Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 41:2 (2026) 785-793

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Exploitation of parasitic elements in beam-shaping applications of super-directive antenna arrays

İhsan Kanbaz[1, 2*]

[1]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Turkey
[2]Centre for Wireless Innovation (CWI), Queen's University Belfast, Belfast BT3 9DT, U.K

Highlights:

- Modeling of super-directive antenna arrays
- Effect of parasitic elements on beam steering
- Beam steering toward the target angle through reactive loading of parasitic elements

Keywords:

- Antenna arrays
- Impedance mismatch
- Realized gain
- Super–directive antenna arrays

Article Info:

Research Article
Received: 21.04.2025
Accepted: 12.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1681152

Acknowledgement:

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the 2219 Overseas Postdoctoral Research Fellowship Program (Project No: 1059B192400225). The author's research activities are also supported by the TÜBİTAK 3501 Career Development Program. We would also like to thank Prof. Dr. Okan Yurduseven and Michalis Matthaiou for their valuable contributions and constructive evaluations in the development of this study

Correspondence:

Author: İhsan Kanbaz
e-mail: ihsankanbaz@gazi.edu.tr
phone: +90 543 314 0524

Graphical/Tabular Abstract

Super-directive antenna arrays (SDAAs) face fundamental challenges such as impedance mismatch and low efficiency, which significantly limit their practical applications. These issues adversely affect the realized gain of SDAAs, overshadowing their high directivity advantage compared to conventional antenna arrays. Additionally, the confinement of maximum radiation to the end-fire direction presents a major limitation for practical implementations. In this study, a novel antenna array geometry is proposed that not only enhances the realized gain but also steers radiation toward the desired direction by employing parasitic elements in conjunction with particle swarm optimization. The impact of parasitic elements on radiation is analyzed using mathematical models, and a new algorithm is developed to control radiation patterns via reactive loads. Subsequently, two compact dipole antenna arrays with hexagonal and T-shaped configurations (as shown in Figure A), consisting of three active and four parasitic elements, are designed and analyzed. Electromagnetic solver-based simulations demonstrate that the proposed geometries hold significant potential for enabling the use of SDAAs in 6G and beyond, particularly in high-mobility applications.

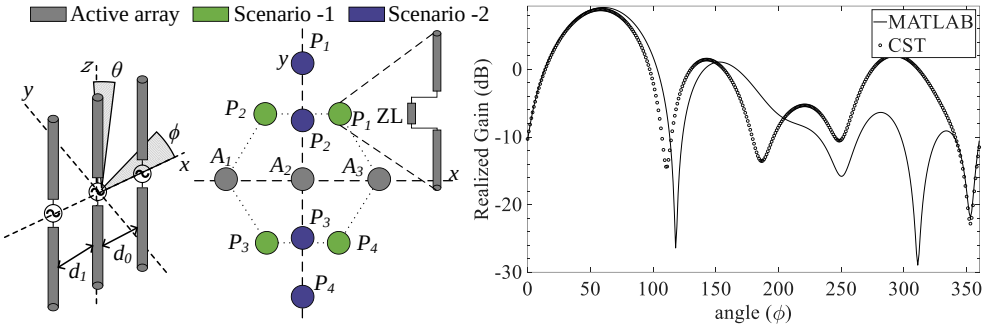


Figure A. Overview of the proposed super-directive antenna array configuration. From left to right: 3D representation of the active dipole array, schematic illustration of parasitic element placements in hexagonal and T-shaped configurations, and the corresponding optimized radiation pattern

Purpose:
To overcome the limited beam-steering capability of SDAAs by integrating parasitic elements and optimizing excitation parameters using a PSO-based approach.

Theory and Methods:
A PSO-based optimization was applied to an active dipole array model with parasitic elements, considering mutual coupling and realized gain. The overall array performance was validated via full-wave simulations.

Results:
The proposed approach led to over 30% improvement in realized gain compared to conventional arrays, along with approximately 35% physical size reduction in the hexagonal configuration. The T-shaped array achieved up to 91.7% efficiency at 120°, demonstrating enhanced beam-steering capability and practical viability for compact, high-performance SDAAs.

Conclusion:
This study demonstrates that integrating reactively loaded parasitic elements into SDAAs enables compact and efficient beam-steering solutions. The combination of optimized active currents and geometrical configurations provides a promising framework for next-generation communication systems requiring high gain and flexible directivity.

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Süper yönlü anten dizilerinin ışın şekillendirme uygulamalarında parazitik elemanların kullanımı

İhsan Kanbaz[1, 2*]

[1]Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye
[2]Centre for Wireless Innovation (CWI), Queen's University Belfast, Belfast BT3 9DT, U.K

Ö N E Ç I K A N L A R

- Süper yünlü anten dizilerinin modellenmesi
- Parazitik elemanların hüzme yönlendirme üzerine etkisi
- Parazitik yüklerin reaktif yüklenmesi ise hüzmenin hedeflenen açıya yönlendirilmesi

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 21.04.2025
Kabul: 12.02.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1681152

Anahtar Kelimeler:
Anten dizileri, empedans uyumsuzluğu, gerçekleştirilmiş kazanç, süper-yönlü anten dizileri

ÖZ

Süper-yönlü anten dizilerinin (SYAD) empedans uyumsuzluğu ve düşük verimlilik gibi temel sorunları, bu dizilerin pratik uygulamalarını sınırlamaktadır. Bu sorunlar, SYAD'ların gerçekleştirilmiş kazanç parametresini olumsuz etkileyerek, klasik anten dizilerine kıyasla sahip oldukları yüksek yönlülük avantajını gölgede bırakmaktadır. Ayrıca, SYAD'ların maksimum ışıma yönünün yalnızca uç doğrultusunda olması pratik uygulamalar için ciddi bir kısıt oluşturmaktadır. Bu çalışmada, parazitik elemanlar ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılarak hem gerçekleştirilmiş kazancın artırıldığı hem de ışımaların istenilen açıya yönlendirildiği yenilikçi bir anten dizi geometrisi sunulmuştur. Parazitik elemanların ışımaya etkileri matematiksel modellerle analiz edilmiş ve reaktif yüklerle ışımayı kontrol eden bir algoritma geliştirilmiştir. Ardından, üç aktif ve dört parazitik elemandan oluşan, altıgen ve T şeklinde iki farklı geometriye sahip kompakt dipol anten dizileri tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Elektromanyetik çözücülerle gerçekleştirilen analizlerde, önerilen geometrilerin 6G ve sonrası yüksek mobilite gerektiren uygulamalarda SYAD'ların kullanımını mümkün kılabilecek önemli bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir.

