



فصل نامه تخصصی مهندسی مخابرات جنوب

صاحب امتیاز : دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

سر دبیر:	دکتر محمد ناصر مقدسی	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
مدیر مسئول :	دکتر نجمه چراغی شیرازی	دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
مدیر داخلی :	دکتر روزبه حمزه ثیان	دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
دبیر تخصصی:	دکتر عبدالرسول قاسمی	دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

اعضای هیئت تحریریه:

دکتر محمد ناصر مقدسی	استاد	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
دکتر همایون عریضی	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر سراج الدین کاتبی	استاد	دانشگاه شیراز
دکتر ابراهیم عبیری	استاد	دانشگاه صنعتی شیراز
دکتر کریم محمدی	استاد	دانشگاه علم و صنعت
دکتر عبدالرضا نبوی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس تهران
دکتر مسعود دوستی	دانشیار	دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
دکتر علیرضا بهراد	استاد	دانشگاه شاهد
دکتر محمد مردانه	استاد	دانشگاه صنعتی شیراز
دکتر غضنفر شاهقلیان	استاد	دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
دکتر رمضانعلی صادقزاده	استاد	دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دکتر اسماعیل نجفی اقدم	استاد	دانشگاه صنعتی سهند تبریز
دکتر مجتبی نجفی	دانشیار	دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
دکتر بال ویردی	استاد	دانشگاه متروپولیتن لندن
دکتر محمد علی بخشی کناری	استاد	دانشگاه رم، ایتالیا
دکتر حمیدرضا عرب نیا	استاد	دانشگاه جورجیا
دکتر علی تیموری	دانشیار	دانشگاه ادینبرا اسکاتلند

نشانی : بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، حوزه معاونت پژوهشی، دفتر مجله تخصصی مهندسی مخابرات جنوب

فکس: ۰۷۷۳۳۵۵۵۴۱۳

تلفن: ۰۹۱۰۷۸۳۷۴۲۰

شاپا الکترونیکی: ۹۲۳۱-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://jce.bushehr.iau.ir>

نشانی الکترونیکی: jce@iaubusher.ac.ir - jce.iaub@gmail.com

نشریه در پایگاههای ملی و بین المللی زیر نمایه شده است:



این مجله بر اساس مجوز انتشار شماره ۸۷/۴۲۲۰۹۲ تاریخ ۸۹/۱۰/۲۲ مدیر کل دفتر گسترش تولید علم دانشگاه آزاد اسلامی انتشار می یابد.



فهرست

- ۱..... مقایسه عملکرد دو آنتن تراهرتز بر پایه ی ساختارهای نوری جهت تشخیص بافت سرطانی.....
محمد طولابی؛ مهدی خطیر؛ محمد ناصر مقدسی؛ نسرين امیری
- ۲۱..... تحلیل و شبیه سازی مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی در سیستم ریز شبکه.....
غضنفر شاهقلیان؛ محمدرضا مرادیان؛ سید محمدعلی زنجانی
- ۳۶..... جمع کننده کامل برگشت پذیر با تأخیر کم و کارآمد بر اساس گیت های تافولی.....
سیده فاطمه دیماد؛ نبی اله شیری؛ فرشاد پسران
- ۵۲..... بهینه سازی تعداد زیر حامل های فعال و صورت فلکی مدولاسیون M-PAM برای سیستم های OFDM-IM.....
فرشاد جلیلی خراجو؛ سیدهادی سیدمعصومیان چرندابی
- ۷۰..... بهبود الگوریتم های بهینه سازی اجتماع ذرات و تکامل تفاضلی با استفاده از نظریه چانه زنی نش.....
مرضیه دادور؛ حمیدرضا نویدی؛ حمید حاج سید جوادی؛ میترا میرزازایی
- ۹۴..... شناسایی حملات DDoS در سوئیچ های SDN با رویکرد یادگیری عمیق و هوش گروهی.....
محسن اقبالی؛ محمدرضا ملاخلیلی میبدی
- ۱۲۱..... طراحی آنتن تک قطبی مسطح بهینه شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند منظوره ترکیبی و توابع آشوبناک.....
وحید حسینی؛ یوسف فرهنگ؛ کامبیز مجیدزاده؛ چنگیز قبادی

Comparison of the Performance of Two Terahertz Antennas Based on Photonic Structures for Cancer Tissue Detection

Mohammad Toolabi¹ | Mehdi Khatir² | Mohammad Naser-Moghaddasi³ | Nasrin Amiri⁴

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
m.toolabi@iau.ac.ir

²Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
khatir@iau.ac.ir

³Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
mn.moghaddasi@srbiau.ac.ir

⁴Electrical and Computer Engineering Department, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
n_amiri@azad.ac.ir

Correspondence

Mehdi Khatir, Assistant Professor of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
khatir@iau.ac.ir

Main Subjects:

Specific Directional Antenna

Paper History:

Received: 18 March 2024

Revised: 6 May 2024

Accepted: 7 May 2024

Abstract

This article proposes the design and performance comparison between wideband Vivaldi antenna and a dual-band log-periodic antenna for cancer detection with novel arrangements of photonic crystals, metasurfaces, and grating reflectors. In the Vivaldi structure, the photonic crystal walls are implemented on both sides of the antenna to provide an electrical shield to focus energy for gain enhancement and antenna directivity as well as sidelobe reduction. The front-to-back ratio is another issue for this antenna where toothed elements are used as reflectors to reduce the antenna's backlobe. This antenna covers the frequency range of 0.5-2 THz with a maximum gain of 8.8 dBi. The proposed antenna is used for breast and skin cancer detection modeled by a Debye 2nd order model. In the second structure, a log-periodic toothed antenna is used as the radiator along with photonic crystals and metasurfaces to improve antenna directivity and reduce the F/B ratio. In this structure, the metasurface is designed as a fractal disk to also exhibit dual-band characteristics. The maximum antenna gain is increased to 11.5 dBi with near 90% efficiency. Reflection and transmission values, pulse response, and phase change of healthy and cancerous tissues are used for cancer detection.

Keywords: Antenna, Photonic crystals, Grating reflector, Cancer spectroscopy, Terahertz, Metasurfaces terms.

Highlights

- Combining photonic crystals and metasurface structure to use logarithmic periodic antenna structure.
- Introducing a novel configuration of Vivaldi antennas using periodic structures, aiming to reduce sidelobes, and enhance directivity.
- Presenting a cancer tissue detection model using antenna output to design a data processing system.
- Employing directive antennas, metasurfaces, and shielding to generate a directional antenna pattern and detect cancerous tissue.

Citation: M. Toolabi, M. Khatir, M. Naser-Moghaddasi, and N. Amiri, "Comparison of the Performance of Two Terahertz Antennas Based on Photonic Structures for Cancer Tissue Detection," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 1–20, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1332, [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

Microstrip antennas are widely recognized for their advantages, including their low profile, low cost, ease of fabrication, and compatibility with matching circuits [1]. Recently, this type of antenna has gained significant attention for applications in the terahertz (THz) frequency range [2]. The THz frequency range, situated between microwave and infrared frequencies, spans from 0.1 to 10 THz [3]. This range is particularly promising for THz imaging in medical applications, such as the early detection of cancer cells. The non-ionizing nature and low phonon energy of THz waves make them safe for human tissue, as they do not produce harmful effects on the human body [4].

Gain is a critical factor in the design of antennas for THz technology. To address this, various techniques have been proposed, including metamaterial near-zero structures [5], lenses [6], and periodic structures for High Input Resistance (HIR) [7]. In the context of THz systems for cancer diagnosis, the design of a directional antenna is a crucial component. THz antennas can be utilized for medical sensing and cancer detection by leveraging the frequency shift differences between cancerous and normal tissues, which serve as a key indicator for cancer detection [8]. For instance, patch antennas integrated with metamaterials have been developed for breast cancer detection by analyzing pulse response differences [9].

2. Innovation and contributions

- **Integration of Photonic Crystals and Metasurfaces:** A novel resonator structure is created by combining photonic crystals with metasurfaces, transforming the toothed log-periodic antenna into a high-performance resonator. This structure is utilized as a probe for enhanced functionality.
- **Advanced Vivaldi Antenna Design:** A new Vivaldi antenna structure is proposed, incorporating photonic crystals and toothed reflectors to achieve effective shielding, reduced sidelobes, and improved directivity.
- **Cancer Detection Model:** A model is introduced to differentiate cancerous tissue from healthy tissue using antenna output data, enabling the design of a data processing system for cancer diagnosis.

3. Materials and Methods

The antenna structures were simulated using CST Microwave Studio software, employing the time-domain method for analysis.

4. Results and Discussion

Several parameters were utilized to distinguish between cancerous and healthy tissues:

- **S21 Parameter:** The transmission coefficient (S21) is illustrated in Figure (a).
- **Phase Response:** The phase delay, depicted in Figure (b), serves as a diagnostic factor for identifying cancerous versus healthy tissue.
- **Pulse Response:** The transmission pulse response, shown in Figure (c), reveals distinct time delays and magnitude changes between healthy and cancerous tissues, providing a clear basis for detection.

5. Conclusion

In the first part of this study, a Vivaldi antenna was designed to operate within the frequency range of 0.5 to 2 THz. By incorporating photonic crystal structures around the antenna, significant improvements in bandwidth and gain were achieved. In the second part, a microstrip toothed log-periodic antenna was designed, utilizing photonic crystals and a metasurface to achieve a structure with enhanced bandwidth, quality factor, and a directional radiation pattern.

6. Acknowledgement

The meticulous review process conducted by the paper reviewers has played a crucial role in strengthening the methodology, refining the arguments, and improving the overall clarity and coherence of the research. I am grateful for the valuable contributions made by the reviewers in shaping this paper into its final form. Also, I want to express my heartfelt appreciation to all the participants who generously shared their time, experiences, and insights for this research. Without their willingness to contribute, this study would not have been possible.

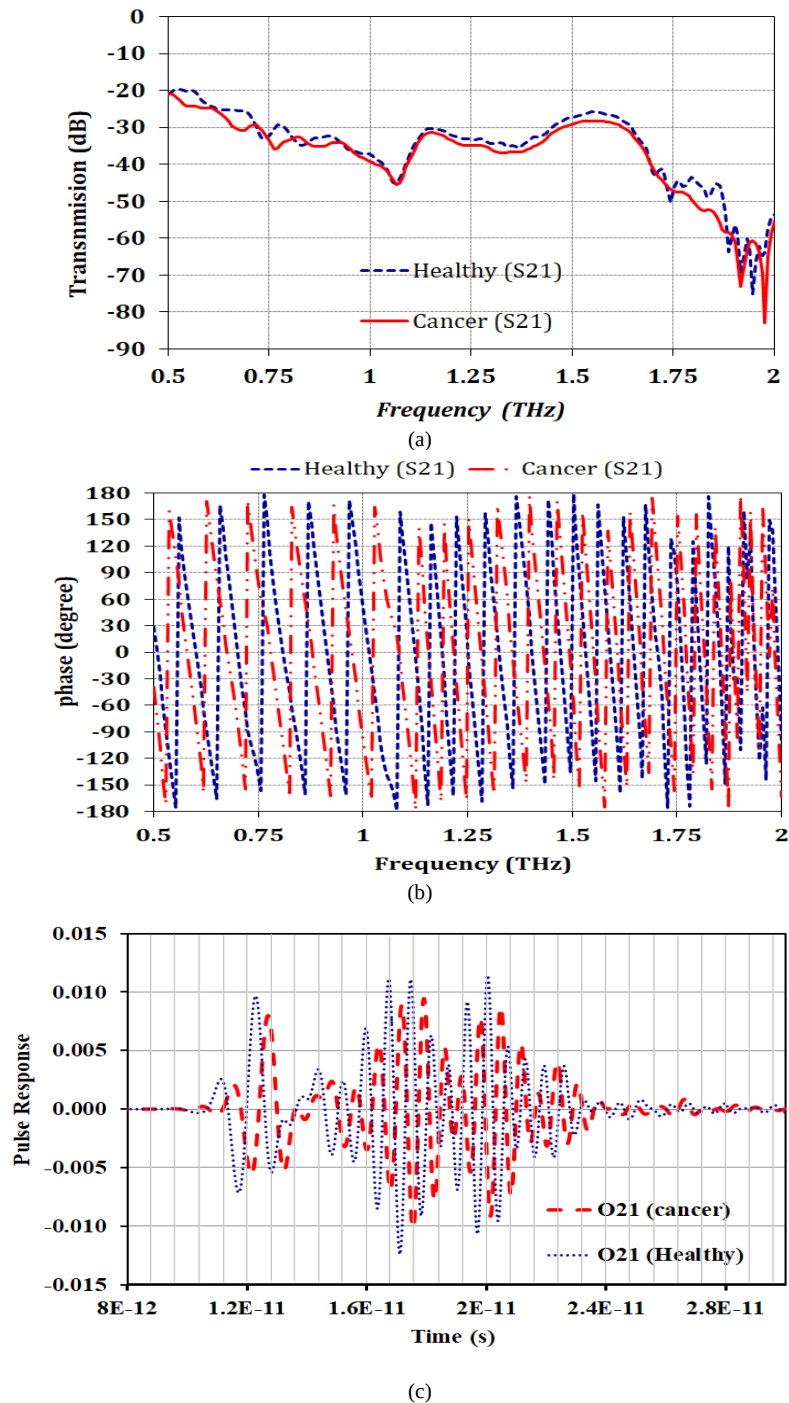


Figure. The response of the antenna for cancer and healthy tissue (a) The transmission (S_{21}) (b) The phase of transmission (c) The pulse response of the transmission

References

- [1] M. Shirzadian, J. Rashed-Mohassel, M. Naser-Moghaddasi and M. Khatir, "Design of a wideband microstrip nanoantenna array," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 1-9, 2019, doi: [10.1007/s11082-019-1852-6](https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6).
- [2] F. Kazemi, "Dual-band compact fractal THz antenna based on CRLH-TL and graphene loads," *Optik*, vol. 206, Article Number: 164369, 2020, doi: [10.1016/j.ijleo.2020.164369](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164369).
- [3] A. Nejati, R. A. Sadeghzadeh, and F. Geran, "Effect of photonic crystal and frequency selective surface implementation on gain enhancement in the microstrip patch antenna at terahertz frequency," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 449, pp. 113-120, 2014, doi: [10.1016/j.physb.2014.05.014](https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.05.014).

- [4] Z. S. Tabatabaieian, "Developing THz metasurface with Array rectangular slot with High Q-factor for early skin cancer detection," *Optik*, vol. 264, Article Number: 169400, 2022, doi: [10.1016/j.ijleo.2022.169400](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169400).
- [5] M.-M. Seyedsharbaty and R. A. Sadeghzadeh, "Antenna gain enhancement by using metamaterial radome at THz band with reconfigurable characteristics based on graphene load," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 6, no. 221, 2017, doi: [10.1007/s11082-017-1052-1](https://doi.org/10.1007/s11082-017-1052-1).
- [6] N. T. Yardimci, D. Turan, S. Cakmakyapan and M. Jarrahi, "A high-responsivity and broadband photoconductive terahertz detector based on a plasmonic nanocavity," *Applied Physics Letters*, vol. 113, no. 25, Article Number: 251102, 2018, doi: [10.1063/1.5066243](https://doi.org/10.1063/1.5066243).
- [7] K. Han, T. Khang-Nguyen, I. Park and H. Han, "Terahertz Yagi-Uda antenna for high input resistance," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 31, no. 4, pp. 441-454, 2010, doi: [10.1007/s10762-009-9596-1](https://doi.org/10.1007/s10762-009-9596-1).
- [8] F. Kazemi, "High Q-factor Compact and Reconfigurable THz Aperture AntennaBased on Graphene Loads for Detecting Breast Cancer Cells," *Superlattices and Microstructures*, vol. 153, Article Number: 106865, 2021, doi: [10.1016/j.spmi.2021.106865](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106865).
- [9] G. Geetharamani and T. Aathmanesan, "Metamaterial inspired THz antenna for breast cancer detection," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 1-9, 2019, doi: [10.1007/s42452-019-0601-6](https://doi.org/10.1007/s42452-019-0601-6).

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

Author Contributions: Mohammad Toolabi: made the simulations, and wrote the manuscript with support from all authors; Mehdi Khatir: developed the theory, supervised the project; Mohammad Naser-Moghaddasi: verified the analytical methods; Nasrin Amiri: contributed to the final version of the manuscript.

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

مقایسه عملکرد دو آنتن تراهرتز بر پایه‌ی ساختارهای نوری جهت تشخیص بافت سرطانی

محمد طولابی^{۱*} | مهدی خطیر^۲ | محمد ناصر مقدسی^۳ | نسرين امیری^۴

چکیده:

این مقاله مقایسه عملکرد بین دو آنتن ویوالدی (Vivaldi) با پهنای باند وسیع (بیش از ۱۲۰ درصد پهنای باند) در فرکانس ۰/۵ تا ۲ تراهرتز و آنتن متناوب لگاریتمی با یک مشخصه دو باندهی در فرکانس‌های ۱/۲ و ۱/۵ تراهرتز را برای تشخیص سرطان با آرایش جدید ویژه بلورهای نوری (Photonic crystals)، فراسطح (Metasurface) و بازتابنده دندانهای (Grating) پیشنهاد می‌کند. در ساختار ویوالدی دیواره‌های بلورهای نوری در دو طرف آنتن اجرا می‌شوند تا یک سپر الکتریکی برای تمرکز انرژی برای افزایش بهره و جهت‌دهی آنتن و کاهش لوب جانبی ایجاد کنند. نسبت جلو به عقب (Front/Back) مشکل دیگری برای این آنتن است که در آن از عناصر دندانهای به عنوان بازتابنده برای کاهش لوب پشتی آنتن استفاده می‌شود. این آنتن بازه فرکانسی ۰/۵ تا ۲ تراهرتز را با حداکثر بهره ۸/۸ دسی بل پوشش می‌دهد. آنتن پیشنهادی برای تشخیص سرطان سینه و پوست که توسط مدل دیبای (Debye) مرتبه دوم مدل‌سازی شده‌اند، استفاده می‌شود. در ساختار دوم از یک آنتن دندانهای متناوب لگاریتمی به عنوان تشعشع‌کننده و از بلورهای نوری و فراسطح برای افزایش جهت‌دهی آنتن و کاهش نسبت جلو به عقب استفاده می‌شود. در این ساختار، فراسطح به شکل دیسک فرکتال (Fractal) طراحی شده است تا ویژگی دو باندهی را نیز نشان دهد. حداکثر بهره آنتن به ۱۱/۵ دسی بل افزایش یافته و راندمان نزدیک به ۹۰ درصد است. از مقادیر بازتاب و انتقال، پاسخ پالس، و تغییر فاز بافت‌های سالم و سرطانی برای تشخیص سرطان استفاده می‌شود.

^۱ دانشجوی دکتری گروه الکترونیک و مخابرات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
m.toolabi@iau.ac.ir

^۲ استادیار گروه الکترونیک و مخابرات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
khatir@iau.ac.ir

^۳ استاد گروه الکترونیک و مخابرات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
mn.moghaddasi@srbiau.ac.ir

^۴ استادیار گروه الکترونیک و مخابرات، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
n_amiri@azad.ac.ir

نویسنده مسئول:

*مهدی خطیر، استادیار گروه الکترونیک و مخابرات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
khatir@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

آنتن جهتی خاص

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۸ اسفند ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها: آنتن، بلورهای نوری، بازتابنده دندانهای، تراهرتز، طیف سنجی سرطان، فراسطح.

تازه‌های تحقیق:

- ترکیب بلورهای نوری و ساختار فراسطح به منظور استفاده از ساختار آنتن متناوب لگاریتمی به عنوان یک پروب
- ساختار جدیدی از آنتن‌های ویوالدی با استفاده از ساختارهای متناوب جهت کاهش لوب‌های جانبی و جهت‌دهی بهتر
- ارائه الگوی تشخیص بافت سرطانی، با استفاده از خروجی آنتن‌ها جهت طراحی سیستم پردازش داده‌ها
- استفاده از آنتن‌های جهتی، فراسطح و حفاظ، جهت ایجاد الگوی آنتن جهتی و تشخیص بافت سرطانی

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

آنتن‌های میکرواستریپ^۱ به دلیل مزایایی از جمله سبک، کوچک، هزینه کم، ساخت آسان و سازگاری با مدارهای تطبیق معروف هستند [۱] و در حال حاضر، این نوع آنتن به شدت برای کاربرد تراهرتز مورد توجه قرار گرفته است [۲]. در واقع، محدوده فرکانس تراهرتز بین میکروویو و مادون قرمز در محدوده فرکانس ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز است [۳،۴] که در تصویربرداری تراهرتز برای اهداف پزشکی مانند تشخیص زودهنگام سلول‌های سرطانی بر اساس پرتوهای غیریونیزه و موج تراهرتز کم انرژی فونون^۲ در نظر گرفته می‌شود که هیچ اثر منفی بر بدن انسان ندارد [۵].

علاوه بر این، از فناوری تراهرتز برای ارتباطات پرسرعت تراهرتز [۶] استفاده شده است و آنتن نقش مهمی در این ساختارها دارد و انواع مختلفی از آنتن‌ها توسعه یافته‌اند. آنتن صفحه‌ای به عنوان آنتن باند باریک شناخته می‌شود [۷،۸] و ساختار شکاف باند نوری به آنتن صفحه‌ای اضافه شده است تا بهره و پهنای باند آنتن را افزایش دهد [۹،۱۰]. انواع دیگری از آنتن‌ها برای پهنای باند بیشتر و بهره بیشتر توسعه یافته‌اند، مانند آنتن یاگی-یودا^۳ [۱۱]، آنتن یاگی-یودا با گرافن به عنوان آنتن قابل تنظیم مجدد [۱۲] آنتن متناوب لگاریتمی [۱۳]، آنتن اسلات^۴ [۱۴]، و آنتن صفحه‌ای با گرافن برای کنترل پلاریزاسیون [۱۵].

بهره آنتن عامل مهمی در طراحی آنتن با فناوری تراهرتز است. بنابراین، روش‌های مختلفی مانند ساختار نزدیک به صفر فراماده^۵ [۱۶]، لنز [۱۷] و ساختار تناوبی برای مقاومت ورودی بالا^۶ [۱۸] پیشنهاد شده است. آنتن ویوالدی کاندیدای خوبی برای داشتن پهنای باند وسیع و بهره بالا است [۱۹]. بنابراین، انواع مختلفی از آنتن ویوالدی از جمله آنتی پودال^۷ [۲۰]، شکاف مخروطی [۲۱] و آنتن دوقطبی [۲۲] پیشنهاد شده است. برای طراحی ساختارهای تراهرتز برای تشخیص سرطان، طراحی آنتن جهت دار مهمترین بخش تشخیص است. از آنتن تراهرتز می‌توان برای سنجش پزشکی و تشخیص سرطان، بر اساس تفاوت تغییر فرکانس بین بافت سرطانی و سالم استفاده کرد [۲۳]. انواع مختلفی از آنتن‌ها مانند آنتن صفحه‌ای با فراماده، با مقایسه پاسخ پالس بافت سالم و سرطانی، برای تشخیص سرطان سینه استفاده می‌شوند [۲۴].

برای ساخت یک فراماده، از یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت کم به عنوان لایه اصلی که همان زیرلایه نامیده می‌شود، استفاده شده و با قرارگیری لایه‌های فلزی بر روی سطح آن یک تشدیدکننده به وجود می‌آید. استفاده از لایه‌های فلزی روی دی‌الکتریک سبب به وجود آمدن مدارات سلفی خازنی در کل حجم یک سلول واحد می‌شود، بطوری‌که مدار معادل آن دارای یک فرکانس تشدید باشد. کاربرد این ساختارها در طراحی موجبرها، فیلترها، کوپلرها و بخصوص در مبحث آنتن‌ها به سرعت در حال گسترش است [۲۵].

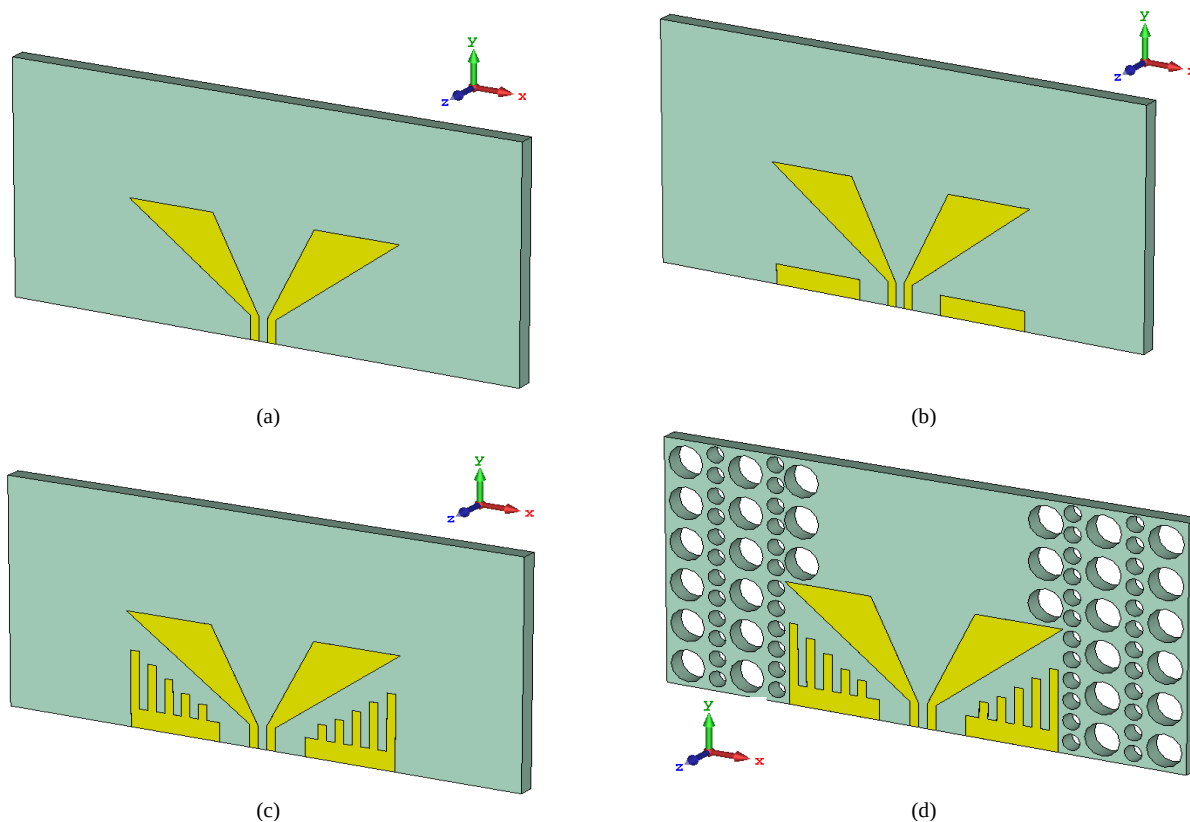
در این مقاله، طراحی و مقایسه بین دو ساختار ویوالدی و متناوب لگاریتمی ارائه شده و نشان داده شده است که عملکرد هردو آنتن با اضافه شدن ساختارهای نوری بهبود یافته است، ساختارهای نهایی برای تشخیص بافت سالم و سرطانی استفاده می‌شوند و بر اساس مدل دیبای مرتبه دوم در طیف تراهرتز مدل می‌شوند. برای شبیه‌سازی ساختار فوق از نرم افزار طراحی میکروویو^۸ و روش حوزه زمان^۹ استفاده شده است.

۲- ساختار ویوالدی: (استفاده از ساختار چندلایه برای آنتن‌هایی با پهنای باند بیشتر)

شکل ۱ (a) یک ساختار آنتن ساده دو قطبی ویوالدی از نوع موج رونده را نشان می‌دهد، در شکل ۱ (b) یک بازتابنده ساده به ساختار اضافه شده و در شکل ۱ (c) یک بازتابنده دندان‌های برای بررسی اثر دندان‌های شکل به ساختار اضافه شده است و در

¹ Microstrip² Phonon³ Yagi-Uda⁴ Slot⁵ Near-Zero Structure Yagi-Uda⁶ HIR⁷ Antipodal⁸ CST Microwave Studio⁹ Time-Domain

نهایت مطابق شکل ۱ (d) دو ردیف بلورهای نوری طراحی می‌شوند تا پهنای باند وسیع‌تری را فراهم کنند و همچنین از افزایش ابعاد آنتن جلوگیری شود.

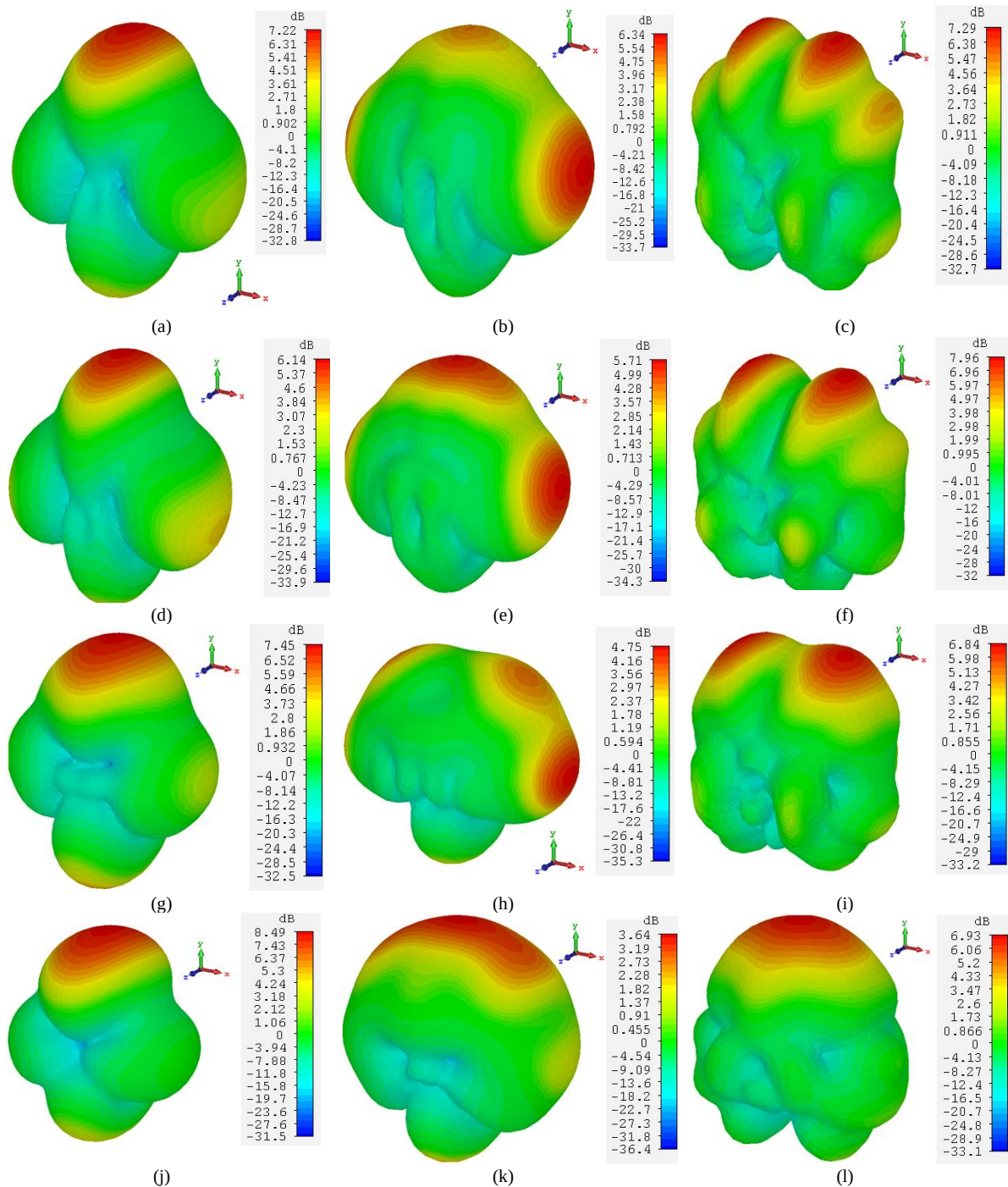


شکل ۱: شماتیک آنتن ویوالدی طراحی شده (a) آنتن اولیه، (b) آنتن ویوالدی با صفحات بازتابنده، (c) آنتن ویوالدی با بازتابنده دندانهای (d) آنتن ویوالدی نهایی با بلور نوری و بازتابنده دندانهای

Figure 1. The schematic of the proposed antenna with grating reflector and photonic crystal shield (a) Primary antenna, (b) Vivaldi antenna with reflectors, (c) Vivaldi antenna with grating, (d) Final Vivaldi antenna with photonic crystal and grating, (e) The final antenna geometry and design details

در شکل ۲ الگوی تابش آنتن در سه فرکانس برای چهار مرحله طراحی، مورد بررسی قرار گرفته است که فرکانس‌های اول، دوم و سوم عبارتند از ۱ تراهرتز، شکل ۲ (a, d, g, j)، ۱/۲ تراهرتز، شکل ۲ (b, e, h, k)، و ۱/۷ تراهرتز، شکل ۲ (c, f, i, l). در فرکانس ۱ تراهرتز، الگوی تابش آنتن جهت‌دار است، اما در فرکانس ۱/۲ تراهرتز، الگوی تابش دارای یک پرتو غالب در جهت اصلی و ۲ پرتو در جهت X (لوب‌های جانبی) است که نامطلوب است و بلورهای نوری برای حذف پرتو در جهت X مطلوب هستند. از سوی دیگر ساختار در فرکانس ۱/۷ تراهرتز دارای دو پرتو در جهت اصلی است که برای سیستم‌های رادار و تشخیص بافت سرطانی نامطلوب است. نقش بازتابنده ممکن است در بهبود بهره موثر باشد، اما وجود میدان در جهت X و دو پرتو در جهت Y در ساختار دوم و سوم مشاهده می‌شود و با اضافه شدن بلورهای نوری، الگوی تابش آنتن کاملاً جهت‌دار می‌شود. لobe‌های جانبی و دوگانه آنتن به طور کامل حذف شده و یک آنتن جهت‌دار ایده‌آل در محدوده فرکانسی مورد نظر طراحی شده است.

مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات قبلی، موید موثر بودن ایده‌های ارائه شده در طراحی ساختار است، حداکثر بهره آنتن طراحی شده ۸/۸ دسی بل است که بیشتر از اکثر آنتن‌های این طیف است. در [۱۶]، بهره بالاتری تا ۱۱/۱ دسی بل به دست آمده است، اما آنتن ساختاری چند لایه دارد که پیچیدگی ساخت را دارد، در [۲۷] بهره ۶/۴۸ با پهنای باند ۵۳ درصد گزارش شده است و در [۱]، آنتن با بهره ۹/۹۴ گزارش شده است در حالی که پهنای باند آنتن تنها ۲۳ درصد است.



شکل ۲: مقایسه الگوی تابش برای چهار مرحله طراحی آنتن، (a) آنتن اولیه در ۱ ترهترتز، (b) آنتن اولیه در ۱/۲ ترهترتز، (c) آنتن اولیه در ۱/۷ ترهترتز، (d) آنتن ویوالدی با بازتابنده در ۱ ترهترتز، (e) آنتن ویوالدی با بازتابنده در ۱/۲ ترهترتز، (f) آنتن ویوالدی با بازتابنده در ۱/۷ ترهترتز، (g) آنتن ویوالدی با بازتابنده دندانهای در ۱ ترهترتز، (h) آنتن ویوالدی با بازتابنده دندانهای در ۱/۲ ترهترتز، (i) آنتن ویوالدی با بازتابنده دندانهای در ۱/۷ ترهترتز، (j) آنتن نهایی ویوالدی با بلورهای نوری و بازتابنده دندانهای در ۱ ترهترتز، (k) آنتن نهایی ویوالدی با بلورهای نوری و بازتابنده دندانهای در ۱/۲ ترهترتز، (l) آنتن نهایی ویوالدی با بلورهای نوری و بازتابنده دندانهای در ۱/۷ ترهترتز

Figure 2. Comparison of radiation pattern for 4 step of antenna design, (a) Primary antenna at 1 THz, (b) Primary antenna at 1.2 THz, (c) Primary antenna at 1.7 THz, (d) Vivaldi antenna with reflector at 1 THz, (e) Vivaldi antenna with reflector at 1.2 THz, (f) Vivaldi antenna with reflector at 1.7 THz, (g) Vivaldi antenna with grating at 1 THz, (h) Vivaldi antenna with grating at 1.2 THz, (i) Vivaldi antenna with grating at 1.7 THz, (j) Final Vivaldi antenna with photonic crystals and grating at 1 THz, (k) Final Vivaldi antenna With photonic crystals and grating at 1.2 THz, (l) Final Vivaldi antenna with photonic crystals and grating at 1.7 THz.

۳- مطالعه بافت

مدل مرتبه دوم دیبای را می‌توان برای تعریف بافت سالم و سرطانی همان‌طور که در رابطه ۱ نشان داده شده است مورد استفاده قرار داد [۲۸، ۲۹] در این معادله، ϵ_s ، ϵ_2 ، τ_1 و τ_2 به ترتیب گذردهی فرکانس بالا، ثابت گذردهی ساکن، گذردهی فرکانس متوسط، زمان استراحت آهسته، و زمان استراحت سریع بافت سرطانی هستند. در جداول ۱ و ۲، پارامترهای مدل دیبای مرتبه دوم بافت پوست و بافت سینه برای انواع سالم و سرطانی در طیف تراهرتز ارائه شده‌اند که از نتایج تجربی به دست آمده‌اند [۳۰].

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_2}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_2} \quad (1)$$

در شکل ۳ (a)، یک سیستم آزمایشی برای بررسی یک بافت سرطانی پوست در طیف تراهرتز نشان داده شده است [۳۰]. بر اساس سیستم آزمایشی قبلی و با توجه به مدل پیشنهادی برای سرطان‌ها، بافتی با ضخامت اولیه ۱۵۰ میکرومتر، بین دو آنتن که در فاصله λ (طول موج ۰/۵ تراهرتز برای فضای آزاد) از نمونه قرار دارند در نظر گرفته می‌شود. و نتایج مورد نیاز بازتاب، انتقال و سایر پارامترها استخراج می‌شوند.

جدول ۱: عوامل مدل‌سازی بافت پوست در طیف تراهرتز

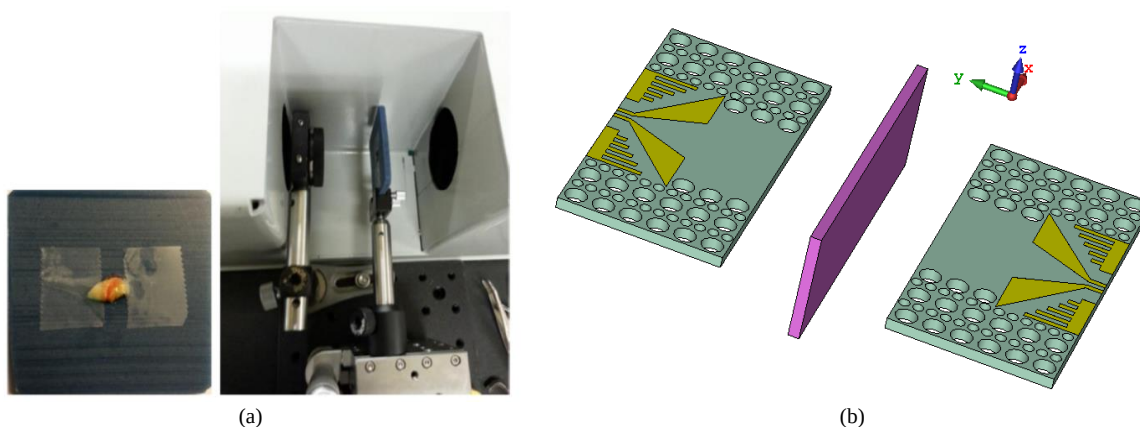
Table 1. The skin tissue modeling factors in the THz spectrum

τ_2 [Ps]	τ_1 [Ps]	ϵ_2	ϵ_s	ϵ_∞	Skin
1	7	5	25	3.4	Normal Tissue
1	10	6.2	40	4.2	Cancerous Tissue

جدول ۲: عوامل مدل‌سازی بافت سینه در طیف تراهرتز

Table 2. The breast tissue modeling factors in the THz spectrum

τ_2 [Ps]	τ_1 [Ps]	ϵ_2	ϵ_s	ϵ_∞	Breast
0.07	10.3	3.9	76.5	2.1	Normal Tissue
0.08	9.1	4.3	77.9	2.5	Cancerous Tissue

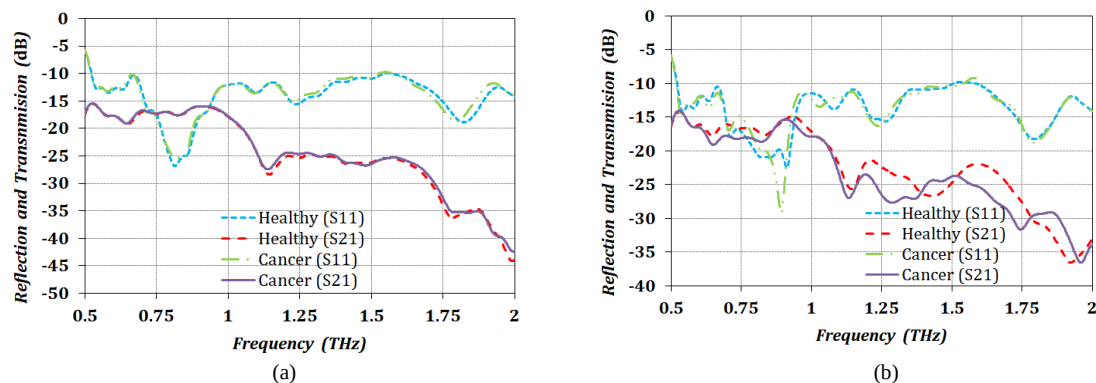


شکل ۳: (a) سیستم عملی برای بررسی بافت سرطان پوست [۳۱]، (b) قرار دادن نمونه بافت بین دو آنتن (این تصویر در مقیاس واقعی نیست)
Figure 3. (a) The practical system for examining the skin cancer tissue [31], (b) The placement of the tissue sample between two antennas (this image is not in real scale).

به عنوان اولین آزمایش، بافت‌های سالم و سرطانی سینه و پوست بین دو آنتن قرار می‌گیرند و انتقال و بازتاب هر دو بافت بررسی می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، دو نوع مختلف بافت سینه و پوست به عنوان مواد تحت آزمایش برای آنتن پیشنهادی بررسی می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرطان پوست بهتر از سرطان سینه قابل تشخیص است. این به دلیل گذردهی بالاتر و تفاوت بیشتر بین گذردهی بافت سالم و سرطانی اتفاق می‌افتد. این تفاوت‌ها ناشی از تفاوت‌های

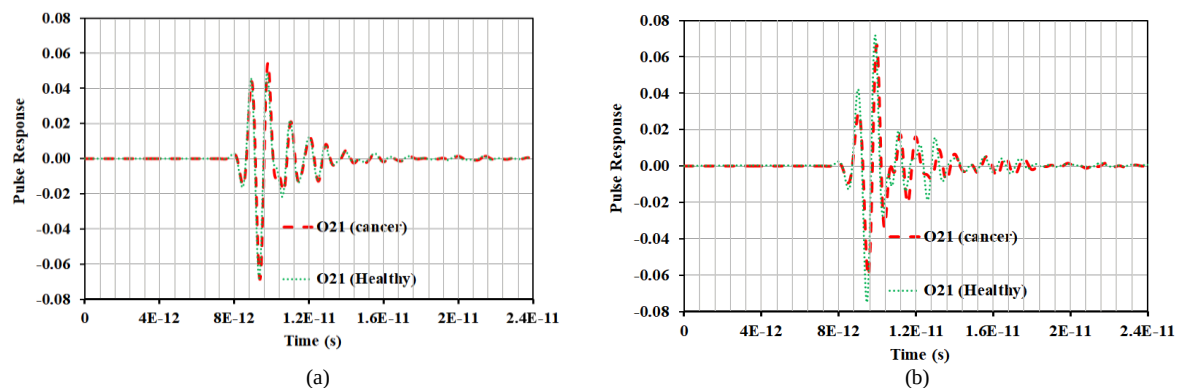
بیشتر بین انتقال و انعکاس بافت پوست است. به همین دلیل به طور معمول برای تشخیص سرطان پوست در مقایسه با سایر انواع سرطان از روش‌های ترازتر استفاده می‌شود [۳۱].

پاسخ پالس انتقال برای بخش‌های سالم و سرطانی بافت سینه و بافت پوست در شکل ۵ مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که روش تشخیصی مبنی بر پاسخ پالس برای سرطان پوست بیشتر از سرطان سینه کاربرد دارد، زیرا تفاوت بین پاسخ پالس در سلول‌های سالم و سرطانی بافت پوست قابل مشاهده است. با این حال، مقایسه بین دو بافت مختلف را می‌توان برای تشخیص ماده مورد آزمایش در نظر گرفت که در آن حداکثر بزرگی پالس برای بافت سینه ۰/۰۶ و این مقدار برای بافت پوست ۰/۰۸ است.



شکل ۴: بازتاب و انتقال آنتن برای بافت (a) سینه سالم و سرطانی، (b) پوست سالم و سرطانی [۳۲]

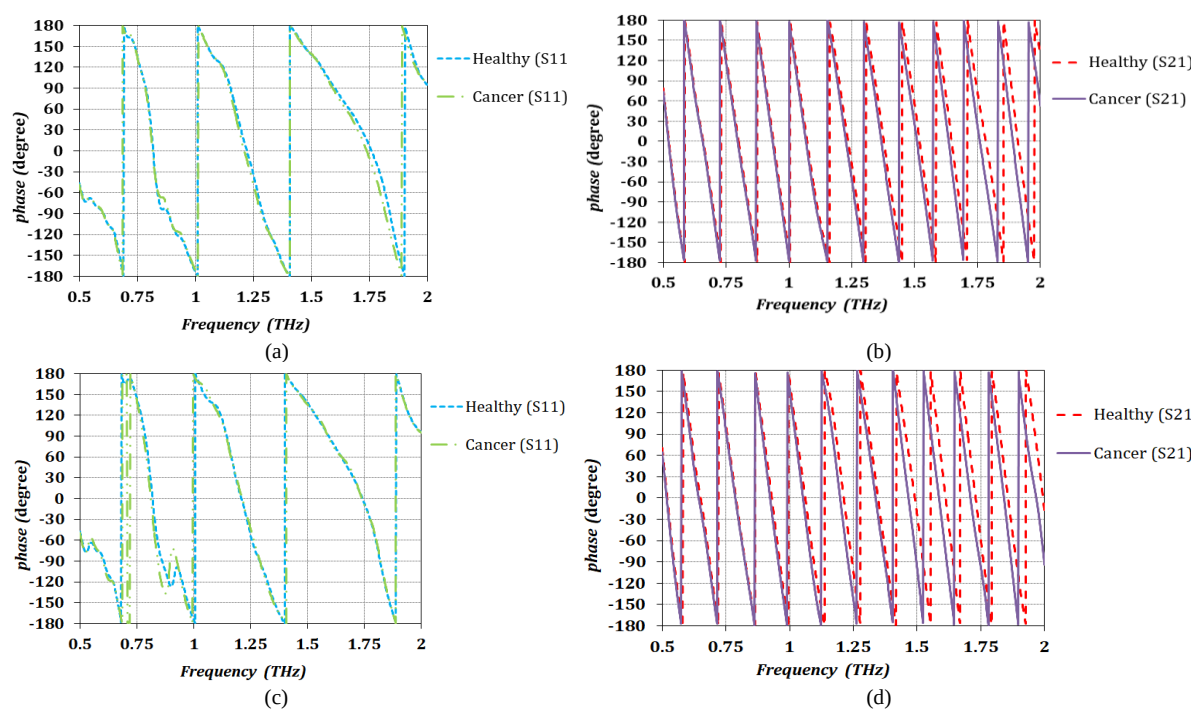
Figure 4. The antenna reflection and transmission for cancer and normal tissue for (a) Breast healthy and cancer, (b) Skin healthy and cancer [32].



شکل ۵: پاسخ پالس (a) بافت سینه برای بخش سالم و سرطانی، (b) بافت پوست برای بخش سالم و سرطانی [۳۲]

Figure 5. The pulse response of (a) the breast tissue for healthy and cancer, (b) the skin tissue for healthy and cancer [32].

عامل مهم دیگر برای تشخیص و شناخت سرطان همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پاسخ فاز انتقال و بازتاب است که برای بافت سینه و بافت پوست بررسی می‌شوند. مطالعه فاز S_{11} نشان می‌دهد که در فرکانس کمتر از ۰/۷۵ ترازتر، می‌تواند جهت تشخیص سرطان برای بافت پوست استفاده شود (شکل ۶-ج)، در حالی که مطابق شکل ۶ (a) اختلاف فاز S_{11} برای بافت سینه سالم و سرطانی بین بازه ۱/۵ تا ۲ ترازتر مشهود است. از طرف دیگر براساس شکل‌های ۶ (b) و ۶ (d) فاز S_{21} تفاوت خوبی را بین نمونه‌های سالم و سرطانی برای هر دو نوع بافت در فرکانس بیش از ۱ ترازتر که بیانگر تغییر فرکانس است، نمایش می‌دهد.



شکل ۶: پاسخ فاز آنتن برای بافت سرطانی و سالم، (a) فاز انعکاس (S_{11}) برای بافت سینه، (b) فاز انتقال (S_{21}) برای بافت سینه، (c) فاز انعکاس (S_{11}) برای بافت پوست، (d) فاز انتقال (S_{21}) برای بافت پوست [۳۲]

Figure 6. The antenna phase response for cancer and normal tissue, Phase of (a) reflection (S_{11}) for breast tissue, (b) transmission (S_{21}) for breast tissue, (c) reflection (S_{11}) for skin tissue, (d) transmission (S_{21}) for skin tissue [32].

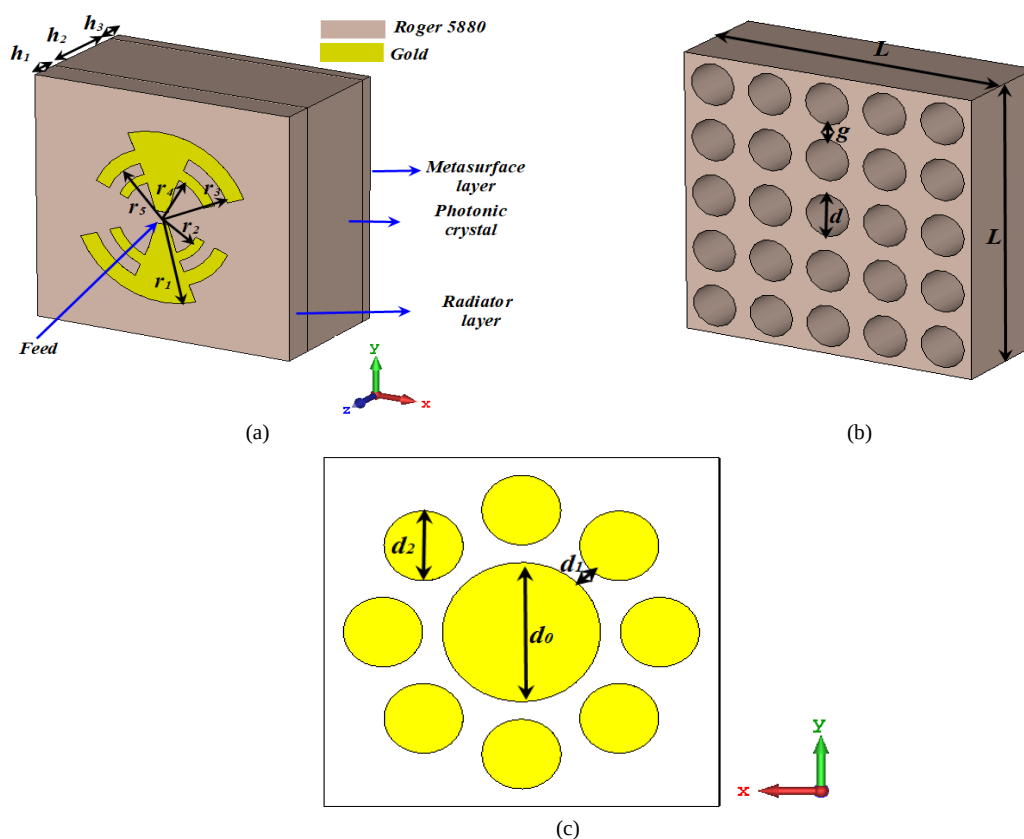
۴- ساختار متناوب لگاریتمی: (ساختار باند باریک با استفاده از آنتن متناوب لگاریتمی)

این ساختار دارای چند بخش است، بخش اول یک آنتن تابشگر بوده که بر روی یک لایه راجرز ۵۸۸۰ با گذردهی ۲/۲ و تانژانت تلفات ۰.۰۰۰۹ قرار گرفته، عنصر آنتن ساخته شده از طلا و دارای ضخامت ۰/۰۲ میکرومتر است و به شکل یک عنصر تناوبی لگاریتم است، در مرحله دوم طراحی به یک ساختار بلور نوری توجه شده است که در شکل ۷ (b) نشان داده شده است و در ادامه همانطور که در تصویر ۷ (c) نشان داده شده است، یک ساختار انتخابگر فرکانسی اضافه شده است که متشکل از یک دیسک در مرکز و ۸ دیسک در اطراف آن است که به صورت فرکانس چیده شده‌اند. ابعاد کلی ساختار متناوب لگاریتمی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: ابعاد المانهای آنتن طراحی شده

Table 3. The proposed antenna elements dimensions.

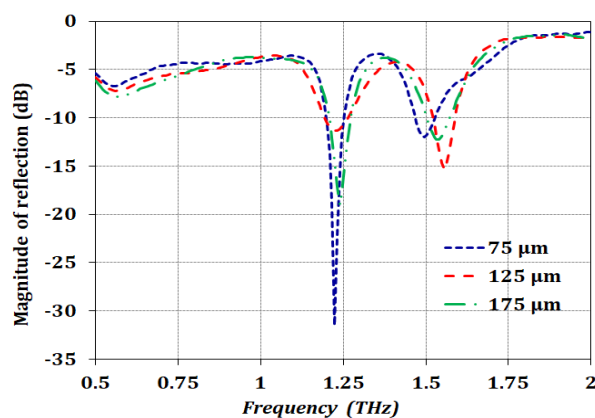
Element	Size (μm)
h_1	25
h_2	75
h_3	10
L	200
g	10
d	30
d_0	80
d_1	10
d_2	40



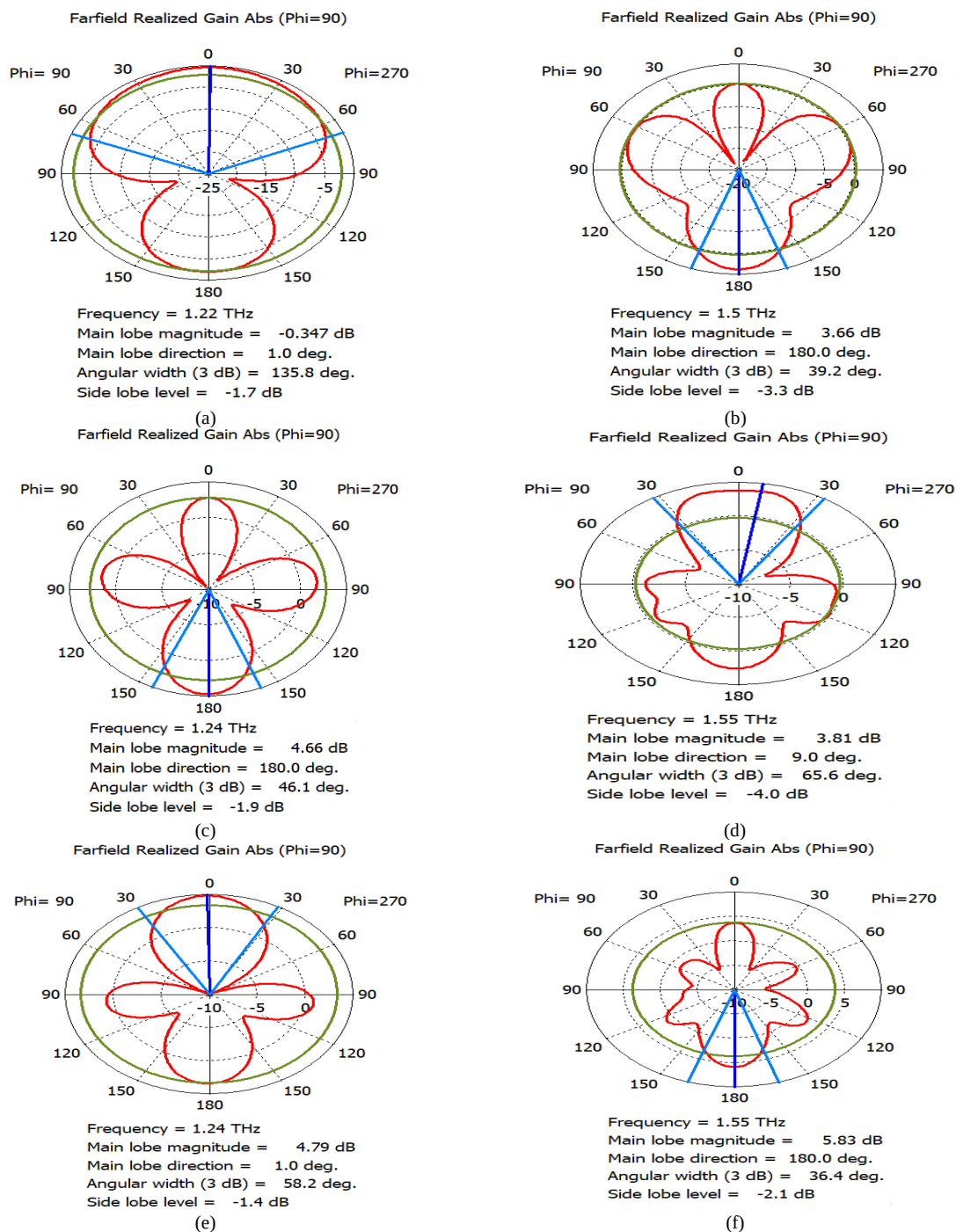
شکل ۷: هندسه آنتن پیشنهادی (a) نمای ۳ بعدی آنتن و تشعشع کننده متناوب لگاریتمی (b) لایه بلورنوری (c) فراسطح
Figure 7. The geometry of the proposed antenna (a) The 3D view of the antenna and the log-periodic radiator (b) The photonic crystal layer (c) The metasurface layer

۵- بهبود ساختار پیشنهادی

فاصله بین فراسطح و آنتن، عامل مهمی در تعیین پاسخ بهینه الگوی آنتن است. این فاصله به طور معمول بین 0.5λ تا 1λ است. دو مورد برای طراحی یک سازه بهینه در نظر گرفته می‌شود. در مورد اول، لایه فاصله‌ساز را که ساختار بلور نوری داشت، حذف کردیم و فواصل $75\mu\text{m}$ ، $125\mu\text{m}$ و $175\mu\text{m}$ را آزمایش کردیم. تلفات برگشتی مطابق شکل ۸ بررسی شده است. فاصله $75\mu\text{m}$ میکرومتر، افت بازگشت خوبی را در حدود -32 دسی بل در فرکانس تشدید اول نشان می‌دهد، اما در فرکانس دوم فقط -12 دسی بل است. برای فاصله $125\mu\text{m}$ میکرومتر، پاسخ در فرکانس اول در حدود -11 دسی بل است اما در فرکانس دوم بهتر است. با این حال، در $175\mu\text{m}$ میکرومتر پاسخ در هر دو تشدید مناسب است.



شکل ۸: تلفات برگشتی آنتن (S_{11}) برای سه فاصله مختلف از فراسطح
Figure 8. The return loss of the antenna (S_{11}) for the three different distance of metasurface



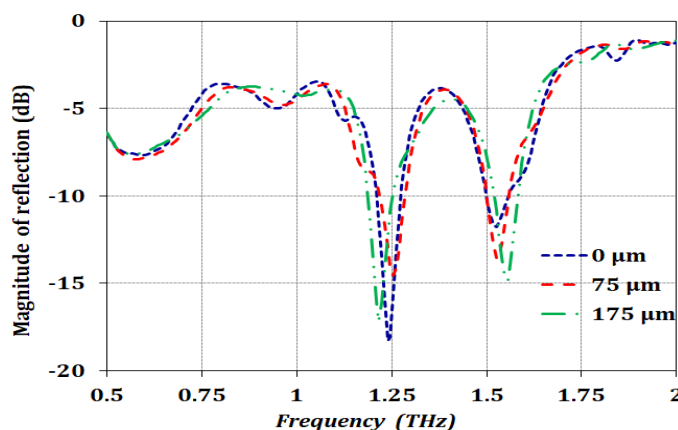
شکل ۹: الگوی تابش آنتن برای فواصل مختلف بین تشعشع کننده متناوب لگاریتمی و فراسطح بدون لایه فاصله ساز (a) برای ۱/۲۲ تراهرتز با فاصله ۷۵ میکرومتر (b) برای ۱/۵ تراهرتز با فاصله ۷۵ میکرومتر (c) برای ۱/۲۴ تراهرتز با فاصله ۱۲۵ میکرومتر (d) برای ۱/۵۵ تراهرتز با فاصله ۱۲۵ میکرومتر (e) برای ۱/۲۴ تراهرتز با فاصله ۱۷۵ میکرومتر (f) برای ۱/۵۵ تراهرتز با فاصله ۱۷۵ میکرومتر

Figure 9. the radiation pattern of the antenna for various distance of metasurface without the spacer layer (a) for 1.22 THz with distance of 75 μm (b) for 1.5 THz with distance of 75 μm (c) for 1.24 THz with distance of 125 μm (d) for 1.55 THz with distance of 125 μm (e) for 1.24 THz with distance of 175 μm (f) for 1.55 THz with distance of 175 μm

عامل دوم الگوی بهره آنتن دو بعدی در $\phi=90^\circ$ درجه است که در شکل ۹ برای سه فاصله در فرکانسهای ۱/۲ تراهرتز و ۱/۵ تراهرتز نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ (e) و ۹ (f) مشاهده می شود، بهره آنتن برای فاصله ۱۷۵ میکرومتر در مقایسه با ۷۵ میکرومتر، شکل ۹ (a, b) و ۱۲۵ میکرومتر، شکل ۹ (c, d) برای هر دو فرکانس بیشتر است. بنابراین این فاصله را انتخاب می کنیم.

در حالت دوم، یک دی الکتریک با فاصله ۱۷۵ میکرومتر بین فراسطح و آنتن استفاده می شود و سه ارتفاع مختلف برای استوانه های بلورنوری در لایه فاصله ساز بررسی می شوند. در حالت اول، ارتفاع استوانه های بلورنوری صفر در نظر گرفته شده است، به این معنی که فاصله ساز یک دی الکتریک یکنواخت است. در حالت دوم، ارتفاع استوانه ها ۷۵ میکرومتر منظور شده است، بنابراین فاصله ساز دارای ساختار بلورنوری ۷۵ میکرومتر و یک دی الکتریک یکنواخت با ارتفاع ۱۰۰ میکرومتر است. در حالت سوم، ارتفاع استوانه های بلورنوری ۱۷۵ میکرومتر در نظر گرفته می شود. افت بازگشتی و الگوی آنتن برای این سه مورد مطالعه شده اند. شکل ۱۰ تلفات بازگشتی را مقایسه می کند و نشان می دهد که پاسخها مشابه هستند، اما پاسخ برای حالتی که ارتفاع بلورهای نوری ۱۷۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است، بهتر است. با این حال عامل مهمتر، الگوی آنتن نشان داده شده در شکل ۱۱ است.

همانطور که مشاهده می شود، بهره آنتن به طور کلی در هر دو فرکانس بالا است، ولی هنگامی که فاصله ساز دارای ساختار بلور نوری تا ارتفاع ۷۵ میکرومتر باشد، جهت دهی بیشتر است. بنابراین، فاصله ۱۷۵ میکرومتر بین فراسطح و آنتن، با یک فاصله گیر مرکب از بلورهای نوری به ارتفاع ۷۵ میکرومتر و دی الکتریک، به عنوان ساختار بهینه برای سنجش سرطان انتخاب می شود. ناحیه بلورهای نوری عملکرد بهتر آنتن را ارائه می دهد در حالی که دی الکتریک یکنواخت پیچیدگی ساخت را به حداقل می رساند. این فاصله ساز هیبریدی امکان جهت دهی و تلفات بازگشتی مناسب آنتن را فراهم می کند.



