım problemindeki yöntemin üzerine yenilik konularak daha güncel bir algoritma ve farklı bir problem üzerinde çalışılarak yapılmıştır.
- Çalışma aynı zamanda her bir giriş tasarım parametresinin Vivaldi anten performansı üzerindeki etkisini de ortaya çıkarmaktadır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Veri odaklı vekil modeller, güvenilir, hızlı, doğru ve hesaplama açısından kazançlı bir optimizasyon sürecine sahip olmak için en etkili yöntemlerden biridir. Çok sayıda araştırma, veri odaklı vekil modellerin parametre ayarlaması (J. Wang vd., 2018), istatistiksel analiz (Ochoa & Cangellaris, 2013; Rossi vd., 2014) ve çok amaçlı tasarım (Dong vd., 2019) gibi çeşitli uygulamalarda kullanıldığını göstermiştir. Literatürde, mikrodalga yapıların vekil tabanlı modellemesi için polinom regresyonu (Chavez-Hurtado & Rayas-Sanchez, 2016), kriging enterpolasyonu (Queipo vd., 2005), radyal baz fonksiyonları (Barmuta vd., 2015), destek vektör regresyonu (Cai vd., 2018), polinom kaos genişlemesi (Petrocchi vd., 2017) ve Yapay sinir ağları (YSA) (Rayas-sanchez & Gutierrez-Ayala, 2006) gibi çok sayıda Yapay zekâ (YZ) tabanlı teknik bulunmaktadır.

Anten tasarım konusu ulusal çalışmalarda da güncelliğini devam ettirmektedir (BAYER KESKİN & GÜLER, 2021; Belen, 2024; Çıldır, 2024). Vivaldi Anten tasarımı da uluslararası araştırmalarda önemini sürdürmektedir (Jia vd., 2024; Karimov vd., 2024; S. Liu vd., 2024; S.-B. Liu vd., 2025; Niu vd., 2024; Sun vd., 2024; H. Zhang & Zhang, 2024). Bunlardan birincisinde simetrik radyasyon desenlerine sahip yeni bir ultra geniş bant dairesel polarize yarı tip Vivaldi anteni sunulmaktadır (Sun vd., 2024). Bir diğerinde karakteristik mod analizi temel alınarak düşük radar kesitli bir Vivaldi anteni tasarlanmıştır (Jia vd., 2024). 15 GHz ile 40 GHz arasındaki bir frekans aralığında 5G uygulamalarında çalışmak üzere tasarlanmış bir diğer güncel çalışma vardır (Karimov vd., 2024).

“5G iletişim optimizasyonu için 2,6 GHz’de Antipodal Vivaldi anteninin tasarımı ve simülasyonu” isimli güncel bir çalışmada gelişen teknoloji 5G iletişimi, 5G’nin verdiği veri hızının 4G’den daha iyi olduğu önerisi üzerine 2,6 GHz’de çalışan Antipodal Vivaldi anten tasarımı önerilmiştir (Darmawidjaja & Wibowo, 2021). Antenin, VSWR 1, referans empedansı 100 ohm ve S_{11} parametresi -20 dB’nin altında olan Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü (IEEE) tarafından tanımlanan standartlarını sağladığı kanıtlanmıştır. Çalışmada Antipodal Vivaldi anten tasarımı süreci için matematiksel formülasyon ve deneysel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm bunları simüle etmek ve optimize etmek için CST Studio Suite 2018 yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda geri dönüş kaybı -32,105013, kazanç yaklaşık 2,697 dB olarak bulunmuştur. Tek bant anten için MATLAB veya benzeri başka bir program yardımı ile farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak daha başarılı sonuçlar bulunabilirdi.

Bir diğer çalışma “Kırsal alan kablosuz iletişimleri için çok nesil 2G-5G anten tasarımı” adlı çalışmadır. Bu çalışmada, kırsal alan kablosuz iletişimleri için 2G, 3G, 4G ve 5G’nin çoklu nesil iletişimlerini gerçekleştirme yeteneğine sahip bir anten önerilmiştir (Sujiansyah vd., 2018). Anten ayrıca kırsal veya kentsel alanlarda afet sonrası iletişim için mobil bilişsel radyo baz istasyonu için de çalışmaktadır. Bu çalışmadaki anten Endonezya’daki 0,8 GHz ile 6 GHz arasında olması beklenen 2G-5G çalışma frekanslarında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Kazancı 8 dB den büyük olan geri dönüş kaybı ise -10 dB küçük olan bir Vivaldi anteni elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iyi olmasına karşın anten boyutu biraz büyüktür.

Bir başka güncel çalışma ise “Yapay zekâ kullanılarak ultra geniş bant Vivaldi anteninin tasarım optimizasyonu” isimli çalışmadır (Mahouti vd., 2022). Bu çalışmada, Frekans seçici yüzey (FSY) yüklü ultra geniş bant Vivaldi anteninin hesaplamalı olarak verimli tasarım optimizasyonu incelenmiştir. Hızlı ve doğru bir optimizasyon sürecine sahip olmak için, meta-sezgisel optimize edici Bal arısı çiftleşme optimizasyonu ile birlikte veri odaklı bir vekil model kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar 3B EM tam dalga simülatörü ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, elde edilen FSY yüklü yapının, geri dönüş kaybı özelliklerinde herhangi bir performans kaybı olmaksızın, FSY yapısı olmayan tasarıma kıyasla gelişmiş yönlülüğe sahip olduğunu göstermektedir. FSY yüklü Vivaldi anteni, 10 GHz’de 10 dB’lik maksimum kazançla 2-12 GHz bandında çalışacak biçimde tasarlanmış ve bu da tasarımı RADAR uygulamaları için iyi bir çözüm haline getiren bir çalışma olmuştur. Genel olarak başarılı bir çalışmadır.

“GOOSE algoritması kullanılarak çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarım probleminde dizi aralık seçiminin sonuç üzerindeki etkisi” isimli son incelenen çalışma ise sabit giriş veri seti değer aralığı seçilerek optimizasyon performans değişimi takip edilmiştir (Uluslu & Allaberdiyev, 2024). Çalışma çift bantlı mikrodalga bant geçiren filtreler, çok bantlı radyo dalgası ve kablosuz uygulamalardaki talebi karşılamak için yapılmıştır. 5G kablosuz iletişim sistemleri için 2,8 GHz ve 3,3 GHz için spektrum bant geçiren kompakt bir mikroşerit bant geçiren filtre (BGF) optimizasyon problemi üzerinden giriş veri seti aralığının seçiminin

optimizasyon problemi üzerindeki başarısının katkısı sunulmuştur. Yapılan çalışmada giriş parametre sayısının yüksekliğinin yanı sıra seçilen filtre modelinin çift bantlı olması optimizasyon problemini oldukça zorlaştırmıştır. Tasarım sonuçları MATLAB programı kullanılarak filtrenin S (dB) parametreleri simülasyon olarak sergilenmiştir. Ayrıca seçilen aralıkların sonuçları tablo olarak ele alındığında oldukça değişken başarılar elde edildiği görülmektedir. Bu durum optimizasyon problemlerinde, giriş veri setinde genişlik aralık seçimi büyük önem arz ettiğini göstermektedir. Aslında bu çalışma her parametre için sabit giriş veri seti değer aralığı seçilmesi eksik olduğu düşünülerek şu anda yapılacak olan çalışmanın temellerini oluşturmuştur.

Bu makalede, WLAN/WiFi kablosuz iletişim sistemleri için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz için çok bantlı bir Vivaldi anten optimizasyon problemi için giriş parametrelerinin ağırlığına göre değişken giriş veri seti değer aralığı seçilerek MATLAB yazılım araçları kullanılarak optimizasyon performans değişimi takip edilmiştir. Anten tasarımı ve performansı sonraki bölümlerde sunulmakta ve tartışılmaktadır.

