

Multi-Objective Optimization Algorithm Development Using Chaotic Maps to Design a Planar Microstrip Monopole Antenna

Vahid Hosseini^{1,2}  | Yousef Farhang^{3,4*}  | Kambiz Majidzadeh⁵  | Changiz Ghobadi⁶ 

¹Computer Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran.

²Department of Computer Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.
v.hosseini1@pnu.ac.ir

³Faculty of Engineering and Architecture, Department of Computer Engineering, Istanbul Esenyurt University, Turkey.

⁴Department of Computer Engineering, Khoy Branch, Islamic Azad University, Khoy, Iran.
youseffarhang@esenyurt.edu.tr

⁵Computer Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran.
dr.kambiz.majidzadeh@gmail.com

⁶Department of Electrical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran,
ch.ghobadi@urmia.ac.ir

Correspondence

Yousef Farhang, Assistant Professor of Computer Engineering, Istanbul Esenyurt University, Turkey.
youseffarhang@esenyurt.edu.tr

Main Subjects:
Microstrip Antenna Design

Paper History:
Received: 6 May 2023
Revised: 18 June 2023
Accepted: 1 July 2023

Abstract

This research uses a new multi-objective optimization algorithm to design a single pole antenna with specific electromagnetic characteristics. This algorithm uses a hybrid chaotic function to integrate the customized mutated particle swarm algorithm with the modified genetic algorithm. By avoiding getting trapped in local minima, the new hybrid approach achieves desired results faster than conventional particle swarm algorithms and genetic algorithms. The performance of the proposed meta-heuristic algorithm has been successfully simulated and stabilized using benchmark functions such as Rastrigin's function, Ackley's function, Rosenbrock's function, and Booth's function. Finally, the validity of the presented approach for electromagnetic applications is demonstrated by optimizing a planar microstrip monopole antenna with a simple structure. The proposed algorithm allows the optimization criteria to be customized to achieve the predetermined results for return loss and resonance frequency. The optimization algorithm developed in MATLAB is used to determine the necessary parameter settings in order to achieve the expected frequency bands using custom mutated particle swarm algorithm or heuristic modified genetics. The dimensions of the proposed antenna elements significantly affect the antenna performance.

Keywords: Optimization Algorithm, Chaotic Map, Monopole Antenna, PSO and GA.

Highlights

- Integrating metaheuristic algorithms using chaotic maps to overcome challenges in algorithm combination.
- Enhancement of the classical Genetic Algorithm for improved performance.
- Development of a multi-objective hybrid optimization algorithm with superior performance.

Citation: V. Hosseini, Y. Farhang, K. Majidzadeh, and Ch. Ghobadi, "Multi-Objective Optimization Algorithm Development using Chaotic Maps to Design of a Planar Microstrip Monopole Antenna," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 121–142, 2025, doi:10.30495/jce.2023.1985366.1202 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



1. Introduction

The design of engineering systems has always faced a significant challenge: optimization, a critical aspect of any system. However, traditional trial-and-error approaches are often inaccurate and unsuitable for complex systems with numerous design parameters. To address this limitation, researchers have developed program-based optimization algorithms that enable precise optimization of sensitive and complex engineering systems. Telecommunication systems, a common type of engineering system, play a vital role in people's daily lives, work, and social interactions. Antennas are a crucial component of modern telecommunication systems, and optimizing their parameters is essential to achieve optimal performance.

There are two primary methods for optimization: deterministic and metaheuristic approaches. Deterministic methods, such as quadratic programming, the simplex method, the gradient method, and Newton's method, are widely used for optimization. However, these methods have notable drawbacks, including susceptibility to local optima, long computation times for complex problems, and the need for a valid starting point [1]. In contrast, metaheuristic approaches are probabilistic optimization algorithms that adapt to a wide range of problems without requiring significant changes to their structure. This adaptability is a key advantage of metaheuristic methods.

Since the early 1970s, various probabilistic optimization approaches have been introduced [2, 3]. Many of these methods are inspired by natural laws and biological processes. Among the most popular metaheuristic techniques are Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), and Ant Colony Optimization (ACO). As reported in [4–6], these algorithms have been extensively used to solve electromagnetic problems, demonstrating their efficiency and flexibility in addressing complex challenges.

Nature-inspired optimization algorithms often rely on complex mechanisms or operators that mimic natural processes. These algorithms do not require prior knowledge of the cost function to achieve general convergence [24, 25]. Instead, their intrinsic parameters are typically defined randomly. These features, along with their proven success in electromagnetic applications, make metaheuristic algorithms ideal candidates for general optimization in electromagnetic systems and antenna design [7]. In fact, algorithm-based optimization methods have gained significant attention due to their high speed and accuracy.

Printed antennas have become increasingly popular due to their lightweight structure, low cost, and ease of integration with other microwave components [8–10]. One of the most significant challenges in antenna design is selecting the optimal physical parameters to achieve desired performance. Numerous studies have been published on the optimization of engineering systems, particularly wireless and telecommunication systems, and antenna design [11–15]. Metaheuristic algorithms are widely used in these applications due to their high efficiency, ease of implementation, and versatility in designing and simulating electromagnetic systems.

For example, in [16], the particle swarm algorithm was used to design a microstrip array antenna with coupled parasitic elements. This antenna, fed by a coaxial cable, operates in the 5 to 6 GHz frequency band for wireless applications. The antenna features several rectangular parasitic elements around the microstrip patch on the printed circuit board to cover the desired frequency band. Determining the precise placement of these parasitic elements is challenging with conventional methods, but the particle swarm algorithm effectively addresses this issue. The proposed antenna exhibits good gain and an omnidirectional radiation pattern.

In [17], an innovative approach is presented to reduce the in-band radar cross-section (RCS) of a microstrip patch antenna while maintaining its radiation properties. This is achieved by placing highly absorbing unit cells around the antenna's radiating patch, optimized using the particle swarm algorithm. Measurement results show a 10 dB RCS reduction in the 2.5–3 GHz band for both x and y polarizations, with a maximum RCS reduction of -26.4 dB at 2.8 GHz.

A three-element Yagi-Uda antenna with a lattice structure is introduced in [18]. The random configuration of this wire antenna is optimized using particle swarm and genetic algorithms to achieve the best bandwidth, radiated power, and front-to-back ratio (FBR).

In [22], the radiation and dispersion parameters of a single-element monopole antenna are optimized using the Customized Mutated Particle Swarm Algorithm (CM-PSO).

2. Innovation and contributions

In this study, a hybrid algorithm has been used to optimize a monopole antenna so that it has an intensity of -40 dB at the resonant frequency of 3.5 GHz and covers the frequency band of 3.3 to 3.8 GHz with an S_{11} criterion of less than -10 dB. This algorithm receives physical parameters such as antenna dimensions as input and calculates their optimal values as output. In fact, the proposed hybrid algorithm is a combination of customized mutated particle swarm algorithms and a modified genetic algorithm. This algorithm uses a chaotic function to optimally combine the two algorithms. In fact, the chaotic function decides, according to the threshold criterion, which of the algorithms to continue the optimization process or whether this process should end. The proposed algorithm is faster than the customized mutant particle swarm algorithms and the modified genetic algorithm and has higher reliability in producing the same results in similar but independent simulations. In the proposed method, the two algorithms are independent of each other and it is not required to merge the algorithms with each other.

The efficiency of the algorithm has been successfully simulated and established using benchmark functions such as the Rastrigen function, the Ackley function, the Rosenbrock function, and the Booth function.

The contributions of the paper are as follows:

- 1- Presenting a new multi-objective optimization algorithm.
- 2- Using a new combinational pattern for the chaotic function.
- 3- A new method for reliable and secure antenna performance.
- 4- Designing and implementing a new antenna for specific applications.

3. Materials and Methods

This study aims to optimize antenna performance through two key approaches: (1) structural modifications of antenna components and (2) implementation of a novel multi-objective hybrid algorithm combining mutated particle swarm optimization, customized chaotic functions, and a modified genetic algorithm.

The research methodology involves:

- 1- Algorithm development in MATLAB environment
- 2- Integration with CST Studio Suite for antenna design simulation
- 3- Comparative analysis with conventional HFSS/CST optimization approaches

A critical observation from our work demonstrates that relying solely on electromagnetic simulation tools (HFSS or CST) for parameter optimization proves computationally intensive and often yields suboptimal results. The proposed hybrid approach addresses these limitations by synergizing metaheuristic optimization with full-wave simulation, significantly enhancing both efficiency and accuracy in antenna design.

4. Results and Discussion

Previous work [22] developed an enhanced PSO variant (CM-PSO) that effectively avoids local minima and rapidly converges to global minima in complex engineering designs. This capability was demonstrated through the design of monopole antennas operating in the 2.4-2.5 GHz band for industrial, scientific, and medical applications. Subsequent improvements [23] achieved faster convergence by incorporating additional algorithms. Further validation [24] confirmed the algorithm's effectiveness through dual-band monopole antenna design and benchmark function testing in electromagnetic optimization.

Our novel multi-objective hybrid algorithm further accelerates convergence through three key innovations: (1) customized mutated PSO algorithms, (2) chaotic functions, and (3) a modified genetic algorithm. By replacing random functions with chaotic functions for initial population generation (parent selection), we enable offspring solutions to surpass their parents' performance. This approach prevents convergence to local optima while promoting movement toward global minima. The chaotic functions generate smoother pseudo-random number sequences with minimal jumps, reducing the influence of randomness during population generation, arithmetic crossover, and mutation operations. Consequently, we can isolate and analyze the modified GA's contribution to the hybrid algorithm's performance. These improvements yield more consistent decision parameters and optimized results across independent runs, as evidenced by smaller deviation plots. The method maintains reliability while requiring fewer function evaluations (NFEs) to reach final solutions.

Regarding the algorithm combination, the customized mutated particle swarm algorithm and modified genetic algorithm require an intelligent integration approach that enhances the convergence rate of the hybrid algorithm while maintaining optimization control. To achieve this, we introduce a new chaotic function to coordinate these algorithms. A threshold value determines which optimization algorithm to employ when searching for global minima during the design process. Specifically, the MCM threshold value selects either the CM-PSO algorithm or the modified genetic algorithm (MGA) to continue optimization, simplifying the combination process and avoiding complex formula integration.

In this study, when the MCM value exceeds the threshold, the CM-PSO algorithm performs the optimization; otherwise, the MGA identifies the global minima. The proposed MCM generates pseudo-random numbers between 0 and 1, exhibiting a mean value of 0.47 (over 3000 iterations) and repeatable patterns across independent runs. Simulation results demonstrate that setting the threshold to 0.45 yields superior solutions with fewer function evaluations, indicating that the CM-PSO algorithm handles most optimization tasks more effectively.

Figure I presents the algorithm flowchart, showing how both algorithms initialize populations and search agents. After evaluating the cost function for the monopole antenna design, the process identifies optimal positions based on minimum cost function values and archives them as global optima.