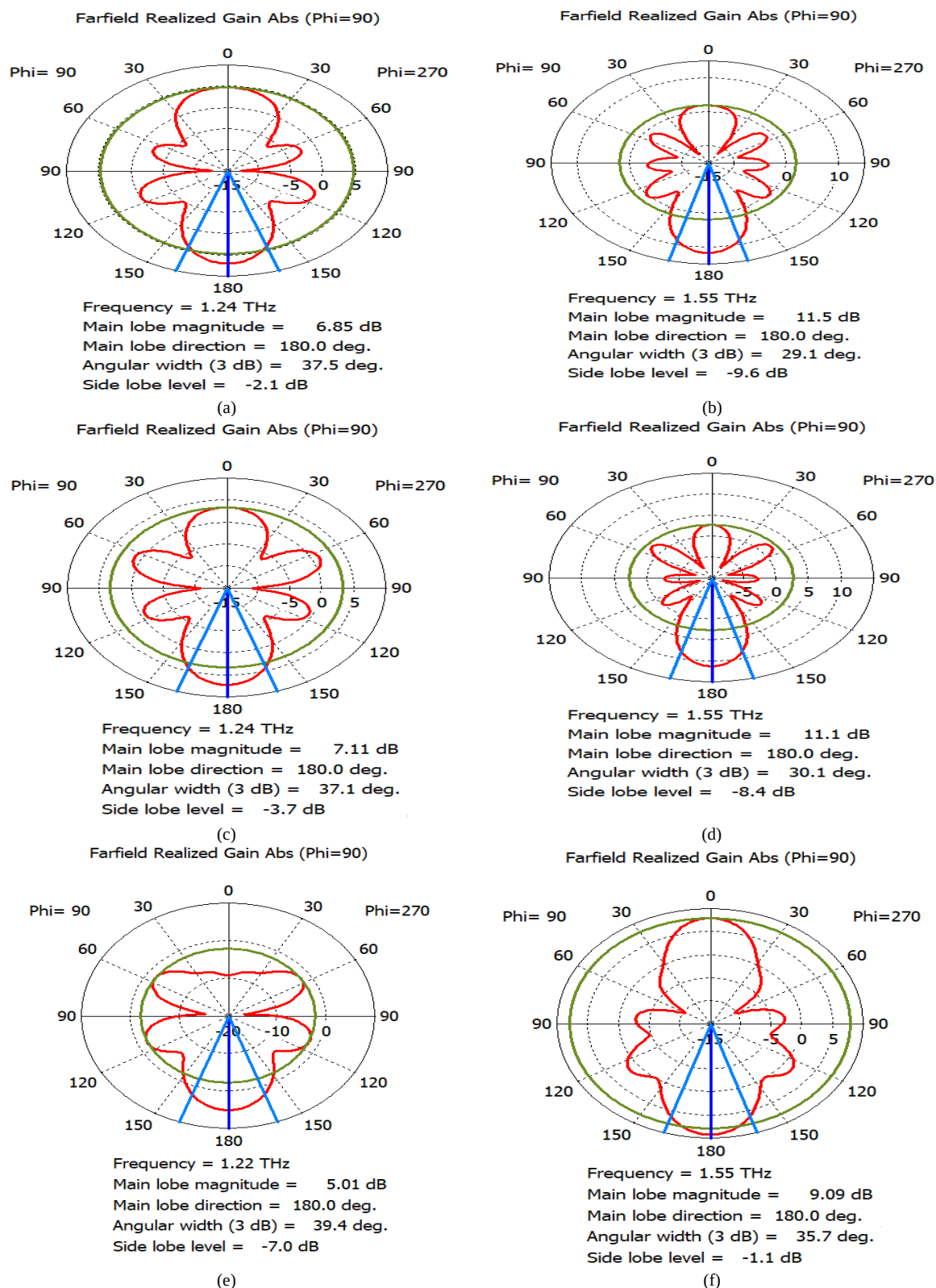
شکل ۱۰: تلفات برگشتی آنتن (S_{11}) برای سه ارتفاع مختلف بلورهای نوری در لایه فاصله ساز

Figure 10. The return loss of the antenna (S_{11}) for the three different heights of the photonic crystal in the spacer layer

جدول ۴: مقایسه کار انجام شده با تحقیقات قبلی از نظر نوع، فرکانس کاری، پهنای باند و بهره

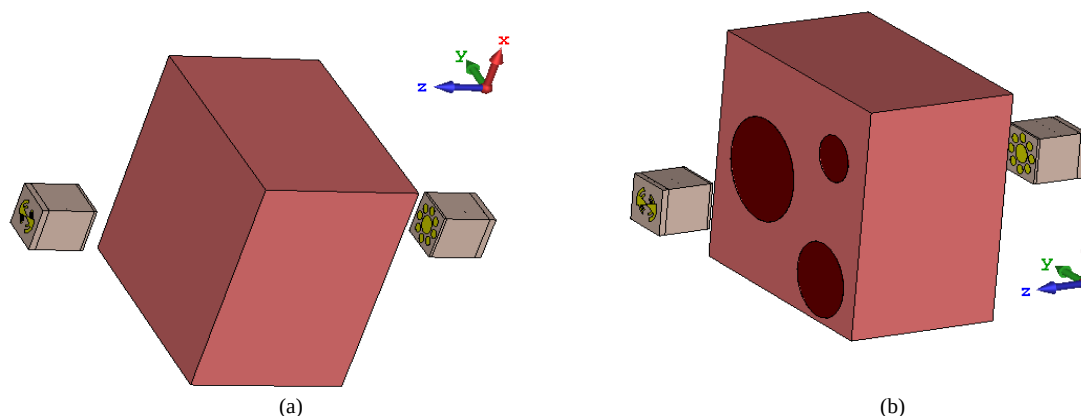
Table 4. comparison this work with previous research for the type, operation frequency, bandwidth and gain

Ref.	Antenna Type	Frequency (Terahertz)	Bandeidth (%)	Gain (dBi)
Designed Structure	log-periodic	1.24, 1.55	6.5	11.5
[26]	Yagi	0.48	20	4.03
[16]	Patch	1	2	11.1
[8]	Patch	1.14	8.2	3.56
[2]	Patch	1.02, 1.47	2	2.5
[23]	Slot	0.4, 0.6	56	2.1
[3]	Patch	0.6	2	7.3

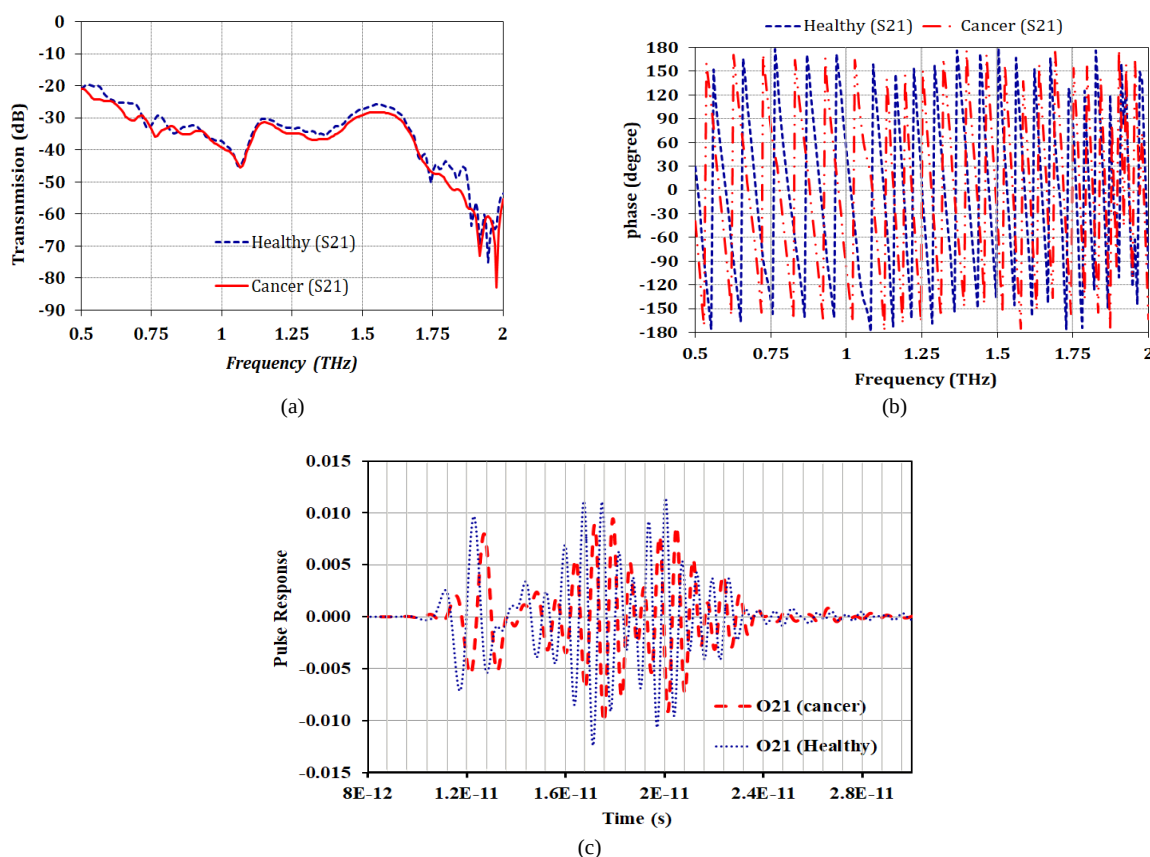


شکل ۱۱: الگوی تابش آنتن برای ارتفاع های مختلف بلورهای نوری در لایه فاصله ساز (a) برای ۱/۲۴ تراهرتز با فاصله ۰ میکرومتر (b) برای ۱/۵۵ تراهرتز با فاصله ۰ میکرومتر (c) برای ۱/۲۴ تراهرتز با فاصله ۷۵ میکرومتر (d) برای ۱/۵۵ تراهرتز با فاصله ۷۵ میکرومتر (e) برای ۱/۲۲ تراهرتز با فاصله ۱۷۵ میکرومتر (f) برای ۱/۵۵ تراهرتز با فاصله ۱۷۵ میکرومتر

Figure 11. the radiation pattern of the antenna for various height of photonic crystal in the spacer layer (a) for 1.24 THz with height of 0 μm (b) for 1.55 THz with height of 0 μm (c) for 1.24 THz with height of 75 μm (d) for 1.55 THz with height of 75 μm (e) for 1.22 THz with height of 175 μm (f) for 1.55 THz with height of 175 μm



شکل ۱۲: قرار دادن نمونه بین دو آنتن برای تشخیص سرطان (a) یک بافت همگن (b) بافت با قسمتی از توده‌ی سرطانی
Figure 12. Placement of sample between two antenna for cancer detection, (a) A homogenous tissue, (b) Tissue with some cancer section



شکل ۱۳: پاسخ آنتن برای بافت سرطانی و سالم (a) انتقال (S_{21}) (b) فاز انتقال (c) پاسخ پالس انتقال
Figure 13. The response of the antenna for cancer and healthy tissue, (a) The transmission (S_{21}), (b) The phase of transmission, (c) The pulse response of the transmission

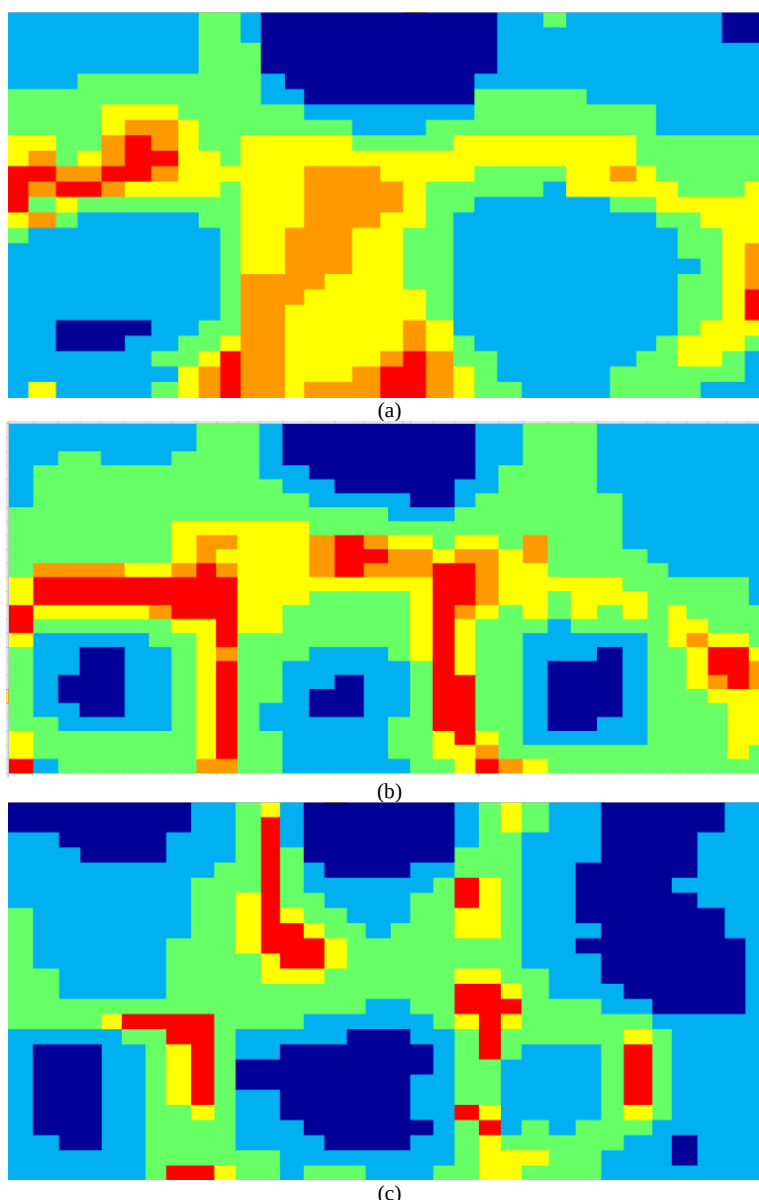
در جدول ۴ مقایسه بین فرکانس کاری، بهره و پهنای باند ساختار طراحی شده با آنتن‌های طراحی شده قبلی در طیف تراهرتز ارائه شده است.

برای تشخیص بافت سرطانی و سالم می‌توان از پارامترهای مختلفی استفاده کرد. پارامتر اول S_{21} است که در شکل ۱۳ (a) نشان داده شده است. برخی از عوامل در برخی از سیستم‌ها ممکن است برای تشخیص مناسب نباشند و در اینجا S_{21} برای بافت سالم و سرطانی مشابه هستند و تشخیص با حساسیت بالا امکان پذیر نیست. عامل دوم پاسخ فاز است و تاخیر فاز را می‌توان عاملی برای تشخیص بافت سرطانی یا سالم در نظر گرفت. در اینجا اختلاف فاز برای انتقال ۵ تا ۴۰ درجه است که در شکل ۱۳ (b)

نشان داده شده است. عامل دیگر در سیستم تشخیص سرطان، پاسخ پالس سیگنال‌ها است [۳۱]. پاسخ پالس انتقال در شکل ۱۳ (c) ارائه شده است. تاخیر زمانی و تغییر در بزرگی برای بافت سالم و سرطانی قابل مشاهده است. برای بافت سرطانی یک جابجایی زمانی اتفاق افتاده و همچنین حداکثر بزرگی کمتر از بافت سالم است.

۶- تصویربرداری تراهرتز

مطابق شکل ۱۲، آنتن به عنوان یک پروب در دو طرف بافت دارای قسمتی از سرطان استفاده می‌شود. همانطور که گفته شد، عوامل مختلفی را می‌توان برای تصویربرداری تراهرتز در نظر گرفت و مقدار انتقال را عاملی برای تشخیص سرطان در نظر گرفت. انتقال با افزایش ضریب نفوذ مواد کاهش می‌یابد. بنابراین، مقادیر انتقال برای سه فرکانس مختلف ۱، ۱/۲ و ۱/۴ تراهرتز به ترتیب در شکل ۱۴ (a, b, c) بررسی شده‌اند.



شکل ۱۴: تصویر بافت بر اساس مقدار انتقال (a) فرکانس ۱ تراهرتز (b) فرکانس ۱/۲ تراهرتز (c) فرکانس ۱/۴ تراهرتز.
Figure 14. The image of tissue based on transmission value (a) For 1 THz (b) For 1.2 THz (c) For 1.4 THz.

در روش فراطیفی، نتایج طیف‌های مختلف را می‌توان استخراج و ترکیب کرد. با این حال، ما قصد داریم نشان دهیم که آنتن پیشنهادی می‌تواند برای شناسایی سلول‌های سرطانی استفاده شود. ناحیه قرمز نشان دهنده انتقال کم و آبی تیره برای انتقال بالاتر مانند اطراف بافت است. ابعاد بافت 1000×1000 میکرومتر مربع در نظر گرفته شده است و آنتن در جهت X بافت را اسکن می‌کند. بنابراین یک ماتریس با مقیاس 33×33 ساخته می‌شود در حالی که هر مرحله اسکن ۲۵ میکرومتر فرض می‌شود.

۷- نتیجه گیری

در بخش اول، طراحی یک آنتن ویوالدی در بازه ۰/۵ تا ۲ تراهرتز انجام شد و با استفاده از ساختارهای بلورهای نوری در اطراف آنتن، حفاظ ایجاد کرده و لوب‌های فرعی مهار شده است و در نتیجه پهنای باند و بهره آنتن بهبود یافته است. همچنین بکارگیری بازتاب‌کننده‌ی دندان‌های به منظور افزایش بهره و انرژی ذخیره‌ای در آنتن و ایجاد جهت‌دهی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در بخش دوم طراحی یک آنتن لگاریتمی دندان‌های میکرواستریپی مورد توجه قرار گرفته است که با قراردادن بلورهای نوری و استفاده از ساختار فراسطح، ساختاری با پهنای باند و ضریب کیفیت بیشتر و الگوی تشعشعی جهتی طراحی شده است. در این مقاله اهمیت یک سیستم باند پهن برای تشخیص سرطان نشان داده شد، زیرا می‌توان از فرکانس بالاتر و فرکانس پایین برای ترکیب آنها برای درک نوع بافت استفاده کرد. دو نوع سرطان مختلف انتخاب شده است تا بررسی شود که برخی از انواع سرطان‌ها با فاکتور خاصی قابل تشخیص هستند.

مراجع

- [1] M. Shirzadian, J. Rashed-Mohassel, M. Naser-Moghaddasi and M. Khatir, "Design of a wideband microstrip nanoantenna array," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, no. 5, pp. 1-9, 2019, doi: [10.1007/s11082-019-1852-6](https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6).
- [2] F. Kazemi, "Dual-band compact fractal THz antenna based on CRLH-TL and graphene loads," *Optik*, vol. 206, Article Number: 164369, 2020, doi: [10.1016/j.ijleo.2020.164369](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164369).
- [3] A. Nejati, R. A. Sadeghzadeh, and F. Geran, "Effect of photonic crystal and frequency selective surface implementation on gain enhancement in the microstrip patch antenna at terahertz frequency," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 449, pp. 113-120, 2014, doi: [10.1016/j.physb.2014.05.014](https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.05.014).
- [4] Z.R. M. Hajiyat, A. Ismail, A. Sali and M. N. Hamidon, "Antenna in 6G wireless communication system: Specifications, challenges, and research directions," *Optik*, vol. 231, Article Number: 66415, 2021, doi: [10.1016/j.ijleo.2021.166415](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166415).
- [5] Z. S. Tabatabaeian, "Developing THz metasurface with Array rectangular slot with High Q-factor for early skin cancer detection," *Optik*, vol. 264, Article Number: 169400, 2022, doi: [10.1016/j.ijleo.2022.169400](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169400).
- [6] K. K. Ansha and P. Abdulla, "Design of broadband circularly polarized THz antenna with stable radiation pattern for 6G communications," *Optik*, vol. 243, Article Number: 167397, 2021, doi: [10.1016/j.ijleo.2021.167397](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167397).
- [7] A. Sharma and Gh. Singh. "Rectangular microstrip patch antenna design at THz frequency for short distance wireless communication systems," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 30, no. 1, Article Number: 20009, doi: [10.1007/s10762-008-9416-z](https://doi.org/10.1007/s10762-008-9416-z).
- [8] Y. Denizhan, K. Akin and C. Sabah. "Fishnet based metamaterial loaded THz patch antenna," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, no. 2, Article Number: 168, 2016, doi: [10.1007/s11082-016-0449-6](https://doi.org/10.1007/s11082-016-0449-6).
- [9] M. A. K. Khan, M. I. Ullah, and M. A. Alim, "High-gain and ultrawide-band graphene patch antenna with photonic crystal covering 96.48% of the terahertz band," *Optik*, vol. 227, Article Number: 166056, 2021, doi: [10.1016/j.ijleo.2020.166056](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.166056).

- [10] L. Yang, X. Shi, K. Chen, K. Fu and B. Zhang, "Analysis of photonic crystal and multi-frequency terahertz microstrip patch antenna," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 431, pp. 11-14, 2013, doi: [10.1016/j.physb.2013.08.036](https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.08.036).
- [11] A. Megahed, A. Shaker and K. R. Mahmoud, "Optimal design of planar terahertz Yagi-Uda antenna using adaptive chaos optimization algorithm," *Optik*, vol. 191, pp. 146-151, 2019, doi: [10.1016/j.ijleo.2019.05.103](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.103).
- [12] Y. Wu, M. Qu, L. Jiao and Y. Liu, "Tunable terahertz filter-integrated quasi-Yagi antenna based on graphene," *Plasmonics*, vol. 12, no. 3, pp. 811-817, 2017, doi: [10.1007/s11468-016-0328-9](https://doi.org/10.1007/s11468-016-0328-9).
- [13] M. Shirzadian, J. Rashed-Mohassel, M. Naser-Moghaddasi and Mehdi Khatir, "Log-Periodic Dipole Nanoantenna Array Based on Substrate Integrated Waveguide for Wireless Communications in Terahertz Band," *Plasmonics*, vol. 14, no. 6, pp. 1955-1961, 2019, doi: [10.1007/s11468-019-00983-0](https://doi.org/10.1007/s11468-019-00983-0).
- [14] S.-A. Naghdehforushha and Gh. Moradi, "High radiation efficiency of coupled plasmonic graphene-based THz patch antenna utilizing strip slot ground plane removal," *Optik*, vol. 182, pp. 1082-1087, 2019, doi: [10.1016/j.ijleo.2019.01.099](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.01.099).
- [15] M. Jafari-Chashmi and P. Rezaei and N. Kiani, "Polarization controlling of multi resonant graphene-based microstrip antenna," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 417-426, 2020, doi: [10.1007/s11468-019-01044-2](https://doi.org/10.1007/s11468-019-01044-2).
- [16] M.-M. Seyedsharbaty and R. A. Sadeghzadeh, "Antenna gain enhancement by using metamaterial radome at THz band with reconfigurable characteristics based on graphene load," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 6, no. 221, 2017, doi: [10.1007/s11082-017-1052-1](https://doi.org/10.1007/s11082-017-1052-1).
- [17] N. T. Yardimci, D. Turan, S. Cakmakyapan and M. Jarrahi, "A high-responsivity and broadband photoconductive terahertz detector based on a plasmonic nanocavity," *Applied Physics Letters*, vol. 113, no. 25, Article Number: 251102, 2018, doi: [10.1063/1.5066243](https://doi.org/10.1063/1.5066243).
- [18] K. Han, T. Khang-Nguyen, I. Park and H. Han, "Terahertz Yagi-Uda antenna for high input resistance," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 31, no. 4, pp. 441-454, 2010, doi: [10.1007/s10762-009-9596-1](https://doi.org/10.1007/s10762-009-9596-1).
- [19] R. K. Kushwaha and P. Karuppanan, "Design and analysis of Vivaldi antenna with enhanced radiation characteristics for mm-wave and THz applications," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, no. 9, pp. 1-19, 2019, doi: [10.1007/s11082-019-2032-4](https://doi.org/10.1007/s11082-019-2032-4).
- [20] F. Guangyou, "New design of the antipodal Vivaldi antenna for a GPR system," *Microwave and optical technology letters*, vol. 44, no. 2, pp. 136-139, 2005, doi: [10.1002/mop.20568](https://doi.org/10.1002/mop.20568).
- [21] H. Cheng, H. Yang, Y. Li, and Y. Chen, "A compact Vivaldi antenna with artificial material lens and Sidelobe suppressor for GPR applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 64056-64063, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2984010](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984010).
- [22] W. Amara, A. Yahyaoui, N. Eltresy, M. Aseeri, B. Hakim, Y. Al-Turki and H. Rmili, "Vivaldi dipole nano-rectenna for IR energy harvesting at 28.3 THz," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 34, no. 2, Article Number: e2836, 2021, doi: [10.1002/jnm.2836](https://doi.org/10.1002/jnm.2836).
- [23] F. Kazemi, "High Q-factor Compact and Reconfigurable THz Aperture Antenna Based on Graphene Loads for Detecting Breast Cancer Cells," *Superlattices and Microstructures*, vol. 153, Article Number: 106865, 2021, doi: [10.1016/j.spmi.2021.106865](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106865).
- [24] G. Geetharamani and T. Aathmanesan, "Metamaterial inspired THz antenna for breast cancer detection," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 1-9, 2019, doi: [10.1007/s42452-019-0601-6](https://doi.org/10.1007/s42452-019-0601-6).
- [25] S. Rezaee and Y. Zehforoosh, "Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 43, pp. 15-26, 2022, doi: [10.30495/jce.2022.689028](https://doi.org/10.30495/jce.2022.689028). [in Persian].

- [26] Z. S. Tabatabaeian, "Graphene load for harmonic rejection and increasing the bandwidth in Quasi Yagi–Uda array THz antenna for the 6G wireless communication," *Optics Communications*, vol. 499, p. 127272, 2021, doi: [10.1016/j.optcom.2021.127272](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127272).
- [27] G. Bansal, A. Marwaha and A. Singh, "A graphene-based multiband antipodal Vivaldi nanoantenna for UWB applications," *Journal of Computational Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 709-718, 2020, doi: [10.1007/s10825-020-01460-2](https://doi.org/10.1007/s10825-020-01460-2).
- [28] A. J. Fitzgerald, E. Pickwell-MacPherson and V. P. Wallace, "Use of finite difference time domain simulations and Debye theory for modeling the terahertz reflection response of normal and tumour breast tissue," *PLoS One*, vol. 9, no. 7, p. e99291, 2014, doi: [10.1371/journal.pone.0099291](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099291).
- [29] B. C. Truong, H. D. Tuan, A. J. Fitzgerald, V. P. Wallace, and Hung T. Nguyen, "A dielectric model of human breast tissue in terahertz regime," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 699-707, 2014, doi: [10.1109/TBME.2014.2364025](https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2364025).
- [30] Z. Vafapour, A. Keshavarz and H. Ghahraloud, "The potential of terahertz sensing for cancer diagnosis," *Heliyon*, vol. 6, no. 12, Article Number: e05623, doi: [10.1016/j.heliyon.2020.e05623](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05623).
- [31] A. Rahman, A. K. Rahman, and B. Rao, "Early detection of skin cancer via terahertz spectral profiling and 3D imaging," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 82, pp. 64-70, 2016, doi: [10.1016/j.bios.2016.03.051](https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.03.051).
- [32] M. Toolabi, M. Khatir, M. Naser-Moghadasi and N. Amiri. "Vivaldi antenna for early cancer detection based on THz spectroscopy: Comparison between response of breast and skin cancer," *Optik*, vol. 273, Article Number: 170440, 2023, doi: [10.1016/j.ijleo.2022.170440](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170440).

Analysis and Simulation of Small Signal Model of Virtual Synchronous Generator in Microgrid System

Ghazanfar Shahgholian^{1,2*}  | Mohammadreza Moradian^{1,2}  | S. Mohammadali Zanjani^{1,2} 

¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
shahgholian@iau.ac.ir

²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
moradian@iau.ac.ir
smazanjani@iau.ac.ir

Correspondence

Ghazanfar Shahgholian, Professor of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Email: shahgholian@iau.ac.ir

Main Subjects:
Microgrid system

Paper History:

Received: 27 December 2024

Revised: 2 February 2025

Accepted: 8 February 2025

Abstract

Microgrids based on distributed generation sources are connected to the main power grid through power electronic converters that have low mechanical inertia and damping, so the dynamic characteristics of the power system must be improved simultaneously with the integration of renewable energy sources for stability. Virtual synchronous generators are one of the effective methods for integrating renewable energy systems into the power grid. In order to have a behavior similar to that of a real synchronous generator when changed or disturbed by a virtual synchronous generator, the control operation is performed in the power electronic converter of the distributed generation unit. In this paper, the characteristics of two droop methods and a virtual synchronous generator for controlling active and reactive powers are compared using the small signal model and the state space model. The evaluation between these two different control strategies is performed using simulation results in the MATLAB environment. Also, the characteristics of the synchronous generator due to changes in the moment of inertia and damping coefficient are shown. Integrating the virtual synchronous generator in the microgrid, in addition to reducing frequency and voltage deviations, also improves stability.

Keywords: Inverter, Oscillation equation, Small signal, Synchronous generator, Virtual inertia.

Highlights

- Study of attenuation reduction of power electronic converters in the network.
- Comparison of droop control method with virtual synchronous generator technique.
- Determination of small signal model of virtual synchronous generator connected to infinite bus.
- Comparison of response speed for load changes of two control methods.

Citation: G. Shahgholian, M. Moradian, and S.M.A. Zanjani, "Analysis and Simulation of Small Signal Model of Virtual Synchronous Generator in Microgrid System," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 21–35, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1331 [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

Environmental problems have caused the power industry to move towards the use of green and low-carbon energy and the reduction of greenhouse gases, so a larger share of the power system has been allocated to renewable energy sources. The energy crisis and environmental pollution have led to the penetration of renewable energies such as photovoltaic systems and wind turbines in the power system. The transformation of the global energy structure, along with the rapid development of energy technologies, has increased the proportion of electricity generation due to the advantages of renewable energy production such as flexible distribution and economic benefits. It is possible to set up power plants near load centers using renewable energy sources in a dispersed manner. Given the many advantages of using renewable energy, their integration into the power system will reduce inertia and affect the stability of the system due to the lack of mechanical rotating components and their non-adjustable nature. Also, the unpredictability and fluctuations of renewable energy sources in the network will be challenging, which is why microgrids are used as a solution to overcome these limitations [1,2]. Microgrids are considered a suitable solution for integrating renewable energy sources, for energy availability in remote locations, as well as ensuring improved flexibility and increased system reliability. Voltage source converters or inverters are usually the interface between energy storage systems, distributed generators and loads. The limited capacity of converters makes it possible to operate a number of them in parallel, forming a microgrid [3,4].

2. Innovation and contributions

The use of power electronic converters increases the generation but leads to a lack of inertia and reduced damping of the power system and reduces the ability of the power system to withstand disturbances. The droop control and virtual synchronous generator control methods can be used in the voltage source inverter. In this paper, by presenting a small signal model, the two above methods are compared in terms of response speed to load changes. The simulation results show the angular velocity changes and active power changes of the inverter output for step changes in the input. Among the innovations of this paper, the following can be stated:

- Study of attenuation reduction of power electronic converters in the network.
- Comparison of droop control method with virtual synchronous generator technique.
- Determination of small signal model of virtual synchronous generator connected to infinite bus.
- Comparison of response speed for load changes of two control methods.

3. Materials and Methods

Virtual synchronous generators (VSG) are similar to a generating unit with a power electronic converter that has similar dynamic behavior and characteristics to synchronous generators, which are used as one of the effective methods for integrating renewable energy sources into the power grid due to their ability [5,6]. Droop control is one of the applied methods for controlling converters in microgrids and virtual synchronous generator is an alternative way. Virtual synchronous generator is an inverter-based control method applied in distributed generation unit and has a behavior similar to synchronous machine in order to support power system stability [7,8]. The main purpose of using virtual synchronous generator technique is to improve power system stability. Energy storage in conventional synchronous generators is mechanical, but in virtual synchronous generator, energy is stored electrically using inverter. In a real synchronous machine, the damping factor and the moment of inertia are constant, but by controlling with the oscillation equation, the dynamic characteristics of the virtual synchronous generator can be adjusted according to the system requirements [9,10].

4. Results and Discussion

In order to maintain the frequency while reducing the equivalent grid inertia due to the increase in the penetration of renewable energy in the grid, a virtual synchronous generator control scheme is used.

5. Conclusion

The rapid expansion of microgrids and the increasing penetration of renewable energy sources using power electronic converters due to the absence of arbiter mass that has low inertia has reduced the inertia of the entire system and affected the stability. One of the practical techniques to overcome the problem of lack of inertia in renewable power systems is the use of virtual synchronous generator, which plays an important role in the production of renewable resources due to its various advantages. Virtual synchronous generator is one of the simplest methods for applying virtual inertia in the power system, which has been studied and simulated in this paper. Simulating the inertia and rotor droop by an inverter similar to a conventional synchronous generator causes the control of the virtual synchronous generator to have better frequency support than droop control. The simulation results have shown the effect of the control scheme of the virtual synchronous generator compared to droop control.

6. Acknowledgement

We would like to thank the esteemed reviewers of the article who guided us in increasing the quality of the article. We also express our appreciation and gratitude to the esteemed editor and the executive staff of the journal.

References

- [1] J. Song, X. Zhou, Z. Zhou, Y. Wang, Y. Wang and X. Wang, "Review of low inertia in power systems caused by high proportion of renewable energy grid integration," *Energies*, vol. 16, no. 16, Article Number: 6042, Aug. 2023, doi:[10.3390/en16166042](https://doi.org/10.3390/en16166042).
- [2] F. Mesrinejad, S. Yaghoubi and B. Fani, "Secondary frequency control for improved dynamic performance in interconnected power system," *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 47-54, Sept. 2022, dor: 20.1001.1.27834441.2022.14.3.5.9.
- [3] Y. Du, J. M. Guerrero, L. Chang, J. Su and M. Mao, "Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications," *Proceeding of the IEEE/ECCE*, pp. 643-649, Melbourne, VIC, Australia, June 2013, doi: [10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167).
- [4] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani and N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions," *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, pp. 1-5, Hua Hin, Thailand, June 2015, doi: [10.1109/ECTICON.2015.7206938](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2015.7206938).
- [5] M. Cheng, W. Yan, D. Zhang, X. Liu, L. He, M. Xu and Q. Yao, "Frequency stability of new energy power systems based on VSG adaptive energy storage coordinated control strategy," *Energy Informatics*, vol. 7, Article Number: 54, July 2024, doi: [10.1186/s42162-024-00359-7](https://doi.org/10.1186/s42162-024-00359-7).
- [6] C. Citro, M. Al-Numay and P. Siano, "Extensive assessment of virtual synchronous generators in intentional island mode", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, Article Number: 109853, June 2024, doi: [10.1016/j.ijepes.2024.109853](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109853).
- [7] H.U. Rehman, X. Yan, M.A. Abdelbaky, M.U. Jan and S. Iqbal, "An advanced virtual synchronous generator control technique for frequency regulation of grid-connected PV system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, Article Number: 106440, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106440](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106440).
- [8] G. Shahgholian, B. Fani, B. Keyvani, H. Karimi and M. Moazzami, "An improve in the rea-ctive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids," *Energy Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 64-71, Oct. 2019, doi: [10.22052/9.3.64](https://doi.org/10.22052/9.3.64).
- [9] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 451-458, June 2015, doi: [10.1109/JESTPE.2014.2362530](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2362530).
- [10] Z. Wang, F. Meng, Y. Zhang, W. Wang, G. Li and J. Ge, "Cooperative adaptive control of multi-parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 38, no. 4, pp. 2396-2408, Dec. 2023, doi: [10.1109/TEC.2023.3283048](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3283048).

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

Author Contributions: All authors reviewed the manuscript.

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

تحلیل و شبیه‌سازی مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی در سیستم ریزشبکه

غضنفر شاهقلیان*^{۲۰۱} | محمدرضا مرادیان^{۲۰۱} | سید محمدعلی زنجانی^{۲۰۱}

چکیده:

ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه اصلی برق متصل می‌شوند که دارای اینرسی مکانیکی و میرایی کمی هستند، بنابراین باید مشخصات دینامیکی سیستم قدرت همزمان با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور پایداری بهبود پیدا کنند. ژنراتورهای سنکرون مجازی یکی از روش‌های موثر برای ادغام سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق است. برای داشتن رفتاری مشابه ژنراتور سنکرون واقعی به تغییر یا اختلال توسط ژنراتور سنکرون مجازی، عمل کنترل در مبدل الکترونیک قدرت واحد تولید پراکنده انجام می‌شود. در این مقاله با استفاده از مدل سیگنال کوچک و مدل فضای حالت ویژگی‌های دو روش افت و ژنراتور سنکرون مجازی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو مقایسه شده است. ارزیابی بین این دو استراتژی کنترلی متفاوت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در محیط متلب انجام شده است. همچنین ویژگی‌های ژنراتور سنکرون در اثر تغییرات ممان اینرسی و ضریب میرایی نشان داده شده است. مدل سیگنال کوچک سیستم مورد مطالعه در سیمولینک متلب نیز پیاده‌سازی شده است. ادغام ژنراتور سنکرون مجازی در ریزشبکه علاوه بر کاهش انحرافات فرکانس و ولتاژ، باعث بهبود پایداری نیز می‌شود.

^۱دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف-آباد، نجف‌آباد، ایران.

shahgholian@iau.ac.ir

^۲مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

moradian@iau.ac.ir

smazanjani@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*غضنفر شاهقلیان، استاد دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

shahgholian@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

سیستم ریز شبکه

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۷ دی ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۴۰۳

کلید واژه‌ها: اینورتر، اینرسی مجازی، ژنراتور سنکرون، سیگنال کوچک، معادله نوسان.

تازه های تحقیق:

- بررسی کاهش میرایی کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه
- مقایسه روش کنترل افتی با تکنیک ژنراتور سنکرون مجازی
- تعیین مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی متصل به شین بی‌نهایت
- مقایسه سرعت پاسخ‌دهی به ازای تغییرات بار دو روش کنترلی

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

مشکلات زیست محیطی باعث حرکت صنعت برق به سمت استفاده از انرژی سبز و کم کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای^۱ شده است، بنابراین سهم بیشتری از سیستم قدرت به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ تعلق پیدا کرده است. بحران انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی منجر به نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سیستم فتوولتائیک^۳ و توربین‌های بادی در سیستم قدرت شده‌اند. دگرگونی ساختار انرژی جهانی همراه با توسعه سریع فناوری‌های انرژی، باعث افزایش نسبت تولید برق با توجه به مزایای تولید انرژی تجدیدپذیر مانند توزیع انعطاف‌پذیر و منافع اقتصادی شده است. امکان راه‌اندازی نیروگاه‌ها در نزدیکی مراکز بار با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت پراکنده وجود دارد. با توجه به مزایای زیاد استفاده از انرژی تجدیدپذیر ولی ادغام آنها در سیستم قدرت به علت عدم داشتن اجزای چرخی مکانیکی و قابل تنظیم نبودن، باعث کاهش اینرسی شده و پایداری سیستم تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۱،۲]. همچنین غیرقابل پیش‌بینی و نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه چالش برانگیز خواهد بود که برای برطرف کردن محدودیت‌ها از ریزشبکه‌ها به عنوان یک راه‌حل استفاده می‌شود. ریزشبکه‌ها^۴ یک راه‌حل مناسب برای یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، برای در دسترس بودن انرژی در مکان‌های دور و همچنین تضمین بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مورد توجه قرار گرفته‌اند. مبدل‌های منبع ولتاژ^۵ یا اینورترها معمولاً رابط بین سیستم‌های ذخیره کننده انرژی، ژنراتورهای توزیع شده و بارها هستند. ظرفیت محدود مبدل‌ها باعث می‌شود که تعدادی از آنها به صورت موازی کار کنند و یک ریزشبکه را تشکیل دهند [۳،۴]. با وجود پاسخ سریع و کنترل انعطاف‌پذیر ولی اینرسی کم ناشی از واحدهای تولید مبتنی بر مبدل الکترونیک قدرت ممکن است باعث ایجاد اختلال در پایداری فرکانس و قابلیت اطمینان سیستم شود. کاهش اینرسی سیستم ریزشبکه به علت ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، باعث تأثیر نامطلوب بر پایداری فرکانس و پشتیبانی از ولتاژ در ریزشبکه می‌شود [۵،۶]. همچنین حوادث اعمال ناگهانی بار و وقوع اتصال کوتاه، باعث ایجاد نوسانات فرکانس می‌شود که امنیت سیستم را تهدید می‌کند و ممکن است منجر به خاموشی کامل و یا آسیب دیدن تجهیزات سیستم شود [۷،۸]. اینرسی کم^۶ در سیستم‌های قدرت به طور کلی بر دو موضوع کلیدی تأثیر خواهد داشت: الف- اینرسی کمتر باعث ایجاد فرکانس ضعیف‌تر در طول اختلال‌ها خواهد بود و با توجه به عدم وجود انرژی جنبشی کافی برای نگهداری فرکانس در یک سطح معلوم، انحراف فرکانس بیشتر شده و امکان آسیب رساندن به تولید و مصرف کنندگان وجود دارد. ب- اینرسی پایین‌تر منجر به یک نرخ تغییر فرکانس^۷ بزرگ می‌شود که با تحریک کردن سیستم حفاظت فعال باعث خاموش شدن ژنراتورها می‌شود [۹،۱۰].

۱-۱- بیان مسئله

ریزشبکه‌ها دارای دو حالت عملیاتی هستند: متصل به شبکه^۸ و مستقل از شبکه^۹ (جزیره‌ای). ریزشبکه در حالت جزیره‌ای از سمت شبکه پشتیبانی نمی‌شود و فرکانس آن معمولاً توسط ریزمنبع‌ها و ذخیره انرژی کنترل می‌شود که ظرفیت یک ریزشبکه مستقل محدود و در برابر نوسانات غیرخطی تصادفی آسیب‌پذیر است [۱۱،۱۲].

ژنراتورهای سنکرون مجازی^{۱۰} (VSG) مشابه یک واحد تولید کننده با یک مبدل الکترونیک قدرت است که رفتار دینامیکی و ویژگی‌های مشابه ژنراتورهای سنکرون دارند که به علت توانایی آنها به عنوان یکی از روش‌های موثر برای ایجاد یکپارچگی منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق استفاده می‌شوند [۱۳،۱۴]. کنترل افت^{۱۱} یکی از روش‌های کاربردی برای کنترل مبدل‌ها در ریزشبکه‌ها است و ژنراتور سنکرون مجازی یک راه جایگزین است [۱۵،۱۶]. ژنراتور سنکرون مجازی یک روش کنترلی مبتنی

¹ Greenhouse Gases

² Renewable Energy Sources

³ Photovoltaic System

⁴ Microgrids

⁵ Voltage Source Converters

⁶ Low Inertia

⁷ Rate of Change of Frequency

⁸ Connected to the Network

⁹ Autonomous

¹⁰ Virtual Synchronous Generators

¹¹ Control Droop

بر اینورتر است که در واحد تولید پراکنده اعمال می‌شود و رفتاری مشابه ماشین سنکرون به منظور پشتیبانی پایداری سیستم قدرت دارد [۱۷،۱۸]. هدف اصلی از به کار بردن تکنیک ژنراتور سنکرون مجازی، بهبود پایداری سیستم قدرت است. ذخیره انرژی در ژنراتورهای سنکرون معمولی به صورت مکانیکی است ولی در ژنراتور سنکرون مجازی با استفاده از اینورتر انرژی به صورت الکتریکی ذخیره می‌شود. در یک ماشین سنکرون واقعی، ضریب میرایی و ممان اینرسی ثابت هستند ولی کنترل با معادله نوسان، ویژگی‌های دینامیکی ژنراتور سنکرون مجازی می‌تواند مطابق نیازهای سیستم تنظیم شود [۱۹،۲۰].

۱-۲- مرور ادبیات

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کنترل ژنراتور سنکرون مجازی برای اینورترهای واسط در ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر ارائه شده است [۲۱،۲۲].

یک روش کنترل ژنراتور سنکرون مجازی مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی^۱ (شامل یک مقاومت مجازی تطبیقی و یک اندوکتانس مجازی ثابت) در دو حالت عملکرد ریزشبکه‌ها به منظور کاهش اختلاف امپدانس در خروجی اینورتر در [۲۳] پیشنهاد شده که هدف آن بهبود اشتراک توان^۲ راکتیو متناسب بین واحدهای تولید پراکنده است. در این روش مقاومت مجازی با توجه به نقاط عملیاتی ریزشبکه به صورت تطبیقی طراحی می‌شود و بر روی کنترل ژنراتور سنکرون مجازی پیاده‌سازی می‌شود.

کنترل ماشین سنکرون مجازی بهبود یافته در [۲۴] با توجه محدودیت ذخیره انرژی ارائه شده است که در آن برای شبیه‌سازی اینرسی و میرایی از کنترل بازیابی انرژی استفاده می‌شود. در این روش ثابت بودن ذخیره انرژی تضمین می‌شود و سیستم ذخیره انرژی با سرعت کند نیز توسط گاورنر برای ارائه خدمات انرژی طولانی مدت تنظیم می‌شود.

استراتژی تطبیقی ترکیبی برای کنترل اینرسی مجازی VSG در [۲۵] برای بهبود نوسانات فرکانس پایین ارائه شده که به طور همزمان باعث بهبود معیارهای عملکرد کنترل فرکانس اولیه نیز می‌شود. برای تامین میرایی نوسانات فرکانس پایین، حداکثر اینرسی VSG بر اساس متغیر تخمین گرادیان فرکانس شبکه به منظور شناسایی مراحل فرآیند کنترل فرکانس اولیه استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی کاهش ذخیره سازی انرژی VSG را تا حدود ۵۰ درصد نشان می‌دهد.

امکان نوسان در توان تحویلی و فرکانس در VSG در هنگام نوسانات در سیستم قدرت وجود دارد که با تنظیم اینرسی چرخشی و ضریب میرایی قابل کنترل هستند. به همین منظور در [۲۶] یک مدل سیگنال کوچک برای بررسی تاثیر اغتشاشات و پارامترها ارائه شده است. سپس راهبرد کنترل تطبیقی برای حفظ نسبت میرایی بهینه در کل فرآیند میرا کردن نوسانات پیشنهاد شده است.

راهبرد کنترل تطبیقی با در نظر گرفتن منحنی زاویه توان برای بهینه‌سازی پارامترها در یک ژنراتور سنکرون مجازی در [۲۷] ارائه شده است که در آن اینرسی و میرایی در دوره نوسان تحلیل می‌شود. همچنین استراتژی کنترل سوئیچینگ چندحالتی به منظور انطباق با سناریوهای مختلف کنترلی با در نظر گرفتن تقاضا برای پاسخ تنظیم سریع و تقاضا برای پشتیبانی همگام‌سازی در شرایط خطای اختلال بررسی شده است.

۱-۳- نوآوری و ساختار

استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت باعث افزایش تولید می‌شود ولی منجر به کمبود اینرسی و کاهش میرایی سیستم قدرت می‌شود و توانایی سیستم قدرت را در برابر اختلالات کاهش می‌دهد. روش‌های کنترل اکتیو و کنترل ژنراتور سنکرون مجازی قابل استفاده در اینورتر منبع ولتاژ هستند. در این مقاله با ارائه مدل سیگنال کوچک، دو روش فوق از نظر سرعت پاسخ‌دهی به ازای تغییرات بار مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی تغییرات سرعت زاویه‌ای و تغییرات توان اکتیو خروجی اینورتر را به ازای تغییرات پله‌ای ورودی نشان می‌دهند.

¹ Adaptive Virtual Impedance

² Power Sharing

۲- سیستم‌های کنترل

هر دو طرح سیستم کنترل افی و ژنراتور سنکرون مجازی، روش کنترل یکسانی برای کنترل توان راکتیو دارند [۲۸،۲۹]. مشخصه‌های افت ویژگی اصلی کنترل توان اکتیو و توان راکتیو در روش‌های ژنراتور سنکرون مجازی و کنترل افت است و تنها اختلاف آنها در این است که روش ژنراتور سنکرون مجازی دارای اینرسی است ولی روش کنترل افت فاقد اینرسی است. بنابراین کنترل افت کمکی به ضریب اینرسی و میرایی لازم برای سیستم قدرت نمی‌کند، ولی ژنراتور سنکرون مجازی قابلیت‌های ژنراتور سنکرون را با استفاده از حلقه‌های کنترل افت به منظور بهبود پاسخ اینرسی روتور و تنظیم ولتاژ ترمینال فراهم می‌کند [۳۰،۳۱]. در استراتژی کنترل افی فقط تنظیم فرکانس اولیه و ویژگی‌های تنظیم تحریک جزئی ژنراتورهای سنکرون شبیه‌سازی می‌شود و ویژگی‌های حرکت روتور ژنراتورهای سنکرون شبیه‌سازی نمی‌شوند. کنترل افی توانایی ارائه اینرسی مجازی را ندارد و ژنراتور سنکرون مجازی یکی از راه‌های ساده برای تزریق اینرسی مجازی در سیستم قدرت است [۳۲]. به دلیل تزریق اینرسی مجازی در فناوری کنترل VSG، اینرسی شبکه افزایش می‌یابد ولی زمان پاسخ و سرعت تنظیم تولید مدولاسیون فرکانس در سیستم محدود خواهد بود و زمان تنظیم فرکانس و اورشوت را کاهش می‌دهد. سرعت پاسخ‌دهی توان اکتیو روش VSG نسبت به روش افی بسیار پایین است و افت زیادی وجود دارد. همچنین انتخاب پارامترهای کنترل آن پیچیده‌تر است [۳۳،۳۴]. در جدول ۱ مقایسه بین دو روش کنترلی در کمیت‌های مختلف آمده است.

جدول ۱: مقایسه ویژگی‌های دو روش کنترلی

Table 1. Comparison of the characteristics of the two control methods

	Output oscillation	Rate of frequency change	Inertia support	Response speed	Current sharing effect
Virtual Synchronous Generator	Yes	Low	Yes	Fast	General
Droop Control	Yes	High	No	Slow	General

۲-۱- کنترل افی

کنترل افی یک استراتژی کنترل غیرمتمرکز^۱ و پرکاربرد است که در ریزشبه‌ها به منظور کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. کنترل افت معمولی برای جبران انحراف فرکانس از طریق P-f توان اکتیو و برای جبران انحراف ولتاژ از طریق Q-U توان راکتیو را فعال می‌کند [۳۵،۳۶]. رابطه‌های کنترل افی متداول برای ریزشبه به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۷]:

$$\begin{cases} \omega = \omega_n - m_p (P - P_0) \\ U = U_n - n_q (Q - Q_0) \end{cases} \quad (1)$$

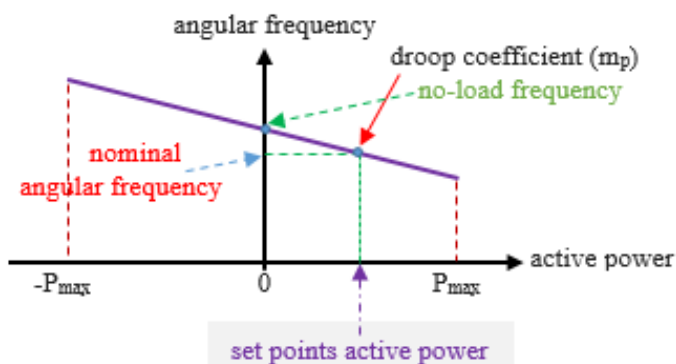
که در آن ω فرکانس زاویه‌ای با نقطه تنظیمی ω_n و U اندازه ولتاژ با نقطه تنظیمی U_n است. شیب‌های افی توان اکتیو و توان راکتیو به ترتیب با m_p و n_q نشان داده می‌شوند [۳۸،۳۹]. شکل‌های ۱ و ۲ نمایش گرافیکی معادلات افی را به ترتیب برای مشخصه‌های افتادگی توان اکتیو-فرکانس ($p-\omega$) و توان راکتیو-ولتاژ ($q-U$) نشان می‌دهند [۴۰]. انتخاب ثابت‌های افت مستلزم در نظر گرفتن تعادل دقت ولتاژ و عملکرد اشتراک بار است. انتخاب شیب‌های افت بالاتر باعث بهبود اشتراک بار می‌شود ولی منجر به افت ولتاژ بیشتر در ریزشبه می‌شود [۴۱،۴۲]. اثر راکتانس فیلتر باعث می‌شود که رابطه افت بین ولتاژ و توان راکتیو در کنترل افت معمولی کاملاً خطی نباشد [۴۳]. برای مبدل‌های مد کنترل ولتاژ با اتصال موازی، توزیع توان و مدیریت با اختصاص ضریب افی مناسب برای هر مبدل بدست می‌آید. در هنگام اختلال در سیستم قدرت، کنترل افی سنتی در اینورتر دارای مشکلاتی مانند تغییر سریع فرکانس و نوسانات زیاد است که باعث بدتر شدن کیفیت توان می‌شود.

۲-۲- ژنراتور سنکرون مجازی

در ژنراتورهای سنکرون معمولی ثابت اینرسی و ضریب میرایی دارای مقادیر ثابتی هستند و در پاسخ به اختلال و تغییرات انعطاف‌پذیری ندارند. ژنراتور سنکرون مجازی می‌تواند مشابه ویژگی‌های گذرا الکترومکانیکی ژنراتورهای سنکرون سنتی عمل

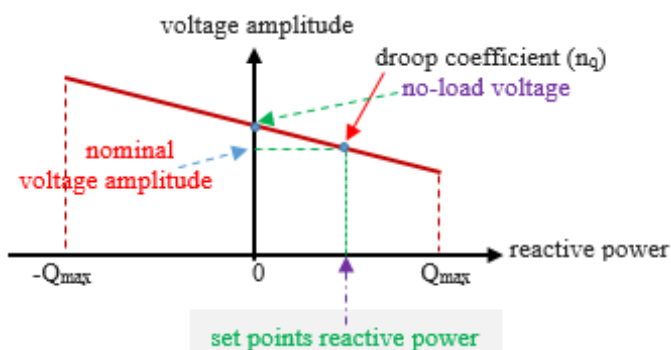
¹ Decentralized Control

کند و باعث افزایش اینرسی و میرایی سیستم شود. ادغام ژنراتور سنکرون مجازی در سیستم ریزشبه نه تنها باعث بهبودی پایداری ریزشبه می‌شود بلکه انحرافات فرکانس و ولتاژ را کاهش خواهد داد [۴۴،۴۵].



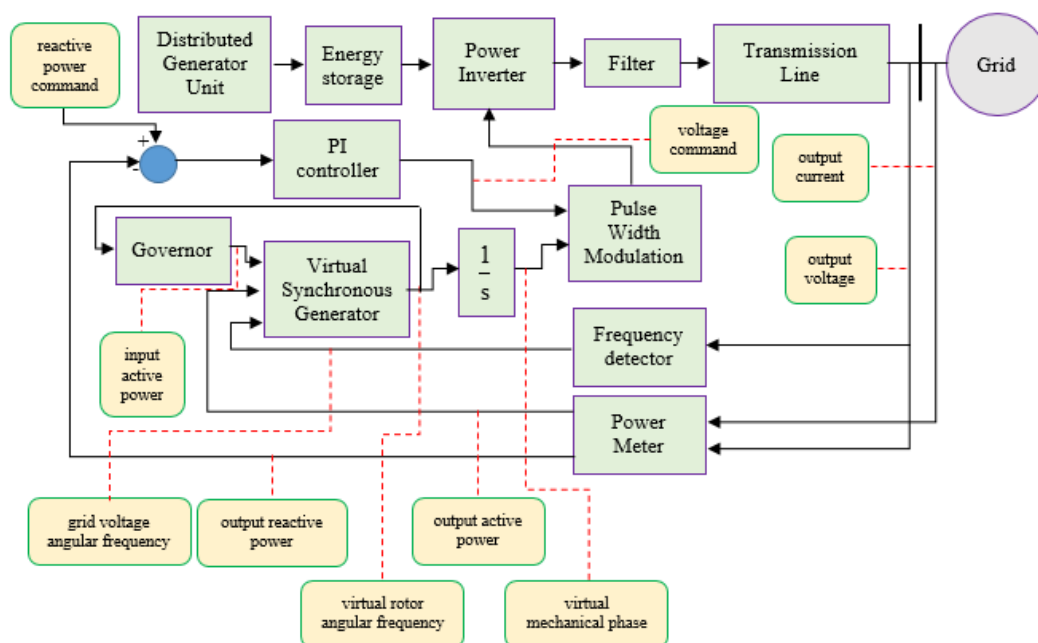
شکل ۱: مشخصه افتی توان اکتیو-فرکانس

Figure 1. Active power drop-frequency characteristic



شکل ۲: مشخصه افتی توان راکتیو-ولتاژ

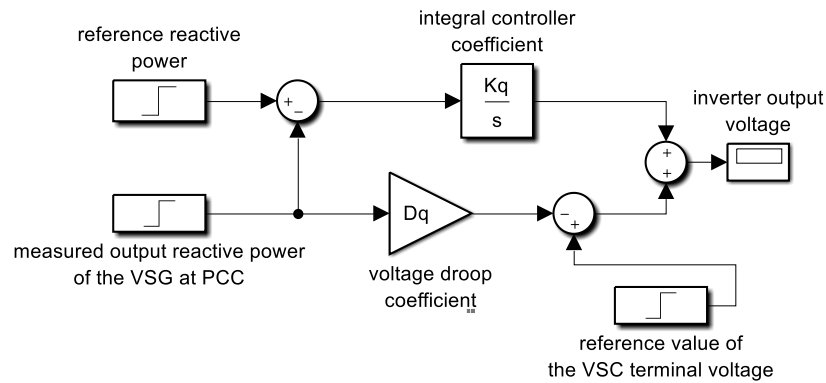
Figure 2. Reactive power drop-voltage characteristic



شکل ۳: توپولوژی ژنراتور سنکرون مجازی همراه با بلوک دیاگرام کنترل

Figure 3. Virtual synchronous generator topology with control block diagram

شکل ۳ نمای کلی شبکه الکتریکی سیستم کنترل مبدل الکترونیک قدرت مبتنی بر ژنراتور سنکرون مجازی را نشان می‌دهد [۴۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود از یک واحد تولید پراکنده، سیستم ذخیره کننده انرژی، مبدل الکترونیک قدرت، مدار



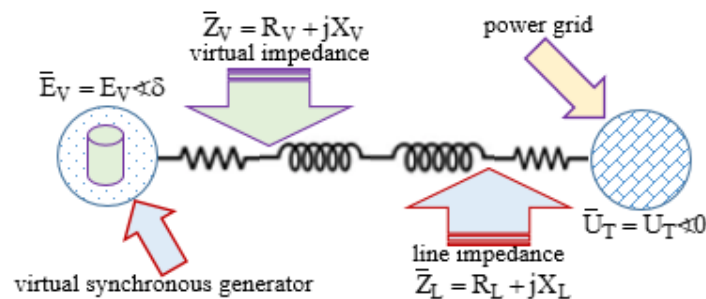
شکل ۵: بلوک دیاگرام حلقه کنترل ولتاژ در ژنراتور سنکرون مجازی با تنظیم توان راکتیو

Figure 5. Block diagram of the voltage control loop in a virtual synchronous generator with reactive power regulation

که در آن X_T راکتانس کل بین منبع ولتاژ خروجی VSG و شبکه و δ اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و خروجی VSG است. با کنترل اندازه ولتاژ خروجی اینورتر توان راکتیو تحویل به بار قابل کنترل است، بنابراین اندازه ولتاژ مرجع با استفاده از کنترل کننده از توان راکتیو خروجی قابل محاسبه است [۵۱]. مدل سیگنال کوچک با خطی سازی معادلات توان تعیین می‌شود:

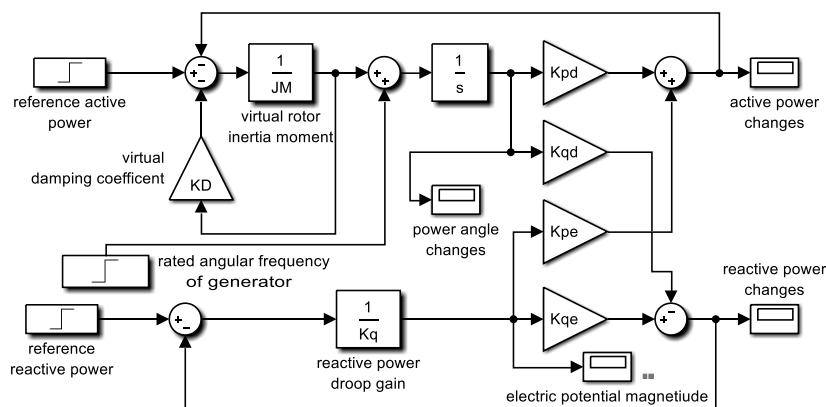
$$\begin{cases} \Delta P_E = \underbrace{\left(\frac{U_T E_V}{X_T} \cos \delta\right)}_{K_{pd}} \Delta \delta + \underbrace{\left(\frac{U_T}{X_T} \sin \delta\right)}_{K_{pe}} \Delta E \\ Q_E = -\underbrace{\left(\frac{U_T E_V}{X_T} \sin \delta\right)}_{K_{pd}} \Delta \delta + \underbrace{\left(\frac{U_T}{X_T} \cos \delta\right)}_{K_{pe}} \Delta E \end{cases} \quad (4)$$

بنابراین مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی براساس معادلات تنظیم توان اکتیو و توان راکتیو مطابق شکل ۷ خواهد بود.



شکل ۶: مدل الکتریکی سیستم اتصال ژنراتور سنکرون مجازی به شبکه

Figure 6. Electrical model of the virtual synchronous generator connection system to the grid

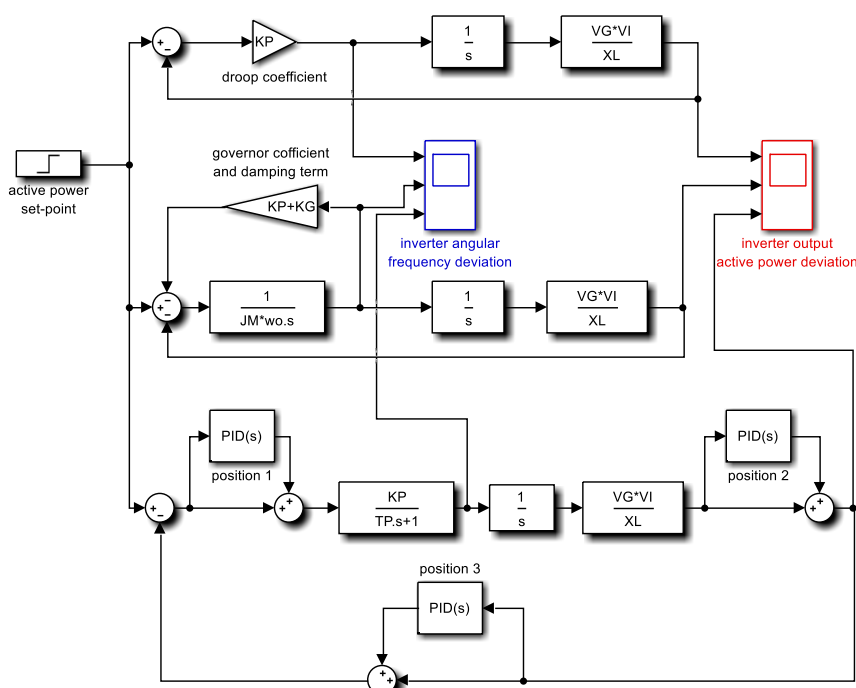


شکل ۷: مدل سیگنال کوچک ژنراتور سنکرون مجازی بر اساس معادلات تنظیم توان

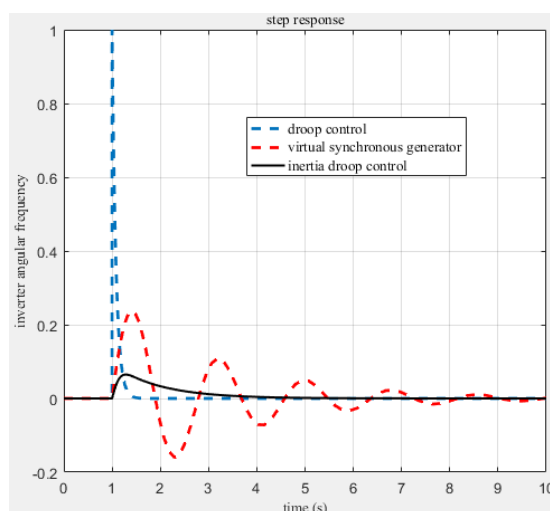
Figure 7. Small signal model of virtual synchronous generator based on power regulation equations

۴- نتایج شبیه‌سازی

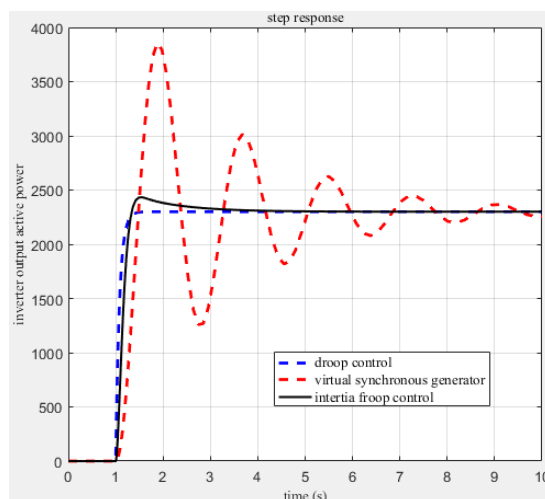
به منظور حفظ فرکانس همزمان با کاهش اینرسی معادل شبکه در اثر افزایش نفوذ انرژی تجدیدپذیر در شبکه، طرح کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی استفاده می‌شود. شکل ۸ بلوک دیاگرام سیگنال کوچک برای کنترل افت (حلقه بالا)، کنترل ژنراتور سنکرون مجازی (حلقه وسط) و کنترل افت اینرسی (حلقه پایین) را نشان می‌دهد که در آن V_G ، V_I ، X_L و J_M به ترتیب ولتاژ شبکه، ولتاژ خروجی اینورتر، راکتانس خط و ثابت اینترسی لحظه‌ای است. همچنین ثابت میرایی سیستم، ثابت افت و ثابت گاورنر به ترتیب با K_P ، K_D و K_G نشان داده شده است. کنترل کننده PID فقط ترم مشتق‌گیر را دارد که در سه موقعیت می‌تواند قرار گیرد که در این روش در موقعیت دو قرار داده شده است. تنظیم ثابت K_M معادل افزایش نسبت میرایی معادل به منظور کاهش مقدار اورشوت و بهبود پاسخ گذرا سیستم است. ورودی مقدار نامی توان اکتیو و خروجی توان اکتیو اینورتر در نظر گرفته شده است. تغییرات فرکانس زاویه‌ای و تغییرات زاویه بار همراه با تغییرات خروجی کنترل کننده به عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۸: مدل سیگنال کوچک برای کنترل افتی و کنترل ماشین سنکرون مجازی
Figure 8. Small signal model for droop control and virtual synchronous machine control



شکل ۹: پاسخ تغییرات سرعت زاویه‌ای به ازای تغییرات پله‌ای ورودی
Figure 9. Response of angular velocity changes to input step changes



شکل ۱۰: پاسخ تغییرات توان اکتیو خروجی اینورتر به ازای تغییرات پله‌ای ورودی
Figure 10. Response of inverter output active power changes to input step changes

پاسخ سرعت زاویه‌ای اینورتر و پاسخ توان اکتیو خروجی اینورتر به ازای تغییرات پله‌ای بار به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کنترل افت معمولی، توان اکتیو خروجی واقعی اینورتر می‌تواند وقتی مقدار توان اکتیو در یک مرحله تغییر کند، به سرعت با تغییرات مطابقت پیدا کند و با توجه به اینکه سیستم مرتبه اول در نظر گرفته شده است، هیچ تغییر یا نوسانی ظاهر نمی‌شود. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود برای کنترل ژنراتور سنکرون مجازی با افزایش مقدار توان اکتیو ورودی، توان اکتیو خروجی اینورتر اورشوت بالایی را تجربه می‌کند و زمان بیشتری برای نشست در طول دوره انتقالی نیاز دارد. کنترل ژنراتور سنکرون مجازی دارای مزایایی مشابه کنترل افتی است ولی به دلیل داشتن نرخ کمتر تغییرات فرکانس نسبت به زمان، نسبت به کنترل افتی دارای عملکرد بهتری از نظر پایداری فرکانس گذرا خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

گسترش سریع ریزشکها و افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به علت عدم وجود جرم داور که دارای اینرسی کمی هستند، باعث کاهش اینرسی کل سیستم شده و پایداری را تحت تاثیر قرار داده است. یکی از تکنیک‌های کاربردی برای غلبه بر مشکل کمبود اینرسی در سیستم‌های قدرت تجدیدپذیر، استفاده از ژنراتور سنکرون مجازی است که به دلیل مزایایی مختلفی که دارد، در تولید منابع تجدیدپذیر نقش مهمی دارد. ژنراتور سنکرون مجازی یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای اعمال اینرسی مجازی در سیستم قدرت است که در این مقاله مطالعه و شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی اینرسی و افت روتور توسط اینورتر مشابه یک ژنراتور سنکرون معمولی باعث می‌شود که کنترل ژنراتور سنکرون مجازی نسبت به کنترل افت از پشتیبانی فرکانس بهتری برخوردار شود. نتایج شبیه‌سازی اثر طرحی کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی را نسبت به کنترل افتی نشان داده است.