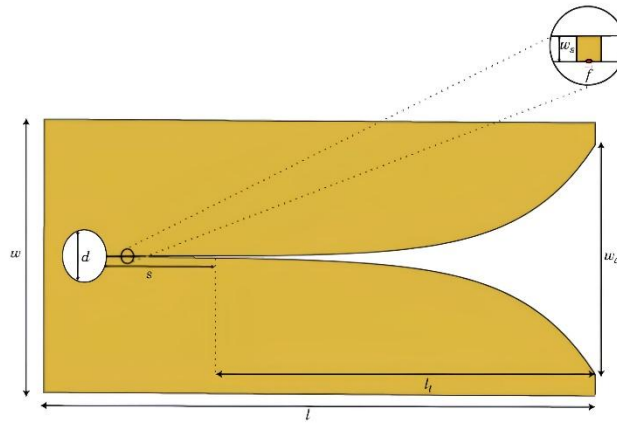
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Vivaldi anten veya konik yuvalı anten, katı bir sac levhadan, baskılı devre kartından veya bir veya her iki tarafı metalize edilmiş bir dielektrik plakadan yapılabilen bir koplaner geniş bant anteni olarak tanımlanabilir. Vivaldi anteni, her iki polarizasyon yönelimini iletmek/almak için ortogonal yönde düzenlenmiş iki cihaz kullanılarak doğrusal polarize dalga için yapılabilir. Dr. P.J. Gibson, Vivaldi antenini 1979'da IEEE 9. Avrupa Mikrodalga konferansında Vivaldi anteni başlığı adı altında tanıttı (Gibson, 1979). Vivaldi anteni, yapısı nedeniyle konik yuvalı anten olarak da adlandırılır, Dr. Gibson müzikle çok daha fazla ilgileniyordu, en sevdiği müzik bestecisi Barok döneminden Antonio Vivaldi'yd. Vivaldi büyük bir keman bestecisiydi. Dr. Gibson tarafından tasarlanan antenin şekli keman yapısına benziyordu ve Antonio Vivaldi'nin büyük bir hayranıydı. Teorik olarak, Vivaldi anteni sabit ışın genişliğine sahip genel bir frekans aralığında çalışabilir (Gibson, 1979).

3.1.1. Anten Tasarımı (Antenna Design)

Vivaldi anteninin temel yapısı aşağıdaki Şekil 1'de verilmiştir. Vivaldi anten tasarım parametreleri ve modelinin şematik görünümü buradan kolayca anlaşılabilir. Burada verilen tasarım parametreleri tanımları ise Tablo 1'de detaylı olarak açıklanmıştır. Önerilen model 7 tanesi değişken olmak üzere toplam 10 farklı parametreye sahiptir. Çalışmadaki tüm ölçüm ve hesaplamalar için MATLAB R2023B versiyonu kullanılacaktır. Tasarım için kullanılan parametrelere merkez değer ve değer aralık bilgisi yine Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 1. Vivaldi anten şematik görünümü ve tasarım parametreleri (Vivaldi antenna schematic view and design parameters)

Çok bantlı Vivaldi anten için tasarım optimizasyonunda kullanılacak olan değişkenlere ait detaylar Tablo 1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Vivaldi anten tasarımı için parametrelerin tanımı ve aralıkları
(Definition and ranges of parameters for multi-band Vivaldi antenna design)

Parametre	Tanımı	Merkez Değeri	Değer Aralığı
TaperLength (l_t) (1)	Konik uzunluk	122 (mm)	$\pm \%50, \pm \%50$
ApertureWidth (w_a) (2)	Diyafram genişliği	52 (mm)	$\pm \%50, \pm \%35$
SlotLineWidth (w_s) (3)	Slot çizgi genişliği	0,25 (mm)	$\pm \%50, \pm \%40$
CavityDiameter (d) (4)	Kavite sonlandırma çapı	12 (mm)	$\pm \%50, \pm \%55$
CavityToTaperSpacing (s) (5)	Geçişin boşluktan sivriltilmeye uzaklığı	12 (mm)	$\pm \%50, \pm \%65$
GroundPlaneLength (l) (6)	Toprak düzlemi uzunluğu	150 (mm)	$\pm \%50, \pm \%60$
GroundPlaneWidth (w) (7)	Zemin düzlemi genişliği	62 (mm)	$\pm \%50, \pm \%45$
OpeningRate	Konik açılma oranı	25	Sabit
FeedOffset	X eksenı boyunca beslemeden uzaklık	3,00E-01	Sabit
Conductor	Metal malzemenin türü	Metal ("PEC")	Sabit

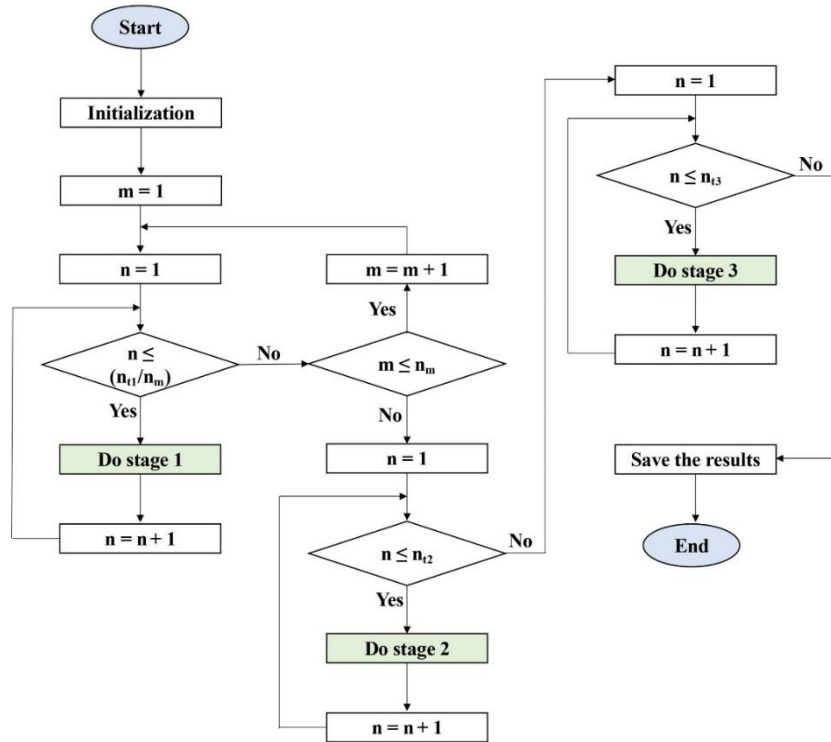
3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Önerilen yöntem, çok bantlı Vivaldi anten tasarım optimizasyon probleminde ağırlıklara göre değişken giriş veri seti aralığı seçiminin henüz çok yeni olan Ibl Mantık algoritması ile problemin performansına etkisi saptanacaktır. Seçilen algoritma henüz anten optimizasyon probleminde hiç kullanılmamış olup yapılan bir çalışmada geleneksel optimizasyon algoritmaları karşısında performanslı sonuçlar elde etmiştir (Mirrashid & Naderpour, 2023). Anten tasarım optimizasyonu için seçilen 7 değişken parametre için Tablo 1’de belirtilmiş olan merkez değer etrafında sabit giriş veri seti aralığı $\pm \%50$ seçilirken, değişken giriş veri seti aralıkları ise $\pm \%35, \pm \%40, \pm \%45, \pm \%50, \pm \%55, \pm \%60$ ve $\pm \%65$ olarak seçilmiştir. Elde edilen veriler ve sonuçlar detaylı olarak analiz edilerek sonuçlar kısmında verilecektir. Tüm elde edilen bu analizler neticesinde en düşük maliyet değerine sahip tasarım sonuçları simüle edilerek çalışmanın sonuna eklenecektir. Devam eden kısımlarda Ibl Mantık algoritması hakkında genel bir bilgi verilerek optimizasyon içerisinde kullanılacak olan amaç fonksiyonları ve maliyet fonksiyon seçimi konusuna değinilecektir.