Exploitation of parasitic elements in beam-shaping applications of super-directive antenna arrays

H I G H L I G H T S

- Modeling of super-directive antenna arrays
- Effect of parasitic elements on beam steering
- Beam steering toward the target angle through reactive loading of parasitic elements

Article Info
Research Article
Received: 21.04.2025
Accepted: 12.02.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1681152

Keywords:
Antenna arrays, impedance mismatch, realized gain, Super-directive antenna arrays

ABSTRACT

Super-directive antenna arrays (SDAAs) face fundamental challenges such as impedance mismatch and low efficiency, which significantly limit their practical applications. These issues adversely affect the realized gain of SDAAs, overshadowing their high directivity advantage compared to conventional antenna arrays. Additionally, the confinement of maximum radiation to the end-fire direction presents a major limitation for practical implementations. In this study, a novel antenna array geometry is proposed that not only enhances the realized gain but also steers the radiation toward the desired direction by employing parasitic elements in conjunction with particle swarm optimization (PSO). The impact of parasitic elements on the radiation is analyzed using mathematical models, and a new algorithm is developed to control radiation patterns via reactive loads. Subsequently, two compact dipole antenna arrays with hexagonal and T-shaped configurations, consisting of three active and four parasitic elements, are designed and analyzed. Electromagnetic solver-based simulations demonstrate that the proposed geometries hold significant potential for enabling the use of SDAAs in 6G and beyond, particularly in high-mobility applications.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / *Corresponding Author / Authors: *ihsankanbaz@gazi.edu.tr / Tel: +90 543 314 0524

1. Giriş (Introduction)

Klasik anten dizilerinde elemanlar arası kuplaj, dizinin toplam ışınım örüntüsünde bozulmalara neden olan başlıca etkenlerden biri olarak görülmekte ve genellikle bir dezavantaj olarak değerlendirildiği için minimize edilmeye çalışılmaktadır. Literatürde bu karşılıklı kuplajı azaltmayı hedefleyen çeşitli yöntemler incelenmiş olsa da, en etkili yaklaşım olarak elemanlar arası mesafenin artırılması öne çıkmaktadır. Pratik bir sınır olarak kabul edilen yarım dalga boyu mesafesi iyi bir izolasyon sağlasa da, eleman sayısının yüzlerle ifade edildiği ve anten panel boyutunun kritik bir parametre haline geldiği devasa çoklu-giriş çoklu-çıkış (Massive MIMO) uygulamaları açısından önemli bir kısıt oluşturur [1–4].

Uzkov tarafından eş yönlü anten kaynakları ele alınarak gerçekleştirilen teorik çalışmada, antenler arası kuplajın yıkıcı etkileri tersine çevrilerek, kuplajın artırılması yoluyla dizi kazancının artırılabileceği öne sürülmüştür [5]. Bu yaklaşımla, kuplajsız anten dizilerinde eleman sayısıyla doğru orantılı olan yönlülük ifadesinin (Y∝N; burada Y yönlülüğü, N ise dizinin toplam eleman sayısını göstermektedir), eleman sayısının karesine kadar yükseltilebileceği iddia edilmiştir (Y∝N^2) [6]. Bu sayede, sahip olduğu sıra dışı yönlülük ile düşük elemanlar arası mesafenin sağladığı kompakt yapının birleşimi, süper yönlü anten dizilerini (SYAD) kısa sürede akademik literatürün odağı hâline getirmiştir [7–10].

Sahip olduğu sıra dışı yüksek yönlülük karakteristiği önemli bir avantaj sunuyor gibi görünse de, bu diziler aynı zamanda yüksek empedans uyumsuzlukları ve düşük ışınım verimliliği gibi, pratik uygulamaları ciddi biçimde kısıtlayan dezavantajlara da sahiptir. Bu problemlerin ilki ve belki de en önemlisi, elemanlar arası kuplajın anten giriş empedansını doğrudan etkileyerek, elektromanyetik sinyalin taşındığı dalga kılavuzu ile anten elemanı arasında bir empedans uyumsuzluğuna yol açmasıdır. Bu uyumsuzluğun doğal bir sonucu olarak dizinin toplam gerçekleştirilmiş kazanç değeri önemli ölçüde düşmektedir [11]. Mevcut literatür, çoğunlukla mükemmel şekilde uyumlandırılmış anten ve besleme elemanlarını esas aldığı için, yönlülük parametresinin artırılmasını yeterli bir performans kriteri olarak değerlendirmiş ve empedans uyumsuzluğu etkisini göz ardı etmiştir [12]. Varsayımsal olarak yürütülen çalışmalarda sıra dışı yönlülük değerleri elde edilebilmiş olsa da, gerçekleştirilmiş kazanç dikkate alınmadığı için bu dizilerin operasyonel olarak kullanımı mümkün olamamaktadır [13].

Bir diğer önemli sorun ise SYAD'ların, yüksek sayıda anten elemanına ihtiyaç duyan uygulamalara uyarlanmasıdır. Literatürde yüksek gerçekleştirilmiş kazanca odaklanan sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmalar yalnızca birkaç elemandan oluşan dizi konfigürasyonlarını incelemektedir [14], [15]. Ancak eleman sayısının artmasıyla birlikte giderek daha baskın hâle gelen elemanlar arası kuplajın neden olduğu düşük gerçekleştirilmiş kazanç değeri, SYAD'ların 6G ve sonrası gezgin haberleşme sistemlerine uyumluluğunu önemli ölçüde kısıtlamaktadır [10].

SYAD'lara özgü literatürdeki önemli sorunlardan biri diğeri, maksimum ışınım yönünün çoğunlukla uç açılara doğru gerçekleşmesi ve bu ışınımın farklı açılara yönlendirilmesi gerektiğinde klasik faz kaydırıcı devrelerin kullanılması hâlinde, gerçekleştirilmiş kazanç değerlerinde ciddi düşüşler yaşanmasıdır [16–19]. Bu durumun temel nedeni, besleme akımlarının değiştirilmesiyle anten elemanları arasındaki kuplajın da değişmesi ve bunun doğrudan anten giriş empedansını etkilemesidir. Diğer bir deyişle, uç açı yönlerine yönlendirildiğinde yüksek elemanlar arası kuplaj elde edilmekte; ancak ışının farklı açılara yönlendirilmesi için antenlere farklı besleme akımları uygulandığında, değişen anten giriş empedansları nedeniyle empedans uyumsuzluğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ışınımın (yüksek gerçekleştirilmiş kazanç kıstası altında) farklı açılara yönlendirilebilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek amacıyla, karmaşık ve yenilikçi anten konfigürasyonları kullanan yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bu soruna odaklanan sınırlı sayıda çalışma bulunmakta olup, bu çalışmalarda genellikle yama antenler ve çapraz dipoller tercih edilmiştir. Söz konusu konfigürasyonlar sayesinde maksimum ışınım yanal yönde gerçekleştirilebilmiş olsa da, ışının farklı açılara yönlendirilebilmesi halen mümkün olamamıştır [13, 20, 21]. Bu nedenle, ışını farklı açılara da yönlendirebilen SYAD konfigürasyonları, literatürde hâlâ umut vadeden araştırma konularından biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek gerçekleştirilmiş kazanç kısıtlaması altında ışın demetinin yönlendirilebilmesine imkân sağlamak amacıyla parazitik elemanların kullanımı incelenmiştir. İlk olarak, üç elemanlı aktif bir dipol dizisi, elemanlar arası kuplajın yüksek tutulması koşulu altında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Ardından, optimize edilmiş üç elemanlı aktif dizi kullanılarak, parazitik elemanların dizi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Parazitik elemanların yerleştirildiği iki farklı geometrik konfigürasyon ele alınmıştır. İlk konfigürasyon olarak, tüm parazitik elemanların merkezdeki aktif elemana eşit uzaklıkta yer aldığı altıgen şekilli bir yerleşim incelenmiştir. Böylece, tekdüze bir yerleşimin dizinin gerçekleştirilmiş kazancı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İkinci olarak, parazitik elemanların yalnızca -y ekseni üzerinde konumlandığı T şeklindeki bir geometrik konfigürasyon ele alınmış ve her iki yerleşimin ışın yönlendirme üzerindeki avantajları sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen tüm konfigürasyonlar, elektromanyetik analiz yazılımları kullanılarak doğrulanmış ve ışınım karakteristikleri ortaya konulmuştur. Bu analizler sonucunda, parazitik yüklerin kapasitif veya endüktif yüklerle yüklendiğinde ışın demetinin yönlendirilebileceği gösterilmiştir. Böylece, parazitik elemanların aktif elemanlarla birleştirilmesiyle oluşturulan, gelecek nesil haberleşme teknolojilerinin mobilite kısıtlamalarına yanıt verebilecek, yüksek kazançlı ve kompakt yapıya sahip SYAD konfigürasyonları literatüre kazandırılmıştır. Özet olarak bu çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde listelenmektedir:

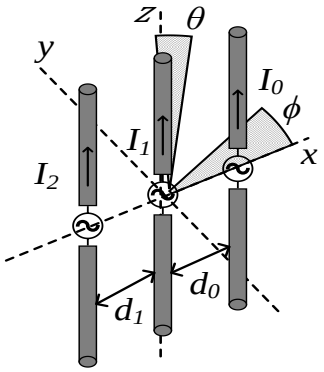
- Bu çalışma, SYAD'larda gerçekleştirilmiş kazancı artırmayı hedefleyen, elemanlar arası kuplajı avantaja dönüştüren optimize edilmiş bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır.
- Literatürde sıklıkla göz ardı edilen toplam verimlilik ve kayıplar dikkate alınarak, üç elemanlı aktif bir dizinin PSO algoritması ile optimize edilmesi sonucu, klasik kuplajsız dizilere kıyasla %30'un üzerinde gerçekleştirilmiş kazanç artışı ve %40'a yakın boyut tasarrufu elde edilmiştir.
- Işının yalnızca uç açılarda yönlendirilebildiği sınırlamayı aşmak amacıyla, parazitik elemanlara dayalı yönlendirme stratejileri geliştirilmiş ve iki farklı (altıgen ve T-şekilli) yapı sistematik olarak karşılaştırılmıştır.
- Gerçekleştirilen analizler sonucunda, T-şekilli konfigürasyon 120° yönünde %91,7 gibi yüksek bir verimliliğe ulaşarak yönlendirme performansında üstünlük sağlarken; altıgen yapı ise %35'ten fazla alan tasarrufu sunarak kompaktlık avantajı sağlamıştır.
- Bu çalışma, reaktif yüklenmiş parazitik elemanlarla SYAD'ların ışın yönlendirme esnekliğini artırarak, dinamik çok kullanıcılı haberleşme uygulamaları için hem performans hem de fiziksel tasarım açısından uygulanabilir yeni bir çerçeve ortaya koymaktadır.

Bu çalışma dört ana başlık altında organize edilmiştir. İkinci bölümde, SYAD'ların teorik altyapısı sunulmuş ve parazitik elemanların dizi

faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üçüncü bölümde, aktif beslemeli üç elemanlı dizinin PSO algoritması ile optimize edilme süreci aktarılmıştır. Dördüncü bölümde ise, parazitik elemanların altıgen ve T şeklinde konumlandırıldığı iki farklı konfigürasyon ele alınmış ve doğrulayıcı analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, sonuç bölümünde elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2. Teorik Arkaplan (Theoretical Background)

Bu bölümde, SYAD'ların teorik arka planı aktarılırken, yapıların sadeliği ve ışınım karakteristiklerinin literatürde iyi bilinmesi nedeniyle dipol anten dizileri kullanılacaktır. l uzunluğunda, ρ yarıçapında, x ekseni boyunca yerleştirilmiş ve $+z$ yönünde uyartılmış bir dipol dizisi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Aktif uyartımlı dipol anten dizisinin geometrik gösterimi
(Geometric representation of the active dipole antenna array)

Her bir aktif dipol elemanı için elektrik alan değeri Eş. 1 ile hesaplanabilmektedir [22].

$$\boldsymbol{E}_n(r,\theta) = -j\eta \boldsymbol{F}(\theta)\frac{e^{-jkr}}{2\pi r} i_n, \tag{1}$$

Burada $\eta \approx 120\pi$ serbest uzay empedansını, i_n antenin karmaşık uyartım akımını ve $k = 2\pi/\lambda$ dalga numarasını göstermektedir. $\lambda = \frac{c}{f}$. ifadesi dalga boyunu, c serbest uzaydaki ışık hızını ve f çalışma frekansını ifade etmektedir. Ayrıca $\boldsymbol{F}(\theta)$ element faktörü olarak adlandırılır ve kolları z eksenine paralel bir dipol için teorik olarak Eş. 2 ile hesaplanmaktadır.

$$\boldsymbol{F}(\theta) = \frac{cos\left(\frac{kl}{2}cos\,\theta\right) - cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{sin(\theta)}\boldsymbol{a_\theta}. \tag{2}$$

Burada $\boldsymbol{a_\theta}$ polar koordinatlardaki birim vektörü ifade eder. Böylece, dizinin toplam elektrik alanı Eş. 3 ile ifade edilebilmektedir.

$$\boldsymbol{E}(r,\theta,\phi) = -j\eta\frac{e^{-jkr}}{2\pi r}\sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk\boldsymbol{r}.\boldsymbol{r}_n}\, i_n \boldsymbol{F}(\theta) \tag{3}$$

Burada $\boldsymbol{r} \triangleq (sin\,\theta\, cos\,\phi\,, sin\,\theta\, sin\,\phi\,, cos\,\theta)^T$, gözlem noktasının pozisyon vektörünü ifade ederken, $\boldsymbol{r_n} \triangleq (nd, 0, 0)$ ifadesi, n'inci elemanın pozisyon vektörünü göstermektedir. Dizinin toplam elektrik alanı ile ışınım şiddeti arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, toplam elektrik alan ifadesi bilinen bir dizinin ışınım şiddeti Eş. 4 ile hesaplanabilir [23].

$$\boldsymbol{U}(\theta,\phi) = \frac{r^2}{2\eta}|\boldsymbol{E}(r,\theta,\phi)|^2$$

$$= \frac{\eta}{8\pi^2}||\boldsymbol{F}(\theta)|^2|\mathbf{a}^H(\theta,\phi)\cdot\mathbf{i}|^2, \tag{4}$$

Burada $\mathbf{a}(\theta,\phi) = \left[e^{-jk\boldsymbol{r}.\boldsymbol{r}0},\ldots,e^{-jk\boldsymbol{r}.\boldsymbol{r}\boldsymbol{n}}\right]^T \in C^{NX1}$ dizi yonelim vektorunu $\mathbf{i} = [i_0,\ldots,i_n]^T \in C^{NX1}$ ifadesi ise dizinin uyartım akımlarını göstermektedir. Toplam ışınım gücü P_{yay}, ışınım şiddetinin tüm katı açı (steradyan) üzerinde integrali alınarak Eş. 5 ile hesaplanabilir [25].

$$P_{yay} = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\boldsymbol{U}(\theta)\sin\theta\, d\theta\, d\phi$$
$$= \frac{\eta}{8\pi^2}\mathbf{i}^H\underbrace{\left[\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\mathbf{a}(\theta)\mathbf{a}^H(\theta)|F(\theta)|^2\sin\theta\; d\theta\, d\phi\right]}_{R\{\mathbf{Z}\}'}\mathbf{i}$$
$$= \frac{1}{2}\mathbf{i}^H R\{\mathbf{Z}\}'\mathbf{i}. \tag{5}$$

Burada $R\{.\}$ ifadesi, ilgili büyüklüğün reel (gerçel) kısmını göstermektedir. $\{\mathbf{Z}\}' \in C^{N\times N}$ kayıpsız dipollerden oluşan dizinin empedans matrisini ifade etmektedir. Empedans matrisi daha ayrıntılı incelendiğinde, kare yapıda olan bu matrisin $m = n$ olan diyagonal elemanları öz empedans, $m \neq n$ olan diyagonal dışı elemanları ise karşılıklı empedans olarak adlandırılır. Empedans matrisi, rastgele geometrilere sahip anten yapıları için Momentler Yöntemi (Method of Moments) veya Sonlu Farklar Yöntemi gibi sayısal yöntemlerle yüksek hassasiyetle belirlenebilmektedir. Ancak kapalı formda ışınım denklemleri türetilmiş olan kayıpsız dipoller söz konusu olduğunda, empedans matrisi ilgili nümerik integrallerin hesaplanmasıyla da elde edilebilir [24]. Öte yandan, pratik uygulamalarda metal kayıplarının göz önünde bulundurulması oldukça kritik bir unsurdur. Akım taşıyan bir metal telin sahip olduğu kayıp direnci ise Eş. 6 ile hesaplanmaktadır [25].

$$R_K = \overline{R_K}\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}}\left|\frac{I_n(x')}{i_n(0)}\right| dx' = \frac{1}{4k\rho}\sqrt{\frac{f\mu}{\pi\sigma_c}}\frac{kl - sin(kl)}{sin^2\left(\frac{kl}{2}\right)} \tag{6}$$

Burada $\rho = \lambda/500$, dipollerin yarıçapını; $\mu = 4\pi 10^{-7}$ H/m serbest uzayın manyetik geçirgenliğini; $\sigma_c = (5{,}8)10^7\, S/m$ ise bakırın iletkenliğini ifade etmektedir. Böylece, iletken üzerinde ısıya dönüşen güç Eş. 7 ile ifade edilmektedir.

$$P_K = \frac{1}{2}R_K\|\boldsymbol{i}\|^2 = \frac{1}{2}\boldsymbol{i}^H.R_K.\boldsymbol{i} \tag{7}$$

Böylece, anten dizisi tarafından harcanan toplam güç; ışınım gücü ile kayıp gücün toplamı şeklinde Eş. 8 ile ifade edilir.

$$P_{giris} = P_K + P_{yay} = \frac{1}{2}\boldsymbol{i}^H.R_K\boldsymbol{i} + \frac{1}{2}\boldsymbol{i}^H.R\{\boldsymbol{Z}\}'.\boldsymbol{i}$$
$$= \frac{1}{2}\boldsymbol{i}^H.R\{\boldsymbol{Z}\}.\boldsymbol{i} \tag{8}$$

Burada R_S öz empedansı ve R_m karşılıklı empedansı göstermek üzere Eş. 9 olarak ifade edilir.

$$R\{\mathbf{Z}\} = \begin{bmatrix} R_s + R_K & R_m \\ R_m & R_s + R_K \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N\times N} \tag{9}$$

Böylece anten dizisinin kazancı ışınım şiddeti ve giriş gücü cinsinden Eş. 10 ile ifade edilebilir.

$$G(\theta,\phi) = 4\pi\frac{U(\theta,\phi)}{P_{giris}} = \frac{G_d(\theta,\phi)(R_K+R_S)|\boldsymbol{a}^H(\theta).\boldsymbol{i}|^2}{\boldsymbol{i}^H.R\{\boldsymbol{Z}\}.\boldsymbol{i}} \tag{10}$$

Burada her bir dipolun kazancını ifade etmektedir (Eş. 11).

$$G_d(\theta,\phi) = \frac{\eta}{\pi(R_K+R_s)}\|\mathbf{F}(\theta,\phi)\|^2 \tag{11}$$

Bu ifadenin önemi, özellikle SYDAlar açısından kritik olan genelleştirilmiş Rayleigh oranıyla ilişkisinden kaynaklanmaktadır. Bu oran, anten dizilerinin performansını değerlendirme ve yönlendirme açısından önemli ipuçları sağlar. Literatürdeki mevcut çalışmaların çoğu, belirli giriş gücü kısıtlamasına uygun şekilde ($P_{giris} \leq P_toplam$), alınan gücü maksimum kılacak optimum akım dağılımlarının bulunmasına odaklanmaktadır [17]. Söz konusu optimum besleme akımları Eş. 12'deki kapalı form ifade ile hesaplanabilmektedir.

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{P_{in}}{\mathbf{a}^H(\theta)R\{\mathbf{Z}\}^{-1}\mathbf{a}(\theta)}}R\{\mathbf{Z}\}^{-1}\mathbf{a}(\theta) \quad (12)$$

Eş. 12, Eş. 10'da yerine yazılırsa maksimum dizi kazancı Eş. 13'teki gibi elde edilir.

$$G(\theta,\phi)_{maks} = G_d(\theta,\phi)(R_K + R_s)\mathbf{a}^H(\theta)R\{\mathbf{Z}\}^{-1}\mathbf{a}(\theta) \quad (13)$$

3. Aktif/Pasif Dipol Anten Dizisi Optimizasyonu
(Optimization of Active/Passive Dipole Antenna Array)

Bu bölümde ilk olarak üç elemanlı aktif dipol dizisinin uyartım akımları, uzunlukları ve elemanların x ekseni üzerindeki konumları PSO algoritması kullanılarak yüksek gerçekleştirilmiş kazanç ve düşük yan kulakçık seviyesi (YKS) kısıtlamaları altında optimize edilmiştir. PSO algoritmasının parametreleri olarak sürü büyüklüğü (SB) 150, daraltma faktörü (κ) 1 olarak seçilmiş, bilişsel katsayı (c_1) ve sosyal katsayı (c_2) değerleri 2,05 olarak alınmıştır. Böylece toplam ivmelenme katsayısı ($\phi = c_1 + c_2$) 4,1 olmakta ve daraltma katsayısı ($\chi = \frac{2\kappa}{\left|2-\phi-\sqrt{\phi^2-4\phi}\right|}$) yaklaşık 0,7298 olarak hesaplanmaktadır. Maliyet fonksiyonu ise Eş. 14'teki gibi seçilmiştir.

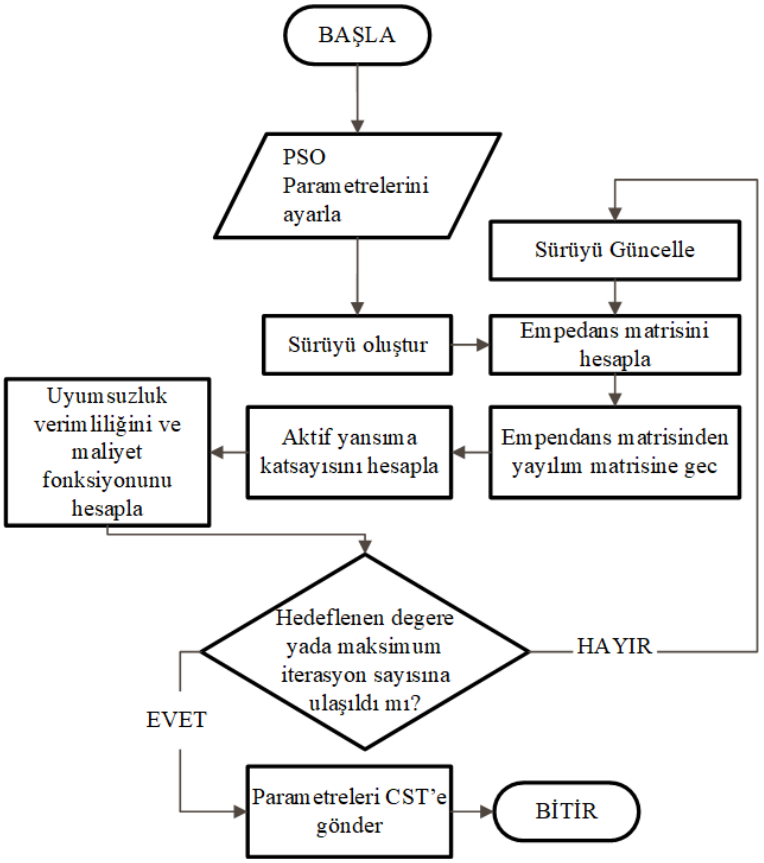
$$F_M = H(\Delta|_G)\Delta|_G \quad (14)$$

Burada $H(\,)$ Heaviside adım fonksiyonunu, $\Delta|_G$ hedeflenen ile hesaplanan gerçekleştirilen kazanç değerleri arasındaki mutlak farkını ifade etmektedir. Aktif dizinin hedeflenen kazanç değeri olarak 7,95 dBi seçilmiştir. Bu deger ortak kuplajın ihmal edildigi üç elemanlı bir diziden yaklaşik %40 daha fazladır.

Optimizasyon süreci Şekil 2'de verilen akış diyagramıyla gösterilmiştir. Algoritma, başlangıçta önceden belirlenmiş optimizasyon parametreleri (κ, c_1, c_2 ve iterasyon sayısı) ile rastgele atanan akım, uzunluk ve mesafe gibi tasarım değerleriyle başlar. Popülasyondaki her birey için giriş empedans matrisi [11]'de belirtildiği şekilde hesaplanır. Ardından, saçılma matrisini elde etmek için [23]'te gösterilen dönüşüm formülleri uygulanır. Daha sonra, saçılma matrisi kullanılarak, eşzamanlı uyarım durumundaki birleşik aktif eleman yansıma katsayısı Eş. 15'teki gibi hesaplanır [24]:

$$\Gamma_{ac} = \frac{1}{I_n}\sum_{n,m}\Gamma_{nm}I_m \quad (15)$$

Burada Γ_{ac} aktif geri yansıma katsayısını göstermektedir. Aktif yansıma katsayısının hesaplanmasının ardından uyumsuzluk verimliliği hesaplanarak $G_{GK} = (1 - |\Gamma_{ac}|^2)G$ ifadesiyle gerçekleştirilmiş kazanç hesaplanır.



Şekil 2. Üç elemanlı aktif dizi optimizasyon algoritmasının akış diyagramı
(Flowchart of the three-element active array optimization algorithm)

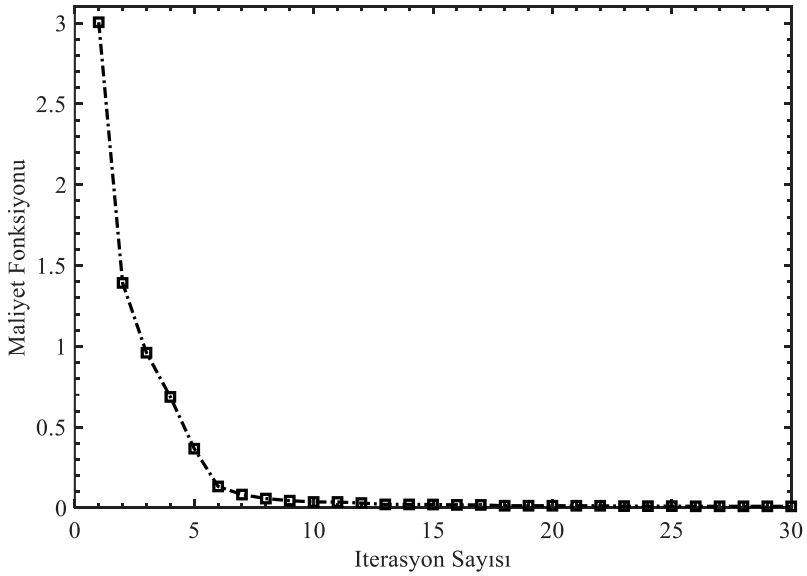
Şekil 3'teki maliyet yakınsama grafiğinden görüldüğü üzere, algoritma başlangıçta 3,1 değerinde bir ortalama karesel hata (MSE) ile başlamış olup bu değer yaklaşık olarak 4,96 dB'lik bir gerçekleştirilmiş kazanca karşılık gelmektedir. Şekil 3'de bu görünümde iterasyon sayısı 30 ile sınırlandırılmıştır. Daha sonra hedeflenen gerçekleştirilmiş kazanç, 46. iterasyon boyunca optimal değerlerin titizlikle korunmasıyla başarıyla elde edilmiştir.

Optimizasyon sonucunda elde edilen anten uyarım genlikleri, fazları, uzunlukları ve pozisyonları Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan görülebileceği üzere, antenlerin uyarım genlikleri arasındaki maksimum fark yaklaşık 0,27, faz farkı ise yaklaşık 218,65°'dir. Antenlerin konumları incelendiğinde, ardışık antenler arasındaki mesafenin 9,0 mm ($0{,}3\lambda$), olduğu görülmektedir. Böylece tekdüze dağılımlı bir dizi elde edilmiştir. Ayrıca toplam dizi uzunluğu yaklaşık 18,00 mm olup, antenlerin yarım dalgaboyu ($0{,}5\lambda$) aralıklarla sıralandığı geleneksel, ortak kuplajin ihmal edildigi bir dizilimle karşılaştırıldığında yaklaşık %40'lik bir alan tasarrufu sağlanmıştır.

Optimize edilen dizi birimlerinin gerçekleştirilmiş kazancı öncelikle MATLAB ortamında simüle edilmiş, sonuçlar CST ile doğrulanmıştır. Şekil 4'te görülen küçük farklılıklar ise, MATLAB'ın aksine CST'nin daha gerçekçi olan Moment Yöntemi (MoM) ya da Sonlu Farklar Zaman Alanı (FDTD) yöntemlerini kullanmasından kaynaklanmaktadır. Bu yöntemler yüzey kaçak akımları, kenar etkileri ve yüzey etkisi gibi kayıpları da hesaba katabilmektedir.

4. Parazitik Elemanların Reaktif/Kapasitif Yuklerinin Optimizasyonu
(Optimization of Reactive/Capacitive Loads of Parasitic Elements)

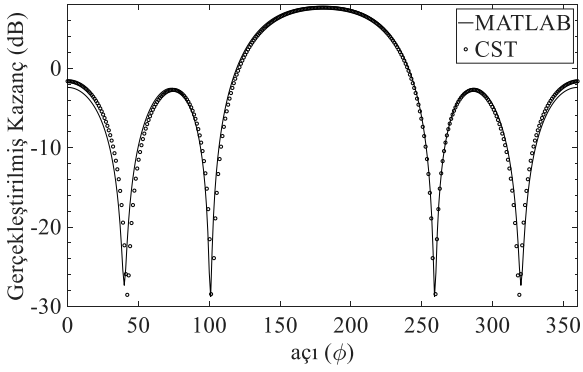
Bu bölümde parazitik elemanların SYAD'nın ışın yönlendirme uygulamalarindaki etkileri iki farkli geometrik konfigürasyon ele alınarak incelenmiştir. Daha önce de aktarıldığı üzere SYADların maksimum ışıması uç açı yönündedir ve diğer tüm açılarda ortak kuplajdan dolayı ışıma verimlilikleri ciddi seviyelere düşmektedir. Bu nedenle aktif / pasif antenlerin kombinasyonlarına dayanan yenilikçi



Şekil 3. Maliyet fonksiyonunun yakınsama grafiği (Convergence graph of the cost function. In this view)

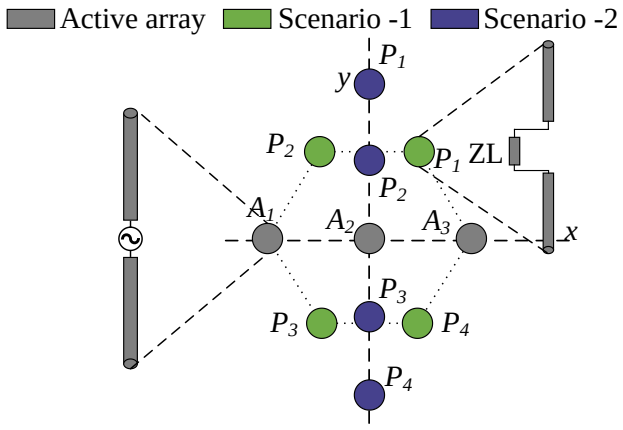
Tablo 1. Üç elemanlı aktif dizinin optimizasyon sonucu elde edilen tasarım parametreleri
(Design parameters obtained through optimization for the three-element active array)

Sıra	Genlik	Faz (∘)	Pozisyon (mm)	Uzunluk (λ)
1	0,91	77,64	-9	0,45
2	1	-141,01	0	0,45
3	0,73	0	9	0,49



Şekil 4. Optimizasyon sonucu elde edilen gerçekleştirilmiş kazanç grafiginin analitik ve tam dalga çözücü sonuçlarının gösterimi
(Presentation of the realized gain graph obtained from the optimization, comparing the analytical results with those from the full-wave solver)

yapıların kullanımının ışın yönlendirme performansına olan etkilerinin incelenmesi oldukça önemlidir. Bu bağlamda bölüm 3'te optimize edilen aktif anten dizisi ele alınmış olup bu dizi ile birlikte iki adet parazitik dizi geometrisi optimize edilmiştir. Senaryoların geometrik gösterimi Şekil 5'te görülebilmektedir.



Şekil 5. Parazitik dipollerin konumlandırılmasının gösterimi
(Illustration of the positioning of the parasitic dipoles)

Senaryo-1'de parazitik anten dizi bir altıgen yapı oluşturacak şekilde aktif anten dizisinin etrafına yerleştirilmiştir. Tüm parazitik elemanların merkezdeki aktif elemana olan uzaklığı $0{,}3\lambda$ seçilmiş olup ardışık elemanlar arası mesafede yine aynı değer seçilerek altıgen yapı elde edilmiştir. Senaryo-2 de ise tüm parazitik elemanlar $x = 0$ ekseni uzerinde ve yine ardışık elemanlar arası mesafenin $0{,}3\lambda$ seçildiği geometri ele alınmıştır. Böylece, dairesel ve dikdörtgensel iki farklı geometrinin performans parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve gelecekteki çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır. Her iki senaryoda da parazitik dipollere indüktif ve kapasitif yükler bağlanmıştır. Bu yükler, Bölüm 3'te detaylandırılan PSO algoritması kullanılarak optimize edilmiş ve yüksek hassasiyet gerektiren anten besleme devreleri yerine, daha basit ve yüksek frekans gerektirmeyen empedans devrelerinin kullanılabilirliği hedeflenmiştir.

Her senaryo için üç farklı açı değeri $\phi = \{60{,}120{,}180\}$ için optimizasyon algoritması çalıştırılmıştır. Elde edilen gerçekleştirilmiş kazanç değerleri, tam dalga elektromanyetik analiz programı olan CST kullanılarak doğrulanmıştır. MATLAB ve CST ile elde edilen kazanç örüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da, Senaryo 1 için sırasıyla 60°, 120° ve 180° yönlerine yönlendirme sonucu elde edilen ışıma örüntüleri (a)–(c)'de; Senaryo 2 için aynı yönlerde elde edilen sonuçlar ise (d)–(f)'de gösterilmektedir. Her iki geometrik yapı için elde edilen kazanç grafikleri, tam dalga çözücü ile elde edilen sonuçlarla yüksek düzeyde uyum içerisindedir. Hedeflenen açı değerlerindeki farklar oldukça düşük seviyelerde olmasına rağmen, bazı açılarda gözlenen uyumsuzluğun temel nedeni, CST analizlerinin saçak saçılmalarını ve rezistif kayıpları da içeren daha gerçekçi bir modele dayanmasıdır.

Senaryo-1 ve Senaryo-2 için 60°, 120° ve 180° yönlerinde optimize edilen aktif anten dizisinin akımları (A1, A2, A3) ve parazitik elemanların yükleri (P1, P2, P3, P4) Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Senaryo-1 ve Senaryo-2 karşılaştırıldığında;

60° yönünde: Senaryo-1'de aktif akımların genlikleri sırasıyla 1, 0,8 ve 0,93 olarak belirlenmişken, Senaryo-2'de bu değerler 0,8, 1 ve 0,9 şeklindedir. Senaryo-1'de tüm parazitik yükler kapasitif (negatif reaktif) özellik gösterirken, Senaryo-2'de ilk parazitik yük belirgin biçimde indüktif karakterlidir (j3000 Ω). Bu açı yönünde Senaryo-2, 9,0 dBi gerçekleştirilmiş kazanç ve %90,8 toplam verimlilik ile, Senaryo-1'e kıyasla (8,8 dBi kazanç, %77,9 verimlilik) üstün performans sunmuştur.

120° yönünde: Senaryo-1 için akım genlikleri 1, 0,7 ve 0,85 iken; Senaryo-2'de bu değerler 0,3, 1 ve 0,8 olarak elde edilmiştir. Yük profili açısından, Senaryo-1 tamamen kapasitif yüklerden oluşurken, Senaryo-2'de üç yük kapasitif, bir yük ise indüktiftir (j63,5 Ω). Bu durumda da Senaryo-2, 9,1 dBi gerçekleştirilmiş kazancı ve %91,7 verimliliğiyle, Senaryo-1'e (8,8 dBi, %77,9) göre daha iyi bir performans sergilemiştir.

180° yönünde: Senaryo-1'de anten akım genlikleri sırasıyla 0,5, 1 ve 0,77 olarak hesaplanırken, Senaryo-2'de bu değerler 0,5, 1 ve 0,4'tür. Yük karakteristikleri açısından, Senaryo-1'de iki yük kapasitif, diğer ikisi ise oldukça yüksek reaktif değerlere sahiptir (örneğin j560,8 Ω). Senaryo-2'de ise -j2182 Ω ve -j1385 Ω gibi yüksek kapasitif ve daha düşük indüktif yük değerleri gözlemlenmiştir. Bu yön için Senaryo-2, Senaryo-1'e göre daha düşük bir kazanç değeri sergilese de (7,47 dBi vs. 7,7 dBi), toplam verimlilik açısından (%79,0 vs. %68,7) daha avantajlıdır.

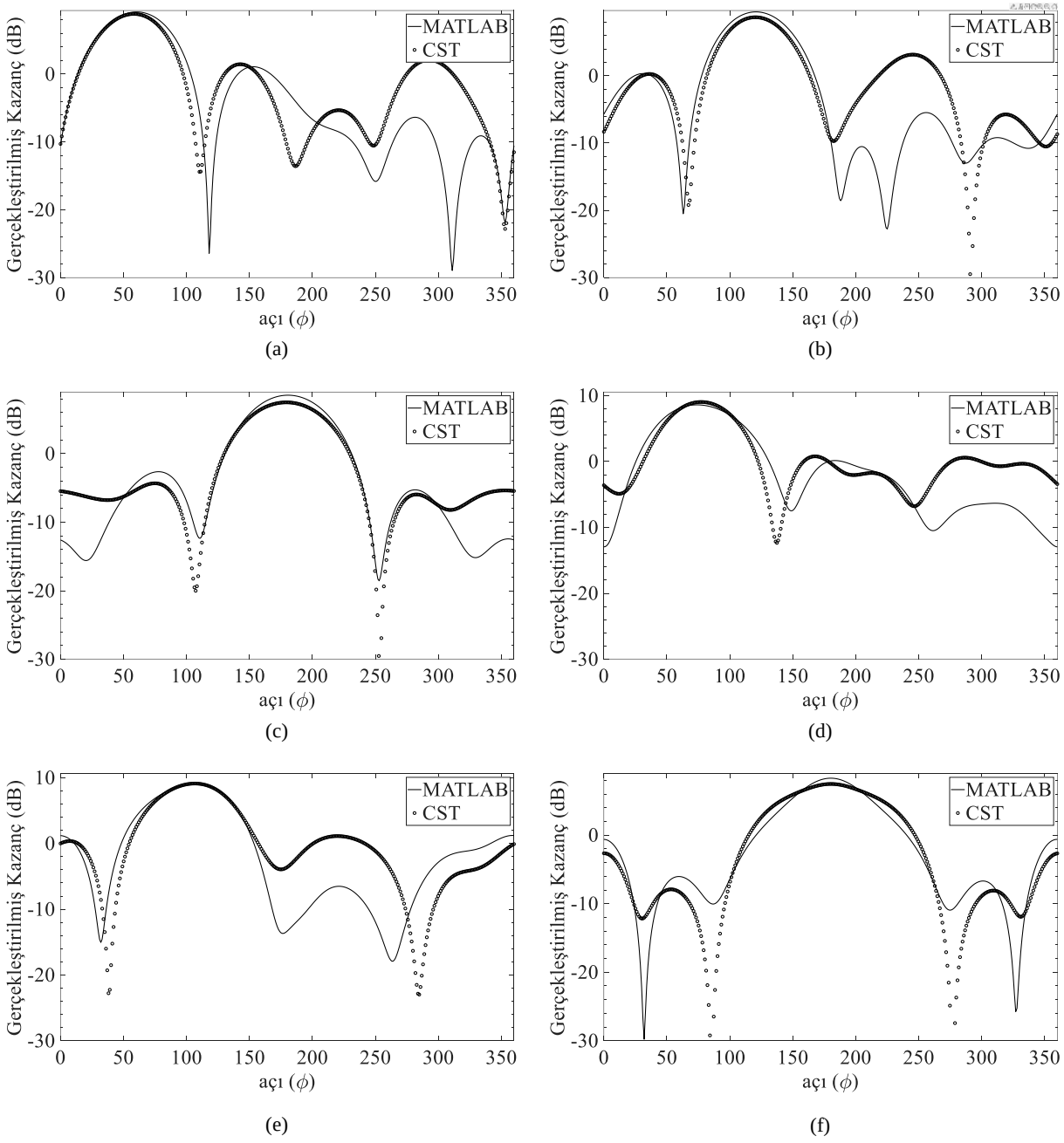
Senaryo-2, özellikle toplam verimlilik açısından her üç yön için de daha yüksek sonuçlar sunmuş ve çoğu durumda daha iyi gerçekleştirilmiş kazanç değerleri elde edilmiştir. Bu durum, parazitik yüklerin konumlandırılması ve karakteristiğinin ışın yönlendirme ve verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, fiziksel yerleşim açısından değerlendirildiğinde, altıgen geometriye sahip Senaryo-1, 10 GHz frekansında 210,44 mm²'lik bir alan kaplarken; T şekilli geometriye sahip Senaryo-2'yi kapsayan en küçük dikdörtgenin alanı 324 mm² olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda, Senaryo-1'in yaklaşık %35,04 oranında alan tasarrufu sağladığı görülmektedir. Bu sonuç, kompakt tasarım gerektiren yüksek frekanslı uygulamalarda altıgen yapının ciddi bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada, elemanlar arası ortak kuplajdan faydalanmak suretiyle anten dizi kazancının artırılmasını hedefleyen SYAD'ların pratik uygulamalardaki en önemli kısıtlayıcı unsurlarından biri olan düşük gerçekleştirilmiş kazanç problemi ele alınmıştır. Literatürde sunulan kapalı form ifadelerin çoğunlukla yalnızca yönlülüğü artırmayı hedeflediği, bu nedenle gerçekleştirilmiş kazanç dikkate alındığında mevcut formüllerin yeterli olmadığı vurgulanmıştır.

Yüksek gerçekleştirilmiş kazanç değerine ulaşmanın, çoklu parametre optimizasyonu ile mümkün olabileceği ileri sürülmüş; bu kapsamda, hem eleman besleme akımlarının hem de konumlarının optimize edilmesiyle daha verimli dizi yapıları elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, gerçekleştirilmiş kazancın yükseltilmesine odaklanan PSO tabanlı bir algoritma geliştirilmiş ve üç elemanlı aktif bir dipol dizisinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen yapı, klasik kuplajsız bir diziye kıyasla yaklaşık %30,5 oranında daha yüksek gerçekleştirilmiş kazanç sunarken, yarım dalga boyu aralıklı klasik dizilere göre yaklaşık %40 oranında boyut tasarrufu sağlamıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, SYAD literatüründeki bir diğer temel sorun olan ışınımın yalnızca uç açılarda maksimum değer alması problemine yönelik çözümler geliştirilmiştir. Bu bağlamda, parazitik elemanların kullanımı incelenmiş ve iki farklı geometrik yapı tasarlanarak karşılaştırılmıştır. İlk olarak, merkezde elemanlar arası mesafenin optimize edildiği ve parazitik elemanların altıgen bir yapı oluşturacak şekilde simetrik olarak yerleştirildiği bir geometri analiz edilmiştir.



Şekil 6. Optimizasyon sonucunda her iki senaryo için elde edilen ışınım örüntüleri
(The radiation patterns obtained for both scenarios after optimization

Tablo 2. Senaryo-1 (Snr-1) ve Senaryo-2 (Snr-2) için optimizasyon sonucu elde edilen tasarım parametreleri ve tam dalga çözüsünde elde edilen gerçekleştirilmiş kazanç (G. K.) ve toplam verimlilik (T. ver) değerleri
(Design parameters obtained through optimization for Scenario-1 (Snr-1) and Scenario-2 (Snr-2), along with the realized gain (RG) and total efficiency (TE) values extracted from the full-wave analysis)

Konf.	(ϕ)	Akımlar $\lvert I\rvert\angle^\circ$			Yükler (Ω)				G. K dBi	T.ver. %
		A1	A2	A3	P1	P2	P3	P4		
	60	1∠109,2°	0,8∠55,9°	0,93∠0°	-j152,3	-j120,1	-j19,9	-j9,7	8,8	77,9
Snr-1	120	1∠107,2°	0,7∠-176,3°	0,85∠80,8°	-j93,5	-j172,5	-j33,0	-j8,3	8,7	77,9
	180	0,5∠55,5°	1∠-132,9°	0,77∠0°	-j648,3	-j128,3	-j99,5	j560,8	7,7	68,7
	60	0,8∠-168,7°	1∠134,3°	0,9∠117,7°	j3000	-j249,6	-j72,0	-j24,2	9,0	90,8
Snr-2	120	0,3∠134,5°	1∠-161,1	0,8∠-93,4°	-j199,5	-j134,0	-j20,4	j63,5	9,1	91,7
	180	0,5∠-100°	1∠12,0°	0,4∠129,6°	j8,2	-j2182	-j1385	j4,84	7,47	79,0

Bu simetrik yapı sayesinde ortak kuplajın etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. İkinci senaryoda ise parazitik elemanlar, x ekseni üzerinde konumlandırılmış ve T şeklindeki bir yerleşimle ışın yönlendirme performansı incelenmiştir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, her iki geometrinin ışın yönlendirme açısından benzer örüntüler sunduğu gözlemlenmiş; ancak gerçekleştirilmiş kazanç açısından T şekilli ikinci senaryo, özellikle 120° yönünde %91'lik bir verimliliğe ulaşarak daha başarılı olmuştur. Öte yandan, fiziksel yerleşim açısından değerlendirildiğinde, altıgen geometriye sahip birinci senaryo 10 GHz'de 210,44 mm²'lik bir alan kaplarken, T şekilli geometriye sahip ikinci senaryoyu içine alabilecek en küçük dikdörtgensel alan 324 mm² olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda birinci senaryonun yaklaşık %35,04 oranında alan tasarrufu sağladığı görülmektedir.

Bu bilgiler ışığında, parazitik elemanların reaktif yüklerle donatılarak SYAD'lara entegre edilmesi sayesinde, ışın demetinin yalnızca belirli açılarda maksimum kazanç sunması gibi önemli bir sınırlamaya yenilikçi bir çözüm getirilebileceği ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, ayarlanabilir pasif devre elemanları ve aktif bileşenler içeren parazitik dipollerden oluşan yapıların, yüksek yönlülüğe sahip ve dinamik ışın yönlendirmenin vazgeçilmez olduğu çok kullanıcılı haberleşme senaryoları gibi uygulamalar için oldukça elverişli olduğu değerlendirilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2219 Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında (Proje No: 1059B192400225) desteklenmiştir. Yazarın araştırma faaliyetleri TÜBİTAK 3501 Kariyer Geliştirme Programı tarafından da desteklenmektedir. Ayrıca bu çalışmanın geliştirilmesine sağladıkları değerli katkılar ve yapıcı değerlendirmeler için Prof. Dr. Okan Yurduseven ve Michalis Matthaiou'ya teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Kanbaz İ., Yurduseven O., Matthaiou M., Optimization of superdirective linear arrays with differential evolution for high realized gain, 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2024), Glasgow, United Kingdom, 17-22 Mart, 2024.
2. Wang L., Wong K.-K., Jin S., Zheng G., Heath R.W., A New Look at Physical Layer Security, Caching, and Wireless Energy Harvesting for Heterogeneous Ultra-Dense Networks, IEEE Communications Magazine, 56 (6), 49-55, 2018.
3. Lou S., Qian S., Lian S., Wang W., Bao H., Leng G., Analysis of High-Order Mutual Coupling Effect of Antenna Arrays Based on Infinitesimal Dipole Model, IEEE Trans. Antennas Propag., 73 (6), 3628-3638, 2025.
4. Çiydem M., Design Of High Gain Array Antenna For Gsm1800 and Umts Base Stations, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (4), 751-757 2014.
5. Uzkov A., An approach to the problem of optimum directive antenna design, Comptes Rendus (Doklady) de l'Académie des Sciences de l'URSS, 53 (1), 35-38, 1946.
6. Harrington R., On the gain and beamwidth of directional antennas, IRE Trans. Antennas Propag., 6 (3), 219-225, 1958.
7. Tornese A., Clemente A., Delaveaud C., Maximum Gain of an Electrically Small Cosines-Dipole-Based End-Fire Array, 2023 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), Aalborg, Denmark, 1-4, 2023.
8. Hazdra P., Kracek J., Lonsky T., On end-fire super directivity of arrays of two elementary dipoles and isotropic radiators, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 13 (14), 2405-2411, 2019.
9. Clemente A., Pigeon M., Rudant L., Delaveaud C., Design of a Super Directive Four-Element Compact Antenna Array Using Spherical Wave Expansion, IEEE Trans. Antennas Propag., 63 (11), 4715-4722, 2015.
10. Kanbaz İ., Yurduseven O., Matthaiou M., Super-directive antenna arrays: How many elements do we need?, 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Dubai, United Arab Emirates,1-6, 21-24 April, 2024.
11. Orfanidis S.J., Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, New Brunswick, 2016.
12. Yaghjian A.D., O'Donnell T.H., Altshuler E.E., Best S.R., Electrically small supergain end-fire arrays, Radio Science, 43 (3), 1-13, 2008.
13. Haskou A., Sharaiha A., Collardey S., Design of small parasitic loaded superdirective end-fire antenna arrays, IEEE Trans. Antennas Propag., 63 (12), 5456-5464, 2015
14. Lynch D.P., Tentzeris M.M., Fusco V., Asimonis S.D., Super Realized Gain Antenna Array, IEEE Trans. Antennas Propag., 72 (9), 7030-7040, 2024.
15. Souai S., Diallo A., Ribero J.-M., Aguili T., Design of a beam-switchable superdirective dipole for IoT gateway, Prog. Electromagn. Res. M, 93, 99-108, 2020.
16. Shamonina E., Maximum directivity of arbitrary dipole arrays, IET Microw. Antennas Propag., 9 (2), 101-107, 2015.
17. Ivrlač M.T., Nossek J.A., Toward a circuit theory of communication, IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, 57 (7), 1663-1683, 2010.
18. Ji R., Huang C., Chen X., Sha W.E.I., Dai L., He J., Zhang Z., Yuen C., Debbah M., Electromagnetic Hybrid Beamforming for Holographic MIMO Communications, IEEE Trans. Wireless Commun., 23 (11), 15973-15986, 2024.
19. Hamza A., Sheikh S.I.M., Attia H., Efficient Design of Super-Directive Antenna Array Using Schelkunoff Method and Genetic Algorithm, IEEE Can. J. Electr. Comput. Eng., 47 (4), 168-174, 2024.
20. Ziolkowski R.W., Superdirective circular arrays of electric and Huygens dipole elements, Electromagnetic Science, 2 (1), 1-25, 2024.
21. Shi T., Tang M.C., Chai R., Ziolkowski R.W., Multipole based electrically small unidirectional antenna with exceptionally high realized gain, IEEE Trans. Antennas Propag., 70 (7), 5288-5301, 2022.
22. Pozar D.M., Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Hoboken, 2012.
23. Balanis C., Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley, 3. Baskı Hoboken, 2016.
24. Manteghi M., Rahmat-Samii Y., Multiport characteristics of a wide-band cavity backed annular patch antenna for multipolarization operations, IEEE Trans. Antennas Propag., 53 (1), 466-474, 2005.
25. Dovelos K., Assimonis S.D., Ngo H.Q., Matthaiou M., Superdirective antenna pairs for energy-efficient terahertz massive MIMO, IEEE Transactions on Communications, 71 (12), 7316-7332, 2023.