مراجع

- [1] J. Song, X. Zhou, Z. Zhou, Y. Wang, Y. Wang and X. Wang, "Review of low inertia in power systems caused by high proportion of renewable energy grid integration," *Energies*, vol. 16, no. 16, Article Number: 6042, Aug. 2023, doi: [10.3390/en16166042](https://doi.org/10.3390/en16166042).
- [2] F. Mesrinejad, S. Yaghoubi and B. Fani, "Secondary frequency control for improved dynamic performance in interconnected power system," *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 47-54, Sept. 2022, dor: 20.1001.1.27834441.2022.14.3.5.9.
- [3] Y. Du, J. M. Guerrero, L. Chang, J. Su, M. Mao, "Modeling, analysis, and design of a frequency-droop-based virtual synchronous generator for microgrid applications," *Proceeding of the IEEE/ECCE*, pp. 643-649, Melbourne, VIC, Australia, June 2013, doi: [10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167](https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579167).

- [4] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani and N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, pp. 1-5, Hua Hin, Thailand, June 2015, doi: [10.1109/ECTICON.2015.7206938](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2015.7206938).
- [5] M. Riahinasab, N. Behzadfar and H. Movahednejad, "Analysis and simulation of load frequency control in power system with reheater steam turbine," *Journal of Applied Dynamic Systems and Control*, vol. 5, no. 1, pp. 84-90, June 2022, dor: 20.1001.1.26764342.2022.5.1.12.0.
- [6] G. Shahgholian, M. Maghsoodi, M. Mahdavian, S. Farazpey, M. Janghorbani and M. Azadeh, "Design of fuzzy+PI controller in application of TCSC and PSS for power system stability improvement," *Proceeding of the IEEE/ECTI-CON*, pp. 1-6, Chiang Mai, Thailand, June/July 2016, doi: [10.1109/ECTICON.2016.7560908](https://doi.org/10.1109/ECTICON.2016.7560908).
- [7] G. Magdy, E. A. Mohamed, G. Shabib, A. A. Elbaset and Y. Mitani, "Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, Article Number: 23, 2018, doi: [10.1186/s41601-018-0093-1](https://doi.org/10.1186/s41601-018-0093-1).
- [8] A. Karimi, Y. Khayat, M. Naderi, T. Dragičević, R. Mirzaei, F. Blaabjerg and H. Bevrani, "Inertia response improvement in ac microgrids: A fuzzy-based virtual synchronous generator control," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 4321-4331, April 2020, doi: [10.1109/TPEL.2019.2937397](https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2937397).
- [9] H.R. Chamorro, F.R.S. Sevilla, F. Gonzalez-Longatt, K. Rouzbehi, H. Chavez and V.K. Sood, "Innovative primary frequency control in low-inertia power systems based on wide-area RoCoF sharing," *IET Energy Systems Integration*, vol. 2, no. 2, pp. 151-160, June 2020, doi: [10.1049/iet-esi.2020.0001](https://doi.org/10.1049/iet-esi.2020.0001).
- [10] G. Shahgholian, M. Ebrahimi-Salary, "Effect of load shedding strategy on interconnected power systems stability when a blackout occurs," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 212-216, April 2012, doi: [10.7763/IJCEE.2012.V4.481](https://doi.org/10.7763/IJCEE.2012.V4.481).
- [11] P. Fan, S. Ke, J. Yang, R. Li, Y. Li, S. Yang, J. Liang, H. Fan and T. Li, "A load frequency coordinated control strategy for multimicrogrids with V2G based on improved MA-DDPG," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 146, Article Number: 108765, March 2023, doi: [10.1016/j.ijepes.2022.108765](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108765).
- [12] M. Bonyani, M. Ghanbarian and M. Simab, "Demand side management based on model predictive control in microgrid in grid connected mode," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, Sept. 2024, doi: [10.30495/jce.2023.1996352.1280](https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1280).
- [13] M. Cheng, W. Yan, D. Zhang, X. Liu, L. He, M. Xu and Q. Yao, "Frequency stability of new energy power systems based on VSG adaptive energy storage coordinated control strategy," *Energy Informatics*, vol. 7, Article Number: 54, July 2024, doi: [10.1186/s42162-024-00359-7](https://doi.org/10.1186/s42162-024-00359-7).
- [14] C. Citro, M. Al-Numay and P. Siano, "Extensive assessment of virtual synchronous generators in intentional island mode," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, Article Number: 109853, June 2024, doi: [10.1016/j.ijepes.2024.109853](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109853).
- [15] H.U. Rehman, X. Yan, M.A. Abdelbaky, M.U. Jan and S. Iqbal, "An advanced virtual synchronous generator control technique for frequency regulation of grid-connected PV system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, Article Number: 106440, Feb. 2021, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106440](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106440).
- [16] G. Shahgholian, B. Fani, B. Keyvani, H. Karimi and M. Moazzami, "An improve in the rea-ctive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids," *Energy Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 64-71, Oct. 2019, doi: [10.22052/9.3.64](https://doi.org/10.22052/9.3.64).
- [17] J. Alipoor, Y. Miura and T. Ise, "Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 451-458, June 2015, doi: [10.1109/JESTPE.2014.2362530](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2362530).
- [18] Z. Wang, F. Meng, Y. Zhang, W. Wang, G. Li and J. Ge, "Cooperative adaptive control of multi-parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 38, no. 4, pp. 2396-2408, Dec. 2023, doi: [10.1109/TEC.2023.3283048](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3283048).
- [19] M. Chen, D. Zhou and F. Blaabjerg, "Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 399-411, May 2020, doi: [10.35833/MPCE.2019.000592](https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000592).

- [20] K.M. Cheema, "A comprehensive review of virtual synchronous generator," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, Article Number: 106006, Sept. 2020, doi: [10.1016/j.ijepes.2020.106006](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006).
- [21] Y. Chen and W. Wang, "A novel improved droop control for grid-supporting inverter combined with the virtual synchronous generator control," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 18, pp. 1601–1611, May 2023, doi: [10.1007/s42835-022-01297-8](https://doi.org/10.1007/s42835-022-01297-8).
- [22] I. Serban and C. P. Ion, "Microgrid control based on a grid-forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 89, pp. 94-105, July 2017, doi: [10.1016/j.ijepes.2017.01.009](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.01.009).
- [23] X. Liang, C. Andalib-Bin-Karim, W. Li, M. Mitolo and M. N. S. K. Shabbir, "Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 46-60, Jan./Feb. 2021, doi: [10.1109/TIA.2020.3039223](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3039223).
- [24] C. Sun, S. Q. Ali, G. Joos and F. Bouffard, "Design of hybrid-storage-based virtual synchronous machine with energy recovery control considering energy consumed in inertial and damping support," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 2648-2666, March 2022, doi: [10.1109/TPEL.2021.3111482](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3111482).
- [25] M. Malekpour, A. Kiyomarsi and M. Gholipour, "A hybrid adaptive virtual inertia controller for virtual synchronous generators," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 7, April 2021, doi: [10.1002/2050-7038.12913](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12913).
- [26] F. Wang, L. Zhang, X. Feng and H. Guo, "An adaptive control strategy for virtual synchronous generator," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5124-5133, Sept./Oct. 2018, doi: [10.1109/TIA.2018.2859384](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2859384).
- [27] T. Shi, J. Sun, X. Han and C. Tang, "Research on adaptive optimal control strategy of virtual synchronous generator inertia and damping parameters," *IET Power Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 121-133, Jan. 2024, doi: [10.1049/pel2.12620](https://doi.org/10.1049/pel2.12620).
- [28] J. Liu, Y. Miura and T. Ise, "Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3600-3611, May 2016, doi: [10.1109/TPEL.2015.2465852](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2465852).
- [29] J. Xiao, Y. Jia, B. Jia, Z. Li, Y. Pan and Y. Wang, "An inertial droop control based on comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 104-112, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.egyr.2020.12.003](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.003).
- [30] K. Shi, H. Ye, W. Song and G. Zhou, "Virtual inertia control strategy in microgrid based on virtual synchronous generator technology," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27949-27957, May 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2839737](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839737).
- [31] M.M. Elwakil, H.M.E. Zogaby, S.M. Sharaf and M.A. Mosa, "Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for islanded microgrid stability improvement," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, Article Number: 57, Nov. 2023, doi: [10.1186/s41601-023-00333-7](https://doi.org/10.1186/s41601-023-00333-7).
- [32] M. Shadoul, R. Ahshan, R.S. AlAbri, A. Al-Badi, M. Albadi and M. Jamil, "A comprehensive review on a virtual-synchronous generator: topologies, control orders and techniques, energy storages, and applications," *Energies*, vol. 15, no. 22, Article Number: 8406, Nov. 2022, doi: [10.3390/en15228406](https://doi.org/10.3390/en15228406).
- [33] J. Liang, H. Fan, L. Cheng, S. Rong, T. Li, T. Yu and L. Wang, "Control strategy for improving the frequency response characteristics of photovoltaic and energy storage systems based on VSG control," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2295-2305, June 2024, doi: [10.1016/j.egyr.2024.01.036](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.036).
- [34] D.Q. Yang, M.J. Li, T. Ma, J.W. Ni and Z.Y. Han, "Study on adaptive VSG parameters and SOC control strategy for PV-HESS primary frequency regulation," *Energy*, vol. 314, Article Number: 133909, Jan. 2025, doi: [10.1016/j.energy.2024.133909](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133909).
- [35] A. Suvorov, A. Askarov, N. Ruban, V. Rudnik, P. Radko, A. Achitaev and K. Suslov, "An adaptive inertia and damping control strategy based on enhanced virtual synchronous generator model," *Mathematics*, vol. 11, no. 18, Article Number: 3938, Sept. 2023, doi: [10.3390/math11183938](https://doi.org/10.3390/math11183938).
- [36] S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines- Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," *Proceeding of the IEEE/PTC*, pp. 1-7, Grenoble, France, June 2013, doi: [10.1109/PTC.2013.6652456](https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652456).

- [37] V. Thomas, S. Kumaravel and S. Ashok, "Virtual synchronous generator and its comparison to droop control in microgrids," *Proceeding of the IEEE/PICCC*, pp. 1-4, Thrissur, India, Jan. 2018, doi: [10.1109/PICCC.2018.8384798](https://doi.org/10.1109/PICCC.2018.8384798).
- [38] A. Villa, F. Belloni, R. Chiumeo and C. Gandolfi, "Conventional and reverse droop control in islanded microgrid: Simulation and experimental test," *Proceeding of the IEEE/SPEEDAM*, pp. 288-294, Capri, Italy, June 2016, doi: [10.1109/SPEEDAM.2016.7526020](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2016.7526020).
- [39] B. Fani, H. Bisheh and A. Karami-Horestani, "An offline penetration-free protection scheme for PV-dominated distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 1-9, April 2018, doi: [10.1016/j.epsr.2017.11.020](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.11.020).
- [40] G. Shahgholian, M. Moazzami and M. Dehghani, "A brief review of the application and control strategies of alternating current microgrids in the power system," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 4, no. 2, pp. 17-34, Sept. 2025, doi: [10.30486/TEEGES.2025.1121457](https://doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1121457).
- [41] X. Wang and H. Wang, "Improved droop control strategy of multiple energy storage applications in an ac microgrid based on the state of charge," *Electronics*, vol. 10, no. 14, Article Number: 1726, July 2021, doi: [10.3390/electronics10141726](https://doi.org/10.3390/electronics10141726).
- [42] R. Ayop and C. W. Tan, "Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 322-335, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.solener.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.016).
- [43] F. Lu and H. Liu, "An accurate power flow method for microgrids with conventional droop control," *Energies*, vol. 15, no. 16, Article Number: 5841, Aug. 2022, doi: [10.3390/en15165841](https://doi.org/10.3390/en15165841).
- [44] H. Wang, C. Yang, X. Liao, J. Wang, W. Zhou and X. Ji, "Artificial neural network-based virtual synchronous generator dual droop control for microgrid systems," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 111, Article Number: 108930, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.compeleceng.2023.108930](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108930).
- [45] X. Gao, D. Zhou, A. Anvari-Moghaddam and F. Blaabjerg, "An adaptive control strategy with a mutual damping term for paralleled virtual synchronous generators system," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, Article Number: 101308, June 2024, doi: [10.1016/j.segan.2024.101308](https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101308).
- [46] B. Ren, Q. Li, Z. Fan and Y. Sun, "Adaptive control of a virtual synchronous generator with multiparameter coordination," *Energies*, vol. 16, no. 12, Article Number: 4789, June 2023, doi: [10.3390/en16124789](https://doi.org/10.3390/en16124789).
- [47] K.M. Cheema and K. Mehmood, "Improved virtual synchronous generator control to analyse and enhance the transient stability of microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 4, pp. 495-505, March 2020, doi: [10.1049/iet-rpg.2019.0855](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0855).
- [48] V. Mallemaci, F. Mandrile, S. Rubino, A. Mazza, E. Carpaneto and R. Bojoi, "A comprehensive comparison of virtual synchronous generators with focus on virtual inertia and frequency regulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 201, Article Number: 107516, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.epsr.2021.107516](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107516).
- [49] J. Chen and T. O'Donnell, "Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 11, pp. 2965-2977, Sept. 2019, doi: [10.1049/iet-pel.2018.5711](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5711).
- [50] H.S. Salama, A. Bakeer, G. Magdy and I. Vokony, "Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system," *Journal of Energy Storage*, vol. 44, Article Number: 103466, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.est.2021.103466](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103466).
- [51] G. Wang, C. Wang, Q. Hao and M. Shahidehpour, "Load frequency control method for cyber-physical power systems with 100% renewable energy," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 4684-4698, March 2024, doi: [10.1109/TPWRS.2023.3301303](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3301303).

Low Latency and Power Efficient Reversible Full Adder Based on Toffoli Gates

Seyedeh Fatemeh Deymad¹  | Nabiollah Shiri^{2*}  | Farshad Pesaran³ 

¹Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran. f.daymad@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran. na.shiri@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran. farshad.pesaran@iau.ac.ir

Correspondence

Nabiollah Shiri, Assistant Professor of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran. na.shiri@iau.ac.ir

Main Subjects:

Electronics Integrated Circuits

Paper History:

Received: 9 June 2023

Revised: 2 July 2023

Accepted: 15 July 2023

Abstract

The reversible circuits are useful in energy-saving applications because of their unique features. Hence, using 32 nm carbon nanotube field-effect transistor (CNTFET) technology and relying on Toffoli's reversible gates, a new full adder (FA) circuit is presented. The proposed circuit has 4 basic Toffoli gates and 18 transistors. 3 of the 4 gates have the same transistor schematic with a constant-ON transistor, but the remaining gate has only two transistors. The proposed circuit has 3 constant inputs and 4 garbage outputs. As a new method, in the proposed circuit, only one type of reversible gate is used. The results show the superiority of the proposed FA in terms of power consumption and energy dissipation. By implementing the proposed FA and other circuits in a 4-bit and 8-bit ripple carry adder (RCA), the proposed circuit shows improvements by 6.83% and 11.25% in terms of power and energy, respectively, compared to the main competitor. Also, in an 8-bit RCA, the proposed FA has a 2% saving compared to the nearest competitor and 27% compared to the worst circuit in terms of the power-delay-area-product (PDAP). These results show the designed FA as a favorable option for complex structures with high-order bits.

Keywords: Full adder, Toffoli gate, Reversible design, Low power, High speed, Ripple carry adder.

Highlights

- Covering the lack of transistor design of reversible FA based on CNTFET technology with a channel length of 32nm.
- Design of a new Toffoli gate (TG) and its usage in the proposed full adder for circuitry performance improvement in terms of power and delay.
- Use of only one type of reversible gate, Toffoli gate (TG), in the design of the proposed full adder.
- Obtaining the proposed full adder with high precision in terms of output voltage generation for use in various high-speed and frequency-dependent applications.

Citation: S.F. Deymad, N. Shiri, and F. Pesaran, "Low Latency and Power Efficient Reversible Full Adder based on Toffoli Gates," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 36–51, 2025, doi:10.30495/jce.2023.1988197.1207 [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

With the limitations imposed by Moore's Law on conventional MOSFETs, researchers have increasingly turned to post-CMOS technologies such as carbon nanotube field-effect transistors (CNTFETs), single-electron transistors (SETs), and quantum cellular automata (QCA) [1]. However, when these technologies are applied to complex structures, they face several challenges, including short-channel effects, reduced gate control, exponential increases in leakage current, process variations, and high power density. These issues have driven researchers to explore new methods for designing integrated circuits (ICs) [2–5].

Among the various methods proposed in the literature, irreversible circuits—designed using conventional mechanisms—are widely used. However, irreversible digital circuits face fundamental challenges, such as high power consumption, low speed, and high energy consumption relative to their area. To address these issues, reversible logic gates have emerged as a promising approach for designing digital circuits. Reversible logic offers unique features, including the potential for zero power dissipation under ideal conditions, as discussed in the literature [6–8].

In conventional irreversible operations, energy loss occurs at a rate of $KT\ln 2$ Joules per bit loss, where K is the Boltzmann constant and T is the temperature. While this energy loss may seem negligible at first, it becomes significant when scaled to the entire chip level. In contrast, reversible circuits ensure that the number of inputs and outputs are equal, with the number of inputs being equal to the sum of the outputs and garbage outputs (GOs). When evaluating reversible logic circuits, key performance metrics include power consumption, energy dissipation, delay time, and area occupation. Additionally, reversible logic gates allow the use of constant inputs (CIs), such as 0 or 1, to achieve the desired logical operations. However, to construct reversible circuits based on $n \times n$ (input $\times$ output) logic gates, certain outputs—referred to as garbage outputs (GOs)—are generated that are not useful for other parts of the system.

Given the unique characteristics of reversible circuits, they are well-suited for designing basic digital circuits such as full adders (FAs), which serve as the foundation for more complex computing circuits like multipliers, dividers, and digital filters. Reversible gates come in various types, including Inverter, Feynman, Toffoli, Peres, and Fredkin. Based on these gates, numerous reversible FA circuits have been proposed in the literature, each differing in the number and type of gates, constant inputs, and garbage outputs.

2. Innovation and contributions

The proposed circuit is thoroughly analyzed from multiple perspectives. First, the block diagram of the proposed circuit is presented and compared with previous works discussed in the earlier section. Next, the transistor-level structure of the circuit is examined, highlighting its advantages and key features. The circuit consists of 4 Toffoli gates (TGs), and by comparing its block diagram with existing works, the innovation in terms of the number and type of gates becomes evident.

To sum the three inputs (A , B , and C_{in}) and produce the two outputs (Sum and C_{out}), the circuit employs two distinct stages with different numbers of inputs and types of constant inputs. The proposed circuit includes two constant inputs of 1 and one constant input of 0, along with 3 garbage outputs (GOs). Given its unique structure and the use of Toffoli gates, the circuit is expected to exhibit low power consumption and high speed.

The low power consumption can be attributed to several factors, such as the minimal impact of certain transistors (e.g., those that are permanently ON) on power usage. Additionally, since the Sum and Cout outputs are independent in the proposed circuit, the power consumption of each gate is isolated and significantly reduced. Although the circuit has a relatively high number of internal nodes, these nodes feature low internal capacitance (as they are formed by approximately two transistors, similar to inverter outputs). This results in two key advantages: reduced power consumption and faster signal transmission during the charge and discharge cycles of these capacitors.

For simulation, the proposed circuit and other benchmark circuits are implemented using the 32 nm Stanford University CNFET technology, a reliable post-CMOS technology. Simulations are conducted based on the parameters listed in Table 2, and all circuit parameters—including power, delay, and energy consumption—are extracted using HSPICE codes. The power results are reported as dynamic average power consumption, while the delay is calculated based on the worst-case input-to-output path delay. Energy consumption is evaluated using the power-delay product (PDP).

Initial simulations are performed at a working frequency of 250 MHz, and the input and output waveforms of the proposed circuit are extracted, confirming that the outputs achieve full swing. To evaluate the circuit under more realistic conditions, a ripple carry adder (RCA) is employed, along with an independent fan-out generator based on the Feynman gate. The fan-out generator, consisting of 3 transistors, does not significantly increase the circuit's area, power consumption, or overall delay.

For the 4-bit RCA, 4 full adders (FAs) and 8 fan-out generators are required, while the 8-bit RCA requires 8 FAs and 16 fan-out generators.

4. Results and Discussion

The proposed circuit, comprising 18 transistors, demonstrates superior performance in terms of power consumption and power-delay product (PDP) compared to other circuits. In terms of power consumption, the proposed circuit achieves 10.157 μW in 4-bit mode and 26.547 μW in 8-bit mode, outperforming the FT circuit by 20.41% and 31.61%, respectively.

Regarding PDP, the closest competitor to the proposed circuit in 4-bit mode is the RFA-3 circuit, with the proposed circuit showing a 6.83% improvement. In 8-bit mode, the FT circuit is the closest competitor, with the proposed circuit achieving an 11.25% better performance. These results highlight the superior performance of the proposed circuit, particularly in terms of power and PDP, despite having a higher number of transistors compared to some circuits.

To ensure a fairer comparison, the power-delay-area product (PDAP)—calculated as the product of PDP and the number of transistors—is used. The results, as shown in Table 4, indicate that in 4-bit mode, the RFA-3 circuit uses the fewest transistors, while in 8-bit mode, the RFA-1 circuit has the lowest transistor count.

In 4-bit mode, the proposed circuit shows a 12.78% improvement over the RFA-3 circuit, while in 8-bit mode, it outperforms the RFA-3 circuit by 17.57%. These results demonstrate that the proposed circuit is particularly effective for high-bit applications, outperforming most existing circuits, especially the RFA-3 circuit.

5. Conclusion

In this article, a new reversible full adder (FA) is proposed, featuring 18 transistors and a novel block diagram based on the Toffoli reversible gate. The proposed circuit, with 3 constant inputs and 4 garbage outputs, demonstrates excellent performance in terms of power consumption and energy dissipation. A key distinguishing feature of this circuit is its use of only one type of gate (Toffoli gate) in its main structure, unlike other reference circuits that rely on a combination of various reversible gates to implement an FA.

Extensive simulations were conducted using HSPICE software under various conditions to validate the superiority of the proposed circuit, particularly in high-order bit implementations. When implemented in 4-bit and 8-bit ripple carry adder (RCA) structures, the proposed circuit outperforms its nearest competitor by 6.83% in power and 11.25% in energy efficiency. Furthermore, considering the number of transistors used, the proposed circuit achieves a 2% improvement over its closest competitor and a 27% improvement over the least efficient circuit in terms of the power-delay-area product (PDAP) in 8-bit mode.

5. Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the Islamic Azad University of Shiraz for their support throughout this research.

References

- [1] A. Sadeghi, R. Ghasemi, H. Ghasemian and N. Shiri, "High Efficient GDI-CNTFET-Based Approximate Full Adder for Next Generation of Computer Architectures," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 33-36, March 2023, doi: [10.1109/LES.2022.3192530](https://doi.org/10.1109/LES.2022.3192530).
- [2] A. Sadeghi et al., "Voltage over-scaling CNT-based 8-bit multiplier by high-efficient GDI-based counters," *IET Comput. Digit., Tech.*, vol. 17, pp. 1– 19, Nov. 2023, doi: [10.1049/cdt2.12049](https://doi.org/10.1049/cdt2.12049).
- [3] N. Shiri, A. Sadeghi, M. Rafiee and M. Bigonah, "SR-GDI CNTFET-based magnitude comparator for new generation of programmable integrated circuits," *Int J Circ Theor.*, vol. 50, no. 5, pp. 1511- 1536, Apr. 2022, doi: [10.1002/cta.3251](https://doi.org/10.1002/cta.3251).
- [4] M. Rafiee, N. Shiri and A. Sadeghi, "High-Performance 1-Bit Full Adder With Excellent Driving Capability for Multistage Structures," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 47-50, March 2022, doi: [10.1109/LES.2021.3108474](https://doi.org/10.1109/LES.2021.3108474).
- [5] M. Sayyaf, A. Ghasemi and R. Hamzehyan, "Design of Low Power Single-Bit Full-Adder Cell Based on Pass-Transistor Logic," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 105-112, 2023, doi: [10.30495/jce.2022.692834](https://doi.org/10.30495/jce.2022.692834).
- [6] H. Arfavi, S. M. Riazi and R. Hamzehyan, "Evaluation of temperature, Disturbance and Noise Effect in Full Adders Based on GDI Method," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 50, pp. 47-66, 2023, doi: [10.30495/jce.2023.1973764.1197](https://doi.org/10.30495/jce.2023.1973764.1197).

- [7] S. Raveendran, P. J. Edavoor, N. Y. B. Kumar and M. H. Vasantha, "An Approximate Low-Power Lifting Scheme Using Reversible Logic," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183367-183377, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3029149](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029149).
- [8] M. Haghparast and K. Navi, "A Novel Reversible Full Adder Circuit for Nanotechnology Based Systems," *Journal of Applied Sciences*, vol. 7, no. 24, pp. 3995-4000, Dec. 2007, doi: [10.3923/jas.2007.3995.4000](https://doi.org/10.3923/jas.2007.3995.4000).

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

Author Contributions: Seyedeh Fatemeh Deymad: Software, simulation, methodology, original draft preparation; Nabiollah Shiri: Evaluation, supervision, methodology, manuscript editing; Farshad Pesaran: Resources, manuscript editing.

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

جمع کننده کامل برگشت پذیر با تأخیر کم و کارآمد بر اساس گیت های تافولی

سیده فاطمه دیماد^۱ | نبی اله شیرازی^۲ | فرشاد پسران^۳

چکیده:

مدارهای برگشت پذیر به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود در کاربردهای با تمرکز بر صرفه جویی در انرژی مفید هستند. از این رو، با استفاده از فناوری ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی ۳۲ نانومتری (CNTFET) و با تکیه بر دروازه های برگشت پذیر تافولی (Toffoli)، یک مدار تمام جمع کننده (FA) جدید ارائه شده است. مدار پیشنهادی دارای ۴ گیت اصلی تافولی و ۱۸ ترانزیستور است. ۳ گیت از ۴ گیت دارای همان شماتیک ترانزیستور با یک ترانزیستور همیشه روشن می باشند، اما گیت باقیمانده فقط دو ترانزیستور دارد. مدار پیشنهادی دارای ۳ ورودی ثابت و ۴ خروجی زباله می باشد. به عنوان یک روش جدید، در مدار پیشنهادی، تنها از یک نوع گیت برگشت پذیر استفاده می شود. نتایج نشان دهنده برتری تمام جمع کننده پیشنهادی از نظر مصرف توان و اتلاف انرژی است. با پیاده سازی مدارهای پیشنهادی تمام جمع کننده و سایر مدارها در جمع کننده حمل موج دار ۴ بیتی و ۸ بیتی (RCA)، مدار پیشنهادی نسبت به رقیب اصلی به ترتیب ۶۸۳/۸ درصد و ۱۱/۲۵٪ از نظر توان و انرژی بهبود یافته است. همچنین، در یک RCA ۸ بیتی، FA پیشنهادی ۲٪ صرفه جویی (saving) در مقایسه با نزدیک ترین (nearest) رقیب و ۲۷٪ نسبت به بدترین مدار از نظر حاصل ضرب توان-تأخیر-سطح مصرفی (PDAP) دارد. این نتایج تمام جمع کننده طراحی شده را به عنوان یک گزینه مطلوب برای ساختارهای پیچیده با بیت های مرتبه بالا نشان می دهد.

^۱ گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

F.daymad@gmail.com

^۲ گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

na.shiri@iau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

farshad.pesaran@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*نبی اله شیرازی، استادیار گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

na.shiri@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

مدارهای مجتمع الکترونیک

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۹ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۱ تیر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۴ تیر ۱۴۰۲

کلیدواژه ها: تمام جمع کننده کامل، توان کم، جمع کننده حمل موج دار، طراحی برگشت پذیر، سرعت بالا، گیت تافولی

تازه های تحقیق:

- پوشش عدم وجود طراحی ترانزیستوری مدارهای تمام جمع کننده برگشت پذیر بر اساس تکنولوژی CNTFET با طول 32nm.
- استفاده از تنها یک نوع گیت برگشت پذیر، تنها Toffoli، در طراحی تمام جمع کننده پیشنهادی.
- طراحی یک گیت جدید Toffoli مورد استفاده در مدار پیشنهادی FA برای بهبود عملکرد مداری از نظر توان و تأخیر.
- دستیابی به مدار FA پیشنهادی با دقت بالا از نظر تولید ولتاژ خروجی برای کاربردهای سرعت بالا و وابسته به فرکانس.

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

با محدودیت قانون مور در مورد ترانزیستورهای معمولی تراشه‌های الکترونیکی که ماسفت^۱ هستند، فناوری های فراتر از CMOS مانند CNTFET^۲، SET^۳ و QCA^۴ به طور گسترده توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. دلیل استفاده از این فناوری‌ها قابلیت آنها در کاهش طول کانال ترانزیستور تا محدوده زیر ۵۰ نانومتر است که موضوع اصلی تراشه‌های مدرن امروزی برای وسایل الکترونیکی قابل حمل مانند تلفن همراه است. با این حال، زمانی که این فناوری‌ها در ساختارهای پیچیده استفاده می‌شوند، محدودیت‌های مختلفی مانند اثرات کانال کوتاه، کاهش کنترل گیت، افزایش تصاعدی جریان نشتی، تغییرات فرآیند و چگالی توان بالا به وجود می‌آیند که محققان را وادار می‌کند تا روش‌های جدیدی را برای طراحی^۵ IC ارائه کنند [۲-۴]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، روش‌های مختلفی در ادبیات مانند طراحی در سطح ترانزیستور و سطح گیتی بر اساس مفاهیم مختلفی مانند MVL^۶ (منطق چند مقداری)، ML^۷ (منطق اکثریت) و AC^۸ (محاسبات تقریبی) توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است [۵]. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایب منحصربه‌فرد خود هستند که هنگام استفاده از آنها در پیاده‌سازی واقعی باید به طور جدی مورد توجه قرار گیرد. این روش‌ها که به طور منظم و بر اساس مکانیسم‌های فوق طراحی می‌شوند، مدارهای برگشت‌ناپذیر^۹ نامیده می‌شوند. با این حال، یکی از چالش‌های اساسی طراحی و پیاده‌سازی مدارهای دیجیتال برگشت را می‌توان به مصرف توان بالا، سرعت کم و مصرف انرژی بالا نسبت به مساحت مصرفی آنها نسبت داد. برای این منظور، یکی از تکنیک‌های نوظهور طراحی مدارهای دیجیتال، استفاده از گیت‌های منطقی برگشت‌پذیر است که دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند [۶-۸]. در شرایط ایده‌آل، طرح‌های مبتنی بر تکنیک برگشت‌پذیر می‌توانند ویژگی بسیار مهمی داشته باشند و آن اتلاف صفر از نظر توان در آنها است که در مقالات به آن پرداخته شده است. علیرغم نوع تکنولوژی، عملیات برگشت‌ناپذیر در اشکال معمولی منجر به از دست دادن انرژی $K_B T \ln 2$ [۸] ژول برای هر بیت مصرفی می‌شود که در آن K_B ثابت بولتزمن و T دما است. اگرچه این انرژی مصرف شده در نگاه اول ناچیز است، اما زمانی که در سطح کل تراشه در نظر گرفته شود به یک مسئله مهم تبدیل می‌شود. برخی از ویژگی‌های اصلی مدارهای مبتنی بر برگشت‌پذیر به شرح زیر است [۸]،

- تعداد مساوی ورودی و خروجی.
- ماهیت منحصربه‌فرد خروجی‌ها نقشه‌برداری یک به یک.
- حداقل تعداد گیت‌های برگشت‌پذیر استفاده شود. تعداد گیت برگشت‌پذیر مورد استفاده برای تحقق عملکرد باید تا حد امکان حداقل باشد تا تأخیر انتشار^{۱۰}، هزینه کوانتومی^{۱۱} و مساحت تراشه کاهش یابد.
- حداقل تعداد خروجی زباله. این به خروجی‌هایی اشاره دارد که استفاده نمی‌شوند و بنابراین باید تا حد امکان کم باشند.
- حداقل تعداد ورودی‌های ثابت. این به ورودی‌هایی اشاره دارد که باید در منطق "۰" یا منطق "۱" ثابت نگه داشته شوند و باید حداقل باشند.
- بدون بازخورد^{۱۲} باید باشند.

¹ Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor

² Carbon nanotube field-effect transistor

³ Single-electron transistors

⁴ quantum dot cellular automata

⁵ Implementing integrated circuits

⁶ Multiple-Valued Logic

⁷ Majority logic

⁸ approximate computing

⁹ irreversible circuits

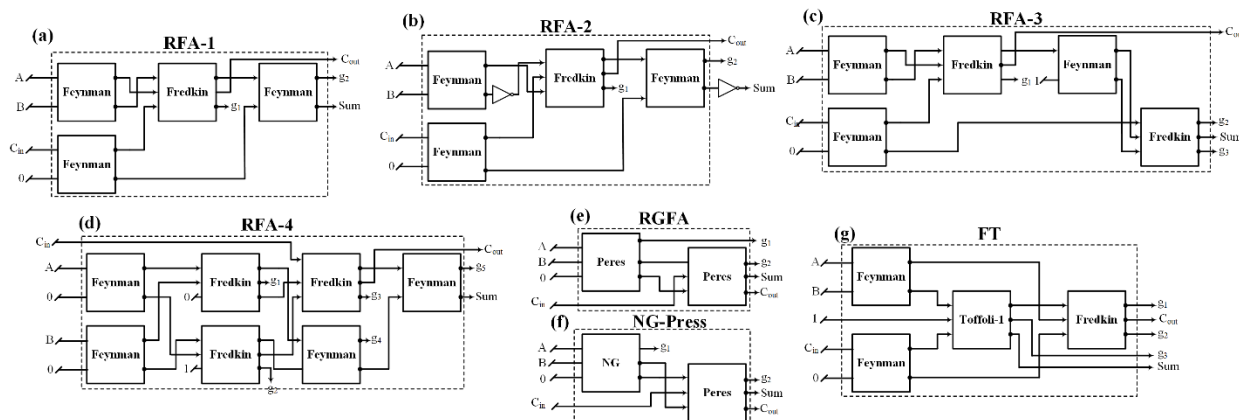
¹⁰ propagation delay

¹¹ quantum cost

¹² feedback

• بدون Fan-out باید باشند.

علاوه بر عملکرد مدار منطقی مبتنی بر برگشت‌پذیر، برخی پارامترهای دیگر نیز باید در نظر گرفته شود. در گیت‌های منطقی برگشت‌پذیر، ورودی‌های ثابتی مانند ۰ یا ۱ مجاز به استفاده برای تولید عملیات منطقی مورد نظر است، که به CI^1 معروف است. از سوی دیگر، برای این که بتوان مدارهای برگشت‌پذیر را بر اساس مفهوم گیت‌های منطقی $n \times n$ (ورودی×خروجی) تشکیل داد، باید خروجی‌هایی در قسمت‌های مختلف مدار تولید شود که برای سایر قسمت‌های سیستم مفید نباشد. این خروجی‌ها GO^2 نامیده می‌شوند



شکل ۱: سلول‌های برگشت‌پذیر در ادبیات: (a) شماتیک AFA1 [۹]، (b) شماتیک AFA2 [۹]، (c) شماتیک AFA3 [۹]، (d) شماتیک AFA4 [۹]، (e)

شماتیک RGFA [۱۰]، (f) شماتیک NG-Press [۱۱]، (g) شماتیک FT [۱۲]

Figure1. Literature reversible cells (a) RFA-1 [9], (b) RFA-2 [9], (c) RFA-3 [9], (d) RFA-4 [9], (e) RGFA [10], (f) NG-Press [11], (g) FT [12].

علاوه بر این، تعداد کل گیت‌های برگشت‌پذیر مورد استفاده در طراحی مدارهای برگشت‌پذیر GC^3 نامیده می‌شود و همچنین تعداد مراحل از ورودی‌ها تا خروجی‌هایی که حاوی GC هستند، حائز اهمیت است. با توجه به ویژگی‌های مدارهای برگشت‌پذیر، می‌توان از این مفهوم در طراحی مدارهای دیجیتال پایه مانند تمام جمع‌کننده استفاده کرد که مبنای اجرای مدارهای محاسباتی دیگر مانند ضرب‌کننده‌ها، تقسیم‌کننده‌ها و فیلترهای دیجیتال است. گیت‌های برگشت‌پذیر انواع مختلفی دارند که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به اینورتر^۴، فاینمن^۵، تافولی^۶، پرز^۷، فردکین^۸ و NG^9 اشاره کرد. بر اساس این گیت‌ها، تمام جمع‌کننده‌های برگشت‌پذیر متفاوتی مطابق شکل ۱ در مقالات ارائه شده‌اند که هر کدام دارای تعداد گیت‌های متفاوت، انواع مختلف گیت، برخی ورودی‌های ثابت و خروجی‌های زباله متعدد هستند. بر این اساس در این مقاله یک تمام جمع‌کننده برگشت‌پذیر جدید مبتنی بر گیت‌های تافولی ارائه شده است. در این راستا، موارد زیر به نوآوری‌ها و سهم اصلی این مقاله می‌پردازند که در مقایسه با مدارهای دیگر مورد توجه قرار می‌گیرند،

• این مقاله عدم وجود تحقیق در زمینه پیاده‌سازی ترانزیستوری تمام جمع‌کننده‌های برگشت‌پذیر، به ویژه بر اساس فناوری CNTFET با طول کانال زیر ۵۰ نانومتر را پوشش می‌دهد.

¹ constant input

² garbage outputs

³ gate count

⁴ inverter

⁵ Feynman

⁶ Toffoli

⁷ Press

⁸ Fredkin

⁹ New-gate

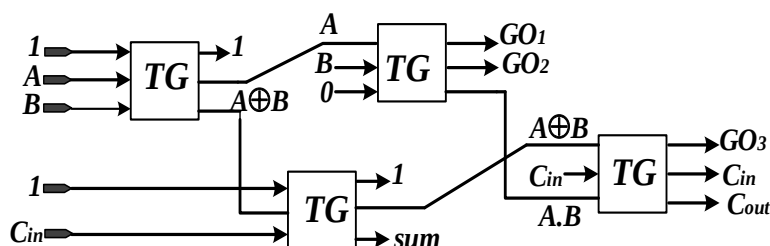
در مقایسه با مدارهای دیگر، مدار پیشنهادی تنها سلولی است که فقط از یک نوع گیت برگشت پذیر استفاده می کند. در تمام مدارهای مرجع، حداقل از دو نوع دروازه برگشت پذیر استفاده شده است. مطابق شکل ۲ در مقاله، بلوک دیاگرام مدار پیشنهادی فقط دارای گیت تافولی^۱ (TG) است. این عامل یکی از نوآوری های ایجاد شده در مورد مشخصات فیزیکی مدار پیشنهادی است.

• یک ساختار ترانزیستوری متفاوت برای TG در تمام جمع کننده پیشنهادی استفاده شده است که عملکرد را از نظر توان و مساحت بهبود می بخشد.

در قسمت های بعدی مدار پیشنهادی به طور کامل بررسی می شود. سازمان دهی این مقاله به شرح زیر است: بخش ۲ جزئیاتی را در مورد ساختار پیشنهادی از نظر بلاک دیاگرام و شماتیک ترانزیستوری ارائه می دهد. در بخش ۳ تنظیمات شبیه سازی و نتایج حاصله ارائه شده و در نهایت مقاله در بخش ۴ نتیجه گیری می شود.

۲- تمام جمع کننده کامل پیشنهادی مبتنی بر تافولی برگشت پذیر

در این قسمت از مقاله مدار پیشنهادی از دیدگاه های مختلف به طور کامل بررسی شده است. ابتدا بلوک دیاگرام مدار پیشنهادی ارائه شده و با کارهای قبلی که در قسمت قبل معرفی شده اند مقایسه شده است. در ادامه ساختار ترانزیستوری تمام جمع کننده پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و ویژگی های اساسی این مدار ارائه شده است. شکل ۲ بلوک دیاگرام مدار پیشنهادی را نشان می دهد. این مدار دارای ۴ گیت TG می باشد. با مقایسه این بلوک دیاگرام و سایر آثار در این زمینه می توان به نوآوری ایجاد شده از نظر تعداد گیت های استفاده شده و نوع آن ها پی برد. برای روشن تر شدن موضوع، مدارهای قبلی مانند RFA-1^۲، RFA-2 و RFA-4 از انواع گیت های برگشت پذیر با اعداد مختلف به طور هم زمان استفاده کرده اند که تفاوت ساختار فیزیکی این مدارها با مدار پیشنهادی را از نظر نشان می دهد.



شکل ۲: بلوک دیاگرام تمام جمع کننده پیشنهادی.

Figure 2. Block diagram of the proposed circuit.

برای جمع سه ورودی A، B و Cin در این مدار و تولید دو خروجی Sum و Cout که حاصل جمع و رقم نقلی خروجی می باشند به ترتیب دو مرحله متفاوت با تعداد ورودی متفاوت و انواع ورودی های ثابت در نظر گرفته شده است. مدار پیشنهادی دارای دو ورودی ثابت '۱' و یک ورودی ثابت '۰' است. همچنین این مدار دارای ۳ خروجی زباله می باشد. روابط بولن مدار پیشنهادی بر اساس روابط ۱ و ۲ است. در اینجا، از فرمول ها، گیت های اصلی مدار (A⊕B) و (A.B) هستند.

$$\text{Sum} = A \oplus B \oplus C_{in} \quad (1)$$

$$C_{out} = (A.B) \oplus [C_{in}.(A \oplus B)] \quad (2)$$

¹ Toffoli gate

² Approximate full adder

جدول ۱ روابط بولن تمام جمع‌کننده پیشنهادی را با مدارهای دیگر مقایسه می‌کند. بر این اساس، رابطه بولن مورد استفاده در مدار پیشنهادی برای Sum برابر است با رابطه بولن مورد استفاده در RGFA^۱، NG-Press^۲ و FT^۳. همچنین، C_{out} مدار پیشنهادی نسبت به مدارهای دیگر رابطه بولن مشابهی دارد. اگرچه روش تولید دو خروجی در تمام جمع‌کننده پیشنهادی از نظر نوع گیت‌ها با مدارهای دیگر متفاوت است.

شماتیک ترانزیستور تمام جمع‌کننده ارائه شده در شکل ۳ نشان داده شده است که دارای ۱۸ ترانزیستور به شکل TG است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، گیت‌های TG1 و TG3 دارای طرح‌واره‌های یکسان با استفاده از ۵ ترانزیستور هستند، در حالی که TG4 از یک ترانزیستور اضافی برای تولید گیت AND استفاده می‌کند. از سوی دیگر، TG2 با استفاده از ۲ ترانزیستوری، طرح متفاوتی دارد. به طور کلی استفاده از گیت‌های TG مختلف با تعداد ترانزیستورهای مختلف سلول پیشنهادی را با ۱۸ ترانزیستور معرفی می‌کند. برای برگشت‌پذیر کردن گیت‌های TG1 و TG3، از ترانزیستور نوع N استفاده می‌شود که ورودی V_{DD} ثابتی به ترمینال گیت آن‌ها اعمال می‌شود. این بدان معناست که این ترانزیستور مانند یک مقاومت بسیار کوچک عمل می‌کند و دائماً روشن است.

جدول ۱: مقایسه بین سلول پیشنهادی و مراجع.

Table 1. Comparison between proposed cell and the references.

	Sum	C _{out}
RFA-1 [9]	$Sum = A \oplus B \oplus C_{in}$	$C_{out} = (A \oplus B).A + (A \oplus B).C_{in}$
RFA-2 [9]	$Sum = ((A \oplus B) \oplus C_{in})$	$C_{out} = (A \oplus B).A + (A \oplus B).C_{in}$
RFA-3 [9]	$Sum = (A \oplus B).C_{in} + (A \oplus B).C_{in}$	$C_{out} = (A \oplus B).A + (A \oplus B).C_{in}$
RFA-4 [9]	$Sum = (A \oplus B).C_{in} + (A \oplus B).C_{in}$	$C_{out} = (A.B).A + (A \oplus B).C_{in}$
RGFA [10]	$Sum = A \oplus B \oplus C_{in}$	$C_{out} = (A.B) \oplus (A \oplus B).C_{in}$
NG-press [11]	$Sum = A \oplus B \oplus C_{in}$	$C_{out} = (A.B) \oplus (A \oplus B).C_{in}$
FT [12]	$Sum = A \oplus B \oplus C_{in}$	$C_{out} = (A \oplus B).A + (A \oplus B).C_{in}$
Proposed	$Sum = A \oplus B \oplus C_{in}$	$C_{out} = (A.B) \oplus [C_{in}.(A \oplus B)]$

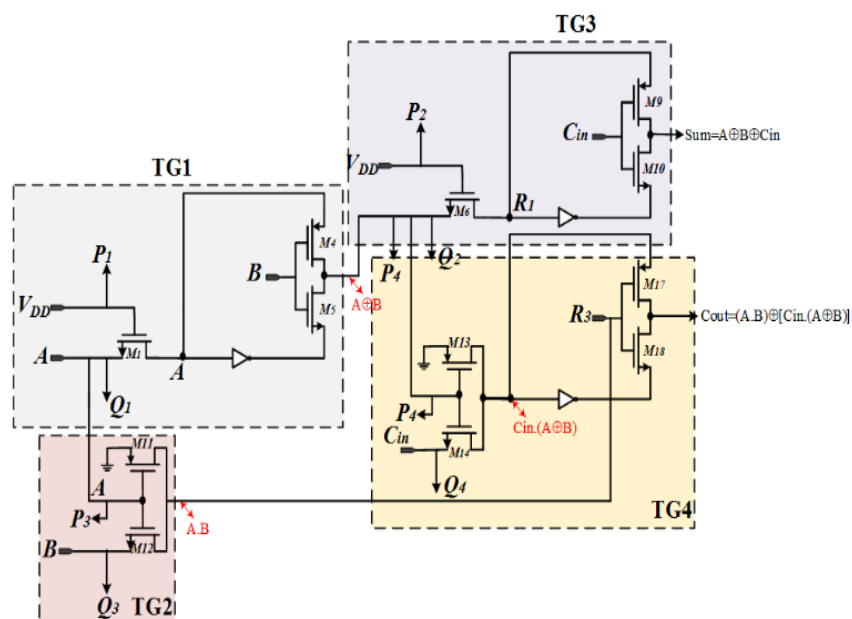
بنابراین، این تک ترانزیستور ابتدا نیاز مدار را برای اعمال ورودی ثابت '۱' برآورده می‌کند و سپس مدار را به حالت برگشت‌پذیر تبدیل می‌کند. این نیاز به طور خودکار در گیت TG4 انجام می‌شود، بنابراین نیازی به یک ترانزیستور نوع N در آن نیست. از طرف دیگر، در گیت TG2، یک ورودی ثابت ۰ به مدار اعمال می‌شود که یکی از سیگنال‌های اعمال شده به پایه درین/سورس ترانزیستور نوع P است. این عمل باعث می‌شود مدار TG2 که وظیفه تولید (A.B) را بر عهده دارد، برگشت‌پذیر باشد. با توجه به ساختار قابل توجه مدار پیشنهادی و استفاده از گیت‌های تافولی، انتظار می‌رود که این مدار مصرف توان کم و سرعت بالا را نشان دهد. مصرف کم توان در این مدار دلایل مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به عدم تأثیر برخی از ترانزیستورها در مصرف توان اشاره کرد، مانند ترانزیستورهایی که دائماً روشن هستند. همچنین از آنجایی که Sum و C_{out} در مدار پیشنهادی مستقل هستند، انتظار می‌رود که تأثیر هر گیت بر مصرف توان مجزا و بسیار کم باشد. اگرچه مدار پیشنهادی دارای تعداد گره‌های داخلی بالایی است، اما مشاهده می‌شود که این گره‌ها دارای مقدار کمی خازن داخلی هستند (چون تقریباً بر اساس دو ترانزیستور مانند خروجی وارونسازها^۴ تشکیل می‌شوند) که منجر به دو نتیجه مهم می‌شود. مانند کاهش مصرف توان و افزایش سرعت انتقال اطلاعات در هنگام شارژ و دشارژ این خازن‌ها.

¹ Reversible gate full adder

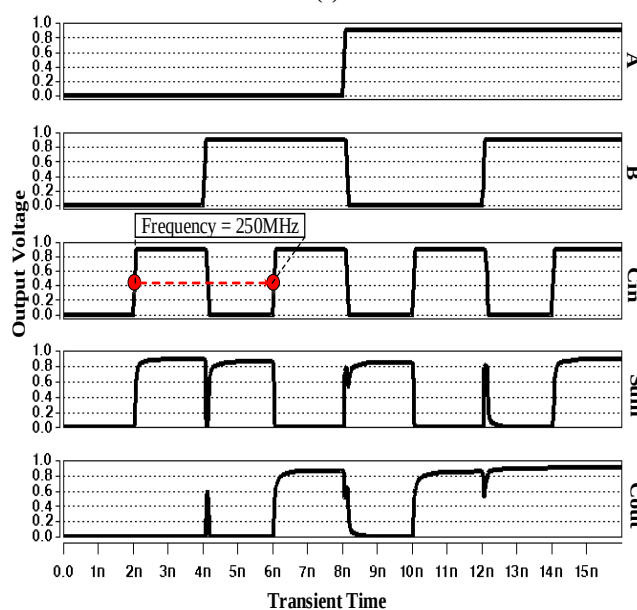
² New gate press

³ Fault tolerant

⁴ inverters



(a)



(b)

شکل ۳: (a) سطح ترانزیستوری، (b) شکل موج خروجی تمام جمع کننده پیشنهادی

Figure 3. (a) Block diagram, (b) output waveforms of the proposed circuit

هنگام در نظر گرفتن یک مدار تقریباً (یا کاملاً) مشابه زیر شرایط آزمایش^۱ (CUT) برای مدارهای مقیاس کوچک، مقادیر تأخیر تفاوت معنی داری نشان نمی دهد. لازم به ذکر است که مدارها تقریباً در یک فرکانس ثابت و با بدون fan-out های بزرگ بررسی شده اند، بنابراین دور از ذهن نیست که بتوان نتایج تقریباً یکسانی را در این مدارها انتظار داشت و می تواند نتایج گزارش شده را تأیید کند. از طرف دیگر توان مصرفی مدار در مقیاس کوچک یا بزرگ تفاوت قابل توجهی دارد. تقریباً تمام پارامترهای موجود مؤثر بر

¹ similar circuit under test

معادله توان دینامیکی مانند فرکانس، ضریب فعالیت و فرکانس کاری توسط کاربر و فناوری تعیین می‌شوند، به جز پارامتر خازن بار که رابطه مستقیمی با ساختار و فیزیک مدار دارد. بنابراین می‌توان گفت مهم‌ترین عامل تغییر مصرف توان در مقایسه مدارهای مختلف با یکدیگر تعداد ترانزیستورها است. البته تعداد ترانزیستورها کم یا زیاد نمی‌تواند نشان دهنده برتری یک مدار نسبت به مدارهای دیگر از نظر توان باشد. در این حالت با مشاهده شماتیک ترانزیستور مدار پیشنهادی می‌توان نتیجه گرفت که دو خروجی اصلی تنها توسط دو ترانزیستور تولید می‌شوند بنابراین مقدار خازن بار در آن‌ها بسیار ناچیز است که خود باعث کاهش قابل توجهی در مصرف توان می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که وقتی این مدار در ساختارهای بزرگ‌تر مانند ساختارهای ۴ بیتی و ۸ بیتی تعبیه شود، این کاهش چشمگیرتر می‌شود.

۳-تنظیمات شبیه‌سازی و نتایج

در این مقاله برای شبیه‌سازی مدارهای پیشنهادی تمام جمع‌کننده و سایر مدارها، از فناوری CNFET دانشگاه استنفورد با مدل ۳۲ نانومتری سازگار با SPICE استفاده شده است که یکی از مطمئن‌ترین فناوری‌های مربوط به تکنولوژی پس از CMOS است. شبیه‌سازی‌های این مقاله با توجه به پارامترهای جدول ۲ انجام شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها با تکنولوژی مشابه برای مقایسه منصفانه یعنی CNTFET 32 نانومتر انجام شده و مقدار V_{DD} برابر با ۰/۹ ولت در نظر گرفته شده است. از آنجایی که هیچ بهینه‌سازی عملکردی از نظر ابعاد ترانزیستور انجام نشده است، ابعاد تمامی ترانزیستورها یکسان در نظر گرفته می‌شود. دلیل اصلی در نظر نگرفتن روش‌های بهینه‌سازی، مقایسه منصفانه مدار پیشنهادی با سایر مدارها در شرایط کاملاً یکسان و مساوی است. لازم به ذکر است یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های CNFET‌ها برابری حامل‌های تحرک در نوع N و نوع P (به ترتیب الکترون و حفره) می‌باشد. بنابراین، برخلاف ترانزیستورهای معمولی، ترانزیستورهای ماسفت، برای دستیابی به زمان صعود و نزول برابر نیازی به اندازه‌گیری ترانزیستور نیست. همچنین، استفاده از CNTFET با در نظر گرفتن صحیح مقدار D_{CNT} ^۱ تا ۲/۹۷ نانومتر (مرتبط با بردار کایرالتی^۲ (۳۸،۰) ولتاژ آستانه برابر با ۰/۱۹۶ ولت، در ترانزیستورهای نوع N و P این امکان را فراهم می‌کند که این عامل باعث می‌شود ولتاژ خروجی حداقل افت ولتاژ داشته باشد. مقادیر در نظر گرفته شده برای همه ترانزیستورها بر حسب تعداد لوله، گام، D_{CNT} و V_{th} در جدول ۲ آورده شده است. تمام پارامترها از جمله توان، تاخیر و مصرف انرژی توسط نرم‌افزار HSPICE استخراج شده است. لازم به ذکر است که نتایج توان در قالب میانگین مصرف توان دینامیکی گزارش شده است. همچنین برای گزارش تأخیر مدارها، تأخیر مسیرهای ورودی به خروجی محاسبه شده و بدترین حالت در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، به عنوان نرخ مصرف انرژی مدارها، حاصل ضرب توان در تأخیر^۳ به عنوان (PDP) در نظر گرفته می‌شود.

شبیه‌سازی‌های اولیه در فرکانس کاری ۲۵۰ مگاهرتز انجام شده و شکل موج ورودی و خروجی مدار پیشنهادی استخراج شده است که نشان دهنده تمام سوئیچینگ بودن خروجی‌ها است (شکل ۳ (b)). دستیابی به خروجی‌های تمام سوئیچینگ می‌تواند نشان دهنده استفاده صحیح از گیت‌ها در این مدار باشد. همچنین خروجی قوی تر مدار باعث سرعت بهتر و در عین حال کاهش مصرف توان می‌شود. برای بررسی تمام جمع‌کننده‌های پیشنهادی در شرایط واقعی‌تر، از یک جمع‌کننده حمل موج دار (RCA) مطابق شکل ۴ استفاده شده است و نتایج در جدول ۳ گزارش شده است.

خروجی fan-out به طور مستقیم در مدارهای برگشت پذیر مجاز نیست. بنابراین از مدار مستقلی به نام تولیدکننده fan-out استفاده شده است که بر اساس گیت فاینمن شکل می‌گیرد که در شکل ۴ نشان داده شده است. این مدار دارای ۳ ترانزیستور است که به ویژه مصرف مساحت مدار را به میزان قابل توجهی افزایش نمی‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر مصرف توان و تأخیر کل مدار ندارد.

¹ Carbon nanotube transistor Diameter

² Chirality Vector

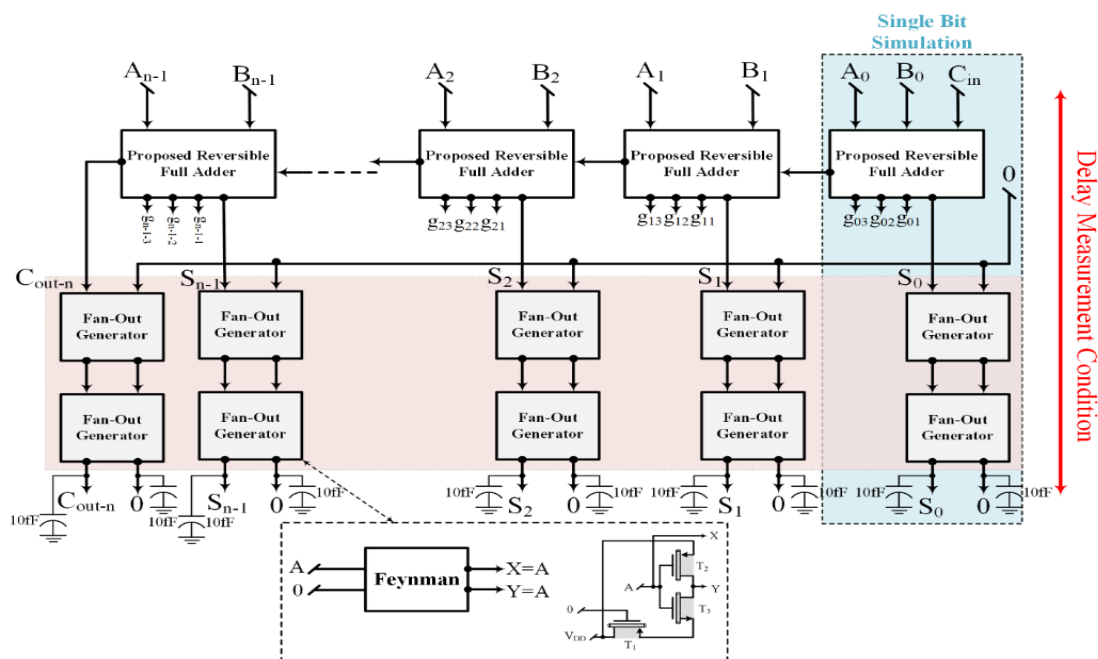
³ power delay product

متعاقباً برای پیاده سازی RCA چهار بیتی ۴ تمام جمع کننده و ۸ تولید کننده fan-out استفاده می شود. همچنین ۸ تمام جمع کننده و ۱۶ تولید کننده fan-out برای RCA هشت بیتی مورد نیاز است.

جدول ۲: پارامترهای اعمال شده فناوری CNTFET [۳].

TABLE 2. PARAMETERS OF THE APPLIED CNTFET TECHNOLOGY [3].

Parameter	Value	Definition
L_{ch}	32nm	Definition
L_{geff}	100nm	Physical Channel Length
L_{ss}	32nm	Mean Free Path: Intrinsic CNT
L_{dd}	32nm	Source Side Extension Regions
K_{gate}	16	Length of Doped CNT Drain
T_{ox}	4nm	Gate Dielectric Constant
C_{sub}	40pF/m	Oxide Thickness
E_{fi}	0.6eV	Coupling Capacitance between Channel and Substrate
Pitch	5 nm	Tubes Distance
Chirality Vector	(38,0)	Chiral Vector
Tubes	10	Number of Tubes
Dcnt	2.97 nm	CNT Diameter
Vth	0.196 V	Threshold Voltage



شکل ۴: مدار RCA مورد استفاده برای ارزیابی تمام جمع کننده ها.

Figure 4. RCA circuit used in this paper for the evaluation of FAs.

با توجه به نتایج به دست آمده، تمام جمع کننده پیشنهادی با ۱۸ ترانزیستور از توان و PDP بهتری نسبت به مدارهای دیگر برخوردار است. از طرف دیگر، از نظر بدترین تاخیر، تنها FT با اختلاف کمی از تمام جمع کننده پیشنهادی بهتر عمل می کند. در مورد توان مصرفی، تمام جمع کننده پیشنهادی با مقدار ۱۰/۱۵۷ میکرو وات و مقدار ۲۶/۵۴۷ میکرو وات در حالت های ۴ بیتی و ۸ بیتی، ۲۰/۴۱ درصد و ۳۱/۶۱ درصد عملکرد بهتری نسبت به FT دارد. در حالت ۴ بیتی و در مورد PDP، نزدیکترین رقیب به تمام جمع کننده پیشنهادی RFA-3 است. در این حالت، تمام جمع کننده پیشنهادی ۶/۸۳ درصد عملکرد بهتری دارد. در مورد حالت ۸ بیتی، این FT

است که نزدیکترین نتیجه را به تمام جمع کننده پیشنهادی دارد. در این حالت تمام جمع کننده ارائه شده ۱/۲۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به FT دارد. این نتایج نشان می دهد که تمام جمع کننده پیشنهادی علیرغم داشتن تعداد ترانزیستور بیشتر در مقایسه با برخی مدارها، عملکرد مداری بهتری به خصوص از نظر توان و PDP دارد.

جدول ۳: ارزیابی عملکرد تمام جمع کننده ها در RCAهای چند بیتی

Table 3. Performance evaluation of the FAs in RCAs.

Designs	4-bit			8-bit		
	Power (μ W)	Delay (ns)	PDP (fJ)	Power (μ W)	Delay (ns)	PDP (fJ)
RFA-1 [9]	12.451	13.989	174.18	46.891	18.847	883.75
RFA-2 [9]	17.190	13.993	240.54	87.603	19.335	1693.80
RFA-3 [9]	11.033	13.986	154.31	30.684	18.986	582.57
RFA-4 [9]	19.701	17.959	353.81	31.257	22.541	704.56
RGFA [10]	14.610	14.985	218.93	37.554	18.941	711.31
NG-press [11]	11.382	14.998	170.71	32.904	23.987	789.27
FT [12]	12.763	13.982	178.45	30.047	17.914	538.26
Proposed	10.157	14.154	143.76	26.547	17.993	477.66

• اعداد برجسته شده به معنای نتایج بهتر است.

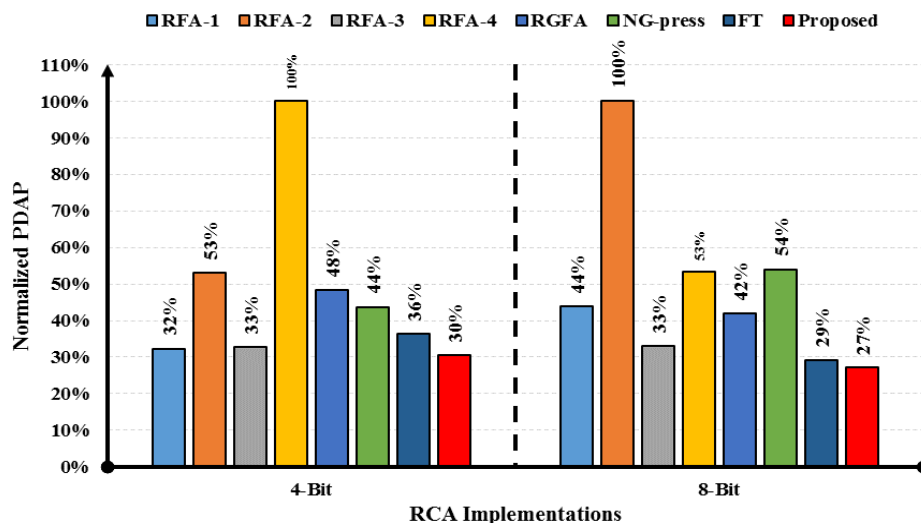
جدول ۴: ارزیابی عملکرد تمام جمع کننده ها در RCA ها بر حسب تعداد ترانزیستورها و PDAP.

TABLE 4. Performance evaluation of the FAs in RCAs in terms of the number of transistors and PDAP.

	4-bit		8-bit	
	Transistor counts	PDAP	Transistor counts	PDAP (Norm)
RFA-1 [9]	84	14631.12	168	148470
RFA-2 [9]	100	24054	200	338760
RFA-3 [9]	78	12036.18	191	111270.9
RFA-4 [9]	128	45287.68	256	180367.4
RGFA [10]	100	21893	200	142262
NG-press [11]	116	19802.36	232	183110.6
FT [12]	92	16417.4	184	99039.84
Proposed	96	13800.96	192	91710.72

• اعداد برجسته شده به معنای نتایج کمتر است نه نتایج بهتر. زیرا تعداد کمتر ترانزیستورها به معنای عملکرد بهتر نیست.

برای مقایسه منصفانه تر بین مدارهای تمام جمع کننده پیشنهادی و مدارهای دیگر، رابطه ای به نام حاصلضرب توان-تاخیر-سطح مصرفی (PDAP) که برابر با حاصلضرب PDP و تعداد ترانزیستورها است، در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حالت های ۴ بیتی و ۸ بیتی، حداقل تعداد ترانزیستورها به ترتیب متعلق به RFA-1 و FT است. این در حالی است که کمتر بودن تعداد ترانزیستورها نشان دهنده برتری مدار از نظر عملکردی نیست. از طرفی کمترین PDAP به ترتیب توسط مدارهای پیشنهادی و RFA-1 برای حالت ۴ بیت و پیشنهادی و FT برای حالت ۸ بیتی بدست می آید. در حالت ۴ بیتی، تفاوت بین تمام جمع کننده پیشنهادی و RFA-1 برابر با ۵/۶۷ درصد است در حالی که در حالت ۸ بیتی، مدار FT دارای ۷/۴ درصد اختلاف می باشد. این نتایج نشان می دهد که تمام جمع کننده پیشنهادی در بیت های بالا می تواند مؤثرتر از مراجع، به ویژه در مقایسه با FT، کار کند. برای بهتر نشان دادن نتایج ابتدا بدترین مدار از نظر PDAP انتخاب شده و بقیه نتایج بر اساس آن نرمالیزه شده اند. نتایج به دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. در اینجا مدار پیشنهادی در حالت ۴ بیتی و ۸ بیتی نسبت به بدترین مدار به ترتیب ۳۰ و ۲۷ درصد صرفه جویی دارد. در این دو مورد، RFA-1 و FT به عنوان نزدیک ترین رقیب به تمام جمع کننده پیشنهادی به ترتیب، ۳۲ و ۲۹ درصد صرفه جویی کمتری نسبت به بدترین مدار دارند. نتایج به دست آمده عملکرد قابل اعتماد مدار پیشنهادی را برای مدارهای با بیت بالا و پیچیده تر ثابت می کند.



شکل ۵: نتایج نرمالیزه شده PDAP تحت RCA های ۴ بیتی و ۸ بیتی.

Figure 5. Normalized PDAP results under 4-bit and 8-bit RCAs.

در نهایت برای نشان دادن ساختار فیزیکی تمام جمع‌کننده پیشنهادی در مقایسه با مدارهای دیگر، جدول ۵ تهیه شده است. بر اساس نتایج استخراج‌شده، تمام جمع‌کننده پیشنهادی از نظر تعداد ورودی‌های ثابت دارای مقدار بالاتری نسبت به اکثر مدارات است، در حالی که RFA-4 دارای تعداد کمتری است. همچنین از نظر تعداد گیت‌های استفاده شده، تمام جمع‌کننده پیشنهادی با ۴ گیت کمتر از RFA-2، RFA-3 و RFA-4 است و دارای تعداد RFA-1 و FT می‌باشد. همین تصور را می‌توان در مورد تعداد ترانزیستورهای استفاده شده نیز ایجاد کرد. شبیه‌سازی‌ها در مورد تغییرات منبع تغذیه انجام شده است و نتایج در جدول ۶ از نظر مصرف PDP موجود است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تمام جمع‌کننده پیشنهادی از نظر PDP عملکرد بهتری نسبت به همه مدارها دارد. بر این اساس مشاهده می‌شود که در ولتاژهای کمتر از ۰/۹ ولت، رقبای تمام جمع‌کننده پیشنهادی به ترتیب RGFA و RFA-1 برای ولتاژ ۰/۶ و ۰/۸ ولت هستند. از سوی دیگر، برای ولتاژهای ۱ ولت و ۱/۲ ولت، RFA-3 بهترین مدار پس از FA پیشنهادی است.