3.2.1. IBI Mantık Algoritması (IBI Logics Algorithm)

Bu bölümde, çeşitli optimizasyon problemlerini çözmede yüksek verimlilik gösteren güncel bir algoritmanın detaylı olarak sunulacaktır. Fikir Ibl Mantık teorisine dayanmaktadır ve Ibl Mantık algoritması olarak adlandırılmaktadır. Bu algoritmanın temel amacı, yüksek Pİ değerine sahip bir Ibl mantığı bulmaktır. Seçilen Ibl mantığı, gelecekte belirli bir zamanda mantık olarak bilinecektir. Ibl Mantık algoritmasının bir hazırlık aşaması ve üç ana aşaması vardır. Bunlar keşif, entegrasyon ve kullanım olarak sıralanabilir. Ibl Mantık algoritmasının üç aşamasının her biri belirli bir amaç için tasarlanmıştır. Diğer mevcut algoritmaların aksine, üç ana aşama bağımsız olarak çalışır. Bu şekilde bir faz tamamlandığında çözümler bir sonraki faza geçer ve devam eden yinelemelerde bir önceki faza geri dönüş olmaz. Şekil 2’de bu üç aşama, grup çalışması, entegrasyon ve Ibl Mantık aramasını temsil eder. Algoritmanın 1’den 3’e kadar olan aşamalarındaki yineleme sayısı sırasıyla n_1 ile n_3 arasında ise, algoritmanın toplam yineleme sayısı $N_T = n_{t1} + n_{t2} + n_{t3}$ olur.

Kullanılan optimizasyon algoritmasında, uzman sayısı ve yinelemeler optimizasyondan önce ayarlanması gereken en önemli parametrelerdir. Ancak, Ibl Mantık algoritmasındaki Tablo 2’de verilen diğer bazı uyum parametreleri soruna göre seçilebilir. Bu parametrelerin uygun şekilde seçilmesi, çalışılan problemi çözmede algoritmanın verimliliğini artırabilir. Ibl Mantık algoritmasının bu parametrelerin her biri için varsayılan değerlerle bile optimum çözümü bulabileceği durumlar söz konusudur.

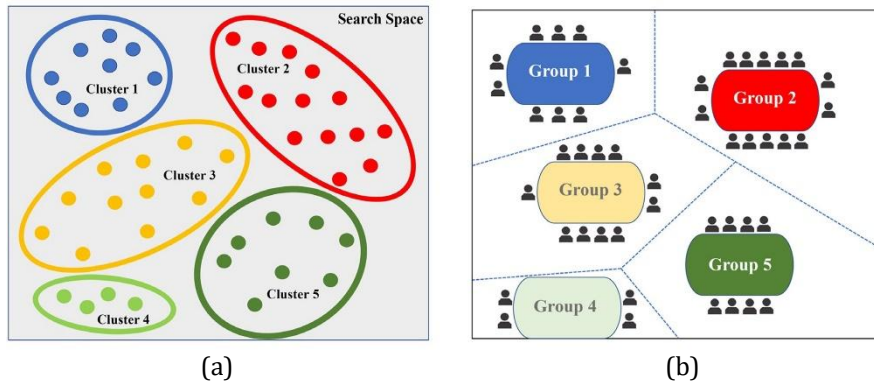


Şekil 2. IBI Mantık algoritmasının genel akış diyagramı (General flow diagram of IBI Logic algorithm)

Tablo 2. IBI Mantık algoritmasının parametreleri (Parameters of IBI Logic algorithm)

Parametreler	Tanım	Rastgele Değer
N_T	Tekrarlama sayısı	Kullanıcı tarafından belirlenir
n_{NL}	Uzman sayısı (her uzman bir mantık dışını temsil eder)	Kullanıcı tarafından belirlenir
n_m	Model sayısı	5
$n_{g,max}$	Her modeldeki maksimum grup sayısı	$(n_{NL})/2$
B_{min}	IBI parametreleri için minimum sınır	0,4
B_{max}	IBI parametreleri için maksimum sınır	0,6
p_{s1}	Aşama 1 de ki maksimum tekrarlama yüzdesi	%33
p_{s2}	Aşama 2 de ki maksimum tekrarlama yüzdesi	%33
n_{rep}	Kümeleme için çoğaltma sayısı	10
t_{clus}	n_{rep} çoğaltmalarında sınıflandırmayı birleştirme girişimlerinin sayısı	100

İlerleyen kısımda hazırlık fazı ve üç ana aşama anlatılacaktır.



Şekil 3. Uzmanların gruplandırılması: (a) Arama alanında kümeleme yaklaşımı, (b) Uzmanları her gruba atama (Grouping of experts: (a) Clustering approach in the search space, (b) Assigning experts to each group)

3.2.1.1. Hazırlık Fazı (Preparation Phase)

Önerilen algoritmada hazırlık kısmı aşama ile başlanır. Tablo 2’de belirtilen Ibl Mantık algoritması parametrelerinin başlangıç değerleri belirtildikten sonra, t_m olarak belirtilen n_m modellerin her biri için yineleme sayısı denklemi (1) kullanılarak belirlenir.

$$t_m = \frac{nt_1}{nm} \quad (1)$$

burada nt_1 , aşama 1 için belirtilen yinelemelerin sayısıdır ve Denklem (2) kullanılarak bulunabilir.

$$nt_1 = p_{s1} N_T \quad (2)$$

Aşağıda n_m modellerinin her biri ayrı ayrı yinelemelerle optimize edilmiştir. n_m modellerinin her biri ayrı ayrı yinelemelerle optimize edilir. Yani her modelin nihai sonuçları bir sonraki modele aktararak t_m kez optimize edilir. Bu, n_m model numarası da optimize edilene kadar yapılır. Bu adımdan sonra 1. aşama için yineleme sayısı tamamlanır ve tüm sonuçlar 2. aşamaya alınır. Her bir model için optimizasyon sürecine başlamadan önce, birinci aşama kullanılarak uzmanlar (tüm popülasyon) üzerinde Şekil 3’teki belirtilen k-ortalama kümeleme yöntemi uygulanarak kümeleme gerçekleştirilir (Likas vd., 2003; Xu & WunschII, 2005). Her bir küme, uzmanların mevcut zamanda Ibl olarak adlandırılan konunun gelecekteki mantığını belirlemek istedikleri inceleme konusu kapsamında bir parça olarak ele alınır. Bu yüzden Şekil 3’teki uzmanların gruplandırılması aşaması önemlidir. Aslında, Şekil 3’te görüleceği üzere bu adımda uzmanlar sınıflandırılır ve her biri bilgi düzeylerine (problemin arama uzayındaki mevcut konumlarına) göre bir gruba atanır. Her model için grup sayısı (n_g), Denklem (3) kullanılarak rastgele seçilir. Bu denklemdeki "randi" fonksiyonu, 1 ile belirtilen argüman olan $n_{g,max}$ arasında rastgele bir sayı seçimi anlamına gelmektedir.

$$n_{g,m} = \text{randi}(n_{g,max}) \quad m=1, \dots, n_m \quad (3)$$

Bir modelde gereken küme sayısı $n_{g,m}$ 'den daha az ise, Denklem (3) ihmal edilir ve önceki model için belirlenen kümeler mevcut model için belirleneceğini ifade etmek gerekir.

K-ortalama yöntemi kümeleme için kullanıldığından dolayı, grup üye sayısı diğer gruplardan farklı olabilir. Önerilen algoritma, kümeleme için mesafe metriği olarak Kareli Öklid mesafesi kullanır. Ancak, k-ortalama tekniği için diğer metrikler de göz önüne alınabilir (Likas vd., 2003; Xu & WunschII, 2005). Kümeleme işleminin sonrasında her uzman bir gruba atanır. Daha sonrasında, belirlenen gruplar optimizasyon sürecini uygulaması için birinci aşamaya (grup çalışması) alınır.