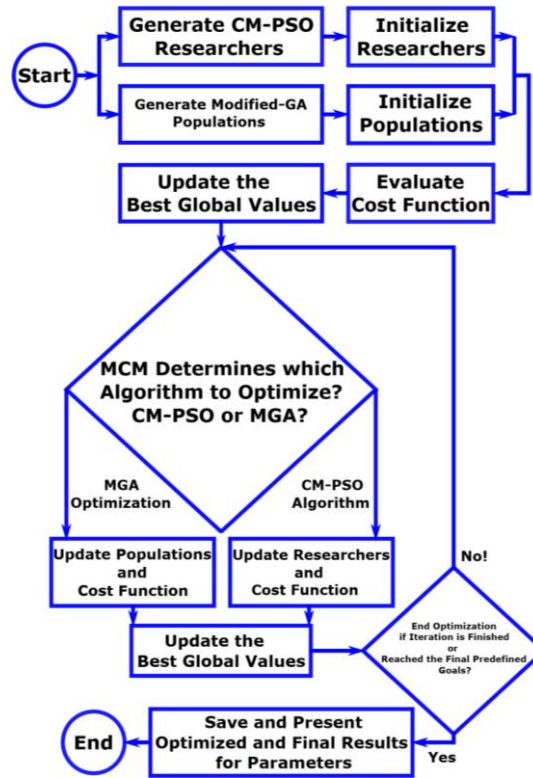


Figure I. Flowchart of how to decide the proposed algorithm [21].

The simulation results demonstrate that the CM-PSO algorithm achieves faster convergence with fewer iterations compared to the MGA algorithm [23-24]. This empirical evidence supports the selection of a threshold value closer to the mean MCM value (0.47) as optimal. Through extensive simulation studies evaluating various threshold criteria, this approach has been validated.

The hybrid algorithm exhibits superior performance in two key aspects:

- 1- Enhanced ability to escape local minima
- 2- Improved convergence toward global minima

This improvement stems from our novel implementation of MCM, which combines:

- Sinusoidal functions
- Recursive functions
- Piecewise chaotic functions

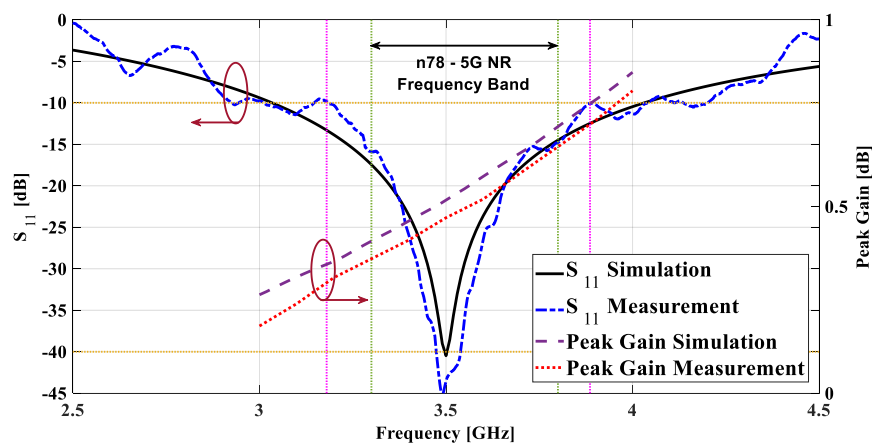


Figure II. Simulated and measured values of S_{11} and Peak Gain for the proposed antenna.

The integrated approach maintains computational efficiency while effectively preventing convergence to local optima, as confirmed by multiple independent simulation runs. The strategic combination of these chaotic functions achieves this performance without introducing unnecessary complexity to the optimization process.

Figure II presents the optimized antenna's final performance metrics, including S_{11} parameters and peak gain values. The S_{11} results demonstrate excellent performance, with the antenna successfully covering the target frequency range of 3.3-3.8 GHz, corresponding to the 5G NR N-78 band specifications. Measurement results further validate the design, showing an operational bandwidth from 3.18 to 3.88 GHz ($S_{11} < -10$ dB), with strong correlation between simulated and measured performance.

The results of the proposed algorithm against existing methods from peer-reviewed publications for antenna design applications demonstrate that our algorithm achieves superior optimization speed while maintaining exceptional accuracy, despite utilizing fewer search agents (populations) and maintaining a relatively simple implementation framework.

5. Conclusion

This study presents a novel multi-objective hybrid optimization algorithm designed to enhance the electromagnetic performance of antennas with specific operational requirements. The algorithm incorporates combined chaotic mapping techniques to improve both reliability and convergence speed. Specifically, we integrate a customized CM-PSO algorithm with an innovative modified genetic algorithm (MGA) through a unique composite chaotic mapping approach.

Using this advanced optimization framework, we successfully designed a planar monopole antenna with simple geometry that achieves:

- $S_{11} < -10$ dB across the 3.3-3.8 GHz frequency band
- $S_{11} < -40$ dB at the 3.5 GHz resonant frequency
- Full compatibility with 5G NR n78 band specifications

The algorithm operates on seven key antenna dimensions as decision variables, optimizing them simultaneously to meet these stringent performance criteria. Validation through multiple benchmark functions confirms the algorithm's robustness, with all decision variables consistently converging to similar values across independent runs.

Key advantages of our approach include:

- 1- Elimination of complex CM-PSO/MGA integration challenges
- 2- Enhanced optimization efficiency through chaotic function implementation
- 3- Reliable convergence behavior
- 4- Significant reduction in computational time while maintaining precision

The proposed method demonstrates particular effectiveness for antenna design applications requiring both broadband performance and specific resonance characteristics.

6. Acknowledgement

The successful completion of this research would not have been possible without the valuable guidance and support of several distinguished individuals. Special thanks to Dr. Yousef Farhang, Dr. Keyvan Kabotri, and Dr. Majid Shokri for their insightful contributions and technical assistance throughout this study. I am also grateful to the Payame Noor University Laboratory for providing me with the opportunity for experiments and research.

References

- [1] M. Wetter and J. Wright, "A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for no smooth simulation-based optimization," *Building and Environment*, vol. 39, no. 8, pp. 989–999, 2004, doi: [10.1016/j.buildenv.2004.01.022](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.022).
- [2] S. Jin, H. Lee and J. Jeong, "Fast partial distortion elimination algorithm based on hadamard probability model," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 1, 2008, doi: [10.1049/el:20082872](https://doi.org/10.1049/el:20082872).
- [3] Y. -C. Lin, M. Clauß and M. Middendorf, "Simple Probabilistic Population-Based Optimization," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 2, pp. 245-262, April 2016, doi: [10.1109/TEVC.2015.2451701](https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2451701).
- [4] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, April 1995, doi: [10.1109/74.382334](https://doi.org/10.1109/74.382334).
- [5] S. M. Mikki and A. A. Kishk, "Quantum Particle Swarm Optimization for Electromagnetics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 10, pp. 2764-2775, Oct. 2006, doi: [10.1109/TAP.2006.882165](https://doi.org/10.1109/TAP.2006.882165).

- [6] E. BouDaher and A. Hoorfar, "Electromagnetic Optimization Using Mixed-Parameter and Multiobjective Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1712-1724, April 2015, doi: [10.1109/TAP.2015.2398116](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2398116).
- [7] S. M. Mikki and A. A. Kishk, "Particle swarm optimization: A physics-based approach," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 3, pp. 1–103, 2008, doi: [10.2200/s00110ed1v01y200804cem020](https://doi.org/10.2200/s00110ed1v01y200804cem020).
- [8] K. Kaboutari, A. Zabihi, B. Virdee and M. Salmasi "Microstrip patch antenna array with cosecant-squared radiation pattern profile," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 106, pp. 82–88, 2019, doi: [10.1016/j.aeue.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.003).
- [9] M.H. Teimouri, Ch. Ghobadi, J. Nourinia, K. Kaboutari, M. Shokri and B.S. Virdee "Broadband printed dipole antenna with integrated balun and tuning element for DTV application," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 148, p. 154161, 2022, doi: [10.1016/j.aeue.2022.154161](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154161).
- [10] M. Shokri *et al.*, "A Printed Dipole Antenna for WLAN Applications with Anti-interference Functionality," *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Hangzhou, China, 2021, pp. 1486-1494, doi: [10.1109/PIERS53385.2021.9694670](https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694670).
- [11] M. M. Hasan and H. T. Mouftah, "Optimization of Watchdog Selection in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 94-97, Feb. 2017, doi: [10.1109/LWC.2016.2633990](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2633990).
- [12] L. Cao, Y. Cai and Y. Yue, "Swarm Intelligence-Based Performance Optimization for Mobile Wireless Sensor Networks: Survey, Challenges, and Future Directions," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 161524-161553, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2951370](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951370).
- [13] D. Cao, A. Modiri, G. Sureka and K. Kiasaleh, "DSP Implementation of the Particle Swarm and Genetic Algorithms for Real-Time Design of Thinned Array Antennas," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1170-1173, 2012, doi: [10.1109/LAWP.2012.2220514](https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2220514).
- [14] A. Modiri and K. Kiasaleh, "Modification of Real-Number and Binary PSO Algorithms for Accelerated Convergence," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 214-224, Jan. 2011, doi: [10.1109/TAP.2010.2090460](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2090460).
- [15] F. Grimaccia, M. Mussetta and R. E. Zich, "Genetical Swarm Optimization: Self-Adaptive Hybrid Evolutionary Algorithm for Electromagnetics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 781-785, March 2007, doi: [10.1109/TAP.2007.891561](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891561).
- [16] A. A. Minasian and T. S. Bird, "Particle Swarm Optimization of Microstrip Antennas for Wireless Communication Systems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6214-6217, Dec. 2013, doi: [10.1109/TAP.2013.2281517](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2281517).
- [17] B. Tütüncü, "Compact low radar cross-section microstrip patch antenna using particle swarm optimization," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, pp. 2288–2294, 2019, doi: [10.1002/mop.31893](https://doi.org/10.1002/mop.31893).
- [18] Z. Bayraktar, P. L. Werner and D. H. Werner, "The design of miniature three-element stochastic Yagi-Uda arrays using particle swarm optimization," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 22-26, 2006, doi: [10.1109/LAWP.2005.863618](https://doi.org/10.1109/LAWP.2005.863618).
- [19] D. Ustun, A. Toktas and A. Akdagli, "Deep neural network–based soft computing the resonant frequency of E–shaped patch antennas," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 102, pp. 54–61, 2019, doi: [10.1016/j.aeue.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.02.011).
- [20] G. Singh and U. Singh, "Triple band-notched UWB antenna design using a novel hybrid optimization technique based on DE and NMR algorithms," *Expert Systems with Applications*, vol. 184, p. 115299, 2021, doi: [10.1016/j.eswa.2021.115299](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115299).
- [21] W. T. Li, X. W. Shi, Y. Q. Hei, S. F. Liu and J. Zhu, "A Hybrid Optimization Algorithm and Its Application for Conformal Array Pattern Synthesis," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 10, pp. 3401-3406, Oct. 2010, doi: [10.1109/TAP.2010.2050425](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2050425).