جدول ۵: ارزیابی تمام جمع‌کننده‌ها از نظر ساختار فیزیکی.

Table 5. Evaluation of the FAs in terms of physical structure

	Constant Input (CI)	Garbage Output (GO)	Gate Count (GC)	Internal Nodes (IN)	Transistor Count (TC)
RFA-1 [9]	1	2	4	5	15
RFA-2 [9]	1	2	5	6	19
RFA-3 [9]	2	3	5	6	18
RFA-4 [9]	4	5	7	8	26
RGFA [10]	1	2	2	8	19
NG-press [11]	1	2	2	8	23
FT [12]	2	3	4	6	17
Proposed	3	3	4	8	18

جدول ۶: ارزیابی عملکرد تمام جمع‌کننده‌ها در مقابل تغییرات منبع تغذیه

Table 6. Performance evaluation of the FAs in RCAs against V_{DD} variation

V_{DD} Variation	0.6 V	0.8 V	1 V	1.2 V
RFA-1 [9]	2.4735	3.901	7.1092	11.551
RFA-2 [9]	2.2916	4.7810	10.089	15.933
RFA-3 [9]	2.1174	3.9878	7.0707	11.015
RFA-4 [9]	3.946	4.214	8.487	13.394
RGFA [10]	1.8686	4.4863	8.7513	11.445
NG-press [11]	2.0072	4.3867	7.6667	11.480
FT [12]	2.1248	4.2840	7.6435	11.141
Proposed	1.7470	3.6145	6.0690	10.808

۴-نتیجه گیری

در این مقاله یک مدار تمام جمع کننده کامل برگشت پذیر (FA) جدید با ۱۸ ترانزیستور و بلوک دیاگرام جدید ارائه شده است که بر اساس گیت برگشت پذیر تافولی طراحی و پیاده سازی شده است. مدار پیشنهادی با ۳ ورودی ثابت و ۴ خروجی زیاله از نظر مصرف توان و اتلاف انرژی عملکرد خوبی دارد. همچنین، بر خلاف مدارهای مرجع دیگر که از ترکیبی از گیت های برگشت پذیر مختلف برای پیاده سازی تمام جمع کننده استفاده می کنند، یکی از ویژگی های اصلی تمام جمع کننده پیشنهادی این است که تنها یک نوع گیت در بدنه اصلی خود دارد. شبیه سازی های مختلفی در این مقاله در شرایط مختلف توسط نرم افزار HSPICE انجام شده است تا برتری تمام جمع کننده پیشنهادی را نسبت به مدارهای دیگر به ویژه در پیاده سازی بیت های مرتبه بالا نشان دهد. اجرای مدار پیشنهادی و سایر مدارها در ساختار جمع کننده حمل موج ۴ بیتی و ۸ بیتی (RCA) نشان می دهد که مدار پیشنهادی از نظر به ترتیب توان و انرژی ۶/۸۳ درصد و ۱۱/۲۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به نزدیکترین رقیب دارد. همچنین با در نظر گرفتن تعداد ترانزیستورهای مورد استفاده در مدار پیشنهادی، در حالت ۸ بیتی، مدار پیشنهادی نسبت به نزدیکترین رقیب ۲ درصد و نسبت به بدترین مدار از نظر حاصلضرب توان-تاخیر-سطح مصرفی، ۲۷ درصد بهبود صرفه جویی دارد.

مراجع

- [1] A. Sadeghi, R. Ghasemi, H. Ghasemian and N. Shiri, "High Efficient GDI-CNTFET-Based Approximate Full Adder for Next Generation of Computer Architectures," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 33-36, March 2023, doi: [10.1109/LES.2022.3192530](https://doi.org/10.1109/LES.2022.3192530).
- [2] A. Sadeghi et al., "Voltage over-scaling CNT-based 8-bit multiplier by high-efficient GDI-based counters," *IET Comput. Digit., Tech.*, vol. 17, pp. 1– 19, Nov. 2023, doi: [10.1049/cdt2.12049](https://doi.org/10.1049/cdt2.12049).
- [3] N. Shiri, A. Sadeghi, M. Rafiee and M. Bigonah, "SR-GDI CNTFET-based magnitude comparator for new generation of programmable integrated circuits," *Int J Circ Theor.*, vol. 50, no. 5, pp. 1511- 1536, Apr. 2022, doi: [10.1002/cta.3251](https://doi.org/10.1002/cta.3251).
- [4] M. Rafiee, N. Shiri and A. Sadeghi, "High-Performance 1-Bit Full Adder With Excellent Driving Capability for Multistage Structures," *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 47-50, March 2022, doi: [10.1109/LES.2021.3108474](https://doi.org/10.1109/LES.2021.3108474).
- [5] M. Sayyaf, A. Ghasemi and R. Hamzehyan, "Design of Low Power Single-Bit Full-Adder Cell Based on Pass-Transistor Logic," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 49, pp. 105-112, 2023, doi: [10.30495/jce.2022.692834](https://doi.org/10.30495/jce.2022.692834).
- [6] H. Arfavi, S. M. Riazi and R. Hamzehyan, "Evaluation of temperature, Disturbance and Noise Effect in Full Adders Based on GDI Method," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 50, pp. 47-66, 2023, doi: [10.30495/jce.2023.1973764.1197](https://doi.org/10.30495/jce.2023.1973764.1197).
- [7] S. Raveendran, P. J. Edavoor, N. Y. B. Kumar and M. H. Vasantha, "An Approximate Low-Power Lifting Scheme Using Reversible Logic," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183367-183377, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3029149](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029149).
- [8] M. Haghparast and K. Navi, "A Novel Reversible Full Adder Circuit for Nanotechnology Based Systems," *Journal of Applied Sciences*, vol. 7, no. 24, pp. 3995-4000, Dec. 2007, doi: [10.3923/jas.2007.3995.4000](https://doi.org/10.3923/jas.2007.3995.4000).
- [9] M. C. Parameshwara and M. Nagabushanam, "Novel low quantum cost reversible logic based full adders for DSP applications," *Int. j. inf. tecnol.*, no. 13, pp. 1755–1761, Aug. 2021, doi: [10.1007/s41870-021-00762-3](https://doi.org/10.1007/s41870-021-00762-3).

- [10] L. Ni, Z. Guan and W. Zhu , “A general method of constructing the reversible full-adder,” in *Proceedings of 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology and Security Informatics*, Jinggangshan, China, 2010, pp. 109–113, doi: [10.1109/IITSI.2010.25](https://doi.org/10.1109/IITSI.2010.25).
- [11] M. D. Hafiz, H. Babu, M. D. R. Islam, A. R. Chowdhury and S. M. A. Chowdhury, “On the realization of reversible full-adder circuit,” *International Conference on Computer and Information Technology*, Dhaka, Bangladesh, vol. 2, 2003, pp. 880-883.
- [12] M. Aditya, Y. B. N. Kumar and M. H. Vasantha, “Reversible full/half adder with optimum power dissipation,” *10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2016, pp. 1-4, doi: [10.1109/ISCO.2016.7726975](https://doi.org/10.1109/ISCO.2016.7726975).

Optimization of the Number of Active Subcarriers and M-PAM Modulation Constellation Pattern for OFDM-IM Systems

Farshad Jalili Kharajoo¹  | SeyyedHadi SeyyedMasoumian Charandabi^{2*} 

¹Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
farshad.jalili.tak@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
masoumian.h@iaut.ac.ir

Correspondence

SeyyedHadi SeyyedMasoumian Charandabi,
Assistant Professor of Electrical Engineering,
Tabriz Branch, Islamic Azad University,
Tabriz, Iran.
Email: masoumian.h@iaut.ac.ir

Main Subjects:

OFDM-IM Wireless Communication Systems

Paper History:

Received: 28 September 2023

Revised: 27 November 2023

Accepted: 20 December 2023

Abstract

Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation (OFDM-IM) is a system that exhibits superior power efficiency and bandwidth compared to the conventional OFDM system. In the OFDM-IM system, some subcarriers are inactive, and instead of transmitting modulation symbols, zero values are sent on these subcarriers. This paper aims to determine the optimal number of active subcarriers to maximize the transmitted data rate and spectral efficiency of the OFDM-IM system. Through mathematical relationships and simulation results, it is demonstrated that the identified value of active subcarriers is indeed optimal, leading to the maximization of the data rate of the system and spectral efficiency. The proposed optimal method, particularly designed for 4-symbol Pulse Amplitude Modulation (PAM) and 8-group OFDM-IM, has resulted in a 6.25% increase in the number of transmitted bits compared to previous methods. As a secondary objective, a modified constellation with equal intervals is introduced for M-PAM modulation, aiming to reduce the bit error rate of the OFDM-IM system and enhance overall system performance. For 4-symbol PAM and 16-group OFDM-IM, utilizing 9 active subcarriers and a signal-to-noise ratio of 12 dB, the proposed constellation has demonstrated a tenfold improvement in the bit error rate of the system.

Keywords: Spectral efficiency, Optimal active subcarrier, Constellation pattern, Data rate, OFDM-IM.

Highlights

- Calculation and optimization of the number of active subcarriers in OFDM-IM systems to maximize the transmitted bit rate and spectral efficiency.
- Introduction of a modified constellation pattern with fixed distances for M-PAM modulation, aimed at reducing the bit error rate (BER) of the OFDM-IM system.
- Keeping average energy of the proposed modulation symbols the same as the standard M-PAM modulation.

Citation: F. Jalili Kharajoo, and S.H. SeyyedMasoumian Charandabi, "Optimization of the Number of Active Subcarriers and M-PAM Modulation Constellation Pattern for OFDM-IM Systems," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 52–69, 2025, doi:10.30495/jce.2023.1997406.1225 [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

High data rate transmission over wireless channels is a critical requirement for many applications. However, as the data rate increases, the symbol duration decreases, leading to more severe inter-symbol interference (ISI) in single-carrier modulation due to wireless channel fading. To mitigate the effects of ISI, the symbol duration must be significantly longer than the delay spread of the wireless channel. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) addresses this challenge by dividing the entire channel into multiple narrowband subchannels that operate in parallel. This approach enables both high-speed transmission and increased symbol duration, effectively combating ISI [1].

OFDM is a specialized form of multicarrier modulation, offering flexibility that allows for the use of advanced techniques to improve transmission efficiency. Additionally, OFDM systems exhibit high resistance to frequency-selective fading, eliminating the need for complex equalizers [1].

Subcarrier Index Modulation (SIM) was first introduced in [2]. This method, based on OFDM, activates some subcarriers while leaving others passive (i.e., transmitting zero values), thereby achieving improved power efficiency and spectral efficiency. In [2], a bit string is used to activate or deactivate subcarriers via the on-off keying (OOK) method, where the spatial arrangement of subcarriers and modulation symbols on active subcarriers transmits the desired bit string. However, the SIM-OFDM system suffers from an unstable data rate due to the randomness of the OOK data stream, which can lead to error propagation and a high number of errors.

To address this issue, the Enhanced Subcarrier Index Modulation (ESIM) method was proposed in [3]. This approach pairs subcarriers, with only one subcarrier in each pair activated while the other remains inactive. The index of the active subcarrier carries one bit of information. Although the ESIM-OFDM system exhibits better bit error rate (BER) performance, it sacrifices half of the index bits compared to SIM-OFDM. Furthermore, frequency resources are underutilized, as only half of the subcarriers are activated for data transmission.

In [4], the OFDM with Index Modulation (OFDM-IM) system was proposed as a more generalized form of ESIM-OFDM. Unlike ESIM-OFDM, subcarriers are not paired. Instead, they are divided into smaller blocks, with a fixed number of active and inactive subcarriers in each block. Digital modulation symbols are transmitted via active subcarriers, while additional bits are conveyed through the permutation and location of active subcarriers, facilitated by a lookup table or combinatorial method [4].

A further generalization of OFDM-IM, termed OFDM-GIM, was proposed in [5]. In this method, the number of active and inactive subcarriers in each block is not fixed but determined by the input bit string, enabling more flexible data transmission.

References [6] and [7] investigate the spectral efficiency of the OFDM-IM system, deriving an approximate value for the number of active subcarriers that maximizes spectral efficiency. Similarly, [8] calculates the optimal number of active subcarriers to maximize the transmitted bit rate of the system. All three studies arrive at the same optimal value for active subcarriers, as maximizing the transmitted bit rate inherently maximizes spectral efficiency. Additionally, [8] proposes a non-uniform pulse amplitude modulation (M-PAM) constellation for the OFDM-IM system, where symbols closer to zero are spaced farther apart than those farther from zero. The optimal spacing is determined through a computer search to minimize the bit error rate.

2. Innovation and contributions

The primary objective of this article is to calculate and refine the optimal number of active subcarriers for the OFDM-IM system to maximize both the transmitted bit rate and spectral efficiency. To achieve this, the derivation of the number of transmitted bits in the OFDM-IM system is utilized. Since this value is expressed as an inequality based on the number of active subcarriers, the derivation is performed using an approximation. A key contribution of this work is the modification of this approximation by incorporating a corrective component at the final optimization stage. In certain cases, the proposed method demonstrates a 25% increase in the transmitted data rate.

In the OFDM-IM system, the presence of the zero symbol disrupts the order and equal spacing of modulation symbols. The second objective and another significant contribution of this paper is the introduction of a modified constellation with fixed and equal intervals for M-PAM modulation. This modification reduces the bit error rate (BER) of the OFDM-IM system while maintaining the average energy of the modulation symbols. Simulation results based on the proposed constellation show a more than 10-fold reduction in the bit error rate, with improvements reaching up to 100-fold in some cases.

3. Materials and Methods

We consider an OFDM-IM system with N subcarriers, K active subcarriers, and an M-PAM digital modulation constellation of M dimensions. A bit string of length Bg is input into the system and divided into g groups (or sub-blocks). Consequently, a bit string of length B enters each group, which is further divided into two substrings of lengths B_1 and B_2 . Each group contains n subcarriers (where $N=ng$), with k subcarriers being active (where $K=kg$).

Within each sub-block, the indices of the active subcarriers are determined based on the bit string of length B_1 . Subsequently, the bit string of length B_2 is mapped to a symbol using the M-PAM modulation scheme, forming a sub-block of length n . All groups are then combined to create an OFDM-IM block of length N .

In the OFDM-IM system, the presence of passive subcarriers (represented by zero values) introduces an additional symbol to the standard M-PAM modulation constellation. This additional symbol disrupts the equal spacing between modulation symbols, causing the constellation to deviate from its standard order and resulting in an increased bit error rate (BER) compared to conventional OFDM systems.

To address this issue, we propose the use of a modified constellation with equal spacing between symbols, similar to the standard M-PAM constellation. This modification is expected to improve the error rate, as the equal distances between symbols enhance the system's robustness against errors.

4. Results and Discussion

The proposed method accurately determines the optimal number of active subcarriers, ensuring the maximum transmitted bit rate in all scenarios and addressing the limitations of the reference method in [8]. By incorporating an integer operator in the final stage of the optimization process, this paper compensates for the initial approximation used in the optimization, resulting in the optimal number of active subcarriers that maximizes the transmitted bits per group. For instance, the proposed method achieves the following improvements in the number of transmitted bits compared to [8]:

- 25% increase for $M = 2$ and $n = 4$,
- 4.5% increase for $M = 2$ and $n = 16$,
- 6.25% increase for $M = 4$ and $n = 8$.

The proposed modified PAM constellation demonstrates superior performance, significantly reducing the bit error rate (BER) compared to standard PAM modulation. Specifically, the BER decreases by approximately 10 times at a signal-to-noise ratio (SNR) of 12 dB and by about 100 times at an SNR of 20 dB.

The BER curve is convex with respect to changes in the distance of the symbol closest to zero (symbol 1 in standard PAM). This convexity allows for the use of optimization algorithms to determine the optimal distance for a given SNR, minimizing the BER. It is important to note that, to maintain the average energy of the modulation symbols, increasing the distance of the closest symbol to zero necessitates decreasing the distance of the next symbol, and vice versa.

The optimal constellation values were calculated using the `fminbnd` function in MATLAB. The results show that the proposed constellation performs nearly as well as the optimal constellation, particularly when spectral efficiency is maximized. Given the minimal performance difference and the reduced computational complexity, the proposed constellation is a practical and effective choice for M-PAM modulation in OFDM-IM systems.

5. Conclusion

In this paper, the OFDM-IM system was investigated. In this system, the number of active subcarriers significantly impacts various qualitative and quantitative parameters, as some subcarriers are active while others remain inactive. The primary objective of this study was to determine the optimal number of active subcarriers to achieve the maximum transmitted bit rate and maximum spectral efficiency. Through optimization using derivation and the correction of existing approximations, along with simulations, it was demonstrated that the proposed optimal number of active subcarriers provides a favorable response for the OFDM-IM system. In some cases, this approach improves the transmitted data rate and spectral efficiency by up to 25%.

In the OFDM-IM system, the presence of passive subcarriers (represented by zero symbols) disrupts the order and equal spacing of the PAM modulation constellation, leading to a higher bit error rate (BER). As a second contribution, this paper proposes a modified constellation with equal symbol spacing while preserving the average energy of the modulation symbols. This modification improves the BER of the OFDM-IM system by 10 to 100 times in certain cases. Simulation results show that the proposed constellation performs nearly as well as the fully optimized constellation obtained through exhaustive search, making it a practical and effective choice for M-PAM modulation in OFDM-IM systems.

6. Acknowledgement

This research did not receive any external funding.

References

- [1] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li and G. Ye Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009, doi: [10.1109/TVT.2008.2004555](https://doi.org/10.1109/TVT.2008.2004555).

- [2] R. Abu-alhiga and H. Haas, "Subcarrier-index modulation OFDM," *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 2009, pp. 177-181, doi: [10.1109/PIMRC.2009.5449882](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2009.5449882).
- [3] D. Tsonev, S. Sinanovic and H. Haas, "Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM," *IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, Houston, TX, USA, 2011, pp. 728-732, doi: [10.1109/GLOCOMW.2011.6162549](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162549).
- [4] E. Başar, Ü. Aygölü, E. Panayircı and H. V. Poor, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536-5549, Nov. 2013, doi: [10.1109/TSP.2013.2279771](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2279771).
- [5] R. Fan, Y. J. Yu and Y. L. Guan, "Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5350-5359, Oct. 2015, doi: [10.1109/TWC.2015.2436925](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2436925).
- [6] M. Chafii, J. P. Coon and D. A. Hedges, "DCT-OFDM With Index Modulation," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1489-1492, July 2017, doi: [10.1109/LCOMM.2017.2682843](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2682843).
- [7] A. W. Azim, M. Chafii, Y. Le Guennec and L. Ros, "Spectral and Energy Efficient Fast-OFDM With Index Modulation for Optical Wireless Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 1771-1774, Aug. 2020, doi: [10.1109/LCOMM.2020.2989633](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2989633).
- [8] N. H. Nguyen, B. Berscheid and H. H. Nguyen, "Fast-OFDM With Index Modulation for NB-IoT," in *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 7, pp. 1157-1160, July 2019, doi: [10.1109/LCOMM.2019.2917684](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2917684).

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

Author Contributions: Farshad Jalili Kharajoo: MATLAB simulation, writing original draft preparation; SeyyedHadi SeyyedMasoumian: MATLAB simulation, resources, main idea, methodology, manuscript editing.

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

بهینه‌سازی تعداد زیر حامل‌های فعال و صورت فلکی مدولاسیون M-PAM برای سیستم‌های OFDM-IM

فرشاد جلیلی خراجو^۱ | سیده‌های سیدمعصومیان چرن‌دابی^۲

چکیده:

سیستم تسهیم تقسیم فرکانس متعامد با مدولاسیون اندیس (OFDM-IM) سیستمی است که کارایی توان و پهنای باند بهتری نسبت به سیستم OFDM دارد. در سیستم OFDM-IM بعضی زیر حامل‌ها غیرفعال بوده و به جای سمبل مدولاسیون، در این زیر حامل‌ها مقدار صفر ارسال می‌شود. در این مقاله هدف اول پیدا کردن مقدار زیر حامل‌های فعال بهینه است به طوری که نرخ داده ارسالی سیستم OFDM-IM و کارایی طیفی بیشینه شود. در این مقاله با توجه به روابط ریاضی و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که مقدار زیر حامل فعال پیدا شده، مقدار بهینه خواهد بود و نرخ داده سیستم را بیشینه کرده و بازده طیفی سیستم را حداکثر می‌کند. روش پیشنهادی بهینه، برای مدولاسیون دامنه پالس ۴ سمبلی و گروه ۸ تایی OFDM-IM، تعداد بیت ارسالی را ۶.۲۵ درصد نسبت به روش‌های قبلی افزایش داده است. به عنوان هدف دوم، یک صورت فلکی تغییر یافته با فواصل یکسان برای مدولاسیون M-PAM پیشنهاد شده است که نرخ خطای بیتی سیستم OFDM-IM را کاهش داده و باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و منحنی‌های نرخ خطای بیتی کارایی صورت فلکی پیشنهادی را نشان می‌دهد. صورت فلکی پیشنهادی برای مدولاسیون دامنه پالس ۴ سمبلی و گروه ۱۶ تایی OFDM-IM و تعداد زیر حامل فعال برابر با ۹ و نسبت سیگنال به نویز ۱۲ دسی بل، ۱۰ برابر نرخ خطای بیتی سیستم را بهبود داده است.

^۱گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

farshad.jalili.tak@gmail.com

^۲گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

masoumian.h@iaut.ac.ir

نویسنده مسئول:

*سیده‌های سیدمعصومیان چرن‌دابی، استادیار گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.
masoumian.h@iaut.ac.ir

موضوع اصلی:

سیستم‌های مخابرات بی‌سیم OFDM-IM

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۶ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۶ آذر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۹ آذر ۱۴۰۲

کلید واژه‌ها: بازدهی طیفی، زیر حامل فعال بهینه، صورت فلکی، نرخ داده، OFDM-IM.

تازه‌های تحقیق:

- محاسبه و اصلاح تعداد زیر حامل‌های فعال بهینه سیستم OFDM-IM به منظور بیشینه نرخ بیت ارسالی و کارایی طیفی.
- ارائه صورت فلکی تغییر یافته با فواصل ثابت برای مدولاسیون M-PAM جهت کاهش نرخ خطای بیتی سیستم OFDM-IM.
- یکسان نگه داشتن متوسط انرژی سمبل‌های مدولاسیون پیشنهادی با مدولاسیون M-PAM استاندارد.

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

انتقال با نرخ داده بالا از طریق کانال‌های بی‌سیم توسط بسیاری از کاربردها مورد نیاز است. با این حال، مدت زمان یک سمبل با افزایش نرخ داده، کاهش می‌یابد و محو شدگی کانال‌های بی‌سیم باعث تداخل بین سمبلی^۱ (ISI) شدیدتر در مدولاسیون تک حاملی می‌شود. برای کاهش اثر ISI، طول مدت سمبل باید بسیار بیشتر از گسترده‌گی تأخیر کانال‌های بی‌سیم باشد. در تسهیم تقسیم فرکانس متعامد^۲ (OFDM)، کل کانال به بسیاری از زیرکانال‌های با باند باریک تقسیم می‌شود، که به صورت موازی کار می‌کنند تا هم انتقال با سرعت بالا داشته باشیم و هم مدت زمان سمبل افزایش یابد تا بتوانیم با ISI مبارزه کنیم [۱]. سیستم OFDM شکل خاصی از مدولاسیون چندحاملی است. انعطاف‌پذیری OFDM فرصت‌هایی را برای استفاده از تکنیک‌های پیشرفته برای بهبود کارایی انتقال فراهم می‌کند. همچنین سیستم OFDM مقاومت بالایی در برابر محوشدگی فرکانس گزین دارد و باعث می‌شود که نیاز به همسان‌سازهای پیچیده نداشته باشیم [۱].

مدولاسیون اندیس زیرحامل^۳ (SIM) برای اولین بار در [۲] معرفی شد. در این روش که مبتنی بر OFDM است، بخشی از زیرحامل‌ها فعال و بخشی غیرفعال هستند، یعنی مقدار صفر دارند، در نتیجه کارایی طیفی و توان خوبی را ارائه می‌دهد. در [۲] با توجه به یک رشته بیت و به‌وسیله روش کلیدزنی روشن خاموش^۴ (OOK) با توجه به تعداد اکثریت صفرها یا یک‌ها، تعدادی از زیرحامل‌ها فعال و تعدادی غیرفعال می‌شوند که رشته بیت مورد نظر توسط جاگیری مکانی زیرحامل‌ها ارسال می‌شود و سمبل‌های مدولاسیون نیز توسط زیرحامل‌های فعال ارسال می‌شود. با این حال، نرخ داده SIM-OFDM به دلیل تصادفی بودن جریان داده OOK ناپایدار است و این ممکن است انتشار خطای بالقوه را تحمیل کند که منجر به انبوهی از خطاها شود. برای حل این مشکل، در [۳] روش مدولاسیون اندیس زیرحامل بهبودیافته^۵ (ESIM) پیشنهاد شده است که زیرحامل‌ها را به صورت جفت تقسیم‌بندی کرده است. برای هر جفت، تنها یک زیرحامل فعال می‌شود، در حالی که دیگری خالی می‌ماند و اندیس زیرحامل فعال اطلاعات یک بیتی را حمل می‌کند. اگرچه عملکرد نرخ خطای بیتی^۶ (BER) سیستم ESIM-OFDM بهتر است، اما در مقایسه با SIM-OFDM، نیمی از بیت‌های اندیس را از دست می‌دهد. علاوه بر این، از منابع فرکانس سیستم کم استفاده می‌شود، زیرا تنها نیمی از زیرحامل‌ها برای انتقال داده فعال می‌شوند.

در [۴]، سیستم تسهیم تقسیم فرکانس متعامد با مدولاسیون اندیس (OFDM-IM) پیشنهاد شده است که حالت کلی تر ESIM-OFDM است ولی تقسیم زیرحامل‌ها به صورت جفت‌جفت نیست. در این روش زیرحامل‌ها به بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و در هر بلوک تعداد زیرحامل‌های فعال و غیرفعال ثابت است. سمبل‌های مدولاسیون دیجیتال توسط زیرحامل‌های فعال ارسال می‌شوند و تعدادی بیت نیز توسط جایگشت و موقعیت مکانی زیرحامل‌های فعال ارسال می‌شوند که این عمل به کمک جدول جستجو یا استفاده از روش ترکیبیات^۷ انجام می‌گیرد [۴].

حالت عمومی‌تر سیستم OFDM-IM تحت عنوان OFDM-GIM در [۵] پیشنهاد شده است که در این روش در هر بلوک تعداد زیرحامل‌های فعال و غیرفعال ثابت نیستند و با توجه به رشته بیت ورودی هر بلوک تعیین می‌شوند، در نتیجه روی همین اختلاف هم می‌توان داده انتقال داد.

در این مقاله روی سیستم OFDM-IM بحث خواهد شد که در سال‌های اخیر به‌عنوان تکنیکی با کارایی توان و پهنای باند خوب برای سیستم‌های مخابراتی پیشنهاد شده است و به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته است. این سیستم در حال حاضر به طور گسترده‌ای به عنوان یک نامزد مطلوب برای استانداردهای ارتباطی آینده در نظر گرفته می‌شود.

در مراجع [۶] و [۷] کارایی طیفی سیستم OFDM-IM بررسی شده است و مقدار زیرحامل تقریبی که بتواند حداکثر کارایی طیفی را ارائه کند به دست آمده است. در [۸] نیز کار مشابهی صورت گرفته است و مقدار زیرحامل فعال بهینه طوری محاسبه شده است که نرخ بیت ارسالی کل سیستم را بیشینه کند. در هر سه مقاله بیان شده مقدار زیرحامل فعال بهینه یکسان محاسبه

¹ Inter Symbol Interference

² Orthogonal Frequency Division Multiplexing

³ Subcarrier Index Modulation

⁴ On-Off Keying

⁵ Enhanced SIM

⁶ Bit Error Rate

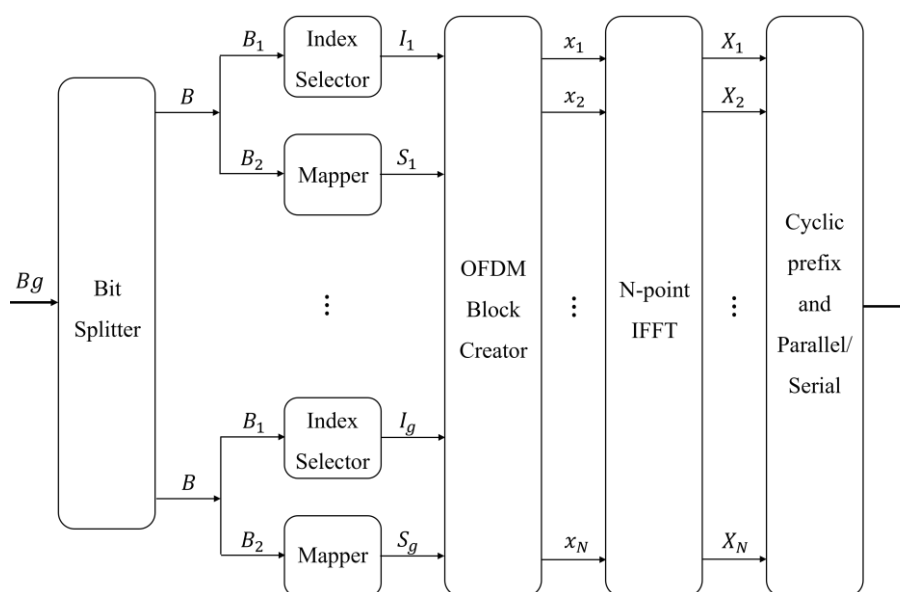
⁷ Combinatorial

شده است و دلیل اصلی آن هم این است که اگر نرخ بیت ارسالی حداکثر شود کارایی طیفی نیز بیشینه خواهد بود. همچنین در [۸] یک صورت فلکی^۱ مدولاسیون دامنه پالس^۲ (M-PAM) با فواصل غیریکنواخت برای سیستم OFDM-IM پیشنهاد شده است. یعنی فواصل سمبل‌های نزدیک به صفر، بیشتر از فواصل سمبل‌های دور در نظر گرفته شده است و بهترین فاصله با توجه به کمترین خطای بیتی توسط جستجوی کامپیوتری به دست آمده است.

در این مقاله هدف اول محاسبه و اصلاح تعداد زیرحامل‌های فعال بهینه برای سیستم OFDM-IM است طوری که نرخ بیت ارسالی و کارایی طیفی، بیشینه مقدار خود را داشته باشند. برای این منظور از مشتق‌گیری تعداد بیت ارسالی سیستم OFDM-IM استفاده می‌شود و چون این مقدار یک نامساوی بر اساس تعداد زیرحامل‌های فعال است، مشتق‌گیری با توجه به یک تقریب انجام می‌گیرد و کمک مقاله اصلاح این تقریب به کمک جزء صحیح بالا در مرحله نهایی بهینه‌سازی است که در مواردی روش پیشنهادی حتی تا ۲۵ درصد افزایش نرخ داده ارسالی را نشان می‌دهد. در سیستم OFDM-IM با توجه به وجود سمبل صفر، نظم سمبل‌ها و فاصله مساوی آن‌ها بر هم می‌خورد. هدف دوم و کمک دیگر این مقاله، ارائه یک صورت فلکی تغییر یافته با فواصل ثابت و برابر برای مدولاسیون M-PAM است که خطای بیتی سیستم OFDM-IM را کاهش دهد و در عین حال متوسط انرژی سمبل‌های مدولاسیون را بر هم نزند. طبق نتایج شبیه‌سازی بر اساس صورت فلکی پیشنهادی، نرخ خطای بیتی سیستم OFDM-IM در بعضی حالت‌ها بیشتر از ۱۰ برابر و حتی ۱۰۰ برابر کاهش پیدا کرده است.

در بخش ۲ مقاله مدل سیستم OFDM-IM استفاده شده در این مقاله معرفی خواهد شد. در بخش ۳ بحث بهینه‌سازی تعداد زیرحامل‌های فعال برای رسیدن به نرخ بیتی و کارایی طیفی بیشینه انجام خواهد شد. سپس در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهد شد و در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری مقاله بیان خواهد شد.

۲- مدل سیستم



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم OFDM-IM

Figure 1. Block diagram of OFDM-IM system

مطابق شکل ۱ یک سیستم OFDM-IM با تعداد زیرحامل N ، تعداد زیرحامل فعال K و صورت فلکی مدولاسیون دیجیتال M-PAM به ابعاد M در نظر می‌گیریم. یک رشته بیت به طول Bg وارد این سیستم می‌شود و به g گروه یا زیربلوک تقسیم می‌شود. بنابراین رشته بیتی به طول B وارد هر گروه می‌شود که این رشته هم به نوبه خود به دو رشته به طول‌های B_1 و B_2 تقسیم می‌شود. در هر گروه n زیرحامل وجود دارد $N=ng$ ، که k زیرحامل آن فعال است $K=kg$. در هر زیربلوک با توجه به رشته بیت

¹ Constellation pattern

² M-ary Pulse Amplitude Modulation

به طول B_1 اندیس زیرحامل‌های فعال آن گروه مشخص می‌شود. سپس با توجه به نگاشت موجود مدولاسیون M-PAM، رشته بیت به طول B_2 به سبیل تبدیل شده و زیربلوک به طول n ساخته می‌شود که در ادامه همه گروه‌ها با هم ترکیب شده و یک بلوک OFDM-IM به طول N را تشکیل می‌دهند. با توجه به [۴] برای تعداد بیت‌های منتقل شده در هر گروه سیستم OFDM-IM داریم:

$$B_1 = k \log_2 M, \quad B_2 = \left\lfloor \log_2 \binom{n}{k} \right\rfloor, \quad B = B_1 + B_2 = k \log_2 M + \left\lfloor \log_2 \binom{n}{k} \right\rfloor, \quad \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (1)$$

که نماد [.] جزء صحیح از سمت پایین را به عنوان خروجی تحویل می‌دهد. همچنین با توجه به [۶] و [۷] برای کارایی طیفی سیستم OFDM-IM داریم:

$$SE_{OFDM-IM} = \frac{g}{N} B = \frac{1}{n} \left(k \log_2 M + \left\lfloor \log_2 \binom{n}{k} \right\rfloor \right) \quad (2)$$

در نتیجه تعداد زیرحامل فعالی که نرخ بیتی سیستم را بیشینه کند، کارایی طیفی را نیز بیشینه خواهد کرد. همان‌طور که می‌دانیم صورت فلکی استاندارد برای مدولاسیون M-PAM به صورت شکل ۲ است [۹].



شکل ۲: صورت فلکی استاندارد مدولاسیون M-PAM
Figure 2. Standard M-PAM constellation pattern

که مقدار هر سبیل مدولاسیون توسط رابطه زیر داده می‌شود

$$A_m = 2m - M - 1, \quad m = 1, \dots, M \quad (3)$$

و طبق رابطه زیر انرژی متوسط مدولاسیون دیجیتال M-PAM استاندارد محاسبه می‌شود [۹]:

$$E_{avg-pam} = \frac{d^2 (M^2 - 1)}{3} = \frac{d^2 (M + 1)(M - 1)}{3} \quad (4)$$

۳- بهینه‌سازی سیستم OFDM-IM

در این بخش اهداف اصلی مقاله یعنی بهینه‌سازی تعداد زیرحامل‌های فعال و ساختار صورت فلکی مدولاسیون M-PAM برای سیستم OFDM-IM مطرح خواهد شد. ابتدا بهینه‌سازی تعداد زیرحامل‌های فعال مطرح خواهد شد و هدف پیدا کردن تعداد زیرحامل فعالی است که نرخ داده سیستم و بازدهی طیفی سیستم را حداکثر کند. سپس صورت فلکی تغییر یافته برای مدولاسیون M-PAM مطرح خواهد شد به طوری که خطای بیتی سیستم را کم کرده و در عین حال انرژی متوسط بیتی مدولاسیون M-PAM استاندارد را افزایش ندهد و با وجود رابطه جبری موجود و فواصل یکسان، به عنوان صورت فلکی استاندارد برای مدولاسیون M-PAM برای سیستم OFDM-IM پیشنهاد شود.

۳-۱- بهینه‌سازی تعداد زیرحامل‌های فعال

برای اینکه در رابطه ۱ مقدار B را نسبت به k بیشینه کنیم باید از این رابطه نسبت به k مشتق بگیریم و حاصل را برابر با صفر قرار دهیم. ابتدا برای حذف تابع جزء صحیح پایین رابطه ۱، نامساوی زیر را تشکیل می‌دهیم،

$$B \leq k \log_2 M + \log_2 \binom{n}{k} \quad (5)$$

رابطه لگاریتم و ترکیب n و k را به صورت زیر باز کرده،

$$\log_2 \binom{n}{k} = \log_2 \frac{n!}{k!(n-k)!} = \log_2 n! - \log_2 k! - \log_2 (n-k)! \quad (6)$$

و در رابطه ۵ جاگذاری می‌کنیم،

$$B \leq k \log_2 M + \log_2 n! - \log_2 k! - \log_2 (n-k)! \quad (7)$$

برای پیدا کردن بیشینه مقدار B باید مشتق گرفته و حاصل را مساوی صفر قرار دهیم. یک تابع لگاریتمی بر اساس فاکتوریل k به دست آمده است که ابتدا می‌خواهیم تکلیف آن را مشخص کنیم. تابع $f(k)$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم،

$$f(k) = \log_2 k! = \frac{\ln \Gamma(k+1)}{\ln 2} \quad (8)$$

که تابع $\Gamma(k)$ تابع گاما بوده و برای اعداد صحیح داریم $\Gamma(k+1)=k!$ مشتق تابع $f(k)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰]،

$$\frac{\partial f(k)}{\partial k} = \frac{\psi(k+1)}{\ln 2} = \frac{1}{\ln 2} \left(-\gamma + \sum_{\kappa=1}^k \frac{1}{\kappa} \right) \quad (9)$$

که تابع $\psi(k)$ تابع دایگاما^۱ بوده و γ ثابت اوایلر-ماسکرونی^۲ از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰]،

$$\gamma = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(-\ln k + \sum_{\kappa=1}^k \frac{1}{\kappa} \right) \quad (10)$$

سری هارمونیک زیر را می‌توان به صورت زیر تقریب زد [۱۰]

$$\sum_{\kappa=1}^k \frac{1}{\kappa} \approx \gamma + \ln k \quad (11)$$

با جاگذاری رابطه ۱۱ در رابطه ۹ خواهیم داشت،

$$\frac{\partial f(k)}{\partial k} = \log_2 k \quad (12)$$

مشتق تابع $f(n-k)$ نیز طبق همین مراحل به شکل زیر به دست می‌آید،

$$\frac{\partial f(n-k)}{\partial k} = -\log_2 (n-k) \quad (13)$$

حال با مشتق‌گیری از رابطه ۷ و جاگذاری روابط ۱۲ و ۱۳ خواهیم داشت،

$$\frac{\partial B}{\partial k} \leq \log_2 M - \log_2 k + \log_2 (n-k) = \log_2 \frac{M(n-k)}{k} = \log_2 \left(\frac{Mn}{k} - M \right) \quad (14)$$

با صفر قرار دادن مشتق و با توجه به این که سمت راست رابطه ۱۴ لگاریتمی است، خواهیم داشت،

$$\frac{\partial B}{\partial k} = 0, \quad \frac{Mn}{k} - M = 1 \Rightarrow k = \frac{Mn}{M+1} \quad (15)$$

تعداد زیرحامل فعال باید عدد صحیح باشد. در نتیجه یا باید از اپراتور جزء صحیح پایین استفاده شود یا اپراتور جزء صحیح بالا. اگر از k به دست آمده از رابطه ۱۵ جزء صحیح پایین گرفته شود، با توجه به کوچک‌تر شدن k، طرف دوم رابطه ۱۴، باز هم بزرگ‌تر می‌شود. ولی چون در رابطه ۵ طرف دوم رابطه را به دلیل راحتی عمل مشتق با حذف جزء صحیح پایین، بزرگ‌تر کرده بودیم، در این مرحله با افزایش k می‌خواهیم طرف دوم رابطه ۱۴ را کوچک‌تر کنیم. در نتیجه تعداد زیرحامل فعال بهینه در هر زیرلوک سیستم OFDM-IM برای ارسال بیشترین بیت ممکن و رسیدن به حداکثر کارایی طیفی ممکن، به صورت زیر پیشنهاد می‌شود،

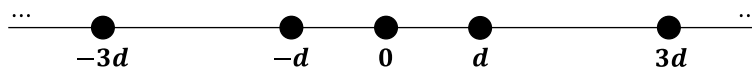
$$k_{opt} = \left\lceil \frac{Mn}{M+1} \right\rceil \quad (16)$$

۳-۲- صورت فلکی پیشنهادی برای مدولاسیون M-PAM

در سیستم OFDM-IM به دلیل وجود زیرحامل‌های غیرفعال که توسط مقدار صفر نمایش داده می‌شوند، یک سمبل دیگر هم به صورت فلکی استاندارد مدولاسیون M-PAM، شکل ۲، اضافه می‌شود و با توجه به این که این سمبل اضافی فاصله بین سمبل‌های مدولاسیون را بر هم می‌زند و صورت فلکی، دیگر نظم استاندارد خود را ندارد، باعث افزایش نرخ خطای بی‌بیتی نسبت به سیستم OFDM می‌شود. صورت فلکی مدولاسیون M-PAM برای سیستم OFDM-IM در شکل ۳ نشان داده شده است.

¹ Digamma function

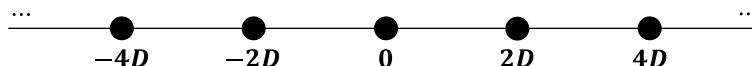
² Euler-Mascheroni constant



شکل ۳: صورت فلکی سیستم OFDM-IM برای مدولاسیون M-PAM

Figure 3. M-PAM constellation pattern for OFDM-IM system

پیشنهاد ما برای بهبود این مشکل، استفاده از صورت فلکی با فواصل یکسان بین سمبل‌ها همانند صورت فلکی استاندارد M-PAM است، شکل ۲. صورت فلکی پیشنهادی این مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است. انتظار می‌رود که به دلیل وجود فاصله برابر بین سمبل‌های مختلف، نرخ خطای بهتری نسبت به حالت قبل داشته باشیم.



شکل ۴: صورت فلکی پیشنهادی سیستم OFDM-IM برای مدولاسیون M-PAM

Figure 4. Proposed M-PAM constellation pattern for OFDM-IM system

در صورت فلکی پیشنهادی، مقدار سمبل‌ها در صورت فلکی توسط رابطه زیر استخراج می‌شود. البته مقدار صفر موجود در صورت فلکی توسط مدولاتور تولید نمی‌شود و مقداری است که توسط زیرحامل‌های غیرفعال ارسال می‌شود.

$$A_m = (2m - M - 2)D, \quad m = 1, 2, \dots, M + 1 \quad (17)$$

برای اینکه مقایسه عادلانه‌ای بین صورت فلکی پیشنهادی، شکل ۳ و صورت فلکی شکل ۲ داشته باشیم، برای پیدا کردن مقدار D محدودیت قرار می‌دهیم و مقدار D را طوری محاسبه می‌کنیم که انرژی متوسط هر دو صورت فلکی شکل‌های ۴ و ۳ با هم برابر باشند. با توجه به رابطه توان متوسط خواهیم داشت،

$$E_{avg-modified} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M+1} A_m^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M+1} (2m - M - 2)^2 D^2 \quad (18)$$

با تغییر متغیر $m \rightarrow (m-1)$ خواهیم داشت،

$$\begin{aligned} E_{avg-modified} &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M (2m - M)^2 D^2 = \frac{D^2}{M} \sum_{m=0}^M (4m^2 + M^2 - 4Mm) \\ &= \frac{D^2}{M} \left(4 \sum_{m=0}^M m^2 + \sum_{m=0}^M M^2 - 4M \sum_{m=0}^M m \right) \\ &= \frac{D^2}{M} \left(\frac{4M(M+1)(2M+1)}{6} + M^2(M+1) - \frac{4M^2(M+1)}{2} \right) \\ &= \frac{D^2}{M} \left(\frac{1}{3}(M^2 + 2M)(M+1) \right) = \frac{D^2 M(M+1)(M+2)}{3M} \end{aligned} \quad (19)$$

در نتیجه برای انرژی متوسط صورت فلکی شکل ۴ خواهیم داشت،

$$E_{avg-modified} = \frac{D^2 (M+1)(M+2)}{3} \quad (20)$$

با مساوی قرار دادن روابط ۴ و ۲۰ خواهیم داشت،

$$\frac{d^2 (M+1)(M-1)}{3} = \frac{D^2 (M+1)(M+2)}{3} \Rightarrow d^2 (M-1) = D^2 (M+2) \quad (21)$$

در نتیجه متغیر D مناسب توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود،

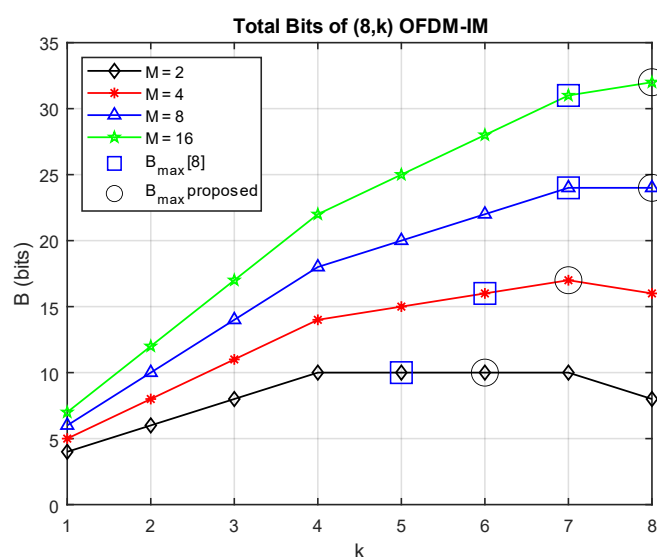
$$D = d \sqrt{\frac{M-1}{M+2}} \xrightarrow{d=1} D = \sqrt{\frac{M-1}{M+2}} \quad (22)$$

۴- شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی مربوط به بهینه کردن تعداد زیرحامل‌های فعال برای رسیدن به حداکثر نرخ داده و بازدهی طیفی آورده شده است. در شکل‌های ۵ تا ۸ تعداد بیت‌های ارسالی هر گروه سیستم OFDM-IM به ازای زیرحامل‌های فعال

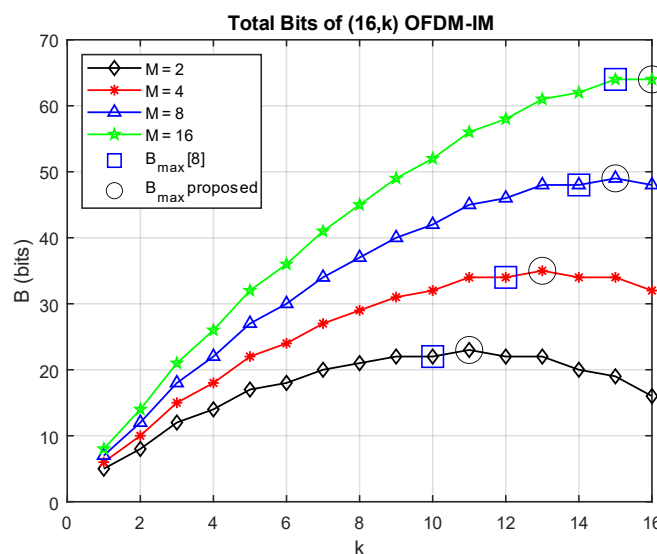
مختلف و برای تعداد مختلف سمبل‌های مدولاسیون، M ، نشان داده شده است. در هر چهار شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سمبل‌های مدولاسیون M تأثیر بیت‌های ارسالی توسط زیرحامل‌های فعال B_1 افزایش می‌یابد و با کاهش مقدار M تأثیر بیت‌های ارسالی توسط زیرحامل‌های غیرفعال B_2 افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار زیرحامل فعال بهینه پیشنهادی رابطه ۱۶، جواب بهینه و مناسب را برای همه حالت‌ها ارائه می‌کند.

برای مقایسه بهتر و دقیق‌تر در جدول ۱ مقدار بیت ارسالی هر گروه سیستم OFDM-IM به ازای مقادیر زیرحامل فعال پیشنهادی و مرجع [۸]، برای حالت‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار زیرحامل فعال بهینه روش پیشنهادی در همه حالت‌ها مقدار بیت ارسالی بیشینه را به درستی ارائه می‌کند و ضعف موجود در رابطه مرجع [۸] را جبران می‌کند. در این روش با استفاده از اپراتور جزء صحیح بالا در مرحله آخر فرآیند بهینه‌سازی و به نوعی جبران تقریب اولیه فرآیند بهینه‌سازی، تعداد زیرحامل فعال بهینه‌ای به دست آمده است که حداکثر بیت ارسالی ممکن در هر گروه را ارائه می‌کند. برای مثال، روش پیشنهادی بهینه، برای $M=2$ و $n=4$ ، ۲۵ درصد، برای $M=2$ و $n=16$ ، ۴/۵ درصد و برای $M=4$ و $n=8$ ، ۶/۲۵ درصد تعداد بیت ارسالی را نسبت به [۸] افزایش داده است.



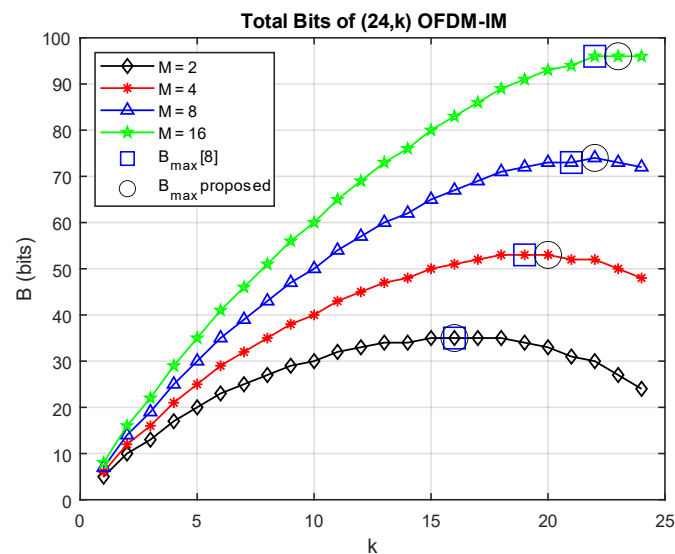
شکل ۵: مقایسه حداکثر بیت ارسالی هر زیربلوک با مقدار k بهینه پیشنهادی و [۸] برای $n=8$

Figure 5. Comparison of maximum transmitted bits of each subblock with proposed optimum k and [8] for $n=8$



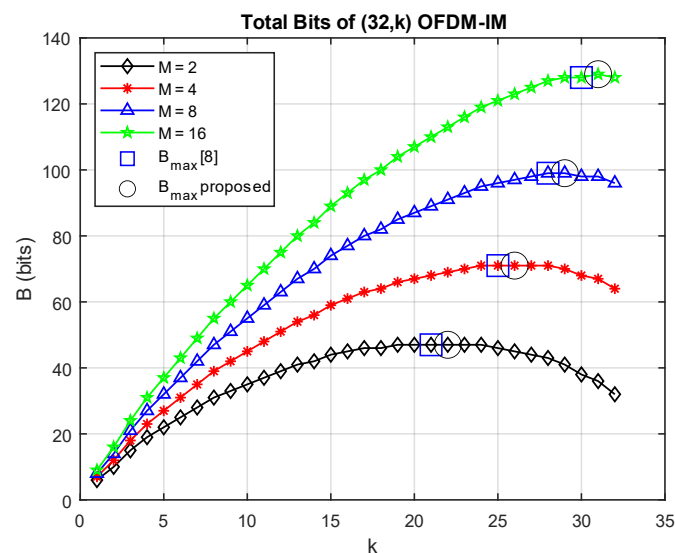
شکل ۶: مقایسه حداکثر بیت ارسالی هر زیربلوک با مقدار k بهینه پیشنهادی و [۸] برای $n=16$

Figure 6. Comparison of maximum transmitted bits of each subblock with proposed optimum k and [8] for $n=16$



شکل ۷: مقایسه حداکثر بیت ارسالی هر زیر بلوک با مقدار k بهینه پیشنهادی و $[8]$ برای $n=24$

Figure 7. Comparison of maximum transmitted bits of each subblock with proposed optimum k and $[8]$ for $n=24$



شکل ۸: مقایسه حداکثر بیت ارسالی هر زیر بلوک با مقدار k بهینه پیشنهادی و $[8]$ برای $n=32$

Figure 8. Comparison of maximum transmitted bits of each subblock with proposed optimum k and $[8]$ for $n=32$

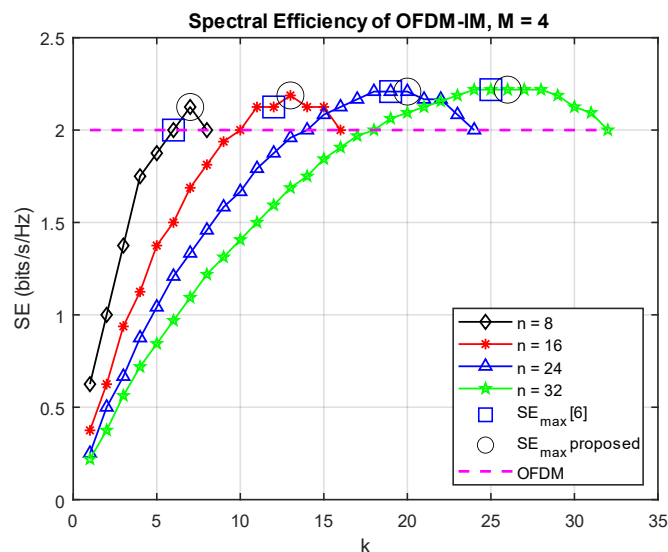
جدول ۱: مقایسه حداکثر بیت ارسالی هر زیر بلوک با مقدار k بهینه پیشنهادی و $[8]$

Table 1. Comparison of maximum transmitted bits of each subblock with proposed optimum k and $[8]$

M	$B_{max}, n = 4$		$B_{max}, n = 8$		$B_{max}, n = 16$		$B_{max}, n = 24$		$B_{max}, n = 32$	
	$[8]$	proposed (gain)	$[8]$	proposed (gain)	$[8]$	proposed (gain)	$[8]$	proposed (gain)	$[8]$	proposed (gain)
2	4	5 (25%)	10	10	22	23 (4.5%)	35	35	47	47
4	8	8	16	17 (6.25%)	34	35 (2.9%)	53	53	71	71
8	11	12 (9.1%)	24	24	48	49 (2.1%)	73	74 (1.4%)	99	99
16	14	16 (14.3%)	31	32 (3.2%)	64	64	96	96	128	129 (0.8%)

در شکل ۹ و جدول ۲ نیز همین مقایسه‌ها برای کارایی طیفی روش پیشنهادی و روش [۶] آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی این مقاله بهترین تعداد زیر حامل فعال ممکن را برای داشتن حداکثر کارایی طیفی به درستی ارائه می‌کند. همچنین در شکل ۹ مقایسه‌ای بین دو سیستم OFDM و OFDM-IM انجام شده است که مشخص می‌کند سیستم

OFDM-IM می‌تواند با انتخاب تعداد مناسبی از زیرحامل‌های فعال، کارایی طیفی بالاتری نسبت به سیستم OFDM داشته باشد.



شکل ۹: مقایسه کارایی طیفی با مقدار k بهینه پیشنهادی و [۶]

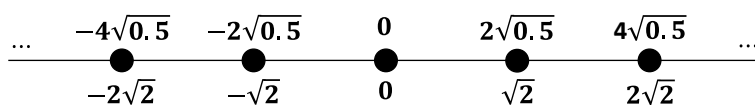
Figure 9. Comparison of spectral efficiency with proposed optimum k and [6]

جدول ۲: مقایسه حداکثر کارایی طیفی با مقدار k بهینه پیشنهادی و [۶]

Table 2. Comparison of maximum spectral efficiency with proposed optimum k and [6]

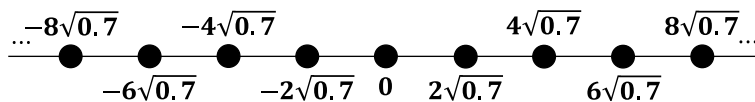
n	$SE_{max}, M = 4$	
	[6]	proposed
8	2	2.125
16	2.125	2.1875
24	2.2083	2.2083
32	2.2188	2.2188

هدف دوم این مقاله به دست آوردن صورت فلکی تغییر یافته برای مدولاسیون M-PAM است که با توجه به رابطه ۲۲ برای فواصل سمبل‌ها در صورت فلکی، صورت فلکی پیشنهادی برای $M=4$ و $M=8$ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: صورت فلکی پیشنهادی سیستم OFDM-IM برای مدولاسیون 4-PAM

Figure 10. Proposed 4-PAM constellation pattern for OFDM-IM system

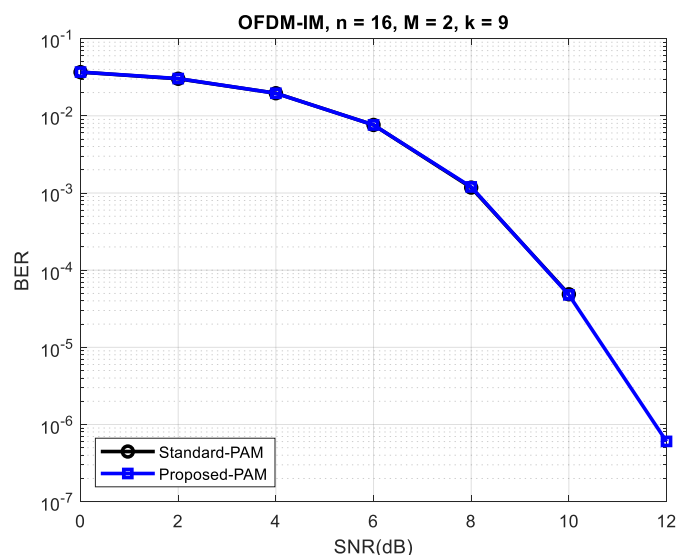


شکل ۱۱: صورت فلکی پیشنهادی سیستم OFDM-IM برای مدولاسیون 8-PAM

Figure 11. Proposed 8-PAM constellation pattern for OFDM-IM system

توجه به این نکته ضروری است که با توجه به ساختار و مقادیر صورت فلکی مدولاسیون BPAM، رابطه ۲۲ بی‌تأثیر است و کمکی نخواهد کرد. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ منحنی نرخ خطای بیتی (BER) برای صورت فلکی استاندارد و صورت فلکی

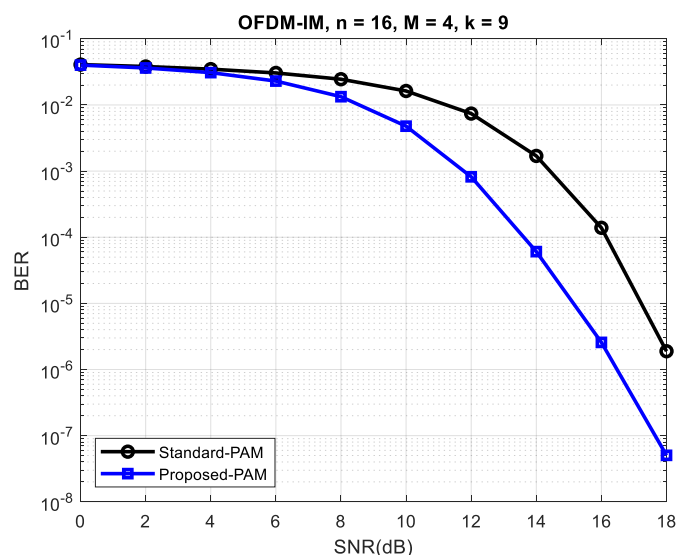
پیشنهادی این مقاله نسبت به ابعاد مختلف مدولاسیون PAM ($M=2,4,8$) برای سیستم OFDM-IM با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۱۲ دیده می‌شود، صورت فلکی تغییر یافته برای حالت $M=2$ هیچ تغییری ایجاد نمی‌کند چون با ایجاد یک صفر مابین سمبل‌های ۱- و ۱، نظم فاصله بین سمبل‌ها به هم نمی‌خورد و همچنان فاصله سمبل‌ها با هم برابر است و مقدار سمبل‌ها را نیز به دلیل محدودیت انرژی متوسط نمی‌توان افزایش داد.



شکل ۱۲: منحنی نرخ خطای بیتی (BER) برای $M=2$

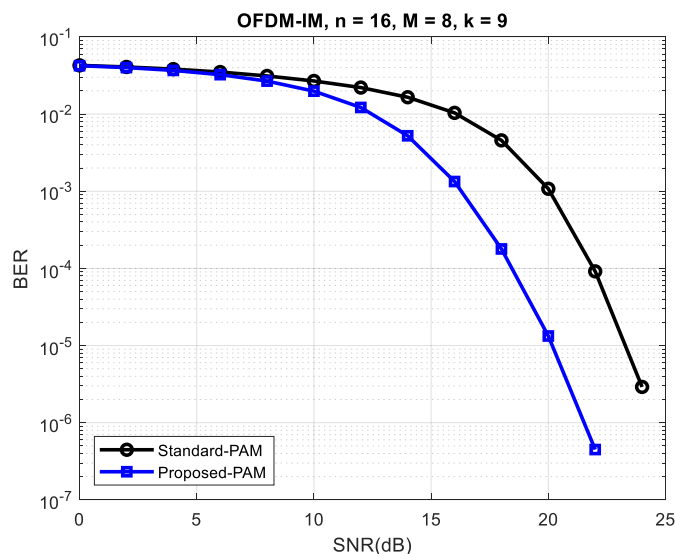
Figure 12. BER of BPAM for OFDM-IM system

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ صورت فلکی پیشنهادی و PAM تغییر یافته قدرت خود را نشان می‌دهد و همان‌طور که ملاحظه می‌شود نرخ خطای بیتی بهتری نسبت به مدولاسیون PAM استاندارد دارد. نرخ خطای بیتی در شکل ۱۳ برای نسبت سیگنال به نویز ۱۲ دسی‌بل حدود ۱۰ برابر و در شکل ۱۴ برای نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل حدود ۱۰۰ برابر کمتر شده است.



شکل ۱۳: منحنی نرخ خطای بیتی (BER) برای $M=4$

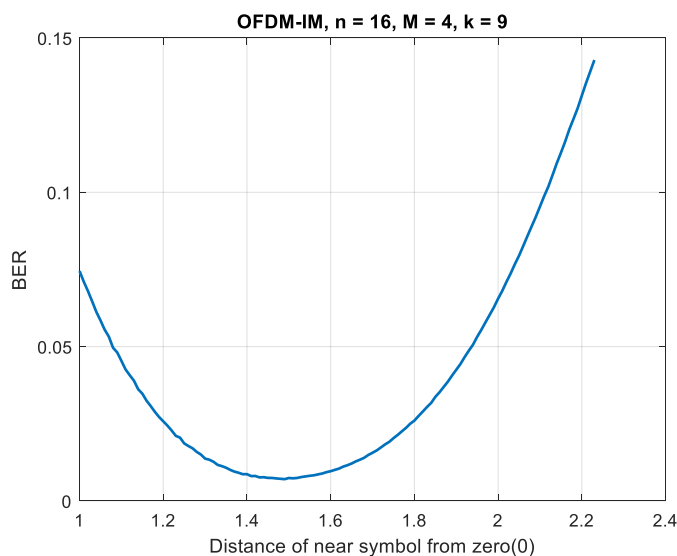
Figure 13. BER of 4-PAM for OFDM-IM system



شکل ۱۴: منحنی نرخ خطای بیتی (BER) برای $M=8$

Figure 14. BER of 8-PAM for OFDM-IM system

در ادامه بحث را فقط روی مدولاسیون 4-PAM متمرکز می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۵ منحنی BER نسبت به تغییرات فاصله نزدیک‌ترین سمبل به مقدار صفر (سمبل ۱ در PAM استاندارد) یک منحنی محدب است. در نتیجه می‌توان با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقدار بهترین فاصله را برای مقدار نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) ثابت پیدا کرد طوری که کمترین نرخ خطای بیتی را داشته باشیم. باید توجه کرد که چون می‌خواهیم انرژی متوسط سمبل‌های مدولاسیون ثابت بماند، با بیشتر شدن فاصله نزدیک‌ترین سمبل به مقدار صفر، فاصله سمبل بعدی حتماً کاهش پیدا خواهد کرد و بالعکس.



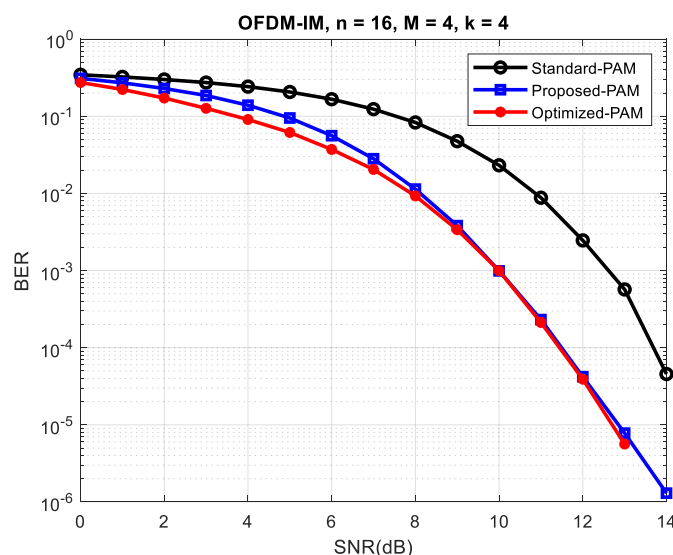
شکل ۱۵: منحنی BER نسبت به تغییرات فاصله نزدیک‌ترین سمبل به مقدار صفر

Figure 15. BER vs distance of PAM nearest symbol to zero

در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ منحنی BER برای مدولاسیون 4-PAM در سیستم OFDM-IM به ازای تعداد زیرحامل‌های فعال مختلف، $k=4,9,13$ ، رسم شده است و مقایسه‌ای بین صورت فلکی پیشنهادی با فواصل برابر و ثابت و صورت فلکی بهینه با فواصل مختلف وابسته به SNR انجام شده است. مقادیر صورت فلکی بهینه در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از تابع `fminbnd` محاسبه شده است که مقادیر سه حالت آن در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که از جدول ۳ قابل مشاهده است، مقادیر

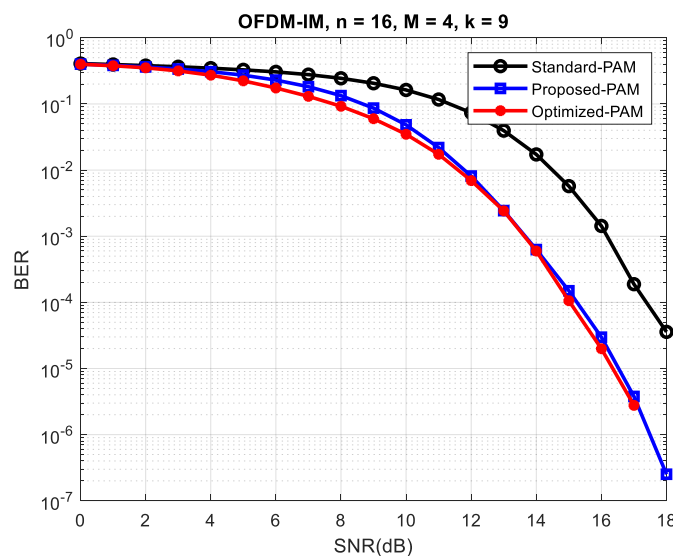
¹ Signal to noise ratio

صورت فلکی بهینه نسبت به مقادیر زیرحامل فعال و SNR حساس و وابسته است و با تغییر در این مقادیر نیاز به جستجو و بهینه‌سازی مجدد دارد که بسیار عمل زمان‌بری است. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ مشاهده می‌شود که تفاوت زیادی بین صورت فلکی پیشنهادی و صورت فلکی بهینه وجود ندارد به ویژه زمانی که مانند شکل ۱۸ حداکثر کارایی طیفی را داشته باشیم. در نتیجه با توجه به زمان انجام و بهبود مختصر صورت فلکی بهینه، صورت فلکی پیشنهادی این مقاله پیشنهاد مناسبی برای مدولاسیون M-PAM در سیستم‌های OFDM-IM است.