3.2.1.2. 1. Aşama Grup Çalışması (Stage 1 Group Work)

Bu aşama, algoritmanın küresel araması veya keşfi ile eşdeğer olup, her grup çözüm uzayının bir kısmına odaklanır ve kendi özel bölümünde en iyi NL'yi bulmaya çalışır. Bu amaçla, bir gruptaki tüm uzmanlar (E), gruptaki mevcut bilgileri kullanarak t_m iterasyonunda başlangıç uygunluklarını (NL) geliştirir. Her yinelemenin başlangıcından önce, üç temel özellik belirtilmiştir.

İlk özellik, tüm gruplar arasında önceki iterasyondaki en iyi NL değerine sahip olan E_i olup, bu araştırmada mevcut iterasyonun Mantiği (L) olarak adlandırılır. İkinci özellik, gruptaki en iyi uzman (E_i, g), ve üçüncü özellik ise her grubun önceki iterasyonda elde ettiği E'lerin ortalaması olan A_g 'dir. Daha sonra, her n_{NL} uzmanı için Ibl Mantık teorisinin üç parametresi, Denklem (4-6) kullanılarak belirlenir. Bu denklemlerde, C_i , D_i ve P_i sırasıyla i . Uzman olan E_i için anlaşılabilirliği, derecesini ve olasılığını temsil eder. E_i 'nin önceki iterasyondaki değeri de $E_{i,p}$ ile gösterilir.

$$C_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}} (E_i - L)^2} \quad (4)$$

$$D_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}} (E_i - E_{i,p})^2} \quad (5)$$

$$P_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{NL}} (E_i - E_{i,p})^2} \quad g=1, \dots, n_{g,m} \quad (6)$$

3.2.1.3. 2. Aşama Entegrasyon (Stage 2 Integration)

Bu aşamada gruplar birbiri ile birleştirilir ve tüm uzmanlar, mevcut iterasyonda olan bütün bilgiyi kullanarak NL değerlerini geliştirir. Dolayısıyla, bu aşamada tüm uzmanlar tek bir gruptadır ve n_{t2} iterasyonu içinde en iyi NL değerlerini bulmak üzerine yoğunlaşırlar.

3.2.1.4. 3. Aşama Mantıksal Arama (Stage 3 Logical Search)

Kullanılan algoritmanın üçüncü aşaması, küçük hareketlerle mümkün olan en iyi çözümü elde etmek ve belirlemek için hazırlanmıştır. Bu aşamada, her bir üyenin bilgisi, tüm uzmanlar tarafından elde edilen ortalama kolektif bilgi kullanılarak geliştirilir. Daha sonrasında, mevcut en iyi uzmandan örnek alarak her araştırmacının edindiği bilgi üzerinde ikincil bir güncelleme yapılır. Bu iki adım, algoritmanın durma kriterine (iterasyon sayısına) ulaşılan kadar n_{t3} kez tekrarlanır. Buna göre, her tekrarın başında mevcut bilginin ortalamasını hesaplamak gereklidir.

3.2.2. Amaç Fonksiyonları ve Maliyet Fonksiyonu (Objective Functions and Cost Function)

S_{11} parametresi, bir antenin yansıma kaybını ölçen bir parametredir. Yansıma katsayısı, yansıyan işaretin genliğinin gönderilen işaretin genliğine oranı olarak da tanımlanabilir. Yansıma katsayısının dB değeri, yani geri dönüş kaybı benzetimlerde de sıklıkla kullandığımız S_{11} parametresinin negatif dB değerine eşittir. Anten performansını belirleme en temel parametrelerden biridir. Bir diğer temel parametre olan yönlülük, antenin maksimum ışıma yaptığı yöndeki güç yoğunluğunun aynı güçteki bir izotropik antenin aynı uzaklıkta oluşturduğu güç yoğunluğuna oranıdır. Bir başka deyişle yönlü bir antenin radyasyon modelinin nasıl olduğunun bir ölçüsüdür. Yönlülük, bir antenin bir yönde diğerinden daha fazla sinyal gönderebilme yeteneğidir. Yönlü antenler yaymada çok güçlü ışıma yapabilen, almada ise çok güçlü sinyaller alabilen antenlerdir. Bu tür antenlerin kazançları yönlendirildiği yerde çoktur. Yönlendirilmediği yerde ise çok düşüktür. Böylece istenmeyen gürültüler veya yayınlar engellenmiş olunur. Tüm bunlardan dolayı anten tasarım optimizasyonu için kullanılacak olan amaç fonksiyonları belirlenen frekans (f) değerindeki S_{11} (dB) ve Yönlülük üzerine kurulmuştur. Diğer optimizasyon probleminde olduğu gibi burada da amaç fonksiyonlarının sıfır değerine yakınlaştırmak için Yönlülük parametresi olabildiğince yüksek, S_{11} (dB) ise olabildiğince düşük olacak şekilde dizayn edilecektir. Kullanılacak olan amaç fonksiyonları literatürde mevcut bir çalışma içerisinde (Uluslu, 2023) en başarılı olan fonksiyon seçilerek uyarlanmıştır. Belirtilen tüm bu koşullar dikkate alınarak amaç fonksiyonları şu şekilde dizayn edilmiştir.

$$AF_1 = \frac{1}{\text{Yönlülük}} \quad (7)$$

$$AF_2 = \frac{1}{-S_{11} \text{ dB}} \quad (8)$$

Maliyet fonksiyonu belirlenen frekanslar (2,4GHz, 3,5GHz ve 5GHz) için her iki amaç fonksiyonunun (7-8) toplanmasıyla elde edilmiştir.

$$\text{Maliyet} = \sum_{f=i} AF_1 + AF_2 \quad (i = 2,4 \ 3,5 \ 5) \quad (9)$$

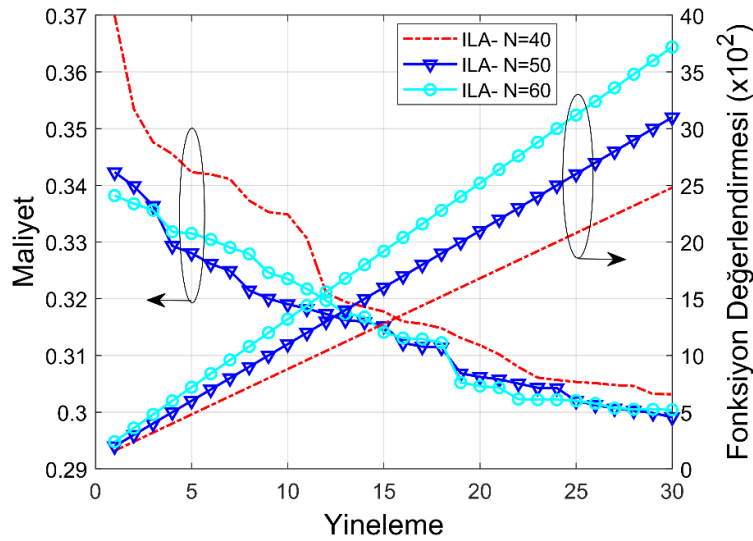
Bilindiği üzere optimizasyon süreçleri doğası gereği rastgele başlayan süreçlerdir. Bu nedenden dolayı her çalışmada farklı performansa sahip sonuçlar elde edilebilir. Bundan dolayı tüm optimizasyon süreçlerinde olduğu gibi bu çalışmada da 10 koşu içerisinde minimum Maliyet (9) değerine sahip sonuç seçilerek sergilenenecektir. Çalışmanın devamında anten optimizasyonu üzerine detaylı analizler gerçekleştirilerek sonuçlar ayrıntılı olarak sergilenenecektir.

4. Sonuçlar (Results)

4.1. Ibl Mantık Algoritması için Optimal Giriş Parametrelerinin Saptanması ve Klasik Optimizasyon Algoritmalarıyla Karşılaştırılması (Determination of Optimal Input Parameters for Ibl Logic Algorithm and Comparison with Classical Optimization Algorithms)

Optimizasyon algoritmalarında popülasyon çeşitliliği, optimizasyon başarısı için çok önemli bir faktördür. Popülasyon çeşitliliğinin öneminden dolayı bu kısım popülasyon tabanı tespiti için ayrılmıştır. Optimizasyon algoritmaları, yalnızca tek bir çözüme yakınsamaya yatkındır ve bu nedenle sıklıkla en iyi sonuçları bulmamızı engeller. Bu konulardan dolayı doğru popülasyon boyutunu seçmek kritik ve önemli bir noktadır. Popülasyon boyutunun ufak seçilmesi durumunda olasılık dahilinde daha performanslı sonuçları gözden kaçırabiliriz. Bu

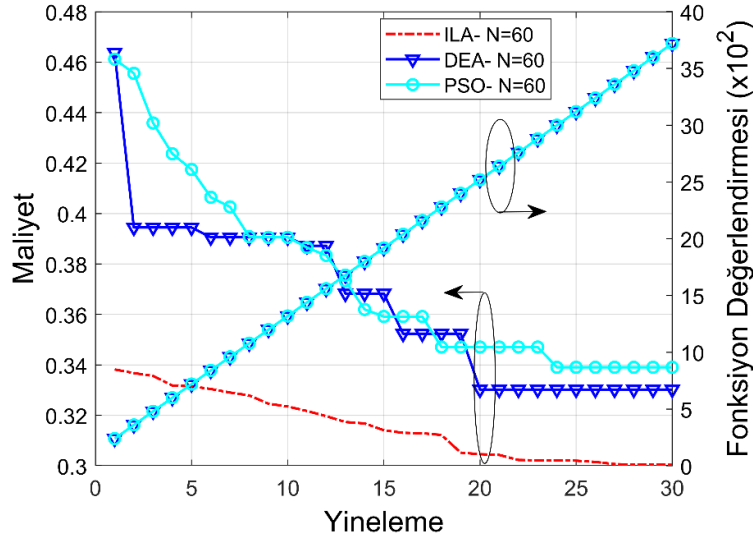
durumda optimizasyon sonucunda en optimum sonuçları bulmamızın önüne geçer. Tam tersi bir durumda yani popülasyon boyutunun büyük seçilmesi ise kaynakların boş yere israf edilmesi ve çözüm sürecinin boş yere uzamasının yanı sıra küçük boyutta optimum sonuçları atlamamıza neden olabilir. Bununla birlikte, yerel optimum ve uluslararası optimum, daha düşük seçimler nedeniyle ortadan kalkar (Uluslu, 2023). Tüm bunlar bir araya getirildiğinde çalışmanın bu aşamasında üç farklı popülasyon boyutu (40, 50, 60) için optimal popülasyon parametresinin saptanması ve çalışmanın bu seçilecek değer ile devam etmesi sağlanacaktır. Bu amaçla 3.2.2. bölümünde detaylandırılan amaç fonksiyon çifti AF_1 - AF_2 (7, 8) ve bunların toplanması sonucu elde edilen Maliyet fonksiyonu (9) kullanılarak optimizasyon aşamaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon süreçleri rastgele başlatılan koşullara ve sürece bağlı olduğundan dolayı, optimizasyon algoritması kodu diğer optimizasyon problemlerinde olduğu gibi on kere koşturulmuştur. Bu, sabit maksimum yinleme ve çeşitli popülasyon parametreleri için diğer optimizasyon sorunları için geçerlidir. Bu on farklı koşturulan içerisinden en iyi performansa sahip olan maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yinleme varyasyonları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yinleme varyasyonları değişimleri nümerik olarak Tablo 3'de detaylandırılmıştır. Bu araştırmanın bulguları, ideal popülasyon (N) değerinin 50 olduğunu bizlere göstermektedir, bu da en uygun maliyetli sonucu sağlar. Giriş kısmında ILA'nın birçok klasik optimizasyon yönteminden daha önde olduğunu, yöntemin performansı hem sınırlı hem de sınırsız 73 kıyaslama problemi üzerinde değerlendirildiğini ve sonuçların, rakip optimizasyon tekniklerinin sonuçlarıyla karşılaştırıldığını ve başarılı olduğunu belirtmiştik (Mirrashid & Naderpour, 2023). Fakat bunlar arasında anten optimizasyon problemi hiç olmadığından DEA ve PSO gibi geleneksel yöntemler ile performans karşılaştırması yapılarak sonuçlar maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yinleme varyasyonları Şekil 5'te gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği üzere ILA'nın rakiplerinden daha başarılı sonuçlar elde ettiği kanısına varılabilir.



Şekil 4. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında Ibl Mantık algoritması ile popülasyon tabanlı 10 koşturulan içerisinden seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinlemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Iterative typical cost and FD variations of the best performance of the selected optimization among 10 runs of the population-based Ibl Logic algorithm for multi-band Vivaldi antenna design)

Tablo 3. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında Ibl Mantık algoritması ile popülasyon tabanlı optimizasyonun performans sonuçları (Performance results of population-based optimization with Ibl Logic algorithm for multi-band Vivaldi antenna design)

Popülasyon		Minimum	Ortalama	Maksimum
40	Maliyet	0,3032	0,3228	0,3700
	FDN	2480	2480	160
50	Maliyet	0,2991	0,3147	0,3423
	FDN	3100	3100	200
60	Maliyet	0,3004	0,3155	0,3382
	FDN	3600	3720	240



Şekil 5. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında lbi Mantık algoritması ile diğer algoritmalar ile 10 koşu içerisinde seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Iterative typical cost and FD variations of the best performance of the optimization selected among 10 runs with lbi Logic algorithm and other algorithms in multi-band Vivaldi antenna design)

4.2. Giriş Parametre Ağırlıklarının Saptanması (Determination of Input Parameter Weights)

Vivaldi anten tasarım optimizasyonu için 7 tanesi değişken olmak üzere toplamda 10 farklı parametre mevcuttur. Elbette her giriş parametresinin optimizasyon performansı üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Bu etkiyi belirleyebilmek ve çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanabilmek amacıyla bu kısımda her bir parametrenin optimizasyon üzerindeki etkisini düşükten yükseğe olacak şekilde bu kısımda belirleyeceğiz. Bu amaçla toplamda 7 farklı koşu yaptırılmış ve her bir koşu işleminde toplam 6 değişken giriş parametresi bulunmaktadır. Bu 7 farklı koşuda değişken 7 parametreden her seferinde 1 tanesi sabit tutularak optimizasyon işlemi yapılacaktır. Böylelikle her bir parametrenin optimizasyondaki parametre ağırlığı saptanacaktır. Bu işlemde sabit tutulan parametreye ait optimizasyon Maliyet değeri; şayet düşük ise o parametrenin optimizasyon içerisindeki ağırlığının da düşük, şayet yüksek ise o parametrenin optimizasyon içerisindeki ağırlığının da yüksek olduğu sonucuna varılacaktır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4’de sıralı olarak sunulmuştur. Sonuçlar minimum Maliyet değeri göz önüne alarak sıralama yapılmıştır. Tablo 4’deki sonuçlardan da görüleceği üzere optimizasyon üzerinde en düşük ağırlığa sahip giriş parametresinin “ApertureWidth”, en yüksek ağırlığa sahip giriş parametresinin ise “CavityToTaperSpacing” olduğu görülmektedir. Giriş parametrelerinin ağırlıkları düşükten yükseğe sırası ile “ApertureWidth”, “SlotLineWidth”, “GroundPlaneWidth”, “TaperLength”, “CavityDiameter”, “GroundPlaneLength” ve “CavityToTaperSpacing” şeklindedir.