- [22] V. Hosseini, Y. Farhang, K. Majidzadeh and Ch. Ghobadi, "Customized mutated PSO algorithm of isolation enhancement for printed MIMO antenna with ISM band applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 145, no. 2, p. 154067, 2022, doi: [10.1016/j.aeue.2021.154067](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.154067).
- [23] V. H. Hasbestan, Y. Farhang, K. Majidzadeh and C. Ghobadi, "Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm for Design a Printed MIMO Antenna With n78–5G NR Frequency Band Applications," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 68231-68242, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3292307](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292307).
- [24] V. Hosseini *et al.*, "Dual-Band Planar Microstrip Monopole Antenna Design Using Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm," *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Prague, Czech Republic, 2023, pp. 467-475, doi: [10.1109/PIERS59004.2023.10221360](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221360).
- [25] M. Masdari, S. Barshande and S. Ozdemir, "CDABC: chaotic discrete artificial bee colony algorithm for multi level clustering in large scale WSNs," *The Journal of Supercomputing*, vol. 75, no. 1, pp. 7174–7208, 2019, doi: [10.1007/s11227-019-02933-3](https://doi.org/10.1007/s11227-019-02933-3).
- [26] S. Barshandeh and M. Haghzadeh, "A new hybrid chaotic atom search optimization based on tree-seed algorithm and Levy flight for solving optimization problems," *Engineering with Computers*, vol. 37, pp. 3079–3122, 2020, doi: [10.1007/s00366-020-00994-0](https://doi.org/10.1007/s00366-020-00994-0).

Declaration of Competing Interest: Authors do not have a conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Vahid Hosseini: Programming and designing the proposed algorithm and writing the article; Yusef Farhang: Resources, methodology, manuscript editing; Kambiz Majidzade: Resources, manuscript editing; Changiz Ghobadi: Resources, methodology.

Open Access: Journal of Southern Communication Engineering is an open-access journal. All papers are immediately available to read and reuse upon publication.

مقاله پژوهشی

طراحی آنتن تک قطبی مسطح بهینه شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند منظوره ترکیبی و توابع آشوب‌ناک

وحید حسینی^{۱*} | یوسف فرهنگ^{۲*} | کامبیز مجیدزاده^۳ | چنگیز قبادی^۴

چکیده:

این تحقیق از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه جدید برای طراحی یک آنتن یک قطبی با ویژگی‌های الکترومغناطیسی خاص استفاده می‌کند. این الگوریتم از یک تابع آشوب‌ناک ترکیبی برای ادغام الگوریتم ازدحام ذرات جهش‌یافته سفارشی شده با الگوریتم ژنتیک اصلاح‌شده استفاده می‌نماید. رویکرد ترکیبی جدید با اجتناب از به دام افتادن در حداقل‌های محلی، سریع‌تر از الگوریتم‌های متداول ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک به نتایج دلخواه نیل می‌نماید. عملکرد الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی با استفاده از توابع معیار مانند تابع راسترینگ، تابع آکلی، تابع روزنبروک و تابع بووت با موفقیت شبیه‌سازی و تثبیت شده‌اند. در نهایت، اعتبار رویکرد ارائه شده برای کاربردهای الکترومغناطیسی با بهینه‌سازی یک آنتن تک قطبی میکرواستریپ مسطح با ساختاری ساده نشان داده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی اجازه می‌دهد تا معیارهای بهینه‌سازی طوری سفارشی شوند که به نتایج از پیش در نظر گرفته شده برای افت بازگشتی و فرکانس رزونانس نیل نمایند. الگوریتم بهینه‌سازی توسعه یافته در مطلب، برای تعیین تنظیمات پارامترهای لازم به منظور دستیابی به باندهای فرکانسی مورد انتظار با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات جهش‌یافته سفارشی یا ژنتیک اصلاح شده ابتکاری استفاده می‌شود. ابعاد عناصر آنتن پیشنهادی، به طور قابل توجهی بر عملکرد آنتن تأثیر می‌گذارند.

کلید واژه‌ها: آنتن تک قطبی، الگوریتم بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک، تابع آشوب‌ناک

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

v.hosseini1@pnu.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی و معماری، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه اسنپورت استانبول، ترکیه.

^۴ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.

youseffarhang@esenyurt.edu.tr

^۵ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

dr.kambiz.majidzadeh@gmail.com

^۶ گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

ch.ghobadi@urmia.ac.ir

نویسنده مسئول:

* یوسف فرهنگ، استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه اسنپورت استانبول، ترکیه

youseffarhang@esenyurt.edu.tr

موضوع اصلی:

بهینه‌سازی آنتن‌های مخابراتی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۸ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۰ تیر ۱۴۰۲

تازه‌های تحقیق:

- ادغام الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از توابع آشوب‌ناک برای غلبه بر چالش‌ها در ترکیب الگوریتم‌ها.
- بهبود الگوریتم ژنتیک کلاسیک برای بهبود عملکرد.
- توسعه یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی چند هدفه با عملکرد بهتر.

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



۱-مقدمه

طراحی سیستم‌های مهندسی همواره چالش مهمی تحت عنوان بهینه‌سازی داشته‌اند که یک جنبه حیاتی برای هر سیستمی است. با این حال، رویکرد آزمون و خطای سنتی اغلب برای سیستم‌های پیچیده با پارامترهای طراحی متعدد نادرست و نامناسب است. برای رفع این محدودیت، محققان کدهای مبتنی بر برنامه را توسعه داده‌اند که از الگوریتم‌هایی برای بهینه‌سازی دقیق سیستم‌های مهندسی حساس و پیچیده استفاده می‌کنند. سیستم‌های مخابراتی یک نوع سیستم مهندسی رایج هستند که نقش مهمی در زندگی روزمره، کار و تعاملات اجتماعی افراد ایفا می‌کنند. آنتن‌ها جزء حیاتی سیستم‌های مخابراتی مدرن هستند و بهینه‌سازی پارامترهای آنها برای دستیابی به بهترین عملکرد ضروری است.

دو روش برای بهینه‌سازی وجود دارد: روش‌های قطعی و فرا ابتکاری. برنامه‌نویسی درجه دوم، روش سیمپلکس، روش گرادیان و روش نیوتن رویکردهای قطعی هستند که معمولاً برای بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. با این حال، این روش‌ها دارای اشکالاتی هستند، مانند گیر افتادن در نقاط بهینه محلی، زمان طولانی برای حل مسائل پیچیده و نیاز به یک نقطه شروع معتبر [۱]. در مقابل، رویکردهای فرا ابتکاری گروهی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر احتمال هستند. مسلماً سازگاری با طیف وسیعی از موضوعات بدون تغییرات اساسی در الگوریتم آنها، مزیت اصلی این روش‌های بهینه‌سازی تلقی می‌شود. از اوایل دهه ۱۹۷۰، رویکردهای مختلف بهینه‌سازی مبتنی بر احتمال معرفی شده است [۲، ۳]. بسیاری از این روش‌های جستجو از قوانین طبیعی و زیست شناسی مبتنی بر تراکم الهام گرفته شده‌اند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (PSO)، الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها محبوب‌ترین تکنیک‌های بهینه‌سازی هستند. همانطور که در [۴-۶] گزارش شده است، بسیاری از مطالعات از روش‌های مبتنی بر احتمال برای حل مسائل الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند. نتایج گزارش شده کارایی و انعطاف‌پذیری این الگوریتم‌ها را در حل مسائل پیچیده الکترومغناطیسی نشان می‌دهد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت برای کاربردهای جامعه علمی اغلب بر اساس مکانیسم‌ها یا عملگرهای پیچیده‌ای هستند که فرایندهای طبیعی را تقلید می‌کنند. برای این الگوریتم‌ها، هیچ دانش اولیه‌ای از تابع هزینه برای دستیابی به همگرایی عمومی لازم نیست [۲۵، ۲۴]. بنابراین لازم است که به صورت تصادفی این مقادیر برای تعیین پارامترهای ذاتی الگوریتم تعریف شوند. این خواص و کاربردهای اثبات شده در مسائل الکترومغناطیسی، این الگوریتم‌ها را به یکی از بهترین نامزدها برای بهینه‌سازی عمومی در کاربردهای الکترومغناطیسی و طراحی آنتن تبدیل می‌کند [۷]. در حقیقت، امروزه روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌ها به دلیل سرعت و دقت بالا مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند.

امروزه آنتن‌های چاپی به دلیل ساختار سبک، ارزان بودن و سهولت اتصال به سایر اجزای مایکروویو محبوبیت بیشتری یافته‌اند [۸، ۹، ۱۰]. یکی از بحرانی‌ترین چالش‌ها در طراحی آنتن، انتخاب پارامترهای فیزیکی بهینه آن برای دستیابی به عملکرد مناسب آنتن است. مقالات متعددی در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی، به ویژه سیستم‌های مخابراتی و بی‌سیم و طراحی آنتن منتشر شده است [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. با توجه به مزایایی مانند راندمان بالا، سهولت اجرا و وسعت عملیات در طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های الکترومغناطیسی، عمدتاً از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود. در [۱۶]، الگوریتم ازدحام ذرات به عنوان یک ابزار طراحی برای تولید یک آنتن آرایه میکرواستریپ با عناصر پارازیتیک جفت شده استفاده شده است. آنتن توسط یک کابل کوآکسیال تغذیه می‌شود و برای کاربردهای بی‌سیم^۳ از باند فرکانسی ۵ تا ۶ گیگاهرتز طراحی شده است. آنتن در محدوده برد مدار چاپی برای پوشش باند فرکانسی مورد نظر دارای چندین عنصر پارازیتیک مستطیلی در اطراف پچ میکرواستریپ است. مدیریت موقعیت عناصر پارازیتیک با روش‌های کلاسیک مرسوم بسیار دشوار و حتی غیرممکن است. بنابراین، مکان دقیق و مناسب عناصر پارازیتیک با اجرای یک الگوریتم مبتنی بر ازدحام ذرات تعیین می‌شود. آنتن پیشنهادی دارای بهره خوب و الگوی تابشی همه جهته است. یک رویکرد خلاقانه برای کاهش سطح مقطع رادار درون باند^۴ برای یک آنتن پچ میکرواستریپ با حفظ خواص تابشی آن در [۱۷] ارائه شده است. این کار در اطراف پچ تشعشی آنتن با استفاده از سلول‌های واحد بسیار جاذب که توسط الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده‌اند انجام می‌گیرد. با توجه به نتایج اندازه‌گیری، بیش از ۱۰

^۱ Particle Swarm Optimization^۲ Genetic Algorithm^۳ Wireless Local Area Network^۴ Radar Cross Section (RCS)

دسی بل کاهش RCS در باند ۲/۵ تا ۳ گیگاهرتز برای هر دو پلاریزاسیون x و y مشاهده می شود. حداکثر ۲۶/۴- دسی بل کاهش RCS در فرکانس ۲/۸ گیگاهرتز به دست می آید. یک آنتن سه المانه یاقی یودا^۱ با ساختار مشبک در [۱۸] ارائه شده است. پیکربندی تصادفی این آنتن سیمی با استفاده از الگوریتم های ازدحام ذرات و ژنتیک به گونه ای طراحی شده است که پهنای باند، توان تابشی و نسبت FBR^۲ به حالت های بهینه نیل می کنند.

در [۲۲]، ابتدا پارامترهای تشعشی و پراکندگی یک آنتن تک المانه تک قطبی توسط الگوریتم ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی^۳ (CM-PSO)، شده^۴، بهینه گشته اند. در دو فاز بعدی این مطالعه، از آنتن تک المانه بهینه شده جهت طراحی آنتن دوگانه و چهارگانه^۵ طوری استفاده شده است که ایزولاسیون مدنظر بین عناصر آنتن توسط الگوریتم بهینه سازی در ساده ترین حالت و کمترین زمان حاصل گردد. در [۲۳]، یک آنتن دوقطبی با زمین ناقص با استفاده از یک الگوریتم چند هدفه دو رگه^۶ طوری بهینه شده است که باند فرکانسی ۳/۳ تا ۳/۸ گیگاهرتز را پوشش داده و در فرکانس رزونانس ۳/۵ گیگا هرتز حداقل مقدار ۳۰- دسی بل^۷ را بدست آورد. آنتن بهینه شده در باند فرکانسی مورد بحث، دارای افت بازگشتی کمتر از ۱۰ دسی بل است. در تحقیق یاد شده، از آنتن بهینه شده دوقطبی جهت طراحی یک ساختار چهارگانه طوری استفاده شده است که حداقل ۲۰- دسی بل ایزولاسیون بین عناصر ساختار چهارگانه در کمترین فاصله و در نتیجه کوچکترین ابعاد ممکن برای ساختار چهارگانه حاصل گردد.