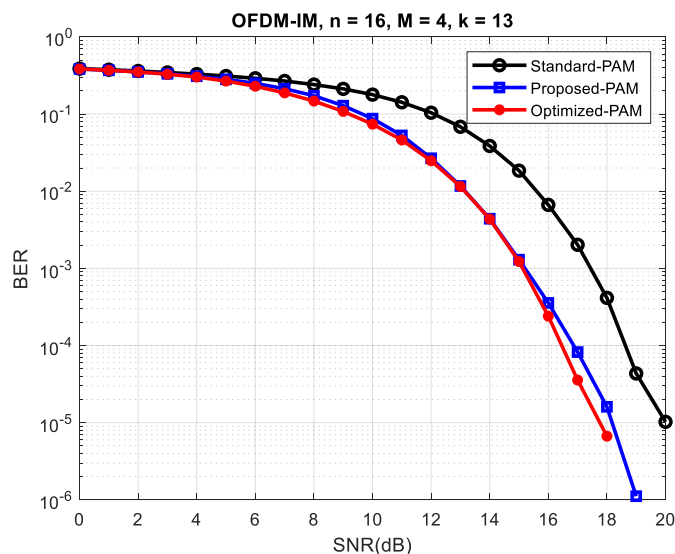
شکل ۱۶: منحنی BER و مقایسه صورت فلکی پیشنهادی و بهینه برای $k=4$

Figure 16. BER and comparison of proposed and optimized constellation pattern for $k=4$



شکل ۱۷: منحنی BER و مقایسه صورت فلکی پیشنهادی و بهینه برای $k=9$

Figure 17. BER and comparison of proposed and optimized constellation pattern for $k=9$



شکل ۱۸: منحنی BER و مقایسه صورت فلکی پیشنهادی و بهینه برای $k=13$
Figure 18. BER and comparison of proposed and optimized constellation pattern for $k=13$

جدول ۳: فاصله نزدیک‌ترین سمبل از نقطه صفر در صورت فلکی بهینه برای $M=4$ نسبت به SNR و k های مختلف

Table 3. Distance of nearest symbol from zero in optimized constellation pattern for $M=4$ relative to different k and SNRs

k	$k = 0, 1, 2, \dots, 18, 19, 20$
4	2.0469, 2.0531, 1.9443, 1.9289, 1.8488, 1.7639, 1.6728, 1.5905, 1.5192, 1.4653, 1.4145, 1.3863, 1.3816, 1.3168, 1.3168, 1.3168, 1.3168, 1.3168, 1.3168, 1.3168, 1.3168
9	1.7011, 1.7208, 1.9375, 1.9448, 2.0326, 1.9442, 1.9428, 1.8454, 1.7774, 1.6893, 1.5873, 1.5498, 1.4850, 1.4514, 1.3974, 1.3567, 1.2970, 1.2970, 1.2970, 1.2970, 1.2970
13	1.4468, 1.5216, 1.6038, 1.6615, 1.7581, 1.8054, 1.8110, 1.7957, 1.7639, 1.6748, 1.6105, 1.5230, 1.4831, 1.4510, 1.4157, 1.3755, 1.3471, 1.3206, 1.3161, 1.3161, 1.3161

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم OFDM-IM مورد بحث قرار گرفت. در این سیستم چون تعدادی از زیرحامل‌ها فعال و بقیه غیرفعال هستند، تعداد این زیرحامل‌های فعال سایر پارامترهای کیفی و کمی این سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله هدف اول پیدا کردن تعداد زیرحامل فعال بهینه با هدف رسیدن به حداکثر نرخ بیت ارسالی و حداکثر کارایی طیفی بود. توسط بهینه‌سازی با عمل مشتق‌گیری و اصلاح درست تقریب موجود و شبیه‌سازی نشان داده شد که تعداد زیرحامل فعال بهینه پیشنهادی این مقاله پاسخ مطلوبی برای سیستم OFDM-IM دارد و می‌تواند در مواردی نرخ داده ارسالی و کارایی طیفی را تا ۲۵ درصد نیز بهبود دهد. در سیستم OFDM-IM با توجه به وجود زیرحامل غیرفعال و سمبل صفر، نظم صورت فلکی مدولاسیون PAM و فاصله برابر بین سمبل‌ها به هم می‌خورد و در نتیجه نرخ خطای بی‌تای دارد. به عنوان کمک دوم این مقاله، یک صورت فلکی پیشنهادی با فواصل برابر با حفظ انرژی متوسط سمبل‌های مدولاسیون پیشنهاد شد که نرخ خطای بی‌تای سیستم OFDM-IM را در بعضی حالت‌ها ۱۰ و حتی ۱۰۰ برابر بهبود می‌دهد و بر اساس نتایج شبیه‌سازی چون با حالت بهینه‌سازی و جستجوی کامل، تفاوت بسیار کمی دارد، می‌توان به عنوان صورت فلکی مناسب برای مدولاسیون M-PAM در سیستم OFDM-IM پیشنهاد شود.

مراجع

- [1] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li and G. Ye Li, "OFDM and Its Wireless Applications: A Survey," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009, doi: [10.1109/TVT.2008.2004555](https://doi.org/10.1109/TVT.2008.2004555).

- [2] R. Abu-alhiga and H. Haas, "Subcarrier-index modulation OFDM," *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 2009, pp. 177-181, doi: [10.1109/PIMRC.2009.5449882](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2009.5449882).
- [3] D. Tsonev, S. Sinanovic and H. Haas, "Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM," *IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, Houston, TX, USA, 2011, pp. 728-732, doi: [10.1109/GLOCOMW.2011.6162549](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162549).
- [4] E. Başar, Ü. Aygölü, E. Panayircı and H. V. Poor, "Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536-5549, Nov. 2013, doi: [10.1109/TSP.2013.2279771](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2279771).
- [5] R. Fan, Y. J. Yu and Y. L. Guan, "Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5350-5359, Oct. 2015, doi: [10.1109/TWC.2015.2436925](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2436925).
- [6] M. Chafii, J. P. Coon and D. A. Hedges, "DCT-OFDM With Index Modulation," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1489-1492, July 2017, doi: [10.1109/LCOMM.2017.2682843](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2682843).
- [7] A. W. Azim, M. Chafii, Y. Le Guennec and L. Ros, "Spectral and Energy Efficient Fast-OFDM With Index Modulation for Optical Wireless Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 1771-1774, Aug. 2020, doi: [10.1109/LCOMM.2020.2989633](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2989633).
- [8] N. H. Nguyen, B. Berscheid and H. H. Nguyen, "Fast-OFDM With Index Modulation for NB-IoT," in *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 7, pp. 1157-1160, July 2019, doi: [10.1109/LCOMM.2019.2917684](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2917684).
- [9] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, Higher Education, 2008.
- [10] J. Havil, *Gamma: Exploring Euler's Constant*. Princeton University Press, 2010.

Improve Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms Using Nash Bargaining Theory

Marziyeh Dadvar¹  | Hamidreza Navidi^{2*}  | Hamid Haj Seyyed Javadi³  | Mitra Mirzarezaee⁴ 

¹Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
m.dadvar@srbiau.ac.ir

²Department of Mathematics and Computer Sciences, Shahed University, Tehran, Iran.
navidi@shahed.ac.ir

³Department of Mathematics and Computer Sciences, Shahed University, Tehran, Iran.
h.s.javadi@shahed.ac.ir

⁴Department of Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Mirzarezaee@srbiau.ac.ir

Correspondence

Hamidreza Navidi, Professor of Mathematics and Computer Sciences, Shahed University, Tehran, Iran.
Email: navidi@shahed.ac.ir

Main Subjects:
Optimization Algorithms

Paper History:
Received: 28 April 2024
Revised: 30 July 2024
Accepted: 6 August 2024

Abstract

This article proposes a new approach in solving optimization (issues) problems in which two known optimization algorithm of particle swarm algorithm (PSO) and differential evolution (DE) cooperate. The proposed approach uses a coalition or cooperation model in the game theory to improve the DE and PSO algorithms. This is done in an attempt to keep a balance between the exploration and exploitation capabilities by preventing population stagnation and avoiding the local optimum. The DE and PSO algorithms are two players in the state space, which play cooperative games together using the Nash bargaining theory to find the best solution. To evaluate the performance of the proposed algorithm, 25 benchmark functions are used in terms of the CEC2005 structure. The proposed algorithm is then compared with the classical DE and PSO algorithms and the hybrid algorithms recently proposed. The results indicated that the proposed hybrid algorithm outperformed the classical algorithms and other hybrid models.

Keywords: Cooperative Game Theory, Nash Bargaining Theory, Differential Evolution, Particle Swarm Optimization.

Highlights

- The game-theoretic environment fosters competition between algorithms, significantly enhancing their search capabilities.
- The Nash bargaining solution provides the best outcome for both algorithms, leveraging their Pareto optimality property.
- The exchange of profits from the game encourages the exploration of new areas in the search space, increasing diversity and preventing convergence to local optima.
- The Nash bargaining theorem ensures a balance between exploration and exploitation in the proposed method.

Citation: M. Dadvar, H. Navidi, H. Haj Seyyed Javadi, and M. Mirzarezaee, "Improve Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms Using Nash Bargaining Theory," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 70–93, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1333 [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

Optimization has emerged as a critical issue in various fields, attracting significant research attention in recent years due to its wide-ranging applications in resource allocation [1], scheduling [2], decision-making [3], and more. However, many optimization problems, particularly in engineering, are inherently complex and cannot be solved using conventional methods such as mathematical programming. As a result, numerous metaheuristic methods, inspired by natural phenomena, have been proposed and are rapidly expanding across various branches of engineering. Some of the recently developed metaheuristic algorithms include Chicken Swarm Optimization (CSO) [4], Sine Cosine Algorithm (SCA) [5], Grey Wolf Optimization (GWO) [6], Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA) [7], Cat Swarm Optimization (CSO) [8], Bird Swarm Algorithm (BSA) [9], Bat Optimization Algorithm (BOA) [10], Differential Evolution (DE) [11], Crow Search Algorithm (CSA) [12], and Particle Swarm Optimization (PSO) [13].

Despite their widespread and effective application, the DE and PSO algorithms have inherent limitations that can hinder their performance. A key challenge is achieving a precise balance between the two conflicting objectives of exploration (diversification) and exploitation (intensification) [18]. To address these limitations, various strategies have been proposed, one of the most effective being hybridization [19]. Hybrid algorithms, a growing field in intelligent systems, aim to combine the strengths of different approaches to mitigate their weaknesses [18]. This paper introduces a novel approach to solving optimization problems by combining the DE and PSO algorithms. The core idea is to use a coalition or cooperation model from game theory, specifically the Nash bargaining theory, to enable the DE and PSO algorithms to engage in cooperative games. In this framework, the two algorithms work together to achieve the best balance in the game, which corresponds to the optimal solution in the state space. During each round, after a specific number of iterations, the DE and PSO algorithms enter the game environment and cooperate, exchanging the profits earned from the game.

In any cooperative scenario, the goal is to maximize individual profits. The Nash bargaining solution represents an agreed-upon bargaining outcome that maximizes the product of individual utilities. A key feature of the Nash bargaining solution is its Pareto optimality property. According to the Pareto optimality principle, no alternative allocation can improve the outcome for all players simultaneously [20]. In other words, the Nash bargaining solution is a Pareto-optimal outcome for cooperative games. Therefore, the profit derived from Nash bargaining serves as the best solution for both the PSO and DE algorithms, owing to its Pareto optimality.

2. Innovation and contributions

Although the DE and PSO algorithms have been successfully applied to a wide range of optimization problems, both suffer from limitations that reduce their effectiveness. To address these shortcomings, the proposed algorithm combines and facilitates cooperation between the DE and PSO algorithms. This cooperation is achieved through a coalition or cooperation model in game theory. Specifically, this paper introduces the GPSO/GDE algorithm, a game-theoretic combination of the DE and PSO algorithms, designed to enhance search capabilities.

In this framework, after a specific number of iterations, the DE and PSO algorithms enter a game environment and engage in cooperative games using the Nash bargaining theory. The goal is to achieve the best balance in the game, which corresponds to the optimal solution in the state space.

The primary objective of this paper is to leverage the strengths of both algorithms to maintain a balance between exploration and exploitation, thereby preventing population stagnation and avoiding convergence to local optima. The key contributions of this article are summarized as follows:

- The game-theoretic environment fosters competition between the algorithms, significantly enhancing their search capabilities.
- The Nash bargaining solution provides the best outcome for both algorithms due to its Pareto optimality property.
- The exchange of profits from the game encourages the exploration of new areas in the search space, increasing diversity and preventing convergence to local optima.
- The Nash bargaining theorem ensures a balance between exploration and exploitation in the proposed method.

3. Materials and Methods

In the proposed method, PSO algorithm is considered as the first player and DE algorithm is considered as the second player. Figure 1 illustrates the flowchart which presents the proposed method. As it can be seen in the proposed method flowchart, the initial population of each player is independently evaluated using the objective function. After the evaluation of all the solutions for the first and second players, the best solution in the first player and the second player is chosen. These two better solutions are compared with each other so that the best solution is selected as the disagreement point (v_1, v_2) in the first round of the game. Since the game has the same conditions for both players and is symmetric, the values $v_1 = v_2$ are equal in the first round.

In each round, the first and second players each run N times independently, and in each iteration, the best solution and its evaluation value are stored for the first player in the set M_1 and for the second player in the set M_2 respectively. This means that N elite solutions are stored in the sets M_1 and M_2 for each iteration.

After N times of iteration, both players enter the game environment and according to the following equation, the Nash bargaining theorem is applied to the feasible set F and the disagreement point (v_1, v_2) . The unique answer $f(F, v) = (x_1^*, x_2^*)$ is selected as the best answer, which is the result of cooperation between two players. In the above equation, according to the condition of the bargaining theory, if (x_1, x_2) is chosen from the feasible set F is better than the disagreement point (v_1, v_2) , then it is considered as a unique answer $(x_1^*, x_2^*) = (x_1, x_2)$, otherwise, the disagreement point is selected as the unique answer $(x_1^*, x_2^*) = (v_1, v_2)$. The unique answer (x_1^*, x_2^*) is the best answer for both players due to the Pareto optimality property.

x_1^* is the game profit for the first player which is taken as the base vector in the DE mutation operator for the next iteration round and causes a change in the DE mutation operator. x_2^* is the game profit for the second player which is used as the lead particle in PSO to update the particle velocity vector in the next iteration round and changes the direction of particles' motion. Also we should state that $v_1 = x_2^*$ as the disagreement point for the first player and $v_2 = x_1^*$ as the disagreement point for the second player are updated. In fact, the unique answer (x_1^*, x_2^*) of this round of Nash bargaining is valued as the disagreement point (v_1, v_2) for the next round of Nash bargaining. In general, the condition of the Nash bargaining theorem helps to maintain the balance between the ability to explore and exploit in the proposed algorithm. In fact, selecting (x_1, x_2) from the feasible set F leads to exploring and searching the problem space thoroughly to find an optimal solution. Also, choosing the disagreement point (v_1, v_2) leads to extracting better solutions. The exchange of profits earned from the game between the algorithms leads to exploring new areas in the search environment, increasing diversity, and avoiding the local optimum.

4. Results and Discussion

In summary, the proposed GPSO/GDE algorithm demonstrates superior performance and robustness compared to other algorithms in terms of search capability and scalability for solving optimization problems. This advantage stems from the algorithm's use of the Nash bargaining solution to combine the DE and PSO optimization algorithms. The Nash bargaining solution is unique, adhering to five key principles: Pareto optimality, individual rationality, linear invariance, independence of irrelevant alternatives, and symmetry. Additionally, the Nash bargaining theory aims to maximize the profit for both players, maintain a balance between exploration and exploitation, avoid local optima, and enhance diversity in the proposed algorithm.

While the proposed algorithm incurs a higher computational cost compared to other algorithms due to the independent execution of the DE and PSO algorithms, the significant improvement in results and overall superiority justify this additional cost.

5. Conclusion

This paper introduced a hybrid algorithm combining the DE and PSO algorithms to address optimization problems. Although both DE and PSO have been widely used for optimization, they suffer from limitations that hinder their performance. For instance, the PSO algorithm is prone to premature convergence and may become trapped in local optima when solving complex problems. Similarly, the DE algorithm heavily depends on the trial vector generation strategy and the values of its parameters.

To overcome these challenges, the proposed GPSO/GDE algorithm leverages the combination and cooperation of the DE and PSO algorithms, facilitated by the Nash bargaining theory. This approach maximizes the profits for both players, maintains a balance between exploration and exploitation, avoids local optima, and enhances diversity. The game-theoretic environment fosters competition between the algorithms, significantly improving their search capabilities.

Experimental results demonstrate that the GPSO/GDE algorithm outperforms both the classical DE and PSO algorithms and other hybrid algorithms in terms of standard deviation and mean error.

6. Acknowledgement

The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript. The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

References

- [1] J. P. B. Mapetu, Z. Chen and L. Kong, "Low-time complexity and low-cost binary particle swarm optimization algorithm for task scheduling and load balancing in cloud computing," *Applied Intelligence*, vol. 49, pp. 3308-3330, 2019, doi: [10.1007/s10489-019-01448-x](https://doi.org/10.1007/s10489-019-01448-x).
- [2] Q.-V. Pham, S. Mirjalili, N. Kumar, M. Alazab and W.-J. Hwang, "Whale optimization algorithm with applications to resource allocation in wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 4, pp. 4285-4297, 2020, doi: [10.1109/TVT.2020.2973294](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2973294).
- [3] M. Dadvar, H. Navidi, H. H. S. Javadi and M. Mirzarezaee, "A cooperative approach for combining particle swarm optimization and differential evolution algorithms to solve single-objective optimization problems," *Applied Intelligence*, vol. 52, pp. 4089-4108, 2022, doi: [10.1007/s10489-021-02605-x](https://doi.org/10.1007/s10489-021-02605-x).
- [4] X. Meng, Y. Liu, X. Gao and H. Zhang, "A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization," in *International conference in swarm intelligence*, pp. 86-94, 2014, doi: [10.1007/978-3-319-11857-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11857-4_10).
- [5] S. Mirjalili, "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-based systems*, vol. 96, pp. 120-133, 2016, doi: [10.1016/j.knosys.2015.12.022](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022).
- [6] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi: [10.1016/j.advengsoft.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [7] W.-T. Pan, "A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example," *Knowledge-Based Systems*, vol. 26, pp. 69-74, 2012, doi: [10.1016/j.knosys.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001).
- [8] S.-C. Chu, P.-W. Tsai and J.-S. Pan, "Cat swarm optimization," in *Pacific Rim international conference on artificial intelligence*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 854-858, doi: [10.1007/978-3-540-36668-3_94](https://doi.org/10.1007/978-3-540-36668-3_94).
- [9] X.-B. Meng, X. Z. Gao, L. Lu, Y. Liu and H. Zhang, "A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird Swarm Algorithm," *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 28, pp. 673-687, 2016, doi: [10.1080/0952813X.2015.1042530](https://doi.org/10.1080/0952813X.2015.1042530).
- [10] X.S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature inspired cooperative strategies for optimization*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, NCSO2010, 2010, pp. 65-74, doi: [10.1007/978-3-642-12538-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6).
- [11] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997, doi: [10.1023/A:1008202821328](https://doi.org/10.1023/A:1008202821328).
- [12] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm," *Computers & Structures*, vol. 169, no. 2, pp. 1-12, 2016, doi: [10.1016/j.compstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.001).
- [13] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, MHS'95, 1995, pp. 39-43, doi: [10.1109/MHS.1995.494215](https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215).
- [14] X. Yu, J. Cao, H. Shan, L. Zhu and J. Guo, "An adaptive hybrid algorithm based on particle swarm optimization and differential evolution for global optimization," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, no. 6, p. 215472, 2014, doi: [10.1155/2014/215472](https://doi.org/10.1155/2014/215472).
- [15] B. Mao, Z. Xie, Y. Wang, H. Handroos and H. Wu, "A hybrid strategy of differential evolution and modified particle swarm optimization for numerical solution of a parallel manipulator," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-9, 2018, doi: [10.1155/2018/9815469](https://doi.org/10.1155/2018/9815469).
- [16] Q. Abbas, J. Ahmad and H. Jabeen, "OPSODE: opposition based particle swarm optimization instilled with differential evolution," *International journal of advanced and applied sciences*, vol. 4, no. 7, pp. 50-58, 2017, doi: [10.21833/ijaas.2017.07.008](https://doi.org/10.21833/ijaas.2017.07.008).
- [17] K. Price, R. M. Storn and J. A. Lampinen, "Differential evolution: a practical approach to global optimization," *Natural Computing*, vol. 141, no. 2, 2005, doi: [10.1007/3-540-31306-0](https://doi.org/10.1007/3-540-31306-0).

- [18] R. Thangaraj, M. Pant, A. Abraham and P. Bouvry, "Particle swarm optimization: hybridization perspectives and experimental illustrations," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 12, pp. 5208-5226, 2011, doi: [10.1016/j.amc.2010.12.053](https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.12.053).
- [19] C. Huang, X. Zhou, X. Ran, J. Wang, H. Chen and W. Deng, "Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 121, no. 3, p. 105942, 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2023.105942](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105942).
- [20] Q. Gao, H. Sun, and Z. Wang, "DP-EPSo: Differential privacy protection algorithm based on differential evolution and particle swarm optimization," *Optics Laser Technology*, vol. 173, p. 110541, June 01, 2024, doi: [10.1016/j.optlastec.2023.110541](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110541).

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

Author Contributions: Marziyeh Dadvar: methodology, made the simulations, writing original draft preparation; Hamidreza Navidi: methodology, manuscript editing; Hamid Haj Seyyed Javadi: developed the theory, manuscript editing; Mitra Mirzarezaee: manuscript editing.

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

بهبود الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات و تکامل تفاضلی با استفاده از نظریه چانه زنی نش

مرضیه دادور^۱ | حمیدرضا نویدی^{۲*} | حمید حاج سید جواد^۳ | میترا میرزارضایی^۴

چکیده:

این مقاله، رویکرد جدیدی را به منظور حل مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌کند، که دو الگوریتم شناخته شده بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization) و تکامل تفاضلی (Differential Evolution) با هم همکاری می‌نماید. در رویکرد پیشنهادی برای حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج با جلوگیری از سکون جمعیت، اجتناب از بهینه محلی و بهبود در الگوریتم‌های PSO و DE از مدل ائتلافی یا همکاری در تئوری بازی‌ها استفاده می‌شود. در واقع الگوریتم‌های PSO و DE به عنوان دو بازیکن در فضای جستجو هستند، که با استفاده از نظریه چانه زنی نش (Nash bargaining theory) در هر مرحله با هم بازی همکاری (Cooperative game) انجام داده تا بهترین راه‌حل را در فضای جستجو بدست آورند. مطابق با ساختار CEC2005، بیست و پنج تابع معیار (Benchmark functions) برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش پیشنهادی با دو الگوریتم کلاسیک PSO و DE و الگوریتم‌های ترکیبی که اخیراً پیشنهاد شده است مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، رویکرد ارائه شده در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک و سایر مدل‌های ترکیبی عملکرد بهتری دارد.

کلید واژه‌ها: بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، تکامل تفاضلی (DE)، تئوری بازی همکاری، نظریه چانه زنی نش.

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

m.dadvar@srbiau.ac.ir

^۲ گروه ریاضیات و علوم کامپیوتر، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

navidi@shahed.ac.ir

^۳ گروه ریاضیات و علوم کامپیوتر، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

h.s.javadi@shahed.ac.ir

^۴ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران، ایران.

Mirzarezaee@srbiau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*حمیدرضا نویدی، استاد گروه ریاضیات و علوم کامپیوتر، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

navidi@shahed.ac.ir

موضوع اصلی:

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۹ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۶ مرداد ۱۴۰۳

تازه‌های تحقیق:

- محیط بازی یک فضای رقابتی را در بین الگوریتم‌ها ایجاد می‌کند و باعث می‌شود توانایی جستجوی الگوریتم‌ها تا حد زیادی افزایش پیدا کند.
- سود حاصل از چانه‌زنی نش با توجه به خاصیت بهینه پرتو بودن بهترین جوابی است که برای هر دو الگوریتم بدست می‌آید.
- تبادل سود حاصل از بازی در بین الگوریتم‌ها باعث اکتشاف نواحی جدید در فضای جستجو و افزایش تنوع و اجتناب از بهینه محلی می‌شود.
- شرط قضیه چانه زنی نش به حفظ تعادل در بین توانایی اکتشاف و استخراج در روش پیشنهادی کمک می‌کند.

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

در سال‌های اخیر بهینه‌سازی در زمینه‌های گوناگون اهمیت خود را نشان داده و توجه بسیاری از دانشمندان علوم مختلف را به خود جلب کرده است و کاربردهای زیادی در زمینه تخصیص منابع، زمان بندی‌ها، تصمیم‌گیری‌ها و غیره دارد [۱-۳]. امروزه بهینه‌سازی همواره با مشکلات فراوانی همراه بوده است و بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در مهندسی، طبیعتا پیچیده‌تر و مشکل‌تر از آن هستند که با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی نظیر روش برنامه‌ریزی ریاضی و نظایر آن قابل حل باشند. از همین رو تاکنون روش‌های فرایافتاری^۱ بسیار زیادی بر اساس الهام از طبیعت در حوزه بهینه‌سازی ارائه شده است که به سرعت در حال گسترش هستند و کاربرد در شاخه‌های مختلف فنی مهندسی دارند. برخی از الگوریتم‌های فرایافتاری اخیر عبارت است از: بهینه‌سازی ازدحام جوجه^۲ [۴]، الگوریتم سینه‌سوس کسینه‌سوس^۳ [۵]، بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری^۴ [۶]، الگوریتم بهینه‌سازی مگس و میوه-^۵ [۷]، بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها^۶ [۸]، الگوریتم ازدحام پرندگان^۷ [۹]، الگوریتم بهینه‌سازی خفاش^۸ [۱۰]، تکامل تفاضلی^۹ [۱۱]، الگوریتم جستجوی کلاغ^{۱۰} [۱۲]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۱} [۱۳] و غیره.

بر این اساس PSO یک استراتژی ساده و قدرتمند بر اساس رفتار تعاملی و اجتماعی که مشابه با رفتار ازدحام ذرات در گروه پرندگان و ماهی‌ها برای هدایت ذرات در جستجوی پاسخ‌های بهینه‌ی سراسری^{۱۲} می‌باشد. از آنجایی که PSO به سادگی پیاده‌سازی می‌شود، در سال‌های اخیر پیشرفت سریعی داشته است. متأسفانه، در حالی که الگوریتم PSO می‌تواند به سرعت در مراحل اولیه همگام شود ولی به دلیل این که ذرات به سادگی تحت تاثیر بهترین ذره و بهترین موقعیت شخصی خود قرار می‌گیرند ممکن است در طی تکرارها با کاهش تنوع مواجه شود و در بهینه محلی^{۱۳} به دام بیفتد. همچنین PSO دارای یک مسئله‌ی همگرایی زود هنگام است که در مسائل بهینه‌سازی پیچیده مشاهده می‌شود [۱۴، ۱۵].

الگوریتم DE به دلیل آن که همگرایی خوبی داشته در بسیاری از زمینه‌ها و موارد کاربردی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی الگوریتم DE نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی آن است که ماهیت متفاوت پارامترهای کنترلی و استراتژی‌های جهش الگوریتم DE احتمال یافتن نقطه بهینه برای مسائل بهینه‌سازی را افزایش می‌دهد و سبب فرار آن از بهینه‌ی محلی می‌شود. ولی بازدهی الگوریتم DE تا حد زیادی به استراتژی تولید بردار آزمایش و مقادیر پارامتر به کار رفته بستگی دارد [۱۴، ۱۶]. انتخاب نامناسب استراتژی‌ها و پارامترها می‌تواند منجر به همگرایی زود هنگام شود، که به طور گسترده در [۱۷] نشان داده شده است.

با وجود آن که الگوریتم‌های PSO و DE به نحو کارآمدی برای محدوده‌ی گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما هر دوی آن‌ها مشکلات خاصی دارند که عملکرد الگوریتم را کاهش می‌دهد. همچنین موفقیت این الگوریتم‌ها تا حد زیادی به موازنه‌ی دقیق دو هدف متناقض اکتشاف^{۱۴} (متنوع‌سازی) و استخراج^{۱۵} (متمرکزسازی) بستگی دارد [۱۸]. این مقاله یک روش جدید برای بهبود الگوریتم‌های PSO و DE برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌کند. ایده اصلی، استفاده از مدل ائتلافی^{۱۶} یا همکاری^{۱۷} در تئوری بازی‌ها است که با استفاده نظریه چانه‌زنی نش الگوریتم‌های PSO و DE به عنوان دو بازیکن در فضای جستجو با هم بازی می‌کنند تا بهترین تعادل در بازی و یا بهترین راه حل در فضا جستجو بدست آورند. در واقع در هر دوره و بعد از تکرارهای مشخص دو الگوریتم PSO و DE وارد محیط بازی می‌شوند و با هم بازی همکارانه را انجام

¹ Meta-heuristic

² Chicken swarm optimization

³ Sine cosine algorithm

⁴ Grey wolf optimizer

⁵ Fruit fly optimization algorithm

⁶ Cat swarm optimization

⁷ Bird Swarm Algorithm

⁸ Bat algorithm

⁹ Differential evolution

¹⁰ Crow search algorithm

¹¹ Particle Swarm Optimization

¹² Global optimum

¹³ Local Optimum

¹⁴ Exploration

¹⁵ Exploitation

¹⁶ Coalition

¹⁷ Cooperation

می دهند. سود حاصل از این بازی بین دو الگوریتم جابه جا می شود. هدف از این مقاله، مهار نقاط قدرتمند الگوریتم ها برای حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج و توانایی اجتناب از یک بهینه محلی است.

بخش های باقیمانده مقاله به صورت زیر سازماندهی می شود. مرور کارهای مرتبط در بخش ۲ متمرکز شده است. بصورت خلاصه الگوریتم های DE و PSO و نظریه چانه زنی نش در بخش ۳ توصیف می شوند. در بخش ۴، ما بر الگوریتم پیشنهادی و ساختار اصلی آن تاکید داریم. نتایج تجربی شبیه سازی توابع معیار در بخش ۵ ارائه می شوند. در نهایت، نکات نتیجه گیری در بخش ۶ نشان داده می شوند.

۲- کارهای مرتبط

در سال های اخیر تعدادی از محققان بر روی ترکیب الگوریتم های PSO و DE پژوهش هایی را به انجام رسانیده اند. که این پژوهش های انجام شده اهمیت ترکیب این الگوریتم ها را نشان می دهد. در این بخش به برخی از جدیدترین تحقیق های انجام شده مرتبط با ترکیب الگوریتم های PSO و DE با مسائل و کاربردهای مختلف می پردازیم.

در مقاله [۱۹] Huang و همکارانش یک الگوریتم PSO جدید و مؤثر به نام ACVDEPS^۱ برای برنامه ریزی مسیر پهباد پیشنهاد دادند. در الگوریتم پیشنهادی برای راحتی جستجوی مسیر، سرعت ذره به بردار استوانه آن تبدیل می شود و پارامترهای الگوریتم به طور خودکار توسط زمان و مقادیر تابع تناسب ذرات انتخاب می شوند و از عملگرهای تکامل تفاضلی برای کاهش احتمال سقوط به بهینه محلی و تسریع سرعت همگرایی الگوریتم استفاده می شود. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که عملکرد بهینه سازی ACVDEPSO از سایر روش های مقایسه بهتر است و یک مسیر با کیفیت بالاتر برای پهباد در محیط های پیچیده سه بعدی ایجاد می کند.

در مقاله [۲۰] Gao و همکارانش یک الگوریتم حفاظت از حریم خصوصی تفاضلی مبتنی بر الگوریتم های تکامل تفاضلی و بهینه سازی ازدحام ذرات پیشنهاد می کنند. الگوریتم تکامل تفاضلی پارامترهای انتخاب، برش و جهش را بر روی نرخ یادگیری انجام می دهد و آن را به راه حل بهینه جهانی نزدیک می کند و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بدون تغییر پارامترها و ساختار گرادینان، پارامترها را با استفاده از ویژگی های انتشار شبکه، بهینه می کند که تأثیر نویز بر دقت را کاهش می دهد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم هایی که دارای حریم خصوصی هستند قوی تر، دقت بهتر و راندمان محاسباتی بالاتر دارد.

در مقاله [۲۱] Wang و همکارانش یک الگوریتم تکامل دیفرانسیل بر اساس PSO به نام DEPSO برای بهبود عملکرد بهینه سازی DE پیشنهاد کرده اند. رویکرد پیشنهادی آن ها از استراتژی جهش بهبود یافته و جهش PSO استفاده می کند. در نتیجه در مرحله اول تنوع جمعیت به خوبی حفظ می شود و سرعت همگرایی بهتر در مرحله بعدی تکامل حاصل می شود. نتایج تجربی نشان می دهد که عملکرد کلی DEPSO از سایر الگوریتم های مقایسه شده بهتر است.

آقایان Fan و Lee در [۲۲] ترکیبی از الگوریتم های PSO و DE بر اساس Spark برای مشکلات بهینه سازی جهانی در مقیاس بزرگ^۲ (LSGO) معرفی کرده اند. الگوریتم پیشنهادی بر بستر محاسبات ابری متکی است و از مدل های مجموعه داده های توزیع شده انعطاف پذیر^۳ (RDD) و جزیره ای^۴ برای موازی سازی^۵ استفاده می کند. جمعیت جهانی به چندین زیر مجموعه تقسیم می شود و هر زیر گروه به طور مستقل تکامل می یابد و برای ارتباط بین زیر مجموعه ها، در فاصله بین تکرارهای خاص، افراد مهاجرت می کنند. نتایج نشان می دهد که الگوریتم سریع و عملکردی بالا و از مقیاس پذیری برخوردار است.

در مقاله [۲۳] Liu و همکارانش یک الگوریتم اصلاح شده PSO به نام MPSO^۶ برای بهبود عملکرد PSO، در مسائل پیچیده بهینه سازی معرفی کردند. در رویکرد پیشنهادی آنها یک وزن اینرسی غیر خطی مبتنی بر هرج و مرج ارائه شده است تا با بزرگ و کوچک کردن مرحله جستجو، تعادل بین اکتشاف و استخراج بهتر شود. علاوه بر این مکانیزم جایگزین نهایی و استراتژی

¹ Adaptive cylinder vector differential evolution particle swarm optimization

² Large-scale global optimization

³ Resilient distributed datasets

⁴ Island

⁵ Island

⁶ Modified particle swarm optimization

بروزرسانی موقعیت سازگار برای افزایش توانایی PSO و استراتژی های یادگیری اصلی و تصادفی برای جلوگیری از همگرایی زودرس طراحی شده اند. نتایج تجربی و تحلیل آماری نشان می دهد که MPSO نسبت به سایر انواع PSO بهترین عملکرد را در بین انواع مختلف کسب کرده است.

در مقاله [۲۴] Wang و همکارانش روش EPSODE^۱ بر اساس ترکیب الگوریتم های PSO و DE و روش جهش متناوب برای حل انواع مختلف تابع معرفی کردند. الگوریتم DE تغییر یافته، اصل برنامه و الگوریتم PSO زیر برنامه روش پیشنهادی را تشکیل می دهد. استراتژی بروز رسانی سرعت از PSO با روش جهش تغییر یافته ترکیب شده است و کلید اصلی الگوریتم پیشنهادی می باشد و می تواند از همگرایی زودرس جلوگیری کند و قابلیت جستجو را بهبود بخشد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که الگوریتم EPSODE از الگوریتم های ترکیبی دیگر فراتر است.

در مقاله [۲۵] Lin و همکارانش یک الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات تکامل دیفرانسیل ناهمگن^۲ (HeDE-PSO) برای توسعه الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) با کارایی بالا و کاربرد گسترده پیشنهاد کردند. HeDE-PSO از دو جهش تکاملی تفاضلی (DE) برای ساختن ویژگی های مختلف نمونه های یادگیری برای PSO استفاده می کند، یک جهش DE برای افزایش اکتشاف و دیگری برای افزایش بهره برداری است. همچنین از جستجوی محلی در مراحل آخر بهینه سازی برای بهبود بیشتر دقت جستجو استفاده می شود.

در مقاله [۲۶] Tang و همکارانش یک الگوریتم ترکیبی بر اساس PSO و DE ارائه دادند. آنها در ابتدا از یک PSO خود تطبیق پذیر جدید برای هدایت حرکت ذرات و از DE خود تطبیق پذیر تغییر یافته برای تحریک کردن بهترین موقعیت شخصی ذرات در الگوریتم پیشنهادی استفاده کردند و تلاش نمودند تعادل خوبی بین جستجو سراسری و محلی ایجاد کنند. آزمایش های عددی نشان می دهند که الگوریتم پیشنهادی سریعتر از سایر الگوریتم های مقایسه ای به مقدار بهینه یا نزدیک بهینه می رسد.

در مقاله [۲۷] Minh Dao و همکارانش یک روش ترکیبی بهینه سازی ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی^۳ (CPSO-DE) در سیستم های قدرت پیشنهاد کردند. در روش پیشنهادی برای مسئله^۴ (TDOPF)، ابتدا از الگوریتم PSO با ضریب انقباض که توسط روش گرادیان هدایت می شود، برای کشف فضای جستجوی جهانی مسئله استفاده می شود و سپس از الگوریتم DE برای بهره برداری از فضای جستجوی محلی مسئله برای تضمین یافتن راه حل تقریباً بهینه استفاده می شود.

در مقاله [۲۸]، Liu و Du الگوریتم PSO را با استفاده از ترکیب DE تغییر یافته و یک آرشو خارجی بهینه بهبود دادند و PSOJADE^۵ نام گذاری کردند که توانایی جستجو سراسری و محلی را متعادل میکند. عملگر چند متقاطع^۶ و JADE در روش پیشنهادی برای تقویت اکتشاف جهانی و بهره برداری محلی در PSO با هم ترکیب شدند. نتایج آزمایش نشان می دهد که PSOJADE بهترین عملکرد را در بین انواع مختلف کسب کرده است.

۳- تعاریف پایه

در این بخش، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و نظریه چانه زنی نش به طور جداگانه معرفی می شوند.

۳-۱- بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم PSO [۱۳] در قیاس با نمونه های محاسبات تکاملی، یک اجتماع تشکیل شده از تعدادی ذرات می باشد که هر ذره نشان دهنده یک راه حل بالقوه است. به عبارت ساده تر، ذرات در یک فضای جستجوی چند بعدی حرکت می کنند که موقعیت هر ذره، به وسیله ی دانش خود ذره و دانش همسایگانش تنظیم می شود. فرض می شود در یک فضای جستجوی D - بعدی x_i و

^۱ Ensemble particle swarm optimization differential evolution

^۲ Heterogeneous differential evolution particle swarm optimization

^۳ combined particle swarm optimization and differential evolution

^۴ Temperature Dependent Optimal Power Flow

^۵ Particle Swarm Optimization with JADE

^۶ multi-crossover

V_i موقعیت و سرعت ذره i ام به صورت $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{iD})$ و $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{iD})$ توصیف می شود. برای به روز رسانی موقعیت هر کدام از ذرات از رابطه های زیر استفاده می شود.

$$V_i^{(t+1)} = wV_i^{(t)} + c_1r_1(p_{i,best} - X_i^{(t)}) + c_2r_2(p_{g,best} - X_i^{(t)}) \quad (1)$$

$$X_i^{(t+1)} = V_i^{(t+1)} + X_i^{(t)} \quad (2)$$

بهترین موقعیتی که ذره i ام پیدا کرده $P_{i,best}$ و بهترین موقعیتی که بهترین ذره در بین کل ذرات پیدا کرده $P_{g,best}$ تعیین می شود. w ضریب وزنی اینرسی^۱ که نشان دهنده میزان تأثیر بردار سرعت تکرار قبل $V_i^{(t)}$ بر روی بردار سرعت در تکرار فعلی $V_i^{(t+1)}$ است. C_1 و C_2 ضریب ثابت آموزش (حرکت در مسیر بهترین تجربه شخصی و بهترین ذره یافت شده در بین کل جمعیت) r_1 و r_2 دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $(0,1)$ می باشد. در زمینه حل مسائل بهینه سازی تحقیقات فراوانی مبتنی بر PSO صورت گرفته که باعث بهبود همگرایی PSO و افزایش تنوع پراکندگی اجتماع ذرات شده است [۲۹,۳۰] ولی تحلیل و بررسی همه ی آن ها در این قسمت نمی گنجد. بر اساس تلاش آن ها در این مقاله راه حل جدیدی را ارائه می کنیم که ترکیبی از الگوریتم های PSO و DE می باشد.

۳-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)

الگوریتم DE [۱۱]، یک روش بهینه سازی که مبتنی بر جمعیت بنا شده و در اصول پایه تولید جمعیت اولیه، ادامه تکامل نسل های آینده و نگاه به ارزش دهی تابع ارزیاب با الگوریتم ژنتیک مطابقت دارد. تفاوت اصلی این الگوریتم با دیگر الگوریتم های تکاملی در انتخاب جهت و فاصله جمعیت فعلی از دیگر عضوهای جمعیت به منظور هدایت فرایند جستجو به سوی یک جهت مطلوب می باشد. این الگوریتم ابتدا از عملگر جهش جهت تولید بردار جهش^۲ و سپس از عملگر برش برای تولید بردار آزمایشی^۳ استفاده می کند. عملگر جهش یک بردار جهش برای هر راه حل (بردار هدف^۴) اصلی با جهش دادن یک بردار پایه^۵ و یک تفاضل وزن دار بین دیگر والد ها که به صورت تصادفی انتخاب می شود تولید می کند. بردار جهش $\vec{u}(t)$ برای والد i ام بصورت زیر تولید می شود:

$$u_i = x_{i_1} + F(x_{i_2} - x_{i_3}) \quad (3)$$

در رابطه بالا x_{i_1} بردار پایه و x_{i_2} و x_{i_3} دو والد دیگر از جمعیت که بصورت تصادفی انتخاب شده اند به نحوی که $i \neq i_1 \neq i_2 \neq i_3$ می باشد. F یک ضریب مقیاس است و میزان تغییر تفاضل را بین جمعیت کنترل می کند. روش های متنوعی نظیر انتخاب تصادفی و انتخاب بهترین راه حل جهت تولید بردار پایه x_{i_1} وجود دارد که برای تولید بردار جهش u_i از آن استفاده می شود. در استراتژی برش یک ترکیب گسسته از بردار جهش u_i و بردار هدف x_i ، برای تولید بردار آزمایش x'_i ارائه شده است که به صورت زیر بدست می آید:

$$x'_i = \begin{cases} u_i & \text{if } r_j \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad j = 1/2 \dots /D \quad (4)$$

جایی که $CR \in [0,1]$ به عنوان نرخ برش تعیین شده است، r_j یک عدد تصادفی یکنواخت در محدوده $[0,1]$ است، j_{rand} یک عدد صحیح تصادفی انتخاب شده در محدوده $[1,D]$ است. این اطمینان می دهد که بردار آزمایش x'_i می تواند حداقل یک عنصر از بردار جهش u_i بدست آورد، بنابراین از رکود تکاملی جلوگیری می کند.

۳-۳- نظریه چانه زنی نش

در بازی های همکارانه ممکن است بازیکنان برای برخورداری از منافع دو یا چند جانبه در بازی رقابتی عمل نکنند، بلکه برای بدست آوردن منافع بیشتر بر سر انتخاب برخی استراتژی ها توافق کنند. در این صورت به مجموعه تکی، دوتایی و یا چندتایی از بازیکنان اصطلاحاً ائتلاف گفته می شود. در این صورت بازیکن موقعی تن به همکاری می دهد که پیامد حاصل از توافق و

¹ Inertia

² Mutation vector

³ Trial vector

⁴ Target vector

⁵ Base vector

همکاری حداقل برابر پیامد مستقل و رقابتی عمل کردن در بازی باشد تا انگیزه برای حصول به همکاری و پیوستن به ائتلاف در بازیکن بوجود آید [۳۱].

نظریه چانه زنی یکی از اولین و مهم‌ترین نظریه در تئوری بازی‌های همکارانه است [۳۲]. در چانه‌زنی بر سر یک مسئله، دو طرف یا بیشتر با هم مذاکره می‌کنند تا به یک توافق و راه حل برسند و آنگاه بر اساس آن رفتار کنند.

مسئله چانه زنی از زوج (F, v) تشکیل شده است که در آن F مجموعه تخصیص‌های شدنی^۱ و زیرمجموعه‌ای بسته و محدب از R^2 است. $v = (v_1, v_2)$ نقطه عدم توافق^۲ نامیده می‌شود که پیامدهای دو بازیکن را در صورت شکست مذاکرات مشخص می‌کند. نقطه عدم توافق همواره به مجموعه شدنی F تعلق دارد. نش یک راه حل منحصر بفرد برای نظریه چانه زنی ارائه داد که بر پنج اصل بهینه‌گی پرتو^۳، عقلانیت فردی^۴، تغییر ناپذیری خطی^۵، استقلال از جایگزین‌های نامناسب^۶ و تقارن^۷ استوار است. قضیه ای که در ادامه می‌آید به معرفی این راه حل منحصر بفرد می‌پردازد.

قضیه (۱.۱): برای مسئله چانه زنی معین (F, v) ، تابع جواب یکتای $f(.,.)$ وجود دارد که اصول موضوع ۱ تا ۵ را برآورده می‌کند. این تابع جواب برای هر مسئله چانه زنی دونفره (F, v) در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$f(F, v) \in \arg \max \left\{ (x_1 - v_1)(x_2 - v_2) \right\},$$

$$(x_1, x_2) \in F,$$

$$x_1 \geq v_1, x_2 \geq v_2$$
(۵)

به طور کلی جواب نش یک وضعیت چانه زنی توافقی است که طی آن حاصل ضرب مطلوبیت افراد بیشینه می‌شود و در آن سعی می‌شود تا حد امکان سود هر دو بازیکن افزایش یابد.

۴- الگوریتم پیشنهادی

با وجود آن که الگوریتم‌های PSO و DE به نحو کارآمدی برای محدوده‌ی گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما هر دوی آن‌ها مشکلات خاصی دارند که عملکرد الگوریتم را کاهش می‌دهد. بر این اساس در روش پیشنهادی برای غلبه بر این مشکلات از ترکیب و همکاری دو الگوریتم PSO و DE استفاده می‌شود. به عبارتی در این مقاله یک ترکیب بازی بین PSO و DE برای بهبود جستجو پیشنهاد شده است و الگوریتم PSO به عنوان بازیکن اول و به نام GPSO و الگوریتم DE به عنوان بازیکن دوم و به نام GDE شناخته می‌شود. در واقع در هر دوره و بعد از تکرارهای مشخص دو الگوریتم GPSO و GDE وارد محیط بازی می‌شوند و با استفاده از نظریه چانه‌زنی نش با هم بازی همکارانه را انجام می‌دهند، تا بهترین تعادل در بازی و یا بهترین راه حل در فضای جستجو را بدست آورند. در چهارچوب الگوریتم‌های GPSO و GDE، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی برای حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج، همگرایی زود هنگام و توانایی اجتناب از یک بهینه محلی با هم همکاری می‌کنند.

هر همکاری بین بازیکنان باید هدف ماکزیمم کردن سود فردی را لحاظ کند. بر این اساس راه حل چانه‌زنی نش یک وضعیت چانه‌زنی توافقی است که طی آن حاصل ضرب مطلوبیت افراد بیشینه می‌شود. نکته قابل توجه راه حل چانه‌زنی نش بهینه پرتو بودن آن است. اصل بهینه پرتو ایجاب می‌کند که نباید هیچ تخصیص شدنی دیگری وجود داشته باشد که برای بازیکنان بهتر از جواب مسئله چانه‌زنی باشد. به عبارتی یک راه حل چانه‌زنی نش یک راه حل بهینه پرتو برای بازی‌های چانه‌زنی است. پس سود حاصل از چانه‌زنی نش با توجه به خاصیت بهینه پرتو بودن بهترین جوابی هست که برای هر دو الگوریتم GPSO و GDE بدست می‌آید. مراحل و جزئیات الگوریتم پیشنهادی در زیر توضیح داده شده است.

¹ Feasible allocation

² Disagreement point

³ Pareto Optimality

⁴ Individual rationality

⁵ Linear invariance

⁶ Independence of irrelevant alternatives

⁷ Symmetry

گام اول: در این مرحله، سائز جمعیت (P)، تعداد تکرار در هر دوره (N)، تعداد متغیر یا بعدهای مسئله (D) و کران بالا و پایین مسئله (LB, UB) مقداردهی اولیه می شود. مسئله به صورت یک مسئله بهینه سازی با تابع هدف $f(x)$ تعریف می شود. در روش پیشنهادی الگوریتم PSO به عنوان بازیکن اول و الگوریتم DE به عنوان بازیکن دوم در نظر گرفته شده است و جمعیت اولیه بصورت تصادفی در بازه (LB, UB) با سائز $(P * D)$ برای هر دو بازیکن مقداردهی می شود.

گام دوم: جمعیت ابتدایی هر کدام از بازیکنان بصورت مستقل با استفاده تابع هدف مورد ارزیابی قرار می گیرد. بعد از این که تمام راه حل ها در بازیکن اول و دوم مورد ارزیابی قرار گرفتند، بهترین راه حل در بازیکن اول و بازیکن دوم انتخاب می شود. این دو راه حل بهتر باهم مقایسه می شوند تا بهترین به عنوان نقطه عدم توافق (v_1, v_2) در دوره اول بازی انتخاب شوند. چون بازی برای هر دو بازیکن شرایط یکسانی دارد و متقارن است، پس مقدار $v_1 = v_2$ در دوره اول باهم برابر هستند.

گام سوم: در این مرحله برای بازیکن اول بصورت کاملاً مستقل در هر تکرار معادله سرعت و موقعیت هر کدام از ذرات بروز رسانی می شود و سپس موقعیت هر ذره با استفاده از تابع هدف مورد ارزیابی قرار می گیرد و بهترین راه حل به عنوان $P_{g/best}$ انتخاب می شود و برای هر ذره $P_{i/best}$ بروز رسانی می شود. این روند N بار برای بازیکن اول تکرار می شود و در هر تکرار بهترین راه حل و مقدار ارزیابی آن در مجموعه M_1 مربوط به بازیکن اول ذخیره می شود یعنی به تعداد تکرار N راه حل نخبه در مجموعه M_1 ذخیره می شود.

گام چهارم: در این مرحله برای بازیکن دوم بصورت کاملاً مستقل در هر تکرار عملگر جهش بر روی هر فرد از جمعیت اعمال می شود و جمعیتی از بردارهای جهشی بوجود می آید. سپس عملگر برش بر روی بردار جهش و بردار هدف برای تولید بردار آزمایش اعمال می شود. بردار آزمایش با استفاده از تابع هدف مورد ارزیابی قرار می گیرد و جمعیت نسل بعد بروز رسانی می شود. این روند N بار برای بازیکن دوم تکرار می شود و در هر بار تکرار بهترین راه حل و مقدار ارزیابی آن در مجموعه M_2 مربوط به بازیکن دوم ذخیره می شود یعنی به تعداد تکرار N راه حل نخبه در مجموعه M_2 ذخیره می شود.

گام پنجم: شرط توافق بررسی می شود و اگر تعداد تکرار کوچکتر از N باشد به گام سوم بازگشت داده شود. در غیر این صورت به گام ششم برود.

گام ششم: در این مرحله از مجموعه مقدار ارزیابی راه حل های نخبه که در گام سوم و چهارم برای بازیکن های اول و دوم بدست آمده، مجموعه ضرب دکارتی $M_1 * M_2$ ایجاد و مجموعه شدنی F نامیده می شود.

$$F = M_1 * M_2 = \{(x_1, x_2) | x_1 \in M_1 \text{ and } x_2 \in M_2\} \quad (6)$$

گام هفتم: در این مرحله هر دو بازیکن وارد محیط بازی می شوند و قضیه چانه زنی نش بر روی مجموعه شدنی F و نقطه عدم توافق (v_1, v_2) اعمال می شود تا جواب یکتای (x_1^*, x_2^*) به عنوان بهترین جواب انتخاب شود که نتیجه همکاری بین دوتا بازیکن است.

گام هشتم: در مرحله قبل جواب یکتای (x_1^*, x_2^*) به عنوان بهترین جواب انتخاب می شود، x_1^* به عنوان بهترین جواب برای بازیکن اول و x_2^* به عنوان بهترین جواب برای بازیکن دوم است. در این مرحله بهترین جواب بازیکن اول به عنوان نقطه عدم توافق بازیکن اول یعنی $v_1 = x_2^*$ و بهترین جواب بازیکن دوم به عنوان نقطه عدم توافق بازیکن دوم یعنی $v_2 = x_1^*$ انتخاب می شود. نقطه (v_1, v_2) به عنوان نقطه عدم توافق برای دوره بعدی مقدار گذاری شده است.

گام نهم: در این مرحله اگر شرایط توافق مهیا شده باشد، آنگاه x_1^* به عنوان بهترین راه حل برای الگوریتم GPSO و x_2^* به عنوان بهترین راه حل برای الگوریتم GDE، انتخاب می شود و در غیر این صورت با توجه به روابط γ و λ و $P_{g,best} = x_2^*$ و $\overrightarrow{x_{11}}(t) = x_1^*$ و تعداد تکرار $iter=0$ مقدار گذاری می شود و به گام سوم برود و به بازی ادامه دهد.

$$u_i = x_i^* + F(x_{i2} - x_{i3}) \quad (7)$$

$$v_i^{(t+1)} = wv_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_{i,best} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (x_2^* - x_i^{(t)}) \quad (8)$$

با ذکر یک نکته که در محیط بازی برای بدست آوردن جواب در قضیه چانه زنی نش از مقدار ارزیابی راه حل ها در مجموعه F و نقطه عدم توافق استفاده می شود ولی برای جابه جایی سود حاصل از بازی در بین بازیکنان از خود راه حل ها استفاده می شود. مراحل و جزئیات الگوریتم پیشنهادی در زیر توضیح داده شده است. بطور کلی در روش پیشنهادی شرط قضیه چانه زنی نش به حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج در روش پیشنهادی کمک می کند. در واقع با انتخاب (x_1^*, x_2^*) از مجموعه شدنی

F باعث اکتشاف و جستجوی کامل فضای مسئله برای یک راه حل بهینه می‌شود و انتخاب نقطه عدم توافق (v_1, v_2) باعث استخراج برای یافتن راه حل های بهتر می‌شود. تبادل سود حاصل از بازی در بین الگوریتم ها باعث اکتشاف نواحی جدید در فضای جستجو و افزایش تنوع و اجتناب از بهینه محلی می‌شود. در شکل ۱ شبه کد الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.

۵-آزمایش ها و تحلیل ها

در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE با آزمایش بر روی توابع معیار و مقایسه عملکرد آن با الگوریتم های ترکیبی که اخیرا پیشنهاد شده بررسی می‌شود. بنابراین مجموعه توابع معیار مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل و تنظیم پارامتر های کنترلی در بخش ۵-۱ توضیح داده شده و نتایج آزمایشی و مقایسه با الگوریتم های دیگر در بخش ۵-۲ ارائه شده است.

۵-۱- توابع معیار و الگوریتم ها

برای ارزیابی توانایی الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE، توابع معیار CEC2005 [۳۳] در آزمایش ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این توابع به چهار دسته توابع یک حالتی^۱ ($F1-F5$)، توابع چند حالتی پایه^۲ ($F6-F12$)، توابع تعمیم یافته^۳ ($F13-F14$) و توابع ساختار هیبرید^۴ ($F15-F25$) تقسیم می‌شوند.

در دسته اول توابع یک حالتی فقط یک بهینه جهانی دارند، که هدف آنها ارزیابی توانایی استخراج و همگرایی الگوریتم است. در دسته دوم توابع چند حالتی پایه دارای بهینه های محلی مختلفی هستند، که برای آزمایش توانایی بهینه سازی جهانی و توانایی اجتناب از بهینه محلی مفید است. در دسته سوم توابع تعمیم یافته که تبدیل یافته یا دوران یافته توابع یک حالتی و توابع چند حالتی پایه می‌باشد و خصوصیات آنها را دارا می‌باشد. در دسته چهارم توابع ساختار هیبرید از توابع تبدیل یافته، دوران یافته، بسط یافته و پیچیده تشکیل می‌شوند. این توابع خصوصیات توابع قدیمی مثل منظم بودن، یکنواختی و تقارن را نقض می‌کنند. با تبدیلات پیچیده مختلف، مدل تابع به نحو بهتری با مسائل دنیای واقعی تطبیق پیدا می‌کند. آزمایش با آن می‌تواند بازدهی الگوریتم را در مسائل کاربردی بهتر شبیه سازی کند. جزئیات بیشتر درباره توابع معیار در [۳۳] ارائه شده اند.

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، از دو الگوریتم کلاسیک PSO و DE و الگوریتم های ترکیبی DEPSO [۲۲]، EPSODE [۲۴]، PSOJADE [۲۸] و MPJO [۲۳] که اخیرا پیشنهاد شده استفاده شده است. دو الگوریتم اول به عنوان الگوریتم های اصلی بوده و در الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول ۱: پارامترهای شبیه سازی

Table 1. Simulation parameter

Parameter	Value
D: Dimension	10,30,50
P: Population size	D*6
MaxIter: Maximum number of iterations	10000
MaxFES: Maximum number of function evaluations	200000
N: The number of iteration	10,20,30
W: Inertial weight	0.7298
c1=c2: Constant training coefficients	1.49445
F: Scaling factor	0.5
CR: Crossover rate	0.9
DE Strategy	DE/rand/1/bin

¹ Unimodal functions

² basic multimodal functions

³ Expanded functions

⁴ Hybrid composition functions

Algorithm 1: GPSO/GDE

Initialize the parameters: P, N, D, (LB, UB), MaxIter, MaxFES, w, c_1 , c_2 , F and CR;
 /* GPSO: PSO algorithm as the first player */
 /* GDE: DE algorithm as the second player */
 POP₁: The initial population GPSO with size (P * D) is randomly initialized in the range (LB, UB);
 POP₂: The initial population GDE with size (P * D) is randomly initialized in the range (LB, UB);
 Evaluate the fitness of the POP₁ and obtain $p_{i,best}$ and $p_{g,best}$;
 Evaluate the fitness of the POP₂ and obtain the best solution s_{best} ;
 FES=FES+2P;
 If ($p_{g,best}$) is better than (s_{best})
 $v_1 = p_{g,best}$; $v_2 = p_{g,best}$;
 Else
 $v_1 = s_{best}$; $v_2 = s_{best}$;
 End If
 It=0;
 While It<= MaxIter or FES<= MaxFES
 /* GPSO algorithm */
 For k=1 to N do
 For i=1 to P do /* for each particle in the POP₁ */
 Update particle velocity using Eq. (1);
 Update particle position using Eq. (8);
 Evaluate the fitness function of the new particle;
 FES=FES+1;
 Update $p_{i,best}$ and $p_{g,best}$;
 End For
 $M_1 = \min(pop_1)$; /* choose the best particle in POP₁ */
 End For
 /* GDE algorithm */
 For k=1 to N do
 For i=1 to P do /* for each particle in the POP₂ */
 Select uniform randomly $i \neq i_1 \neq i_2 \neq i_3$;
 Generate mutation vector u_i using Eq. (7);
 Generate the trial vector x'_i using Eq. (4);
 Evaluate the fitness function of the trial vector x'_i ;
 FES=FES+1;
 If $f(x'_i)$ is better than $f(x_i)$
 $x_i = x'_i$;
 End If;
 End For;
 $M_2 = \min(pop_2)$ /* choose the best individual in POP₂ */
 End For;
 Cooperative by Algorithm 2;
 It=It+1;
 End while;
 x_1^* is selected as the best value for the GPSO algorithm and x_2^* is selected as the best value for the GDE

Algorithm 2: cooperative

Input: M_1, M_2, v_1, v_2 ;
 /* **Game environment** */
 $F = M_1 * M_2$; /* F is equal to the Cartesian product of the evaluation values of the best solutions (M_1 and M_2) */
 For each $(x_1, x_2) \in F$ do
 $(x_1^*, x_2^*) = \text{argmax}((x_1 - v_1)(x_2 - v_2))$
 End For
 If v_1 is dominated x_1^* and v_2 is dominated x_2^* /*Condition of Nash bargaining theory*/
 $x_1^* = v_1$; $x_2^* = v_2$;
 End if
 $p_{g,best} = x_2^*$; $x_{i_1} = x_1^*$;
 $v_1 = x_2^*$; $v_2 = x_1^*$;
Output: $p_{g,best}, x_{i_1}, v_1, v_2$;

شکل ۱: شبه کد الگوریتم GPSO/GDE

Figure 1. Flowchart of the GPSO/GDE algorithm

جدول ۱ لیست کاملی از پارامترهای شبیه‌سازی را ارائه کرده است. این پارامترها شامل پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE و پارامترهای بعد، اندازه جمعیت، ماکزیمم تعداد تکرار و ماکزیمم تعداد ارزیابی تابع می‌باشد که برای شبیه‌سازی در همه الگوریتم‌های مورد مقایسه به طور یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین برای مقایسه‌ی بهتر، همه‌ی پارامترهای الگوریتم‌های مقایسه شده برابر با مقادیر توصیه شده در مقالات اصلی در نظر گرفته می‌شوند. برای مقایسه عادلانه تفاوت بین الگوریتم‌ها، همه‌ی آزمایش‌ها ۱۰ بار به صورت مستقل اجرا می‌شوند. در تمام آزمایش‌ها، معیار متوقف کردن آزمایش این است که تعداد ارزیابی تابع (FES) کمتر از حداکثر ارزیابی تابع (MaxFES) و یا تعداد تکرار اجرا کمتر از ماکزیمم تعداد تکرار (MaxIter) باشد. مقدار میانگین و انحراف استاندارد خطای تابع $f(x) - f(x^*)$ ، برای اندازه‌گیری عملکرد الگوریتم‌ها در نظر گرفته شده که در آن x و x^* به ترتیب بهترین راه حل ارائه شده توسط الگوریتم و مقدار مطلوب تابع معیار بوده است.

۵-۲- نتایج تجربی و بحث

در این بخش ابتدا حساسیت پارامتر N در روش پیشنهادی را تجزیه و تحلیل کرده و سپس به بررسی و مقایسه الگوریتم‌های PSO و DE کلاسیک با الگوریتم‌های GPSO و GDE در روش پیشنهادی که به عنوان دو بازیکن در فضای جستجو هستند، پرداخته می‌شود و در نهایت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم‌های DEPSO [۲۲]، EPSODE [۲۴]، PSJOADE [۲۸] و MPPO [۲۳] مورد مقایسه قرار می‌دهیم.

در الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE، پارامتر N به ازای تکرارهای مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ مقدارگذاری شده و عملکرد هر کدام بر روی ۲۵ تابع شناخته شده F1-F25 و با ابعاد مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. برای بعد ۱۰، میانگین خطای توابع F1، F5، F7 و F8 به ازای N های مختلف باهم برابر بوده و برای بقیه توابع به طور متوسط $N=10$ و $N=30$ نتیجه بهتری را نسبت به $N=20$ بدست آورده است. برای بعد ۳۰، مقدار F7، F8، F18، F20، F23 و F24 باهم برابر بوده و برای بقیه توابع به طور متوسط $N=10$ و $N=20$ نتیجه بهتری را نسبت به $N=30$ بدست آورده است. برای بعد ۵۰ فقط نتیجه F1، F7 و F8 باهم برابر بوده و برای بقیه توابع به طور متوسط $N=10$ عملکرد بهتری را نسبت به $N=20$ و $N=30$ بدست آورده است. بدین ترتیب، در آزمایش‌های زیر برای الگوریتم پیشنهادی پارامتر $N=10$ در نظر گرفته می‌شود. زیرا در چنین شرایطی به ازای تعداد تکرار کمتر، الگوریتم‌های GPSO و GDE به تعداد دفعات بیشتری در طول اجرای روش پیشنهادی وارد محیط بازی می‌شوند و باهم به چانه زنی می‌پردازند.

جدول ۳، میانگین خطا و انحراف استاندارد الگوریتم‌های PSO و DE کلاسیک و الگوریتم‌های GPSO و GDE در روش پیشنهادی را برای ۲۵ تابع شناخته شده F1-F25 و با ابعاد مختلف نشان می‌دهد. برای مقایسه الگوریتم‌ها در بعد ۱۰، فقط تابع‌های F5، F10، F13 و F15 مقدار میانگین الگوریتم DE بهتر از GDE بوده و برای تابع‌های F16، F18، F22، F23 و F25 مقدار میانگین PSO بهتر از GPSO بوده و در بقیه توابع GPSO و GDE عملکرد بهتری نسبت به PSO و DE دارند. در بعد ۳۰، الگوریتم DE برای تابع‌های F1، F5، F12 و F17 عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم GDE دارد و برای تابع‌های F14، F19، F21، F22 و F25 الگوریتم PSO نتیجه بهتری دارد و در حالی که در بقیه توابع همواره الگوریتم‌های GPSO و GDE بهترین بازدهی را دارند. برای بعد ۵۰، الگوریتم‌های GPSO و GDE تقریباً برای همه توابع بهترین عملکرد را دارند و در حالی که فقط الگوریتم DE برای تابع F21 و الگوریتم PSO برای توابع F7، F22 و F25 عملکرد بهتری داشتند.