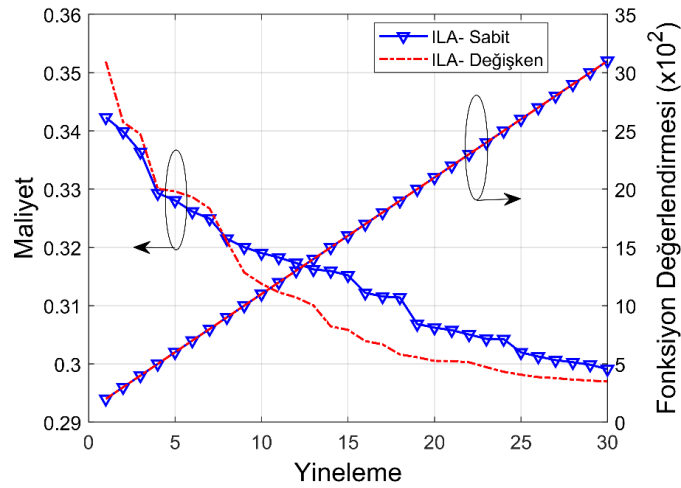
Tablo 4. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında lbi Mantık algoritması ile azaltılmış sabit giriş parametre yöntemi ile optimizasyonun performans sonuçları (Performance results of optimization with reduced fixed input parameter method with lbi Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)

Eksik Olan Parametre	Minimum	Ortalama	Maksimum
ApertureWidth (2)	0,3040	0,3296	0,3646
SlotLineWidth (3)	0,3042	0,3205	0,3521
GroundPlaneWidth (7)	0,3046	0,3245	0,3699
TaperLength (1)	0,3074	0,3153	0,3413
CavityDiameter (4)	0,3076	0,3247	0,3421
GroundPlaneLength (6)	0,3190	0,3279	0,3443
CavityToTaperSpacing (5)	0,3212	0,3329	0,3553

4.3. Değişken Giriş Veri Seti Değer Aralığı Seçiminin Performansı (Performance of Variable Input Data Set Value Range Selection)

Bir önceki bölümde uygulanan algoritma parametre seçiminde olduğu gibi giriş parametre veri setleri için değer aralık seçimi de ayrı bir problem olarak tasarımcıların önüne çıkmaktadır. Giriş veri seti değer aralığı seçimi optimizasyon sonuçları üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Giriş veri seti değer aralığının büyük seçilmesi

durumunda olması aradaki olabilecek en iyi sonuçları atlamamıza neden olabileceken, bu değerin küçük seçilmesi durumunda daha performanslı sonuçları kaçırmamıza neden olabilir. Aynı şekilde her giriş parametresi için sabit giriş veri değeri aralığı seçimi de yukarıda bahsedildiği kadar büyük bir etkiye sahip olmasa da performans üzerinde azımsanamayacak kadar etkisi olabilir. Tüm bunları test etmek ve optimizasyonun performansı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla bir önceki kısımda belirlenen giriş parametre ağırlıklarına göre 7 farklı giriş parametresi için verilen merkez değerden belirlenen 7 farklı yüzde (± 35 , ± 40 , ± 45 , ± 50 , ± 55 , ± 60 ve ± 65) için elde edilen sonuç, 4.1. bölümünde elde edilen sabit giriş veri seti değeri aralığı ile karşılaştırmalı olarak sergilenenektir. 4.2 bölümünde elde edilen giriş parametre ağırlıkları sıralı olarak verilmişti. Burada ise o kısımda verilen sıra doğrultusunda değişken giriş veri seti değeri aralığı verilerek tekrar optimizasyon işlemi tekrarlanmıştır. Sabit ve değişken giriş veri seti değeri aralığına ait on farklı koşu içerisinde en iyi performansa sahip olan maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yineleme varyasyonları Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da maliyet-fonksiyon değerlendirme numarası/yineleme varyasyonları değişimleri nümerik olarak Tablo 5'te karşılaştırılmalı olarak detaylandırılmıştır. Tüm bunların sonucunda değişken giriş veri seti seçiminin daha performanslı sonuçlar vereceği açıkça görülmektedir, bu da en uygun maliyetli sonucu bulmamızı bizlere sağlar.



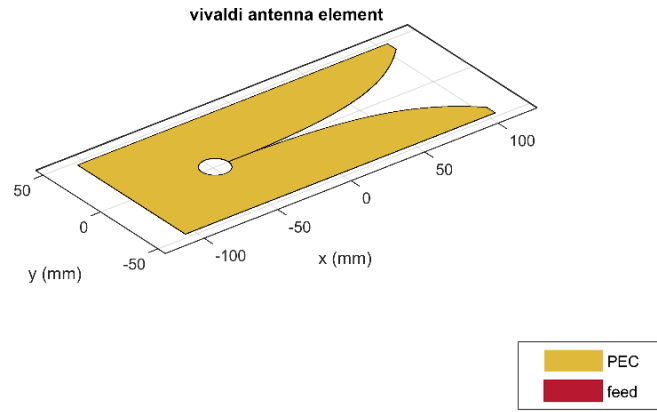
Şekil 6. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında Ibl Mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değeri aralığı seçim tabanlı 10 koşu içerisinde seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FD varyasyonları (Iterative typical cost and FD variations of the best performance of the optimization selected among 10 runs based on fixed/variable input data set value range selection with Ibl Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)

Tablo 5. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında Ibl Mantık algoritması ile sabit/değişken giriş veri seti değeri aralığı seçim tabanlı optimizasyonun performans sonuçları (Performance results of fixed/variable input data set value range selection based optimization with Ibl Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)

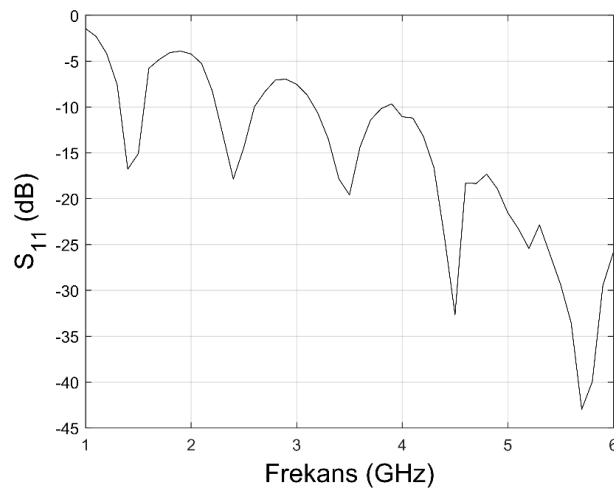
Tür		Minimum	Ortalama	Maksimum
Sabit Giriş Veri Seti Aralığı	Maliyet	0,2991	0,3147	0,3423
	FND	3100	3100	200
Değişken Giriş Veri Seti Aralığı	Maliyet	0,2970	0,3113	0,3519
	FND	3100	3100	200

4.4. En Başarılı Anten Tasarımının Simülasyon Sonuçları (Simulation of S Parameters for Best Results)

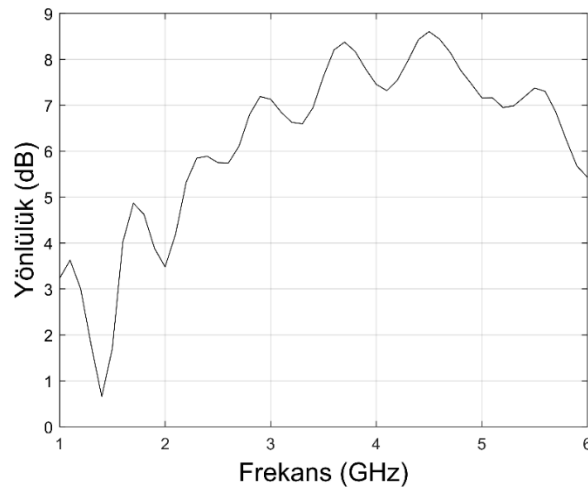
Her optimizasyon probleminde olduğu gibi bu problemde de en performanslı sonuçları sağlayabilmek için MATLAB programı içerisindeki anten araç kutusu kullanılarak sabit ve değişken giriş veri seti değeri aralığı verilerek farklı denemeler yapılmış ve bunlara ait minimum, ortalama ve maksimum fonksiyon değerlendirme numaraları maliyet karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında ise Tablo 5'de verilen en performanslı antenin S_{11} (dB) parametresi 2 GHz ile 6 GHz arasında olacak şekilde değişimi tipik genlik-frekans olarak verilmiştir. Anten S_{11} parametresi -10 dB ve altında yansıma yaptığı varsayıldığından hedeflenen anten için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz de yani istenilen bantlarda çalıştığı görülmektedir. Şekil 7'da en başarılı optimizasyondan elde edilen antenin şematik görüntüsü verilmiştir. Amaç fonksiyonlarından biri olan antenin S_{11} (dB) parametresi değişimi ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Bir diğer amaç fonksiyonu olan Yönlülük parametresi ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar gerek S_{11} (dB) parametresi olarak gerekse de Yönlülük olarak istenilen frekanslar için antenin gereksinimlerini sağladığı görülmektedir.



Şekil 7. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında İbİ Mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin şematik görünümü (Schematic view of the most successful antenna obtained with the İbİ Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)



Şekil 8. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında İbİ Mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin S_{11} (dB) parametresi simülasyonu (S_{11} (dB) parameter simulation of the most successful antenna obtained with İbİ Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)



Şekil 9. Çok bantlı Vivaldi anten tasarımında İbİ Mantık algoritması ile elde edilen en başarılı antenin Yönlülük parametresi simülasyonu (Simulation of the most successful antenna Directivity parameter obtained with İbİ Logic algorithm in multi-band Vivaldi antenna design)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Literatüre kazandırılan bu çalışmada, WLAN/WiFi kablosuz iletişim sistemleri için 2,4 GHz, 3,5 GHz ve 5 GHz için çok bantlı bir Vivaldi anten optimizasyon problemi için giriş parametrelerinin ağırlığına göre değişken giriş veri

seti değer aralığı seçilerek optimizasyon performans değişimi takip edilmiştir. Çalışma daha önce yapılan bir çift bantlı mikroşerit bağlantılı kombine bant geçiren filtre tasarım problemindeki yöntemin üzerine yenilik konularak daha güncel bir algoritma ve farklı bir problem üzerinde çalışılarak yapılmıştır (Uluslu & Allaberdiyev, 2024). Seçilen algoritmanın güncel, mevcut geleneksel algoritmalar karşısında başarısını ispatlamış olması nedeniyle başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada geleneksel algoritmalar ile performans karşılaştırması kısmı da mevcuttur. Ayrıca henüz anten tasarımı alanında kullanılmamış olması ve optimizasyon giriş veri seti seçimine farklı bir bakış açısı getirmesi benzer alanda çalışacak araştırmacılar için öncü bir literatür kaynağı oluşturacaktır. Seçilen konu dolayısı ile birçok çalışma için referans kaynağı niteliğindedir. Elde edilen bulgular değişken giriş veri seti değer aralığı seçiminin daha performanslı sonuçlar elde edilebileceğini kanıtlamıştır. Tüm bu optimizasyon sonucu elde edilen sonuçlar MATLAB anten araç kutusu kullanılarak S_{11} (dB) ve Yönlülük parametreleri sonuçları simülasyon olarak gösterilmiştir. Tüm bu sonuçlar bir önceki çalışmada (Uluslu & Allaberdiyev, 2024) olduğu gibi değişken giriş veri seti değer aralığı seçiminin referans niteliği taşımaktadır. Çalışmanın sonraki versiyonlarında optimizasyon süreçlerini hızlandırmak adına modelleme desteği veya farklı yöntemler geliştirilerek yeni çalışmalara imza atılabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abderazek, H., Yildiz, A. R., & Mirjalili, S. (2020). Comparison of recent optimization algorithms for design optimization of a cam-follower mechanism. *Knowledge-Based Systems*, 191, 105237. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105237>
- Barmuta, P., Ferranti, F., Gibiino, G. P., Lewandowski, A., & Schreurs, D. M. M.-P. (2015). Compact Behavioral Models of Nonlinear Active Devices Using Response Surface Methodology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(1), 56-64. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2376559>
- BAYER KESKİN, S. E., & GÜLER, C. (2021). DESIGN OF CIRCULAR SLOTTED RECTANGULAR MICROSTRIP PATCH ANTENNA WITH DUAL-RESONANCE FOR WLAN/WIMAX APPLICATIONS. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1296-1301. <https://doi.org/10.21923/jesd.676705>
- Belen, M. A. (2024). ÇOK BANDLI UYGULAMALAR İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12(4), 866-875. <https://doi.org/10.21923/jesd.1551368>
- Cai, J., King, J., Yu, C., Liu, J., & Sun, L. (2018). Support Vector Regression-Based Behavioral Modeling Technique for RF Power Transistors. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(5), 428-430. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2819427>
- Chavez-Hurtado, J. L., & Rayas-Sanchez, J. E. (2016). Polynomial-Based Surrogate Modeling of RF and Microwave Circuits in Frequency Domain Exploiting the Multinomial Theorem. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(12), 4371-4381. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2623902>
- Çıldır, A. (2024). THE MICROSTRIP ARRAY ANTENNA WITH REFLECTOR at 1.4 AND 2.4 GHz for RADARS APPLICATIONS. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12(1), 88-97. <https://doi.org/10.21923/jesd.1351302>
- Darmawidjaja, A. R., & Wibowo, E. P. (2021). Design and Simulation of Antipodal Vivaldi Antenna (AVA) AT 2.6 GHz For 5G Communication Optimation. 2021 Sixth International Conference on Informatics and Computing (ICIC), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIC54025.2021.9632925>
- Dhiman, G., Singh, K. K., Soni, M., Nagar, A., Dehghani, M., Slowik, A., Kaur, A., Sharma, A., Houssein, E. H., & Cengiz, K. (2021). MOSOA: A new multi-objective seagull optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 167, 114150. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114150>
- Dong, J., Qin, W., & Wang, M. (2019). Fast Multi-Objective Optimization of Multi-Parameter Antenna Structures Based on Improved BPNN Surrogate Model. *IEEE Access*, 7, 77692-77701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2920945>
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. (2020). Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 191, 105190. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105190>
- Gao, D., Wang, G.-G., & Pedrycz, W. (2020). Solving Fuzzy Job-Shop Scheduling Problem Using DE Algorithm Improved by a Selection Mechanism. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(12), 3265-3275. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.3003506>
- Gibson, P. J. (1979). The Vivaldi Aerial. 1979 9th European Microwave Conference, 101-105. <https://doi.org/10.1109/EUMA.1979.332681>
- Gu, Z.-M., & Wang, G.-G. (2020). Improving NSGA-III algorithms with information feedback models for large-scale many-objective optimization. *Future Generation Computer Systems*, 107, 49-69. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.01.048>
- Hang, D., & Li, X. (2018). Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on GSO in Optimization Design of FIR Digital Filter. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI), 84-87. <https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690503>
- Hayyolalam, V., & Pourhaji Kazem, A. A. (2020). Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103249>
- Jain, M., Singh, V., & Rani, A. (2019). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 148-175. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.013>