در این تحقیق نیز از یک الگوریتم دورگه جهت بهینه سازی یک آنتن تک قطبی طوری استفاده شده است که در فرکانس رزونانس ۳/۵ گیگاهرتز دارای شدت ۴۰- دسی بل بوده و باند فرکانسی ۳/۳ تا ۳/۸ گیگاهرتز را با معیار S_{11} کمتر از ۱۰- دسی بل پوشش دهد. این الگوریتم پارامترهای فیزیکی نظیر ابعاد آنتن را به عنوان ورودی دریافت کرده و مقادیر بهینه آنها را به عنوان خروجی محاسبه می نماید. در حقیقت، الگوریتم دورگه مطرح شده ترکیبی از الگوریتم های ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی شده و الگوریتم اصلاح شده ژنتیک می باشد. این الگوریتم جهت تلفیق دو الگوریتم نامبرده به صورت بهینه از یک تابع آشوبناک استفاده می کند. در واقع، تابع آشوبناک با توجه به معیار آستانه تصمیم می گیرد که کدامیک از الگوریتم های نامبرده فرآیند بهینه سازی را ادامه داده و یا اینکه این فرآیند پایان پذیرد. در واقع الگوریتم مطرح شده نسبت به الگوریتم های ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی شده و الگوریتم اصلاح شده ژنتیک سریعتر به جواب نهایی میل کرده و قابلیت اطمینان پذیری بالاتری در جهت تولید نتایج یکسان در شبیه سازی های مشابه ولی مستقل دارد. علاوه بر این، در روش مطرح شده دو الگوریتم مورد استفاده مستقل از هم بوده و نیازی به ادغام الگوریتم ها با یکدیگر نخواهیم داشت. کارایی این الگوریتم با استفاده از توابع معیار مانند تابع راستریگن^۸، تابع آکلی^۹، تابع روزنبروک^{۱۰} و تابع بووث^{۱۱} با موفقیت شبیه سازی و تثبیت شده اند.

۲- اهداف الگوریتم بهینه سازی

هدف اصلی این تحقیق، افزایش عملکرد آنتن ها با اصلاح ابعاد فیزیکی عناصر آنها و به کارگیری یک الگوریتم ترکیبی چندهدفه جدید مبتنی بر ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی شده، توابع آشوبناک و الگوریتم اصلاح شده ژنتیک است. نرم افزار شبیه ساز متلب^{۱۲} برای توسعه الگوریتم دورگه ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته و سپس با مجموعه استودیو فناوری شبیه سازی کامپیوتری سی اس تی^{۱۳} (CST) برای انجام فرآیندهای طراحی آنتن ادغام می شود.

¹ Yagi-Uda

² Front-to-Back Ratio

³ Customized Mutated-Particle Swarm Optimization

⁴ Customized Mutated-Particle Swarm Optimization (CM-PSO)

⁵ Multiple-Input/Multiple-Output (MIMO)

⁶ Multi-purpose two-line

⁷ Decibel (db)

⁸ Rastgrin

⁹ Ackley

¹⁰ Rosenbrock

¹¹ Booth Function

¹² MATLAB (Matrix LABoratory)

¹³ Computer Simulation Technology

برای این منظور ابتدا عملکرد الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی با استفاده از توابع معیار مانند تابع راستریگن، تابع آکلی، تابع روزنبروک و تابع بووت با موفقیت شبیه سازی و تثبیت می گردند. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی عملکرد یک آنتن چاپی تک قطبی مسطح را برای اعتبارسنجی بهبود می بخشد. بنابراین پارامتر S_{11} آن در نرم افزار شبیه ساز CST با استفاده از الگوریتم مذکور طوری بهینه می گردد که در پهنای باند فرکانسی $3/3$ تا $3/8$ گیگاهرتز با کاربردهای باند فرکانسی n78 نسل پنجم NR^۱ کمتر از 10 - دسی بل بوده و در فرکانس رزونانس $f_r = 3/5$ گیگاهرتز کمتر از 40 - دسی بل عمق داشته باشد. برای نیل به هدف یاد شده، یک تابع هزینه به صورت زیر تعریف می شود:

$$CF = \min_{R_1, R_2, L_1, W_1, L_a, W_g, \theta} \begin{cases} f_r(R_1, R_2, L_1, W_1, L_a, W_g, \theta) - 3.5 [GHz] \\ |S_{11}| - 40 [dB] \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } S_{11} (IBW) \leq -10 [dB]$$

$$IBW = [3.3, 3.8] [GHz]$$

$$[1, 4, 5, 1, 5, 5, 7, 90] [mm] \leq [R_1, R_2, L_1, W_1, L_a, W_g, \theta] \leq [3, 6, 6, 2, 6, 5, 12, 150] [mm]$$

که در آن متغیرهای تصمیم $R_1, R_2, L_1, W_1, L_a, W_g, \theta$ پارامترهای آنتن پیشنهادی برای اعمال تنظیم توسط الگوریتم پیشنهادی هستند. شایان ذکر است که دستیابی به پارامترهای بهینه آنتن و به دست آوردن حداکثر کارایی تنها با استفاده از نرم افزار شبیه ساز ساختار فرکانس بالا^۲ (HFSS) یا CST خسته کننده است.

۳- توسعه الگوریتم بهینه سازی دورگه چندهدفه با استفاده از الگوریتم CM-PSO، تابع آشوبناک ادغام شده و الگوریتم ژنتیک اصلاح شده

با توجه به [۲۲]، یک الگوریتم PSO کلاسیک بهبود یافته با نام CM-PSO، برای فرار از به دام افتادن در حداقل های محلی و نزدیک شدن به حداقل های عمومی با سریع ترین سرعت ممکن در طراحی مسائل پیچیده مهندسی، اصلاح شده است. در نتیجه، توانایی آن توسط طراحی آنتن تک قطبی در باند فرکانسی $2/4$ تا $2/5$ گیگاهرتز با کاربردهای صنعتی، علمی و پزشکی تثبت شده است. با این حال، با ترکیب سایر الگوریتم ها در الگوریتم ذکر شده، نرخ همگرایی آن در [۲۳] بهبود یافته است. همچنین عملکرد این الگوریتم در [۲۴] با موفقیت در کاربردهای بهینه سازی الکترومغناطیسی با طراحی یک آنتن تک قطبی دو بانده و توابع معیار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در الگوریتم چند هدفه و ترکیبی جدید با استفاده از الگوریتم های ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی شده، توابع آشوبناک و الگوریتم اصلاح شده ژنتیک که در آن از تابع آشوبناک به جای یک تابع تصادفی برای تولید نسل های اصلی (والدین) جمعیت ها/مأمورها استفاده می شود، نرخ همگرایی به مقادیر نهایی عمومی را افزایش داده ایم. به این ترتیب، فرزندان این فرصت را دارند که از والدین خود بهتر بوده و از گرفتار شدن در نقاط محلی اجتناب کرده و به نقاط عمومی کلی (کمینه ها) میل نمایند. به این ترتیب می توان از تأثیر اعداد تصادفی در تولید جمعیت، تقاطع حسابی و جهش در اکتشافات و بهره برداری های مستقل چشم پوشی کرد و فقط بر روی تأثیر الگوریتم اصلاح شده GA بر نتایج الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تمرکز نمود. همچنین، توابع آشوبناک اعداد شبه تصادفی صاف تری با پرش های کوچک تولید می کنند. در نتیجه، باعث ایجاد باگس پلات های کوچکتر برای پارامترهای تصمیم گیری و نتایج بهینه شده در اجراهای مستقل می شود که به معنی قابلیت اطمینان در رسیدن به نتایج نهایی با NFE^۳ های کوچکتر می باشد.

در رابطه با موضوع ترکیب، الگوریتم ازدحام ذرات جهش یافته سفارشی شده و الگوریتم اصلاح شده ژنتیک باید به راحتی و هوشمندانه ترکیب شوند به نحوی که نرخ همگرایی الگوریتم ترکیبی نهایی را افزایش داده و کنترل فرآیند بهینه سازی را آسان کند. برای این منظور، یک تابع آشوبناک جدید^۴ برای ترکیب الگوریتم های ذکر شده، معرفی شده است. یک مقدار آستانه جهت تصمیم گیری برای انتخاب الگوریتم بهینه سازی تنظیم می شود تا حداقل نقاط عمومی کلی را در طول فرآیند طراحی، پیدا کند.