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳، الگوریتم‌های GPSO و GDE قدرتمندتر و بهتر از مدل کلاسیک شان در توانایی جستجو برای یافتن راه حل بهینه سراسری و افزایش ابعاد است، زیرا در محیط بازی، چانه زنی نش سعی می‌کند تا حد امکان سود هر دو الگوریتم را افزایش دهد و سود حاصل از این چانه زنی با توجه به خاصیت بهینه پرتو بودن بهترین جوابی هست که برای هر دو الگوریتم بدست می‌آید. شکل ۲ نمودار همگرایی مقدار میانگین خطای الگوریتم‌های PSO، DE، GPSO و GDE برای برخی توابع معیار با بعد ۵۰ را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نتایج آزمایشات روی پارامتر N با مقادیر مختلف

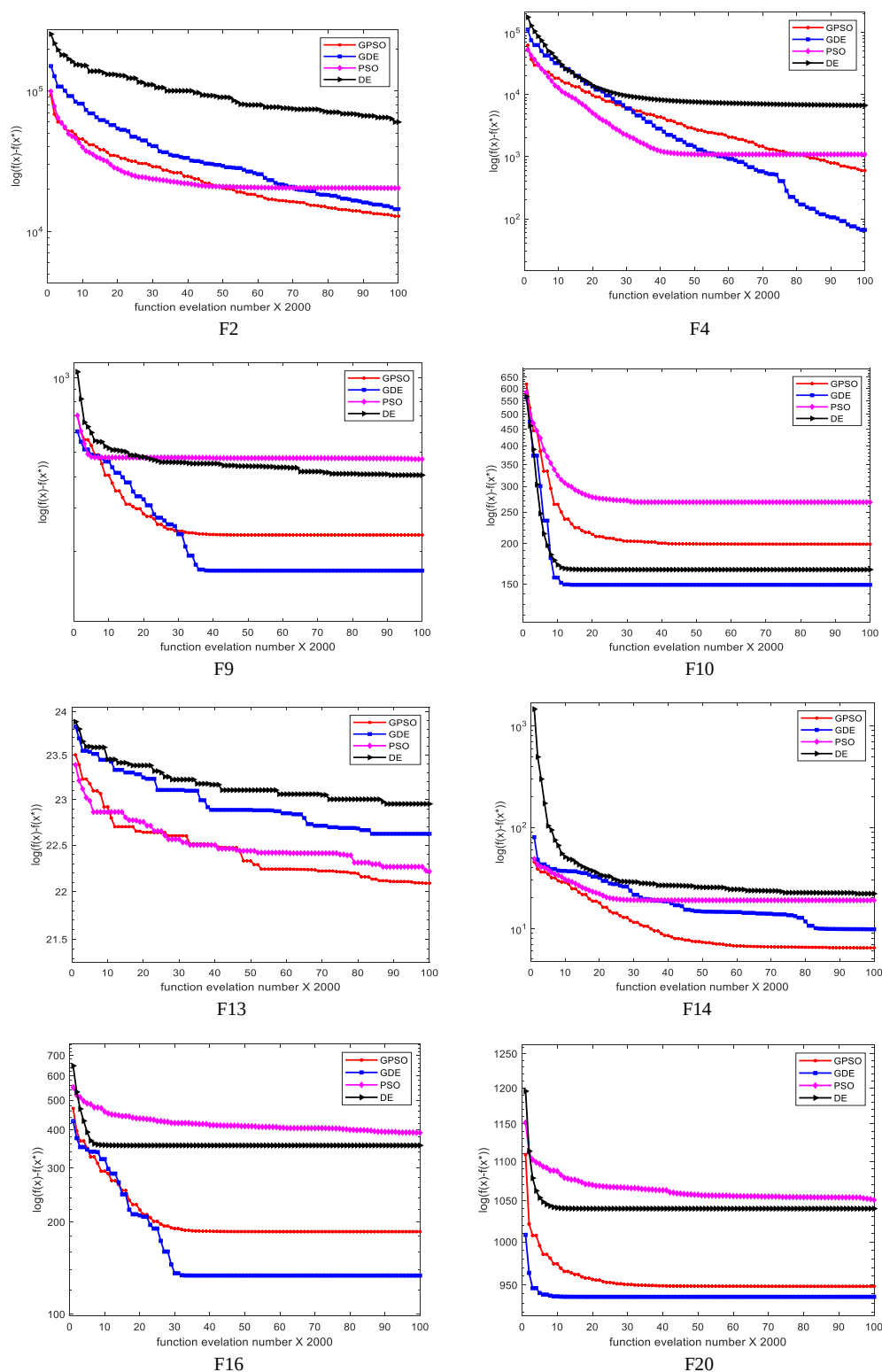
Table 2. The results of experiments on parameter N with different values

Fi	D	Mean			SD			Fi	D	Mean			SD		
		n=10	n=20	n=30	n=10	n=20	n=30			n=10	n=20	n=30	n=10	n=20	n=30
F1	10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	F14	10	2.82E+00	2.44E+00	2.45E+00	9.59E-02	1.26E-01	2.54E-01
	30	3.79E-14	0.00E+00	1.89E-14	3.28E-14	0.00E+00	3.28E-14		30	1.29E+01	1.27E+01	1.27E+01	1.29E-01	1.41E-01	6.56E-01
	50	5.68E-14	5.68E-14	5.68E-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		50	2.28E+01	2.21E+01	2.21E+01	1.52E-01	2.33E-01	5.81E-01
F2	10	0.00E+00	1.89E-14	0.00E+00	0.00E+00	3.28E-14	0.00E+00	F15	10	2.16E+02	1.73E+02	5.60E+01	1.76E+02	1.96E+02	4.91E+01
	30	5.26E-08	5.67E-09	9.59E-10	2.31E-08	2.62E-09	1.23E-09		30	3.33E+02	3.00E+02	3.00E+02	1.15E+02	1.00E+02	1.00E+02
	50	1.35E+01	8.35E+00	6.18E+00	9.33E+00	6.76E+00	4.86E+00		50	3.07E+02	3.15E+02	4.05E+02	9.65E+01	8.97E+01	2.25E+01
F3	10	2.58E+04	1.37E+04	2.03E+04	1.66E+04	1.40E+04	5.71E+03	F16	10	1.09E+02	1.05E+02	1.15E+02	9.88E+00	4.89E+00	2.89E+01
	30	7.13E+05	6.46E+05	8.83E+05	1.16E+05	1.49E+05	8.24E+05		30	2.90E+02	1.80E+02	2.38E+02	9.65E+01	5.05E+01	3.42E+01
	50	5.08E+06	6.19E+06	5.26E+06	2.13E+06	2.37E+06	1.59E+06		50	2.57E+02	3.02E+02	2.65E+02	7.78E+00	3.54E+01	4.00E+01
F4	10	0.00E+00	1.89E-14	0.00E+00	0.00E+00	3.28E-14	0.00E+00	F17	10	1.15E+02	1.19E+02	1.12E+02	4.83E+00	2.08E+01	1.06E+01
	30	3.67E-02	1.36E-01	1.49E-01	2.23E-02	1.09E-02	1.17E-01		30	2.16E+02	2.27E+02	2.58E+02	4.46E+00	1.76E+01	7.10E+01
	50	1.11E+03	1.39E+03	2.00E+03	5.03E+02	5.98E+02	8.22E+02		50	2.76E+02	3.08E+02	2.98E+02	4.76E+00	5.93E+01	4.58E+01
F5	10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	F18	10	4.67E+02	7.01E+02	4.67E+02	2.89E+02	1.71E+02	2.89E+02
	30	1.77E+03	2.28E+03	3.37E+03	9.05E+02	1.19E+03	2.30E+02		30	9.06E+02	9.05E+02	9.05E+02	1.08E-01	4.14E-01	9.28E-02
	50	4.89E+03	6.03E+03	6.56E+03	7.25E+02	7.56E+02	1.83E+03		50	9.29E+02	9.27E+02	9.25E+02	4.52E+00	4.09E+00	1.17E+00
F6	10	1.31E-01	1.84E-01	1.63E-01	1.35E-01	1.58E-01	1.57E-01	F19	10	6.33E+02	3.00E+02	8.00E+02	2.89E+02	0.00E+00	2.92E-05
	30	6.04E+01	4.25E+01	4.92E+01	2.84E+01	2.31E+01	2.30E+01		30	9.05E+02	8.77E+02	9.05E+02	4.40E-01	5.02E+01	6.54E-01
	50	7.91E+02	1.14E+03	1.20E+03	3.28E+02	2.95E+02	8.37E+01		50	9.30E+02	9.28E+02	9.25E+02	5.63E-01	7.24E+00	2.72E+00
F7	10	1.27E+03	1.27E+03	1.27E+03	0.00E+00	0.00E+00	1.14E-13	F20	10	6.33E+02	8.00E+02	3.00E+02	2.89E+02	6.99E-06	0.00E+00
	30	4.70E+03	4.70E+03	4.70E+03	5.41E-12	1.44E-12	6.43E-13		30	9.05E+02	9.05E+02	9.05E+02	2.07E-01	3.53E-01	6.78E-02
	50	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	4.81E-12	5.28E-09	2.59E-11		50	9.27E+02	9.23E+02	9.27E+02	7.50E-01	2.70E+00	2.87E+00
F8	10	2.03E+01	2.03E+01	2.03E+01	4.81E-02	5.71E-02	8.28E-02	F21	10	6.18E+02	8.09E+02	6.17E+02	3.90E+02	2.81E+02	3.90E+02
	30	2.09E+01	2.09E+01	2.09E+01	4.37E-02	9.88E-03	3.13E-02		30	5.00E+02	5.00E+02	6.00E+02	1.33E-13	1.33E-13	1.73E+02
	50	2.11E+01	2.11E+01	2.11E+01	5.03E-02	2.77E-02	1.24E-02		50	8.48E+02	9.50E+02	6.78E+02	3.02E+02	1.30E+02	3.09E+02
F9	10	6.63E+00	6.63E+00	5.98E+00	1.52E+00	1.49E+00	9.95E-01	F22	10	8.07E+02	7.53E+02	8.00E+02	9.60E+01	3.93E+00	6.15E+00
	30	3.88E+01	5.21E+01	3.88E+01	1.99E+00	9.46E+00	2.31E+01		30	9.73E+02	9.63E+02	9.40E+02	3.62E+01	6.87E+00	8.71E+00
	50	9.98E+01	1.07E+02	9.95E+01	2.21E+01	3.51E+01	9.49E+00		50	9.85E+02	1.00E+03	9.84E+02	8.80E+00	3.18E+01	8.71E+00
F10	10	2.00E+01	1.36E+01	1.76E+01	2.90E+00	2.50E+00	4.14E+00	F23	10	6.13E+02	7.24E+02	6.13E+02	9.34E+01	2.84E+02	9.34E+01
	30	5.81E+01	5.17E+01	7.65E+01	1.75E+01	2.25E+01	1.20E+01		30	5.34E+02	5.34E+02	5.34E+02	1.96E-12	4.00E-06	2.53E-07
	50	1.53E+02	1.22E+02	1.40E+02	1.26E+02	3.67E+01	2.27E+01		50	7.01E+02	7.18E+02	7.41E+02	2.70E+02	1.73E+02	2.45E+02
F11	10	3.85E+00	5.12E+00	4.83E+00	1.71E+00	1.08E+00	1.49E+00	F24	10	2.00E+02	3.00E+02	2.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	30	1.82E+01	2.12E+01	2.45E+01	3.13E+00	2.15E+00	3.18E+00		30	2.00E+02	2.00E+02	2.00E+02	1.81E-12	0.00E+00	0.00E+00
	50	3.66E+01	4.49E+01	4.31E+01	2.67E+00	4.24E+00	3.86E+00		50	4.89E+02	7.38E+02	1.01E+03	4.48E+02	4.61E+02	1.04E+01
F12	10	3.46E+02	1.52E+02	2.05E+02	3.58E+02	6.13E+01	1.49E+02	F25	10	8.18E+02	8.18E+02	8.17E+02	1.77E+00	9.67E-01	1.45E+00
	30	1.79E+05	1.50E+05	1.23E+05	6.71E+04	5.51E+04	8.85E+04		30	9.95E+02	9.99E+02	9.99E+02	6.82E+00	5.13E+00	1.23E+00
	50	1.08E+06	1.09E+06	1.15E+06	1.71E+05	1.85E+05	1.27E+05		50	1.23E+03	1.23E+03	1.24E+03	1.08E+01	4.03E+00	6.09E+00
F13	10	5.81E-01	5.82E-01	7.50E-01	1.07E-01	9.99E-02	3.78E-01								
	30	3.88E+00	3.86E+00	4.99E+00	1.10E+00	8.41E-01	1.89E+00								
	50	6.28E+00	7.37E+00	1.25E+01	1.12E+00	8.35E-01	3.47E+00								

جدول ۳: نتایج آزمایش‌های الگوریتم‌های کلاسیک DE و PSO و الگوریتم‌های GDE و GPSO در روش پیشنهادی

Table 3. The results of experiments with the classical DE and PSO algorithms and the GPSO and GDE algorithms in the proposed method

Fi	D	Mean				SD				Fi	D	Mean				SD			
		GPSO	PSO	GDE	DE	GPSO	PSO	GDE	DE			GPSO	PSO	GDE	DE	GPSO	PSO	GDE	DE
F1	10	0.00E+00	6.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.18E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	10	3.34E+00	3.24E+00	3.25E+00	3.03E-01	2.43E-01	4.20E-01	2.74E-01	
	30	4.66E-13	1.69E-01	7.96E-14	1.14E-14	9.15E-13	8.80E-02	3.11E-14	2.54E-14	30	1.23E+01	1.24E+01	1.24E+01	9.84E-01	1.94E-01	3.67E-01	5.15E-01		
	50	1.75E-04	5.61E+00	1.59E-13	5.89E-08	1.57E-04	2.91E+00	4.76E-14	2.00E-08	50	2.22E+01	2.26E+01	2.30E+01	5.63E-01	2.46E-01	3.48E-01	1.26E-01		
F2	10	0.00E+00	3.83E-04	6.82E-14	6.70E+03	0.00E+00	4.25E-04	6.23E-14	3.39E+03	10	4.28E+02	4.85E+02	7.88E+02	1.58E+02	6.31E+01	7.44E+01	1.02E+02		
	30	4.69E-02	4.29E+01	3.75E-13	6.30E+03	3.01E-02	1.65E+01	3.11E-14	3.99E+03	30	6.44E+02	4.12E+02	8.94E+02	3.77E+01	1.23E+02	5.18E+01	1.03E+02		
	50	5.98E+02	1.09E+03	6.61E+01	6.72E+03	1.43E+02	2.25E+02	8.71E+01	2.82E+03	50	5.53E+02	4.09E+02	8.26E+02	5.26E+01	1.86E+02	6.21E+01	5.58E+01		
F3	10	1.00E+05	1.02E+05	1.47E+07	1.47E+07	8.37E+04	5.91E+04	4.24E+03	1.55E+07	10	1.23E+02	1.46E+02	3.73E+02	1.48E+01	1.38E+01	2.01E+01	1.34E+02		
	30	1.49E+06	8.23E+06	6.10E+05	1.21E+07	6.21E+05	4.33E+06	3.50E+05	6.07E+06	30	2.11E+02	2.50E+02	3.00E+02	1.68E+02	6.33E+01	1.38E+02	1.79E+01		
	50	7.62E+06	3.51E+07	6.17E+06	1.13E+07	1.53E+06	1.22E+07	2.29E+06	4.02E+06	50	3.91E+02	1.34E+02	3.56E+02	1.24E+02	5.62E+01	3.61E+01	1.33E+02		
F4	10	0.00E+00	9.38E-02	1.02E-13	2.84E+02	0.00E+00	6.38E-02	1.09E-13	2.29E+02	10	1.91E+02	1.41E+02	3.59E+02	8.27E+01	1.28E+02	1.39E+01	2.25E+02		
	30	1.69E+02	1.77E+03	2.85E-01	4.01E+01	1.24E+02	1.00E+03	6.10E-01	2.98E+02	30	2.66E+02	3.27E+02	3.23E+02	1.38E+02	3.81E+01	1.96E+02	8.36E+01		
	50	1.28E+04	2.03E+04	1.44E+04	6.01E+04	4.20E+03	4.79E+03	8.38E+03	1.08E+04	50	3.68E+02	2.76E+02	3.73E+02	1.41E+02	7.21E+01	1.57E+02	1.14E+02		
F5	10	0.00E+00	5.68E-02	7.28E-13	0.00E+00	0.00E+00	7.73E-02	1.63E-12	0.00E+00	10	7.93E+02	9.37E+02	1.01E+03	9.00E+00	2.92E+02	8.96E+01	1.09E+02		
	30	3.50E+03	9.97E+03	2.10E+03	1.38E+02	4.68E+02	1.24E+03	1.05E+03	1.59E+02	30	9.14E+02	9.21E+02	9.48E+02	4.37E+00	1.75E+00	2.68E+01	3.64E+01		
	50	7.58E+03	1.78E+04	5.99E+03	9.38E+03	1.84E+03	2.75E+03	1.06E+03	8.05E+02	50	9.64E+02	9.32E+02	9.83E+02	1.58E+01	7.51E+01	9.06E+00	3.48E+01		
F6	10	5.84E+00	1.75E+02	7.97E-01	6.78E+00	6.30E+00	1.63E-02	1.78E+00	6.58E+00	10	9.32E+02	8.25E+02	1.06E+03	3.10E+02	8.30E+01	2.70E+02	1.82E+02		
	30	9.33E+01	1.54E+03	1.59E+00	2.93E+01	6.88E+01	2.65E+03	2.18E+00	2.65E+01	30	8.18E+02	9.08E+02	1.01E+03	2.01E+01	2.10E+02	7.72E+00	6.26E+01		
	50	1.33E+02	4.08E+03	1.05E+00	4.63E+01	8.42E+01	4.18E+03	2.32E+00	3.87E-01	50	9.70E+02	9.30E+02	1.02E+03	2.18E+01	3.51E+01	7.98E+00	5.46E+01		
F7	10	1.27E+03	1.27E+03	1.27E+03	1.96E+03	1.97E-13	0.00E+00	9.86E-02	2.78E+02	10	9.95E+02	9.79E+02	1.19E+03	1.28E+02	2.45E+01	1.06E+02	4.87E+01		
	30	4.71E+03	4.70E+03	4.70E+03	5.13E+03	8.00E+00	0.00E+00	6.43E-13	2.15E+02	30	9.21E+02	9.09E+02	1.02E+03	5.57E+00	2.18E+01	1.05E+00	1.61E+01		
	50	6.27E+03	6.22E+03	6.20E+03	6.28E+03	2.00E+01	3.88E+01	2.13E-12	6.49E+01	50	1.05E+03	9.37E+02	1.04E+03	5.54E+00	1.00E+02	1.33E+01	1.85E+01		
F8	10	2.02E+01	2.03E+01	2.03E+01	2.04E+01	5.23E-02	2.14E-02	6.52E-02	3.64E-02	10	9.64E+02	9.22E+02	1.31E+03	2.62E+02	2.88E+02	3.56E+02	5.55E+01		
	30	2.09E+01	2.10E+01	2.09E+01	2.10E+01	8.56E-02	3.45E-02	3.29E-02	5.98E-02	30	5.46E+02	6.19E+02	1.18E+03	2.89E+02	8.08E+01	2.66E+02	4.07E+01		
	50	2.10E+01	2.12E+01	2.12E+01	2.12E+01	5.51E-02	3.28E-02	3.85E-02	3.83E-02	50	9.34E+02	1.02E+03	1.01E+03	3.07E+02	3.76E+02	9.68E+00	1.15E+02		
F9	10	1.33E+01	1.81E+01	1.53E+01	3.50E+01	2.40E+00	1.47E+01	5.83E+00	1.35E+01	10	7.03E+02	8.12E+02	1.01E+03	2.82E+01	2.26E+02	3.68E+01	1.42E+02		
	30	1.00E+02	1.17E+02	7.45E+01	8.44E+01	1.79E+01	2.54E+01	2.09E+01	1.02E+01	30	9.15E+02	9.43E+02	1.01E+03	4.53E+01	2.88E+01	1.01E+01	4.43E+01		
	50	1.99E+02	2.68E+02	1.49E+02	1.66E+02	1.54E+01	2.75E+01	3.90E+01	3.40E+01	50	9.68E+02	1.01E+03	1.05E+03	2.31E+01	2.45E+01	3.22E+01	2.09E+01		
F10	10	2.83E+01	2.88E+01	2.37E+01	7.94E+00	7.33E+00	9.73E+00	1.03E+01	2.43E+00	10	9.52E+02	9.01E+02	1.32E+03	2.61E+02	3.65E+02	3.30E+02	2.11E+01		
	30	1.39E+02	2.07E+02	9.31E+01	1.92E+02	2.90E+01	4.79E+01	2.43E+01	3.93E+00	30	7.51E+02	6.66E+02	1.16E+03	2.85E+02	2.87E+02	1.22E+02	6.10E+01		
	50	2.33E+02	4.70E+02	1.68E+02	4.06E+02	6.23E+01	6.24E+01	5.77E+01	1.38E+01	50	1.09E+03	1.02E+03	1.14E+03	1.58E+02	2.83E+02	3.76E+00	7.56E+01		
F11	10	4.71E+00	6.34E+00	4.24E+00	4.60E+00	1.53E+00	5.53E-01	1.86E+00	7.79E-01	10	3.62E+02	6.83E+02	1.11E+03	1.64E+02	1.53E+02	4.17E+02	1.44E+02		
	30	1.62E+01	3.18E+01	1.68E+01	3.75E+01	4.61E+00	2.80E+00	2.29E+00	9.84E-01	30	2.12E+02	8.19E+02	1.14E+03	5.37E-10	2.12E+00	3.46E+02	1.06E+02		
	50	3.78E+01	5.86E+01	3.45E+01	7.35E+01	4.64E+00	3.44E+00	2.70E+00	1.85E+00	50	1.23E+03	1.07E+03	1.22E+03	4.40E+01	3.33E+01	1.08E+02	2.90E+01		
F12	10	3.17E+02	1.82E+04	1.29E+03	1.29E+04	6.93E+02	8.58E+03	2.38E+03	2.80E+03	10	1.02E+03	1.01E+03	1.32E+03	2.29E+01	2.67E+02	2.62E+02	1.11E+02		
	30	4.19E+04	1.55E+05	5.41E+05	5.14E+05	6.96E+04	4.86E+04	2.79E+05	6.55E+04	30	1.09E+03	1.08E+03	1.27E+03	1.43E+02	1.04E+02	8.84E+01	2.47E+01		
	50	4.63E+05	8.08E+05	3.14E+06	3.57E+06	2.90E+05	8.16E+04	9.51E+05	2.37E+05	50	1.30E+03	1.26E+03	1.29E+03	1.61E+01	1.09E+01	2.54E+01	1.87E+01		
F13	10	7.39E-01	8.77E-01	7.36E-01	7.07E+00	1.18E+00	3.20E+00	7.26E-01	4.56E-01	10	1.30E+03	1.26E+03	1.29E+03	1.61E+01	1.09E+01	2.54E+01	1.87E+01		
	30	3.08E+00	7.99E+00	4.71E+00	7.07E+00	1.40E+00	3.85E+00	2.44E+00	1.46E+00	30	1.30E+03	1.26E+03	1.29E+03	1.61E+01	1.09E+01	2.54E+01	1.87E+01		
	50	6.45E+00	1.90E+01	9.85E+00	2.21E+01	1.40E+00	3.85E+00	2.44E+00	1.46E+00	50	1.30E+03	1.26E+03	1.29E+03	1.61E+01	1.09E+01	2.54E+01	1.87E+01		



شکل ۲: منحنی های همگرایی الگوریتم های PSO، DE، GPSO و GDE برای بعد ۵۰

Figure2: The convergence curves of the PSO, DE, GPSO, and GDE algorithms for dimension 50

جدول ۴، میانگین خطا و انحراف استاندارد شش الگوریتم DEPSO، EPSODE، PSOJADE، MPSO، GPSO و GDE برای ۲۵ تابع شناخته شده F1-F25 و با ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۴ برای بعد ۱۰، الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE بهترین نتیجه را برای توابع دسته اول دارد. برای توابع دسته دوم، GPSO/GDE بهترین عملکرد بر روی تابع های F6 و F7 و F12 دارد.

جدول ۴: نتایج آزمایش ها با الگوریتم های مختلف

Table 4. The results of experiments with different algorithms

Fi	D	EPISODE		MPSO		PSOJADE		DEPSO		GPSO		GDE	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
F1	10	7.24E+02	8.47E+02	2.49E+02	3.92E+01	1.29E+03	6.27E+02	3.54E-09	5.97E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	30	1.31E+03	5.00E+02	9.45E+03	4.69E+03	1.99E+04	2.19E+03	7.34E-02	1.50E-02	4.66E-13	9.15E-13	7.96E-14	3.11E-14
	50	3.99E+04	3.01E+04	2.09E+04	4.91E+03	5.30E+04	2.65E+03	3.33E+00	4.39E-01	1.75E-04	1.57E-04	1.59E-13	4.76E-14
F2	10	1.95E+02	1.23E+02	2.61E+02	2.27E+02	1.55E+03	2.61E+02	1.06E-01	6.28E-02	0.00E+00	0.00E+00	6.82E-14	6.23E-14
	30	9.39E+03	8.52E+03	4.10E+04	2.10E+04	2.75E+04	3.35E+03	1.17E+03	1.28E+02	4.69E-02	3.01E-02	3.75E-13	3.11E-14
	50	8.39E+04	3.58E+04	9.15E+04	1.12E+04	9.25E+04	1.21E+04	1.59E+04	1.01E+03	5.98E+02	1.43E+02	6.61E+01	8.71E+01
F3	10	1.56E+06	2.15E+06	5.20E+06	2.18E+06	2.72E+06	1.83E+06	3.53E+05	3.24E+05	1.00E+05	8.37E+04	2.49E+03	4.24E+03
	30	6.17E+07	3.96E+07	9.33E+07	1.33E+07	1.83E+08	3.28E+07	1.82E+06	5.34E+05	1.49E+06	6.21E+05	6.10E+05	3.50E+05
	50	2.29E+08	2.24E+08	6.87E+08	4.68E+08	1.00E+09	2.72E+07	4.67E+06	1.98E+06	7.62E+06	1.53E+06	6.17E+06	2.29E+06
F4	10	5.93E+03	8.01E+03	9.59E+02	4.60E+02	1.72E+03	6.06E+02	5.93E-01	4.84E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.02E-13	1.09E-13
	30	5.77E+04	1.04E+03	5.44E+04	9.53E+03	2.79E+04	4.60E+03	2.82E+03	1.46E+03	1.69E+02	1.24E+02	2.85E-01	6.10E-01
	50	1.35E+05	3.14E+04	1.29E+05	3.31E+04	1.03E+05	1.54E+04	2.64E+04	4.20E+03	1.28E+04	4.20E+03	1.44E+04	8.38E+03
F5	10	5.78E+03	5.94E+03	1.35E+02	4.11E+01	5.61E+03	5.78E+02	4.51E-01	3.86E-01	0.00E+00	0.00E+00	7.28E-13	1.63E-12
	30	1.27E+04	1.05E+03	1.80E+04	1.40E+04	1.86E+04	1.16E+03	3.55E+03	3.40E+02	3.50E+03	4.68E+02	2.10E+03	1.05E+03
	50	1.56E+04	3.88E+03	1.78E+04	2.65E+03	3.00E+04	7.55E+02	7.04E+03	3.84E+02	7.58E+03	1.84E+03	5.99E+03	1.06E+03
F6	10	2.97E+07	5.07E+07	2.66E+06	1.52E+06	2.76E+07	2.34E+07	4.98E+00	3.93E+00	5.84E+00	6.30E+00	7.97E-01	1.78E+00
	30	5.94E+08	1.01E+09	7.15E+08	5.77E+08	3.58E+09	7.53E+08	8.25E+02	1.05E+03	9.33E+01	6.88E+01	1.59E+00	2.18E+00
	50	5.34E+09	8.99E+09	3.20E+09	2.02E+09	1.44E+10	7.66E+08	3.53E+03	1.17E+03	1.33E+02	8.42E+01	1.05E+00	2.32E+00
F7	10	1.27E+03	4.63E-01	1.27E+03	3.54E-01	1.27E+03	2.23E-05	1.27E+03	1.04E-01	1.27E+03	1.97E-13	1.27E+03	9.86E-02
	30	4.71E+03	1.70E+01	5.27E+03	9.94E+02	4.72E+03	1.19E+01	4.70E+03	1.44E-08	4.71E+03	8.00E+00	4.70E+03	6.43E-13
	50	6.28E+03	1.25E+02	6.91E+03	1.08E+03	6.29E+03	3.55E+01	6.20E+03	2.00E-05	6.27E+03	2.00E+01	6.20E+03	2.13E-12
F8	10	2.01E+01	2.07E-01	2.02E+01	3.80E-02	2.03E+01	9.88E-02	2.03E+01	5.55E-02	2.02E+01	5.23E-02	2.03E+01	6.52E-02
	30	2.06E+01	3.91E-01	2.10E+01	6.42E-02	2.09E+01	8.78E-02	2.10E+01	3.23E-02	2.09E+01	8.56E-02	2.09E+01	3.29E-02
	50	2.08E+01	1.80E-01	2.11E+01	2.24E-02	2.12E+01	1.74E-02	2.12E+01	2.35E-02	2.10E+01	5.51E-02	2.12E+01	3.85E-02
F9	10	3.22E+01	4.91E+00	7.44E+01	5.61E+00	3.45E+01	5.73E+00	1.18E-08	1.03E-08	1.33E+01	2.40E+00	1.53E+01	5.83E+00
	30	1.72E+02	3.60E+01	4.88E+02	1.99E+01	2.89E+02	1.07E+01	3.43E+00	1.48E+00	1.00E+02	1.79E+01	7.45E+01	2.09E+01
	50	4.24E+02	1.08E+02	5.82E+02	3.57E+01	6.05E+02	1.88E+01	1.72E+02	7.52E+01	1.99E+02	1.54E+01	1.49E+02	3.90E+01
F10	10	4.54E+01	3.46E+01	1.04E+02	2.24E+01	4.81E+01	2.77E+00	1.43E+01	5.48E+00	2.83E+01	7.33E+00	2.37E+01	1.03E+01
	30	2.92E+02	8.29E+01	4.13E+02	4.85E+01	3.95E+02	5.88E+00	2.02E+02	9.36E+00	1.39E+02	2.90E+01	9.31E+01	2.43E+01
	50	5.79E+02	1.79E+02	7.17E+02	6.21E+01	8.07E+02	3.26E+01	4.07E+02	9.27E+00	2.33E+02	6.23E+01	1.68E+02	5.77E+01
F11	10	9.16E+00	2.34E+00	8.75E+00	1.08E+00	8.11E+00	4.68E-01	4.20E+00	9.10E-01	4.71E+00	1.53E+00	4.24E+00	1.86E+00
	30	3.11E+01	2.01E+00	4.03E+01	1.11E+00	4.00E+01	8.97E-01	1.93E+01	3.70E+00	1.62E+01	4.61E+00	1.68E+01	2.29E+00
	50	6.37E+01	5.99E+00	7.31E+01	6.58E-01	7.35E+01	1.36E+00	7.06E+01	2.85E+00	3.78E+01	4.64E+00	3.45E+01	2.70E+00
F12	10	3.61E+03	2.90E+03	2.16E+04	5.00E+03	2.20E+04	3.90E+03	7.16E+03	8.96E+02	3.17E+02	6.93E+02	2.95E+03	2.38E+03
	30	4.31E+05	4.43E+05	1.02E+06	6.48E+04	9.84E+05	5.28E+04	6.77E+05	1.36E+05	4.19E+04	6.96E+04	5.41E+05	2.79E+05
	50	1.59E+06	1.20E+06	5.32E+06	1.58E+05	5.32E+06	1.45E+05	3.44E+06	6.01E+05	4.63E+05	2.90E+05	3.14E+06	9.51E+05

F13	10	2.37E+00	1.57E+00	6.96E+00	1.73E+00	3.01E+00	1.27E+00	4.28E-01	3.41E-01	7.59E-01	2.14E-01	7.36E-01	1.35E-01
	30	2.05E+01	1.34E+01	6.38E+01	2.39E+01	3.52E+01	8.93E+00	1.06E+01	4.06E+00	3.08E+00	1.18E+00	4.71E+00	7.26E-01
F14	50	4.96E+01	2.78E+01	2.39E+02	7.13E+01	1.30E+02	3.30E+00	2.69E+01	2.90E+00	6.45E+00	1.40E+00	9.85E+00	2.44E+00
	10	4.34E+00	2.47E-01	4.15E+00	3.11E-01	3.50E+00	1.19E-01	2.84E+00	6.07E-01	3.01E+00	3.03E-01	3.24E+00	3.24E+00
F15	30	1.40E+01	8.06E-02	1.36E+01	3.81E-01	1.32E+01	2.32E-01	1.32E+01	5.73E-01	1.24E+01	9.84E-01	1.24E+01	1.24E+01
	50	2.34E+01	6.00E-02	2.35E+01	2.98E-01	2.31E+01	2.58E-02	2.33E+01	1.04E-01	2.21E+01	5.63E-01	2.26E+01	2.26E+01
F16	10	4.78E+02	7.87E+01	6.74E+02	4.34E+01	4.04E+02	9.29E+00	3.17E+02	1.16E+02	2.84E+02	1.58E+02	4.85E+02	4.85E+02
	30	6.11E+02	4.25E+01	7.10E+02	1.80E+02	8.62E+02	7.78E+01	2.63E+02	5.94E+01	4.74E+02	3.77E+01	4.12E+02	4.12E+02
F17	50	8.26E+02	1.31E+02	8.58E+02	3.71E+01	7.85E+02	1.29E+02	4.46E+02	1.73E+01	4.16E+02	5.26E+01	4.09E+02	4.09E+02
	10	2.60E+02	7.22E+01	2.37E+02	5.44E+01	2.20E+02	1.75E+01	1.52E+02	1.91E+00	1.29E+02	1.48E+01	1.46E+02	1.46E+02
F18	30	3.09E+02	4.85E+01	4.07E+02	7.70E+01	4.80E+02	6.29E+01	3.37E+02	1.52E+02	2.10E+02	1.68E+02	2.50E+02	2.50E+02
	50	5.36E+02	1.97E+02	4.78E+02	8.00E+01	6.27E+02	9.76E+01	3.66E+02	1.86E+02	1.86E+02	1.24E+02	1.34E+02	1.34E+02
F19	10	2.40E+02	9.87E+00	2.49E+02	2.72E+00	2.38E+02	1.60E+01	1.23E+02	2.19E+01	1.75E+02	8.27E+01	1.41E+02	1.41E+02
	30	3.99E+02	7.48E+01	4.69E+02	1.29E+02	5.17E+02	7.51E+01	2.45E+02	5.90E+00	2.28E+02	1.38E+02	3.27E+02	3.27E+02
F20	50	4.39E+02	1.10E+01	4.60E+02	2.78E+01	6.21E+02	5.65E+01	3.96E+02	6.68E+01	3.31E+02	1.41E+02	2.76E+02	2.76E+02
	10	9.00E+02	0.00E+00	1.05E+03	3.75E+01	9.57E+02	6.16E+01	9.79E+02	1.05E+02	1.00E+03	9.00E+00	9.37E+02	9.37E+02
F21	30	9.00E+02	0.00E+00	9.49E+02	3.79E+01	1.08E+03	1.69E+01	9.22E+02	1.82E+00	9.13E+02	4.37E+00	9.21E+02	9.21E+02
	50	9.00E+02	0.00E+00	1.01E+03	5.14E+01	1.18E+03	2.21E+01	9.88E+02	3.27E+01	9.54E+02	1.58E+01	9.32E+02	9.32E+02
F22	10	9.00E+02	0.00E+00	8.33E+02	1.45E+02	9.93E+02	4.89E+01	9.74E+02	1.52E+02	8.49E+02	3.10E+02	8.25E+02	8.25E+02
	30	9.00E+02	0.00E+00	9.38E+02	3.20E+01	1.07E+03	1.35E+01	9.25E+02	1.42E+01	9.26E+02	2.01E+01	9.08E+02	9.08E+02
F23	50	9.00E+02	0.00E+00	1.04E+03	7.24E+01	1.18E+03	1.89E+01	9.95E+02	3.71E+01	9.53E+02	2.18E+01	9.30E+02	9.30E+02
	10	9.00E+02	0.00E+00	9.35E+02	2.40E+02	9.84E+02	3.73E+01	9.15E+02	1.91E+02	9.33E+02	1.28E+02	9.79E+02	9.79E+02
F24	30	9.00E+02	0.00E+00	9.52E+02	6.11E+01	1.07E+03	2.21E+01	9.22E+02	5.85E+00	9.12E+02	5.57E+00	9.09E+02	9.09E+02
	50	9.00E+02	0.00E+00	1.03E+03	6.94E+01	1.18E+03	1.80E+01	9.57E+02	2.10E+01	9.49E+02	5.54E+00	9.37E+02	9.37E+02
F25	10	1.20E+03	1.02E+02	9.25E+02	3.27E+02	1.18E+03	4.27E+01	8.67E+02	3.48E+02	9.41E+02	2.62E+02	9.22E+02	9.22E+02
	30	1.11E+03	6.04E+00	1.09E+03	4.22E+01	1.25E+03	1.99E+01	8.30E+02	3.39E+02	6.29E+02	2.89E+02	6.19E+02	6.19E+02
F26	50	1.08E+03	3.59E+01	1.04E+03	7.18E+00	1.35E+03	9.08E+00	1.03E+03	4.52E+00	7.00E+02	3.07E+02	1.02E+03	1.02E+03
	10	9.84E+02	9.41E+01	9.19E+02	1.00E+02	8.44E+02	2.49E+01	8.49E+02	5.16E+01	7.79E+02	2.82E+01	8.12E+02	8.12E+02
F27	30	1.14E+03	1.77E+02	1.01E+03	1.52E+02	1.18E+03	2.19E+01	9.79E+02	5.97E+01	9.83E+02	4.53E+01	9.43E+02	9.43E+02
	50	1.01E+03	6.73E+01	1.06E+03	2.79E+01	1.32E+03	2.10E+01	1.01E+03	5.71E+01	9.96E+02	2.31E+01	1.01E+03	1.01E+03
F28	10	1.23E+03	6.40E+01	1.06E+03	3.07E+02	1.18E+03	3.00E+01	1.13E+03	6.48E+01	8.99E+02	2.61E+02	9.01E+02	9.01E+02
	30	1.11E+03	2.97E+00	1.03E+03	1.04E+02	1.25E+03	2.16E+01	7.97E+02	3.36E+02	6.62E+02	2.85E+02	6.66E+02	6.66E+02
F29	50	1.05E+03	1.92E+01	1.07E+03	2.46E+01	1.35E+03	1.14E+01	8.72E+02	2.88E+02	6.10E+02	1.58E+02	1.02E+03	1.02E+03
	10	1.17E+03	1.84E+02	8.37E+02	3.88E+02	8.88E+02	1.07E+02	3.20E+02	1.86E+11	2.00E+02	1.64E+02	6.83E+02	6.83E+02
F30	30	9.75E+02	2.20E+01	1.04E+03	9.77E+01	1.28E+03	2.97E+01	2.00E+02	1.16E+03	2.00E+02	5.37E+10	8.19E+02	8.19E+02
	50	1.12E+03	2.77E+01	1.04E+03	1.31E+01	1.38E+03	1.64E+01	1.22E+03	4.96E+02	2.01E+02	4.40E+01	1.07E+03	1.07E+03
F31	10	1.19E+03	2.02E+02	1.33E+03	4.83E+01	1.09E+03	6.57E+01	1.34E+03	2.51E+02	9.68E+02	2.29E+01	1.01E+03	1.01E+03
	30	1.23E+03	1.08E+02	1.13E+03	6.89E+01	1.35E+03	1.72E+01	1.24E+03	5.37E+00	9.97E+02	1.43E+02	1.08E+03	1.08E+03
F32	50	1.28E+03	2.62E+01	1.32E+03	5.73E+00	1.38E+03	6.23E+00	1.27E+03	5.03E+00	1.31E+03	1.61E+01	1.26E+03	1.26E+03

در حالی که EPSODE بر روی تابع F8 و DEPSO روی F9-F11 بهترین نتیجه را حاصل می‌کنند. برای توابع دسته سوم، DEPSO نتیجه بهتری را نشان می‌دهد. برای توابع دسته چهارم، الگوریتم پیشنهادی برای توابع F15، F16، F19 و F22-F25 بهترین بازدهی را نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارد و برای بقیه توابع DEPSO و EPSODE بهترین نتیجه را دارند. مطابق با جدول ۴ برای بعد ۳۰، GPSO/GDE بهترین عملکرد را بر روی توابع دسته اول دارد. برای توابع دسته دوم، بازدهی GPSO/GDE بهتر از الگوریتم‌های دیگر بر روی توابع F6، F7 و F10-F12 است و برای توابع F8 و F9 الگوریتم‌های EPSODE و DEPSO به ترتیب بهترین نتیجه را حاصل می‌کنند. برای توابع دسته سوم F13 و F14، GPSO/GDE بهترین عملکرد را نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارد. برای توابع دسته چهارم، GPSO/GDE بهترین نتیجه را روی توابع F16، F17، F21-F25 دارا است و EPSODE و DEPSO به ترتیب بهترین بازدهی را روی تابع F15 و F18-F20 دارد.

همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴ برای بعد ۵۰ نشان می‌دهد، برای توابع دسته اول، GPSO/GDE با بهترین بازدهی را برای توابع F1-F2 و F4-F5 دارد و DEPSO نتیجه بهتری روی توابع F3 دارد. در توابع دسته دوم، برای توابع F6، F7 و F9-F12، GPSO/GDE بهترین بازدهی را دارد و برای تابع F8، EPSODE عملکرد بهتری دارد. همچنین GPSO/GDE بهترین عملکرد را برای توابع دسته سوم دارد. برای توابع دسته چهارم F15-F17 و F21-F25، GPSO/GDE بهترین نتیجه را نشان می‌دهد و برای بقیه توابع و EPSODE بهترین عملکرد را دارد.

در مجموع، الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE قدرتمندتر و بهتر از سایر الگوریتم‌ها در توانایی جستجو برای یافتن راه حل بهینه و افزایش ابعاد برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. به این دلیل که در روش پیشنهادی برای ترکیب الگوریتم‌های PSO و DE از جواب نظریه چانه زنی نش که یک راه حل منحصر بفرد است و در پنج اصل بهینه‌گی پرتو، عقلانیت فردی، تغییر ناپذیری خطی، استقلال از جایگزین‌های نامناسب و تقارن صدق می‌کند، استفاده می‌کند. همچنین نظریه چانه زنی نش سعی می‌کند تا حد امکان سود هر دو بازیکن را افزایش دهد و باعث حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج، اجتناب از بهینه محلی و افزایش تنوع در روش پیشنهادی می‌شود. از آنجایی که در روش پیشنهادی الگوریتم‌های PSO و DE به صورت مستقل اجرا می‌شوند، هزینه محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد مقایسه بیشتر است اما بهبود نتایج و برتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر برای توجیه هزینه اضافی در روش پیشنهادی کافی می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، از همکاری بین PSO و DE برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است. با وجود آن که الگوریتم‌های PSO و DE به نحو کارآمدی برای محدوده‌ای گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما هر دوی آن‌ها مشکلات خاصی دارند که عملکرد الگوریتم را کاهش می‌دهد. در واقع الگوریتم PSO در حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی دارای یک همگرایی زود هنگام است و در بهینه‌ی محلی به دام می‌افتد و توانایی خارج شدن از آن را ندارد. الگوریتم DE تا حد زیادی به استراتژی تولید بردار آزمایش و مقادیر پارامترهای به کار رفته بستگی دارد. برای غلبه بر این مشکلات در الگوریتم پیشنهادی از ترکیب و همکاری دو الگوریتم بهینه‌سازی PSO و DE استفاده شد که همکاری الگوریتم‌ها بر اساس نظریه چانه زنی نش صورت گرفت. به عبارتی نظریه چانه زنی نش سعی می‌کند تا حد امکان سود هر دو بازیکن را افزایش دهد و باعث حفظ تعادل بین توانایی اکتشاف و استخراج، اجتناب از بهینه محلی و افزایش تنوع در روش پیشنهادی می‌شود. در واقع محیط بازی یک فضای رقابتی را در بین الگوریتم‌ها ایجاد می‌کند و باعث می‌شود توانایی جستجوی الگوریتم‌ها تا حد زیادی افزایش پیدا کند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی GPSO/GDE بر دو الگوریتم PSO و DE کلاسیک و سایر الگوریتم‌های ترکیبی از نظر انحراف معیار و میانگین برتری دارد. ارزیابی آزمایش‌ها روی توابع معیار نشان می‌دهد که ایجاد بازی بین دو الگوریتم PSO و DE در محیط جستجو می‌تواند بازدهی الگوریتم GPSO/GDE را بهبود بخشد.

در مطالعات آتی، الگوریتم پیشنهادی توسعه یافته و برای حل مسائل دنیای واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعه‌ی حاضر سبب کمک به محققانی می‌شود که در زمینه‌ی الگوریتم‌های تکاملی برای توسعه‌ی مدل‌های هیبرید جدید یا بکارگیری مدل‌های موجود برای زمینه‌های کاربردی جدید فعالیت دارند.

مراجع

- [1] J. P. B. Mapetu, Z. Chen and L. Kong, "Low-time complexity and low-cost binary particle swarm optimization algorithm for task scheduling and load balancing in cloud computing," *Applied Intelligence*, vol. 49, pp. 3308-3330, 2019, doi: [10.1007/s10489-019-01448-x](https://doi.org/10.1007/s10489-019-01448-x).
- [2] Q.-V. Pham, S. Mirjalili, N. Kumar, M. Alazab and W.-J. Hwang, "Whale optimization algorithm with applications to resource allocation in wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, pp. 4285-4297, 2020, doi: [10.1109/TVT.2020.2973294](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2973294).
- [3] M. Dadvar, H. Navidi, H. H. S. Javadi and M. Mirzarezaee, "A cooperative approach for combining particle swarm optimization and differential evolution algorithms to solve single-objective optimization problems," *Applied Intelligence*, vol. 52, no. 4, pp. 4089-4108, 2022, doi: [10.1007/s10489-021-02605-x](https://doi.org/10.1007/s10489-021-02605-x).
- [4] X. Meng, Y. Liu, X. Gao and H. Zhang, "A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization," in *International conference in swarm intelligence*, pp. 86-94, 2014, doi: [10.1007/978-3-319-11857-4_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11857-4_10).
- [5] S. Mirjalili, "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-based systems*, vol. 96, pp. 120-133, 2016, doi: [10.1016/j.knosys.2015.12.022](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022).
- [6] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi: [10.1016/j.advengsoft.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [7] W.-T. Pan, "A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example," *Knowledge-Based Systems*, vol. 26, pp. 69-74, 2012, doi: [10.1016/j.knosys.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.07.001).
- [8] S.-C. Chu, P.-W. Tsai and J.-S. Pan, "Cat swarm optimization," in *Pacific Rim international conference on artificial intelligence*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 854-858, doi: [10.1007/978-3-540-36668-3_94](https://doi.org/10.1007/978-3-540-36668-3_94).
- [9] X.-B. Meng, X. Z. Gao, L. Lu, Y. Liu and H. Zhang, "A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird Swarm Algorithm," *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 28, pp. 673-687, 2016, doi: [10.1080/0952813X.2015.1042530](https://doi.org/10.1080/0952813X.2015.1042530).
- [10] X.S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature inspired cooperative strategies for optimization*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, NICSO2010, 2010, pp. 65-74, doi: [10.1007/978-3-642-12538-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6).
- [11] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997, doi: [10.1023/A:1008202821328](https://doi.org/10.1023/A:1008202821328).
- [12] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm," *Computers & Structures*, vol. 169, no. 2, pp. 1-12, 2016, doi: [10.1016/j.compstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.001).
- [13] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, MHS'95, 1995, pp. 39-43, doi: [10.1109/MHS.1995.494215](https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215).
- [14] X. Yu, J. Cao, H. Shan, L. Zhu and J. Guo, "An adaptive hybrid algorithm based on particle swarm optimization and differential evolution for global optimization," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, no. 6, p. 215472, 2014, doi: [10.1155/2014/215472](https://doi.org/10.1155/2014/215472).
- [15] B. Mao, Z. Xie, Y. Wang, H. Handroos and H. Wu, "A hybrid strategy of differential evolution and modified particle swarm optimization for numerical solution of a parallel manipulator," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-9, 2018, doi: [10.1155/2018/9815469](https://doi.org/10.1155/2018/9815469).

- [16] Q. Abbas, J. Ahmad and H. Jabeen, "OPSO: opposition based particle swarm optimization instilled with differential evolution," *International journal of advanced and applied sciences*, vol. 4, no. 7, pp. 50-58, 2017, doi: [10.21833/ijaas.2017.07.008](https://doi.org/10.21833/ijaas.2017.07.008).
- [17] K. Price, R. M. Storn and J. A. Lampinen, "Differential evolution: a practical approach to global optimization," *Natural Computing*, vol. 141, no. 2, 2005, doi: [10.1007/3-540-31306-0](https://doi.org/10.1007/3-540-31306-0).
- [18] R. Thangaraj, M. Pant, A. Abraham and P. Bouvry, "Particle swarm optimization: hybridization perspectives and experimental illustrations," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 12, pp. 5208-5226, 2011, doi: [10.1016/j.amc.2010.12.053](https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.12.053).
- [19] C. Huang, X. Zhou, X. Ran, J. Wang, H. Chen and W. Deng, "Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 121, no. 3, p. 105942, 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2023.105942](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105942).
- [20] Q. Gao, H. Sun, and Z. Wang, "DP-EPHO: Differential privacy protection algorithm based on differential evolution and particle swarm optimization," *Optics Laser Technology*, vol. 173, p. 110541, June 01, 2024, doi: [10.1016/j.optlastec.2023.110541](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110541).
- [21] S. Wang, Y. Li and H. Yang, "Self-adaptive mutation differential evolution algorithm based on particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 81, p. 105496, 2019, doi: [10.1016/j.asoc.2019.105496](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105496).
- [22] D. Fan and J. Lee, "A Hybrid Mechanism of Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms based on Spark," *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, vol. 13, no. 12, pp. 5972-5989, 2019, doi: [10.3837/tiis.2019.12.010](https://doi.org/10.3837/tiis.2019.12.010).
- [23] H. Liu, X.-W. Zhang and L.-P. Tu, "A modified particle swarm optimization using adaptive strategy," *Expert Systems with Applications*, vol. 152, p. 113353, 2020, doi: [10.1016/j.eswa.2020.113353](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113353).
- [24] H. Wang, L. Zuo, J. Liu, W. Yi and B. Niu, "Ensemble particle swarm optimization and differential evolution with alternative mutation method," *Natural Computing*, vol. 19, pp. 699-712, 2020, doi: [10.1007/s11047-018-9712-z](https://doi.org/10.1007/s11047-018-9712-z).
- [25] A. Lin, D. Liu, Z. Li, H. M. Hasanien and Y. Shi, "Heterogeneous differential evolution particle swarm optimization with local search," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 6905-6925, 2023, doi: [10.1007/s40747-023-01082-8](https://doi.org/10.1007/s40747-023-01082-8).
- [26] B. Tang, K. Xiang and M. Pang, "An integrated particle swarm optimization approach hybridizing a new self-adaptive particle swarm optimization with a modified differential evolution," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 7, pp. 4849-4883, 2020, doi: [10.1007/s00521-018-3878-2](https://doi.org/10.1007/s00521-018-3878-2).
- [27] T. M. Dao, M. Q. Tran, L. T. Duong, D. Do, N. Nguyen and D. Vo, "Temperature Dependent Optimal Power Flow Using Combined Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Method," *GMSARN International Journal*, vol. 18, pp. 84-105, 2024.
- [28] S.-Y. Du and Z.-G. Liu, "Hybridizing Particle Swarm Optimization with JADE for continuous optimization," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, pp. 4619-4636, 2020, doi: [10.1007/s11042-019-08142-7](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08142-7).
- [29] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Empirical study of particle swarm optimization," *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, DC, USA, 1999, pp. 1945-1950 Vol. 3, doi: [10.1109/CEC.1999.785511](https://doi.org/10.1109/CEC.1999.785511).
- [30] Z. -H. Zhan, J. Zhang, Y. Li and H. S. -H. Chung, "Adaptive Particle Swarm Optimization," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 39, no. 6, pp. 1362-1381, Dec. 2009, doi: [10.1109/TSMCB.2009.2015956](https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2015956).
- [31] GH. Abdoli, "Game theory and its applications (incomplete information, evolutionary and cooperative games)", 2007, The organization for researching and composing university textbooks in the humanities.

- [32] R. B. Myerson, "Game theory", *Harvard university press*, 2013.
- [33] P. N. Suganthan *et al.*, "Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2005 special session on real-parameter optimization," *KanGAL report*, vol. 2005005, p. 2005, 2005.

Detection of DDoS Attacks in SDN Switches with Deep Learning and Swarm Intelligence Approach

Mohsen Eghbali¹  | Mohammad Reza Mollakhalili Meybodi^{2*} 

¹Department of Computer Engineering,
Maybod Branch, Islamic Azad University,
Maybod, Iran.
m.eghbali@maybodiau.ac.ir

²Department of Computer Engineering,
Maybod Branch, Islamic Azad University,
Maybod, Iran.
mollakhalili@maybodiau.ac.ir

Correspondence

Mohammad Reza Mollakhalili Meybodi,
Associate Professor of Computer
Engineering, Maybod Branch, Islamic Azad
University, Maybod, Iran.
mollakhalili@maybodiau.ac.ir

Main Subjects:

Internet of things

Paper History:

Received: 16 October 2023

Revised: 2 December 2023

Accepted: 17 December 2023

Abstract

This paper introduces an efficient intrusion detection system for the Internet of Things, addressing the challenge of malware-infected IoT nodes acting as botnet attackers, along with issues in existing intrusion detection systems such as feature selection, data imbalance, and centralization. The proposed system leverages the distributed architecture of SDN. The method begins by balancing the dataset using the SMOTE technique. Essential features are then selected using the African Vulture Optimization Algorithm. Subsequently, an LSTM deep learning model is trained within the SDN controller. SDN switches utilize this trained model for attack detection. To enhance attack mitigation, attacking node addresses are shared among SDN switches, ensuring consistent recognition and enabling effective Distributed Denial-of-Service (DDoS) attack prevention across the network. Experimental results obtained in MATLAB, using the NSL-KDD dataset, demonstrate the proposed method's effectiveness, achieving an accuracy of 99.34%, a sensitivity of 99.16%, and a precision of 98.93% in attack detection. The proposed method outperforms feature selection methods based on WOA, HHO, and AO algorithms, and deep learning methods like LSTM, RNN, and CNN, particularly in detecting DDoS attacks.

Keywords: Internet of Things, Intrusion detection system, DDoS attacks, SDN network, Deep learning.

Highlights

- Development of a distributed intrusion detection system based on SDN architecture.
- Dataset balancing using SMOTE method in SDN controller.
- Introduction of a feature selection and binary version of the AVOA for attack detection.
- Integration of swarm intelligence and LSTM deep learning in SDN network to detect IoT attacks.

Citation: M. Eghbali, and M.R. Mollakhalili Meybodi, "Detection of DDoS Attacks in SDN Switches with Deep Learning and Swarm Intelligence Approach," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 55, pp. 94–120, 2025, doi:10.30495/jce.2023.1998267.1233 [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 Internet of Things (IoT) has undergone remarkable advancements, becoming a cornerstone of modern technology. Smart devices are now ubiquitous, seamlessly integrated into everyday life, offering unprecedented convenience and efficiency. The proliferation of IoT devices has revolutionized various sectors, including smart homes, healthcare, transportation, and energy management, by enabling automation, enhancing productivity, and optimizing resource utilization [1]. However, this rapid expansion has also introduced significant challenges, particularly in the realms of security and privacy.

One of the most pressing concerns is the vulnerability of IoT devices to cyberattacks. These devices, often designed with limited computational resources and security measures, are prime targets for malicious actors. Among the most prevalent and damaging attacks are Distributed Denial of Service (DDoS) attacks. In such attacks, a multitude of compromised IoT devices, infected with malware, are harnessed to overwhelm a target network with excessive traffic, rendering it inaccessible to legitimate users [2]. The consequences of these attacks can be severe, disrupting critical services and causing substantial financial and reputational damage.

The rise in DDoS attacks has been fueled by the increasing number of IoT devices connected to the internet. These devices, equipped with sensors and remote communication capabilities, have become integral components of the IoT ecosystem. However, their widespread adoption has also expanded the attack surface, making them attractive targets for cybercriminals. The situation is exacerbated by the fact that many IoT devices are deployed with default configurations and lack robust security mechanisms, making them easy prey for malware such as the Mirai botnet, which has been responsible for some of the largest DDoS attacks in recent history [3].

To combat these threats, researchers have developed various intrusion detection techniques. Traditional methods include signature-based detection, which relies on a database of known attack patterns, and anomaly-based detection, which identifies deviations from normal network behavior [4]. While these approaches have proven effective to some extent, they are not without limitations. Signature-based methods struggle to detect novel attacks, while anomaly-based techniques can generate high false-positive rates. Moreover, the centralized nature of many intrusion detection systems poses scalability challenges, particularly in the context of IoT networks, which generate vast amounts of data.

In recent years, machine learning and deep learning have emerged as powerful tools for enhancing intrusion detection capabilities. These techniques can analyze complex, high-dimensional data and identify subtle patterns indicative of malicious activity [5]. Deep learning, in particular, has shown great promise due to its ability to model non-linear relationships and capture intricate features in network traffic. However, the effectiveness of these methods depends on the quality and balance of the training data. Imbalanced datasets, where one class of data is underrepresented, can lead to biased models with poor detection performance [6].

To address these challenges, this paper proposes a distributed intrusion detection system within a Software-Defined Networking (SDN) framework. SDN offers a centralized control plane that can dynamically manage network resources and traffic flows, providing a flexible and scalable platform for implementing security measures [7]. The proposed system leverages several advanced techniques to enhance detection accuracy and efficiency:

1. **Data Balancing:** The Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) is used to balance the dataset, ensuring that the model is trained on a representative sample of both normal and attack traffic [8]. This step is crucial for improving the model's ability to detect rare but critical attack events.
2. **Feature Selection:** The African Vulture Optimization Algorithm (AVOA) is employed for feature selection. This metaheuristic algorithm, inspired by the foraging behavior of vultures, excels at navigating complex, high-dimensional search spaces to identify the most relevant features for intrusion detection [9]. By reducing the dimensionality of the data, AVOA enhances the efficiency of the detection process and improves the model's performance.
3. **Deep Learning:** The system incorporates Long Short-Term Memory (LSTM) networks, a type of recurrent neural network known for its ability to capture temporal dependencies in sequential data. LSTM is particularly well-suited for analyzing network traffic, which often exhibits time-based patterns. The trained LSTM model, along with the optimized feature set, is deployed across the SDN switches, enabling distributed detection of DDoS attacks in real-time.

The primary contribution of this research is the development of an efficient, distributed intrusion detection system tailored for IoT networks. By integrating data balancing, intelligent feature selection, and deep learning within an SDN architecture, the proposed system addresses key challenges in IoT security, such as data imbalance, scalability, and detection accuracy. The system's distributed nature ensures that it can handle the high volume of traffic generated by IoT devices, while its advanced algorithms enable precise and timely detection of DDoS attacks.

In summary, this paper presents a comprehensive solution to the growing threat of DDoS attacks in IoT networks. By leveraging the strengths of SDN, machine learning, and deep learning, the proposed system offers a robust and scalable approach to enhancing the security of IoT ecosystems [10]. The findings of this research have significant

implications for the development of future intrusion detection systems, paving the way for more secure and resilient IoT infrastructures.

2. Innovation and contributions

The proposed method for detecting network attacks employs a distributed architecture within SDN switches. This method consists of the following steps:

1. **Data Balancing with SMOTE:** The SDN controller receives network traffic and balances the dataset using the Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE). This technique generates synthetic samples for minority classes (e.g., attack traffic), addressing data imbalance and preventing overfitting.
2. **Feature Selection with AVOA:** The controller utilizes the African Vulture Optimization Algorithm (AVOA) to select the most important features from the network traffic. AVOA excels in identifying optimal features due to its ability to perform both global and local searches simultaneously. Each feature vector is treated as a vulture, and the optimal feature vectors are selected using objective functions.
3. **Training the LSTM Deep Learning Model:** The controller employs an LSTM (Long Short-Term Memory) neural network to classify network traffic. LSTM is particularly effective for analyzing time-series data and avoids issues such as the vanishing gradient problem. The trained LSTM model, along with the optimal feature vector, is distributed to the SDN switches.
4. **Intrusion Detection in SDN Switches:** Each SDN switch analyzes network traffic using the optimal feature vector and the LSTM model to detect attacks. The switches can also share information about malicious IP addresses of attacking nodes and block malicious traffic.
5. **Information Sharing Among Switches:** SDN switches share information about malicious IP addresses among themselves, enabling more effective identification and mitigation of DDoS attacks.

Key Innovations of This Paper:

- **Data Balancing:** The use of SMOTE resolves data imbalance issues, improving model accuracy and robustness.
- **Intelligent Feature Selection:** The African Vulture Optimization Algorithm (AVOA) accurately selects important features, reducing data dimensionality and enhancing detection efficiency.
- **Use of LSTM:** The LSTM neural network is highly effective for detecting DDoS attacks due to its ability to process time-series data and capture temporal dependencies.
- **Distributed Architecture:** Distributing the intrusion detection process across SDN switches increases system speed, scalability, and efficiency.

This method integrates advanced techniques such as SMOTE, AVOA, and LSTM to create an efficient and accurate intrusion detection system for SDN networks.

3. Materials and Methods

In the proposed method, the SDN controller utilizes the optimal feature vector calculated by the African Vulture Optimization Algorithm (AVOA) as the input for the LSTM classifier. The LSTM neural network, a deep learning model, incorporates input, forget, and output gates, making it highly efficient for classifying network traffic. This network models hidden states and cell states using specific equations, enabling it to analyze time-series data and retain critical information in its memory. These characteristics make LSTM particularly effective for detecting network attacks.

One of the key advantages of the LSTM network is its ability to avoid issues such as vanishing gradients or exploding gradients, which are common in traditional recurrent neural networks (RNNs). Additionally, LSTM can process longer sequences of data, overcoming the limitations imposed by activation functions. By leveraging the AVOA algorithm to select important features, the accuracy and effectiveness of LSTM in detecting attacks are significantly improved.

The proposed process involves the following steps:

1. **Data Balancing:** Network traffic enters the SDN controller and is balanced using the SMOTE method.
2. **Feature Selection:** The AVOA algorithm is applied to select the optimal features, and the feature vectors are updated.
3. **Model Deployment:** The trained LSTM model, along with the optimal feature vector, is distributed to the SDN switches.
4. **Attack Detection:** The switches use the LSTM model to detect DDoS attacks and block malicious IP addresses. This method achieves high accuracy in attack detection by intelligently combining feature selection and deep learning.

4. Results and Discussion

The proposed intrusion detection system is implemented in an SDN architecture using Matlab and evaluated against similar methods. It utilizes 70% of the data for training and 30% for testing, with data normalized between 0 and 1. The system employs the AVOA for feature selection and LSTM for classification, achieving high

accuracy, sensitivity, and precision. The NSL-KDD dataset, which includes four main attack types, is used for evaluation. However, the dataset is highly imbalanced, with normal traffic dominating. To address this, the SMOTE method is applied to balance the data by generating synthetic samples for minority classes. Experimental results show that without balancing, the system achieves 96.68% accuracy, 95.52% sensitivity, and 95.44% precision. With SMOTE balancing, these metrics improve to 99.34%, 99.16%, and 98.93%, respectively. The system outperforms other feature selection algorithms like WOA, HHO, and GEO due to the superior intelligence and hierarchical mechanism of AVOA. Additionally, it surpasses deep learning methods such as CNN and CNN+LSTM, as well as hybrid swarm intelligence algorithms like Black Widow and Honey Bee and Grey Wolf Optimizer, in terms of accuracy. However, it slightly lags behind the majority voting-based method. In conclusion, the proposed method combines SMOTE, AVOA, and LSTM to create an efficient and accurate intrusion detection system. Data balancing and intelligent feature selection significantly enhance its performance, making it highly effective in detecting DDoS and other cyberattacks. This approach demonstrates the importance of addressing data imbalance and leveraging advanced optimization and deep learning techniques for robust network security.

5. Conclusion

The Internet of Things connects smart devices to generate and collect vast amounts of data, but it faces significant challenges from cyberattacks that disrupt services. To address this, the proposed method introduces an efficient intrusion detection system within a distributed SDN architecture. This system leverages the SMOTE algorithm to balance imbalanced datasets like NSL-KDD and uses the AVOA for feature selection to reduce network traffic dimensionality. The selected features are then used to train a LSTM neural network, enabling accurate attack detection. Evaluations show that the proposed method outperforms deep learning models like CNN and RNN, as well as feature selection algorithms such as WOA, HHO, and GWO, in terms of accuracy.

A key strength of the proposed method lies in its use of swarm intelligence, which enables parallel searching for optimal feature vectors. Parameters like population size and iteration count are carefully tuned to balance accuracy and computational efficiency. Future work could explore integrating majority voting mechanisms for attack detection in SDN switches and employing advanced neural networks like GRU and CNN to further enhance detection capabilities. This approach demonstrates the importance of combining data balancing, intelligent feature selection, and distributed architectures for robust IoT security.

6. Acknowledgement

The authors express their gratitude to the esteemed reviewers and all those who assisted in the execution of this research.

References

- [1] B. Kaur, S. Dadkhah, F. Shoeleh, E. C. P. Neto, P. Xiong, S. Iqbal, P. Lamontagne, S. Ray and A. A. Ghorbani, "Internet of things (IoT) security dataset evolution: Challenges and future directions," *Internet of Things.*, vol. 22, p. 100780, July. 2023, doi: [10.1016/j.iot.2023.100780](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100780).
- [2] H. Kareemullah, D. Najumnissa, M. M. Shajahan, M. Abhineshjayram, V. Mohan and S. A. Sheerin, "Robotic Arm controlled using IoT application," *Computers and Electrical Engineering.*, vol. 105, p. 108539, Jun. 2023, doi: [10.1016/j.compeleceng.2022.108539](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108539).
- [3] O. E. Tayfour, A. Mubarakali, A. E. Tayfour, M. N. Marsono, E. Hassan and A. M. Abdelrahman, "Adapting deep learning-LSTM method using optimized dataset in SDN controller for secure IoT," *Soft Computing.*, pp. 1-9, Mar. 2023, doi: [10.1007/s00500-023-08348-w](https://doi.org/10.1007/s00500-023-08348-w).
- [4] K. P. Reddy, K. R. Raju, K. C. Mouli and M. Praveen, "An intelligent network intrusion detection system for anomaly analyzer using machine learning for software defined networks," *In AIP Conference Proceedings*, vol. 2548, no. 1, July 2023, doi: [10.1063/5.0118479](https://doi.org/10.1063/5.0118479).
- [5] R. J. Gohari, L. Aliahmadipour and M. K. Rafsanjani, "Deep learning-based intrusion detection systems: A comprehensive survey of four main fields of cyber security," *Journal of Mahani Mathematical Research Center*, vol. 12, no. 2, pp. 289-324, May. 2023, doi: [10.22103/jmmr.2022.19961.1305](https://doi.org/10.22103/jmmr.2022.19961.1305).
- [6] A. Javadpour, P. Pinto, F. Ja'fari and W. Zhang, "DMAIDPS: a distributed multi-agent intrusion detection and prevention system for cloud IoT environments," *Cluster Computing*, vol. 26, no. 1, pp. 367-384, May. 2022, doi: [10.1007/s10586-022-03621-3](https://doi.org/10.1007/s10586-022-03621-3).