- Jia, Y., Luo, J., Ren, X., Shi, G., & Liu, Y. (2024). Design of Low-RCS Vivaldi Antenna Based on Characteristic Mode Analysis. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(4), 1246-1250. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3350890>
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.05.007>
- Karimov, A., Nauryzbayev, G., & Hashmi, M. (2024). Ultra-Wide Band Antipodal Vivaldi Antenna with a Metamaterial Structure for 5G Applications. 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), 2067-2068. <https://doi.org/10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686433>
- Kennedy, J. (t.y.). *Swarm Intelligence. İçinde Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing* (ss. 187-219). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-387-27705-6_6
- Li, J., & Han, Y. (2020). A hybrid multi-objective artificial bee colony algorithm for flexible task scheduling problems in cloud computing system. *Cluster Computing*, 23(4), 2483-2499. <https://doi.org/10.1007/s10586-019-03022-z>
- Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, 111, 300-323. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>
- Likas, A., Vlassis, N., & J. Verbeek, J. (2003). The global k-means clustering algorithm. *Pattern Recognition*, 36(2), 451-461. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00060-2)
- Liu, S., Zhang, Y., Wang, Y., & Xia, T. (2024). Wideband Vivaldi Antenna and 2 X 8 Antenna Array Design. 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT61774.2024.10672197>
- Liu, S.-B., Zhang, F.-S., Xie, G.-J., Song, L., & Guo, Y.-X. (2025). Miniaturization of Ultrawideband Horizontally Polarized Omnidirectional Vivaldi Antenna Arrays Using Nonuniform Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 73(2), 748-757. <https://doi.org/10.1109/TAP.2024.3503775>
- Mahouti, P., Kızılay, A., Tari, O., Belen, A., Belen, M. A., & Çalışkan, A. (2022). Design Optimization of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna using Artificial Intelligence. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*. <https://doi.org/10.13052/2021.ACES.J.361211>
- Mirrashid, M., & Naderpour, H. (2021). Recent Trends in Prediction of Concrete Elements Behavior Using Soft Computing (2010–2020). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 3307-3327. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09500-7>
- Mirrashid, M., & Naderpour, H. (2023). Incomprehensible but Intelligible-in-time logics: Theory and optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 264, 110305. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.110305>
- Naderpour, H., & Mirrashid, M. (2020a). Bio-inspired predictive models for shear strength of reinforced concrete beams having steel stirrups. *Soft Computing*, 24(16), 12587-12597. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04698-x>
- Naderpour, H., & Mirrashid, M. (2020b). Estimating the compressive strength of eco-friendly concrete incorporating recycled coarse aggregate using neuro-fuzzy approach. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121886>
- Naderpour, H., & Mirrashid, M. (2020c). Proposed soft computing models for moment capacity prediction of reinforced concrete columns. *Soft Computing*, 24(15), 11715-11729. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04634-8>
- Naderpour, H., Mirrashid, M., & Parsa, P. (2021). Failure mode prediction of reinforced concrete columns using machine learning methods. *Engineering Structures*, 248, 113263. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113263>
- Niu, L., Zhang, H., Zhai, H., Zhu, C., & Wang, N. (2024). An Ultra-wideband Circularly-polarized Vivaldi Antenna with Wide Beam Angel. 2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), 1-3. <https://doi.org/10.1109/ACES-China62474.2024.10700002>
- Ochoa, J. S., & Cangellaris, A. C. (2013). Random-Space Dimensionality Reduction for Expedient Yield Estimation of Passive Microwave Structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(12), 4313-4321. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2286968>
- Petrocchi, A., Kaintura, A., Avolio, G., Spina, D., Dhaene, T., Raffo, A., & Schreurs, D. M. M.-P. (2017). Measurement Uncertainty Propagation in Transistor Model Parameters via Polynomial Chaos Expansion. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(6), 572-574. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2701334>
- Pierezan, J., dos Santos Coelho, L., Cocco Mariani, V., Hochsteiner de Vasconcelos Segundo, E., & Prayogo, D. (2021). Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems. *Computers & Structures*, 242, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106353>
- Prasad, R. V. H., Vakula, D., & Chakravarthy, M. (2018). A Novel Fractal Slot DGS Microstrip Antenna for Wi-Fi Application. 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP), 1-4. <https://doi.org/10.1109/INCAP.2018.8770773>
- Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R., & Kevin Tucker, P. (2005). Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(1), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.001>
- Rayas-sanchez, J., & Gutierrez-Ayala, V. (2006). EM-Based Statistical Analysis and Yield Estimation Using Linear-Input and Neural-Output Space Mapping. 2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1597-1600. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249641>
- Rossi, M., Dierck, A., Rogier, H., & Vande Ginste, D. (2014). A Stochastic Framework for the Variability Analysis of Textile Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(12), 6510-6514. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2360219>
- Sujiansyah, D. A., Syihabuddin, B., Anwar, K., & Adriansyah, N. M. (2018). Antenna Design for Multi-generation 2G-5G for Rural Area Wireless Communications. 2018 International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev), 7-11. <https://doi.org/10.1109/ICICTR.2018.8706865>
- Sun, X.-Y., Wu, B., Zhang, H.-H., Guo, K.-X., Xie, H.-Y., Song, X.-Z., & Su, T. (2024). Ultrawideband Circularly Polarized Halved-Type Vivaldi Antenna With Symmetrical Radiation Pattern. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(2), 633-637. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3331383>
- Truong, L. X., Tao, V. Q., Minh Tuan, T., & Vu Bang Giang, T. (2015). Design a microstrip antenna with defected ground structure. 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 160-163.

- <https://doi.org/10.1109/ATC.2015.7388311>
- Uluslu, A. (2023). Fitting nonlinear mathematical models to the cost function of the quadrafilal helix antenna optimization problem. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 115(3), 307-318. <https://doi.org/10.1007/s10470-023-02174-8>
- Uluslu, A., & Allaberdiyev, K. (2024). GOOSE ALGORİTMA SI KULLANILARAK ÇİFT BANTLI MİKROŞERİT BAĞLANTILI KOMBİNE BANT GEÇİREN FİLTRE TASARIM PROBLEMİNDE DİZİ ARALIK SEÇİMİNİN SONUÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12(3), 557-571. <https://doi.org/10.21923/jesd.1472691>
- Wang, G.-G., Guo, L., Gandomi, A. H., Hao, G.-S., & Wang, H. (2014). Chaotic Krill Herd algorithm. *Information Sciences*, 274, 17-34. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.123>
- Wang, J., Yang, X., & Wang, B. (2018). Efficient gradient-based optimisation of pixel antenna with large-scale connections. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(3), 385-389. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0719>
- Xu, R., & WunschII, D. (2005). Survey of Clustering Algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16(3), 645-678. <https://doi.org/10.1109/TNN.2005.845141>
- Yang, D., Hu, J., & Liu, S. (2018). A Low Profile UWB Antenna for WBAN Applications. *IEEE Access*, 6, 25214-25219. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2819163>
- Yang, X.-S. (2020). Nature-inspired optimization algorithms: Challenges and open problems. *Journal of Computational Science*, 46, 101104. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101104>
- Yi, J.-H., Xing, L.-N., Wang, G.-G., Dong, J., Vasilakos, A. V., Alavi, A. H., & Wang, L. (2020). Behavior of crossover operators in NSGA-III for large-scale optimization problems. *Information Sciences*, 509, 470-487. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.10.005>
- Zhang, H., & Zhang, F. (2024). A Novel Ultrawideband Miniature Vivaldi Antenna With Sawtooth Outer Edges and Inclined Elliptical Slots. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23(9), 2708-2712. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3405007>
- Zhang, Y., Wang, G.-G., Li, K., Yeh, W.-C., Jian, M., & Dong, J. (2020). Enhancing MOEA/D with information feedback models for large-scale many-objective optimization. *Information Sciences*, 522, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.02.066>