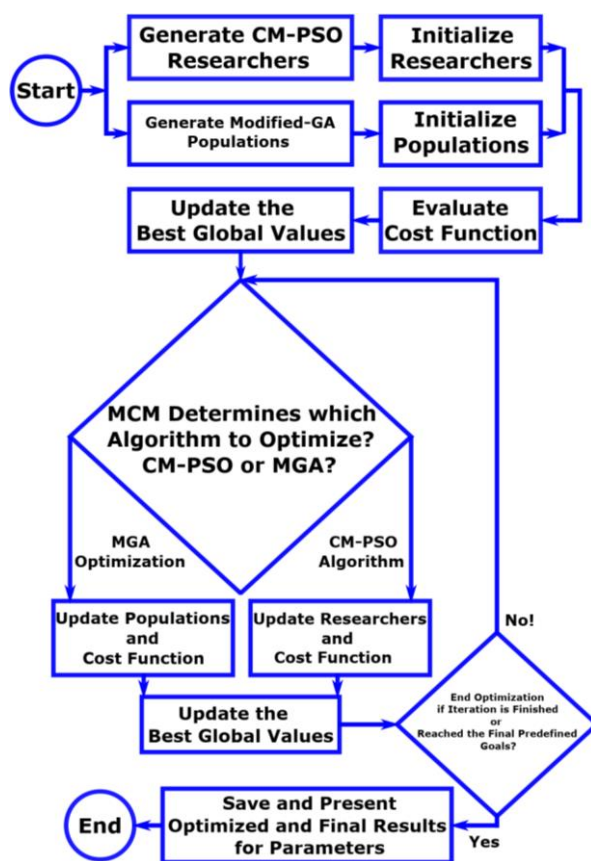
^۱ n78 - 5G NR Frequency Band

^۲ High-Frequency Structure Simulator

^۳ Number of Function Evaluations

^۴ Merged Chaotic Ma

در واقع، مقدار آستانه MCM برای تعیین الگوریتم CM-PSO یا الگوریتم اصلاح شده ژنتیک (MGA^۱) جهت ادامه فرآیند بهینه‌سازی استفاده می‌شود و ترکیب الگوریتم‌ها را آسان‌تر نموده و بنابراین از ترکیب‌های خسته‌کننده فرمول اجتناب می‌کند. در این مطالعه، اگر مقدار MCM از آستانه فراتر رود، از الگوریتم CM-PSO برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود، در غیر این صورت، MGA برای یافتن حداقل‌های عمومی در مسئله طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. MCM پیشنهادی اعداد شبه تصادفی بین ۰ و ۱ با مقدار میانگین ۰/۴۷ (برای بیش از ۳۰۰۰ مرحله گام) و یک الگوی تکرارپذیر در اجراهای مستقل تولید می‌کند. نتایج شبیه‌سازی تایید می‌کند که تعیین ۰/۴۵ به عنوان یک آستانه، راه حل بهتری را در NFE کمتر برای تابع هزینه ارائه می‌دهد. این بدان معناست که الگوریتم CM-POS برای انجام بیشتر بهینه‌سازی‌ها مناسب‌تر است. در شکل ۱، فلوچارت عملکرد این الگوریتم نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، جمعیت‌ها و محققان توسط الگوریتم‌ها تولید و مقداردهی اولیه می‌شوند. پس از ارزیابی تابع هزینه برای طراحی ساختار آنتن تک قطبی، بهترین موقعیت بر اساس حداقل تابع هزینه تعیین شده و در مقادیر بهینه کلی قرار می‌گیرند (ذخیره می‌شوند). تابع آشوب‌ناک پیشنهادی جدید، MCM، الگوریتمی را برای شروع یا ادامه فرآیند بهینه‌سازی بر اساس مقدار آستانه انتخاب می‌کند. پس از انجام عملیات بهینه‌سازی، موقعیت جمعیت‌ها/محققان به روز شده و نتایج تابع هزینه در نتیجه موقعیت‌های به روز شده ارزیابی می‌شود. تابع هزینه حداقل یک بار دیگر برای تعیین بهترین موقعیت استفاده می‌شود. در نهایت، بر اساس شرایط از پیش تعیین شده، الگوریتم توسعه یافته تصمیم می‌گیرد که آیا پارامترهای بهینه و نهایی را ذخیره و نشان دهد یا به پروسه بهینه‌سازی برگشته و عمل بهینه‌سازی را هر چه بیشتر ادامه دهد.



شکل ۱: فلوچارت نحوه تصمیم‌گیری الگوریتم پیشنهادی [۲۱].

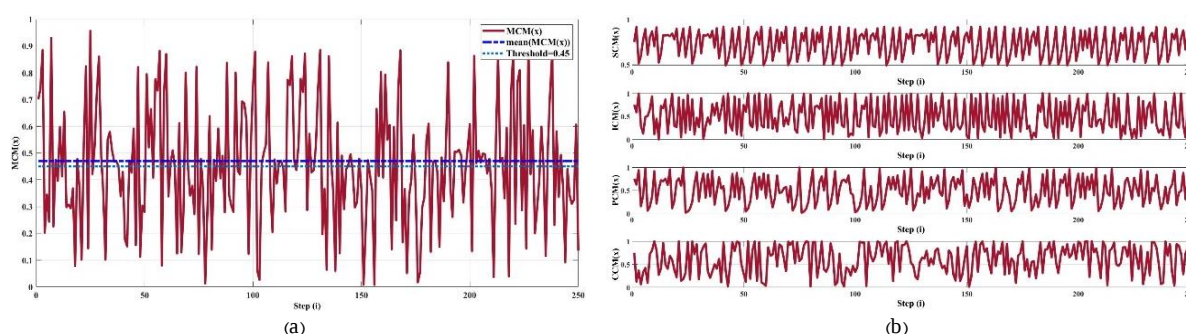
Figure 1. Flowchart of how to decide the proposed algorithm [21].

در واقع، نتایج شبیه‌سازی ثابت می‌کند که الگوریتم CM-PSO سرعت بیشتری برای نزدیک شدن به نتایج نهایی در تکرارهای کمتر نسبت به الگوریتم MGA [۲۳-۲۴] دارد. با توجه به این واقعیت، نویسندگان معتقدند که آستانه‌ای کمتر و نزدیک‌تر به

¹ Modified Genetic Algorithm

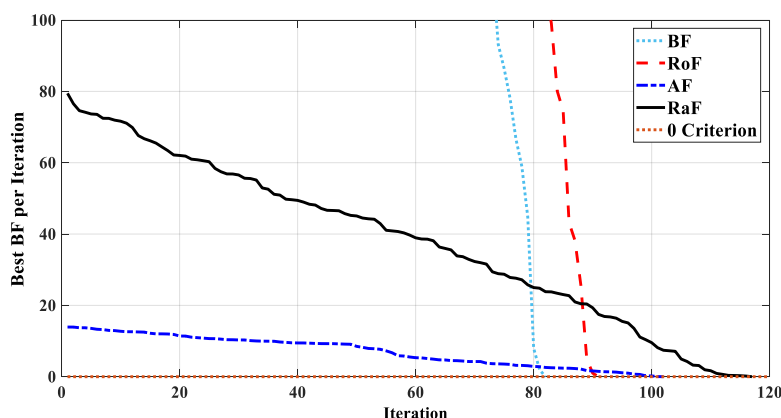
مقدار میانگین بهترین گزینه می‌باشد. بر اساس مقادیر معیارهای آستانه اعمال شده در مطالعات شبیه‌سازی، این ایده مورد ارزیابی و تایید قرار گرفته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشخص شد که ویژگی هیبریداسیون باعث می‌شود که الگوریتم ترکیبی به احتمال زیاد از گیرکردن در حداقل‌های محلی اجتناب کرده و به حداقل کلی میل می‌کند.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مستقل، به نظر می‌رسد جهت پیاده‌سازی MCM، ترکیب نوآورانه توابع آشوبناک سینوسی، بازگشتی و تکه‌ای از پیچیدگی بیشتر جلوگیری کرده و از به دام افتادن در حداقل‌های محلی اجتناب می‌کند. در واقع، میانگین توابع آشوبناک SCM^1 و ICM^2 زمانی به دست می‌آید که آرگومان‌های ورودی آنها به ترتیب با استفاده از توابع آشوبناک ICM و PCM^3 ، به نام تابع آشوبناک ادغام شده (MCM)، محاسبه شوند. در این مطالعه، اولین ورودی MCM به صورت تصادفی بر روی $0/7$ تنظیم شده است. این آرگومان را می‌توان برای اصلاح میانگین و در نتیجه آستانه MCM تغییر داد تا مشخص شود کدام الگوریتم باید برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد، که مستقیماً بر نرخ همگرایی تأثیر خواهد گذاشت. شکل ۲، الگوی توابع آشوبناک مطرح شده را در ۲۵۰ پله زمانی نمایش می‌دهد.



شکل ۲: توابع آشوبناک با ۲۵۰ پله زمانی، (a) تابع آشوبناک ادغامی با میانگین $0/47$ و معیار آستانه $45/0$. (b) توابع آشوبناک PCM، CCM، ICM و SCM [۲۴].

Figure 2. Chaotic functions with 250 time steps, (a) integrated chaotic function with mean 0.47 and consistency criterion 45. (b) chaotic functions of CCM, PCM, ICM and SCM [24].



شکل ۳: نتایج همگرایی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از توابع معیار راسترینگن، آکلی، روزنبروک و بووث. در این ارزیابی از ۶ جستجوگر یا والدین در الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است.

Figure 3. Convergence results of the proposed algorithm using Rastrigin, Ackley, Rosenbrock and Booth criterion functions. In this evaluation, 6 searchers or parents are used in the proposed algorithm.

¹ Sinusoidal Chaotic Map

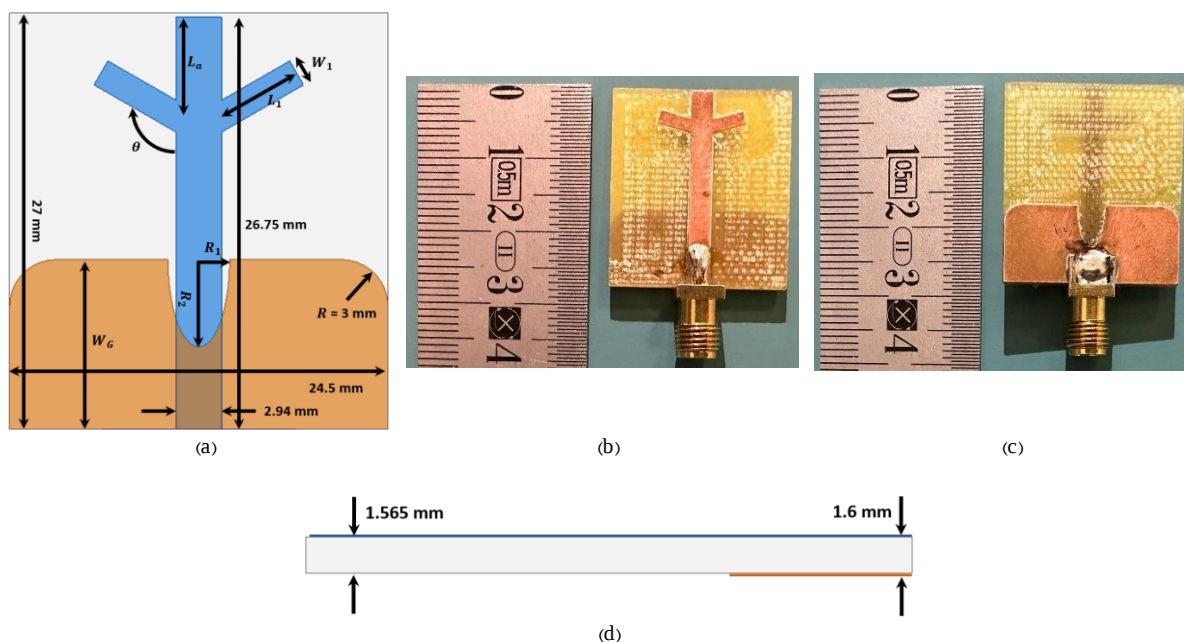
² Iterative Chaotic Map

³ Piecewise Chaotic Map

در شکل ۳، نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی با استفاده از توابع معیار راستیگن، آکلی، روزنبروک و بووت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم فوق با استفاده از توابع معیار یاد شده، حداکثر در ۱۲۰ بازگشت همگرا می‌گردند. بنابراین، با توجه به نتایج می‌توان از توانایی این الگوریتم در بهینه‌سازی مسائل اطمینان داشت.

۴- طراحی آنتن تک قطبی میکرواستریپ مسطح با ساختاری ساده با کاربرد باند فرکانسی ۳/۳ تا ۳/۸ گیگاهرتز

این تحقیق یک آنتن تک‌باند تک قطبی میکرواستریپ^۱ مسطح با ساختاری ساده را ارائه می‌کند که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی چند هدفه توضیح داده شده برای کاربرد باند فرکانسی ۳/۳ تا ۳/۸ گیگاهرتز طراحی شده است. آنتن از یک ساختار ساده بر روی یک برد مدار چاپی FR4 با ضریب گذرشی ۴/۳ و مماس تلفات ۰/۰۲ ساخته شده است. ابعاد آنتن پیشنهادی $27 \times 24.5 \times 1.6$ میلی‌متر مکعب است. در واقع، آنتن تک قطبی از یک پیچ تشعشعی پایه مرغی و یک صفحه زمین مستطیلی شکل ناقص و اصلاح شده تشکیل شده است که در آن الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای تصمیم را تغییر می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی فرکانس‌های تشدید و پهنای باند آنتن را تنظیم می‌کند. شکل ۳ ساختار و مراحل طراحی آنتن تک قطبی چاپی پیشنهادی را نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان از الگوریتم معرفی شده جهت بهینه‌سازی ویژگی‌های S_{11} و پهنای باند آنتن تک قطبی مسطح پیشنهادی با ساختار ساده استفاده نمود.



شکل ۴: شماتیک آنتن پیشنهادی به همراه شکل ساخته شده آن، (a) شماتیک آنتن پیشنهادی، (b) نمای آنتن ساخته شده از بالا، (c) نمای آنتن ساخته شده از پایین و (d) نمای جانبی شماتیک آنتن پیشنهادی.

Figure 4. Schematic of the proposed antenna with its fabricated form: (a) schematic of the proposed antenna, (b) top view of the fabricated antenna, (c) bottom view of the fabricated antenna, and (d) side view of the schematic of the proposed antenna.

در این ساختار متغیرهای تصمیم $R_1, R_2, L_1, W_1, L_a, W_g, \theta$ پارامترهای آنتن پیشنهادی برای اعمال تنظیم توسط الگوریتم پیشنهادی هستند. با تغییر پارامترهای یاده شده در آنتن پیشنهادی توسط الگوریتم، می‌توان ویژگی‌های الکترومغناطیسی آن را بهینه کرده و در مقادیر مورد نیاز تنظیم کرد. در اولین اجرای الگوریتم، متغیرهای تصمیم به صورت تصادفی مقدار دهی می‌گردند. هر چند در اجراهای بعدی الگوریتم، این مقادیر هدفمندتر توسط الگوریتم پیشنهادی مقدار دهی می‌شوند. در جدول شماره ۱، مقادیر بهینه استخراج شده توسط الگوریتم برای متغیرهای تصمیم ذکر شده است. بنابراین با تنظیم مقادیر متغیرهای تصمیم بر روی مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم، ویژگی‌های مورد نیاز برای آنتن پیشنهادی در بهترین حالت حاصل می‌گردد.

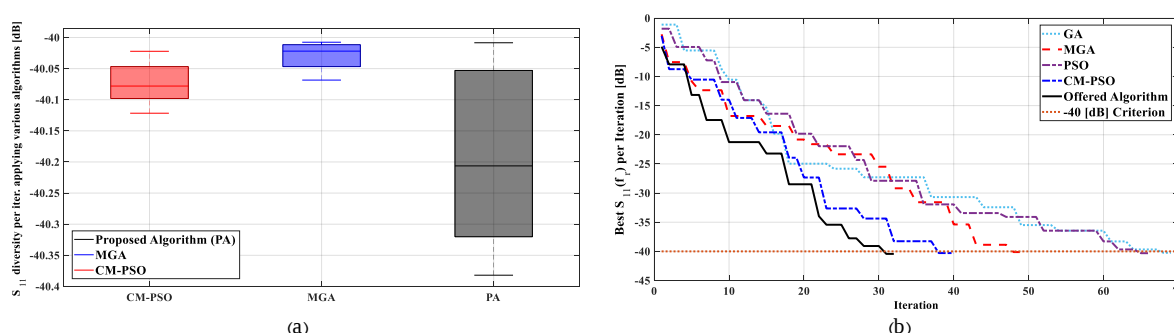
¹ Microstrip

جدول ۱: مقادیر بهینه شده برای متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم پیشنهادی.

Table 1: Optimized values for decision variables by the proposed algorithm.

decision variables	Value in millimeters or degrees	decision variables	Value in millimeters or degrees
R_1	2.01	R_2	56.7
L_1	5.62	W_1	1.81
L_a	6.43	W_g	10.25
θ	121.05	—	—

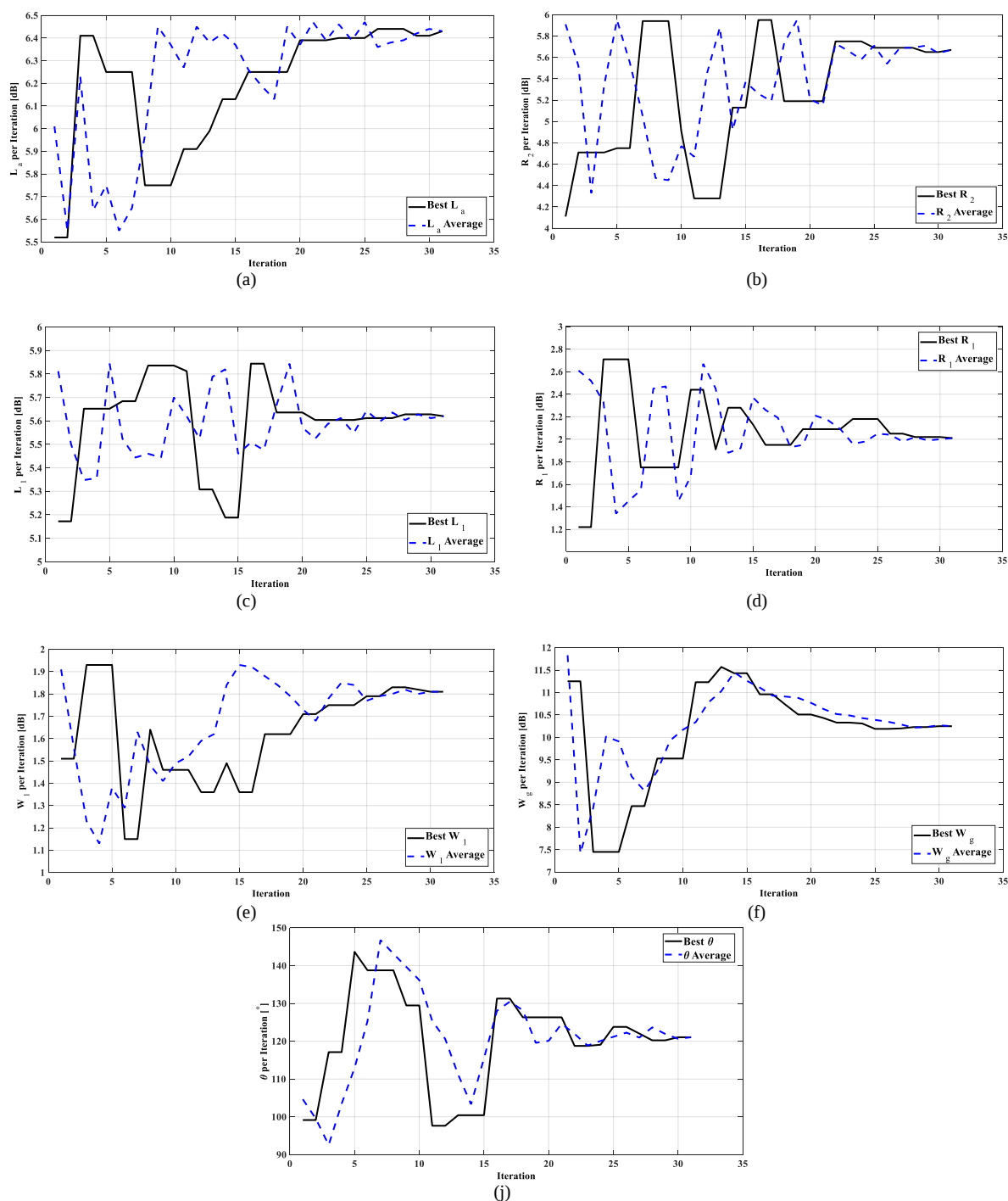
در شکل ۵ (a) مقایسه‌ای از عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های متداول نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی در شرایط یکسان سریع‌ترین همگرایی را داشته و در اجراهای مستقل به نتایج یکسان بیشتری میل می‌کند که این امر نشان دهنده قابلیت اطمینان‌پذیری بیشتر به الگوریتم مطرح شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر می‌باشد که الگوریتم پیشنهادی در کمترین زمان ممکن، یعنی کمترین تعداد بازگشت به نتایج نهایی و مورد نظر دست یافته است. در این شبیه‌سازی، همه الگوریتم‌های پیشنهادی به نتایج مورد نظر، هر چند با تعداد اجرای بیشتر نیل کرده‌اند. در این شبیه‌سازی از ۴۰ جستجوگر یا والدین در اجراهای مستقل الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. شایان ذکر می‌باشد که با توجه به نتایج شبیه‌سازی و نحوه اعمال تغییرات بر روی الگوریتم ژنتیک کلاسیک و همچنین شیوه ادغام آن با الگوریتم CM-PSO، بازدهی الگوریتم دورگه و چند هدفه پیشنهادی حاصل افزایش یافته است. شکل ۵ (b) نیز با گس پلات یا بازه همگرایی الگوریتم‌ها را با هم مقایسه می‌کند. با توجه به شکل، الگوریتم پیشنهادی در شرایط یکسان به بهترین نتایج نهایی میل کرده است.



شکل ۵: همگرایی و با گس پلات S_{11} که (a) مقایسه با گس پلات الگوریتم‌های CM-PSO و MGA با الگوریتم پیشنهادی، (b) نرخ همگرایی به S_{11} مناسب.

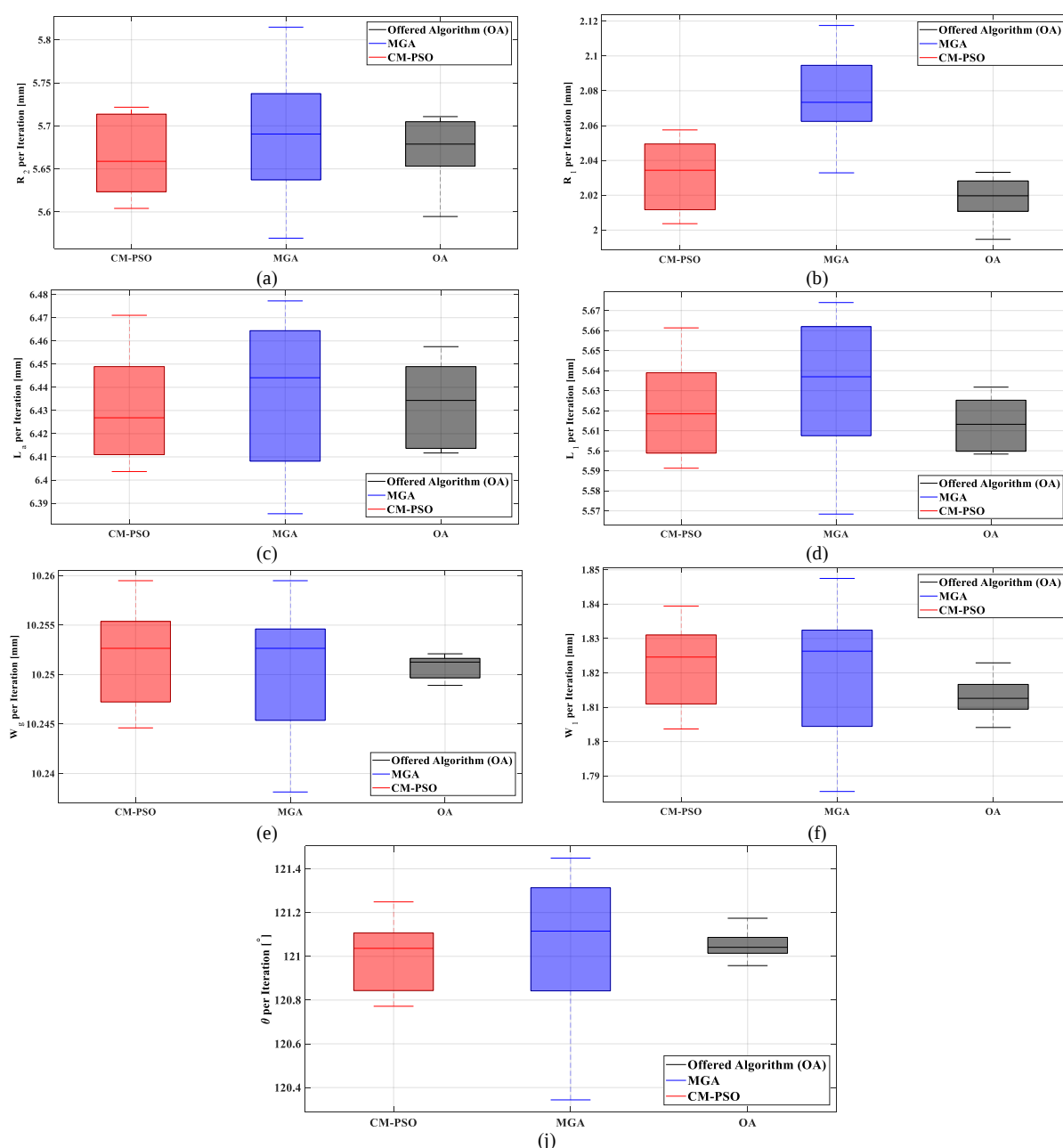
Figure 5. Convergence and bugsplot of S_{11} , (a) Bugsplot comparison of CM-PSO and MGA algorithms with the proposed algorithm, (b) Convergence rate to suitable S_{11}

شکل ۶ نرخ همگرایی متغیرهای تصمیم در الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که همه متغیرهای تصمیم بعد از ۲۵ بار اجرا یا بازگشت، به نتایج نهایی نزدیک شده‌اند. بنابراین اجراهای بعدی فقط موجب دقیق‌تر شدن مقادیر یاد شده می‌شوند. همچنین این شکل میانگینی از متغیرهای تصمیم را در اجراهای مستقل نمایش می‌دهد که همگی به مقادیر نهایی نیل کرده‌اند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که این الگوریتم اطمینان‌پذیر بوده و در اجراهای مستقل، متغیرهای تصمیم همیشه به جواب درست میل می‌کنند. در این شبیه‌سازی نیز از ۴۰ جستجوگر یا والدین استفاده شده است. شکل ۷ بازه همگرایی متغیرهای تصمیم را در ۱۰ اجرای مستقل در شرایط یکسان با ۴۰ جستجوگر یا والدین را نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج، الگوریتم پیشنهادی معمولاً دارای بهترین جواب نهایی و کوچکترین بازه همگرایی می‌باشد که نشان دهنده قابلیت اطمینان‌پذیری بالای آن می‌باشد.



شکل ۶: همگرایی متغیرهای تصمیم به مقادیر نهایی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، (a) نرخ همگرایی R_1 به مقدار نهایی، (b) نرخ همگرایی R_2 به مقدار نهایی، (c) نرخ همگرایی L_1 به مقدار نهایی، (d) نرخ همگرایی L_a به مقدار نهایی، (e) نرخ همگرایی W_1 به مقدار نهایی، (f) نرخ همگرایی W_g به مقدار نهایی و (g) نرخ همگرایی θ به مقدار نهایی.

Figure 6. Convergence of decision variables to the final values using the proposed algorithm, (a) rate of convergence of R_1 to the final value, (b) rate of convergence of R_2 to the final value, (c) rate of convergence of L_1 to the final value, (d) rate of convergence L_a to the final value, (e) rate of convergence of W_1 to the final value, (f) rate of convergence of W_g to the final value and (g) rate of convergence of θ to the final value.

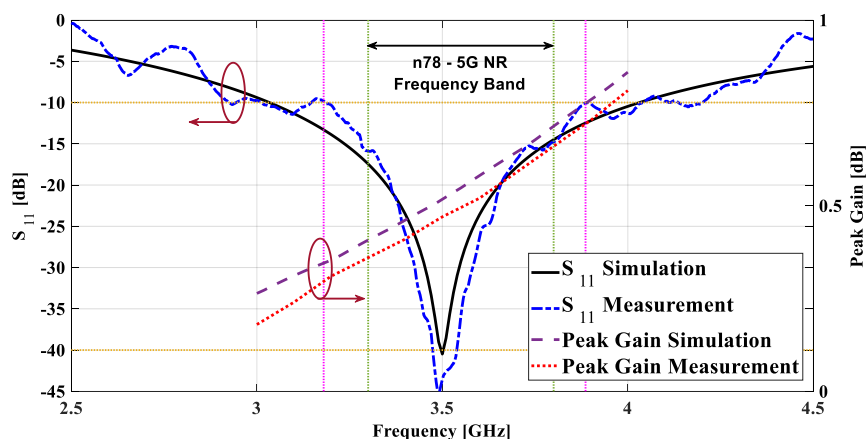


شکل ۷: بازه همگرایی (باگس پلات) متغیرهای تصمیم به مقادیر یکسان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در اجراهای مستقل و متفاوت، (a) بازه همگرایی R_2 به مقادیر نهایی، (b) بازه همگرایی R_1 به مقادیر نهایی، (c) بازه همگرایی L_a به مقادیر نهایی، (d) بازه همگرایی L_1 به مقادیر نهایی، (e) بازه همگرایی W_1 به مقادیر نهایی، (f) بازه همگرایی W_g به مقادیر نهایی و (j) بازه همگرایی θ به مقادیر نهایی.

Figure 7. Convergence interval (bugsplot) of decision variables to the same values using the proposed algorithm in independent and different executions, (a) R_2 convergence interval to final values, (b) R_1 convergence interval to final values, (c) L_a convergence interval to the final values, (d) the convergence interval of L_1 to the final values, (e) the convergence interval of W_1 to the final values, (f) the convergence interval of W_g to the final values and (j) the convergence interval of θ to the final values.

شکل ۸، مقادیر نهایی S_{11} و بیک گین را برای آنتن بهینه شده نهایی نمایش می دهد. با توجه به نتایج S_{11} حاصله برای آنتن بهینه شده پیشنهادی، می توان به عملکرد صحیح آن پی برد. آنتن بهینه شده پیشنهادی، باند فرکانسی $3/3$ تا $3/8$ گیگاهرتز با کاربردهای باند فرکانسی 78 نسل پنجم $5G$ را به خوبی پوشش می دهد. در واقع با توجه به نتایج اندازه گیری می توان گفت که این آنتن باند فرکانسی $3/18$ تا $3/88$ گیگاهرتز با معیار S_{11} کمتر از 10 دسی بل را پوشش داده است. با توجه به نتایج، مقادیر اندازه گیری شده به خوبی مقادیر شبیه سازی شده را تأیید می کند. همچنین، با توجه به خطاهای انسانی در اندازه گیری

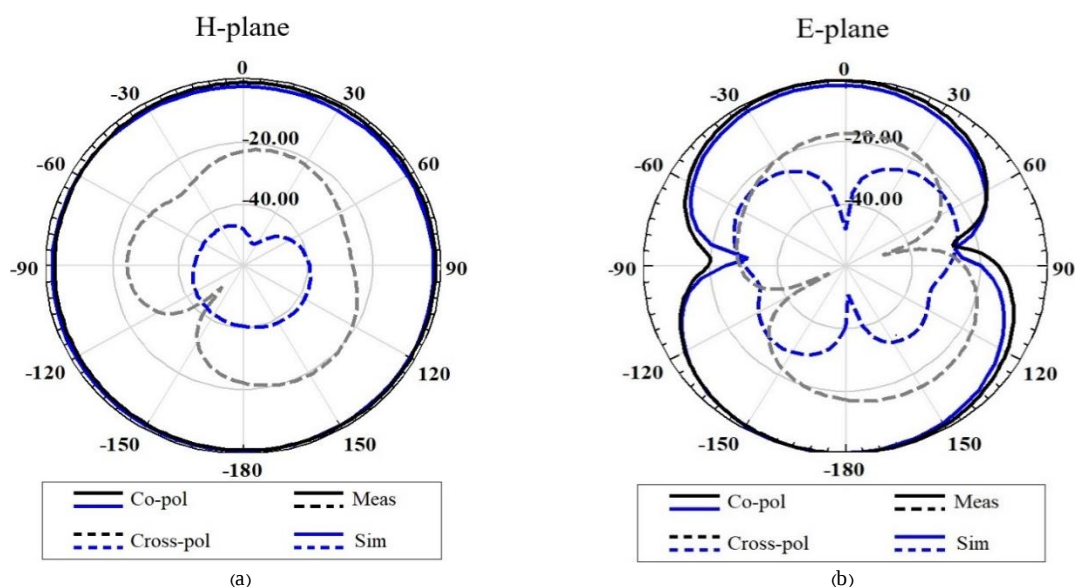
و سایر موارد، می‌توان از تفاوت ناچیز بین مقادیر شبیه‌سازی اندازه‌گیری چشم پوشی نمود. در این شکل، پیک‌گین اندازه‌گیری شده با دقت بسیار خوبی نتایج شبیه‌سازی شده را مورد تأیید قرار می‌دهد. در باند فرکانسی $3/3$ تا $3/8$ گیگاهرتز، آنتن پیشنهادی دارای ماکزیمم بهره‌ای مابین $0/30$ تا $0/72$ دسی‌بل می‌باشد. شایان ذکر می‌باشد که ماکزیمم بهره آنتن پیشنهادی در 10 نقطه به فاصله $0/1$ گیگاهرتز ابتدا اندازه‌گیری شده و سپس سایر مقادیر با استفاده از اینترپولیشن خطی^۱ بدست آمده‌اند.



شکل ۸: مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده S_{11} و Peak Gain برای آنتن پیشنهادی.

Figure 8. Simulated and measured values of S_{11} and Peak Gain for the proposed antenna.

شکل ۹، پترن‌های نرمال شده تشعشعی آنتن پیشنهادی را در دو صفحه E-Plane و H-Plane برای مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در فرکانس $3/5$ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، پترن‌های تشعشعی Co-pol حداقل 10 دسی‌بل بهتر از پترن‌های تشعشعی Cross-pol می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، آنتن پیشنهادی طراحی شده دارای پترن‌های پایدار می‌باشد.



شکل ۹: الگوهای نرمالیزه شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی در فرکانس رزونانس $3/5$ گیگاهرتز، (a) الگو تشعشعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در صفحه H-Plane، (b) الگو تشعشعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در صفحه E-Plane.

Figure 9. Simulated and measured normalized patterns of the proposed antenna at the resonance frequency of (a) simulated and measured radiation pattern in the H-Plane, (b) simulated and measured radiation pattern in the plane-Plane

¹ Linear Interpolation

در جدول شماره ۲، مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های مطرح شده در مقالات معتبر علمی برای طراحی آنتن‌های مختلف با الگوریتم‌های پیشنهاد شده ارائه شده است. با توجه به نتایج مقایسه، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی علیرغم سادگی آن و تعداد اندک محققین یا جمعیت‌های استفاده شده یکی از سریع‌ترین متدهای بهینه‌سازی در طراحی آنتن با دقت بسیار زیاد می‌باشد. در شکل ۱۰، نحوه اندازه‌گیری پارامترهای S_{11} ، گین و پترن تشعشعی آنتن بهینه‌شده پیشنهادی را می‌توان مشاهده نمود.

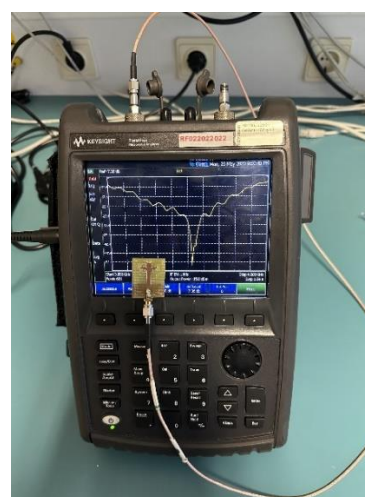
جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های الگوریتم‌ها و آنتن‌ها از سایر مقالات با روش و آنتن پیشنهادی.

Table 2: Comparison of the characteristics of algorithms and antennas from other papers with the proposed method and antenna.

Reference	Antenna Type	Type of Algorithms	Optimization Parameters	Simplicity or complexity of the algorithm	Number of returns for optimization	Number of researchers or populations
[16]	Microstrip Antenna	PSO	S_{11} Bandwidth and	simple	-	-
[17]	Microstrip Antenna	PSO	In-band radar cross section (RCS) reduction	simple	-	-
[18]	Yagi-Uda arrays	PSO	Forward gain, good front-to-back ratio, and 2:1 or better voltage standing wave ratio (VSWR)	simple	-	-
[19]	E-Shaped patch	DNN	Resonance frequency adjustment	Complex	-	-
[20]	Patch	DE NMR	Triple-band rejection characteristics	Complex	500	60 51
[21]	Conformal antenna array	IGA IPSO	Antenna size reduction Optimize the amplitude of the element current excitation of the spherical conformal array	Complex	2000	32
[22]	Monopole MIMO	CM-PSO	S_{11} and isolation	simple	25..30	100
[23]	Dipole MIMO	MCM CM-PSO AGA MCM	S_{11} and isolation	simple	25..30	40
[24]	Monopole	CM-PSO MGA MCM	S_{11} and isolation	simple	25..30	100
This Method	Monopole	CM-PSO MGA	S_{11} and isolation	simple	25..30	40



(a)



(b)

شکل ۱۰: نحوه اندازه‌گیری پارامترهای S_{11} ، گین و پترن تشعشعی آنتن بهینه‌شده پیشنهادی، (a) اندازه‌گیری پارامترهای گین و پترن تشعشعی در اتاق آنتن، (b) اندازه‌گیری پارامتر S_{11} با استفاده از N9918A KEYSIGHT Network Analyzer.

Figure 10. Measure S_{11} parameters, gain, and radiation pattern of the proposed optimized antenna, (a) gain and radiation pattern parameters in the antenna room, (b) measurement of S_{11} parameter using N9918A KEYSIGHT Network Analyzer.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه الگوریتم بهینه سازی ترکیبی چند هدفه جدیدی را معرفی می کند تا خواص الکترومغناطیسی یک آنتن با نیازهای مشخص قبلی را بهبود ببخشد. این الگوریتم شامل نقشه های آشوبی ترکیب شده است تا آن را قابل اعتماد و سریع تر کند. در واقع، الگوریتم ترکیبی CM-PSO و یک MGA نوآورانه با استفاده از یک نقشه آشوبی ترکیبی منحصر به فرد ادغام شده است. بنابراین در این مقاله، یک آنتن تک قطبی مسطح با ساختار ساده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی جدید در کمترین زمان ممکن طراحی شده است. الگوریتم طراحی شده، اندازه ۷ قسمت مختلف آنتن فوق را به عنوان ورودی با نام متغیرهای تصمیم دریافت کرده و آنها را طوری تغییر می دهد که S_{11} بهینه شده آن کمتر از -10 - دسی بل در باند فرکانسی $3/3$ تا $3/8$ گیگاهرتز و کمتر از -40 - دسی بل در فرکانس رزونانس $3/5$ گیگاهرتز با کاربردهای باند فرکانسی n78 نسل پنجم NR باشد. همچنین، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با استفاده از چندین تابع معیار مورد تأیید قرار گرفته است. با توجه به نتایج اخذ شده برای متغیرهای تصمیم در الگوریتم پیشنهادی، مشاهده می شود که کلیه متغیرهای تصمیم به مقادیر یکسان در اجراهای مستقل میل می کنند. علاوه بر این، الگوریتم پیشنهادی جدید از ادغام پیچیده الگوریتم های CM-PSO و MGA اجتناب کرده و از توابع آشوب ناک برای افزایش کارایی الگوریتم مطرح شده استفاده کرده است.

مراجع

- [1] M. Wetter and J. Wright, "A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for no smooth simulation-based optimization," *Building and Environment*, vol. 39, no. 8, pp. 989–999, 2004, doi: [10.1016/j.buildenv.2004.01.022](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.022).
- [2] S. Jin, H. Lee and J. Jeong, "Fast partial distortion elimination algorithm based on hadamard probability model," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 1, 2008, doi: [10.1049/el:20082872](https://doi.org/10.1049/el:20082872).
- [3] Y. -C. Lin, M. Clauß and M. Middendorf, "Simple Probabilistic Population-Based Optimization," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 2, pp. 245-262, April 2016, doi: [10.1109/TEVC.2015.2451701](https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2451701).
- [4] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, April 1995, doi: [10.1109/74.382334](https://doi.org/10.1109/74.382334).
- [5] S. M. Mikki and A. A. Kishk, "Quantum Particle Swarm Optimization for Electromagnetics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 10, pp. 2764-2775, Oct. 2006, doi: [10.1109/TAP.2006.882165](https://doi.org/10.1109/TAP.2006.882165).
- [6] E. BouDaher and A. Hoorfar, "Electromagnetic Optimization Using Mixed-Parameter and Multiobjective Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1712-1724, April 2015, doi: [10.1109/TAP.2015.2398116](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2398116).
- [7] S. M. Mikki and A. A. Kishk, "Particle swarm optimization: A physics-based approach," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 3, pp. 1–103, 2008, doi: [10.2200/s00110ed1v01y200804cem020](https://doi.org/10.2200/s00110ed1v01y200804cem020).
- [8] K. Kaboutari, A. Zabihi, B. Virdee and M. Salmasi "Microstrip patch antenna array with cosecant-squared radiation pattern profile," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 106, pp. 82–88, 2019, doi: [10.1016/j.aeue.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.003).
- [9] M.H. Teimouri, Ch. Ghobadi, J. Nourinia, K. Kaboutari, M. Shokri and B.S. Virdee "Broadband printed dipole antenna with integrated balun and tuning element for DTV application," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 148, p. 154161, 2022, doi: [10.1016/j.aeue.2022.154161](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154161).
- [10] M. Shokri et al., "A Printed Dipole Antenna for WLAN Applications with Anti-interference Functionality," *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Hangzhou, China, 2021, pp. 1486-1494, doi: [10.1109/PIERS53385.2021.9694670](https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694670).

- [11] M. M. Hasan and H. T. Mouftah, "Optimization of Watchdog Selection in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 94-97, Feb. 2017, doi: [10.1109/LWC.2016.2633990](https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2633990).
- [12] L. Cao, Y. Cai and Y. Yue, "Swarm Intelligence-Based Performance Optimization for Mobile Wireless Sensor Networks: Survey, Challenges, and Future Directions," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 161524-161553, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2951370](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951370).
- [13] D. Cao, A. Modiri, G. Sureka and K. Kiasaleh, "DSP Implementation of the Particle Swarm and Genetic Algorithms for Real-Time Design of Thinned Array Antennas," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1170-1173, 2012, doi: [10.1109/LAWP.2012.2220514](https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2220514).
- [14] A. Modiri and K. Kiasaleh, "Modification of Real-Number and Binary PSO Algorithms for Accelerated Convergence," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 214-224, Jan. 2011, doi: [10.1109/TAP.2010.2090460](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2090460).
- [15] F. Grimaccia, M. Mussetta and R. E. Zich, "Genetical Swarm Optimization: Self-Adaptive Hybrid Evolutionary Algorithm for Electromagnetics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 781-785, March 2007, doi: [10.1109/TAP.2007.891561](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.891561).
- [16] A. A. Minasian and T. S. Bird, "Particle Swarm Optimization of Microstrip Antennas for Wireless Communication Systems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6214-6217, Dec. 2013, doi: [10.1109/TAP.2013.2281517](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2281517).
- [17] B. Tütüncü, "Compact low radar cross-section microstrip patch antenna using particle swarm optimization," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, pp. 2288-2294, 2019, doi: [10.1002/mop.31893](https://doi.org/10.1002/mop.31893).
- [18] Z. Bayraktar, P. L. Werner and D. H. Werner, "The design of miniature three-element stochastic Yagi-Uda arrays using particle swarm optimization," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 22-26, 2006, doi: [10.1109/LAWP.2005.863618](https://doi.org/10.1109/LAWP.2005.863618).
- [19] D. Ustun, A. Toktas and A. Akdagli, "Deep neural network-based soft computing the resonant frequency of E-shaped patch antennas," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 102, pp. 54-61, 2019, doi: [10.1016/j.aeue.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.02.011).
- [20] G. Singh and U. Singh, "Triple band-notched UWB antenna design using a novel hybrid optimization technique based on DE and NMR algorithms," *Expert Systems with Applications*, vol. 184, p. 115299, 2021, doi: [10.1016/j.eswa.2021.115299](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115299).
- [21] W. T. Li, X. W. Shi, Y. Q. Hei, S. F. Liu and J. Zhu, "A Hybrid Optimization Algorithm and Its Application for Conformal Array Pattern Synthesis," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 10, pp. 3401-3406, Oct. 2010, doi: [10.1109/TAP.2010.2050425](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2050425).
- [22] V. Hosseini, Y. Farhang, K. Majidzadeh and Ch. Ghobadi, "Customized mutated PSO algorithm of isolation enhancement for printed MIMO antenna with ISM band applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 145, no. 2, p. 154067, 2022, doi: [10.1016/j.aeue.2021.154067](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.154067).
- [23] V. H. Hasbestan, Y. Farhang, K. Majidzadeh and C. Ghobadi, "Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm for Design a Printed MIMO Antenna With n78-5G NR Frequency Band Applications," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 68231-68242, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3292307](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292307).
- [24] V. Hosseini et al., "Dual-Band Planar Microstrip Monopole Antenna Design Using Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm," *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Prague, Czech Republic, 2023, pp. 467-475, doi: [10.1109/PIERS59004.2023.10221360](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221360).
- [25] M. Masdari, S. Barshande and S. Ozdemir, "CDABC: chaotic discrete artificial bee colony algorithm for multi level clustering in large scale WSNs," *The Journal of Supercomputing*, vol. 75, no. 1, pp. 7174-

7208 , 2019, doi: [10.1007/s11227-019-02933-3](https://doi.org/10.1007/s11227-019-02933-3).

- [26] S. Barshandeh and M. Haghzadeh, "A new hybrid chaotic atom search optimization based on tree-seed algorithm and Levy flight for solving optimization problems," *Engineering with Computers*, vol. 37, pp. 3079–3122, 2020, doi: [10.1007/s00366-020-00994-0](https://doi.org/10.1007/s00366-020-00994-0).