- [7] S. Javanmardi, M. Shojafar, R. Mohammadi, M. Alazab and A. M. Caruso, "An SDN perspective IoT-Fog security: A survey," *Computer Networks*, vol. 229, p. 109732, June. 2023, doi: [10.1016/j.comnet.2023.109732](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109732).
- [8] O. Habibi, M. Chemmakha, and M. Lazaar, "Imbalanced tabular data modelization using CTGAN and machine learning to improve IoT Botnet attacks detection," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 118, p. 105669, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2022.105669](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105669).
- [9] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh and S. Mirjalili, "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 158, p. 107408, 2021, doi: [10.1016/j.cie.2021.107408](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107408).
- [10] P. Kumari and A. K. Jain, "A comprehensive study of DDoS attacks over IoT network and their countermeasures," *Computers & Security*, vol. 127, p. 103096, April 2023, doi: [10.1016/j.cose.2023.103096](https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103096).

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

Author Contributions: All authors reviewed the manuscript.

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

شناسایی حملات DDoS در سوئیچ‌های SDN با رویکرد یادگیری عمیق و هوش گروهی

محسن اقبالی^۱ | محمد رضا ملاخلیلی میبدی^۲

چکیده:

در این مقاله، یک سیستم کارآمد تشخیص نفوذ برای اینترنت اشیا (IoT) ارائه شده است که به چالش گره‌های IoT آلوده به بدافزارهای مختلف و تبدیل شدن هر دستگاه هوشمند به گره حمله‌کننده باتنت می‌پردازد. همچنین، مسائل موجود در سیستم‌های تشخیص نفوذ فعلی، مانند انتخاب ویژگی‌های هوشمند، عدم تعادل مجموعه داده‌های آموزشی و تمرکزگرایی را نیز مد نظر قرار می‌دهد. سیستم پیشنهادی از معماری توزیع‌شده شبکه‌های نرم‌افزارمحور (SDN) بهره می‌برد. روش پیشنهادی با متعادل‌سازی مجموعه داده‌ها با استفاده از تکنیک SMOTE آغاز می‌شود. سپس، ویژگی‌های اساسی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، یک مدل یادگیری عمیق LSTM در کنترلر SDN آموزش داده می‌شود. سوئیچ‌های SDN از این مدل آموزش‌دیده برای تشخیص حملات استفاده می‌کنند. برای بهبود مقابله با حملات، آدرس‌های گره‌های حمله‌کننده بین سوئیچ‌های SDN به اشتراک گذاشته می‌شوند، که تشخیص سازگار را تضمین کرده و امکان جلوگیری موثر از حملات منع سرویس توزیع‌شده (DDoS) را در سراسر شبکه فراهم می‌کند. نتایج تجربی به دست آمده در MATLAB، با استفاده از مجموعه داده NSL-KDD، اثربخشی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد و دقت ۹۹.۳۴٪، حساسیت ۹۹.۱۶٪ و دقت ۹۸.۹۳٪ را در تشخیص حملات به دست می‌آورد. روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های انتخاب ویژگی مبتنی بر الگوریتم‌های WOA، HHO و AO، و روش‌های یادگیری عمیق مانند LSTM، RNN و CNN، به ویژه در تشخیص حملات DDoS، دارد.

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

m.eghbali@maybodiau.ac.ir

^۲گروه مهندسی کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران.

mollakhalili@maybodiau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*محمد رضا ملاخلیلی میبدی، استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران.
mollakhalili@maybodiau.ac.ir

موضوع اصلی:

اینترنت اشیا

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۴ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۱ آذر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۶ آذر ۱۴۰۲

کلید واژه‌ها: اینترنت اشیا، سیستم تشخیص نفوذ، حملات DDoS، شبکه SDN، یادگیری عمیق.

تازه های تحقیق:

- ارائه یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در بستر معماری SDN
- متعادل‌سازی مجموعه داده با استفاده از روش SMOTE در کنترلر کننده SDN
- ارائه یک نسخه انتخاب ویژگی و باینری از الگوریتم کرکس آفریقایی در تشخیص حملات
- تلفیق هوش گروهی و یادگیری عمیق LSTM در شبکه SDN برای تشخیص حملات در اینترنت اشیا

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

فناوری اینترنت اشیاء^۱ به حدی پیشرفت کرده است که بسیاری از افراد در زندگی روزمره به شکلی از دستگاه‌های هوشمند استفاده می‌کنند و یا با آن‌ها تعامل دارند. از مزایای اینترنت اشیاء می‌توان به خودکارسازی، بهبود بهره‌وری و استفاده مؤثر از منابع و موارد دیگر اشاره کرد [۱]. تعداد دستگاه‌های فیزیکی با قابلیت ارتباط از راه دور و حسگر متصل به اینترنت در چند سال گذشته افزایش یافته است. الگوی رشد اتصال به اینترنت دستگاه IoT نقطه اوج پیشرفت تحقیقات در ارتباطات بی‌سیم، محاسبات ابری و تجزیه و تحلیل داده‌ها در سال‌های اخیر و همچنین تعداد برنامه‌هایی است که اینترنت اشیاء ارائه می‌دهد، از جمله خانه‌های هوشمند، مراقبت‌های بهداشتی هوشمند، سامانه‌های حمل و نقل هوشمند، شبکه هوشمند و بسیاری دیگر [۲]. با این وجود، امنیت و حریم خصوصی ارائه شده توسط اینترنت اشیاء همچنان یک نگرانی است، زیرا این دستگاه‌ها بیشتر در معرض حملات امنیتی و آسیب‌پذیری هستند و دشمنان دائماً به دنبال راه‌های جدیدی برای به خطر انداختن دستگاه‌های ناامن و آسیب‌پذیر باز شده عمومی هستند. علاوه بر این، دستگاه‌های اینترنت اشیاء از طریق اینترنت به سرویس‌های ابری متصل می‌شوند تا به روزرسانی‌ها را ارسال کنند و پیشنهادهای یا توصیه‌هایی را برای انجام اقدامات هوشمندانه از طرف کاربران دستگاه اینترنت اشیاء دریافت کنند، بنابراین، وجود دستگاه‌های اینترنت اشیاء پیچیدگی بیشتری به مدیریت و نگهداری شبکه‌ها می‌افزاید و باعث ایجاد نسل جدیدی از شبکه‌های هوشمند شده است [۱ و ۲].

اخیراً خطر حملات سایبری به دلیل آسیب‌پذیری‌هایی در برخی دستگاه‌های متصل به اینترنت که اغلب آن‌ها را به اهداف آسانی تبدیل می‌کند، افزایش یافته است. امروزه حملات زیادی علیه اینترنت اشیاء انجام می‌شود که نمونه آن حملات رد سرویس خدمات توزیع شده^۲ است. در این حملات تعدادی زیادی گره در اینترنت اشیاء به بدافزار^۳ آلوده می‌شود و هر کدام از آن‌ها تبدیل به یک بات نت^۴ می‌شود. حجم حملات به شبکه اینترنت اشیاء در سال‌های اخیر افزایش یافته است و این حملات کاربران و سرویس‌های شبکه را تهدید می‌کنند [۳]. حملات انکار سرویس یکی از محبوب‌ترین و تهدیدکننده‌ترین حملات به امنیت شبکه است. این تهدید در نقض در دسترس بودن سرویس‌های شبکه با ممانعت از دسترسی کاربران مجاز به خدمات هدف نشان داده می‌شود. برخلاف حملات DoS که از یک منبع راه‌اندازی می‌شوند، حملات DDoS به شیوه‌ای توزیع شده از چندین منبع راه‌اندازی می‌شوند. مهاجمان یک حمله DDoS را انجام می‌دهند تا هدف را با سیل بی‌امان ترافیک مغلوب کنند که منجر به مصرف توان محاسباتی و همچنین ظرفیت شبکه پیوندهای شبکه می‌شود. اولین حمله DDoS در اوت ۱۹۹۹ در شبکه کامپیوتری دانشگاه مینه‌سوتا انجام شد. مهاجم توانست کامپیوترهای شبکه را برای حدود دو روز خاموش کند. در فوریه ۲۰۰۰، وبسایت‌های معروفی مانند eBay، Yahoo، Buy و Amazon مورد حمله DDoS قرار گرفتند. پس از آن، حملات DDoS از نظر فرکانس به رشد خود ادامه دادند و امروزه از دستگاه‌های IoT استفاده می‌کنند و روش‌های پیچیده جدیدی را برای فراگیر شدن اتخاذ می‌کنند [۴].

طبق گزارش‌های سازمان‌های امنیت شبکه در سال ۲۰۲۲، حملات DDoS به‌طور کلی نسبت به سال قبل افزایش یافته است. حملات لایه برنامه نظیر HTTP DDoS و Ransom DDoS در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال قبل به ترتیب ۱۱۱ درصد و ۶۷ درصد افزایش یافته است. حملات لایه شبکه در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال قبل ۹۷ درصد و در سه ماهه سوم نسبت به یک چهارم مشابه سال قبل ۲۴ درصد افزایش یافته است [۵]. از زمان ظهور حملات DDoS، جامعه تحقیقاتی با این تهدید از طریق چندین تکنیک شناسایی، از جمله: طرح ردیابی، سیستم خودکار فیلتر ترافیک، تشخیص مبتنی بر امضاء^۵ و تشخیص مبتنی بر ناهنجاری^۶ با این تهدید مقابله کرده‌اند [۶].

¹ Internet of Things (IoT)

² Distributed denial-of-service (DDoS)

³ Malware

⁴ Botnet

⁵ Signature-based detection

⁶ Anomaly-based detection

طرح ردیابی متکی بر یافتن مکان‌های منابع حمله است، درحالی‌که یک سیستم فیلتر ترافیک، مستقل از فیلتر ترافیک برای جداسازی ترافیکی استفاده می‌کند که مبدأ یا مقصد شبکه نیست. طرح تشخیص مبتنی بر امضا، پایگاه داده خود را از تهدیدات مخرب شناخته‌شده ایجاد می‌کند و ترافیک جدید را با آن پایگاه داده مقایسه می‌کند تا فعالیت‌های مخرب را شناسایی کند، درحالی‌که طرح تشخیص مبتنی بر ناهنجاری، رفتار شبکه را برای تشخیص فعالیت‌های مخرب از ترافیک عادی بر اساس یک آموزش نظارت می‌کند. در بیشتر مطالعات از روش‌های یادگیری ماشین^۱ و یادگیری عمیق^۲ برای توسعه سیستم‌های تشخیص نفوذ بر اساس ناهنجاری ترافیک شبکه استفاده می‌شود [۳].

یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌تواند برای تشخیص نفوذ در ترافیک شبکه به‌عنوان یکی از مؤثرترین تکنیک‌های تشخیص استفاده شود. به‌طور خاص، یادگیری عمیق در سال‌های اخیر عملکرد بسیار خوبی در تشخیص حملات از خود نشان داده است. از آنجایی‌که داده‌های واقعی غیرخطی، پیچیده و بسیار ابعادی هستند، ساخت مدل‌های یادگیری عمیق چندین نورون پنهان دارد و هر نورون یک تابع غیرخطی دارد. ساختار پیچیده مدل‌های یادگیری عمیق باعث می‌شود آن‌ها را در درک بهتر داده‌های پیچیده و غیرخطی در حوزه هدف بهتر کنند [۷]. یکی از چالش‌های مهم سامانه‌های تشخیص نفوذ به شبکه ساختار متمرکز سیستم تشخیص نفوذ است و اگر سیستم تشخیص نفوذ متمرکز ارائه شود چالش‌هایی برای آن وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها زمان زیاد برای تشخیص حملات در حجم بالایی از ترافیک است. عدم تمرکز در سیستم‌های تشخیص نفوذ باعث تقسیم‌کاری و بهبود زمان تشخیص حملات می‌شود. عدم تمرکز در سیستم‌های تشخیص نفوذ باعث می‌شود اگر یک سیستم تشخیص نفوذ مورد حمله واقع شود آنگاه سایر سیستم‌های تشخیص نفوذ می‌توانند حملات را تشخیص دهند [۸].

قابلیت مدیریت منابع شبکه متمرکز از مزایای شبکه‌های نرم‌افزار محور^۳ است که می‌توان از این معماری توزیع‌شده برای تشخیص حملات استفاده نمود. منابع شبکه را می‌توان به کمک این فناوری مدیریت کرد و ترافیک شبکه را می‌توان با استفاده از کنترلر شبکه‌های نرم‌افزار محور برای بهبود امنیت کنترل کرد [۹]. امروزه، شبکه‌های نرم‌افزار محور به‌خوبی برای پردازش نه‌تنها ترافیک شبکه پروتکل قدیمی بلکه دستگاه‌های اینترنت اشیاء که ترافیک شبکه را با پروتکل OpenFlow و برنامه‌های کنترل‌کننده شبکه‌های نرم‌افزار محور سفارشی‌شده تولید می‌کنند، مجهز است. اگرچه شبکه‌های نرم‌افزار محور می‌تواند برای مدیریت مسیریابی، مدیریت منابع، نظارت و مدیریت ترافیک، تشخیص امنیت و کاهش در محیط‌های اینترنت اشیاء استفاده شود، شبکه‌های نرم‌افزار محور نیز به دلیل وجود دستگاه‌های اینترنت اشیاء مستعد حملات جدید نظیر بات‌نت‌ها است. به‌عنوان مثال، دستگاه‌های اینترنت اشیاء پیکربندی‌شده پیش‌فرض با استفاده از بدافزار بات‌نت میرا^۴ در معرض خطر قرار می‌گیرند و ارتباطات فرمان و کنترل را با سرور مهاجم راه دور برای تبدیل شدن به بخشی از ارتش ربات آغاز می‌کنند. این ربات‌ها در معرض خطر را می‌توان برای ایجاد ترافیک شبکه مخرب و سیل کنترل‌کننده شبکه‌های نرم‌افزار محور استفاده کرد. منابع کنترل‌کننده یا اشباع منابع شبکه می‌تواند منجر به خاموش شدن کل شبکه با حملات انکار سرویس توزیع‌شده یا DDoS شود [۱۰]. احتمالات متعدد دیگری برای حمله وجود دارد، مسمومیت توپولوژی^۵ [۱۱]، به خطر انداختن کنترلر یا سوئیچ‌ها با آسیب‌پذیری‌های شناخته‌شده [۱۲]، یا حملات روز صفر^۶ [۱۳] از جمله آن‌ها است. هدف از سیستم تشخیص نفوذ کارآمد، تشخیص با نرخ خطای اندک و زمان کم برای تشخیص حملات است اما برای تشخیص حملات DDoS در اینترنت اشیاء چالش‌های وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- سیستم‌های تشخیص نفوذ اگر روی مجموعه داده نامتعادل آموزش داده شوند دارای دقت اندکی خواهند بود و از این جهت بهتر است که کلاس‌های اقلیت در مجموعه داده با روش‌های متعادل‌سازی افزایش داده شوند.
- معماری متمرکز برای تشخیص حملات توانایی تحلیل حجم ترافیک اینترنت اشیاء را ندارد و از این جهت بهتر است برای شبکه اینترنت اشیاء معماری‌های توزیع‌شده تشخیص نفوذ توسعه داده شود.

¹ Machine learning

² Deep learning

³ Software-defined networking (SDN)

⁴ Mirai

⁵ Topology poisoning

⁶ Zero-day attacks

▪ حجم و تعداد ویژگی‌های ترافیک شبکه اینترنت اشیاء قابل توجه است و در این میان فقط برخی از ویژگی‌های ترافیک شبکه اهمیت بیشتری دارند؛ لذا توسعه سیستم‌های تشخیص نفوذ با انتخاب ویژگی هوشمندانه دارای اهمیت بالایی است.

برای رفع چالش‌های فوق در این مقاله یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در بستر معماری شبکه‌های نرم افزار محور ارائه می‌شود. در مرحله اول ترافیک شبکه در کنترلر شبکه نرم افزار محور با روش SMOTE^۱ متعادل سازی می‌شود [۱۴]. در مرحله دوم از الگوریتم بهینه سازی کرکس آفریقایی^۲ که اخیراً ارائه شده است برای انتخاب ویژگی استفاده می‌شود [۱۵]. مزیت این الگوریتم هوش گروهی دقت بالا و مدل سازی پیچیده برای یافتن جواب‌های بهینه در فضاهای چندبعدی و پیچیده است. در مرحله سوم کنترل کننده بر اساس یادگیری عمیق LSTM یک مدل طبقه بندی ایجاد می‌کند و این مدل آموزش یافته به همراه بردار ویژگی بهینه را برای سوئیچ‌های شبکه نرم افزار محور ارسال می‌کند تا ترافیک حملات DDOS را شناسایی نمایند. هدف اصلی این مقاله ارائه یک سیستم تشخیص نفوذ کارآمد در بستر معماری شبکه نرم افزار محور و تشخیص دقیق و سریع حملات به اینترنت اشیاء است. سهم نویسندگان از این تحقیق شامل موارد ذیل است:

- ارائه یک سیستم تشخیص نفوذ توزیع شده در بستر معماری SDN
 - متعادل سازی مجموعه داده با استفاده از روش SMOTE در کنترلر کننده SDN
 - ارائه یک نسخه انتخاب ویژگی و باینری از الگوریتم کرکس آفریقایی در تشخیص حملات
 - تلفیق هوش گروهی و یادگیری عمیق LSTM در شبکه SDN برای تشخیص حملات در اینترنت اشیاء
- این مقاله در چند بخش تهیه و نگارش شده است. در بخش II کارهای مرتبط در زمینه تشخیص حملات DDOS مرور شده است. در بخش III، سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی در معماری SDN با الگوریتم بهینه سازی کرکس آفریقایی و یادگیری عمیق LSTM توسعه داده شده است. در بخش IV، روش پیشنهادی پیاده سازی و تحلیل می‌شود و با روش‌های مشابه مقایسه می‌شود. در بخش آخر با ۷ نتایج تحقیق و یافته‌های تحقیق به همراه پیشنهادها آتی ارائه می‌گردد.

۲- کارهای مرتبط

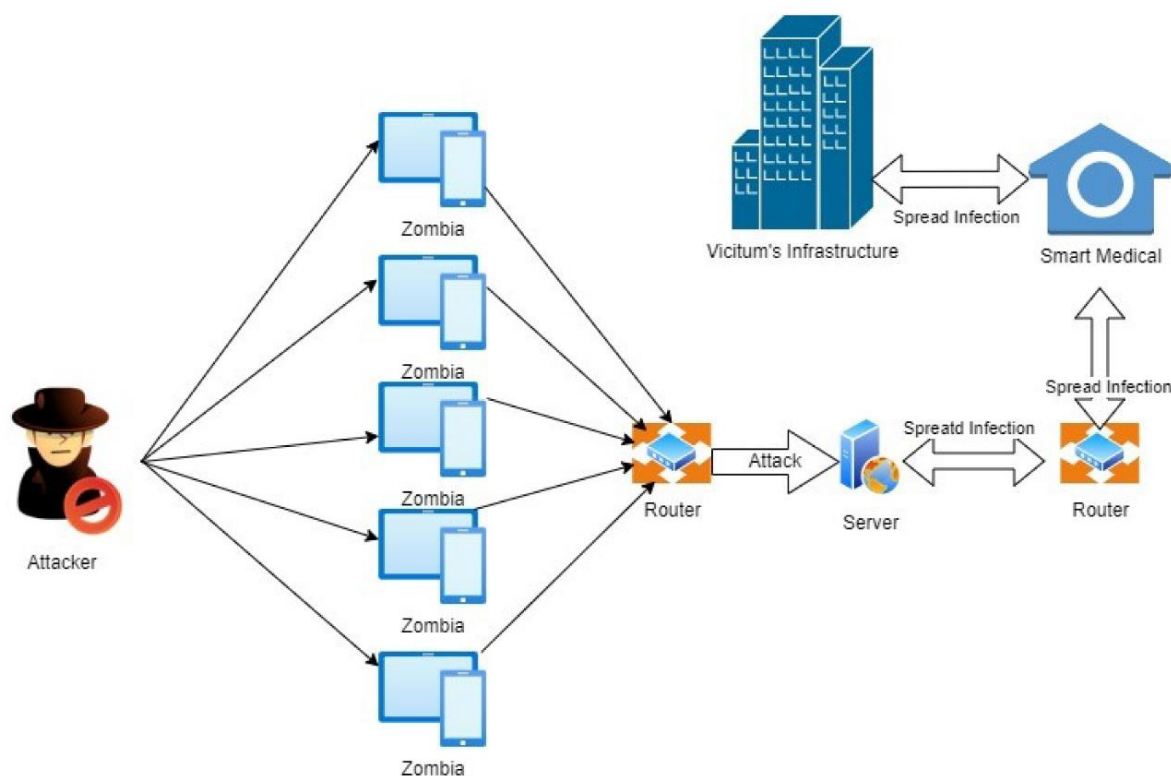
یک حمله انکار سرویس یک دستگاه یا شبکه را بیش از حد بارگذاری می‌کند و آن را غیرقابل دسترسی می‌کند. مهاجمان این کار را با ارسال ترافیکی بیشتر از میزان توانایی هدف انجام می‌دهند که باعث شکست آن و ناتوانی در ارائه خدمات به کاربران عادی خود می‌شود. یک شبکه به هم پیوسته و توزیع شده از ماشین‌ها باعث حمله DDOS می‌شود که می‌تواند شامل اینترنت اشیاء باشد و می‌تواند تحت تأثیر بدافزارهایی باشد که از راه دور کنترل می‌شوند. یک بات نت می‌تواند مستقیماً به هر ربات حمله کند و دستورالعمل‌ها را از راه دور ارسال کند. در یک بات نت، شبکه آسیب دیده یا سرور، هر ربات درخواستی را به یک آدرس IP مشخص ارسال می‌کند و باعث ایجاد یک DoS به ترافیک عادی می‌شود. جدا کردن ترافیک عادی از ترافیک مهاجم چالش برانگیز است. نمونه‌های رایج حملات DDOS عبارتند از سیل UDP، سیلاب SYN و تقویت DNS است. امروزه حملات DDOS بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد. گزارش‌های نشان می‌دهد که میانگین مدت حمله DDOS در سال ۲۰۲۲ بین ۵ تا ۱۰ ثانیه و ظرفیت آن‌ها در بیشتر موارد ۵ گیگا بیت در ثانیه در ۲۴ ساعت است [۱۶].

با رشد سریع اینترنت اشیاء، بات نت می‌تواند به راحتی مقیاس‌های گسترده تری از حملات را با استفاده از دستگاه‌های اینترنت اشیاء انجام دهد. ربات مخرب دستگاهی است که آلوده شده است و آن دستگاه می‌تواند یک دستگاه اینترنت اشیاء باشد. ربات‌های آلوده گاهی به هم متصل می‌شوند و بات نت‌هایی را تشکیل می‌دهند. سپس این بات نت‌ها فعالیت‌هایی مانند حملات DDOS را انجام می‌دهند. حمله DDOS شکلی از حمله است که در آن ترافیک مخرب هدف یا زیرساخت مرتبط را بارگذاری می‌کند. این امر با استقرار ربات‌ها، شبکه‌ای از رایانه‌های آلوده به بدافزار و سایر دستگاه‌های معروف به زامبی‌ها^۳ به دست می‌آید که مهاجم ممکن است از راه دور آن‌ها را مدیریت کند، همان طور که در شکل ۱، نشان داده شده است [۱۷].

¹ Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE)

² African Vultures Optimization Algorithm (AVOA)

³ Zombies

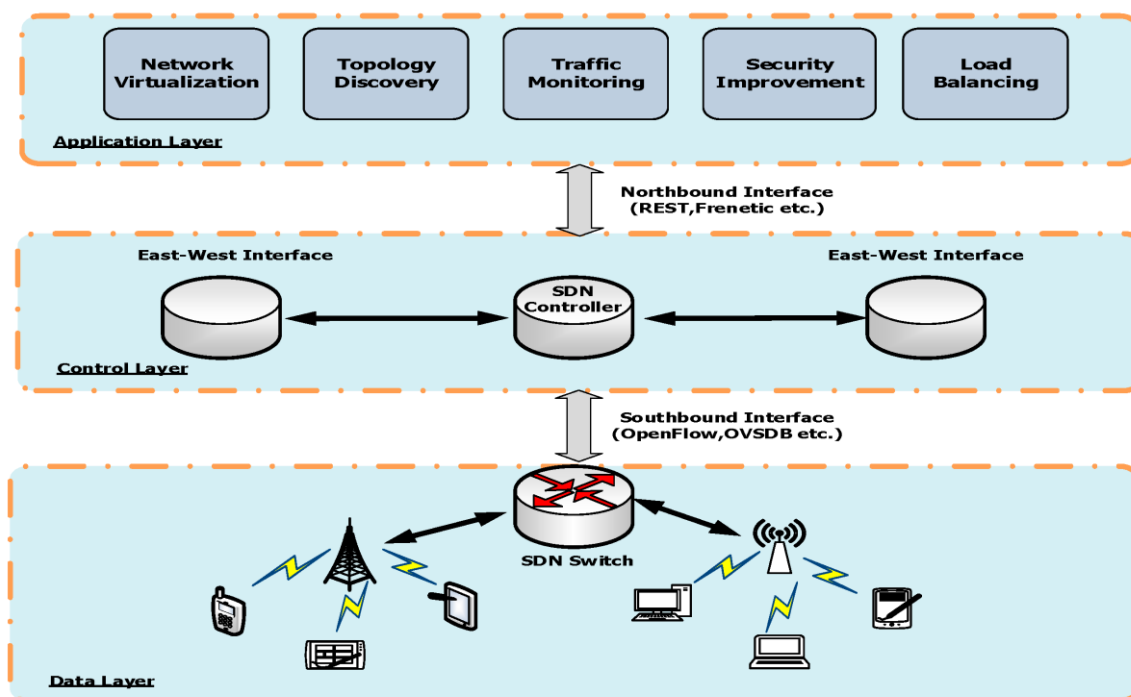


شکل ۱: مکانیزم وقوع حملات DDoS علیه سرویس‌های شبکه [۱۷]

Figure 1. The mechanism of DDoS attacks against network services [17]

حملات رد سرویس خدمات توزیع شده به طور قابل توجهی پهنای باند و اتصال را محدود می کند و باعث از کار افتادن تمام خدمات شبکه می شود. اکوسیستم های ابری بیشترین ضرر را به دلیل انکار خدمات و تخریب متحمل می شوند. هدف اصلی آسیب رساندن به دسترسی به منابع برای کاربران قانونی است. شناسایی ترافیک حمله در یک حمله DDoS به دلیل شباهت آن به ترافیک عادی دشوار است، زیرا آن ها مانند بسته های شبکه معمولی رفتار می کنند [۱۷]. یک معماری کاربردی برای ارائه سیستم های تشخیص نفوذ، معماری SDN است. مزیت حالت توزیع شده این معماری، در صورتی که سیستم تشخیص نفوذ در آن مستقر شود از نوع توزیع شده خواهد بود. SDN فناوری جدیدی است که مدیریت شبکه را با ساختار پویا و قابل برنامه ریزی خود تسهیل می کند. در SDN صفحات کنترل و داده از یکدیگر تقسیم می شوند و مدیریت شبکه توسط یک کنترل کننده مرکزی انجام می شود و بنابراین کنترل کننده ای که می تواند کل شبکه را از یک نقطه مدیریت کند، می تواند به سرعت سیاست های مختلف شبکه را در کل شبکه اعمال کند. شکل ۲، ساختار لایه ای محیط SDN را نشان می دهد.

با این حال، این رویکرد جدید در حال ظهور علاوه بر مزایایی که ارائه می دهد، مشکلات امنیتی را نیز به همراه دارد. علاوه بر حملاتی که در ساختارهای شبکه سنتی با آن مواجه می شوند، SDN نیز در معرض حملات خاص خود قرار دارد. شاید خطرناک ترین این حملات، حملات به کنترلر باشد، زیرا مهاجمی که کنترلر را تصاحب می کند، می تواند توانایی مدیریت یا اختلال در تمام ترافیک شبکه را داشته باشد. حملات DDoS که در آن کاربران از دسترسی به خدمات شبکه محروم می شوند، در رأس حملات به کنترل کننده قرار دارند. در ادامه این بخش تعدادی از کارهای مرتبط در زمینه ی تشخیص نفوذ در اینترنت اشیاء و با رویکرد شبکه SDN مرور می شود.



شکل ۲: معماری SDN و لایه‌های آن [۱۸]
Figure 2. SDN architecture and its layers [18]

در [۱۹] یک رویکرد پیش‌بینی و تشخیص حملات DDoS در محاسبات لبه با یادگیری عمیق در شبکه SDN را پیشنهاد دادند. آن‌ها یک چارچوب جدید به نام CoWatch برای پیش‌بینی و تشخیص مشترک حملات DDoS در سناریوهای محاسبات لبه پیشنهاد دادند. آن‌ها مدل LSTM را برای طراحی الگوریتمی برای پیش‌بینی مشترک و تشخیص حملات DDoS بررسی و ایجاد کردند. نتایج آزمایش بر روی تعدادی از مجموعه داده‌ها عملکرد امیدوارکننده CoWatch را در اثربخشی و کارایی نشان می‌دهد. در [۲۰] چارچوب امن SDN-IoT برای تشخیص حملات DDoS با استفاده از یادگیری عمیق را پیشنهاد دادند. چارچوب پیشنهادی از مجموعه داده CICDDoS2019 برای شناسایی حملات بازتابی و حملات بهره‌برداری در TCP, UDP و ICMP آزمایش می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثر حملات DDoS را شناسایی و کاهش دهد درحالی‌که از منابع CPU به‌طور مؤثر و در زمان کوتاه‌تری در مقایسه با رویکردهای موجود استفاده می‌کند. در [۲۱] برای تشخیص حملات DDoS یک روش یادگیری گروهی در جریان داده برای دستگاه‌های سنجش هوشمند IoT ارائه دادند. روش آن‌ها می‌تواند مجموعه داده‌های غیر سلسله‌مراتبی و نامتعادل مشابه حملات Mirai را مدیریت و شناسایی کنند. در [۲۲] یک رویکرد جدید را پیشنهاد دادند که یک مدل شبکه عصبی کانولوشنال مرتب‌سازی نرم را با ضریب پرت محلی و تشخیص ناهنجاری مبتنی بر جداسازی با استفاده از مدل‌های گروه‌های نزدیک‌ترین همسایه که از روش‌های یادگیری نظارت‌شده و بدون نظارت استفاده می‌کنند، ترکیب می‌کند. ارزیابی‌ها نشان داد دقت روش آن‌ها در تشخیص حملات می‌تواند تا ۹۸/۹۴ درصد افزایش یابد و حملات ناشناخته را تشخیص دهد. در [۲۳] یک شبکه عصبی همبستگی برای تشخیص حمله DDoS در سیستم اینترنت اشیاء ارائه دادند. آن‌ها به‌طور گسترده معماری‌های پیشنهادی را با ارزیابی پنج مدل شبکه عصبی مختلف که بر روی مجموعه داده‌ای که از یک سیستم اینترنت اشیاء دارای ۴۰۶۰ گره در دنیای واقعی آموزش دادند. آزمایش‌ها نشان دادند حافظه کوتاه‌مدت و یک مدل مبتنی بر ترانسفورماتور، در ارتباط با معماری‌هایی که از اطلاعات همبستگی گره‌های اینترنت اشیاء استفاده می‌کنند، عملکرد بالاتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه می‌کنند. در [۲۴] تشخیص مبتنی بر تغییرات آنتروپی در حملات DDoS بررسی شده است. هدف آن‌ها دستیابی به شناسایی حملات DDoS با روش تشخیص مبتنی بر قانون با استفاده از معیارهای

تئوری اطلاعات است. تغییر در آنتروپی ویژگی‌های ترافیک فراتر از یک آستانه، نشانگر تغییر در تراکم ترافیک به یک شبکه است. در این مقاله، ما یک تحلیل عملکرد از پارامترهای مختلف مرتبط با تشخیص حملات DDoS مبتنی بر تغییرات آنتروپی ارائه می‌شود. در [۲۵] یک رویکرد طبقه‌بندی تعبیه‌شده برای تشخیص حملات DDoS مبتنی بر ترافیک اینترنت اشیاء ارائه شده است. عملکرد مدل آن‌ها با اجرای چهار سناریو مختلف مبتنی بر ترافیک اینترنت اشیاء ارزیابی می‌شود. در این پژوهش مجموعه داده Bot-IoT در دسترس عموم برای طراحی و اعتبارسنجی رویکرد طبقه‌بندی چند کلاسه پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی ۸۴/۴ درصد نرخ کاهش ویژگی و تقریباً ۵/۱۹ درصد دقت طبقه‌بندی بالاتر از رویکردهای موجود ارائه می‌کند. در [۲۶] یک روش انتخاب ویژگی برای تشخیص حمله رد سرویس خدمات توزیع‌شده با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین ارائه دادند. در این پژوهش ویژگی‌های مهم دو مجموعه داده NF_BoT_IoT و NF_ToN_IoT با دو روش انتخاب ویژگی Information Gain و Gain Ratio انتخاب می‌شوند و با استفاده از الگوریتم Ranker رتبه‌بندی می‌شوند. سپس این مجموعه داده‌ها با استفاده از چهار الگوریتم مختلف مانند شبکه باور^۱، نزدیک‌ترین همسایه، جدول تصمیم‌گیری و جنگل تصادفی آزمایش می‌شوند. آزمایش‌ها نشان داد بهترین طبقه‌بندی کلی شبکه بیزین با دقت ۹۷/۵۰۶ درصد و ۹۰/۶۷ درصد برای هر دو مجموعه داده NF_BoT_IoT و NF_ToN_IoT است. در [۲۷] یک روش شناسایی حملات DDoS دستگاه‌های IoT توسط Bi-LSTM-CNN ارائه دادند. این مقاله یک حافظه کوتاه‌مدت دوسویه مبتنی بر توجه ترکیبی با شبکه‌های عصبی کانولوشن برای شناسایی حملات DDoS در لایه برنامه و SDN پیشنهاد می‌کند. آن‌ها چندین مدل یادگیری ماشین دیگر مانند رگرسیون لجستیک^۲، درخت‌های تصمیم^۳، جنگل‌ها تصادفی^۴، ماشین‌های بردار پشتیبان^۵، نزدیک‌ترین همسایگان^۶، تقویت گرادینان شدید^۷، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸، CNN، LSTM، CNN-LSTM را برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی خود به کار گرفتند. تجزیه و تحلیل تجربی روی مجموعه داده‌های چندگانه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی طبقه‌بندی را به‌طور مؤثر با دقت ۹۹/۷۴ درصد انجام می‌دهد.

۳-روش پیشنهادی

روش پیشنهادی برای تشخیص حملات به شبکه از معماری توزیع‌شده در سوئیچ‌های SDN استفاده می‌شود و روش پیشنهادی دارای اجزای ذیل است:

- کنترل‌کننده در ابتدا ترافیک شبکه را دریافت نموده و با روش SMOTE آن را متعادل‌سازی می‌کند.
 - کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقای می‌تواند ویژگی‌های مهم ترافیک شبکه را تشخیص دهد و آن را برای کاهش ابعاد ترافیک شبکه استفاده نماید.
 - کنترل‌کننده می‌تواند روش یادگیری عمیق مانند LSTM را آموزش دهد و این مدل آموزش‌یافته را برای سوئیچ-های SDN ارسال کند.
 - کنترل‌کننده بردار ویژگی بهینه و مدل آموزش‌یافته LSTM را برای سوئیچ‌های SDN ارسال می‌کند و هر سوئیچ می‌تواند بر اساس الگوی بردار ویژگی و مدل آموزش‌یافته LSTM اقدام به تشخیص نفوذ نماید.
 - سوئیچ‌های SDN می‌توانند IP های مخرب گره‌های حمله‌کننده را باهم به اشتراک بگذارند.
- یک بخش مهم روش پیشنهادی متعادل‌سازی مجموعه داده تشخیص نفوذ است تا مدل‌سازی و دقت یادگیری افزایش داده شود. در روش پیشنهادی برای افزایش تعداد نمونه‌های اقلیت در مجموعه داده از روش SMOTE استفاده می‌شود تا تعداد نمونه‌های حمله که کمتر از تعداد نمونه‌های عادی است افزایش یابد. SMOTE نمونه‌های مصنوعی را برای کلاس اقلیت ایجاد می‌کند تا

¹ Bayesian Network

² Logistic regression

³ Decision trees

⁴ Random forest

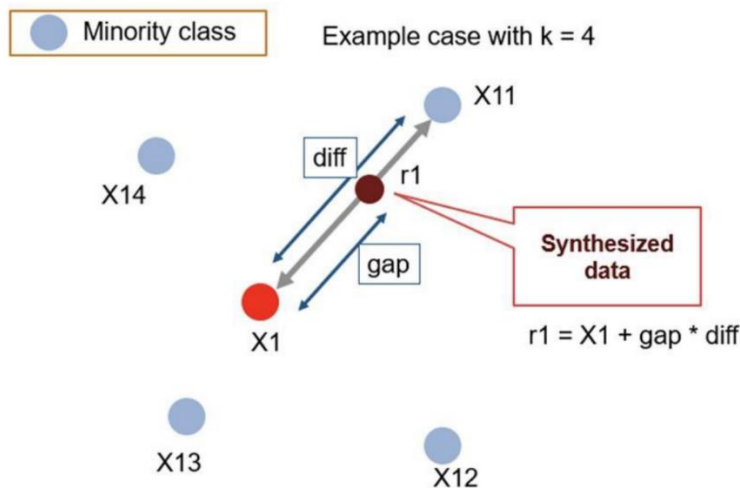
⁵ Support vector machines

⁶ Nearest neighbors

⁷ Extreme Gradient Boosting

⁸ Artificial Neural Networks

مجموعه داده را متعادل کند. این رویکرد می‌تواند مشکل اضافه برآزش را به دلیل نمونه‌گیری بیش‌ازحد تصادفی حل کند. ابتدا، SMOTE نمونه‌های داده مصنوعی را با استفاده از روش k -نزدیک‌ترین همسایه ایجاد می‌کند. با انتخاب تصادفی داده‌ها از کلاس اقلیت شروع می‌شود و الگوریتم k نزدیک‌ترین همسایه‌ها را برای داده‌ها تنظیم می‌کند. سپس داده‌های ترکیبی بین داده‌های تصادفی و داده‌های k نزدیک‌ترین همسایگان به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. شکل ۳، روش کار SMOTE را نشان می‌دهد.



شکل ۳: روش تولید نمونه‌های مصنوعی با SMOTE [۲۸]

Figure 3. The method of producing synthetic samples with SMOTE [28]

بعد از متعادل‌سازی مجموعه داده در کنترل‌کننده با روش SMOTE، در مرحله فاز انتخاب ویژگی با الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی انجام می‌شود. در این مرحله هر بردار ویژگی یک عضو الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی است و توسط این الگوریتم بهینه‌ترین بردار ویژگی کشف می‌شود. دلایل استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی در انتخاب ویژگی به شرح ذیل است:

- الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی در ژورنال Elsevier چاپ‌شده و یک مقاله معتبر در زمینه‌ی هوش گروهی است. این الگوریتم اخیراً ارائه شده است و با توجه به آزمایش‌های نویسندگان، الگوریتم آن‌ها از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مطرح نظیر ژنتیک و الگوریتم ذرات دارای خطای کمتری در یافتن جواب بهینه است.
- الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی دارای مدل‌سازی قوی است و جستجوی سراسری و محلی را هم‌زمان انجام می‌دهد. پیروی راه‌حل‌های مسئله از چند راه‌حل بهینه دریافتن جواب بهینه، باعث شده نوعی سلسله مراتب رهبری دریافتن جواب بهینه در این الگوریتم وجود داشته باشد و از این جهت الگوریتم بسیار رفتار هوشمندانه‌ای دارد.
- اگر یکی از راه‌حل‌ها در نزدیکی بهینه محلی باشد توسط دو راه‌حل شایسته با احتمال زیاد از بهینه محلی دور می‌شود و احتمال همگرایی الگوریتم به بهینه‌های محلی کم است.
- به دلیل مدل‌سازی قابل‌توجه و دقیق الگوریتم بهینه‌سازی کرکس آفریقایی، این الگوریتم برای حل مسائلی با ابعاد بالا مانند انتخاب ویژگی بسیار کارآمد است.

در روش پیشنهادی هر بردار ویژگی یک سطر ماتریس جمعیت الگوریتم کرکس یا AVOA و مطابق رابطه ۱، است.

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \cdots & \cdots & P_{1,j} & P_{1,d-1} & P_{1,d} \\ P_{2,1} & \cdots & \cdots & P_{2,j} & P_{2,d-1} & P_{2,d} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n-1,1} & \cdots & \cdots & \cdots & P_{n-1,d-1} & P_{n-1,d} \\ P_{n,1} & \cdots & \cdots & P_{n,j} & P_{n,d-1} & P_{n,d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این ماتریس جمعیت، هر ستون یک ویژگی مرتبط با تشخیص نفوذ است و در اینجا d ابعاد مسئله یا تعداد ویژگی‌های مجموعه داده است. اگر از مجموعه داده NSL-KDD استفاده شود مقدار d برابر با ۴۱ است. در این رابطه، n تعداد بردارهای ویژگی است. در این ماتریس $p_{i,j}$ نشان‌دهنده بردار ویژگی i و j بردار ویژگی i است. هر بردار ویژگی برای ارزیابی نیاز به یک روش طبقه‌بندی دارد تا مشخص کند بردار ویژگی تا چه اندازه خطا در تشخیص نفوذ دارد. در روش پیشنهادی می‌توان از روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم‌گیری برای ارزیابی بردار ویژگی استفاده نمود. باید توجه شود که طبقه‌بندی‌کننده نهایی در این مقاله، روش LSTM است؛ اما در فاز ارزیابی بردارهای ویژگی از درخت تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. هر بردار برای ارزیابی از تابع هدف رابطه ۲، استفاده می‌کند.

$$F(P_i) = \alpha \cdot E + \beta \cdot \frac{\|P_i\|}{\|d\|} \quad (2)$$

در تابع هدف E خطای تشخیص حملات به شبکه توسط بردار ویژگی P_i با استفاده از درخت تصمیم‌گیری است و $\|P_i\|$ تعداد ویژگی انتخاب‌شده توسط بردار ویژگی P_i است. در این رابطه، α و β به ترتیب ضرایب خطای تشخیص نفوذ و کاهش ابعاد مسئله است. در ساخت درخت تصمیم‌گیری با الگوریتم C5.0 نرخ بهره اطلاعات را به‌عنوان استاندارد برای تعیین بهترین متغیر گروه بندی و نقطه تقسیم‌بندی می‌گیرد و اندازه سود و هزینه به دست آوردن اطلاعات را در نظر می‌گیرد. هر چه نرخ به دست آوردن اطلاعات متغیرها بیشتر باشد، بهتر است از آن‌ها به‌عنوان متغیرهای گروه‌بندی استفاده شود. متفاوت از الگوریتم C5.0، درخت CART ضریب جینی را به‌عنوان ویژگی تقسیم انتخاب می‌کند و ویژگی را با بزرگ‌ترین ضریب جینی برای تقسیم انتخاب می‌کند. در روش پیشنهادی از درخت تصمیم‌گیری با الگوریتم C5.0 برای ارزیابی بردارهای ویژگی استفاده می‌شود زیرا نرخ بهره اطلاعات در آن بکار رفته که درواقع اهمیت ویژگی‌ها را در خود نهفته دارد. بردارهای ویژگی که این تابع را بیشتر کمینه نمایند به‌عنوان بردار ویژگی بهینه در نظر گرفته می‌شوند. هر کرکس برای انتخاب یک سردسته و حرکت به سمت آن از احتمال رابطه ۳، استفاده می‌کند.

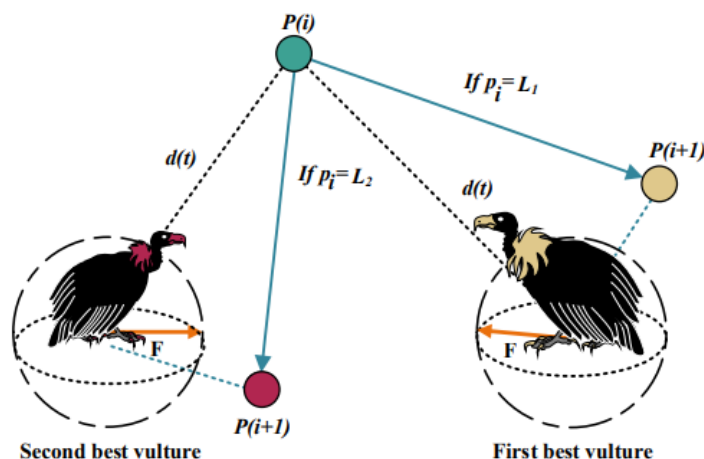
$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

در اینجا F_i شایستگی یک بردار ویژگی یا کرکس معادل آن است و P_i نیز احتمال حرکت یک کرکس به سمت یکی از دو کرکس بهینه است. در شکل ۴ حرکت یک کرکس و انتخاب یکسر دسته و پرواز به سمت آن را نشان می‌دهد. کرکس‌ها در حین پرواز و جستجو پیرامون دو جواب بهینه می‌توانند گرسنه شوند و برای غذا با سایر کرکس‌ها مبارزه کنند. برای مدل‌سازی رفتار گرسنگی و حمله از رابطه ۴ و ۵ استفاده می‌شود.

$$t = h \times \left(\sin^w \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{iter}{Maxlter} \right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{iter}{Maxlter} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

$$F = (2 \times rand + 1) \times z \times \left(1 - \frac{iter}{Maxlter} \right) + t \quad (5)$$

در رابطه ۴ و ۵، $iter$ شمارنده تکرار الگوریتم و $Maxlter$ حداکثر شماره تکرار الگوریتم است. z یک عدد تصادفی یکنواخت در بازه $[-1, +1]$ است. h یک عدد تصادفی در بازه $[-2, +2]$ است. w یک ضریب وزنی بین ۱ تا ۲ برای تأثیر افزایش میزان گرسنگی و حمله کرکس‌ها است. می‌توان فرض کرد که دو بردار ویژگی در تشخیص نفوذ به ترتیب با $BestVulture_1$ و $BestVulture_2$ نشان داده می‌شود. بر اساس مقدار F می‌توان استراتژی حمله به سمت غذا را تشخیص داد. اگر $|F| > 1$ باشد یک کرکس فقط در آسمان می‌چرخد و سیر است و به دنبال غذا نیست. اگر $|F| \leq 1$ باشد کرکس گرسنه است و دارای رفتاری تهاجمی برای حمله به سمت طعمه است.



شکل ۴: پرواز یک کرکس به سمت یکی از دو کرکس بهینه جمعیت به صورت تصادفی
Figure 4. Flight of a vulture towards one of the two optimal population vultures randomly

اگر $|F| > 1$ باشد کرکس‌ها جستجوی اکتشافی را انجام می‌دهند. در این حالت یک عدد تصادفی بین صفر و یک برای یک کرکس در نظر گرفته می‌شود و اگر کوچک‌تر از P_i باشد از رابطه ۶ و ۷ و اگر بیشتر از p_1 باشد از رابطه ۸، استفاده می‌شود.

$$P(i+1) = R(i) - D(i) \times F \quad (6)$$

$$D(i) = |X \times R(i) - P(i)| \quad (7)$$

در اینجا $P(i)$ موقعیت یک بردار ویژگی و $P(i+1)$ موقعیت جدید همان بردار ویژگی یا کرکس است. X یک ضریب تصادفی بین صفر و دو برای حمله است. $R(i)$ یکی از بردارهای ویژگی $BestVulture_1$ و $BestVulture_2$ است که تصادفی در نظر گرفته می‌شود.

$$P(i+1) = R(i) - F + rand((ub - lb)) \quad (8)$$

در رابطه ۸، lb و ub به ترتیب محدوده بالا و پایین یک راه‌حل است. اگر $|F| \leq 1$ باشد در این حالت دو وضعیت پیش خواهد آمد در حالت اول اگر $|F| \geq 0/5$ باشد و عدد تصادفی کمتر از p_2 باشد از رابطه ۹ برای به‌روزرسانی بردارهای ویژگی استفاده می‌شود و اگر بیشتر از مقدار p_2 باشد از رابطه ۹، استفاده می‌شود.

$$P(i+1) = D(i) \times (F + rand) - d(t) \quad (9)$$

$$d(t) = R(i) - (P(i)) \quad (10)$$

در رابطه ۹ و ۱۰، $d(t)$ فاصله یک بردار ویژگی یا یک کرکس از یکی از دو بردار ویژگی بهینه $BestVulture_1$ یا $BestVulture_2$ است. اگر $|F| \geq 0/5$ باشد و عدد تصادفی ایجادشده برای هر کرکس و بردار ویژگی بیشتر از p_2 باشد برای به‌روزرسانی بردارهای ویژگی یا راه‌حل‌های مسئله از رابطه ۱۱، ۱۲ و ۱۳ استفاده می‌شود.

$$S_1 = R(i) - \left(\frac{rand \times P(i)}{2\pi}\right) \times \cos(P(i)) \quad (11)$$

$$S_2 = R(i) - \left(\frac{rand \times P(i)}{2\pi}\right) \times \sin(P(i)) \quad (12)$$

$$P(i+1) = R(i) - \left(\frac{S_1 + S_2}{2}\right) \quad (13)$$

اگر مقدار $|F| < 0/5$ باشد و از طرفی عدد تصادفی تولیدشده برای هر بردار ویژگی کمتر از پارامتر p_3 باشد برای به‌روزرسانی بردارهای ویژگی از رابطه ۱۴، ۱۵ و ۱۶ استفاده می‌شود.

$$A_1 = BestVulture_1(i) - \left(\frac{BestVulture_1 \times P(i)}{BestVulture_1 \times P(i)^2} \right) \times F \quad (14)$$

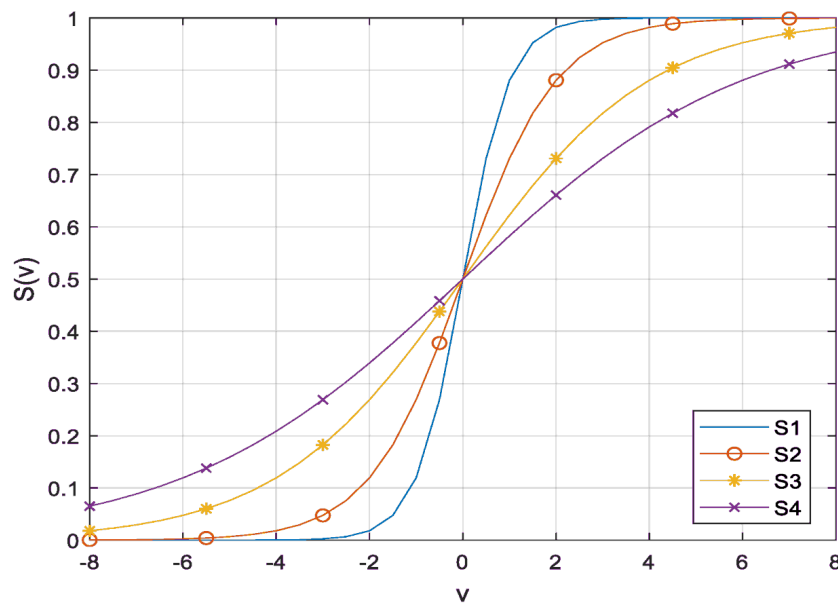
$$A_2 = BestVulture_2(i) - \left(\frac{BestVulture_2 \times P(i)}{BestVulture_2 \times P(i)^2} \right) \times F \quad (15)$$

$$P(i+1) = \frac{(A_1 + A_2)}{2} \quad (16)$$

اگر مقدار $|F| < 0/5$ باشد و عدد تصادفی تولیدشده برای هر بردار ویژگی بیشتر از $p3$ باشد برای به‌روزرسانی هر یک از بردارهای ویژگی از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود.

$$p(i+1) = R(i) - |d(t) \times F \times Levy(d)| \quad (17)$$

در اینجا $Levy(d)$ یک تابع پروازی در d بعد است و $|d(t)|$ قدر مطلق فاصله یک راه‌حل از یکی از راه‌حل‌ها بهینه مسئله است. بردارهای ویژگی که توسط الگوریتم AVOA محاسبه می‌شوند نیاز به باینری کردن دارند لذا برای باینری نمودن آن‌ها از توابع نگاشت S و V استفاده می‌شود که نمونه آن‌ها در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است. در ابتدا می‌توان بردارهای ویژگی را توسط روابط ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ با استفاده از توابع S نرمالیزه نمود و یا توسط روابط ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۵ با تابع V بردارهای ویژگی را بین صفر و یک نرمالیزه نمود. بعد از نرمال‌سازی بردارهای ویژگی توسط روابط ۲۶ و ۲۷ می‌توان بردارهای ویژگی را با آستانه مرتبط با تابع S و V به مقادیر صفر یا یک نگاشت داد و آن را باینری نمود. در این رابطه‌ها $V_{l,d}$ به نشان‌دهنده مؤلفه d بردار ویژگی l است. مقادیر r_1 تا r_5 نیز اعداد تصادفی بین صفر و یک است [۲۹].



شکل ۵: تابع تبدیل S برای باینری کردن بردارهای ویژگی به‌روزرسانی شده توسط الگوریتم AVOA [۲۹]

Figure 5. S transform function to binarize feature vectors updated by AVOA algorithm [29]

$$S1(v_{l,d}(t+1)) = \frac{\pi_{\eta}}{1 + \exp(-2v_{l,d}(t+1))} \quad (18)$$

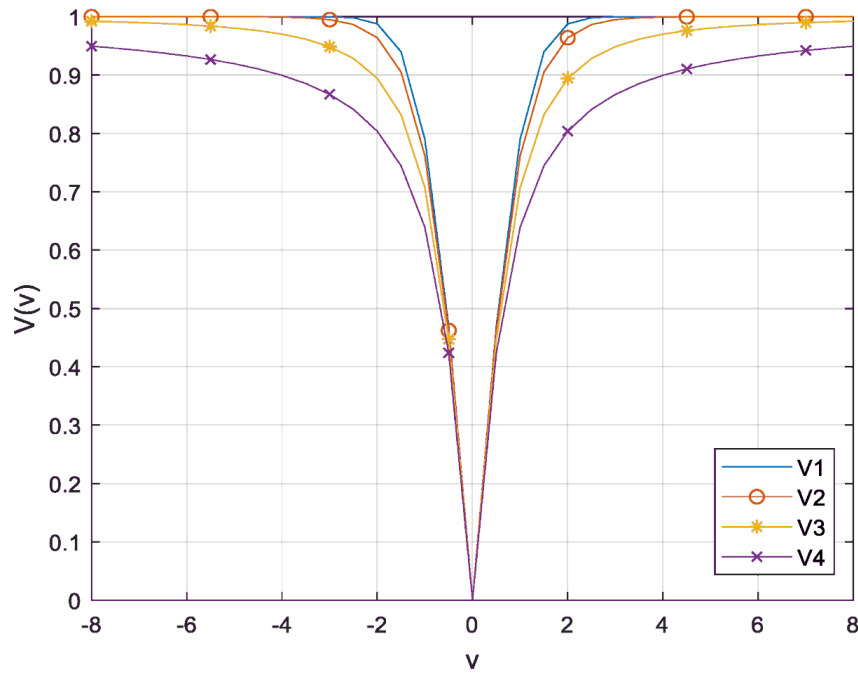
$$S2(v_{l,d}(t+1)) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{l,d}(t+1))} \quad (19)$$

$$S3(v_{l,d}(t+1)) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{l,d}(t+1)/2)} \quad (20)$$

$$S3(v_{l,d}(t+1)) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{l,A}(t+1)/3)} \quad (21)$$

$$V1(v_{l,A}(t+1)) = \left| \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} v_{l,d}(t+1) \right) \right| \quad (22)$$

$$V2(v_{l,d}(t+1)) = \left| \tanh(v_{l,d}(t+1)) \right| \quad (23)$$



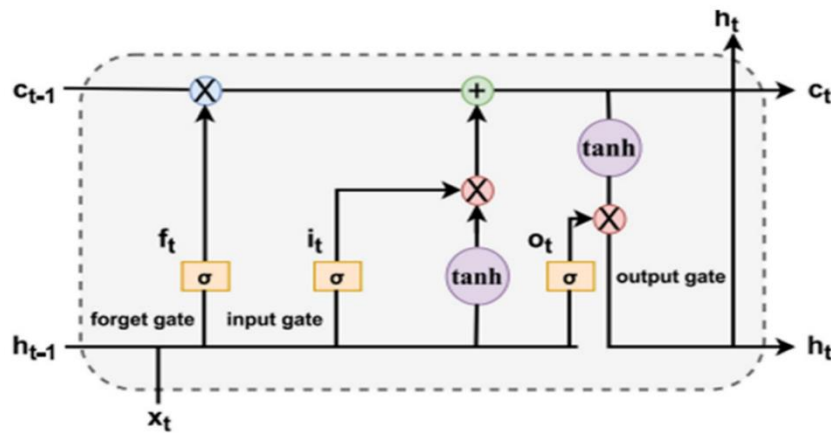
شکل ۶: تابع تبدیل V برای باینری کردن بردارهای ویژگی به‌روزرسانی شده توسط الگوریتم AVOA [۲۹]
Figure 6. V transform function to binarize feature vectors updated by AVOA algorithm [29]

$$V3(v_{l,A}(t+1)) = \left| \frac{v_{l,A}(t+1)}{\sqrt{1 + (v_{l,A}(t+1))^2}} \right| \quad (24)$$

$$V4(v_{l,A}(t+1)) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\pi}{2} v_{l,A}(t+1) \right) \right| \quad (25)$$

$$x_{l,d}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{if } S(v_{l,A}(t+1)) > r_4 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$x_{l,d}(t+1) = \begin{cases} 1 - x_{l,d}(t), & \text{if } V(v_{l,A}(t+1)) \geq r_5 \\ x_{l,d}(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (27)$$



شکل ۷: ساختار شبکه عصبی LSTM
Figure 7. LSTM neural network structure

در روش پیشنهادی کنترلر SDN، بردار ویژگی بهینه‌ای که توسط الگوریتم AVOA محاسبه می‌شود نوع ورودی طبقه‌بندی کننده LSTM را تعیین می‌کند. شبکه عصبی LSTM یک روش یادگیری عمیق است که مطابق شکل ۷، دارای گیت‌های فراموشی، خروجی و ورودی است و یک ابزار کارآمد برای طبقه‌بندی ترافیک شبکه است. در معادلات ۲۸، ۲۹، ۳۰ و ۳۱، مدل‌سازی شبکه عصبی یادگیری عمیق LSTM را نشان داده است [۳۰].

$$i_t = \sigma(W_{xi}x_t + W_{hi}x_{t-1} + W_{ci}c_{t-1} + b_i) \quad (28)$$

$$f_t = \sigma(W_{xf}x_t + W_{hf}h_{t-1} + W_{cf}c_{t-1} + b_f) \quad (29)$$

$$o_t = \sigma(W_{xo}x_t + W_{ho}h_{t-1} + W_{co}c_{t-1} + b_o) \quad (30)$$

$$c_t = f_t c_{t-1} + i_t \tanh(W_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_c) \quad (31)$$

$$h_t = o_t + \tanh(c_t) \quad (32)$$

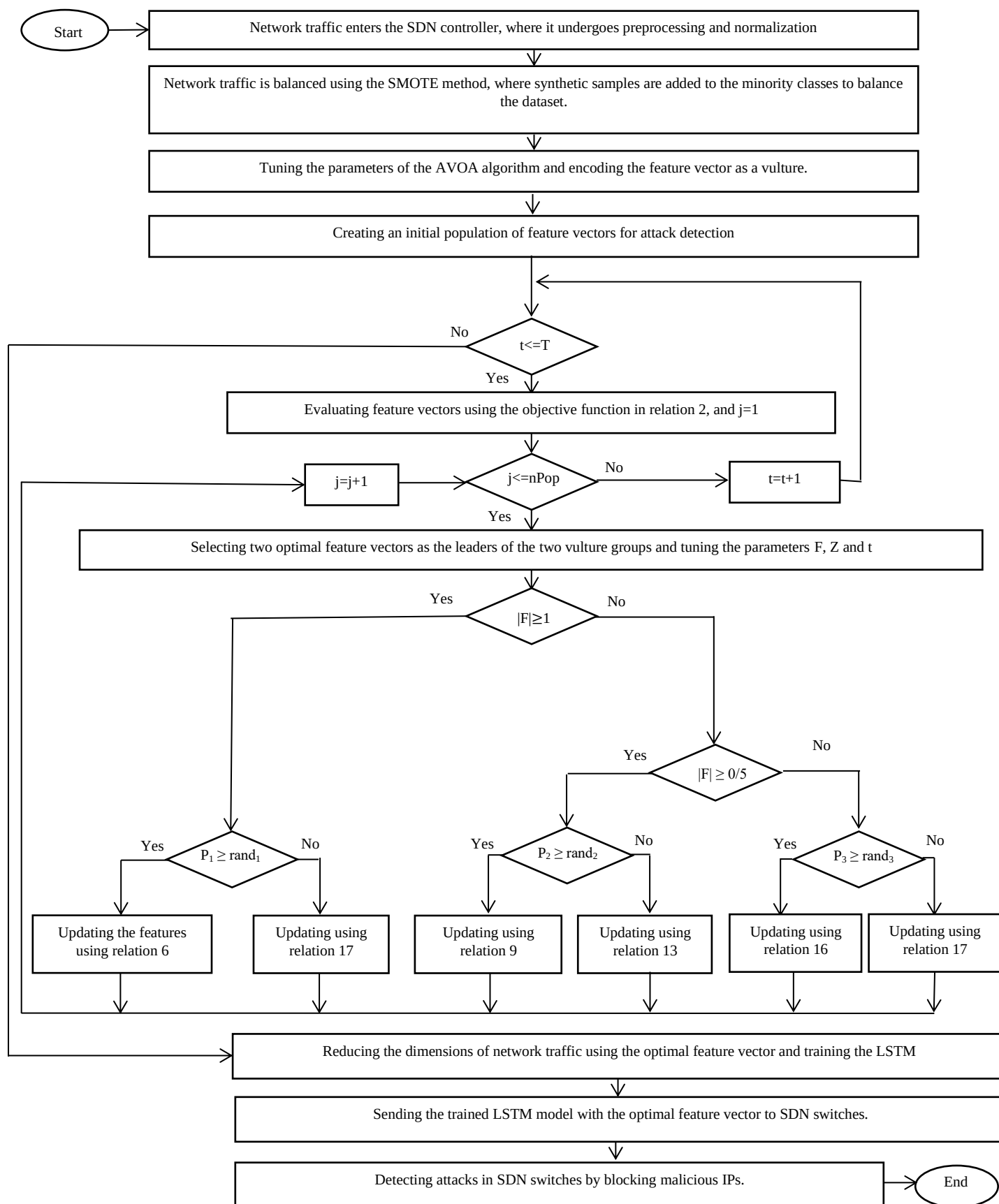
که در آن، o_t ، f_t و c_t به ترتیب ورودی، فراموشی، خروجی و فعال‌سازی دروازه سلولی در هر زمان t هستند. در این معادلات، σ تابع سیگموئید لجستیک و W_x ماتریس‌های وزن شبکه عصبی است و b_x بایاس‌های شبکه است. h_{t-1} حالت پنهان در مرحله زمانی $t-1$ است و c_{t-1} وضعیت سلول در زمان $t-1$ است. در اینجا شبکه LSTM نقش طبقه‌بندی کننده ترافیک شبکه را بر عهده دارد و مدل آموزش‌یافته از طریق کنترل کننده برای سوئیچ‌های شبکه ارسال می‌شود. شبکه عصبی LSTM یک روش قدرتمند برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی و جریان‌های داده‌ای است. در این شبکه برخی از اطلاعات به گیت فراموشی سپرده می‌شوند و برخی دیگر نگهداری می‌شوند. مزیت این شبکه آن است که قبل و بعد یک جریان داده‌ای تا حدودی به خاطر سپرده می‌شود. دلیل استفاده از شبکه عصبی LSTM در بخش طبقه‌بندی روش پیشنهادی آن است که این روش در بسیاری از پژوهش‌ها برای تحلیل ترافیک شبکه استفاده شده و نتایج ارزشمندی به دست آورده است.

شبکه عصبی از نوع LSTM مشکل محو شونده‌ی تدریجی و انفجار گرادیان را ندارد برخلاف شبکه‌های بازگشتی و کانولوشن، آموزش آن پیچیده نیست. در شبکه‌های عصبی بازگشتی اگر از $\tanh$ یا relu به عنوان یک تابع فعال‌سازی استفاده شود، نمی‌تواند دنباله‌های بسیار طولانی را پردازش کند؛ اما شبکه عصبی LSTM این چالش را ندارد. فیلتر کردن ترافیک ورودی آن با الگوریتم بهینه‌سازی کرکس در فاز انتخاب ویژگی نیز توان این شبکه را برای یادگیری روی ویژگی‌های اصلی افزایش می‌دهد و توانایی تشخیص آن را در تشخیص حملات افزایش می‌دهد.

در شکل ۸، فلوچارت روش پیشنهادی برای تشخیص حملات در سوئیچ‌های SDN نمایش داده شده است و دارای مراحل ذیل است:

- ترافیک شبکه وارد کنترلر SDN می‌شود تا برای ایجاد مدل طبقه‌بندی از آن استفاده شود.
- ترافیک شبکه در کنترلر با روش SMOTE متعادل‌سازی می‌شود و سپس حجم نمونه‌های اقلیت افزوده می‌شود تا مجموعه داده متعادل‌سازی شود.
- الگوریتم AVOA^۱ برای انتخاب ویژگی در کنترلر استفاده می‌شود و در اینجا هر بردار ویژگی یک کرکس است که توسط معادلات الگوریتم AVOA مورد به‌روزرسانی قرار گرفته می‌شوند.
- بردارهای ویژگی در هر تکرار با تابع هدف ارزیابی می‌شوند تا در نهایت بهینه‌ترین بردارهای ویژگی انتخاب شود و دو بردار ویژگی بهینه اول به عنوان سردسته کرکس‌ها انتخاب می‌شود.
- در روش پیشنهادی در هر تکرار بردارهای ویژگی با توابع نظیر S و V باینری می‌شوند تا در نهایت بردارهای ویژگی مجدد حالت صفر و یک خود را به دست آورند.
- کنترلر کننده SDN بر اساس بردار ویژگی شبکه عصبی LSTM را آموزش داده و یک مدل طبقه‌بندی را ایجاد می‌کند.

¹ African Vultures Optimiztion Algorithm



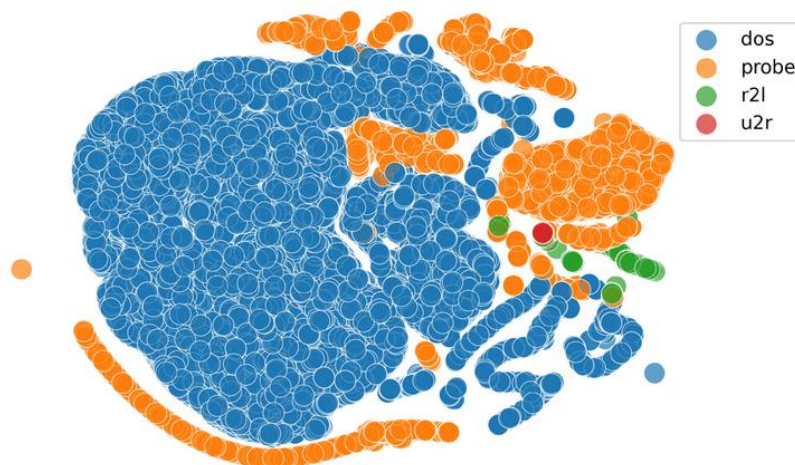
شکل ۸: فلوچارت روش پیشنهادی در تشخیص حملات به شبکه

Figure 8. Flowchart of the proposed method in detecting network attacks

- کنترلر کننده SDN بردار ویژگی بهینه و مدل یادگیری LSTM را برای سوئیچ‌های SDN ارسال کرده و هر سوئیچ SDN در ابتدا توسط بردار ویژگی بهینه، ترافیک شبکه را کاهش ابعاد داده و سپس در ادامه با مدل طبقه‌بندی LSTM ترافیک شبکه را به دودسته حمله و عادی طبقه‌بندی می‌کند.
- سوئیچ‌های SDN، IP گره‌های حمله‌کننده در حملات DDoS را باهم به اشتراک می‌گذارند و از آن‌ها برای بلاک کردن ترافیک حملات استفاده می‌کنند.

۴- نتایج تجربی

در این بخش سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی در معماری SDN در محیط Matlab پیاده‌سازی می‌شود و سپس در ادامه با آزمایش‌هایی روش پیشنهادی در تشخیص حملات با روش‌های مشابه مقایسه می‌شود. در روش پیشنهادی ۷۰ درصد از ترافیک شبکه آموزشی است و ۳۰ درصد دیگر برای ارزیابی به‌عنوان داده‌های آزمون و اعتبارسنجی استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی محدوده نرمال‌سازی بین ۰ و ۱ است و نوع تابع فعالیت نیز در هر آزمایش تصادفی انتخاب می‌شود. در روش پیشنهادی تعداد بردارهای ویژگی برابر ۱۵ و تعداد تکرار الگوریتم AVOA برابر ۵۰ است و هر آزمایش ۳۵ مرتبه تکرار شده است. مقدار پارامترهای p1، p2 و p3 در الگوریتم AVOA به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۶ تنظیم می‌شود. مجموعه داده NSL-KDD یک مجموعه داده جهانی در زمینه تشخیص حملات به شبکه است و مطابق شکل ۹، این مجموعه داده دارای عدم تعادل در چهار حمله مختلف است [۳۲].



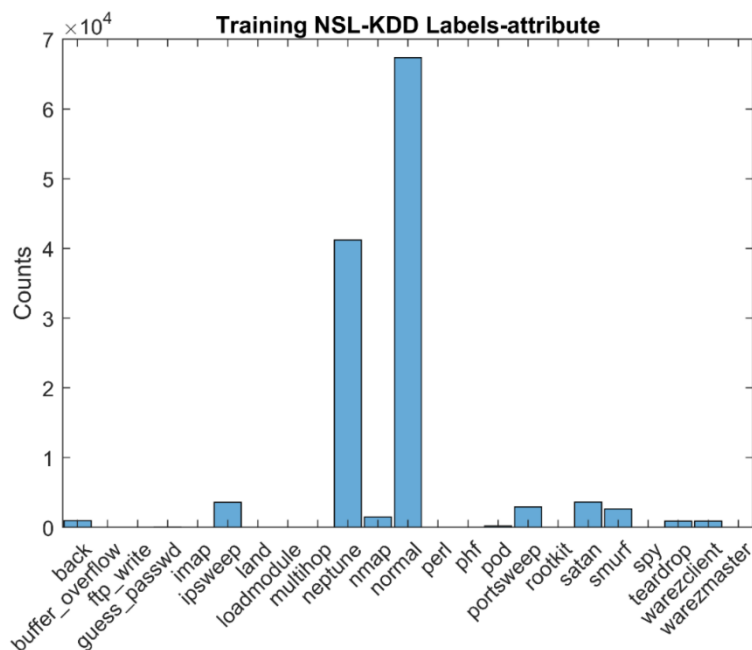
شکل ۹: عدم تعادل در مجموعه داده NSL-KDD
Figure 9. Imbalance in the NSL-KDD dataset

در این مجموعه داده برای هر ورودی یا نمونه، از ۴۱ ویژگی مختلف ارائه‌شده که هر یک از آن‌ها ممکن است به نوع حمله رکورد یا نوع عادی آن اختصاص داده شود. مقادیر مشخصه می‌توانند اسمی، باینری یا عددی باشند. باینر، برخلاف KDD CUP 99، مجموعه آموزشی مجموعه داده NSL-KDD حاوی هیچ ورودی تکراری نیست؛ بنابراین، طبقه‌بندی نسبت به رکوردهای متداول‌تر تعصب ندارند؛ بنابراین، در NSL-KDD، تکنیک‌هایی با نرخ تشخیص بهتر رکوردهای مکرر در مجموعه‌های آزمایشی بر عملکرد یادگیرندگان تأثیر نمی‌گذارند. از ۴۱ ویژگی موجود در این مجموعه داده، سه ویژگی نوع اسمی، Protocol_type، Service و Flag وجود دارد. درحالی‌که سایر ویژگی‌ها همه از نوع عددی هستند. حملات انکار سرویس (DoS)، حملات از راه دور به سیستم محلی (R2L)، حمله کاربر به ریشه (U2R) و حملات کاوشگر چهار دسته اصلی حملات سایبری در این مجموعه هستند. در جدول ۱، ایست ویژگی‌های بکار رفته در مجموعه داده NSL-KDD به نمایش گذاشته شده است [۳۴]. مجموعه داده NSL-KDD یک مجموعه داده به‌شدت نامتعادل است؛ زیرا مطابق شکل ۱۰، حملات مختلف دارای نمونه‌هایی به‌اندازه یکسان نیست [۳۴].

جدول ۱: ویژگی‌های بکار رفته در مجموعه داده NSL-KDD

Table 1. Features used in the NSL-KDD dataset

Feature type	Features
Numerical	Duration, src_bytes, dst_bytes, land, wrong_fragment, urgent, hot, num_failed_logins, logged_in, num_compromised, root_shell, su_attempted, num_root, num_file_creations, num_shells, num_access_files, num_outbound_cmds, is_host_login, is_guest_login, count, srv_count, error_rate, srv_error_rate, error_rate, srv_error_rate, same_srv_rate, diff_srv_rate, srv_diff_host_rate, dst_host_count, dst_host_srv_count, dst_host_same_srv_rate, dst_host_diff_srv_rate, dst_host_same_src_port_rate, dst_host_srv_diff_host_rate, dst_host_error_rate, dst_host_srv_error_rate, dst_host_error_rate and dst_host_srv_error_rate.
Non-numerical	“Protocol type”, “Service”, and “Flag”.



شکل ۱۰: عدم تعادل در مجموعه داده NSL-KDD

Figure 10. Imbalance in the NSL-KDD dataset

در این مجموعه داده ترافیک عادی بیشترین سهم از ترافیک را دارد و از طرفی حمله‌ای نظیر neptune دارای بیشترین سهم در بین انواع حملات است و از طرفی حمله‌ای نظیر Perl دارای تعداد نمونه‌های اندک است. برای رفع این چالش و افزایش تعداد نمونه‌ای انواع حملات از جمله DDOS می‌توان با روش تولید داده مصنوعی SMOTE تعدادی نمونه مصنوعی ایجاد نمود و به مجموعه داده اضافه نمود. در روش پیشنهادی مجموع حملاتی نظیر DDOS به تعداد ترافیک عادی با روش SMOTE تولید و به مجموعه داده اضافه می‌شود. در روش پیشنهادی تعداد نمونه‌های عادی برابر ۶۵۰۰۰ و تعداد نمونه‌های حمله نیز به ۶۵۰۰۰ افزایش داده می‌شود تا مجموعه داده متعادل شود.

یکی از مهم‌ترین روش‌های به دست آوردن تخمین خطای مدل از طریق داده‌های تست، روش اعتبارسنجی متقابل هست که یکی از روش‌های آن، “K-fold cross validation” است. در این روش به صورت تصادفی داده‌ها را به K بخش به‌طور یکسان تقسیم می‌شوند به‌طوری‌که در هر مجموعه تقریباً nk مشاهده برای $k=1, \dots, K$ قرار بگیرد. در آزمایش‌ها انجام‌شده مقدار k برابر ۱۰ تنظیم‌شده است. برای ارزیابی سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی به‌عنوان یک روش طبقه‌بندی ترافیک شبکه از متریک‌های مانند دقت^۱، حساسیت^۲ و صحت^۳ مطابق رابطه‌های ۳۳، ۳۴، ۳۵ فرموله شده است.

$$Accuracy = ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (33)$$

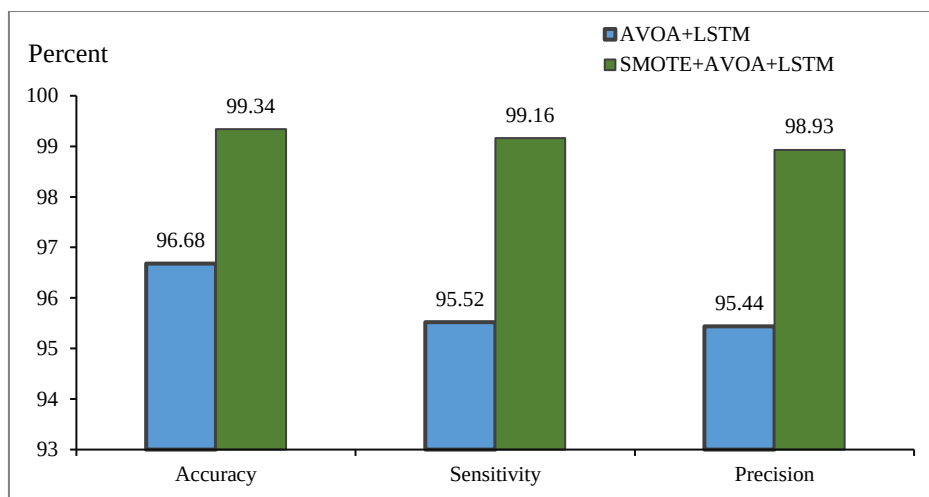
¹ Accuracy
² Sensitivity
³ Precision

$$Sensitivity = Recall = DR = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (34)$$

$$Precision = P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (35)$$

پارامترهای TP، TN، FP و FN به شکل تعریف می‌شود:

- نمونه‌های صحیح مثبت (TP): ترافیک وارد شده به سوئیچ SDN از نوع حمله بوده و روش پیشنهادی به درستی این ترافیک را در کلاس حمله قرار داده است.
 - نمونه‌های غلط مثبت (FP): ترافیک وارد شده به سوئیچ SDN از نوع عادی بوده و روش پیشنهادی به اشتباه این ترافیک را در کلاس حمله قرار داده است.
 - نمونه‌های صحیح منفی (TN): ترافیک وارد شده به سوئیچ SDN از نوع عادی بوده و روش پیشنهادی به درستی این ترافیک را در کلاس عادی قرار داده است.
 - نمونه‌های غلط منفی (FN): ترافیک وارد شده به سوئیچ SDN از نوع حمله بوده و روش پیشنهادی به اشتباه این ترافیک را در کلاس عادی قرار داده است.
- آزمایش‌ها انجام شده نشان می‌دهد روش پیشنهادی بدون متعادل‌سازی مجموعه داده دارای دقت، حساسیت و صحتی برابر ۹۶/۶۸ درصد و ۹۵/۵۲ درصد و ۹۵/۴۴ درصد است و این در حالی است که اگر متعادل‌سازی مجموعه داده با روش SMOTE انجام شود آنگاه دقت، حساسیت و صحتی برابر ۹۹/۳۴ درصد، ۹۹/۱۶ درصد و ۹۸/۹۳ درصد است. برای اجرای هر روش دو حالت مستقل ذیل در نظر گرفته شده تا اطمینان حاصل شود که آزمایش‌ها مستقل است:
- در ابتدا مجموعه داده نامتعادل به عنوان ورودی روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است و آزمایش‌ها چند بار تکرار شده است و متوسط شاخص‌ها مانند دقت، حساسیت و صحت محاسبه شده است.
 - در مرحله دوم در آزمایش‌هایی مستقل، مجموعه داده در ابتدا به کمک روش SMOTE متعادل‌سازی شده است. در نمودار شکل ۱۱، شاخص‌های دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی در دو حالت باهم مقایسه شده است.

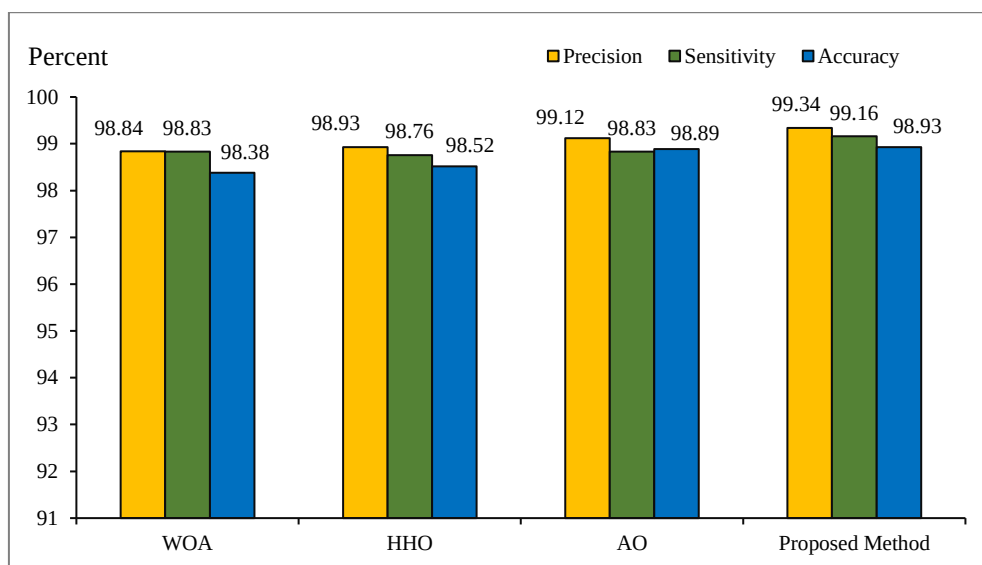


شکل ۱۱: نقش متعادل‌سازی مجموعه داده در افزایش دقت، حساسیت و صحت مدل پیشنهادی

Figure 11. The role of data set balancing in increasing the accuracy, sensitivity and accuracy of the proposed model

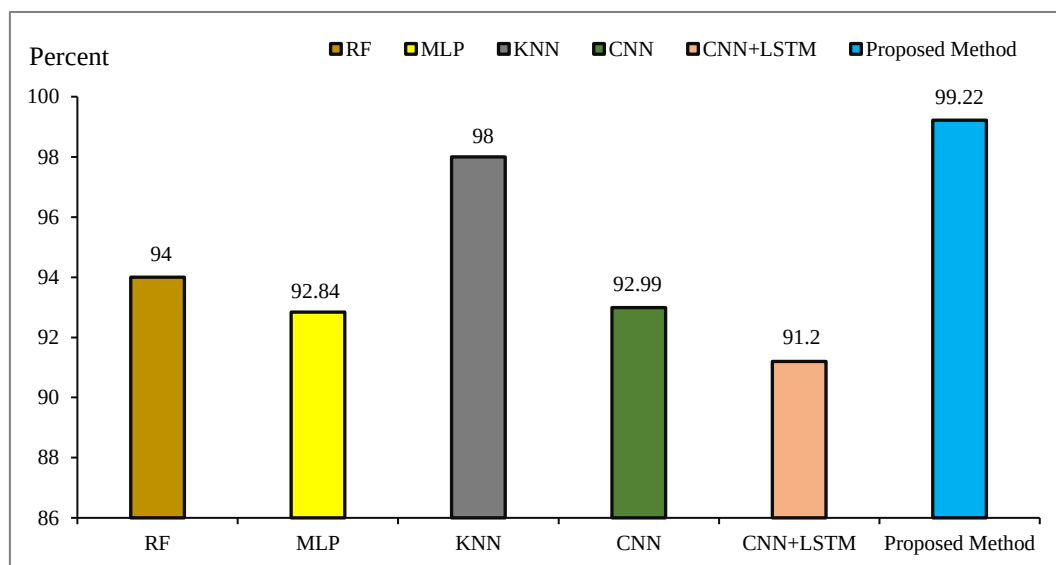
آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر از متعادل‌سازی در روش پیشنهادی استفاده شود آنگاه شاخص دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی به ترتیب ۳/۶۴ درصد و ۲/۶۶ درصد و ۳/۴۹ درصد در تشخیص حملات بهبود خواهد داشت. انتخاب ویژگی نقش مهمی در دقت روش پیشنهادی دارد و در نمودار شکل ۱۲، شاخص دقت، حساسیت و صحت روش پیشنهادی با الگوریتم‌های

انتخاب ویژگی از جمله الگوریتم بهینه‌سازی وال^۱ (WOA)، الگوریتم بهینه‌سازی شاهین^۲ (HHO)، الگوریتم بهینه‌سازی عقاب طلایی^۳ (GEO) مقایسه شده است. در این مقایسه‌ها تلاش شده است تا هر کدام از الگوریتم‌های مورد مقایسه جایگزین روش انتخاب ویژگی در ترکیب SMOTE و LSTM شود تا تأثیر آن در تشخیص حملات ارزیابی شود.



شکل ۱۲: مقایسه دقت، حساسیت و صحت تشخیص حملات با روش‌های انتخاب ویژگی

Figure 12. Comparison of accuracy, sensitivity and accuracy of attack detection with feature selection methods



شکل ۱۳: مقایسه دقت تشخیص حملات با روش‌های یادگیری

Figure 13. Comparison of attack detection accuracy with learning methods

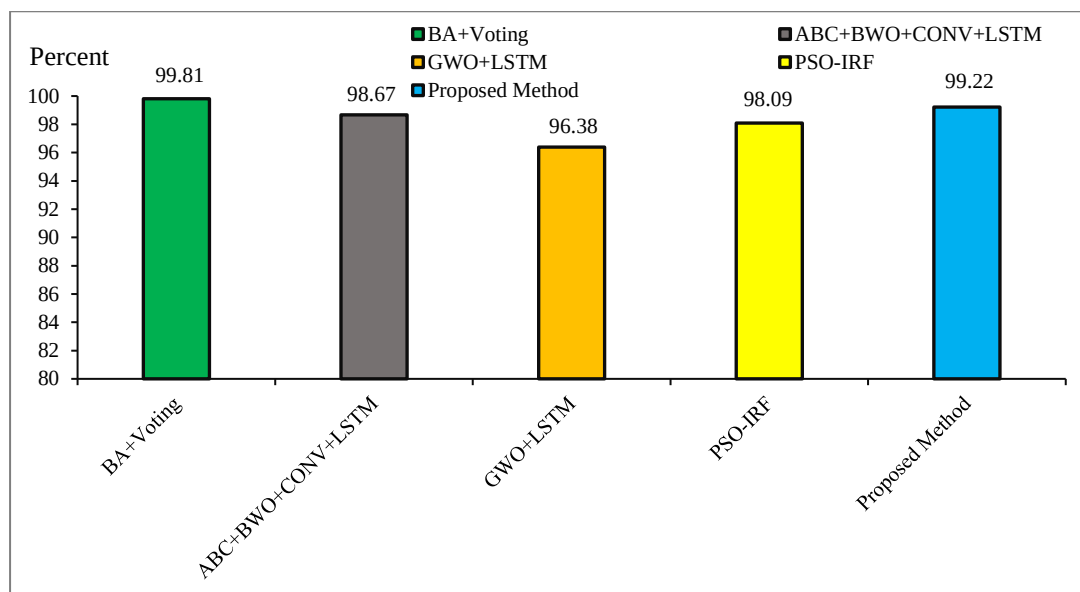
تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در بین روش‌های موردنظر الگوریتم AVOA یا روش پیشنهادی در ترکیب با یادگیری عمیق LSTM دارای دقت، حساسیت و صحت بیشتری نسبت به سایر روش‌های فرا ابتکاری در انتخاب ویژگی است. یکی از دلایل دقت بیشتر روش پیشنهادی در تشخیص حملات نسبت به این روش‌ها آن است که مکانیزم جستجوی AVOA نسبت به سایر الگوریتم‌ها هوشمندی بیشتری دارد و از طرفی الگوریتم AVOA دارای یک نوع سلسله‌مراتب رهبری و هدایت جمعیت

¹ Whale Optimization Algorithm (WOA)

² Harris Hawks Optimization Algorithm (HHO)

³ Golden Eagle Optimizer Optimization Algorithm (GEO)

توسط دو جواب بهینه است که در سایر الگوریتم این مکانیزم وجود ندارد. در نمودار شکل ۱۳، روش پیشنهادی در شاخص دقت با چند روش یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مقایسه شده است [۳۲].



شکل ۱۴: مقایسه دقت روش پیشنهادی با روش‌های هوش گروشی ترکیب‌شده با یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

Figure 14. Comparing the accuracy of the proposed method with group intelligence methods combined with machine learning and deep learning

در این نمودار مشاهده می‌شود روش پیشنهادی از روش‌های یادگیری عمیق نظیر CNN و CNN+LSTM دارای دقت بیشتری در تشخیص حملات است. یکی از دلایل این موضوع آن است که روش پیشنهادی دارای فاز انتخاب ویژگی هوشمندانه با الگوریتم AVOA است و از طرفی داده‌ها در مجموعه داده در روش پیشنهادی با SMOTE متعادل‌سازی می‌شود. در پژوهش [۳۳] که در سال ۲۰۲۳ ارائه شده است برای تشخیص حملات از چند روش انتخاب ویژگی مانند الگوریتم خفاش با مکانیزم رأی‌گیری^۱، الگوریتم ترکیبی بیوه سیاه و زنبور عسل^۲، الگوریتم گرگ خاکستری^۳ و الگوریتم ذرات^۴ استفاده شده است و روش پیشنهادی مطابق نمودار شکل ۱۴، با این روش‌ها در شاخص دقت مقایسه شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد دقت روش پیشنهادی از روش‌های تشخیص نفوذ بر پایه الگوریتم ترکیبی بیوه سیاه و زنبور عسل، الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ذرات دقت بیشتری دارد و فقط نسبت به سیستم تشخیص نفوذ بر پایه یادگیری با رأی‌گیری اکثریت دارای دقت کمتری است.

۵- نتیجه‌گیری

اینترنت اشیاء شبکه‌ای از دستگاه‌های هوشمند به هم پیوسته است که در تولید و جمع‌آوری حجم عظیمی از داده‌ها کمک می‌کند. دستگاه‌های اینترنت اشیاء در حال حاضر در هر زمینه‌ای از زندگی روزمره ما استفاده می‌شوند. یکی از چالش‌های مهم اینترنت اشیاء حملات به شبکه و زیرساخت‌های آن است. شناسایی حملات سایبری از این جهت مهم است که باعث آسیب و متوقف شدن سرویس‌های کاربردی در اینترنت اشیاء می‌شود. سیستم‌های تشخیص نفوذ یک روش کارآمد برای تشخیص حملات و مقابله با انواع حملات سایبری هستند. یکی از چالش‌های سیستم‌های تشخیص نفوذ عدم تطبیق آن‌ها با معماری اینترنت اشیاء است. در روش پیشنهادی یک سیستم تشخیص نفوذ کارآمد در بستر معماری توزیع‌شده شبکه نرم‌افزار محور ارائه شده است. مزیت سیستم تشخیص نفوذ پیشنهادی آن است که به صورت توزیع‌شده در سوئیچ‌های شبکه نرم‌افزار محور مستقر است.

¹ BA+Voting

² ABC+BWO+CONV+LSTM

³ GWO+LSTM

⁴ PSO-IRF

استقرار سیستم تشخیص نفوذ در شبکه نرم افزار محور باعث می شود ترافیک در حین مبادله در سیستم سوئیچینگ نیز تحلیل و ارزیابی شود. روش پیشنهادی برای رفع چالش عدم تعادل در مجموعه داده آموزشی NSL-KDD از الگوریتم SMOTE استفاده می کند و برای کاهش ابعاد ترافیک شبکه در کنترل کننده شبکه نرم افزار محور از الگوریتم بهینه سازی کرکس آفریقای استفاده می کند. در روش پیشنهادی ویژگی های مهم ترافیک شبکه برای آموزش شبکه عصبی حافظه ی کوتاه مدت طولانی در شبکه نرم افزار محور استفاده می شود. ارزیابی ها نشان می دهد روش پیشنهادی به دلیل انتخاب ویژگی مؤثر و متعادل سازی مجموعه داده از روش های یادگیری عمیق نظیر شبکه عصبی حافظه ی کوتاه مدت طولانی، شبکه عصبی بازگشتی و شبکه عصبی کانولوشن دقت بیشتری در تشخیص حملات دارد و نسبت به روش های انتخاب ویژگی نظیر الگوریتم بهینه سازی وال، الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس، الگوریتم بهینه سازی عقاب طلایی، الگوریتم بهینه سازی ذرات، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری، الگوریتم بهینه سازی کلونی زنبور عسل دارای دقت بیشتری در تشخیص حملات است.

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در افزایش کارایی روش پیشنهادی در تشخیص حملات به شبکه استفاده از هوش گروهی است. هوش گروهی به دلیل آنکه اعضای آن جستجوی موازی را باهم هم انجام می دهند شانس زیادی برای یافتن بردارهای ویژگی بهینه دارد. برای آنکه الگوریتم هوش گروهی توانایی بهتری برای جستجو داشته باشد، اندازه جمعیت، تعداد تکرار آن و مقادیر پارامترها بسیار تأثیرگذار است. به طور کلی با افزایش اندازه جمعیت و تعداد تکرار الگوریتم بهینه سازی کرکس آفریقای احتمال یافتن جواب بهینه افزایش خواهد داشت. با افزایش اندازه جمعیت، فضای مسئله بیشتر مورد جستجو قرار گرفته می شود و با افزایش تکرار نیز شانس همگرایی به جواب های بهینه افزایش خواهد یافت. افزایش اندازه جمعیت و تعداد تکرار از یک آستانه باعث افزایش قابل توجه در دقت نمی شود و فقط زمان اجرای آزمایش ها را افزایش می دهد؛ لذا در آزمایش ها اندازه جمعیت و تکرار الگوریتم منطقی و مانند اکثر پژوهش ها در نظر گرفته شده است. پارامترهای الگوریتم بهینه سازی کرکس نیز بر اساس مقاله مرتبط با این الگوریتم تنظیم شده است. از پیشنهاد های آتی ما به کارگیری مکانیزم رأی گیری اکثریت در تشخیص حملات در سوئیچ های شبکه نرم افزار محور و همچنین به کارگیری شبکه عصبی واحد بازگشتی گیتی و شبکه عصبی کانولوشن برای تشخیص حملات است.

مراجع

- [1] B. Kaur, S. Dadkhah, F. Shoeleh, E. C. P. Neto, P. Xiong, S. Iqbal, P. Lamontagne, S. Ray and A. A. Ghorbani, "Internet of things (IoT) security dataset evolution: Challenges and future directions," *Internet of Things*, vol. 22, p. 100780, July. 2023, doi: [10.1016/j.iot.2023.100780](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100780).
- [2] H. Kareemullah, D. Najumnissa, M. M. Shajahan, M. Abhineshjayram, V. Mohan and S. A. Sheerin, "Robotic Arm controlled using IoT application," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 105, p. 108539, Jun. 2023, doi: [10.1016/j.compeleceng.2022.108539](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108539).
- [3] O. E. Tayfour, A. Mubarakali, A. E. Tayfour, M. N. Marsono, E. Hassan and A. M. Abdelrahman, "Adapting deep learning-LSTM method using optimized dataset in SDN controller for secure IoT," *Soft Computing*, pp. 1-9, Mar. 2023, doi: [10.1007/s00500-023-08348-w](https://doi.org/10.1007/s00500-023-08348-w).
- [4] A. Bashaiwth, H. Binsalleeh and B. AsSadhan, "An Explanation of the LSTM Model Used for DDoS Attacks Classification," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, pp. 1-30, Jul. 2023, doi: [10.3390/app13158820](https://doi.org/10.3390/app13158820).
- [5] DDoS Attacks History. Radware. Available online: <https://www.radware.com/security/ddos-knowledge-center/ddos-chronicles/ddos-attacks-history>, accessed on 17 July 2023.
- [6] K. P. Reddy, K. R. Raju, K. C. Mouli and M. Praveen, "An intelligent network intrusion detection system for anomaly analyzer using machine learning for software defined networks," *In AIP Conference Proceedings*, vol. 2548, no. 1, July 2023, doi: [10.1063/5.0118479](https://doi.org/10.1063/5.0118479).

- [7] R. J. Gohari, L. Aliahmadipour and M. K. Rafsanjani, "Deep learning-based intrusion detection systems: A comprehensive survey of four main fields of cyber security," *Journal of Mahani Mathematical Research Center*, vol. 12, no. 2, pp. 289-324, May. 2023, doi: [10.22103/jmmr.2022.19961.1305](https://doi.org/10.22103/jmmr.2022.19961.1305).
- [8] A. Javadpour, P. Pinto, F. Ja'fari and W. Zhang, "DMAIDPS: a distributed multi-agent intrusion detection and prevention system for cloud IoT environments," *Cluster Computing*, vol. 26, no. 1, pp. 367-384, May. 2022, doi: [10.1007/s10586-022-03621-3](https://doi.org/10.1007/s10586-022-03621-3).
- [9] S. Javanmardi, M. Shojafar, R. Mohammadi, M. Alazab and A. M. Caruso, "An SDN perspective IoT-Fog security: A survey," *Computer Networks*, vol. 229, p. 109732, June. 2023, doi: [10.1016/j.comnet.2023.109732](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109732).
- [10] P. Kumari and A. K. Jain, "A comprehensive study of DDoS attacks over IoT network and their countermeasures," *Computers & Security*, vol. 127, p. 103096, April 2023, doi: [10.1016/j.cose.2023.103096](https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103096).
- [11] Y. Gao and M. Xu, "Defense against software-defined network topology poisoning attacks," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 39-46, February 2023, doi: [10.26599/TST.2021.9010077](https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010077).
- [12] C. Singh and A. K. Jain, "Detection and Mitigation of DDoS Attacks on SDN Controller in IoT Network using Gini Impurity," *Computer Security and Reliability*, pp. 1-27, May 2023, doi: [10.21203/rs.3.rs-2991752/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2991752/v1).
- [13] D. Jin, S. Chen, H. He, X. Jiang, S. Cheng and J. Yang, "Federated Incremental Learning based Evolvable Intrusion Detection System for Zero-Day Attacks," *IEEE Network*, vol. 37, no. 1, pp. 125-132, April 2023, doi: [10.1109/MNET.018.2200349](https://doi.org/10.1109/MNET.018.2200349).
- [14] O. Habibi, M. Chemmakha, and M. Lazaar, "Imbalanced tabular data modelization using CTGAN and machine learning to improve IoT Botnet attacks detection," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 118, p. 105669, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.engappai.2022.105669](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105669).
- [15] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh and S. Mirjalili, "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 158, p. 107408, 2021, doi: [10.1016/j.cie.2021.107408](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107408).
- [16] R. M. A. Haseeb-ur-rehman, A. H. M. Aman, M. K. Hasan, K. A. Z. Ariffin, A. Namoun, A. Tufail and K. H. Kim, "High-Speed Network DDoS Attack Detection: A Survey," *Sensors*, vol. 23, no. 6850, Aug. 2023, doi: [10.3390/s23156850](https://doi.org/10.3390/s23156850).
- [17] S. Ullah, Z. Mahmood, N. Ali, T. Ahmad and A. Buriro, "Machine Learning-Based Dynamic Attribute Selection Technique for DDoS Attack Classification in IoT Networks," *Computers*, vol. 12, no. 115, May 2023, doi: [10.3390/computers12060115](https://doi.org/10.3390/computers12060115).
- [18] Ö. Tonkal, H. Polat, E. Başaran, Z. Cömert and R. Kocaoğlu, "Machine learning approach equipped with neighbourhood component analysis for DDoS attack detection in software-defined networking," *Electronics*, vol. 10, no. 11, p. 1227, 2021, doi: [10.3390/electronics10111227](https://doi.org/10.3390/electronics10111227).
- [19] H. Zhou, Y. Zheng, X. Jia and J. Shu, "Collaborative prediction and detection of DDoS attacks in edge computing: A deep learning-based approach with distributed SDN," *Computer Networks*, vol. 225, p. 109642, April 2023, doi: [10.1016/j.comnet.2023.109642](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109642).
- [20] M. Cherian and S. L. Varma, "Secure SDN-IoT Framework for DDoS Attack Detection Using Deep Learning and Counter Based Approach," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 31, no. 54, 2023, doi: [10.1007/s10922-023-09749-w](https://doi.org/10.1007/s10922-023-09749-w).
- [21] T. M. Ghazal, N. A. Al-Dmour, R. A. Said, A. Omidvar, U. Y. Khan, T. R. Soomro, H. M. Alzoubi, M. Alshurideh, T. M. Abdellatif, A. Moubayed and L. Ali, "DDoS Intrusion Detection with Ensemble Stream Mining for IoT Smart Sensing Devices," *In The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems*, pp. 1987-2012, 2023, doi: [10.1007/978-3-031-12382-5_109](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12382-5_109).

- [22] X. H. Nguyen and K. H. Le, "Robust detection of unknown DoS/DDoS attacks in IoT networks using a hybrid learning model," *Internet of Things*, vol. 23, p. 100851, 2023, doi: [10.1016/j.iot.2023.100851](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100851).
- [23] A. Hekmati, N. Jethwa, E. Grippo and B. Krishnamachari, "Correlation-Aware Neural Networks for DDoS Attack Detection In IoT Systems," *Computer Science*, Feb. 2023, doi: [10.48550/arXiv.2302.07982](https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07982).
- [24] N. Pandey and P. K. Mishra, "Performance analysis of entropy variation-based detection of DDoS attacks in IoT," *Internet of Things*, vol. 23, p. 100812, October. 2023, doi: [10.1016/j.iot.2023.100812](https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100812).
- [25] P. Shukla, C. R. Krishna and N. V. Patil, "EIoT-DDoS: embedded classification approach for IoT traffic-based DDoS attacks," *Cluster Computing*, pp. 1-20, 2023, doi: [10.1007/s10586-023-04027-5](https://doi.org/10.1007/s10586-023-04027-5).
- [26] S. S. S. Othman, C. F. M. Foozy and S. N. B. Mustafa, "Feature Selection of Distributed Denial of Service (DDoS) IoT Bot Attack Detection Using Machine Learning Techniques," *Journal of Soft Computing and Data Mining*, vol. 4, no. 1, pp. 63-71, 2023, doi: [10.30880/jscdm.2023.04.01.006](https://doi.org/10.30880/jscdm.2023.04.01.006).
- [27] I. Priyadarshini, P. Mohanty, A. Alkhayyat, R. Sharma and S. Kumar, "SDN and application layer DDoS attacks detection in IoT devices by attention-based Bi-LSTM-CNN," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 34, no. 4, pp. 1-14, Feb.2023, doi: [10.1002/ett.4758](https://doi.org/10.1002/ett.4758).
- [28] J. N. Lee and J. Y. Lee, "An Efficient SMOTE-Based Deep Learning Model for Voice Pathology Detection," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3571, Feb. 2023, doi: [10.3390/app13063571](https://doi.org/10.3390/app13063571).
- [29] J. Too, A. R. Abdullah and N. Mohd Saad, "Binary competitive swarm optimizer approaches for feature selection," *Computation*, vol. 7, no. 31, 2019, doi: [10.3390/computation7020031](https://doi.org/10.3390/computation7020031).
- [30] R. Elsayed, R. Hamada, M. Hammoudeh, M. Abdalla and S. A. Elsaid, "A Hierarchical Deep Learning-Based Intrusion Detection Architecture for Clustered Internet of Things," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 12, no. 3, December 2022, doi: [10.3390/jsan12010003](https://doi.org/10.3390/jsan12010003).
- [31] G. Dlamini and M. Fahim, "DGM: a data generative model to improve minority class presence in anomaly detection domain," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no. 33, pp. 13635-13646, 2021, doi: [10.1007/s00521-021-05993-w](https://doi.org/10.1007/s00521-021-05993-w).
- [32] K. O. Adefemi Alimi, K. Ouahada, A. M. Abu-Mahfouz, S. Rimer and O. A. Alimi, "Refined LSTM based intrusion detection for denial-of-service attack in Internet of Things," *Journal of sensor and actuator networks*, vol. 11, no. 32, July 2022, doi: [10.3390/jsan11030032](https://doi.org/10.3390/jsan11030032).
- [33] M. Bakro, R. R. Kumar, A. A. Alabrah, Z. Ashraf, S. K. Bisoy, N. Parveen, S. Khawatmi and A. Abdelsalam, "Efficient Intrusion Detection System in the Cloud Using Fusion Feature Selection Approaches and an Ensemble Classifier," *Electronics*, vol. 12, no. 11, May 2023, doi: [10.3390/electronics12112427](https://doi.org/10.3390/electronics12112427).
- [34] M. H. Alwan, Y. I. Hammadi, O. A. Mahmood, A. Muthanna and A. Koucheryavy, "High Density Sensor Networks Intrusion Detection System for Anomaly Intruders Using the Slime Mould Algorithm," *Electronics*, vol. 11, no. 20, October 2022, doi: [10.3390/electronics11203332](https://doi.org/10.3390/electronics11203332).

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.

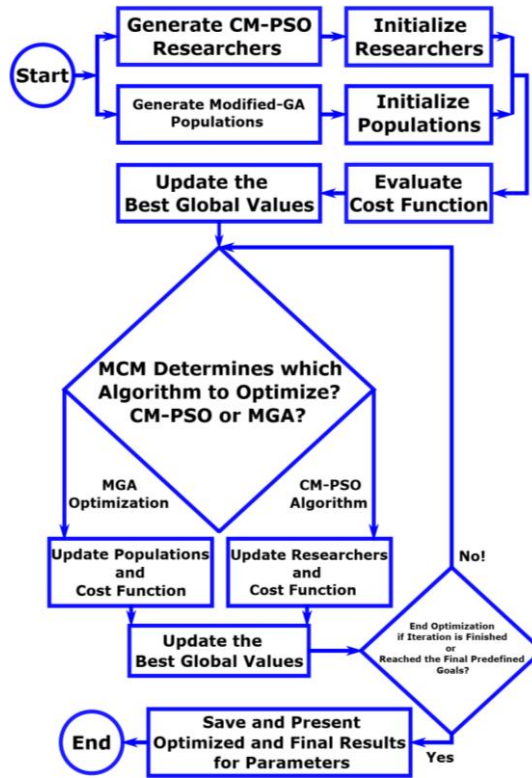


Figure I. Flowchart of how to decide the proposed algorithm [21].

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

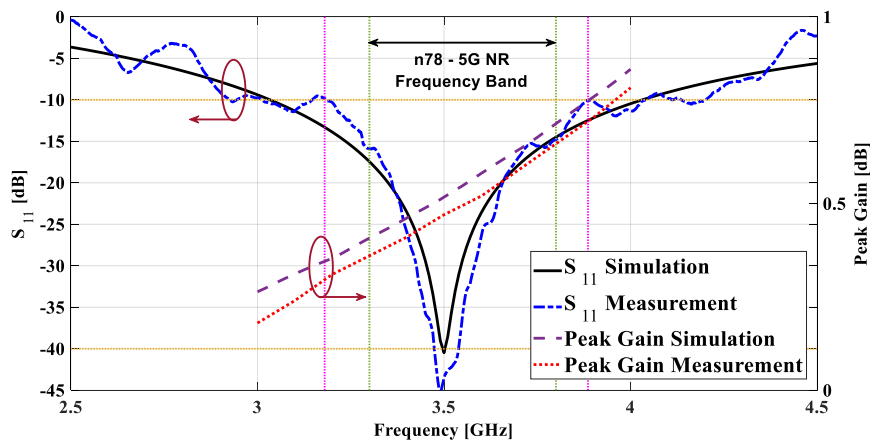


Figure II. Simulated and measured values of S_{11} and Peak Gain for the proposed antenna.

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 فراابتکاری 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 زیست‌شناسی 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 کواکسیال 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.

^۱ Yagi-Uda

^۲ Front-to-Back Ratio

^۳ Customized Mutated-Particle Swarm Optimization

^۴ Customized Mutated-Particle Swarm Optimization (CM-PSO)

^۵ Multiple-Input/Multiple-Output (MIMO)

^۶ Multi-purpose two-line

^۷ Decibel (db)

^۸ Rastgrin

^۹ Ackley

^{۱۰} Rosenbrock

^{۱۱} Booth Function

^{۱۲} MATLAB (Matrix LABoratory)

^{۱۳} 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.

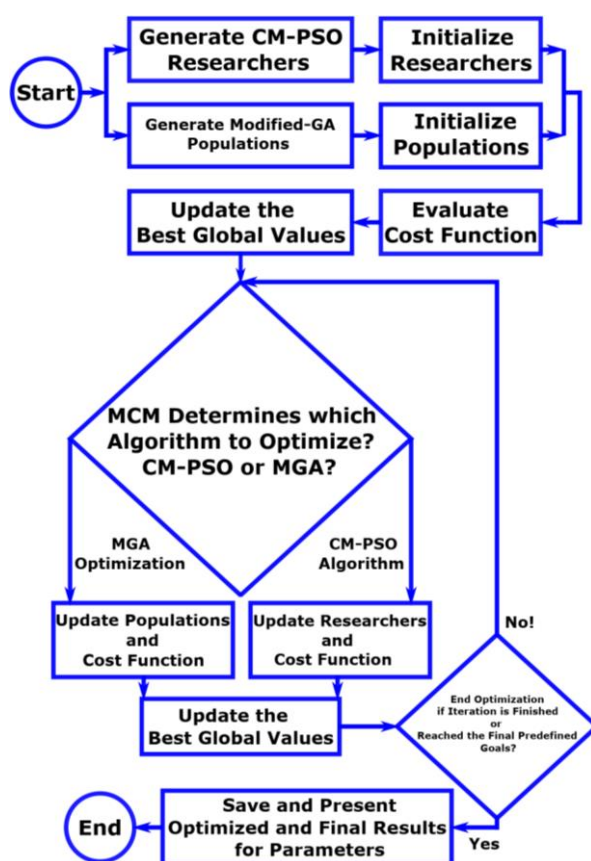
^۱ n78 - 5G NR Frequency Band

^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].

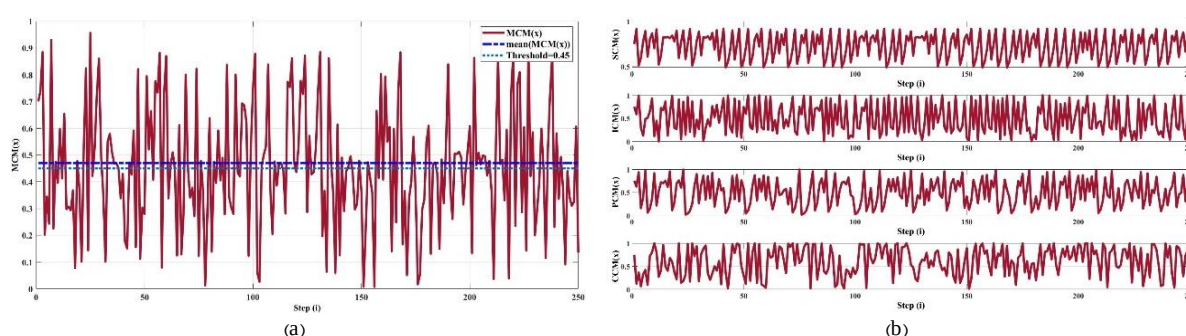
Figure 1. Flowchart of how to decide the proposed algorithm [21].

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

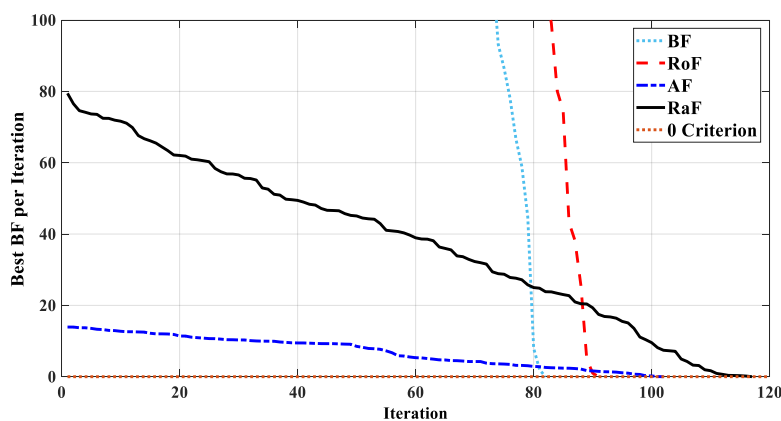
مقدار میانگین بهترین گزینه می‌باشد. بر اساس مقادیر معیارهای آستانه اعمال شده در مطالعات شبیه‌سازی، این ایده مورد ارزیابی و تایید قرار گرفته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشخص شد که ویژگی هیبریداسیون باعث می‌شود که الگوریتم ترکیبی به احتمال زیاد از گیرکردن در حداقل‌های محلی اجتناب کرده و به حداقل کلی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

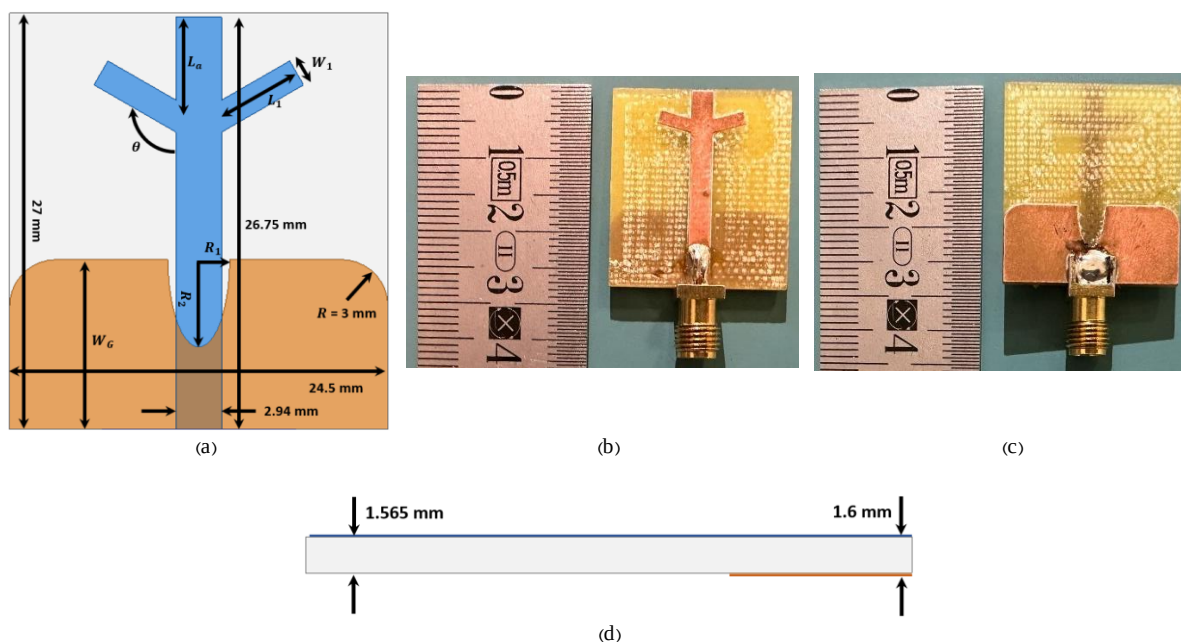
² Iterative Chaotic Map

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 گذردهی 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 $R_1, R_2, L_1, W_1, L_2, W_2, \theta$ 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.

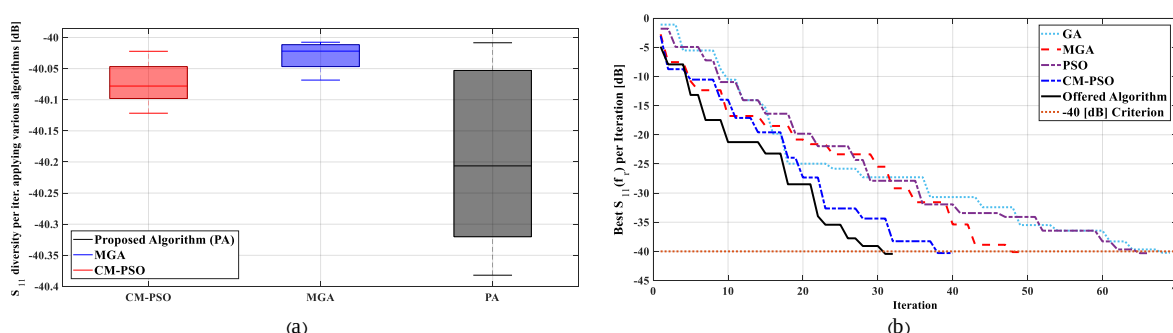
¹ Microstrip

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	—	—

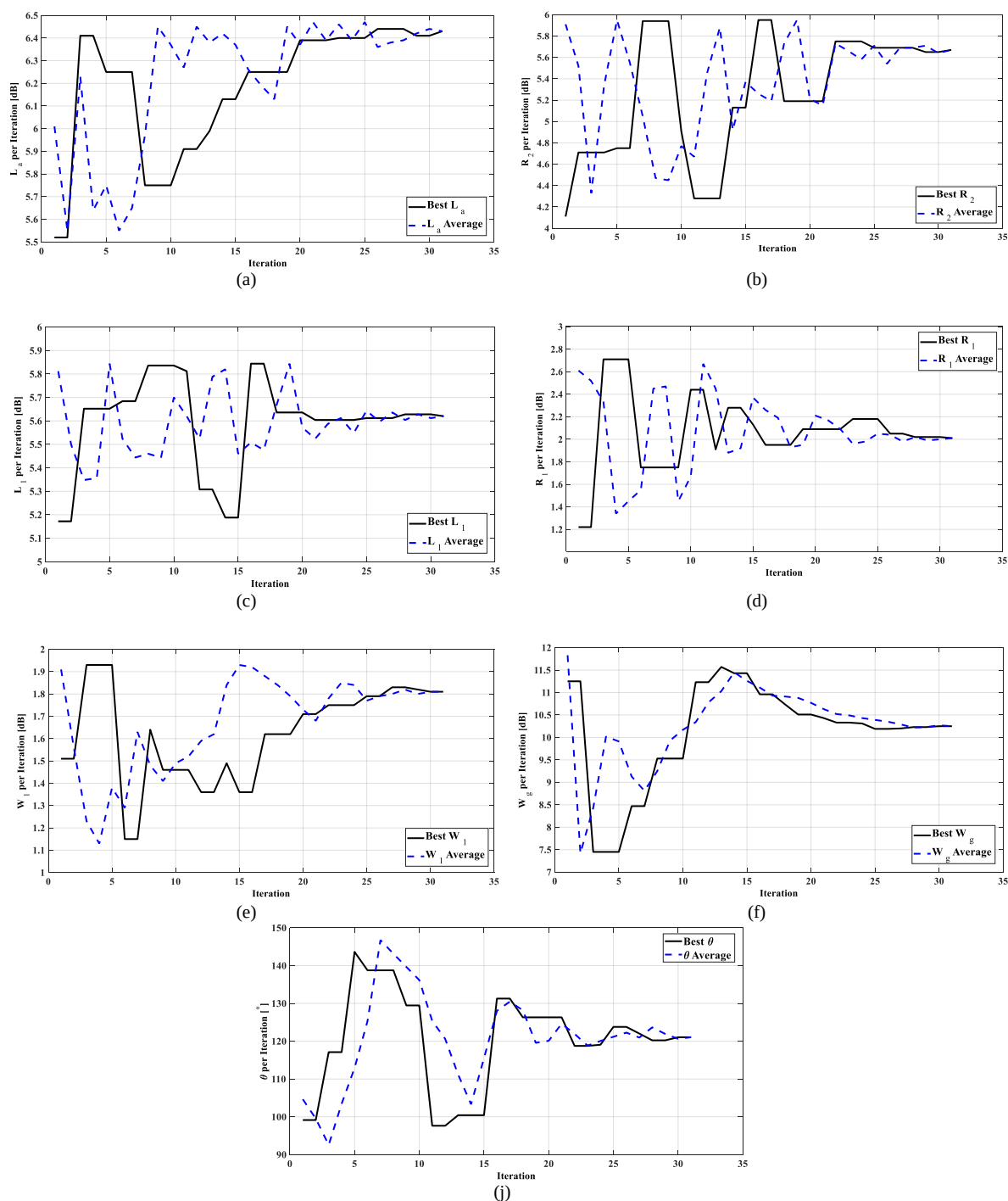
در شکل ۵ (a) مقایسه‌ای از عملکرد الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های متداول نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی در شرایط یکسان سریع‌ترین همگرایی را داشته و در اجراهای مستقل به نتایج یکسان بیشتری میل می‌کند که این امر نشان دهنده قابلیت اطمینان‌پذیری 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.

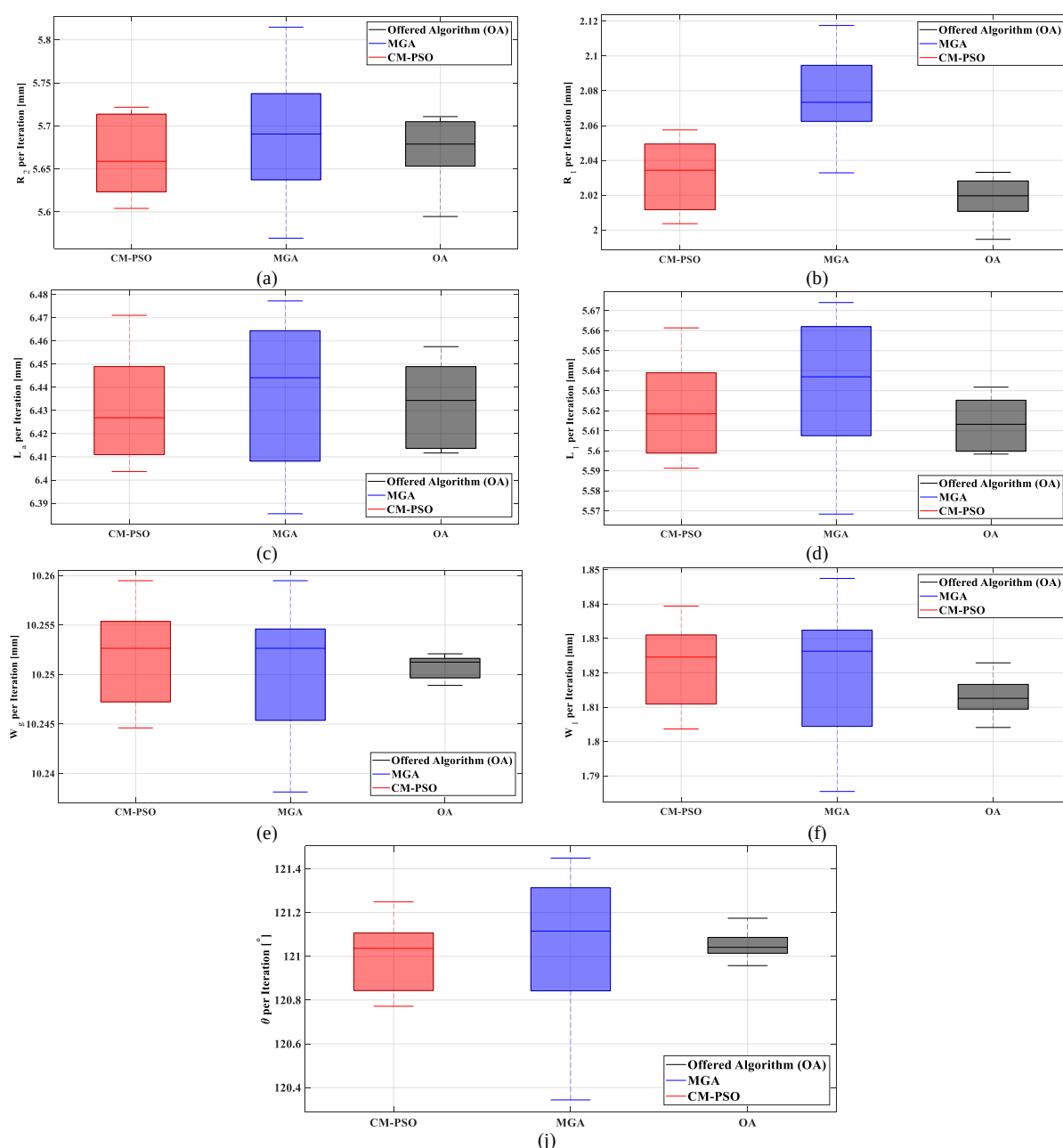
Figure 5. Convergence and bugsplot of S_{11} , (a) Bugsplot comparison of CM-PSO and MGA algorithms with the proposed algorithm, (b) Convergence rate to suitable S_{11}

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.

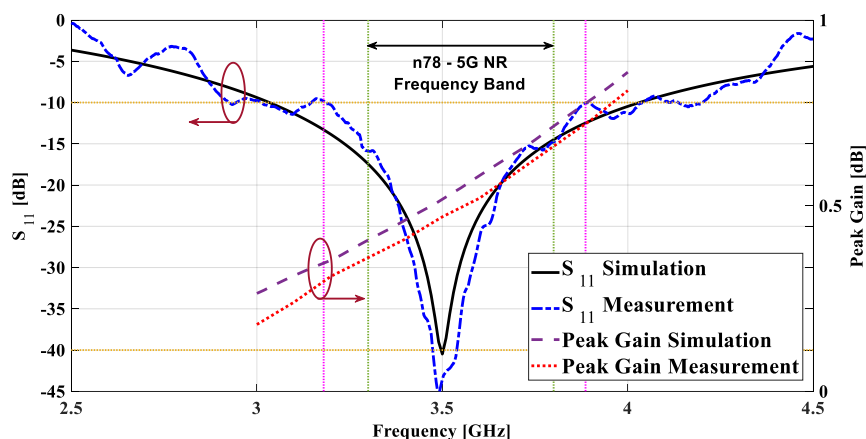


شکل ۷: بازه همگرایی (باگس پلات) متغیرهای تصمیم به مقادیر یکسان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در اجراهای مستقل و متفاوت، (a) بازه همگرایی R_2 به مقادیر نهایی، (b) بازه همگرایی R_1 به مقادیر نهایی، (c) بازه همگرایی L_a به مقادیر نهایی، (d) بازه همگرایی L_1 به مقادیر نهایی، (e) بازه همگرایی W_1 به مقادیر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

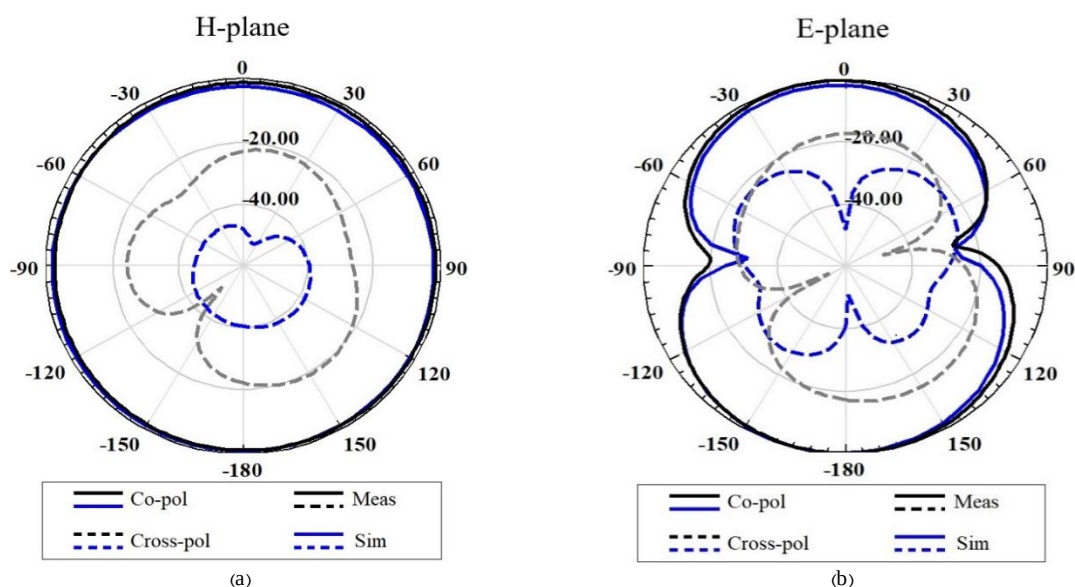
و سایر موارد، می‌توان از تفاوت ناچیز بین مقادیر شبیه‌سازی اندازه‌گیری چشم پوشی نمود. در این شکل، پیک‌گین اندازه‌گیری شده با دقت بسیار خوبی نتایج شبیه‌سازی شده را مورد تأیید قرار می‌دهد. در باند فرکانسی $3/3$ تا $3/8$ گیگاهرتز، آنتن پیشنهادی دارای ماکزیمم بهره‌ای مابین $0/30$ تا $0/72$ دسی‌بل می‌باشد. 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.

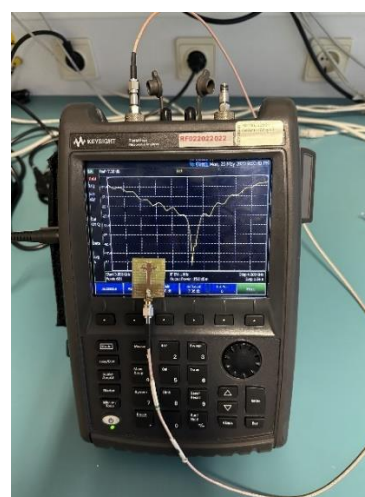
جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های الگوریتم‌ها و آنتن‌ها از سایر مقالات با روش و آنتن پیشنهادی.

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.aue.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.aue.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.aue.2022.154161](https://doi.org/10.1016/j.aue.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).



Journal of Southern Communication Engineering



Islamic Azad University Bushehr Branch

Online ISSN: 2980-9231

Vol. 14, Issue 55, Spring 2025

Contents

Comparison of the Performance of Two Terahertz Antennas Based on Photonic Structures for Cancer Tissue Detection.....1	
Mohammad Toolabi; Mehdi Khatir; Mohammad Naser-Moghaddasi; Nasrin Amiri	
Analysis and Simulation of Small Signal Model of Virtual Synchronous Generator in Microgrid System.....21	
Ghazanfar Shahgholian; Mohammadreza Moradian; S. Mohammadali Zanjani	
Low Latency and Power Efficient Reversible Full Adder Based on Toffoli Gates.....36	
Seyedeh Fatemeh Deymad; Nabiollah Shiri; Farshad Pesaran	
Optimization of the Number of Active Subcarriers and M-PAM Modulation Constellation Pattern for OFDM-IM Systems52	
Farshad Jalili Kharajoo; Seyyed-Hadi Seyyed Masoumian Charandabi	
Improve Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms Using Nash Bargaining Theory.....70	
Marziyeh Dadvar; Hamidreza Navidi; Hamid Haj Seyyed Javadi; Mitra Mirzarezaee	
Detection of DDoS Attacks in SDN Switches with Deep Learning and Swarm Intelligence Approach.....94	
Mohsen Eghbali; Mohammad Reza Mollakhalili Meybodi	
Multi-Objective Optimization Algorithm Development using Chaotic Maps to Design of a Planar Microstrip Monopole Antenna..121	
Vahid Hosseini; Yousef Farhang; Kambiz Majidzadeh; Changiz Ghobadi	



Journal of Southern Communication Engineering

License holder: Islamic Azad University Bushehr Branch

Editor-in-chief:	Dr. Mohammad Naser-Moghaddasi	Islamic Azad University Science and Research Branch
Director:	Dr. Najmeh Cheraghi Shirazi	Islamic Azad University Bushehr Branch
Executive Director:	Dr. Roozbeh Hamzehyan	Islamic Azad University Bushehr Branch
Editor:	Dr. Abdolrasul Ghasemi	Islamic Azad University Bushehr Branch

Editorial Board:

Dr. Mohammad Naser-Moghaddasi	Professor	Islamic Azad University Science and Research Branch
Dr. Homayoon Oraizi	Professor	Iran University of Science and Tech.
Dr. Srajoddin katebi	Professor	Shiraz University
Dr. Ebrahim Abiri	Professor	Shiraz University of Technology
Dr. Karim Mohammadi	Professor	Iran University of Science and Tech.
Dr. Abdolreza Nabavi	Professor	Tarbiat Modares University
Dr. Massoud Dousti	Associate Professor	Islamic Azad University Science and Research Branch
Dr. Alireza Behrad	Professor	Shahed University
Dr. Mohammad Mardaneh	Professor	Shiraz University of Technology
Dr. Ghazanfar Shahgholian	Professor	Islamic Azad University Najafabad branch
Dr. Ramezan Ali Sadeghzadeh Sheikhan	Professor	K.N. Toosi University of Technology
Dr. Esmail Najafiaghdam	Professor	Sahand University of Technology
Dr. Mojtaba Najafi	Associate Professor	Islamic Azad University Bushehr Branch
Dr. Bal Virdee	Professor	London Metropolitan University
Dr. Mohammad Alibakhshikenari	Professor	University of Rome "Tor Vergata", Italy
Dr. Hamid Reza Arabnia	Professor	University of Georgia
Dr. Ali Taimori	Research Associate	University of Edinburgh

Address: Iran, Bushehr, Islamic Azad University Bushehr Branch

Tel: (+98) 9107837420

Fax: (+98) 771 5683717

Website: <https://jce.bushehr.iau.ir/>

eISSN: 2980-9231

Email: jce.iaub@gmail.com – jce@iaubusher.ac.ir

Indexed by:

