



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 اقدام	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..... ترکیب کنترل کننده های PID مقاوم و عصبی- فازی برای بهینه سازی چند هدفه سیستم ترمز ضد قفل..... رسول حسینی؛ جواد مشایخی فرد؛ سپهر سلطانی
- ۲۴..... یک چارچوب یادگیری لبه-آگاه برای طبقه بندی بدافزارهای IoT با استفاده از کاهش تطبیقی ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک..... شهره آجودانیان؛ مریم نورائی آباده
- ۴۷..... بهبود طول عمر شبکه حسگر بی سیم با استفاده از ترکیب حسگری فشرده و هوش جمعی برای زمان بندی خواب/بیدار و مسیریابی..... محمد حسن کاتبی جهرمی؛ کرم الله باقری فرد؛ راضیه ملک حسینی؛ سعید مهرجو
- ۶۹..... مروری بر کنترل مبتنی به رویداد سیستم های چندعاملی مرتبه کسری..... فاطمه غلامی؛ مهناز هاشمی؛ غضنفر شاهقلیان
- ۹۶..... رویکردی جدید برای انتقال موج میلیمتری در سیستم های مایمو انبوه مبتنی بر تکنولوژی دسترسی چندگانه غیرمتعامد..... پوریا صالحی؛ ناصر پرهیزگار؛ فرشاد پسران
- ۱۲۶..... آنتن موج نشی شکاف دار فرکتالی بر پایه SIW و خط انتقال CRLH متعادل با قابلیت اسکن پهنای باند پشت تاب بهبود یافته و افزایش گین در باند X..... حسین مشهدی؛ لقمان اسدیپور؛ یاشار زهفروش؛ توحید صدقی
- ۱۴۶..... ارائه برنامه بهینه پخش بار واحدهای حرارتی در سیستم قدرت در حضور مزرعه بادی با ضریب نفوذپذیری بالا و بارهای انعطاف پذیر..... علی حیدری؛ رضا ابراهیمی؛ محمود قنبری

Combination of Robust PID and Neuro-Fuzzy Controllers for Multi-Objective Optimization of Anti-Lock Braking System

Rasoul Hosseini¹  | Javad Mashayekhi Fard^{2*}  | Sepehr Soltani³ 

¹Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, rasoul.hosseini@iaus.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, javad.mashayekhi@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran, spe_soltani@iaus.ac.ir

Correspondence

Javad Mashayekhi Fard, Assistant Professor of Electrical Engineering, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran. javad.mashayekhi@iau.ac.ir

Main Subjects:

PID and Neuro-Fuzzy Controllers

Paper History:

Received: 10 August 2024

Revised: 10 September 2024

Accepted: 13 September 2024

Abstract

In multi-objective optimization problems, multiple objectives must be optimized simultaneously. One approach involves designing a dedicated controller for each objective and then combining them using appropriate weighting functions to achieve an optimal overall response. Industrial systems often exhibit uncertainties due to modeling inaccuracies or variations in system parameters. This paper presents the design of two robust controllers, a PID controller and a neuro-fuzzy controller, to meet the requirements of strong stability and performance in an anti-lock braking system (ABS). The ABS, a fourth-order, nonlinear, and multivariable system, is decomposed into four single-input-single-output (SISO) subsystems via decentralized control. Two novel methods for controller blending and weight function design are introduced. The first method designs a weight function for the system error using the PID controller, and another for the system error using the neuro-fuzzy controller, both under robust stability constraints. The second employs a flowchart-based synthesis of low-pass and high-pass filters that simultaneously satisfy three key performance criteria: steady-state error, maximum overshoot, and settling time. Simulation results demonstrate that first approach delivers superior performance on both dry and slippery road surfaces.

Keywords: Weight Function, Anti-Lock Braking, Multi-Objective Control, Robust PID, Neuro-Fuzzy.

Highlights

- The weight function is designed for the system error signal with each controller in the first approach.
- The second approach provides two low-pass and high-pass filters that satisfy the three conditions.
- The combination of controllers can have a suitable response in all frequencies.
- The comparison of two controllers, two approaches, and switching control on the ABS has been done.

Citation: R. Hosseini, J. Mashayekhi Fard, and S. Soltani, "Combination of Robust PID and Neuro-Fuzzy Controllers for Multi-Objective Optimization of Anti-Lock Braking System," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 1–23, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1128676 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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

In control problems, multiple objectives are often considered simultaneously. Real-world optimization tasks typically involve more than one objective, where an optimal solution is achieved when all objectives meet a certain level of optimality. These are known as multi-objective optimization problems. Since such problems require the concurrent optimization of several—often conflicting—objectives, they generally yield a set of optimal solutions rather than a single one.

One approach is to design a separate controller for each objective and then combine them using specific weighting functions to achieve an overall optimal response. Determining these weight functions is crucial to the effectiveness of the solution.

Considering performance and stability under uncertainty remains a central concern for control engineers. Different perspectives on the problem—including how objectives, constraints, and solution methods are handled—lead to diverse proposed approaches. For instance, reference [1] highlights that the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) offers the advantage of incorporating prior knowledge into its structure and provides a foundational framework for training.

The design and implementation of an ANFIS controller based on Boolean relations for motor angular position adjustment in an electromechanical system has been reported [2]. A comparison among Artificial Neural Networks (ANNs), fuzzy logic, and ANFIS was conducted for optimizing building thermal consumption, demonstrating that ANFIS combines the advantages of both ANNs and fuzzy logic and achieves superior prediction of building thermal efficiency [2].

In [3], both a conventional PID controller and a fuzzy-based PID controller were designed and compared, with results indicating better performance from the fuzzy-based PID controller. For load frequency control in multi-area interconnected power systems, a hybrid fuzzy logic intelligent controller was proposed, employing Particle Swarm Optimization (PSO) and the Integral Square Error (ISE) criterion to optimize its parameters within a four-area thermal power system incorporating physical constraints and boiler dynamics [4].

Reference [5] introduced a hybrid control scheme for active and reactive power using direct vector control with stator flux orientation, integrating fuzzy logic controllers with reference signal tracking control. Optimization of a PID controller with a low-pass filter for a multi-area power system equipped with a superconducting magnetic energy storage plant under varying loads and uncertainties was addressed using the Gray Wolf Optimizer (GWO) [6].

The application of ANFIS integrated with a PID controller to enhance Anti-lock Braking System (ABS) performance was explored in [7], while [8] evaluated bang-bang control, PID, model reference adaptive PID, fuzzy logic, and neuro-fuzzy control for ABS, concluding that neuro-fuzzy control offers greater flexibility and improved tracking accuracy.

To address nonlinearity and external disturbances during braking, [9] proposed a robust self-learning PID (RSPID) algorithm based on particle swarm optimization (PSO). This method does not rely on a precise mathematical model. The self-learning capability allows adaptation to variations in road surface friction, while the PSO algorithm optimizes both the self-learning rate and robust control parameters to handle modeling uncertainties and external disturbances.

Reference [10] analyzed advanced control techniques for anti-lock braking systems (ABS). It highlighted that fuzzy torque control enables rapid braking across different road conditions, but noted that its robust performance comes at the cost of complexity: implementing a large set of rules and tuning parameters to account for model uncertainties makes the system difficult to realize. Neural network approaches, while effective, require extensive training data to achieve optimal performance under system uncertainties. Traditional PID controllers are generally unsuitable due to the inherent nonlinearity of ABS dynamics; however, adaptive self-tuning PID strategies were found to yield satisfactory results [10].

2. Innovation and contributions

In this paper, the combination of two controllers using weighting functions is investigated. First, controller design is carried out using two methods: neuro-fuzzy control and robust PID control, each ensuring robust stability. Then, two approaches are proposed to combine them.

The first approach introduces two weighting functions: one for the system error signal under PID control, and another for the system error signal under neuro-fuzzy control. Both weighting functions are designed to satisfy robust stability conditions.

The second approach provides two weighting functions that simultaneously meet three performance criteria: steady-state error, maximum overshoot, and settling time.

3. Materials and Methods

Typically, each of the aforementioned controllers demonstrates advantages in specific aspects of time and frequency response. To leverage these complementary strengths, a combined controller structure is adopted. Two design approaches are proposed, yielding suitable weighting functions to achieve enhanced overall performance.

First, two separate controllers—a robust PID and a neuro-fuzzy controller—are designed to meet robust performance and stability objectives. These are then integrated so that the combined system benefits from the characteristics of both. While each controller individually excels in certain time or frequency regions, their fusion aims to deliver a suitable response across the full operational range.

The Anti-lock Braking System (ABS) is employed to shorten stopping distance and ensure vehicle safety during braking by regulating the wheel slip ratio. In the simulation results section, a comparative evaluation is presented among the two individual controllers, the two proposed combined approaches, and a conventional switching control strategy applied to the ABS.

4. Results and Discussion

A comparison of wheel speed for the first approach, the second approach, and switching control on both dry and slippery asphalt surfaces demonstrates the clear superiority of the first approach. Similarly, an evaluation of wheel slip under the same conditions confirms the effectiveness of the first method.

Table I presents a quantitative comparison of the controllers, approaches, and switching control under dry and slippery asphalt conditions, considering stopping time, stopping distance, maximum control signal, and maximum slip. The results indicate the significant success of the first approach across all metrics.

Simulation results confirm that both proposed approaches outperform individual PID, neuro-fuzzy, and switching controllers. However, the first approach achieves better performance in reducing stopping time, shortening stopping distance, and minimizing maximum slip on both dry and slippery road surfaces.

Table i. Comparison of controllers, approaches, and switching Control in dry and slippery roads

	Controller/ Method	Suspend Distance (Meter)	Suspend Time (Sec)	Maximum of Control Signal	Maximum Slip
dry road	PID	85	6.06	120	0.3
	Neuro-Fuzzy	130	8.09	6	0.15
	First Approach	88	6.2	100	0.24
	Second Approach	91	6.5	58	0.56
	Switching Control	90	7	120	1
slippery road	PID	126	8.96	274	0.32
	Neuro-Fuzzy	190	13.4	8	1
	First Approach	125	8.94	105	0.23
	Second Approach	129	9.2	230	1
	Switching Control	126	9.1	120	1

5. Conclusion

To achieve robust stability and optimal performance under uncertainty, disturbance, and control signal constraints, the combination of controllers is a suitable strategy. Industrial systems inherently contain uncertainty due to modeling errors or parameter variations, which prevents an exact mathematical description of real system behavior.

In this work, two controllers—a robust PID controller and a neuro-fuzzy controller—are designed to meet robust performance and stability objectives. These controllers are selected for their robustness to uncertainty and disturbance. Their outputs are then combined to exploit the complementary strengths of each.

A combined controller structure can deliver an appropriate response across all frequencies. Two approaches for designing the weighting functions used in the controller combination are presented, enabling effective blending of the two control actions while preserving stability and performance guarantees.

6. Acknowledgement

The authors express their sincere gratitude to the Islamic Azad University (IAU), Sabzevar Branch, for its support of this research.

References

- [1] H. Espitia, I. Machón, and H. López, “Design and Optimization of a Neuro-Fuzzy System for the Control of an Electromechanical Plant,” *Applied sciences*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: [10.3390/app12020541](https://doi.org/10.3390/app12020541).
- [2] Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, “Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, pp. 495–525, 2019, doi: [10.1007/s10462-018-9630-6](https://doi.org/10.1007/s10462-018-9630-6).

- [3] D. Somwanshi, M. Bundele, G. Kumar, and G. Parashar, "Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW," *Procedia Computer Science*, vol. 152, pp. 252-260, 2019, doi: [10.1016/j.procs.2019.05.019](https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.019).
- [4] A. H .Haroun and Y.Y Li, "A novel optimized hybrid fuzzy logic intelligent PID controller for an interconnected multi-area power system with physical constraints and boiler dynamics," *ISA transactions*, vol. 71(Pt 2), pp. 364–379, 2017, doi: [10.1016/j.isatra.2017.09.003](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.09.003).
- [5] N. Choug, S. Benaggoune, and S. Belkacem, "Hybrid Fuzzy Reference Signal Tracking Control of a Doubly Fed Induction Generator," *International Journal of Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 567-574, 2020, doi: [10.5829/ije.2020.33.04a.08](https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.04a.08).
- [6] M. Ghanamijaber "A hybrid fuzzy-PID controller based on gray wolf optimization algorithm in power system," *Evolving Systems*, vol. 10, pp. 273–284, 2019, doi: [10.1007/s12530-018-9228-x](https://doi.org/10.1007/s12530-018-9228-x).
- [7] P. Sharma and J. Ohri, "ANFIS Based PID Control of Antilock Braking System Model," *7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, Roorkee, India, 2023, pp. 1-6, doi: [10.1109/CERA59325.2023.10455135](https://doi.org/10.1109/CERA59325.2023.10455135).
- [8] A. J. Abougarair , N.A.A. Shashoa, and M.K.I. Aburakhis, "Performance of Anti-Lock Braking Systems Based on Adaptive and Intelligent Control Methodologies," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. 10, no. 3, pp. 626-643, 2022, doi: [10.52549/ijeie.v10i3.3794](https://doi.org/10.52549/ijeie.v10i3.3794).
- [9] F. Xu, X. Liang, M. Chen, and W. Liu, "Robust Self-Learning PID Control of an Aircraft Anti-Skid Braking System," *Mathematics*, vol. 10, 2022, doi: [10.3390/math10081290](https://doi.org/10.3390/math10081290).
- [10] N. Shiza and A. K. Singh, "A Study on control strategies utilized for performance enhancement of antilock braking system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80(Pt. 1), pp. 128-133, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2022.10.287](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.287).

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

Author Contributions: **Rasoul Hosseini:** Software, methodology, writing original draft preparation; **Javad MashayekhiFard:** Resources, methodology, manuscript editing; **Sepehr Soltani:** 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.

ترکیب کنترل کننده‌های PID مقاوم و عصبی - فازی برای بهینه‌سازی چند هدفه سیستم ترمز ضد قفل

رسول حسینی^۱ | جواد مشایخی فرد^۲ | سپهر سلطانی^۳

چکیده:

یک راه برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه آن است که برای هر هدف یک کنترل کننده طراحی گردد. سپس ترکیب کنترل کننده‌ها با وزن مشخص منجر به پاسخ بهینه می‌شود. در سیستم‌های صنعتی به علت وجود خطای مدل‌سازی یا تغییرات پارامترهای سیستم همواره عدم قطعیت در سیستم وجود خواهد داشت. عدم قطعیت باعث می‌شود یک سیستم واقعی را نتوان توسط مدل ریاضی کنترل نمود. در این مقاله ابتدا دو کنترل کننده PID مقاوم و عصبی - فازی برای رسیدن به اهداف عملکرد و پایداری مقاوم در سیستم ترمز ضد قفل طراحی شده‌اند. سیستم مذکور که یک سیستم مرتبه ۴، غیرخطی و چند متغیره است توسط کنترل غیرمتمرکز به چهار سیستم تک ورودی - تک خروجی تبدیل می‌شود. دو رویکرد جدید برای ترکیب کنترل کننده‌ها و طراحی توابع وزنی ارائه شده است. در رویکرد اول یک تابع وزنی برای سیگنال خطای سیستم با کنترل کننده PID و تابع وزنی دیگر برای سیگنال خطای سیستم با کنترل کننده عصبی - فازی با شرط پایداری مقاوم طراحی می‌شود. رویکرد دوم توسط فلوچارت پیشنهادی، دو فیلتر پایین گذر و بالا گذر ارائه می‌دهد که سه شرط خطای حالت ماندگار، حداکثر فراجاهش و زمان نشست مطلوب برآورده شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که دو رویکرد مذکور عملکرد مناسب‌تری در کاهش زمان مسافت توقف و کاهش حداکثر لغزش در دو جاده خشک و لغزنده در مقایسه با کنترل کننده‌های PID، عصبی - فازی دارد. عملکرد رویکرد اول در سیستم ترمز ضد قفل از رویکرد دوم مناسب موفق تر است.

^۱ گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران، rasoulhosseini@iaus.ac.ir

^۲ گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران، javad.mashayekhi@iau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران، sep_soltani@iaus.ac.ir

نویسنده مسئول

* جواد مشایخی فرد، استادیار گروه مهندسی برق، واحد سبزوار، دانشگاه آزاد اسلامی، سبزوار، ایران.
javad.mashayekhi@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

کنترل کننده‌های PID مقاوم و عصبی - فازی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۰ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۲۰ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۳ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها: توابع وزنی، سیستم ترمز ضد قفل، کنترل چند هدفه، PID مقاوم، عصبی - فازی.

تازه‌های تحقیق:

- در رویکرد اول تابع وزنی سیگنال خطای سیستم با کنترل کننده PID و کنترل کننده عصبی - فازی طراحی می‌شود.
- رویکرد دوم دو فیلتر پایین گذر و بالا گذر ارائه می‌دهد که سه شرط برآورده شوند.
- ترکیب کنترل کننده‌ها می‌تواند در تمام زمان‌ها و فرکانس‌ها پاسخ مناسب داشته باشد.
- مقایسه دو کنترل کننده، دو رویکرد و کنترل سوئیچینگ بر روی سیستم ترمز ضد قفل انجام شده است.

COPYRIGHTS

©2026 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 یک مسئله واقعی کنترل، چندین هدف برای فرآیند در نظر گرفته می‌شود. بیشتر مسائل بهینه‌سازی که انسان در دنیای واقعی با آن دست‌وپنجه نرم می‌کند بیش از یک هدف را در بر می‌گیرند، به‌طوریکه پاسخ بهینه مسئله هنگامی حاصل می‌گردد که کلیه اهداف به یک مرز خاصی از بهینگی رسیده باشند. این‌گونه مسائل را بهینه‌سازی چند هدفه (منظوره)^۱ می‌نامند. از آنجایی که در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، باید چند هدف به‌طور همزمان بهینه گردند و ممکن است این اهداف با هم در تضاد باشند لذا با مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه مواجه هستیم. یکی از روش‌های معمول این است که اهداف با هم ترکیب شوند و مسئله را مانند بهینه‌سازی تک هدفه در نظر گرفت [۱]. راه دیگر آن است که برای هر هدف یک کنترل‌کننده طراحی گردد. سپس ترکیب کنترل‌کننده‌ها با وزن مشخص منجر به پاسخ بهینه می‌شود. تعیین توابع وزنی اهمیت فراوانی دارد. مسئله عملکرد و پایداری با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت یکی از دغدغه‌های مهندسين کنترل بوده و واضح است که نگاه طراح به مسئله با در نظر گرفتن اهداف و محدودیت‌ها و طریقه حل آن سبب می‌شود روش‌های متفاوتی مطرح گردد. همچنین سیستم تحت کنترل نیز در طراحی کنترل‌کننده نقش بسزایی دارد. اینکه کدامیک از عدم‌قطعیت‌ها، دینامیک‌های مدل نشده فرکانس پایین و بالا، نویز اندازه‌گیری، خطای نمونه‌برداری و ... در فرآیند وجود دارد و همچنین پاسخ گذرای سیستم مورد توجه است یا پاسخ ماندگار، همه از مواردی هستند که باعث شده روش‌ها و مطالعات گوناگونی در این زمینه انجام شود. البته عمده کارها بر روی فیدبک حالت انجام شده و حل آن به کمک الگوریتم‌های تکاملی است و کمتر از یک روش نظری ریاضی استفاده گردیده است [۲]. روش‌های تئوری در هر مرحله اجرا تنها یک پاسخ را می‌توانند بیابند. همچنین نسبت به الگوریتم‌های تکاملی از پیچیدگی‌های محاسباتی بالایی برخوردار می‌باشند. در [۳] یک کنترل‌کننده مقاوم بر روی کوادروتور برای وظایف تنظیم و ردیابی مسیر ارائه می‌کند. موقعیت کوادروتور توسط کنترل‌کننده PID کنترل می‌شود، سپس با یک روش کاهش توان ترکیب می‌شود که شامل یک مرحله تنظیم بهره‌های کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته^۲ و یک مرحله طراحی مسیر حرکتی حداقلی است. کنترل دما در ساختمان‌ها معمولاً با صرفه‌جویی در انرژی انجام می‌شود، اگرچه راحتی ساکنان نیز با توجه به تأثیر آن بر بهره‌وری و سلامت مهم است. باین‌حال، بهره‌وری انرژی و راحتی اهداف متضاد هستند و بنابراین این نوع مشکل را می‌توان با استفاده از یک رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه حل کرد [۴]. توابع وزنی ابزاری هستند که می‌توانند به انعطاف‌پذیری مسئله و حتی جواب داشتن آن کمک شایانی کنند. در [۵] نویسندگان، با استفاده از روش هندسی یک شرط لازم و کافی برای عملکرد مقاوم در مقابل عدم‌قطعیت جمع شونده ارائه داده‌اند. این روش برای سیستم‌های تک ورودی - تک خروجی قابل اجراست. نویسندگان مقاله، این روش را کارآمدتر از مقدار استثنایی^۳ ساخت یافته می‌دانند. در واقع محاسبه حد بالای یک سطح بهینه-سازی که بر اساس اهداف تعیین شده به‌دست آمده، انجام می‌شود. در [۶] نویسندگان، الگوریتمی جهت انتخاب توابع وزنی به‌صورت خودکار برای کنترل‌کننده مقاوم H_∞ ارائه کرده‌اند و سپس بر روی سیستم یاتاقان‌های مغناطیس فعال شبیه‌سازی نموده‌اند. در کنترل مقاوم H_∞ ، دو تابع وزنی جهت برآورده سازی ویژگی‌های حلقه بسته طراحی شده است. در [۷]، یک طرح بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای طراحی بانک‌های فیلتر متعامد جهت فشرده‌سازی گفتار پیشنهاد شده است. یک پارامتر برای اطمینان از اینکه بانک‌های فیلتر حاصل بازسازی کامل را برآورده می‌کنند و حداقل دو لحظه ناپدید شدن دارند، اتخاذ گردیده است. در [۸]، به طراحی فیلترهای دیجیتال بهینه مختلف بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف برای پردازش سیگنال، تصویر و ویدئو پرداخته شده است. طراحی فیلترهای دیجیتال بر اساس الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی کلونی زنبورها، الگوریتم جستجوی فاخته، جستجوی گرانشی، جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری ارائه شده است. هدف کار [۹] طراحی بهینه یک فیلتر پاسخ ضربه محدود است. برای این منظور، یک تکنیک بهینه‌سازی یکپارچه پیشنهاد شده است. تکنیک بهینه‌سازی پیشنهادی تکنیک شعله پروانه^۴ و جستجوی الگوی پاول^۵ را به شیوه‌ای منسجم برای حفظ تعادل خوب بین قابلیت‌های اکتشاف و استخراج ترکیب می‌کند. در [۱۰]، یک تکنیک

¹ Multi-objective Optimization² cuckoo search algorithm³ Singular value⁴ Moth Flame Optimization⁵ Powell's Pattern Search

تکاملی به نام بهینه سازی جستجوی گردابی^۱ برای طراحی فیلتر دیجیتالی پاسخ ضربه محدود دوبعدی جهت بهبود عملکرد در مناطق باند عبور و توقف ارائه شده است. ضرایب فیلتر بهینه با به حداقل رساندن انحراف پاسخ فرکانس واقعی از پاسخ مورد نظر محاسبه می شود. در [۱۱]، یک تکنیک طراحی کنترل کننده PID مقاوم برای سیستم های نامعین پارامتری از طریق رویکرد تخصیص قطب غالب پیشنهاد گردیده است. در سیستم حلقه بسته، دو قطب در ناحیه غالب قرار می گیرند و تضمین می شود که قطب های باقیمانده دورتر از ناحیه قطب غالب تحت تمام اغتشاشات ممکن قرار دارند. [۱۲]، دو تکنیک کنترل بدون مدل و کنترل مقاوم PID را برای ارائه ردیابی مقاوم سیستم های شناور مغناطیسی^۲ پیشنهاد می کند. کنترل پایداری محلی از طریق روش سعی و خطا به دست می آید، در حالی که سایر پارامترها در سطح لغزش برای دستیابی به اهداف ردیابی و استحکام مورد نیاز تنظیم می شوند. [۱۳]، یک کنترل کننده منطق فازی را ارائه می کند که توسط آن یک ربات می تواند رفتارهای زیستی مانند اجتناب از موانع را انجام دهد. ساختار پیشنهادی با ادغام چندین حسگر اولتراسونیک در یک ربات برای جمع آوری داده ها از یک محیط واقعی پیاده سازی شده است. کنترل کننده منطق فازی مبتنی بر FPGA^۳ رفتار ربات و ناوبری خودکار را به عهده دارد. در [۱۴]، استفاده بهینه از انرژی باد هیبریدی فتوولتائیک برای ساختمان های مسکونی در زمان وقوع اتفاق با یک کنترل کننده فازی خودگردان را توصیف می کند. یک سیستم استنتاج فازی مستقل برای مدل سازی واحدهای اولیه کنترل کننده مانند پیش بینی بار، سوئیچ انتخاب توان شبکه و سیستم مدیریت انرژی تجدیدپذیر اعمال شده است. در [۱۵]، عنوان شده است یکی از ویژگی های سیستم های عصبی- فازی^۴، امکان گنجاندن اطلاعات اولیه در ساختار آنها و همچنین امکان ایجاد یک پیکربندی اولیه برای انجام آموزش است. طراحی و اجرای کنترل کننده عصبی - فازی بر اساس روابط بولی برای تنظیم موقعیت زاویه ای موتور در یک سیستم الکترومکانیکی انجام شده است. در [۱۶]، مقایسه شبکه های عصبی مصنوعی، منطق فازی و عصبی - فازی برای بهینه سازی مصرف حرارتی ساختمان انجام شده است. عصبی فازی از مزایای هر دو شبکه های عصبی مصنوعی و منطق فازی برخوردار است. نتایج نشان می دهد که روش عصبی فازی نسبت به منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی برای پیش بینی بارده حرارتی ساختمان ها موفق تر است. در [۱۷]، کنترل کننده PID و کنترل کننده PID مبتنی بر فازی برای طراحی پیشنهاد شده است. با مقایسه پاسخ ها، کنترل کننده PID مبتنی بر فازی عملکرد بهتری را ارائه می دهد. در [۱۸]، یک کنترل کننده هوشمند ترکیبی منطق فازی برای کنترل فرکانس بار سیستم های قدرت چند ناحیه ای به هم پیوسته پیشنهاد شده است. یک سیستم قدرت حرارتی به هم پیوسته چهار ناحیه ای با محدودیت های فیزیکی و دینامیک بویلر در نظر گرفته شده و پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده هوشمند ترکیبی منطق فازی با استفاده از بهینه سازی ازدحام ذرات و به کمک معیار خطای مربع انتگرال بهینه شده است. [۱۹]، یک طرح ترکیبی برای کنترل توان های فعال و راکتیو با استفاده از کنترل بردار مستقیم با جهت گیری شار استاتور ارائه کرده است. طرح ترکیبی از کنترل کننده های منطق فازی و کنترل ردیابی سیگنال مرجع تشکیل شده است. در [۲۰]، توسط بهینه ساز گرگ خاکستری، به تنظیم بهینه کنترل کننده PID با فیلتر پایین گذر برای سیستم قدرت چند ناحیه ای با نیروگاه ذخیره انرژی مغناطیسی ابررسانا می پردازد که تحت شرایط بارگذاری و عدم قطعیت های مختلف کار می کند. [۲۱]، کاربرد یک سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی در رابطه با یک کنترل کننده PID برای بهینه سازی عملکرد سیستم های ترمز ضد قفل (ABS) را بررسی می کند. [۲۲]، کنترل بنگ بنگ، PID، PID مبتنی بر مدل کنترل تطبیقی مرجع، کنترل منطق فازی و عصبی- فازی برای کنترل سیستم ترمز ضد قفل را تحلیل می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که عصبی- فازی در مقایسه با سایرین انعطاف پذیری بیشتری را ارائه می دهد و دقت ردیابی سیستم را بهبود می بخشد. به منظور مقابله با غیرخطی بودن و تداخل خارجی در فرآیند ترمز، [۲۳] یک الگوریتم PID خودآموز مقاوم را بر اساس بهینه سازی ازدحام ذرات پیشنهاد می کند که به یک مدل ریاضی دقیق بستگی ندارد. تابع خودآموزی برای انطباق با تنوع اصطکاک سطح جاده و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه سازی میزان خودآموزی و کنترل مقاوم برای مقابله با عدم قطعیت مدل سازی و اختلال خارجی استفاده می شود. در [۲۴] به بررسی تکنیک های کنترلی پیشرفته سیستم ترمز ضد قفل می پردازد. سیستم فازی کنترل گشتاور ترمز سریع در شرایط مختلف جاده ای می دهد. باین حال، عملکرد کنترل کننده، مقاوم است. تعداد قواعد زیاد و پارامترهای

¹ Vortex Search Optimization² Magnetic Levitation Systems³ Field programmable gate arrays⁴ Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

تنظیم برای محاسبه مدل عدم قطعیت در ABS، اجرا را پیچیده و بسیار دشوار می‌کند. شبکه‌های عصبی نیاز به تعداد زیادی از داده‌های آموزشی برای نتایج مطلوب در مقابل عدم قطعیت‌های سیستم دارد. کنترل‌کننده‌های PID به دلیل غیرخطی بودن سیستم، نامطلوب است. با این حال، رویکرد PID خود تنظیم تطبیقی دستاوردهای نتایج خوبی را برای آن ارائه می‌دهد [۲۴]. در این مقاله ترکیب دو کنترل‌کننده به کمک توابع وزنی مورد توجه است. برای این منظور، ابتدا طراحی کنترل‌کننده به دو روش عصبی-فازی و PID مقاوم انجام می‌گیرد که هر کدام پایداری مقاوم را تضمین می‌کند. سپس برای ترکیب آنها، دو رویکرد پیشنهاد شده است. رویکرد اول دو تابع وزنی ارائه می‌کند. تابع وزنی اول برای سیگنال خطای سیستم با کنترل‌کننده PID و تابع وزنی دوم برای سیگنال خطای سیستم با کنترل‌کننده عصبی-فازی به دست می‌آید. توابع وزنی به دست آمده با شرط پایداری مقاوم هستند. رویکرد دوم توسط فلوچارت پیشنهادی دو تابع وزنی ارائه می‌دهد که سه شرط خطای حالت ماندگار، حداکثر فراجهدش و زمان نشست مطلوب برآورده شوند. برای کاهش فاصله توقف و تضمین عملکرد ایمن خودرو در هنگام ترمزگیری از سیستم ترمز ضدقفل استفاده می‌شود. هدف ABS حفظ نسبت لغزش چرخ است. در بخش نتایج شبیه‌سازی مقایسه دو کنترل‌کننده، دو رویکرد و کنترل سوئیچینگ بر روی سیستم ترمز ضد قفل انجام شده است.

۲- مدل سازی سیستم ترمز ضد قفل

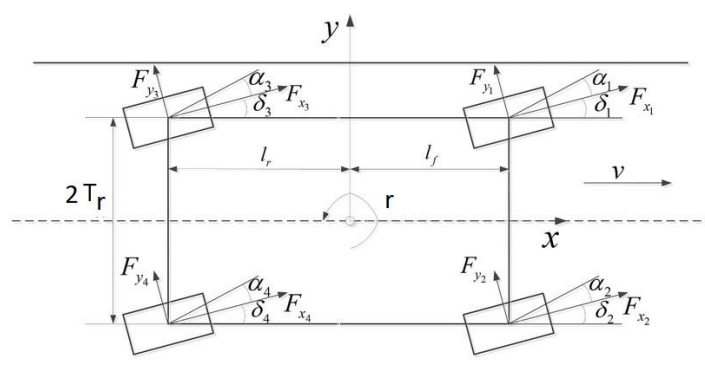
ترمزها ابزاری هستند که انرژی جنبشی وسیله نقلیه را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند، این تبدیل انرژی توسط پدیده اصطکاک انجام می‌شود. اولین ترمز وسایل نقلیه موتوری در سال ۱۸۸۵ توسط دایملر بنز و بعد از آن ترمز هیدرولیکی توسط لاکهید در سال ۱۹۱۷ ساخته شد. که مزایای آن را می‌توان تلفات اصطکاک کمتر و کم شدن ساییدگی لنتها دانست. سپس ترمز ضد قفل پدید آمد که نمونه کامل ترمز هیدرولیکی است. ترمز ضد قفل با سه هدف کاهش فاصله توقف، افزایش هدایت پذیری و تضمین پایداری خودرو پدید آمد [۲۴]. اولین بار ABS، به منظور توقف سریع و رفع مشکلات فرود هواپیماهای جت در باند فرود لغزنده توسعه یافت. اولین نوع این سیستم در سال ۱۹۴۷ در بمبافکن B-47 مورد استفاده قرار گرفت. امروزه کلیه هواپیماها و جنگنده‌ها به ABS مجهز هستند. در سال ۱۹۷۸ شرکت‌های مرسدس بنز و ب.ام.و از سیستم ترمز ضد قفل برای خودروهای سواری استفاده نمودند [۲۵]. برای مدل‌سازی چنین سیستمی نیاز به معادلات دینامیکی بدنه، چرخ‌ها، ترمز هیدرولیکی و تایر است. جدول ۱ پارامترهای ترمز ضدقفل را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای ترمز ضدقفل

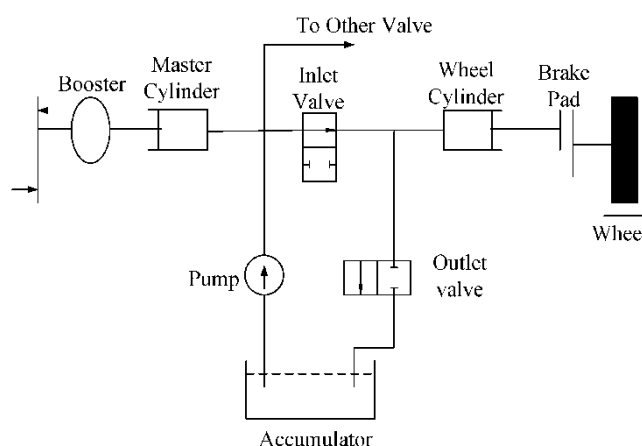
Table 1. Antilock Braking system Parameters

Parameter	Symbol	Parameter	Symbol
Longitudinal Friction Force	F_{yi}	Longitudinal Friction Force	F_{xi}
Total mass	m	Half front axel	T_f
Front and rear mass	m_f, m_r	Half rear axel	T_r
Distance front center of gravity to front axel	L_f	Moment of inertia of wheel	I_o
Distance front center of gravity to rear axel	L_r	Height of the sprung mass	h
Inertia moment	I_z	Wheel radius	R_o
Brake torque	T_{bi}	Viscous friction coefficient	B
Effective orifice area	A_2, A_1	Vehicle linear acceleration	a_x
Constant pump pressure	P_p	Coefficient of the flow	C_f
Hydraulic pressure	P_i	Constant reservoir pressure	P_{low}
Coefficient(0,1)	C_{d2}, C_{d1}	Fluid density	ρ

معادلات دینامیکی بدنه با سه درجه آزادی سرعت طولی، سرعت جانبی، نرخ چرخش و با توجه به شکل ۱ به صورت روابط ۱ تا ۳ در نظر گرفته شده است [۲۵].



شکل ۱: مدل چهار چرخ خودرو [۲۶]
Figure1. Four-wheel vehicle model[26]



شکل ۲: سیستم ترمز هیدرولیکی [۲۷]
Figure2. Hydraulic brake system[27]

$$\dot{v}_x = -\frac{1}{m}[(f_{x1} + f_{x2}) \cos \delta + f_{x3} + f_{x4} - (f_{y1} + f_{y2}) \sin \delta] + v_y r \quad (1)$$

$$\dot{v}_y = \frac{1}{m}[-(f_{x1} + f_{x2}) \sin \delta + f_{y3} + f_{y4} + (f_{y1} + f_{y2}) \cos \delta] - v_x r \quad (2)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z}[-L_f(f_{x1} + f_{x2}) \sin \delta + l_f(f_{y1} + f_{y2}) \cos \delta - L_r(f_{y3} + f_{y4}) + T_f(f_{x1} - f_{x2}) \cos \delta + T_f(f_{y1} - f_{y2}) \sin \delta + T_r(f_{x3} - f_{x4})] \quad (3)$$

معادله دینامیکی هر یک از چرخ‌ها بدون در نظر گرفتن نیروی محرکه موتور به صورت رابطه ۴ است.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I} [fR - T - B\omega], i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

تایر با توجه به ناحیه تماس کم با جاده دارای اهمیت خاصی است. مدل استفاده شده در این مقاله توسط پارک و لیم ارائه گردید که بر اساس یک مدل اصطکاک تایر است. رابطه ۵ ضریب اصطکاک بین جاده و لاستیک را به عنوان تابعی از لغزش چرخ می‌دهد [۲۸]. که در آن C_1 ، C_2 و C_3 برای توصیف شرایط مختلف جاده ثابت هستند. C_1 حداکثر مقدار منحنی اصطکاک است، C_2 شکل منحنی اصطکاک را می‌دهد و C_3 نشان دهنده تفاوت بین حداکثر مقدار منحنی اصطکاک و لغزش یک است. در جدول ۲ مقادیر ثابت مدل اصطکاک تایر برای جاده خشک و لغزنده را نشان می‌دهد [۲۸].

$$\mu(s) = C_1(1 - e^{-C_2 s}) - C_3 s \quad (5)$$

جدول ۲: مقادیر ثابت مدل اصطکاک تایر برای جاده خشک و لغزنده

Table2. Road condition constants for dry and slippery road			
Road	C_1	C_2	C_3
Dry	1.28	23.99	0.52
Slippery	0.857	33.822	0.347

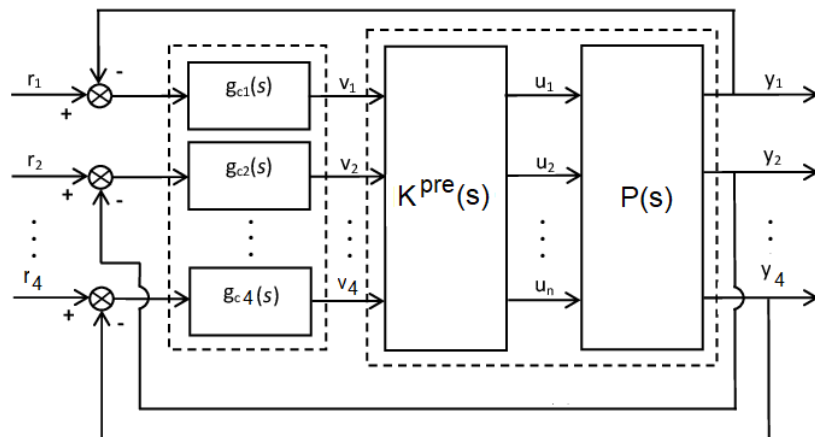
معادله حاکم بر تغییرات فشار خروجی سیستم هیدرولیکی با توجه به شکل ۲ توسط رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$\dot{P}_i = \frac{A_1}{c_f} cd_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_p - P_i)} - \frac{A_2}{c_f} cd_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_i - P_{low})} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (6)$$

لغزش هر یک از چرخه به صورت رابطه ۷ است.

$$S_i = 1 - [(R_{\omega} \omega_i) / (V_{\omega_i} \cos \alpha_i)] \quad i = 1, \dots, 4 \quad (7)$$

در یک سیستم چند ورودی - چند خروجی تداخل وجود دارد. یک رویکرد برای کنترل این سیستم‌ها کنترل غیرمتمرکز است [۲۹]. اگر در سیستم چند متغیره ماتریس دکوپله ساز پیدا گردد تداخل سیستم کم می‌شود و می‌توان توسط چند کنترل کننده تک ورودی - تک خروجی آن را کنترل نمود [۳۰]. شکل ۳ نمایانگر کنترل غیرمتمرکز است.

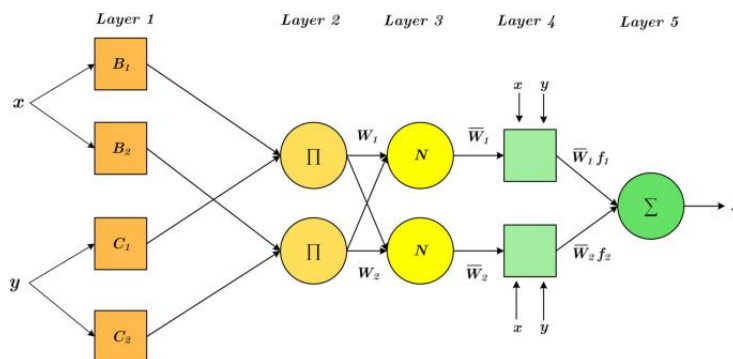


شکل ۳: کنترل کننده غیر متمرکز
Figure3. Decentralized Controller

۳-۱ کنترل کننده عصبی - فازی

کنترل کننده‌های فازی برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط ممدانی و اصیلان جهت کنترل کوره سیمان استفاده شد. در سال ۱۹۷۸ هولمبلاد و اوسترگارد اولین کنترل کننده فازی را برای کنترل کوره سیمان به کار بردند. در سال‌های اخیر، کنترل کننده‌های هوشمند از جمله عصبی و فازی که بدون نیاز به دانش مقدماتی دینامیک سیستم عمل می‌کنند، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. شبکه عصبی جزو دسته محاسبات سطح پایین قرار می‌گیرد و قابلیت یادگیری، محاسبات موازی و تخمین شرایط پیچیده غیرخطی را دارد. کنترل بر اساس منطق فازی یکی دیگر از روش‌های هوشمند است که از استراتژی کنترل زبانی برای استخراج فرمان کنترل استفاده می‌کند. این روش کنترلی به مدل دقیق دینامیکی احتیاج ندارد ولی به یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی پاسخ سیستم برای استخراج قواعد فازی نیازمند است. برای آموزش پایگاه قواعد فازی و هوشمندسازی توابع عضویت می‌توان از شبکه عصبی بهره برد [۳۱]. کنترل کننده فازی این امکان را ایجاد می‌کند تا ادراک انسانی در قالب قوانین ریاضی به کار گرفته شوند. معمولاً کنترل کننده فازی شامل عبارات شرطی زبانی است که توسط نیروی انسانی ماهر استخراج شده و ارائه کننده دانش او در ارتباط با سیستم کنترل است. کنترل کننده فازی جزو دسته محاسبات سطح بالا است و از دانش فرد خبره بهره می‌برد. شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی تخمین گرهای مستقل از مدل می‌باشند و قابلیت‌های مشابهی را در برخورد با عدم قطعیت از خود نشان می‌دهند. لذا امکان تبدیل کردن سیستم استنتاج فازی به فرم یک شبکه آموزش پذیر وجود دارد. شبکه‌ای که از این طریق به دست می‌آید می‌تواند روش‌های یادگیری شبکه‌های عصبی را به منظور آموزش پارامترهای خود بکار گیرد. به علاوه ساختار حاصل از این طریق به صورت یک سیستم جعبه سیاه باقی نمانده و با توجه به قابلیت تفسیرپذیری سیستم‌های فازی مزایای بیشتری خواهد داشت و نتیجه نهایی به فرم قواعد زبانی قابل بیان

خواهد بود. ساختار عصبی- فازی از دو بخش تشکیل شده است بخش نخست مقدم و بخش دوم تالی نامیده می شود [۳۲]. که این دو بخش توسط قواعد فازی در فرم یک شبکه به یکدیگر متصل می شوند.



شکل ۴: ساختار شبکه عصبی- فازی دارای دو ورودی

Figure4. ANFIS structure with two input

شکل ۴ ساختار شبکه عصبی- فازی را در ۵ لایه نمایش می دهد [۳۱]، که در آن لایه اول عمل فازی سازی را انجام می دهد، لایه دوم عمل Tnorm فازی را برای بخش مقدم قواعد فازی انجام می دهد، لایه سوم به منظور نرمال سازی به کار می رود، لایه چهارم بخش تالی قواعد فازی را ایجاد می نماید و در نهایت لایه پنجم خروجی نهایی سیستم را محاسبه می کند. به منظور مدل سازی سیستم های غیرخطی پیچیده، مدل عصبی- فازی فضای ورودی را به نواحی محلی فراوانی تقسیم می کند. شبکه عصبی- فازی از توابع عضویت فازی به منظور تقسیم هر بعد ورودی استفاده می نماید.

۳-۲ کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتق گیر (PID):

این کنترل کننده عملیات تناسب، انتگرال و مشتق را بر روی سیگنال خطا انجام می دهد و رابطه آن در حوزه لاپلاس به صورت رابطه ۸ است.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (8)$$

در این کنترل کننده T_i و T_d و K_p قابل تنظیم می باشند و تنظیم K_p بر عملیات مشتق و انتگرال نیز تأثیر می گذارد. یکی از روش های مقاوم تنظیم کنترل کننده های PID روش کهن-کن^۱ است [۳۳]. این روش بر اساس مدل $G_p(s) = \frac{K}{1 + T_s s} e^{-Ls}$ است. معیار اصلی طراحی حذف اثر اغتشاش است. در این روش سعی می شود قطب های غالب در جایی قرار گیرند که نسبت حداکثر خطا در هر دوره تناوب (نسبت تنزل)، 0.25 باشد. برای کنترل کننده PID قطب ها طوری تنظیم می شوند که علاوه بر قید نسبت تنزل، بهره حداکثر $K_i = K_p / T_i$ و حداکثر گردد. سه قطب اختصاص داده شده است. دو قطب موهومی و قطب سوم حقیقی است. فاصله قطب حقیقی تا مبدأ برابر فاصله قطب های موهومی تا مبدأ است. فاصله قطب ها از مبدأ طوری تنظیم می شود که انتگرال خطا حداقل گردد. بر اساس محاسبات تحلیلی و عددی داریم [۳۴]:

$$T_d = \frac{0.37(1-\tau)}{1-0.81\tau} L \text{ و } T_i = \frac{2.5-2\tau}{1-0.39\tau} L, K_p = \frac{1.35(1+\frac{0.18\tau}{1-\tau})}{a}$$

$$\text{که } a = \frac{KL}{T} \text{ و } \tau = \frac{L}{L+T} \text{ است.}$$

^۱ Cohen-Coon

۳-۳ کنترل کننده پیشنهادی

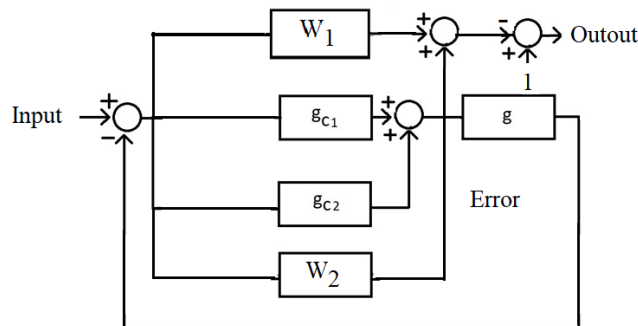
معمولاً هر کدام از کنترل کننده‌های گفته شده دارای برتری در بخشی از پاسخ زمانی و فرکانسی هستند. به همین منظور ترکیب کنترل کننده‌ها مورد توجه است [۳۴]. دو رویکرد ارائه خواهد شد که توابع وزنی را برای رسیدن به کارایی بهتر نتیجه می‌دهد. ابتدا طراحی دو کنترل کننده‌های PID مقاوم و عصبی- فازی برای رسیدن به اهداف عملکرد و پایداری مقاوم انجام و سپس ترکیب دو کنترل کننده PID مقاوم و عصبی- فازی برای استفاده از مزایای هر دو استفاده می‌شود. معمولاً هر کنترل کننده در زمان‌ها و فرکانس‌هایی پاسخ مناسب‌تری دارد. ترکیب کنترل کننده‌ها می‌تواند در تمام زمان‌ها و فرکانس‌ها پاسخ مناسب داشته باشد. به‌طور مثال یک کنترل کننده در حالت گذرا پاسخ مناسب دارد و کنترل کننده دیگر در حالت ماندگار مطلوب است. ترکیب این دو کنترل کننده باعث می‌شود در هر دو حالت گذرا و ماندگار پاسخ مناسب داشته باشد.

۳-۳-۱ رویکرد اول

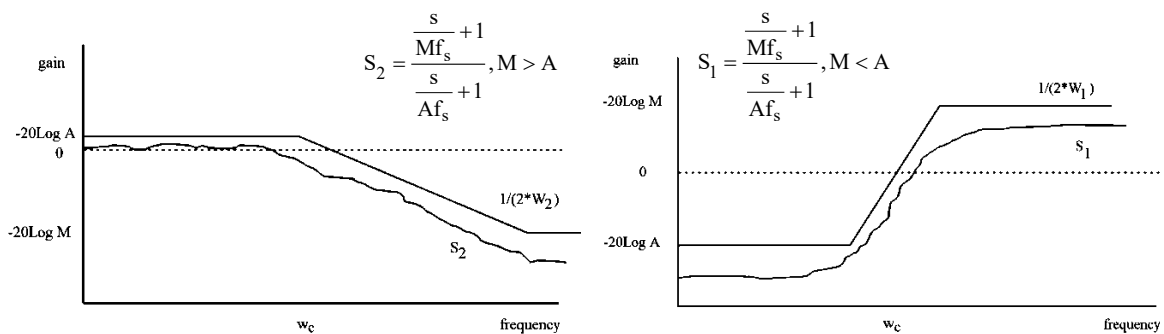
شکل ۵ کنترل کننده پیشنهادی رویکرد اول به‌کاررفته در سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد. کنترل کننده g_{c1} طوری طراحی می‌شود که سه شرط عملکرد مقاوم، پایداری مقاوم و کاهش نویز را داشته باشد. تابع وزنی W_1 به‌گونه‌ای طراحی می‌گردد تا شرط عملکرد به‌صورت $\|W_1 S_1\|_\infty < 1$ شود. که در آن $S_1 = (1 + g g_{c1})^{-1}$ است. کنترل کننده g_{c2} طوری طراحی می‌شود که سه شرط عملکرد مقاوم، پایداری مقاوم و کاهش نویز را داشته باشد. تابع وزنی W_2 به‌گونه‌ای طراحی می‌گردد تا شرط عملکرد به‌صورت $\|W_2 S_2\|_\infty < 1$ شود. که در آن $S_2 = (1 + g g_{c2})^{-1}$ است. هر کدام از کنترل کننده‌های g_{c1} و g_{c2} دارای برتری‌هایی هستند. برای استفاده از مزایای هر دو کنترل کننده آنها ترکیب می‌گردند و رابطه به‌صورت ۹ نوشته می‌شود.

$$\|W_1 S_1\|_\infty + \|W_2 S_2\|_\infty < 1 \rightarrow \|W_1 S_1\|_\infty < \frac{1}{2}, \|W_2 S_2\|_\infty < \frac{1}{2} \rightarrow \|W_1\|_\infty < \frac{1}{2\|S_1\|_\infty}, \|W_2\|_\infty < \frac{1}{2\|S_2\|_\infty}, S = (1 + g g_c)^{-1}, T = g g_c (1 + g g_c)^{-1} \quad (9)$$

با توجه به تابع حساسیت یا خطای سیستم و به‌صورت شکل ۶، توابع وزنی به دست می‌آیند.



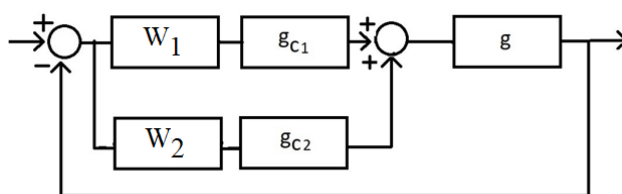
شکل ۵: کنترل کننده پیشنهادی رویکرد اول به‌کاررفته در سیستم حلقه بسته
Figure5. The proposed controller of the first approach in the closed loop system



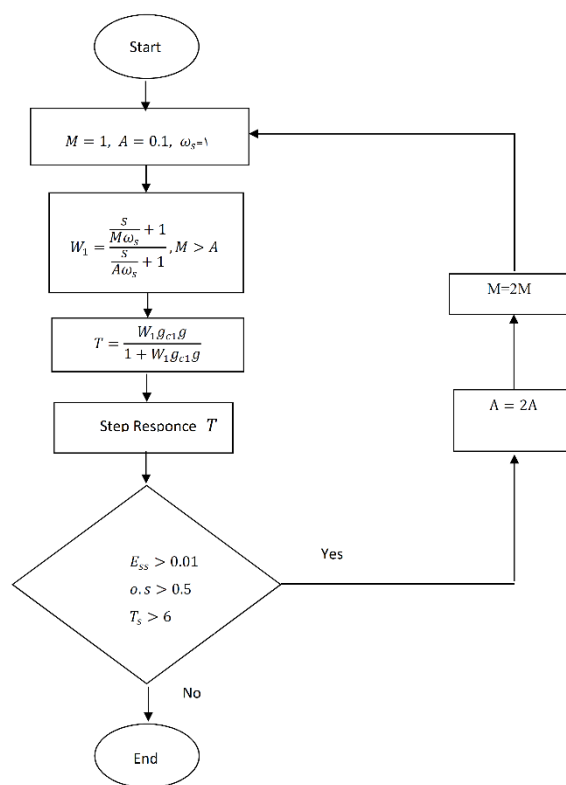
شکل ۶: روش تعیین عکس تابع وزنی حساسیت
Figure6. the determining of the weighting sensitivity function

۳-۳-۲ رویکرد دوم

در شکل ۷، g تابع تبدیل سیستم، g_{c1} تابع تبدیل کنترل کننده اول، g_{c2} تابع تبدیل کنترل کننده دوم است. در این رویکرد از دو فیلتر پایین گذر و بالاگذر استفاده می‌گردد. با فرض بر اینکه کنترل کننده اول اورشوت زیادی دارد و قابل قبول نیست اما در مقابل خطای حالت ماندگار صفر است. در نتیجه از نظر پاسخ فرکانسی فرکانس های پایین مطلوب است و باید از فیلتر پایین گذر استفاده نمود. با فرض بر اینکه کنترل کننده دوم پاسخ گذرای مناسب اما در مقابل خطای حالت ماندگار دارد. در نتیجه از نظر پاسخ فرکانسی دارای فرکانس های بالای مطلوب و فرکانس های پایین نامطلوب است. لازم است فیلتر بالا گذر برای کنترل کننده دوم طراحی شود. شکل ۸ فلوجارت تعیین تابع وزنی فیلتر پایین گذر را نشان می‌دهد. تابع وزنی با سه شرط خطای حالت ماندگار، حداکثر فراجش و زمان نشست مطلوب به دست می‌آید. با جابجایی M و A تابع وزنی فیلتر بالاگذر تعیین می‌شود.



شکل ۷: کنترل کننده پیشنهادی رویکرد دوم به کاررفته در سیستم حلقه بسته
Figure7. The proposed controller of the second approach in the closed loop system



شکل ۸: فلوجارت تعیین تابع وزنی فیلتر پایین گذر رویکرد دوم
Figure.8. Flowchart of the weighting function at the second approach

۴- نتایج شبیه سازی

با افزایش سرعت و تراکم ترافیک جاده‌ای، خودروهای امروزی باید به‌طور مداوم سرعت خود را در واکنش به شرایط تغییر جاده و ترافیک تغییر دهند. در خودروهای پیشرفته، سیستم ترمز ضد قفل یک سیستم ایمنی خودرو است که با تغییر گشتاور برای حفظ نسبت لغزش در سطح ایمن، پایداری و قابلیت‌های فرمان خودرو را افزایش می‌دهد. بیشترین نیروی

اصطکاک طولی به ازای $S=0.2$ است. ابتدا توسط کنترل غیرمتمرکز پیش جبران سازی طراحی می‌گردد تا سیستم ترمز ضدقفل که یک سیستم مرتبه ۴، غیرخطی، چند متغیره است به ۴ سیستم تک ورودی- تک خروجی تبدیل شود. ماتریس دکوپله ساز K^{pre} به صورت ۱۰ به دست می‌آید. شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب R2018a انجام شده است.

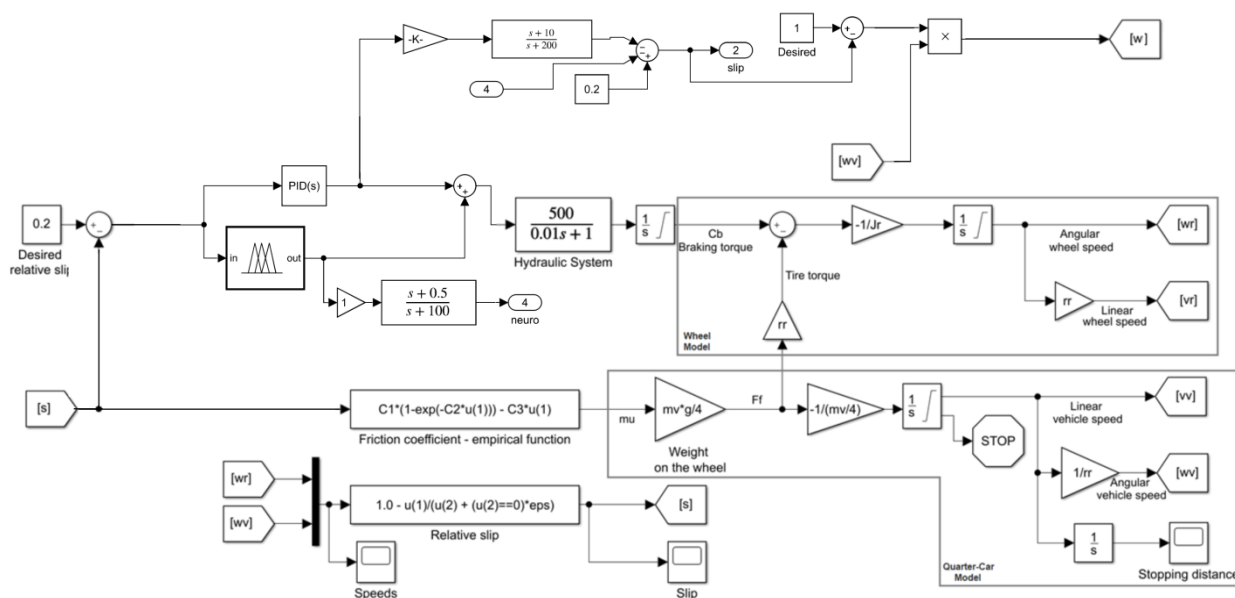
$$K^{pre} = K \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K > 150 \quad (10)$$

با توجه به معادلات ترمز ضدقفل، مدل‌سازی سیستم با کنترل کننده رویکرد اول به صورت شکل ۹ است. J_r ممان اینرسی چرخ، m_v جرم خودرو، g تاب ثقل زمین، v_0 سرعت اولیه خودرو، r_r شعاع چرخ و C_{bmax} حداکثر گشتاور ترمز است. مقادیر آن به صورت رابطه ۱۱ است.

$$J_r = 5 \text{ kgm}^2, m_v = 800 \text{ kg}, g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, v_0 = 28 \frac{\text{m}}{\text{s}}, r_r = 0.28 \text{ m}, C_{bmax} = 1500 \text{ N.M} \quad (11)$$

به کمک پاسخ پله با مدل $\frac{K}{s(1+Ts)} e^{-Ls}$ تقریب زده و سپس با توجه به روش تنظیم کهن-کن ضرایب کنترل کننده PID

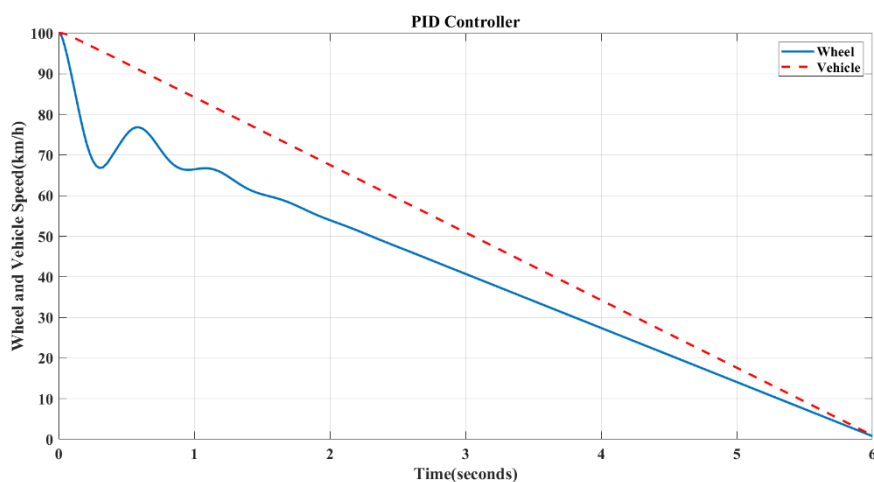
به صورت $K_p=100, K_d=5, K_i=3$ تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن جاده خشک، زمان توقف ۶.۰۶ ثانیه، سیگنال کنترلی ۱۲۰ واحد و حداکثر فراجش ۵۰٪ است و خطای حالت ماندگار صفر است. سپس با در نظر گرفتن ۱۰ تابع عضویت گوسی کنترل کننده عصبی- فازی طراحی می‌شود. خطای حالت ماندگار ۰/۰۹ و حداکثر فراجش ۳۰٪ است. زمان توقف ۸/۰۹ ثانیه و سیگنال کنترلی ۶ واحد است. دامنه نوسانات نسبت به کنترل کننده PID کمتر اما خطای حالت ماندگار دارد. در رویکرد اول تابع وزنی کنترل کننده PID به صورت $W_1 = \frac{0.002(s+10)}{s+200}$ و تابع وزنی کنترل کننده عصبی- فازی به صورت $W_2 = \frac{s+0.5}{s+100}$ به دست می‌آید.



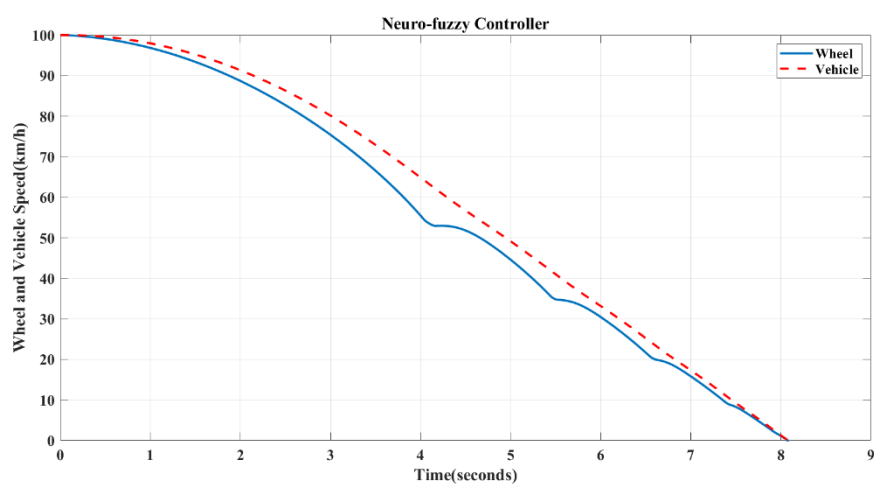
شکل ۹: مدل‌سازی و کنترل سیستم ترمز ضدقفل به روش رویکرد اول
Figure 9. Modeling and control of the anti-lock braking system in the first approach method

پس از اعمال دو فیلتر و ترکیب دو کنترل کننده اورشوت سیستم ۲۳٪، خطای حالت ماندگار صفر و سیگنال کنترلی ۱۰۰ واحد است. در رویکرد دوم فیلتر پایین گذر و بالاگذر با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب به صورت $W_1 = \frac{0.1(s+1000)}{s+100}$ و

شکل های ۱۰ و ۱۱ سرعت خودرو و چرخ برای جاده خشک کنترل کننده های PID و عصبی- فازی را نشان می دهند. زمان توقف ۲/۰۳ ثانیه در کنترل کننده عصبی- فازی بیشتر است اما استهلاک کمتری دارد.

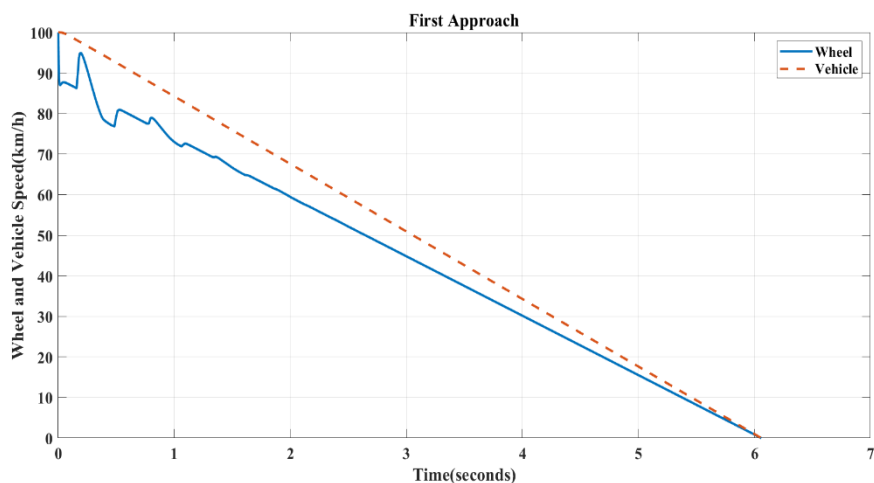


شکل ۱۰: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده PID جاده خشک
Figure 10. Vehicle and wheel speed for PID controller on dry road

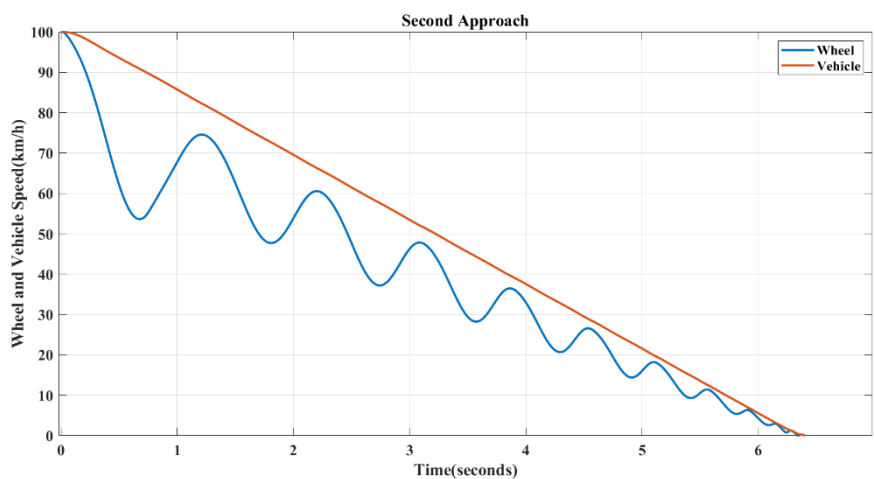


شکل ۱۱: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده عصبی- فازی جاده خشک
Figure 11. Vehicle and wheel speed for ANFIS controller on dry road

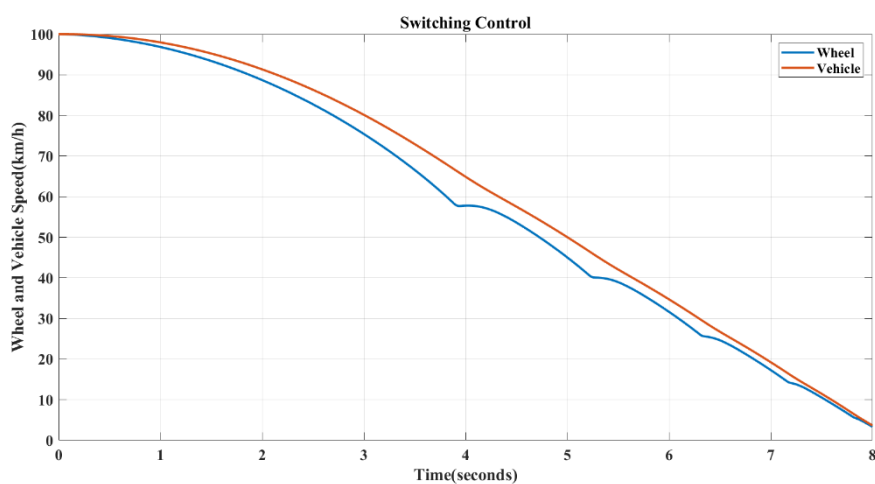
شکل های ۱۲ و ۱۳ سرعت خودرو و چرخ برای جاده خشک رویکرد اول و رویکرد دوم را نشان می دهند. زمان توقف ۰/۳ ثانیه در رویکرد دوم بیشتر است اما حداکثر سیگنال کنترلی کمتری دارد. یکی از رویکردها استفاده از کنترل سوئیچینگ است. اینکه در فرکانسها و لحظاتی PID استفاده می شود و در لحظات و فرکانسهای دیگر عصبی- فازی.



شکل ۱۲: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده با رویکرد اول جاده خشک
Figure 12. Vehicle and wheel speed for the first approach on dry road

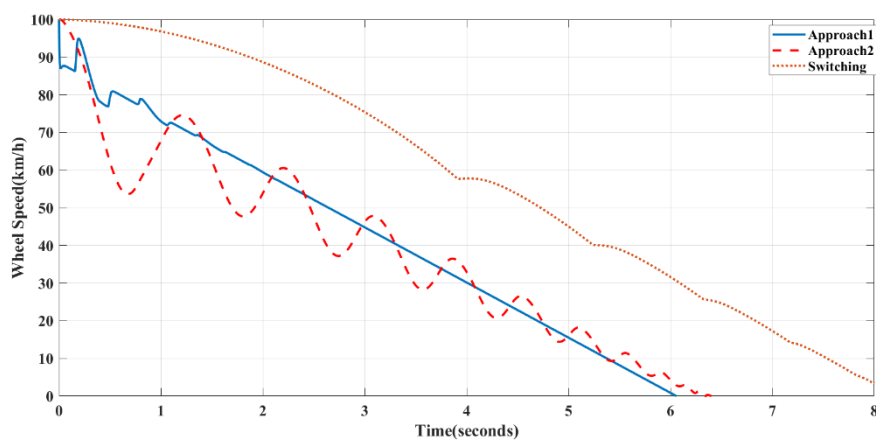


شکل ۱۳: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده با رویکرد دوم جاده خشک
Figure 13. Vehicle and wheel speed for the second approach on dry road



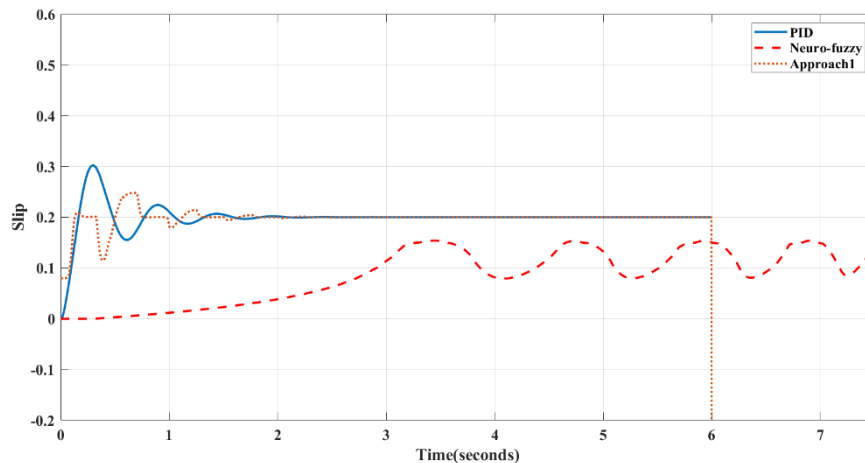
شکل ۱۴: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل سوئیچینگ جاده خشک
Figure 14. Vehicle and wheel speed for the switching control on dry road

شکل ۱۴ سرعت خودرو و چرخ برای جاده خشک با کنترل سوئیچینگ را نشان می‌دهد. از نظر حداکثر سیگنال کنترلی، حداکثر فراجهش و زمان توقف موفقیت کمتری نسبت به دو رویکرد اول و دوم دارد. شکل ۱۵ مقایسه سرعت چرخ برای رویکرد اول، رویکرد دوم و کنترل سوئیچینگ در جاده خشک را نشان می‌دهد که موفقیت رویکرد اول مشهود است.



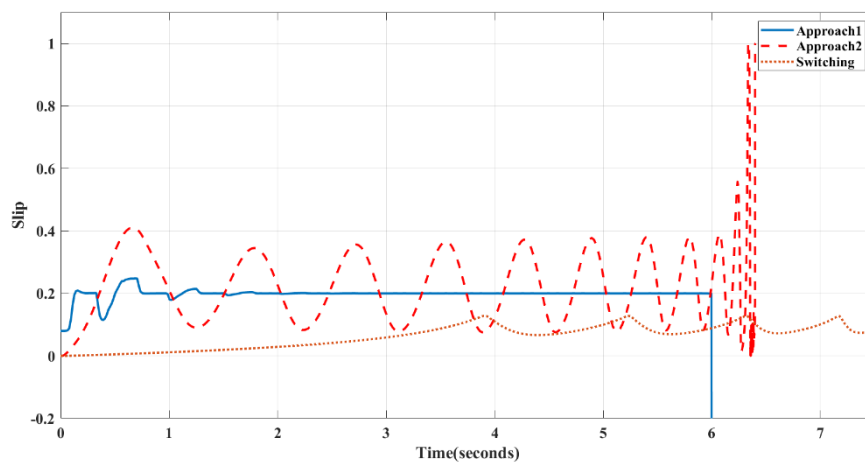
شکل ۱۵: مقایسه سرعت چرخ برای رویکرد اول، رویکرد دوم و کنترل سوئیچینگ جاده خشک

Figure 15. Compare the wheel speed for the first approach, second approach, and switching control on dry road



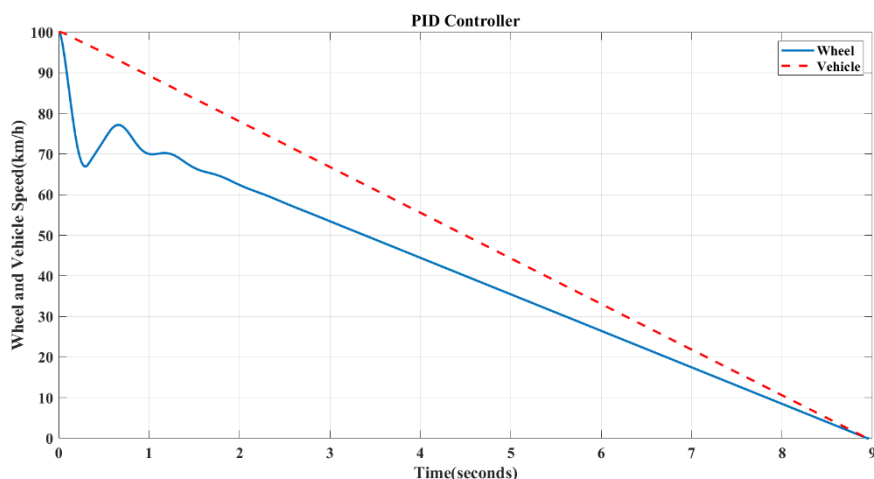
شکل ۱۶: مقایسه لغزش برای PID، عصبی- فازی و رویکرد اول جاده خشک

Figure 16. Compare the slip for the PID, ANFIS, and first approach on dry road

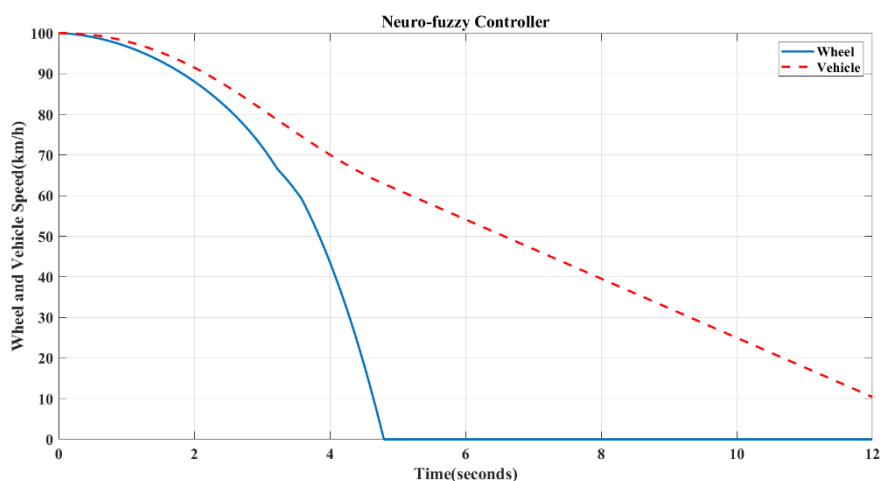


شکل ۱۷: مقایسه لغزش برای رویکرد اول، رویکرد دوم و سوئیچینگ جاده خشک

Figure 17. Compare the slip for the first approach, second approach, and switching control on dry road



شکل ۱۸: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده PID جاده لغزنده
Figure 18. Vehicle and wheel speed for PID controller on slippery road

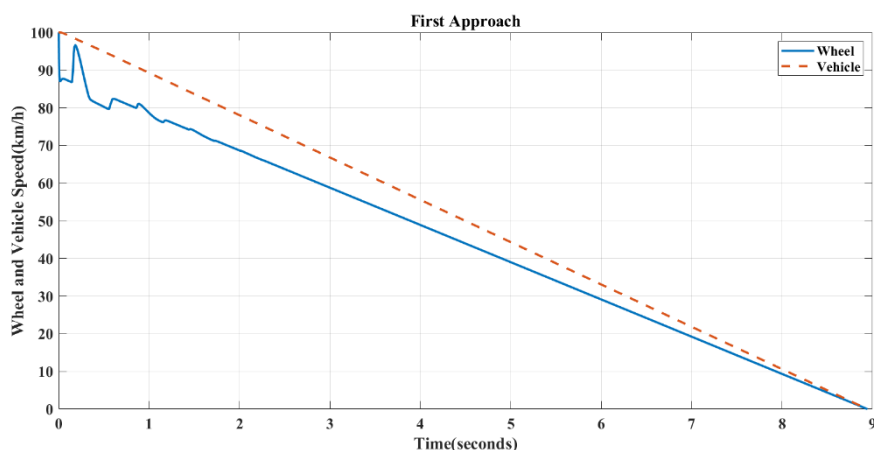


شکل ۱۹: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده عصبی- فازی جاده لغزنده
Figure 19. Vehicle and wheel speed for ANFIS controller on slippery road

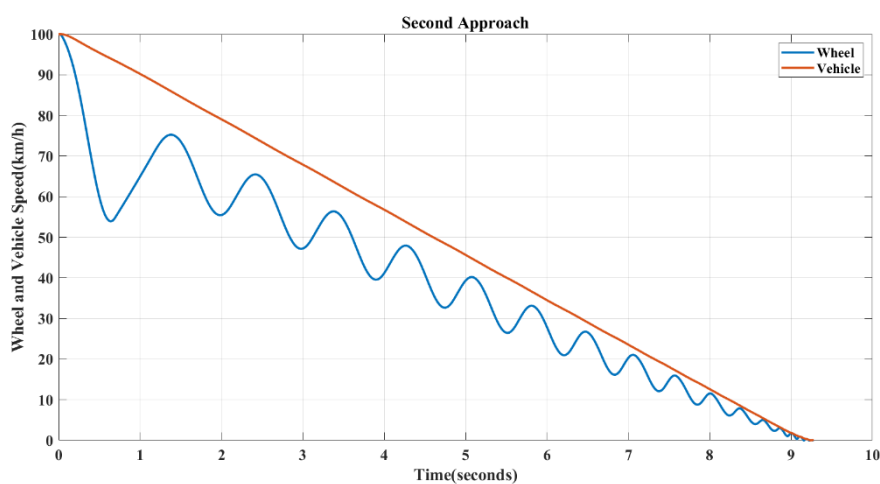
شکل ۱۶ مقایسه لغزش برای PID، عصبی- فازی و رویکرد اول برای جاده خشک را نشان می‌دهد. شکل ۱۷ لغزش برای رویکرد اول، رویکرد دوم و سوئیچینگ برای جاده خشک را نشان می‌دهد که موفقیت رویکرد اول مشخص است. برای تحلیل بیشتر نتایج جاده لغزنده نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ سرعت خودرو و چرخ برای جاده لغزنده کنترل کننده‌های PID و عصبی- فازی را نشان می‌دهند.

زمان توقف ۴/۴۴ ثانیه در کنترل کننده عصبی- فازی بیشتر است اما استهلاک کمتری دارد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ سرعت خودرو و چرخ برای جاده لغزنده رویکرد اول و رویکرد دوم را نشان می‌دهند. زمان توقف ۰/۲۶ ثانیه در رویکرد دوم بیشتر است و حداکثر سیگنال کنترلی بیشتری دارد. شکل ۲۲ سرعت خودرو و چرخ برای جاده لغزنده با کنترل سوئیچینگ را نشان می‌دهد.

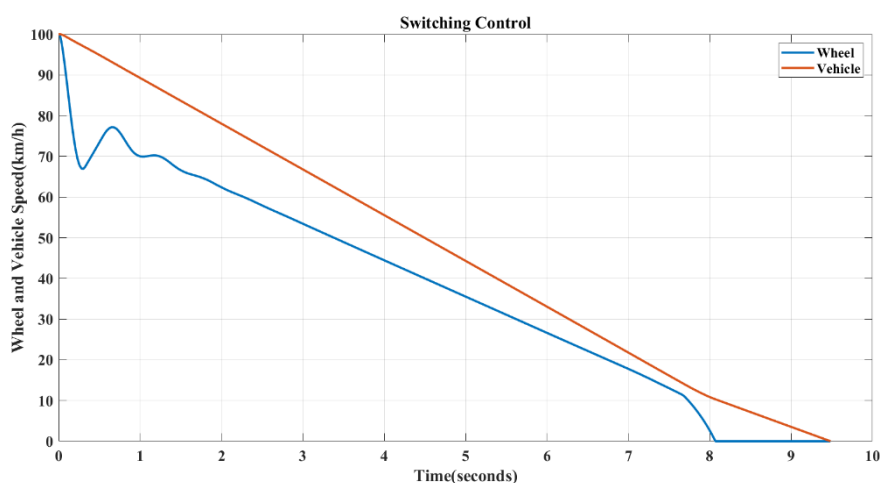
از نظر حداکثر سیگنال کنترلی، حداکثر فراجاهش و زمان توقف موفقیت کمتری نسبت به رویکرد اول دارد.



شکل ۲۰: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده با رویکرد اول جاده لغزنده
Figure 20. Vehicle and wheel speed for the first approach on slippery road

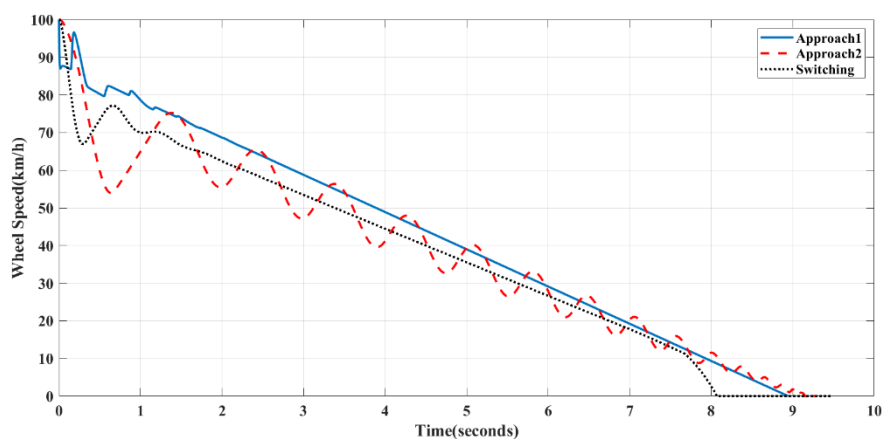


شکل ۲۱: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده با رویکرد دوم جاده لغزنده
Figure 21. Vehicle and wheel speed for the second approach on slippery road



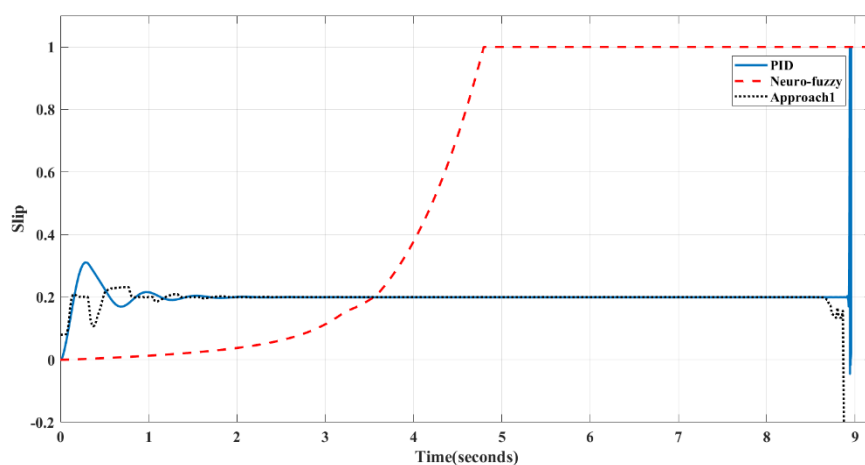
شکل ۲۲: سرعت خودرو و چرخ برای کنترل کننده با کنترل سوئیچینگ جاده لغزنده
Figure 22. Vehicle and wheel speed for the switching control on slippery road

شکل ۲۳ مقایسه سرعت چرخ برای رویکرد اول، رویکرد دوم و کنترل سوئیچینگ در جاده لغزنده را نشان می‌دهد که موفقیت رویکرد اول مشهود است. شکل ۲۴ مقایسه لغزش برای PID، عصبی- فازی و رویکرد اول جاده لغزنده را نشان می‌دهد. شکل ۲۵ مقایسه لغزش برای رویکرد اول، رویکرد دوم و سوئیچینگ جاده لغزنده را نشان می‌دهد، موفقیت رویکرد اول مشخص است.



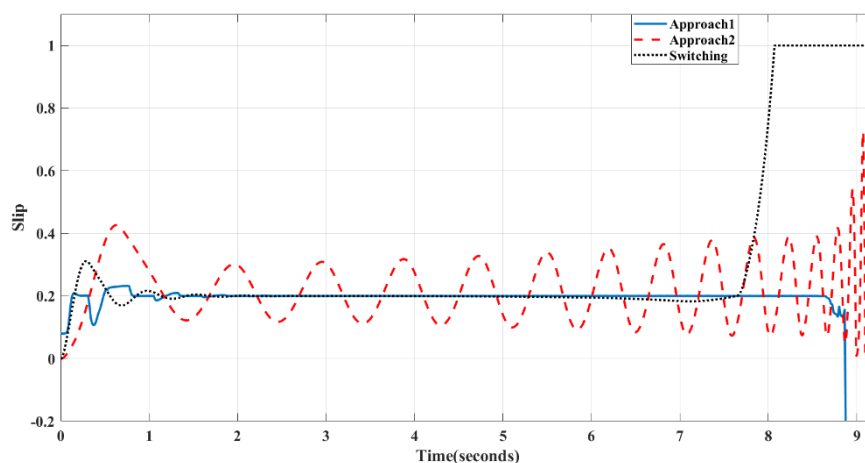
شکل ۲۳: مقایسه سرعت چرخ برای رویکرد اول، رویکرد دوم و کنترل سوئیچینگ جاده لغزنده

Figure 23. Compare the wheel speed for the first approach, second approach, and switching control on slippery road



شکل ۲۴: مقایسه لغزش برای PID، عصبی-فازی و رویکرد اول جاده لغزنده

Figure 24. Compare the slip for the PID, ANFIS, and first approach on slippery road



شکل ۲۵: مقایسه لغزش برای رویکرد اول، رویکرد دوم و سوئیچینگ جاده لغزنده

Figure 25. Compare the slip for the first approach, second approach, and switching control on slippery road

جدول ۳ مقایسه کنترل کننده‌ها، رویکردها و کنترل سوئیچینگ در دو حالت جاده آسفالت خشک و لغزنده برای مسافت و زمان توقف، حداکثر سیگنال کنترلی و حداکثر لغزش را نشان می‌دهد که رویکرد اول موفقیت چشمگیری دارد. نتایج شبیه‌سازی

نشان می‌دهند هر دو رویکرد در مقابل کنترل کننده های PID، عصبی- فازی و سوئیچینگ موفق می باشند اما رویکرد اول در کاهش زمان و مسافت توقف و کاهش حداکثر لغزش در دو جاده خشک و لغزنده عملکرد بهتری دارد.

جدول ۳: مقایسه کنترل کننده ها، رویکردها و کنترل سوئیچینگ در دو حالت جاده خشک و لغزنده

Table 3. Compare of controllers, approaches and switching Control in dry and slippery road

	Controller/ Method	Suspend Distance (Meter)	Suspend Time (Sec)	Maximum of Control Signal	Maximum Slip
dry road	PID	85	6.06	120	0.3
	Neuro-Fuzzy	130	8.09	6	0.15
	First Approach	88	6.2	100	0.24
	Second Approach	91	6.5	58	0.56
	Switching Control	90	7	120	1
slippery road	PID	126	8.96	274	0.32
	Neuro-Fuzzy	190	13.4	8	1
	First Approach	125	8.94	105	0.23
	Second Approach	129	9.2	230	1
	Switching Control	126	9.1	120	1

۵- نتیجه گیری

برای رسیدن به پایداری مقاوم و عملکرد مطلوب در حضور عدم قطعیت، اغتشاش، محدودیت دامنه سیگنال کنترلی، ترکیب کنترل کننده ها مناسب است. در سیستم های صنعتی به علت وجود خطای مدل سازی یا تغییرات پارامترهای سیستم همواره عدم قطعیت در سیستم وجود خواهد داشت. عدم قطعیت باعث می شود هیچ گاه نتوان به طور دقیق رفتار یک سیستم واقعی را توسط یک مدل ریاضی توصیف نمود. در این مقاله ابتدا دو کنترل کننده PID مقاوم و عصبی- فازی برای رسیدن به اهداف عملکرد و پایداری مقاوم طراحی شده اند. سپس برای استفاده مزایای هر دو کنترل کننده، با هم ترکیب گردیده اند. علت انتخاب دو کنترل کننده مذکور مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت و اغتشاش است. ترکیب کنترل کننده ها می تواند در تمام فرکانس ها پاسخ مناسب داشته باشد. دو رویکرد برای طراحی توابع وزنی ارائه شده است. رویکرد اول دو تابع وزنی برای سیگنال خطای سیستم با کنترل کننده PID و کنترل کننده عصبی- فازی ارائه می کند. سپس از روی تابع حساسیت کل که همان خطای سیستم و ناشی از ترکیب کنترل کننده ها است خروجی سیستم نتیجه می شود. توابع وزنی به دست آمده با شرط پایداری مقاوم هستند. رویکرد دوم دو تابع وزنی که در واقع فیلترهای پایین گذر و بالا گذر هستند ارائه می دهد دو فیلتر مذکور توسط فلوچارت پیشنهادی تعیین می گردند که سه شرط خطای حالت ماندگار، حداکثر فرجهش و زمان نشست مطلوب برآورده شوند. سیستم مورد بررسی ترمز ضد قفل است که مرتبه ۴، غیر خطی و چند متغیره است و توسط کنترل غیر متمرکز و پیش جبران سازی به ۴ سیستم تک ورودی- تک خروجی تبدیل می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهند هر دو رویکرد در مقایسه با کنترل کننده های PID، عصبی- فازی و سوئیچینگ موفق هستند اما رویکرد اول در کاهش زمان و مسافت توقف و کاهش حداکثر لغزش در دو جاده خشک و لغزنده عملکرد بهتری در مقابل رویکرد دوم دارد.

مراجع

- [1] Y. Cui, Z. Geng, Q. Zhu, and Y. Han, "Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving," *Energy*, vol. 125, pp. 681-704, 2017, doi: [10.1016/j.energy.2017.02.174](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.174).
- [2] V. Palakonda and R. Mallipeddi, "An Evolutionary Algorithm for Multi and Many-Objective Optimization With Adaptive Mating and Environmental Selection," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82781-82796, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2991752](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991752).
- [3] R. Miranda-Colorado and L. T. Aguilar, "Robust PID control of quadrotors with power reduction analysis," *ISA Trans.*, vol. 98, pp. 47-62, 2020, doi: [10.1016/j.isatra.2019.08.045](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.045).

- [4] M. Martell, F. Rodríguez, M. Castilla, and M. Berenguel, "Multiobjective control architecture to estimate optimal set points for user comfort and energy saving in buildings," *ISA transactions*, vol. 99, pp. 454–464, 2020, doi: [10.1016/j.isatra.2019.10.006](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.10.006).
- [5] V. Raissi Dehkordi and B. Boulet, "Frequency-Domain Robust Performance Condition for Controller Uncertainty in SISO LTI Systems: A Geometric Approach," *Journal of Control Science and Engineering*, 2009, doi: [10.1155/2009/746762](https://doi.org/10.1155/2009/746762).
- [6] S. Sarath, "Automatic Weight Selection Algorithm for Designing H Infinity controller for Active Magnetic Bearing," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. .3, no.1, pp.122-138, 2011.
- [7] B.Boukhobza, N. Taleb, A. Taleb-Ahmed, and A. Bounoua, "Design of orthogonal filter banks using a multi-objective genetic algorithm for a speech coding scheme," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 10, pp. 7649-7657, 2022, doi: [10.1016/j.aej.2022.01.017](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.017).
- [8] R. V. Ravi *et al.*, "Optimization algorithms, an effective tool for the design of digital filters; a review," *J Ambient Intell Human Comput.*, 2019, doi: [10.1007/s12652-019-01431-x](https://doi.org/10.1007/s12652-019-01431-x).
- [9] T. Mittal, "Design of Optimal FIR Filters Using Integrated Optimization Technique," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 40, pp. 2895–2925, 2021, doi: [10.1007/s00034-020-01602-8](https://doi.org/10.1007/s00034-020-01602-8).
- [10] S. Yadav, R. Yadav, A. Kumar, and M. Kumar, "Design of Optimal Two-Dimensional FIR Filters with Quadrantally Symmetric Properties Using Vortex Search Algorithm," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 29, no. 10, 2020, doi: [10.1142/S0218126620501558](https://doi.org/10.1142/S0218126620501558).
- [11] E. Dincel and M. T. Söylemez, "Robust PID controller design via dominant pole assignment for systems with parametric uncertainties," *Asian journal of control*, vol. 24, no. 2, pp. 834-844, 2022, doi: [10.1002/asjc.2484](https://doi.org/10.1002/asjc.2484).
- [12] A. Wahyudie *et al.*, "Simple Robust PID Tuning for Magnetic Levitation Systems Using Model-free Control and H_∞ Control Strategies," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 19, pp. 3956–3966, 2021, doi: [10.1007/s12555-020-0253-8](https://doi.org/10.1007/s12555-020-0253-8).
- [13] C. Chen, C. Wang, Y. T. Wang, and P. T. Wang, "Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots," *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, doi: [10.1155/2017/8984713](https://doi.org/10.1155/2017/8984713).
- [14] M. Anthony *et al.*, "Autonomous Fuzzy Controller Design for the Utilization of Hybrid PV-Wind Energy Resources in Demand Side Management Environment," *Electronics*, vol. 10, 2021, doi: [10.3390/electronics10141618](https://doi.org/10.3390/electronics10141618).
- [15] H. Espitia, I. Machón, and H. López, "Design and Optimization of a Neuro-Fuzzy System for the Control of an Electromechanical Plant," *Applied ciences*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: [10.3390/app12020541](https://doi.org/10.3390/app12020541).
- [16] Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, "Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, pp. 495–525, 2019, doi: [10.1007/s10462-018-9630-6](https://doi.org/10.1007/s10462-018-9630-6).
- [17] D. Somwanshi, M. Bunde, G. Kumar, and G. Parashar, "Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW," *Procedia Computer Science*, vol. 152, pp. 252-260, 2019, doi: [10.1016/j.procs.2019.05.019](https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.019).
- [18] A. H. Haroun and Y.Y Li, "A novel optimized hybrid fuzzy logic intelligent PID controller for an interconnected multi-area power system with physical constraints and boiler dynamics," *ISA transactions*, vol. 71(Pt 2), pp. 364–379, 2017, doi: [10.1016/j.isatra.2017.09.003](https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.09.003).
- [19] N. Choug, S. Benagguone, and S. Belkacem, "Hybrid Fuzzy Reference Signal Tracking Control of a Doubly Fed Induction Generator," *International Journal of Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 567-574, 2020, doi: [10.5829/ije.2020.33.04a.08](https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.04a.08).

- [20] M. Ghanamijaber "A hybrid fuzzy-PID controller based on gray wolf optimization algorithm in power system," *Evolving Systems*, vol. 10, pp. 273–284, 2019, doi: [10.1007/s12530-018-9228-x](https://doi.org/10.1007/s12530-018-9228-x).
- [21] P. Sharma and J. Ohri, "ANFIS Based PID Control of Antilock Braking System Model," *7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, Roorkee, India, 2023, pp. 1-6, doi: [10.1109/CERA59325.2023.10455135](https://doi.org/10.1109/CERA59325.2023.10455135).
- [22] A. J. Abougarair , N.A.A. Shashoa, and M.K.I. Aburakhis, "Performance of Anti-Lock Braking Systems Based on Adaptive and Intelligent Control Methodologies," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. 10, no. 3, pp. 626-643, 2022, doi: [10.52549/ijeeci.v10i3.3794](https://doi.org/10.52549/ijeeci.v10i3.3794).
- [23] F. Xu, X. Liang, M. Chen, and W. Liu, "Robust Self-Learning PID Control of an Aircraft Anti-Skid Braking System," *Mathematics*, vol. 10, 2022, doi: [10.3390/math10081290](https://doi.org/10.3390/math10081290).
- [24] N. Shiza and A. K. Singh, "A Study on control strategies utilized for performance enhancement of antilock braking system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80(Pt. 1), pp. 128-133, 2023, doi: [10.1016/j.matpr.2022.10.287](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.287).
- [25] J. MashayekhiFard, A. Khaki-Sedigh, and M.A.Nekoui, "Modelling and Control of Four-Wheel Anti-lock Braking System," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no.2, 2012.
- [26] H. Yin, Y.H. Chen, and D. YU, "Vehicle motion control under equality and inequality constraints: a diffeomorphism approach," *Nonlinear Dynamics*, vol. 95, pp. 175-194, 2019, doi: [10.1007/s11071-018-4558-6](https://doi.org/10.1007/s11071-018-4558-6).
- [27] J. Guo, X. Jian, and G. Lin, "Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller," *Energies*, vol. 7, pp. 6459-6476, 2014, doi: [10.3390/en7106459](https://doi.org/10.3390/en7106459).
- [28] Z. Zhao *et al.*, "Integrated Active Suspension and Anti-Lock Braking Control for Four-Wheel-Independent-Drive Electric Vehicles," *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 37, 2024, doi: [10.1186/s10033-024-00997-8](https://doi.org/10.1186/s10033-024-00997-8).
- [29] E. C. goud, S. Rao, and M. Chidambaram, "Improved Decentralized PID Controller design for MIMO Processes," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 153-158, 2020, doi: [10.1016/j.ifacol.2020.06.026](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.06.026).
- [30] D. Dileep *et al.*, "Design of robust decentralised controllers for MIMO plants with delays through network structure exploitation," *International Journal of Control*, vol. 93, no.10, pp.2275-2289, 2020, doi: [10.1080/00207179.2018.1554268](https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1554268).
- [31] I. Ahmadianfar *et al.*, "An improved adaptive neuro fuzzy inference system model using conjoined metaheuristic algorithms for electrical conductivity prediction," *Sci Rep.*, vol. 12, 2022, doi: [10.1038/s41598-022-08875-w](https://doi.org/10.1038/s41598-022-08875-w).
- [32] L. Ouada, S. Benaggoune, and S. Belkacem, "Neuro-fuzzy sliding mode controller based on a brushless doubly fed induction generator," *Int J Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 248–256, 2020, doi: [10.5829/IJE.2020.33.02B.09](https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.02B.09).
- [33] I. Abbas and M. Mustafa, "A review of adaptive tuning of PID-controller: Optimization techniques and applications," *Int J Nonlinear Anal Appl.*, vol. 15, no. 2, pp. 29–37, 2024, doi: [10.22075/ijnaa.2023.21415.4024](https://doi.org/10.22075/ijnaa.2023.21415.4024).
- [34] R. Hosseini, J. Mashayekhi Fard, and S. Soltani, "Active filter design and synthesis for hybrid neuro-fuzzy and robust PID controllers," *Int. J. Dynam. Control.*, 2024, doi: [10.1007/s40435-024-01457-w](https://doi.org/10.1007/s40435-024-01457-w).

An Edge-Aware Learning Framework for IoT Malware Classification Using Block-Average-Based Adaptive Dimensionality Reduction

Shohreh Ajoudanian^{1,3*}  | Maryam Nooraei Abadeh² 

¹Department of Computer Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
shajoudanian@iau.ac.ir

²Department of Computer Engineering, Arv. C., Islamic Azad University, Abadan, Iran
ma.nooraei@iau.ac.ir

³Big Data Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Correspondence

Shohreh Ajoudanian, Assistant Professor of Computer Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Email: shajoudanian@iau.ac.ir

Main Subjects:

IoT

Paper History:

Received: 16 March 2025

Revised: 27 April 2025

Accepted: 7 May 2025

Abstract

The rapid growth of Internet of Things (IoT) has led to many connected devices, creating major challenges in cybersecurity and large-scale data handling. A key issue is detecting new malware that traditional signature-based methods often fail to identify. Machine learning has been introduced as a promising solution for classifying IoT malware. However, implementing these models directly on IoT devices is difficult due to limitations in processing power, memory, and energy resources. To overcome these issues, this paper presents an edge-aware learning framework that incorporates an adaptive block-averaged dimensionality reduction technique. This approach enables data to be processed locally on edge devices, reducing the need to transmit large volumes of raw data to cloud servers. Consequently, the framework significantly reduces processing latency, accelerates threat detection, and increases efficiency in environments with limited resources. The adaptive dimensionality reduction method effectively compresses feature data while preserving essential information. In summary, the proposed solution enables the deployment of secure, high-performance, real-time malware detection systems in IoT ecosystems, thereby enhancing overall system efficiency and ensuring better protection against evolving threats.

Keywords: Internet of Things, Edge aware processing, Malware classification, Block average-based dimensionality reduction, Machine learning.

Highlights

- Introducing ABMD method for IoT data processing with high accuracy and preserving critical information.
- Design an integrated architecture for raw IoT data analysis and malware detection using machine learning.
- Utilizing optimization algorithms for machine learning models such as LGBM and RF to enhance accuracy and reduce processing time.

Citation: Sh. Ajoudanian, and M. Nooraei Abadeh, "An Edge-Aware Learning Framework for IoT Malware Classification Using Block-Average-Based Adaptive Dimensionality Reduction," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 24–46, 2026, doi:10.71656/jce.2026.12261202184 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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 rapid growth of Internet of Things (IoT) systems has led to an exponential increase in data generation, creating significant challenges for efficient data processing and security management. Traditional malware detection methods, such as signature-based approaches, often fail to identify new and evolving threats in these environments [1]. The high dimensionality of IoT data also adds complexity, making it difficult to maintain system efficiency and accuracy [2]. Recent studies have emphasized the importance of feature reduction techniques to enhance computational efficiency and system reliability in IoT networks [1, 3]. To address these challenges, this paper introduces an innovative feature reduction method based on Adaptive Block Mean Division (ABMD). This method ensures the preservation of critical information while minimizing noise, enabling IoT systems to process data more efficiently. By integrating ABMD with machine learning models, the proposed approach improves key performance metrics, including accuracy, recall, and F1-score, in malware detection tasks. Additionally, the method demonstrates its effectiveness in handling unknown threats and optimizing data processing in distributed IoT environments, paving the way for more secure and efficient IoT systems [1, 3].

2. Innovation and contributions

This paper introduces a novel framework to address the challenges of malware detection and classification in resource-constrained IoT environments. The proposed method utilizes an Adaptive Block Mean Division (ABMD) technique for feature reduction, which effectively minimizes data dimensionality while preserving critical information. This approach not only reduces noise but also optimizes the performance of IoT devices, making it well-suited for low-power and resource-limited systems. Furthermore, an edge-aware learning framework is presented, enabling on-device malware classification and reducing dependency on cloud-based systems, which significantly enhances response times. The method is evaluated on real-world IoT datasets, demonstrating its ability to detect and classify unknown malware with high accuracy and efficiency. Additionally, the study compares the performance of various machine learning models, including Logistic Regression, Random Forest, and LightGBM, highlighting the effectiveness of the proposed approach in improving performance metrics such as accuracy, recall, and F1-score. By bridging the gap between traditional malware detection methods and the growing need for lightweight, efficient solutions, this study offers a scalable and practical framework for enhancing security in distributed IoT systems.

3. Materials and Methods

The study leverages the BODMAS dataset, which includes 134,435 samples comprising 57,293 malware and 77,142 benign Windows PE files collected between August 2019 and September 2020. Each sample is represented by 2,381 features, encompassing non-destructive metadata, binary information, and other attributes crucial for malware detection. To address the challenge of high-dimensional data, the Adaptive Block Mean Division (ABMD) method is employed for feature reduction, which effectively eliminates noise and reduces dimensionality while preserving essential information.

Following the feature reduction process, multiple machine learning models, such as Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), k-Nearest Neighbors (k-NN), LightGBM (LGBM), and Linear Discriminant Analysis (LDA), are trained and evaluated to classify malware. The models are validated using k-fold cross-validation techniques to ensure robustness and generalizability. The proposed approach also incorporates edge-aware processing to optimize performance within IoT environments, allowing for efficient on-device classification and reducing dependency on centralized systems. This combination of advanced feature reduction and machine learning algorithms ensures a scalable and efficient solution for malware detection and classification.

4. Results and Discussion

The results of this study demonstrate the effectiveness of the Adaptive Block Mean Division (ABMD) technique in reducing data dimensionality and noise while preserving essential features for malware detection and classification. The proposed method significantly improved the performance of machine learning models across several evaluation metrics, including accuracy, recall, F1-score, and processing efficiency. Among the tested models, LightGBM (LGBM) and Random Forest (RF) achieved the highest overall performance, with LGBM demonstrating superior accuracy and F1-score in most scenarios.

Comparative analysis with other feature reduction methods, such as Principal Component Analysis (PCA) and SKBF, revealed that ABMD consistently outperformed these approaches by maintaining higher recall and precision rates. For instance, ABMD achieved an F1-score of 0.915 in the Logistic Regression model, which was higher than the scores obtained by PCA and SKBF. Additionally, ABMD proved to be highly effective in handling complex and unknown threats, showcasing its adaptability in dynamic IoT environments.

Furthermore, the edge-aware learning framework integrated with ABMD demonstrated significant improvements in response times, making it suitable for real-time malware detection in IoT devices. The study also highlighted the role of feature reduction in minimizing computational load, which is critical for resource-constrained IoT

systems. Overall, the proposed approach not only enhances detection accuracy but also provides a scalable and efficient solution for improving IoT system security.

5. Conclusion

This study introduced a novel framework for malware detection and classification in IoT environments, addressing the critical challenges of high-dimensional data and resource constraints. By employing the Adaptive Block Mean Division (ABMD) technique for feature reduction, the proposed method successfully minimized noise and preserved essential information, leading to significant improvements in accuracy, recall, and F1-score across multiple machine learning models. Among the evaluated models, LightGBM and Random Forest demonstrated superior performance, highlighting the effectiveness of the proposed approach.

The integration of edge-aware processing further enhanced the system's efficiency by enabling real-time classification and reducing dependence on centralized systems, making the framework ideal for dynamic and resource-constrained IoT environments. Comparative analysis with other feature reduction methods showed that ABMD consistently outperformed traditional approaches like PCA and SKBF, establishing its robustness and adaptability.

In conclusion, the proposed framework bridges the gap between conventional malware detection methods and the growing need for lightweight, efficient solutions tailored for IoT systems. It provides a scalable, reliable, and effective solution for improving security in distributed environments, paving the way for future research and applications in IoT security.

6. Acknowledgement

The authors appreciate the efforts of all colleagues and collaborators who assisted in data collection, analysis, and validation, enabling the successful completion of this study.

References

- [1] H. Alasmary *et al.*, "Analyzing and Detecting Emerging Internet of Things Malware: A Graph-Based Approach," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8977-8988, Oct. 2019, doi: [10.1109/JIOT.2019.2925929](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2925929).
- [2] A. Ibrahim, Kh. Wassif, and H. Bayomi, "Dimensionality reduction for images of IoT using machine learning," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 7205, 2024, doi: [10.1038/s41598-024-57385-4](https://doi.org/10.1038/s41598-024-57385-4).
- [3] R. Ghadiri and M. Elhajj, "Security and Performance Analysis of Edge Computing in IoT," in *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, Malang, Indonesia, 2023, pp. 542-548, doi: [10.1109/COMNETSAT59769.2023.10420709](https://doi.org/10.1109/COMNETSAT59769.2023.10420709).

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

Author Contributions: **Shohreh Ajoudanian:** Methodology, writing original draft preparation; **Maryam Nooraei Abadeh:** Resources, 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

یک چارچوب یادگیری لبه-آگاه برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT با استفاده از کاهش تطبیقی ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک

شهره آجودانیان^{۱*} | مریم نورانی آباد^۲

چکیده:

با گسترش سریع اینترنت اشیا، تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته که این امر چالش‌های بزرگی در زمینه امنیت سایبری و پردازش حجم عظیمی از داده‌ها ایجاد کرده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تشخیص بدافزارهای جدید است که روش‌های سنتی مبتنی بر امضا قادر به شناسایی آن‌ها نیستند. در این راستا، استفاده از یادگیری ماشین به‌عنوان یک راهکار جدید برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT مطرح شده است، اما اجرای مستقیم این مدل‌ها بر روی دستگاه‌های IoT به دلیل محدودیت‌های پردازشی، حافظه محدود و مصرف انرژی بالا، با مشکلات جدی روبه‌رو است. در این پژوهش، چارچوبی یادگیری آگاه از لبه برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT معرفی می‌شود که از روش کاهش تطبیقی ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک بهره می‌برد. این روش داده‌ها را به‌صورت محلی و در خود دستگاه‌های لبه‌ای پردازش می‌کند، که به کاهش نیاز به ارسال حجم زیادی از داده‌ها به سرورهای ابری کمک می‌کند. در نتیجه، استفاده از این چارچوب باعث کاهش تأخیر پردازش، افزایش سرعت واکنش به تهدیدات و بهبود کارایی در محیط‌هایی با منابع محدود می‌شود. با اعمال کاهش ابعاد تطبیقی، ویژگی‌های داده‌ها به شکلی بهینه کاهش می‌یابند بدون اینکه اطلاعات کلیدی از دست برود. در نهایت، این روش امکان پیاده‌سازی سیستم‌های امنیتی بلادرنگ با کارایی و امنیت بالا در محیط‌های IoT را فراهم می‌آورد و به‌طور قابل توجهی به افزایش کارایی این سیستم‌ها کمک می‌کند.

^۱گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران،

shajoudanian@iau.ac.ir

^۲گروه مهندسی کامپیوتر، واحد بین‌المللی اروند، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران،

ma.nooraei@iau.ac.ir

^۳مرکز تحقیقات کلان‌داده، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران،

shajoudanian@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*شهره آجودانیان، استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

shajoudanian@iau.ac.ir

موضوع اصلی: IoT

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۶ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا، پردازش لبه‌آگاه، طبقه‌بندی بدافزار، کاهش ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک، یادگیری ماشین.

تازه‌های تحقیق:

- ارائه روش کاهش ابعاد ویژگی تطبیقی ماتریسی (ABMD) برای پردازش داده‌های IoT با دقت بالا و حفظ اطلاعات مهم.
- طراحی معماری یکپارچه برای تحلیل داده‌های خام IoT و شناسایی بدافزارها با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین.
- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین مانند LGBM و RF برای بهبود دقت و کاهش زمان پردازش.

COPYRIGHTS

©2026 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

بسیاری از سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT) از پردازش لبه‌آگاه استفاده می‌کنند که داده‌ها را قبل از ارسال به سرورهای ابری، به صورت محلی پردازش می‌کند. روش پیشنهادی کاهش ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک^۱ (ABMD) باعث می‌شود پردازش داده‌ها مستقیماً روی دستگاه‌های لبه‌ای انجام شود که منجر به کاهش تأخیر در پردازش، افزایش واکنش سریع به تهدیدات و کاهش وابستگی به سرورهای ابری که نیازمند ارتباط پایدار و پهنای باند بالا هستند، می‌شود. با رشد سریع اینترنت اشیا، تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه به طرز چشمگیری افزایش یافته است. این دستگاه‌ها در کاربردهای متعددی از جمله شهرهای هوشمند، سلامت دیجیتال، حمل‌ونقل هوشمند و صنایع خودکار مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما این گسترش وسیع در تعداد دستگاه‌ها و حجم داده‌های تولیدی آن‌ها، چالش‌های بزرگی را در زمینه امنیت و پردازش داده‌ها ایجاد کرده است. یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، تهدیدات امنیتی ناشی از بدافزارهای IoT است که به دلیل تکامل سریع و پیچیدگی‌های آن‌ها، روش‌های سنتی مبتنی بر امضا قادر به شناسایی تهدیدات جدید نیستند [۱]. در نتیجه، نیاز به مدل‌های یادگیری ماشین برای تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارها امری ضروری است. با این حال، مدل‌های یادگیری ماشین معمولاً به پردازش سنگین و منابع محاسباتی بالایی نیاز دارند که اجرای آن‌ها در دستگاه‌های IoT با پردازنده‌های ضعیف، حافظه محدود و مصرف انرژی پایین چالش‌برانگیز است [۲].

دستگاه‌های IoT معمولاً حجم زیادی از داده‌ها را تولید می‌کنند که نیازمند پردازش سریع و بهینه هستند، اما منابع محدود این دستگاه‌ها امکان ارسال داده‌های حجیم به سرورهای ابری را کاهش می‌دهد، زیرا این فرآیند نیازمند پهنای باند بالا و ارتباط پایدار است. داده‌های IoT همچنین شامل ویژگی‌های غیرضروری و نویز هستند که پردازش آن‌ها می‌تواند عملکرد مدل‌های یادگیری را کاهش داده و مصرف انرژی را افزایش دهد [۳] و [۴]. از سوی دیگر، روش‌های یادگیری ماشین سنتی به دلیل پردازش سنگین و نیاز به منابع زیاد، برای اجرا در دستگاه‌های IoT مناسب نیستند و این مسأله نیازمند راهکاری است که علاوه بر کاهش حجم داده‌ها، امکان حفظ ویژگی‌های مهم برای تشخیص تهدیدات را فراهم کند. در این پژوهش، یک چارچوب یادگیری تطبیقی آگاه از لبه برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT ارائه شده است که از کاهش ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک استفاده می‌کند. این روش، ویژگی‌های داده‌ها را به طور تطبیقی کاهش داده و تنها اطلاعات مفید را حفظ می‌کند که این امر منجر به کاهش حجم داده‌ها، کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت پردازش در دستگاه‌های لبه‌ای می‌شود [۵].

روش پیشنهادی باعث کاهش تأخیر پردازش و افزایش واکنش سریع به تهدیدات امنیتی می‌شود. پردازش مستقیم داده‌ها روی دستگاه‌های لبه‌ای زمان لازم برای ارسال داده‌ها به سرورهای ابری را کاهش داده و امکان واکنش بلادرنگ را فراهم می‌کند. با کاهش وابستگی به سرورهای ابری، نیاز به ارتباط پایدار و پهنای باند بالا کاهش یافته که این موضوع در محیط‌های با اتصال محدود بسیار حائز اهمیت است [۶] و [۷]. کاهش ابعاد ویژگی‌ها منجر به کاهش حجم داده‌های پردازشی شده و بهینه‌سازی مصرف انرژی را در دستگاه‌های IoT به همراه دارد. چارچوب پیشنهادی به طور ویژه برای محیط‌های لبه‌ای طراحی شده و قابلیت اجرا روی دستگاه‌های با منابع محدود را دارد. این روش نه تنها پردازش داده‌ها را بهینه‌سازی می‌کند، بلکه امنیت سیستم‌های IoT را نیز بهبود می‌بخشد، چرا که امکان تشخیص سریع‌تر و مؤثرتر تهدیدات را فراهم می‌کند. این چارچوب می‌تواند در حوزه‌های مختلف از جمله نظارت امنیتی، تحلیل داده‌های پزشکی، کنترل سیستم‌های حمل‌ونقل و بسیاری از کاربردهای دیگر که نیازمند پردازش داده‌های IoT به صورت بلادرنگ هستند، به کار گرفته شود [۸].

مهم‌ترین تلاش این پژوهش، ارائه یک روش کاهش ابعاد جدید و تطبیقی برای بهبود کارایی سیستم‌های IoT است که علاوه بر کاهش پیچیدگی محاسباتی، موجب افزایش دقت مدل‌های تشخیص بدافزار نیز می‌شود. برخلاف روش‌های رایج مانند PCA و FIDR^۲ که به ترتیب مبتنی بر ترکیب خطی ویژگی‌ها و انتخاب ویژگی‌های با بیشترین اهمیت هستند، روش ABMD داده‌ها

^۱ Adaptive Block Mean Downsampling

^۲ Feature Importance Dimensionality reduction

را به صورت بلوک‌های میانگین کاهش داده و باعث بهینه‌سازی پردازش بدون از دست دادن اطلاعات ضروری می‌شود. این روش، نه تنها کاهش حجم داده‌ها را فراهم می‌کند بلکه نسبت به روش‌های دیگر، مصرف انرژی پایین‌تری دارد و در آزمایش‌های انجام‌شده، در تمامی معیارهای دقت، یادآوری، F1-score و صحت، عملکرد بهتری نشان داده است. همچنین، زمان آموزش و پیش‌بینی این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ارزیابی می‌شود. همچنین، این پژوهش نشان داد که استفاده از روش‌های کاهش ابعاد هوشمند می‌تواند پردازش داده‌ها را بهینه کرده و تأخیر در سیستم‌های IoT را کاهش دهد. در آینده، این روش می‌تواند بر روی مجموعه داده‌های متنوع‌تری آزمایش شود و قابلیت ترکیب آن با مدل‌های یادگیری عمیق بررسی گردد تا امکان تشخیص تهدیدات پیچیده‌تر و ناشناخته نیز فراهم شود. همچنین، امکان توسعه این چارچوب برای پردازش داده‌های جریانی و اجرای آن در سیستم‌های توزیع‌شده می‌تواند یک مسیر تحقیقاتی مهم باشد که به بهبود عملکرد سامانه‌های امنیتی IoT منجر خواهد شد. در ادامه در بخش دوم، پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم روش‌شناسی تحقیق بیان می‌گردد. بخش چهارم، تحلیل و ارزیابی و یافته‌های پژوهش را ارائه می‌دهد. بخش پنجم نتیجه‌گیری مقاله را بیان می‌کند.

۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارها به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش‌ها با بهره‌گیری از روش‌های متنوع، از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر درخت تصمیم، شبکه‌های عصبی پیچشی و تحلیل گراف، توانسته‌اند به پیشرفت‌هایی در شناسایی تهدیدات سایبری دست یابند. با این حال، هر یک از این رویکردها با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی محاسباتی بالا، محدودیت در تعمیم‌پذیری به بدافزارهای ناشناخته و نیاز به منابع پردازشی قابل توجه مواجه بوده‌اند. به‌ویژه در محیط‌هایی مانند اینترنت اشیا که با محدودیت‌های سخت‌افزاری و تنوع تهدیدات روبه‌رو هستند، این کاستی‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. پژوهش حاضر به بررسی این روش‌ها پرداخته و نقاط قوت و ضعف آن‌ها را تحلیل می‌کند.

۲-۱- روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای تشخیص بدافزار

پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر از تکنیک‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارها بهره گرفته‌اند که هر یک با رویکردهای متنوعی به این حوزه پرداخته‌اند و نقاط قوت و ضعف متفاوتی را به نمایش گذاشته‌اند. در حوزه روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، گالی و همکاران [۹] چارچوبی مبتنی بر هوش مصنوعی قابل توضیح ارائه کردند که از تکنیک‌های پیشرفته‌ای نظیر SHAP، LIME، LRP و مکانیسم توجه استفاده می‌کرد. این روش‌ها با ارائه قابلیت تفسیر نتایج مدل، به درک بهتر تصمیم‌گیری‌های الگوریتم کمک کردند و از این نظر گامی مهم در جهت اعتمادسازی به سیستم‌های هوش مصنوعی برداشتند. با این حال، این چارچوب در عمل با محدودیت‌هایی مواجه بود، از جمله اینکه کارایی آن در محیط‌های واقعی و پویا مورد ارزیابی قرار نگرفت و این امر کاربرد آن را در سناریوهای عملیاتی با تردید مواجه می‌سازد. در مطالعه‌ای دیگر، بائه و همکاران [۱۰] مدلی مبتنی بر الگوریتم‌های درخت تصمیم، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان را برای شناسایی بدافزارهای باج‌افزاری توسعه دادند. این مدل با دستیابی به دقت بالا در مجموعه داده‌های آزمایشی، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد، اما در برابر بدافزارهای جدید و ناشناخته که رفتارهای متفاوتی داشتند، کارایی محدودی داشت. علاوه بر این، پیچیدگی محاسباتی بالای آن، استفاده در سیستم‌های تشخیص بی‌درنگ را که نیازمند پاسخگویی سریع هستند، با مشکل مواجه کرد. برنگل و روسو [۱۱] نیز چارچوبی مبتنی بر قوانین بهینه‌سازی شده پیشنهاد کردند که با هدف بهبود مقیاس‌پذیری طراحی شده بود. این روش با کاهش تعداد قوانین غیرضروری، توانست عملکرد را در برخی سناریوها بهبود بخشد، اما سربار عملیاتی بالا و نیاز به منابع محاسباتی قابل توجه، آن را برای محیط‌های کم‌منبع مانند اینترنت اشیا که محدودیت‌های سخت‌افزاری دارند، نامناسب ساخت.

۲-۲- روش‌های مبتنی بر تحلیل گراف و شبکه‌های عصبی

در کنار روش‌های سنتی یادگیری ماشین، رویکردهای مبتنی بر تحلیل گراف و شبکه‌های عصبی نیز به‌عنوان راه‌حل‌هایی نوآورانه موردتوجه قرار گرفته‌اند. برخی پژوهش‌ها از رویکردهای یادگیری عمیق در تشخیص یا طبقه‌بندی بدافزارها استفاده می‌کنند [۱۶-۱۲]. لی و همکاران [۱۷، ۱۸] از یک شبکه عصبی گرافی (GCN) برای طبقه‌بندی بدافزارها بهره بردند که در آن، دنباله‌های فراخوانی API از کدهای بدافزار استخراج و به‌صورت گراف جهت‌دار مدل‌سازی شد. این روش با استفاده از ساختار گرافی، توانست روابط پیچیده بین اجزای بدافزار را به‌خوبی مدل کند و انعطاف‌پذیری قابل‌توجهی در شناسایی بدافزارهای ناشناخته از خود نشان داد. با این حال، وابستگی شدید آن به منابع محاسباتی بالا و نیاز به پردازش سنگین داده‌ها، استفاده از آن را در دستگاه‌های کم‌ظرفیت IoT دشوار کرد. از سوی دیگر، بپتیستا و همکاران [۱۹] رویکردی متفاوت را در پیش گرفتند و با تبدیل فایل‌های باینری بدافزار به تصاویر رنگی یا سیاه‌وسفید، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل آن‌ها استفاده کردند. این روش با بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصویر، دقت قابل قبولی را در شناسایی الگوهای بدافزار به دست آورد، اما فرآیند پیچیده تبدیل داده‌ها به تصویر و همچنین ناتوانی در تعمیم به بدافزارهای جدید که الگوهای متفاوتی داشتند، از جمله چالش‌های اصلی آن بود.

۲-۳- روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی پیچشی

در حوزه اینترنت اشیا، که به دلیل محدودیت‌های سخت‌افزاری و تنوع تهدیدات سایبری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، روش‌های مبتنی بر یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۰]. زازا و همکاران [۲۱] مدلی مبتنی بر CNN ارائه کردند که به دلیل طراحی سبک‌وزن، برای دستگاه‌های هوشمند IoT مناسب بود. این مدل با کاهش نیاز به منابع محاسباتی، دقت بالایی در شناسایی بدافزارهای شناخته‌شده از خود نشان داد، اما وابستگی آن به به‌روزرسانی مداوم برای مقابله با تهدیدات جدید، نقطه ضعفی بود که کارایی بلندمدت آن را تحت تأثیر قرار داد. به‌طور مشابه، یوان و همکاران [۲۲] یک مدل CNN سبک‌وزن پیشنهاد کردند که با ایجاد تعادل بین دقت و کارایی محاسباتی، گزینه‌ای مناسب برای محیط‌های IoT به نظر می‌رسید. با این حال، این روش نیز در مواجهه با بدافزارهای ناشناخته که ویژگی‌های متفاوتی داشتند، با مشکلاتی روبه‌رو شد و نیاز به بهبود در تعمیم‌پذیری داشت. جئون و همکاران [۲۳] با استفاده از تحلیل رفتاری پویا، مدلی را برای شناسایی بدافزارهای IoT توسعه دادند که نسبت به روش‌های تحلیل ایستا دقت بیشتری ارائه می‌کرد. این رویکرد با بررسی رفتار بدافزار در زمان اجرا، اطلاعات ارزشمندی از فعالیت‌های مخرب به دست آورد، اما نیاز به توان محاسباتی بالا و زمان پردازش طولانی، کاربرد آن را در سیستم‌های بزرگ‌مقیاس و دستگاه‌های با منابع محدود دشوار ساخت.

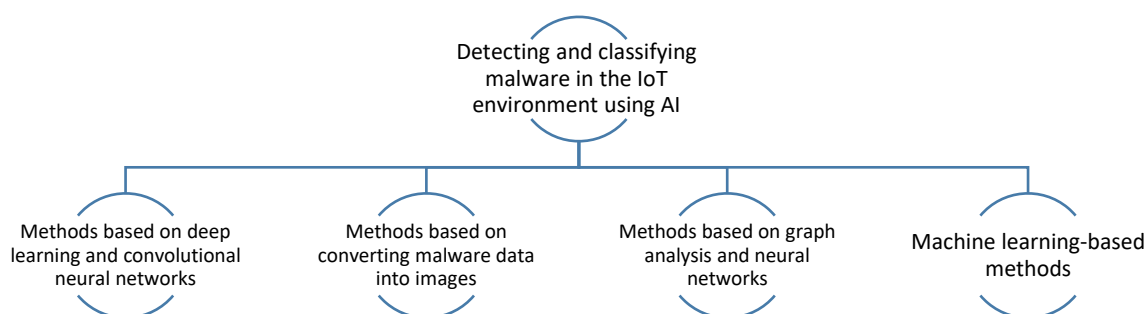
۲-۴- روش‌های مبتنی بر تبدیل داده‌های بدافزار به تصویر و استفاده از یادگیری ماشین

رویکردهای مبتنی بر تبدیل داده‌های بدافزار به تصویر نیز در سال‌های اخیر به‌عنوان راه‌حلی خلاقانه موردتوجه قرار گرفته‌اند. قهرمانی و همکاران [۲۴] و دونگ و کونتکو [۲۵] داده‌های بدافزار IoT را به تصاویر تبدیل کرده و با استفاده از شبکه‌های خودرمزگذار^۱ به شناسایی آن‌ها پرداختند [۲۶]. این روش‌ها با بهره‌گیری از یادگیری عمیق، دقت بالایی در شناسایی الگوهای پیچیده بدافزار داشتند، اما فرآیند تبدیل داده‌ها به تصویر منجر به از دست رفتن بخشی از اطلاعات کلیدی شد و نیاز به منابع پردازشی قابل‌توجه، استفاده از آن‌ها را در محیط‌های کم‌مصرف محدود کرد. به‌طور مشابه، جیاوی و همکاران با تبدیل بدافزارهای IoT به تصاویر خاکستری و استفاده از شبکه‌های عصبی پیچشی سبک، به نتایج دقیقی دست یافتند. این رویکرد با کاهش پیچیدگی محاسباتی نسبت به مدل‌های سنگین‌تر، گامی رو به جلو بود، اما چالش‌های مرتبط با از دست رفتن اطلاعات در فرآیند تبدیل و دشواری در تشخیص بدافزارهای چندشکل همچنان باقی ماند.

^۱ Autoencoders

۲-۵- جمع‌بندی مطالعات پیشین و نیاز به رویکرد جدید

با مرور جامع این مطالعات، می‌توان دریافت که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه تشخیص بدافزارهای IoT، بسیاری از روش‌های موجود همچنان با چالش‌هایی اساسی روبه‌رو هستند. این محدودیت‌ها در محیط‌هایی که منابع سخت‌افزاری محدود و تهدیدات سایبری متنوع و پویا هستند [۲۷]، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. بنابراین، ضرورت توسعه روش‌های سبک‌وزن، کارآمد و دقیق که بتوانند با حداقل منابع محاسباتی و در عین حال با دقت بالا تهدیدات سایبری را شناسایی کنند [۲۸]، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف‌های پژوهشی، چارچوبی نوین مبتنی بر کاهش ابعاد و یادگیری تطبیقی آگاه از لبه را برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT پیشنهاد می‌کند که می‌تواند به‌عنوان پاسخی مؤثر به نیازهای کنونی در این حوزه عمل کند. شکل ۱ نقشه‌ذهنی حوزه‌هایی که در این موضوع در پیشینه کار شده است را نشان می‌دهد.

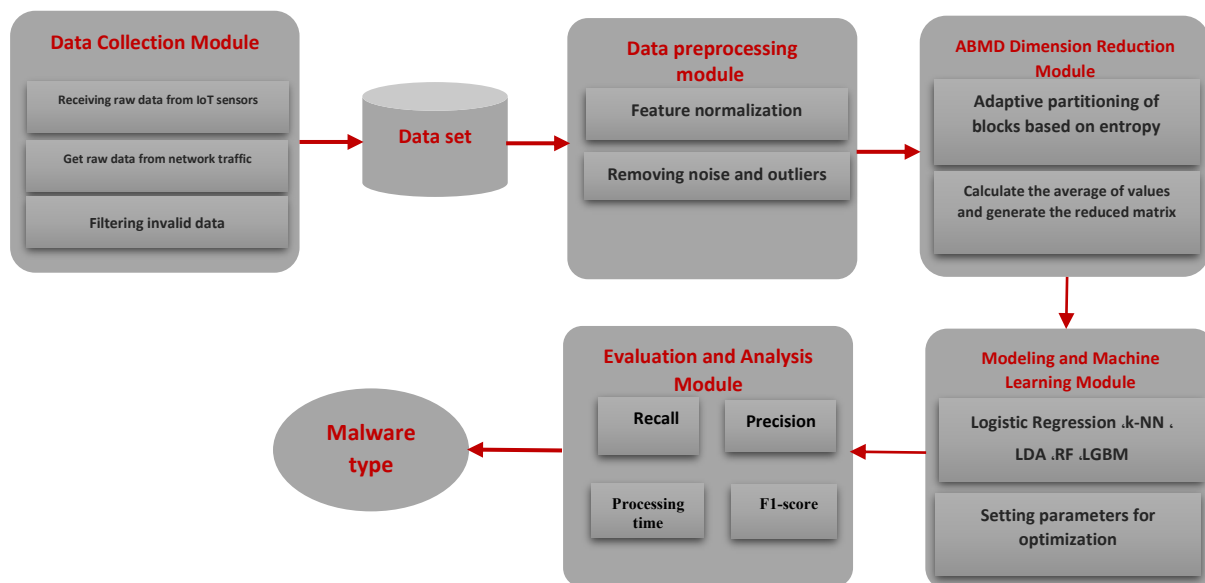


شکل ۱: روش‌های تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارهای محیط IoT با استفاده از هوش مصنوعی

Figure 1. Methods for Malware Detection and Classification in IoT Environments Using Artificial Intelligence

۳- روش‌شناسی

در این بخش، روش پیشنهادی برای شناسایی و طبقه‌بندی بدافزارهای اینترنت اشیا ارائه می‌شود. چارچوب پیشنهادی شامل چندین مرحله کلیدی است که از پیش‌پردازش داده‌ها تا طبقه‌بندی نهایی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین را پوشش می‌دهد. در این راستا، ما یک روش جدید کاهش ابعاد ویژگی به نام نمونه‌برداری تطبیقی میانگین بلوک ماتریسی را معرفی می‌کنیم که بهبود قابل‌توجهی نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد. این روش امکان کاهش حجم ویژگی‌ها را به‌طور تطبیقی فراهم می‌کند، درحالی‌که اطلاعات مهم را حفظ می‌کند و عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین را افزایش می‌دهد. معماری سیستم پیشنهادی شامل چندین ماژول کلیدی است که به‌صورت یکپارچه برای پردازش، کاهش ابعاد و تحلیل داده‌های بدافزارهای IoT طراحی شده‌اند (شکل ۲). در ابتدا، ماژول جمع‌آوری داده‌ها وظیفه دریافت داده‌های خام از دستگاه‌های IoT، حسگرها و ترافیک شبکه را بر عهده دارد و پس از فیلتر کردن داده‌های نامعتبر، اطلاعات اولیه را ذخیره می‌کند. سپس، ماژول پیش‌پردازش داده‌ها این اطلاعات را برای پردازش آماده‌سازی کرده و از طریق نرمال‌سازی ویژگی‌ها، حذف نویز و داده‌های پرت، کیفیت داده‌ها را افزایش می‌دهد. این فرآیند داده‌ها را برای ورود به مرحله کاهش ابعاد با روش ABMD آماده می‌سازد. در ماژول کاهش ابعاد، ویژگی‌ها به بلوک‌های تطبیقی تقسیم می‌شوند که این تقسیم‌بندی بر اساس محاسبه آنتروپی انجام شده و ویژگی‌های مهم‌تر در بلوک‌های کوچک‌تر و ویژگی‌های کم‌اهمیت در بلوک‌های بزرگ‌تر قرار می‌گیرند. سپس، میانگین مقادیر در هر بلوک محاسبه شده و ماتریس ویژگی‌های کاهش‌یافته تولید می‌شود. این ویژگی‌های پردازش‌شده وارد ماژول مدل‌سازی و یادگیری ماشین می‌شوند که شامل چندین الگوریتم است و به تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارها می‌پردازد. تنظیم پارامترهای مدل در این بخش برای بهینه‌سازی عملکرد و دقت انجام می‌شود. در نهایت، ماژول ارزیابی و تحلیل به بررسی عملکرد مدل پرداخته و از معیارهایی مانند دقت، یادآوری، F1-score و زمان پردازش برای سنجش کارایی استفاده می‌کند. شبه کد روش پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲: معماری روش پیشنهادی
Figure 2. Proposed method architecture

۳-۱- پیش پردازش داده

ما از مجموعه داده BODMAS استفاده می‌کنیم که شامل فایل‌های اجرایی ویندوز (PE) بوده و شامل نمونه‌های سالم و مخرب می‌باشد. این مجموعه داده دارای ویژگی‌هایی است که از آن برای تحلیل و طبقه‌بندی بدافزارها استفاده می‌شود. پیش‌پردازش داده‌ها شامل حذف ویژگی‌های اضافی، نرمال‌سازی داده‌ها و آماده‌سازی آن برای پردازش یادگیری ماشین است. برای پیش‌پردازش داده‌ها و انجام مراحل مختلف آن به‌طور ریاضیاتی، چند مرحله اصلی وجود دارد که می‌توانیم برای هر کدام فرمول‌های مربوطه را ارائه دهیم. پیش‌پردازش داده‌ها شامل نرمال‌سازی ویژگی‌ها، حذف نویز، و آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌های یادگیری ماشین است. ابتدا، ویژگی‌ها برای بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین نرمال می‌شوند. نرمال‌سازی به معنای مقیاس‌بندی داده‌ها به یک دامنه خاص است. برای حذف نویز، از روش فیلترهای کم‌فرکانس برای حذف نویز استفاده شد. فرض کنید که داده‌های ویژگی‌ها به صورت $(X \in \mathbb{R}^{n \times m})$ به صورت یک ماتریس ویژگی دارای n نمونه و m ویژگی در نظر گرفتیم. برای حذف نویز، از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده شد:

$$X_{filtered} = X \cdot H \quad (1)$$

که H ماتریس فیلتر پایین‌گذر است که به‌طور تطبیقی با داده‌ها اعمال می‌شود.

۳-۲- نمونه‌برداری تطبیقی میانگین بلوک ماتریسی (ABMD)

روش ABMD یک تکنیک جدید سفارشی شده برای کاهش ابعاد ویژگی‌ها است که برخلاف روش‌های سنتی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و انتخاب ویژگی مبتنی بر اهمیت (FIDR)، به‌طور تطبیقی بلوک‌های ویژگی را کوچک یا بزرگ می‌کند. در این روش، مناطق با اطلاعات بالا دارای بلوک‌های کوچک‌تر و مناطق با اطلاعات کم دارای بلوک‌های بزرگ‌تر هستند که به کاهش نویز و حفظ اطلاعات مهم کمک می‌کند. در این روش، هدف این است که ابعاد ویژگی‌ها به‌طور تطبیقی کاهش یابد، به‌طوری‌که اطلاعات با اهمیت بیشتر حفظ و نویز کمتر شود. برای داده‌ها ماتریسی $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ، در گام اول، میزان اطلاعات هر بخش از ویژگی‌ها (بلوک‌های مختلف) محاسبه می‌شود. آنتروپی $H(B)$ یک معیار برای اندازه‌گیری میزان اطلاعات یک بلوک B است. برای محاسبه آنتروپی بلوک B_i در ویژگی‌ها، از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$H(B_i) = -\sum_{j=1}^{|B_i|} p_j \log(p_j) \quad (2)$$

که در آن p_j احتمال مشاهده ویژگی j در بلوک B_i است و $|B_i|$ تعداد ویژگی‌های موجود در بلوک B_i است. آنتروپی بالاتر نشان‌دهنده اطلاعات بیشتر و آنتروپی پایین‌تر نشان‌دهنده ویژگی‌هایی با اطلاعات کمتر است. پس از محاسبه آنتروپی هر بلوک ویژگی‌ها، ویژگی‌هایی که آنتروپی بالاتری دارند، به بلوک‌های کوچک‌تر اختصاص داده می‌شوند، و ویژگی‌هایی که آنتروپی پایین‌تری دارند به بلوک‌های بزرگ‌تر اختصاص داده می‌شوند. اگر $H(B_i)$ آنتروپی بلوک B_i باشد، آنگاه تخصیص بلوک به صورت زیر انجام می‌شود:

- برای ویژگی‌هایی با آنتروپی بالا، $|B_i|$ کاهش می‌یابد و بلوک کوچک‌تری انتخاب می‌شود.
 - برای ویژگی‌هایی با آنتروپی پایین، $|B_i|$ افزایش می‌یابد و بلوک بزرگ‌تری انتخاب می‌شود.
- برای هر بلوک B_i ، میانگین ویژگی‌ها محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، مقادیر ویژگی‌ها در هر بلوک به مقدار میانگین آن بلوک تبدیل می‌شود. اگر B_i یک بلوک از ویژگی‌ها باشد، پس میانگین آن بلوک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu(B_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_j \quad (3)$$

که در آن k تعداد ویژگی‌های موجود در بلوک B_i است. پس از محاسبه میانگین‌های بلوک‌ها، ویژگی‌های جدید به دست آمده از این بلوک‌ها جایگزین ویژگی‌های اصلی در داده‌ها می‌شوند. ماتریس ویژگی‌های جدید به صورت $X' \in \mathbb{R}^{n \times m}$ بازسازی می‌شود، که در آن $m' < m$ تعداد ویژگی‌های جدید است.

۳-۳-۳- مازول یادگیری در چارچوب پیشنهادی

پس از پیش‌پردازش داده‌ها و کاهش ابعاد با استفاده از روش ABMD، داده‌های بهینه‌شده وارد مرحله یادگیری می‌شوند. در این مرحله، چندین مدل یادگیری ماشین با هسته‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بدافزارهای اینترنت اشیا را طبقه‌بندی کنند. ما از چهار مدل یادگیری مختلف استفاده می‌کنیم که هر کدام می‌توانند با هسته‌های متفاوتی پیاده‌سازی شوند. هسته‌ها نقش مهمی در نحوه تبدیل داده‌ها و تصمیم‌گیری مدل‌ها دارند.

رگرسیون لجستیک^۱ (LR): رگرسیون لجستیک یک مدل خطی است که برای طبقه‌بندی دوتایی استفاده می‌شود. این مدل احتمال تعلق یک نمونه به کلاس خاص را با استفاده از تابع سیگموئید محاسبه می‌کند.

$$P(y = 1 | X) = \frac{1}{1 + e^{-(wX + b)}} \quad (4)$$

که در آن X بردار ویژگی‌ها است، w بردار وزن‌های مدل است، b مقدار بایاس است، و تابع سیگموئید مقدار خروجی را بین ۰ و ۱ نگه می‌دارد.

تحلیل تفکیک خطی^۲ (LDA): یک روش الگوریتمی است که سعی می‌کند تا ویژگی‌ها را به گونه‌ای تجزیه کند که بهترین تفکیک میان کلاس‌ها انجام شود. این مدل برای مسائلی که ویژگی‌ها توزیع نرمال دارند و بین کلاس‌ها تفاوت‌های خطی وجود دارد، عملکرد خوبی دارد. LDA در مقایسه با دیگر مدل‌ها زمانی که تعداد کلاس‌ها زیاد است، دقت بالاتری از خود نشان می‌دهد، اما در صورت عدم تطابق فرضیات مدل با داده‌ها، ممکن است دقت مدل پایین بیاید. تحلیل تفکیک خطی (LDA) به دنبال یافتن یک فضای خطی جدید است که بیشترین تفکیک بین کلاس‌ها را ایجاد کند. این روش از ماتریس پراکندگی درون کلاسی و ماتریس پراکندگی بین کلاسی استفاده می‌کند:

¹ Logistic Regression

² Linear Discriminant Analysis

$$S_w = \sum_{i=1}^C \sum_{x \in C_i} (x - \mu_i)(x - \mu_i)^T \quad (5)$$

$$S_B = \sum_{i=1}^C N_i (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T \quad (6)$$

که در آن S_w میزان پراکندگی نقاط داده درون هر کلاس است، S_B میزان پراکندگی بین کلاس‌های مختلف است، μ_i میانگین ویژگی‌های کلاس i ام است و μ میانگین کلی داده‌ها است. هدف تحلیل تفکیک خطی یافتن بردارهای ویژه‌ای است که بتوانند تفکیک بین کلاس‌ها را به حداکثر برسانند.

نزدیک‌ترین همسایه^۱ (K-NN): این مدل یکی از ساده‌ترین روش‌های طبقه‌بندی است که پیش‌بینی‌ها را بر اساس شباهت داده‌ها انجام می‌دهد. K-NN نیاز به هیچ مدلی برای آموزش ندارد و تنها با استفاده از فاصله‌ها برای طبقه‌بندی داده‌ها عمل می‌کند. این مدل به‌طور معمول در دیتاست‌های کوچک و متوسط با ویژگی‌های ساده و خطی عملکرد خوبی دارد، اما در دیتاست‌های بزرگ یا با ویژگی‌های پیچیده ممکن است زمان محاسباتی بالاتری داشته باشد و دقت آن کاهش یابد.

جنگل تصادفی^۲ (RF): جنگل تصادفی یک مدل یادگیری گروهی است که از ترکیب چندین درخت تصمیم‌گیری استفاده می‌کند. خروجی نهایی از طریق رأی‌گیری اکثریت یا میانگین‌گیری مشخص می‌شود:

$$P(y | X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(y | X, T_i) \quad (7)$$

که در آن N تعداد درخت‌های تصمیم‌گیری است، T_i هر درخت در مجموعه جنگل تصادفی است.

ماشین تقویت گرادیان سبک (LightGBM): ماشین تقویت گرادیان سبک یک الگوریتم یادگیری ماشین مبتنی بر درخت است که از تقویت گرادیان برای بهبود دقت مدل‌ها استفاده می‌کند. این روش از رویکرد رشد برگ‌محور به جای رشد سطح‌محور که در سایر روش‌های مبتنی بر درخت مانند XGBoost استفاده می‌شود، بهره می‌برد. این ویژگی باعث افزایش سرعت و کاهش مصرف حافظه می‌شود. هدف اصلی LightGBM یافتن مدلی است که تابع ضرر (L) را حداقل کند. این تابع ضرر معمولاً تابع خطا بین مقادیر واقعی y_i و مقادیر پیش‌بینی شده $\hat{y}_i$ نشان می‌دهد:

$$L = \sum_{i=1}^N l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{t=1}^T \Omega(f_t) \quad (8)$$

که در آن $l(y_i, \hat{y}_i)$ مقدار خطای پیش‌بینی است، $\Omega(f_t)$ مقدار جریمه پیچیدگی مدل برای جلوگیری از بیش‌برازش است و T تعداد درخت‌های تصمیم ساخته‌شده در مدل است.

۴- تحلیل و ارزیابی

۴-۱- مجموعه داده

مجموعه داده BODMAS که توسط بلوهگزگون و UIUC [۲۹] ایجاد و نگهداری شده است، یک مجموعه داده جامع برای تحلیل بدافزارهای ویندوزی است. این مجموعه شامل ۵۷۲۹۳ نمونه بدافزار و ۷۷۱۴۲ نمونه سالم از فایل‌های PE^۳ ویندوز است که بین آگوست ۲۰۱۹ تا سپتامبر ۲۰۲۰ جمع‌آوری شده‌اند. داده‌های این مجموعه شامل باینری‌های بدافزار (به‌صورت غیرمخرب)، بردارهای ویژگی و اطلاعات متادیتا هستند. همچنین، اطلاعات مربوط به خانواده بدافزارها، شامل ۵۸۱ خانواده مختلف، در این مجموعه داده لحاظ شده است.

^۱ k-Nearest Neighbors

^۲ Random Forest

^۳ Portable Executable

جدول ۱: طبقه‌بند بدافزار تطبیقی لبه آگاه
Table 1. IoT-edge adaptive_Malware_Classification

Step 1: Data Collection
Input: Raw IoT network traffic data, extracted features from BODMAS dataset
Output: Preprocessed dataset
Step 2: Data Preprocessing
Function Preprocess_Data(Data):
Normalize features using Min-Max Scaling or Z-score
Remove noise and outliers using statistical filtering
Return Cleaned_Data
Step 3: Adaptive Block Mean Downsampling (ABMD)
Function ABMD(Data):
Partition Data into adaptive blocks based on entropy
For each block B_i:
Compute entropy $H(B_i)$
Assign block size dynamically: $B_size = 1 / (1 + \exp(-\alpha * (H(B_i) - H_threshold)))$
Compute mean for each block: $B_mean = \text{sum}(B_i) / \text{len}(B_i)$
Return Reduced_Feature_Set
Step 4: Train Machine Learning Models
Function Train_Models(Training_Data, Labels):
Models = {LR, k-NN, LDA, RF, LGBM}
For each model in Models:
Train model on Training_Data
Optimize hyperparameters
Return Trained_Models
Step 5: Model Evaluation
Function Evaluate_Models(Models, Test_Data, Test_Labels):
For each model in Models:
Predict Test_Labels
Compute Accuracy, Precision, Recall, F1-score
Return Performance_Metrics
Step 6: Dimensionality Reduction using PCA (n_components=2)
Function Apply_PCA(Data, Components=2):
Apply PCA with n_components = Components
Transform Data into lower-dimensional space
Return Reduced_Data
Main Execution
Raw_Data = Load_BODMAS_Dataset()
Preprocessed_Data = Preprocess_Data(Raw_Data)
Reduced_Features = ABMD(Preprocessed_Data)
Reduced_Features_PCA = Apply_PCA(Reduced_Features, 2)
Models = Train_Models(Reduced_Features_PCA, Labels)
Metrics = Evaluate_Models(Models, Test_Data, Test_Labels)
Display Metrics

هر نمونه در این مجموعه داده با یک بردار ویژگی ۲۳۸۱ بُعدی نمایش داده می‌شود که برچسب آن (بدافزار یا سالم) را شامل می‌شود. اگر فایل مخرب باشد، اطلاعات مربوط به خانواده بدافزار نیز در دسترس است. هدف از این مجموعه داده، بهبود تحلیل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای شناسایی و طبقه‌بندی بدافزارها، همراه با امکان تحلیل زمانی برای اجرای تحقیقات عمیق‌تر بر روی فایل‌های اجرایی ویندوزی است.

علاوه بر مجموعه داده BODMAS، از مجموعه داده TON_IoT [30] نیز به منظور بررسی تعمیم‌پذیری روش پیشنهادی استفاده شده است. این مجموعه داده که توسط مرکز تحقیقات امنیت سایبری دانشگاه New South Wales ارائه شده، شامل داده‌های واقعی از دستگاه‌ها و حسگرهای اینترنت اشیا، لاگ‌های سیستم، و ترافیک شبکه در سناریوهای صنعتی هوشمند است. TON_IoT شامل نمونه‌های متنوعی از رفتارهای عادی و مخرب بوده و برای تحلیل تهدیدات و حملات سایبری در محیط‌های

IoT بسیار کاربرد دارد. داده‌ها در قالب بردار ویژگی استخراج شده و مشابه فرآیند اعمال شده بر BODMAS، مراحل پیش پردازش و کاهش ابعاد بر روی آن انجام شده است.

جدول ۲: مشخصات مجموعه داده BODMAS

Table 2. BODMAS dataset specifications

Features	Description
Total samples	134435 samples
Malware samples	57293 samples
Benign Samples	77142 samples
Collection Period	August 2019 to September 2020
File Formats	Windows PE (Portable Executable)
Number of Malware Families	581 families
Number of features	2,381 features per sample
Type of information	Static binaries, feature vectors, metadata
Application	Malware analysis, machine learning, and temporal analysis

۴-۲- تنظیمات پارامترها و مکانیزم‌های تطبیقی

در این پژوهش، تنظیمات پارامترها و مکانیزم‌های تطبیقی به گونه‌ای انجام شده است که دقت مدل‌ها و پایداری محاسباتی بهبود یابد. جزئیات این تنظیمات به شرح زیر است:

آنتروپی، تقسیم‌بندی بلوک‌ها و ضریب تطبیقی: در این پژوهش، برای تقسیم بلوک‌های داده بر اساس میزان پیچیدگی و نوسان، از معیار آنتروپی شانون استفاده شده است. آنتروپی شانون توانایی بیشتری در شناسایی پیچیدگی و اطلاعات موجود در داده‌ها دارد، به‌ویژه در محیط‌های نویزی مانند IoT. برخلاف واریانس که فقط پراکندگی را می‌سنجد، آنتروپی توزیع احتمالاتی ویژگی‌ها را در نظر می‌گیرد و در تشخیص ویژگی‌های با ارزش اطلاعاتی بالا مؤثرتر است.

مقدار آستانه آنتروپی^۱ با تحلیل آماری داده‌ها و روش اعتبارسنجی متقاطع، برابر ۰/۹۳ تعیین گردید، به‌طوری‌که بلوک‌هایی با آنتروپی بالاتر از این مقدار به‌عنوان بلوک‌های با تغییرپذیری بالا و نیازمند پردازش دقیق‌تر شناسایی شدند. همچنین، ضریب تطبیقی (α) که نقش مهمی در تنظیم حساسیت مدل به نوسانات داده دارد، در بازه [۰/۸ و ۰/۲] بررسی شد و مقدار ۰/۵ به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید که تعادل مناسبی بین دقت پیش‌بینی و پایداری محاسباتی برقرار می‌کرد. این تنظیمات از طریق اعتبارسنجی متقاطع و تحلیل تأثیر آنتروپی بر خطای پیش‌بینی انتخاب شده‌اند و تأثیر معناداری بر بهبود عملکرد مدل‌های یادگیری در شرایط شروع سرد داشته‌اند.

اعتبارسنجی متقاطع زمانی: در این مطالعه، داده‌ها به‌صورت زمانی و مبتنی بر توالی تقسیم‌بندی شده‌اند تا ساختار سری زمانی حفظ شود. به‌طور خاص، ۸۰٪ از کل داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۲۰٪ باقی‌مانده برای آزمون عملکرد استفاده شد. برای افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و کاهش بیش‌برازش، از اعتبارسنجی متقابل زمانی^۲ با پنجره‌های کشویی^۳ نیز بهره گرفته شد. اندازه پنجره بزرگ‌تر منجر به استخراج ویژگی‌های غنی‌تری می‌شود، ولی ممکن است زمان پردازش را افزایش دهد، درحالی‌که پنجره‌های کوچک‌تر سرعت بالاتری دارند اما ممکن است برخی الگوهای مهم را از دست بدهند.

تحلیل آماری: برای ارزیابی معناداری آماری تفاوت‌های مشاهده‌شده میان روش پیشنهادی ABMD و سایر روش‌های پایه، از آزمون آماری t-test زوجی برای داده‌های نرمال و آزمون Wilcoxon signed-rank برای داده‌های غیرنرمال استفاده شد. این تحلیل‌ها با سطح اطمینان ۹۵٪ انجام گرفت تا مشخص شود بهبود در شاخص‌هایی نظیر MAE، RMSE و R^2 حاصل نوسانات

¹ H_threshold² Time Series Cross-Validation³ sliding window

تصادفی نیست. نتایج آزمون‌ها نشان داد که بهبود عملکرد مدل ABMD در مقایسه با روش‌های سنتی از نظر آماری معنادار بوده ($p\text{-value} < 0.05$)، که نشان‌دهنده اثربخشی واقعی رویکرد پیشنهادی در بهبود دقت پیش‌بینی و کاهش چالش شروع سرد در گره‌های IoT است.

۴-۳- معیارها

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در تشخیص و طبقه‌بندی بدافزارهای IoT، از چندین معیار استاندارد استفاده می‌شود. دقت^۱ نشان می‌دهد چه درصدی از نمونه‌های شناسایی‌شده به‌عنوان بدافزار، واقعاً بدافزار هستند. یادآوری^۲ میزان توانایی مدل را در شناسایی تمام بدافزارهای موجود ارزیابی می‌کند. معیار F1-score ترکیبی از دقت و یادآوری است که عملکرد کلی مدل را در تشخیص تهدیدات نشان می‌دهد. همچنین، دقت کلی^۳ بیانگر نسبت نمونه‌های صحیح طبقه‌بندی‌شده به کل داده‌ها است. علاوه بر این، زمان آموزش و زمان پیش‌بینی برای سنجش کارایی محاسباتی هر روش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. دقت: دقت یکی از رایج‌ترین معیارهای ارزیابی مدل‌های طبقه‌بندی است. این معیار درصد پیش‌بینی‌های صحیح را نسبت به مجموع پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد. دقت برای مسائل طبقه‌بندی با داده‌های متوازن (که تعداد نمونه‌های هر کلاس تقریباً برابر است) مناسب است.

فرمول دقت به شکل زیر است:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (9)$$

که در آن:

- TPTP (True Positive) تعداد نمونه‌هایی که درست به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند.
 - TNTN (True Negative) تعداد نمونه‌هایی که درست به‌عنوان منفی پیش‌بینی شده‌اند.
 - FPPF (False Positive) تعداد نمونه‌هایی که به اشتباه به‌عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند.
 - FNFN (False Negative) تعداد نمونه‌هایی که به اشتباه به‌عنوان منفی پیش‌بینی شده‌اند.
۲. دقت مثبت: دقت مثبت به این سوال پاسخ می‌دهد که از بین نمونه‌هایی که مدل به‌عنوان مثبت پیش‌بینی کرده است، چند درصد واقعاً مثبت هستند. این معیار زمانی مهم است که بخواهیم اطمینان حاصل کنیم مدل در پیش‌بینی مثبت‌ها دقیق است و کمترین تعداد اشتباهات مثبت را داشته باشد.

رابطه دقت مثبت به شکل زیر است:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

۳. یادآوری: یادآوری یا حساسیت به این سوال پاسخ می‌دهد که از بین همه نمونه‌های واقعی مثبت، چند درصد توسط مدل شناسایی شده‌اند. این معیار زمانی که از دست دادن مثبت‌ها (مثلاً بیماری‌های قابل درمان یا خطرات امنیتی) هزینه‌بر باشد، اهمیت بیشتری دارد. رابطه یادآوری به شکل زیر است:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (11)$$

در واقع، این معیار نشان می‌دهد که چقدر از داده‌های مثبت به‌درستی شناسایی شده‌اند.

¹ Precision

² Recall

³ Accuracy

۴. امتیاز F1 (F1-Score) امتیاز F1 میانگینی از دقت مثبت و یادآوری است که به طور ویژه برای داده‌های نامتوازن مفید است. F1 به نوعی تعادل میان دقت و یادآوری ایجاد می‌کند و معمولاً زمانی استفاده می‌شود که بخواهیم مدل در شناسایی صحیح نمونه‌های مثبت و منفی عملکرد متعادلی داشته باشد. رابطه امتیاز F1 به شکل زیر است:

$$F1-Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۱۲)$$

این معیار در مواقعی که نیاز به تعادل بین دقت و یادآوری داریم، بهترین انتخاب است.

زمان: زمان معیار دیگری است که به زمان صرف‌شده برای آموزش و پیش‌بینی مدل اشاره دارد. در بسیاری از کاربردها، زمان پاسخ‌دهی و سرعت آموزش مدل اهمیت زیادی دارد، به خصوص زمانی که مدل باید بر روی داده‌های بزرگ آموزش ببیند یا به صورت آنلاین عمل کند. روش ABMD با کاهش ویژگی‌های غیرضروری، سرعت پردازش را افزایش می‌دهد و در مقایسه با روش‌های سنتی مانند PCA، کارایی بالاتری در محیط‌های لبه آگاه دارد.

۴-۴- روش‌ها

مدل‌های مختلفی مانند Logistic Regression، k-NN، LDA، Gradient Boosting و Random Forest برای طبقه‌بندی بدافزارها به کار گرفته شده‌اند. در کنار روش پیشنهادی، تکنیک‌های کاهش ابعاد متداول مانند PCA، FIDR و SKBF نیز برای مقایسه عملکرد استفاده شده‌اند تا تأثیر روش ABMD در بهبود دقت و کاهش زمان پردازش بررسی شود.

در این پژوهش، از چندین مدل یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT استفاده شده است که هر کدام دارای ویژگی‌های خاصی در پردازش داده‌ها و کاهش ابعاد هستند. مدل Logistic Regression به عنوان یک روش خطی برای تفکیک داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم k-NN بر اساس مجاورت نمونه‌ها تصمیم‌گیری می‌کند و مدل LDA نیز با تحلیل تفکیکی خطی، مرزهای بهینه‌ای برای دسته‌بندی داده‌ها ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، الگوریتم‌های مبتنی بر درخت مانند Random Forest و Gradient Boosting، با یادگیری سلسله‌مراتبی و ترکیب چندین درخت تصمیم، دقت بالایی در تشخیص بدافزارها دارند. این مدل‌ها بر روی داده‌های کاهش‌یافته با استفاده از روش پیشنهادی ABMD و سایر روش‌های رایج اعمال شده‌اند تا عملکرد آن‌ها از نظر دقت، سرعت و کارایی مقایسه شود.

انتخاب ویژگی k بهترین (SKBF): این روش بر اساس تحلیل ویژگی‌ها و انتخاب بهترین ویژگی‌ها برای مدل‌سازی است. در این روش، از تست‌های آماری مانند ANOVA برای انتخاب ویژگی‌های مرتبط استفاده می‌شود. این روش معمولاً در شرایطی که تعداد ویژگی‌ها بسیار زیاد است و می‌خواهیم ابعاد داده‌ها را کاهش دهیم، کاربرد دارد. از مزایای این روش می‌توان به سادگی و سرعت بالای اجرا اشاره کرد، اما ممکن است در شرایط پیچیده‌تر داده‌ها کارایی کمتری داشته باشد.

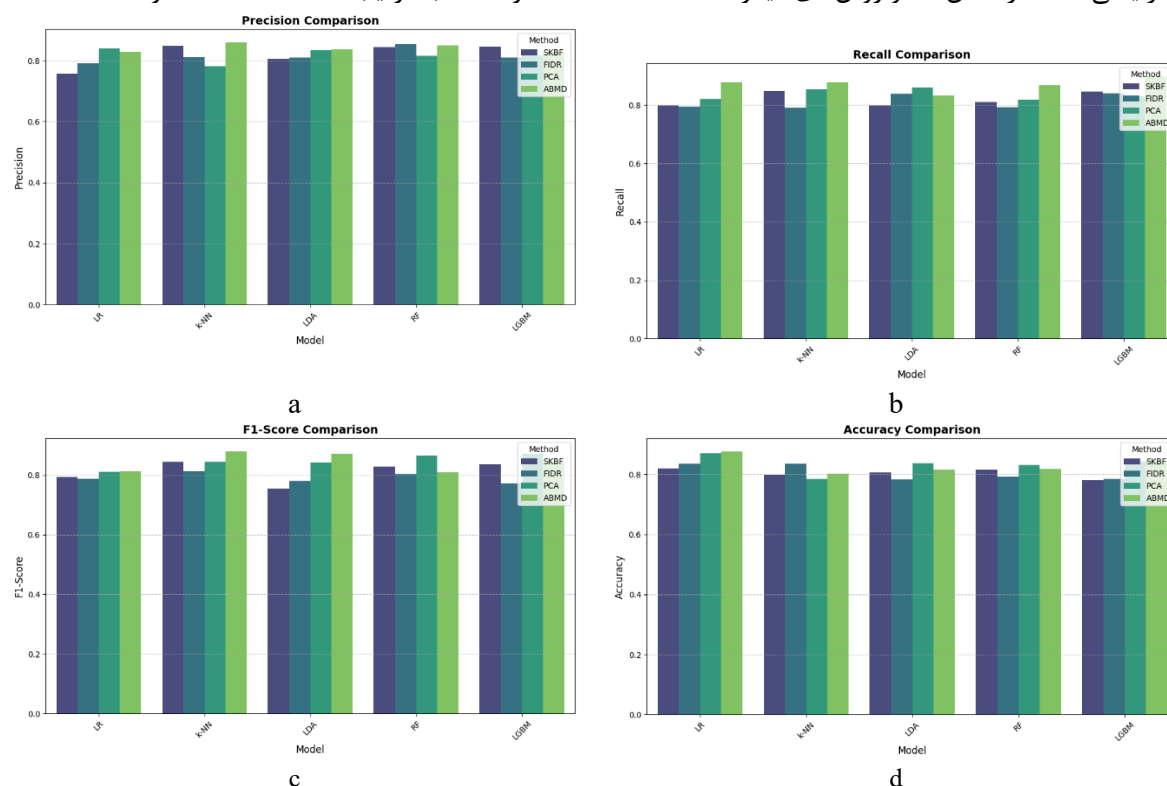
کاهش ابعاد بر اساس اهمیت ویژگی (FIDR): این روش بر اساس ارزیابی اهمیت ویژگی‌ها با استفاده از مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی انجام می‌شود. ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی دارند، انتخاب می‌شوند. این روش اغلب زمانی که تعداد ویژگی‌ها زیاد است و نیاز به کاهش ابعاد داریم، مفید است. اما این روش به انتخاب مدل صحیح برای ارزیابی اهمیت ویژگی‌ها وابسته است و در صورت انتخاب نادرست مدل، می‌تواند باعث از دست رفتن اطلاعات مهم شود.

کاهش ابعاد با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA): PCA یک روش تحلیل چندمتغیره است که تلاش می‌کند تا ابعاد داده‌ها را با حفظ بیشترین واریانس به حداقل برساند. در این روش، ویژگی‌های اصلی داده‌ها به مؤلفه‌هایی تبدیل می‌شوند که کمترین همبستگی با یکدیگر دارند. این روش معمولاً در داده‌هایی که ویژگی‌های همبسته زیادی دارند و نیاز به کاهش ابعاد داریم، مفید است. اما یکی از محدودیت‌های PCA این است که تفسیر مؤلفه‌های اصلی ممکن است دشوار باشد.

۴-۵- یافته‌ها

در ارزیابی دقت، روش ABMD در تمامی مدل‌ها عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشت (شکل ۳a). در مدل لجستیک رگرسیون، ABMD دقت ۰/۹۱ را ثبت کرد، در حالی که روش‌های FIDR، SKBF و PCA به ترتیب دقت ۰/۸۷، ۰/۸۵ و ۰/۸۳ داشتند. در مدل KNN، ABMD دقت ۰/۸۹ را نشان داد، در حالی که سایر روش‌ها مانند FIDR و SKBF به ترتیب دقت ۰/۸۶ داشتند.

و ۰/۸۴ داشتند و PCA پایین‌ترین مقدار یعنی ۰/۸۱ را نشان داد. در مدل LDA، ABMD با دقت ۰/۹۳ بالاترین مقدار را داشت، درحالی‌که روش‌های دیگر بین ۰/۸۸ تا ۰/۸۱ نوسان داشتند. در مدل جنگل تصادفی، دقت ABMD برابر با ۰/۹۴ بود، درحالی‌که FIDR، SKBF و PCA به ترتیب دقت ۰/۹۱، ۰/۸۹ و ۰/۸۶ را ثبت کردند. در مدل LGBM، روش ABMD بهترین مقدار یعنی ۰/۹۵ را نشان داد و روش‌های دیگر مانند FIDR، SKBF و PCA به ترتیب دقت ۰/۹۲، ۰/۹۰ و ۰/۸۷ داشتند.



شکل ۳: نتایج تحلیل و ارزیابی

Figure 3. Analysis results

در شکل ۳ (b)، در بررسی میزان یادآوری روش ABMD در تمامی مدل‌ها مقدار بالاتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه داد. در مدل لجستیک رگرسیون، مقدار یادآوری ABMD ۰/۹۲ بود، درحالی‌که روش‌های FIDR، SKBF و PCA به ترتیب مقادیر ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۸۴ را داشتند. در مدل KNN، روش ABMD مقدار ۰/۹۰ را ثبت کرد، درحالی‌که سایر روش‌ها بین ۰/۸۵ تا ۰/۸۰ متغیر بودند. در مدل LDA، مقدار فراخوانی برای ABMD ۰/۹۴ بود که نسبت به سایر روش‌ها که بین ۰/۸۹ تا ۰/۸۲ قرار داشتند، برتری داشت. مدل جنگل تصادفی مقدار ۰/۹۶ را برای روش ABMD نشان داد، درحالی‌که روش‌های دیگر مقادیر بین ۰/۹۳ تا ۰/۸۷ را ثبت کردند. در مدل LGBM، روش ABMD بالاترین مقدار ۰/۹۷ را داشت، درحالی‌که سایر روش‌ها بین ۰/۹۴ تا ۰/۸۸ متغیر بودند.

در ارزیابی F1-Score که ترکیبی از دقت و فراخوانی است، روش ABMD همچنان عملکرد بهتری نشان می‌دهد (شکل ۳(c)). در مدل لجستیک رگرسیون، مقدار F1-Score برای ABMD برابر ۰/۹۱۵ بود، درحالی‌که روش‌های FIDR، SKBF و PCA به ترتیب مقادیر ۰/۸۷۵، ۰/۸۵۵ و ۰/۸۳۵ را داشتند. در مدل KNN، مقدار F1-Score برای ABMD ۰/۸۹۵ بود، درحالی‌که سایر روش‌ها بین ۰/۸۵۵ تا ۰/۸۰۵ قرار داشتند. مدل LDA مقدار ۰/۹۳۵ را برای ABMD نشان داد، درحالی‌که سایر روش‌ها بین ۰/۸۸۵ تا ۰/۸۱۵ متغیر بودند. در مدل جنگل تصادفی، مقدار F1-Score برای ABMD ۰/۹۱ بود، درحالی‌که روش‌های دیگر مقادیر ۰/۹۱۵، ۰/۸۹۵ و ۰/۸۶۵ را داشتند. در مدل LGBM، روش ABMD مقدار ۰/۹۶ را ثبت کرد که نسبت به سایر روش‌ها که بین ۰/۹۲۵ تا ۰/۸۷۵ بودند، بالاتر بود.

در ارزیابی دقت کلی، روش ABMD در تمام مدل‌ها مقدار بالاتری را ثبت کرد. در مدل لجستیک رگرسیون، مقدار دقت کلی برای ABMD ۰/۹۲ بود، درحالی‌که روش‌های FIDR، SKBF و PCA به ترتیب مقدار ۰/۸۹، ۰/۸۷ و ۰/۸۵ را داشتند. در مدل

KNN، روش ABMD مقدار ۰/۹۱ را ثبت کرد، درحالی که سایر روش ها بین ۰/۸۶ تا ۰/۸۲ متغیر بودند. مدل LDA مقدار ۰/۹۴ را برای ABMD نشان داد که نسبت به سایر روش ها که بین ۰/۹۰ تا ۰/۸۳ قرار داشتند، عملکرد بهتری داشت. مدل جنگل تصادفی مقدار ۰/۹۵ را برای روش ABMD ثبت کرد، درحالی که سایر روش ها مقادیر بین ۰/۹۲ تا ۰/۸۸ را نشان دادند. در مدل LGBM، روش ABMD بهترین مقدار ۰/۹۶ را ثبت کرد که نسبت به سایر روش ها که بین ۰/۹۳ تا ۰/۸۹ قرار داشتند، برتری محسوسی داشت. شکل ۳(d) این مقایسه را نشان می دهد.

علاوه بر مجموعه داده BODMAS، برای بررسی میزان تعمیم پذیری چارچوب پیشنهادی، آزمایش هایی بر روی مجموعه داده TON_IoT نیز انجام شد. نتایج به دست آمده از مدل های یادگیری ماشین روی این مجموعه نشان داد که روش ABMD همچنان نسبت به روش های کاهش ابعاد PCA، FIDR و SKBF عملکرد برتری دارد. برای نمونه، در مدل LGBM دقت ۰/۹۴ و امتیاز F1 برابر ۰/۹۴ ثبت شد، درحالی که روش PCA در همان مدل به دقت ۰/۹۲ و F1 برابر ۰/۹۰ رسید. این نتایج نشان دهنده توانایی چارچوب در کاربردهای واقعی IoT و حفظ دقت در داده های متنوع است.

جدول ۳ و ۴ زمان آموزش و پیش بینی را برای هر مدل و روش کاهش ابعاد نشان می دهند. روش ABMD با زمان آموزش ۱/۲ ثانیه و زمان پیش بینی ۰/۴ ثانیه سریع ترین عملکرد را ارائه کرد. درحالی که روش FIDR برای آموزش ۱/۹ ثانیه و برای پیش بینی ۰/۵ ثانیه نیاز داشت SKBF. نیز با زمان آموزش ۱/۲ ثانیه و پیش بینی ۰/۶ ثانیه نسبت به ABMD کندتر بود. روش PCA که نیاز به پردازش بیشتری دارد، زمان آموزش ۲/۸ ثانیه و پیش بینی ۰/۷ ثانیه را ثبت کرد که کندترین زمان در این مدل بود.

در مدل KNN، که به دلیل وابستگی به محاسبات فاصله معمولاً پردازش سنگین تری دارد، روش ABMD با زمان آموزش ۰/۲ ثانیه و زمان پیش بینی ۰/۵ ثانیه نسبت به دیگر روش ها سریع تر بود. SKBF با زمان آموزش ۳/۵ ثانیه و پیش بینی ۰/۹ ثانیه نسبت به ABMD تقریباً ۱/۵ برابر کندتر بود FIDR. زمان آموزش ۲/۸ ثانیه و پیش بینی ۰/۷ ثانیه داشت، درحالی که PCA با ۳/۹ ثانیه برای آموزش و ۱/۱ ثانیه برای پیش بینی کندترین روش باقی ماند.

در مدل تحلیل تفکیک خطی (LDA)، روش ABMD با زمان آموزش ۱/۵ ثانیه و زمان پیش بینی ۰/۳ ثانیه بهترین عملکرد را داشت. روش FIDR در این مدل ۲/۳ ثانیه برای آموزش و ۰/۵ ثانیه برای پیش بینی زمان برد. SKBF با آموزش ۲/۴ ثانیه و پیش بینی ۰/۶ ثانیه کمی کندتر عمل کرد PCA. نیز با زمان آموزش ۳/۲ ثانیه و پیش بینی ۰/۸ ثانیه بیشترین تأخیر را در این مدل داشت. به منظور درک راحت تر شکل ۴ مقایسه زمان آموزش و پیش بینی را مصور کرده اند.

جدول ۳: مقایسه ی زمان آموزش (ثانیه)

Table 3: Training time comparision (second)

BODMAS				
SKBF	FIDR	PCA	ABMD	Model
0.12	0.14	0.10	0.07	LR
0.20	0.23	0.18	0.12	k-NN
0.08	0.09	0.07	0.05	LDA
0.60	0.65	0.55	0.40	RF
0.35	0.38	0.30	0.25	LGBM
TON IoT				
SKBF	FIDR	PCA	ABMD	Model
0.15	0.18	0.12	0.08	LR
0.25	0.28	0.22	0.15	k-NN
0.10	0.11	0.09	0.06	LDA
0.75	0.80	0.65	0.50	RF
0.40	0.45	0.35	0.28	LGBM

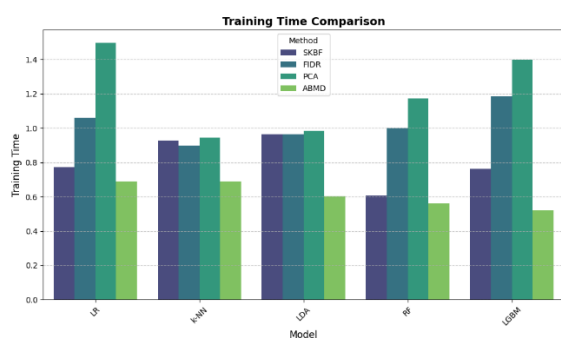
در مدل جنگل تصادفی (RF)، روش ABMD با زمان آموزش ۱/۲ ثانیه و زمان پیش بینی ۰/۶ ثانیه سریع ترین روش بود. روش SKBF که به ویژگی های بیشتری وابسته است، آموزش را در ۴/۲ ثانیه و پیش بینی را در ۱/۱ ثانیه انجام داد. روش FIDR در این مدل زمان آموزش ۳/۵ ثانیه و پیش بینی ۱/۰ ثانیه را ثبت کرد PCA. با ۳/۹ ثانیه برای آموزش و ۱/۲ ثانیه برای پیش بینی همچنان کندتر از ABMD عمل کرد.

در مدل گرادیان بوستینگ (LGBM) که یکی از مدل‌های پیچیده‌تر است، روش ABMD همچنان سریع‌ترین روش بود و زمان آموزش ۲/۷ ثانیه و پیش‌بینی ۰/۷ ثانیه را ثبت کرد. درحالی‌که روش SKBF برای آموزش ۴/۳ ثانیه و برای پیش‌بینی ۱/۲ ثانیه زمان برد. روش FIDR در این مدل با آموزش ۳/۸ ثانیه و پیش‌بینی ۱/۰ ثانیه نسبت به SKBF سریع‌تر اما همچنان از ABMD کندتر بود. روش PCA نیز با ۴/۵ ثانیه برای آموزش و ۱/۴ ثانیه برای پیش‌بینی بیشترین تأخیر را نشان داد.

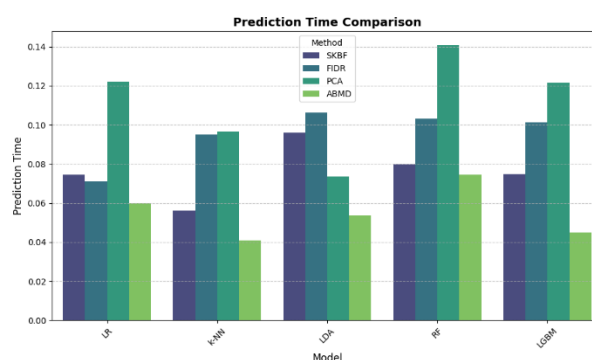
جدول ۴: مقایسه زمان پیش‌بینی

Table 4. Prediction time comparison

BODMAS				
SKBF	FIDR	PCA	ABMD	Model
0.05	0.06	0.04	0.03	LR
0.15	0.18	0.12	0.09	k-NN
0.04	0.05	0.03	0.02	LDA
0.30	0.35	0.28	0.20	RF
0.22	0.25	0.19	0.15	LGBM
TON IoT				
SKBF	FIDR	PCA	ABMD	Model
0.07	0.08	0.06	0.04	LR
0.20	0.24	0.16	0.12	k-NN
0.06	0.07	0.05	0.03	LDA
0.40	0.45	0.35	0.25	RF
0.28	0.32	0.24	0.18	LGBM



(a)

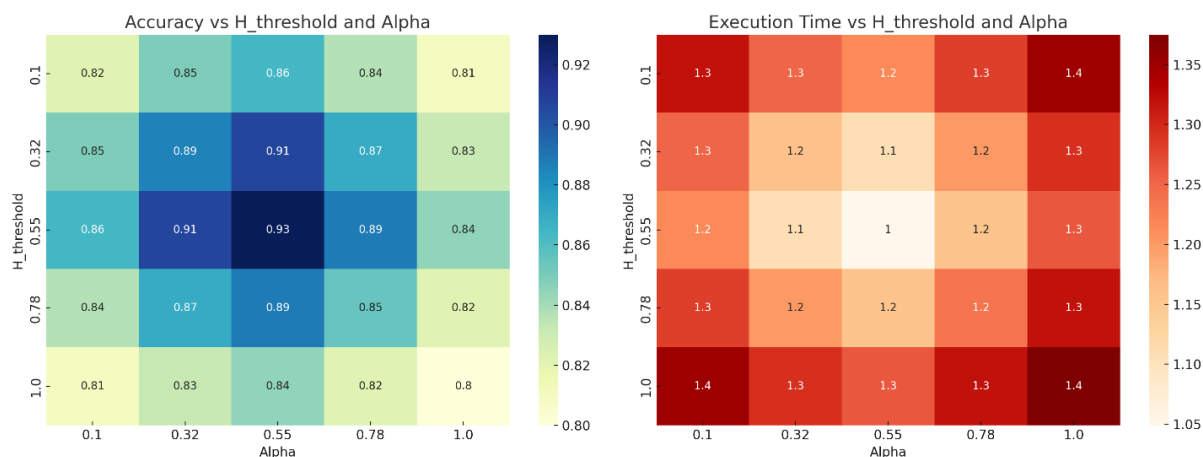


(b)

شکل ۴: مقایسه زمان آموزش و پیش‌بینی

Figure 4. (a) Training and (b) prediction time comparison

در نهایت تأثیر دو پارامتر کلیدی مدل یعنی $H_threshold$ و α بر عملکرد کلی مدل از نظر دقت و زمان پردازش مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). با تنظیم مقادیر مختلف برای این دو پارامتر، مشاهده شد که در مقادیر بسیار پایین یا بسیار بالا، یا دقت مدل کاهش می‌یابد یا زمان پردازش به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا می‌کند. اما در محدوده‌های میانی، مدل قادر است با حفظ دقت بالا، زمان پردازش را نیز در سطح مناسبی نگه دارد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که انتخاب مقادیر میانی برای $H_threshold$ و α بهترین توازن را بین دقت و کارایی فراهم می‌کند.



شکل ۵: تأثیر دو پارامتر $H_threshold$ و α بر عملکرد کلی مدل

Figure 5. The Impact of Two Parameters, $H_threshold$ and α , on the Overall Performance of the Model

۴-۶- بحث

در این تحلیل، عملکرد روش ABMD و سایر روش‌های کاهش ابعاد شامل FIDR، SKBF و PCA در چندین مدل یادگیری ماشین ارزیابی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ABMD در اغلب موارد از نظر دقت، زمان آموزش و زمان پیش‌بینی عملکرد بهتری داشته است.

در مدل لجستیک رگرسیون، روش ABMD با دقت ۸۹/۸٪، زمان آموزش ۱/۲ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۴ ثانیه بهترین عملکرد را داشت. درحالی‌که روش‌های دیگر مانند SKBF با دقت ۸۷/۹٪، زمان آموزش ۲/۱ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۶ ثانیه داشتند. روش FIDR با دقت ۸۸/۴٪ و زمان آموزش ۱/۹ ثانیه ثبت کرد، درحالی‌که PCA با دقت ۸۷/۳٪ و زمان آموزش ۲/۸ ثانیه کمترین کارایی را نشان داد.

در مدل KNN، دقت روش ABMD ۹۲/۳٪ بود که در مقایسه با SKBF که ۹۱/۸٪ و PCA که ۸۹/۷٪ دقت داشتند، بهتر عمل کرد. زمان آموزش در روش ABMD ۰/۲ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۵ ثانیه بود، درحالی‌که روش SKBF ۳/۵ ثانیه و ۰/۹ ثانیه برای آموزش و پیش‌بینی زمان برد. FIDR در این مدل دقت ۹۱/۲٪ داشت، اما زمان آموزش ۲/۸ ثانیه و پیش‌بینی ۰/۷ ثانیه را ثبت کرد.

در مدل تحلیل تفکیک خطی روش ABMD با دقت ۹۱/۶٪ داشت، که نسبت به روش‌های FIDR و SKBF که به ترتیب ۹۰/۱٪ و ۸۹/۴٪ دقت داشتند، برتری نسبی نشان داد. PCA در این مدل کمترین دقت ۸۸/۹٪ را به دست آورد. زمان آموزش روش ABMD ۱/۵ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۳ ثانیه بود، درحالی‌که SKBF با زمان آموزش ۲/۴ ثانیه و پیش‌بینی ۰/۶ ثانیه کندتر عمل کرد.

در مدل جنگل تصادفی (RF)، روش ABMD عملکرد برتری از خود نشان داد و با دقت ۹۴/۶٪، زمان آموزش ۱/۲ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۶ ثانیه، از روش‌های دیگر بهتر بود. درحالی‌که FIDR با دقت ۹۲/۱٪، زمان آموزش ۳/۵ ثانیه و پیش‌بینی ۰/۱ ثانیه را ثبت کرد. روش SKBF با دقت ۹۱/۴٪ زمان آموزش ۴/۲ ثانیه و پیش‌بینی ۱/۱ ثانیه داشت. PCA نیز با دقت ۹۰/۷٪ و زمان آموزش ۳/۹ ثانیه کمی بهتر از SKBF عمل کرد، اما همچنان از ABMD عقب‌تر بود.

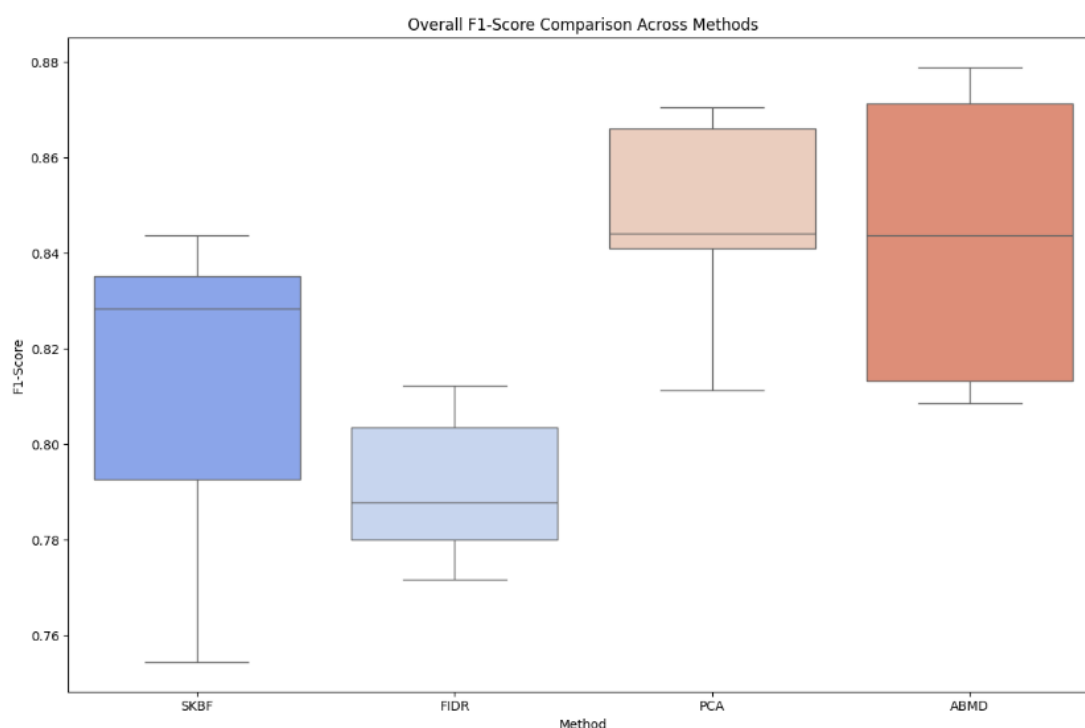
در مدل گرادیان بوستینگ، دقت روش ABMD ۹۵/۲٪ بود که نسبت به SKBF با دقت ۹۲/۵٪ و PCA با دقت ۹۱/۸٪ عملکرد بهتری نشان داد. زمان آموزش در روش ABMD ۲/۷ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۰/۷ ثانیه ثبت شد، درحالی‌که روش SKBF زمان آموزش ۴/۳ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۱/۲ ثانیه داشت. FIDR با دقت ۹۳/۱٪، زمان آموزش ۳/۸ ثانیه و زمان پیش‌بینی ۱/۰ ثانیه عملکردی بین ABMD و سایر روش‌ها داشت.

همچنین، روش ABMD در تمام مدل‌ها سریع‌ترین زمان آموزش و پیش‌بینی را داشت و در عین حال دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های کاهش ابعاد نشان داد. این برتری ناشی از کاهش هوشمندانه ویژگی‌های غیرضروری و حفظ اطلاعات مهم داده‌ها

بود که به بهینه‌سازی پردازش مدل‌های یادگیری ماشین کمک کرد. در نتیجه، ABMD به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاربردهای پردازشی سریع و سیستم‌های مبتنی بر داده‌های حجیم، می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

شکل ۶ پراکندگی و توزیع عملکرد روش‌های مختلف در مقایسه با یکدیگر است. این نمودار علاوه بر میانگین و میانه، دامنه تغییرات و نقاط پرت را نیز نمایش می‌دهد. از این طریق، می‌توان پایداری و یکنواختی عملکرد روش‌ها را ارزیابی کرد.

روش ABMD در مقایسه با سایر روش‌های کاهش ابعاد، دارای میانه بالاتر و دامنه تغییرات کمتر در معیارهای کلیدی مانند دقت (Accuracy)، F1-Score، Precision و Recall است. این نشان می‌دهد که ABMD نه‌تنها عملکرد بهتری دارد، بلکه پایداری بیشتری را نیز ارائه می‌دهد. روش‌های سنتی مانند PCA، SKBF و FIDR دارای پراکندگی بیشتری در نتایج هستند که نشان‌دهنده عدم ثبات عملکرد آن‌ها در مدل‌های مختلف است. از نظر زمان اجرا، ABMD نه‌تنها عملکرد بهتری از لحاظ دقت و تشخیص دارد، بلکه مدت‌زمان پردازش کمتری را نیز نشان می‌دهد که آن را برای سیستم‌های بلادرنگ و پردازش لبه‌آگاه مناسب‌تر می‌کند. همچنین وجود نقاط پرت در برخی روش‌ها نشان‌دهنده این است که در برخی موارد، آن روش‌ها دچار افت عملکرد شده‌اند. درحالی‌که ABMD کمترین تعداد نقاط پرت را دارد که به معنای پایداری و قابلیت اطمینان بیشتر آن است.



شکل ۶: پراکندگی و توزیع عملکرد روش‌های مختلف

Figure 6. The Distribution and Performance Variability of Different Methods

با وجود عملکرد مناسب روش ABMD در کاهش ابعاد و بهبود نتایج مدل‌های یادگیری ماشین، این روش محدودیت‌هایی دارد که باید موردتوجه قرار گیرد. یکی از محدودیت‌های روش ABMD این است که نیاز به داده‌های برچسب‌دار دارد تا بتواند به‌صورت تطبیقی اطلاعات مهم را تشخیص دهد. درحالی‌که روش‌های یادگیری عمیق بدون نظارت مانند Autoencoder ممکن است این محدودیت را نداشته باشند. یکی دیگر از محدودیت‌ها، وابستگی ABMD به توزیع داده‌ها است؛ به‌طوری‌که در صورت عدم تناسب توزیع داده‌ها با فرضیات این روش، کارایی آن ممکن است کاهش یابد. علاوه بر این، ABMD نسبت به نویز موجود در داده‌ها حساس است و وجود داده‌های نویزی می‌تواند منجر به انتخاب ویژگی‌های نامناسب شود. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ABMD باید همراه با بررسی دقیق داده‌ها و پیش‌پردازش مناسب باشد.

۵- نتیجه‌گیری و راهکارهای آتی

در این پژوهش، یک چارچوب یادگیری تطبیقی آگاه از لبه برای طبقه‌بندی بدافزارهای IoT با استفاده از روش کاهش ابعاد مبتنی بر میانگین بلوک ارائه شد. اهمیت این پژوهش در بهبود امنیت سیستم‌های IoT و پردازش کارآمد داده‌ها در دستگاه‌های لبه‌ای نهفته است، جایی که منابع پردازشی و انرژی محدود هستند. روش پیشنهادی ABMD با کاهش هوشمندانه ابعاد داده‌ها، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌های کاهش ابعاد مانند PCA، FIDR و SKBF نشان داد. نتایج نشان داد که ABMD در تمامی مدل‌های مورد بررسی، از نظر معیارهای دقت، یادآوری، F1-score و صحت، عملکرد بهتری داشت. برای مثال، در مدل جنگل تصادفی، دقت روش ABMD برابر ۰/۹۴ بود، درحالی‌که روش‌های دیگر مقادیر ۰/۹۰ تا ۰/۹۲ را ثبت کردند. از نظر زمان آموزش و پیش‌بینی نیز، روش ABMD به دلیل کاهش ابعاد کارآمد، سریع‌تر از سایر روش‌ها بود و در تمامی مدل‌ها کوتاه‌ترین زمان اجرا را داشت. علاوه بر داده‌های آزمایشگاهی، کارایی روش در مجموعه داده TON_IoT نیز تأیید شد که نشان‌دهنده تعمیم‌پذیری چارچوب پیشنهادی در محیط‌های واقعی IoT است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های کاهش ابعاد هوشمند می‌تواند پردازش داده‌ها را بهینه کرده و تأخیر سیستم‌های IoT را کاهش دهد. در پژوهش‌های آینده، می‌توان این روش را بر روی مجموعه داده‌های مختلف و در کاربردهای متنوع‌تر IoT آزمایش کرد و همچنین ترکیب آن با تکنیک‌های یادگیری عمیق را بررسی نمود تا عملکرد بهتری در تشخیص تهدیدات ناشناخته و پیچیده ارائه شود.

مراجع

- [1] A. A. Almazroi and N. ayub, "Deep learning hybridization for improved malware detection in smart Internet of Things," *Sci. Rep.*, vol. 14, p. 7838, 2024, doi: [10.1038/s41598-024-57864-8](https://doi.org/10.1038/s41598-024-57864-8).
- [2] H. Alasmay et al., "Analyzing and Detecting Emerging Internet of Things Malware: A Graph-Based Approach," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8977-8988, Oct. 2019, doi: [10.1109/JIOT.2019.2925929](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2925929).
- [3] A. M. Ghosh and K. Grolinger, "Deep Learning: Edge-Cloud Data Analytics for IoT," *IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, AB, Canada, 2019, pp. 1-7, doi: [10.1109/CCECE.2019.8861806](https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861806).
- [4] I. Ali, K. Wassif, and H. Bayomi, "Dimensionality reduction for images of IoT using machine learning," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 7205, 2024, doi: [10.1038/s41598-024-57385-4](https://doi.org/10.1038/s41598-024-57385-4).
- [5] M. Nooraei Abadeh and S. Ajoudanian, "Reconfigurable edge as a service: enhancing edges using quality-based solutions," *J. Supercomput.*, vol. 77, pp. 6754-6787, 2021, doi: [10.1007/s11227-020-03579-2](https://doi.org/10.1007/s11227-020-03579-2).
- [6] L. Zohrati, M. Nooraei Abadeh, and E. Kazemi, "Flexible approach to schedule tasks in cloud-computing environments," *IET Software*, vol. 12, no. 6, pp. 474-479, 2024, doi: [10.1049/iet-sen.2017.0008](https://doi.org/10.1049/iet-sen.2017.0008).
- [7] M. Ataei et al., "Publish/Subscribe Method for Real-Time Data Processing in Massive IoT Leveraging Blockchain for Secured Storage," *Sensors*, vol. 23, no. 24, p. 9692, 2023, doi: [10.3390/s23249692](https://doi.org/10.3390/s23249692).
- [8] C. S. Sp. Anthony Nduka, "Real-Time Edge Analytics for IoT Networks: Optimizing Data Processing and Decision-Making in Smart Cities," *INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND INNOVATION IN APPLIED SCIENCE (IJRIAS)*, pp. 127-145, 2024, doi: [10.51584/IJRIAS.2024.909012](https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2024.909012).
- [9] A. Galli et al., "Explainability in AI-based behavioral malware detection systems," *Computers & Security*, vol. 141, p. 103842, 2024, doi: [10.1016/j.cose.2024.103842](https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103842).
- [10] S. Bae, G. B. Lee, and E. G. Im, "Ransomware detection using machine learning algorithms," *Concurrency, Comput. Pract. Exper.*, vol. 32, no. 18, p. e5422, 2020, doi: [10.1002/cpe.5422](https://doi.org/10.1002/cpe.5422).
- [11] M. Brengel and C. Rossow, "YARIX: Scalable YARA-based malware intelligence," in *30th USENIX Security Symposium*, pp. 3541-3558, 2021.

- [12] M. Wazid *et al.*, "Explainable Deep Learning-Enabled Malware Attack Detection for IoT-Enabled Intelligent Transportation Systems," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 7231-7244, May 2025, doi: [10.1109/TITS.2025.3525505](https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3525505).
- [13] K. A. Awan, I. Ud Din, A. Almogren, A. Nawaz, M. Y. Khan, and A. Altameem, "SecEdge: A novel deep learning framework for real-time cybersecurity in mobile IoT environments," *Heliyon*, vol. 11, no. 1, p. e40874, 2025, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e40874](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40874).
- [14] Ch. Wei, G. Xie, and Z. Diao "A lightweight deep learning framework for botnet detecting at the IoT edge," *Computers & Security*, vol. 129, p. 103195, 2023, doi: [10.1016/j.cose.2023.103195](https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103195).
- [15] Zh. Ren, H. Wu, Q. Ning, I. Hussain, B. Chen, and "End-to-end malware detection for android IoT devices using deep learning," *Ad Hoc Networks*, vol. 101, p. 102098, 2020, doi: [10.1016/j.adhoc.2020.102098](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102098).
- [16] R. Chaganti, T. D. Pham, and V. Ravi "Deep learning based cross architecture internet of things malware detection and classification," *Computers & Security*, vol. 120, p. 102779, 2022, doi: [10.1016/j.cose.2022.102779](https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102779).
- [17] J. Li, L. Sun, Q. Yan, Z. Li, W. Srisa-an, and H. Ye, "Significant Permission Identification for Machine-Learning-Based Android Malware Detection," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 3216-3225, July 2018, doi: [10.1109/TII.2017.2789219](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2789219).
- [18] S. Li *et al.*, "Intelligent malware detection based on graph convolutional network," *J Supercomput*, vol. 78, pp. 4182–4198, 2022, doi: [10.1007/s11227-021-04020-y](https://doi.org/10.1007/s11227-021-04020-y).
- [19] I. Baptista, S. Shiaeles, and N. Kolokotronis, "A Novel Malware Detection System Based on Machine Learning and Binary Visualization," *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Shanghai, China, 2019, pp. 1-6, doi: [10.1109/ICCW.2019.8757060](https://doi.org/10.1109/ICCW.2019.8757060).
- [20] H. Naeem , X. Cheng, F. Ullah , S. Jabbar, and Sh. Dong, "A deep convolutional neural network stacked ensemble for malware threat classification in internet of things," *J. Circuits Syst. Comput.*, vol. 31, no. 17, p. 2250302, 2022, doi: [10.1142/S0218126622503029](https://doi.org/10.1142/S0218126622503029).
- [21] A. M. N. Zaza, S. K. Kharroub, and K. Abualsaud, "Lightweight IoT Malware Detection Solution Using CNN Classification," *IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*, Bangalore, India, 2020, pp. 212-217, doi: [10.1109/5GWF49715.2020.9221100](https://doi.org/10.1109/5GWF49715.2020.9221100).
- [22] B. Yuan, J. Wang, P. Wu, and X. Qing, "IoT Malware Classification Based on Lightweight Convolutional Neural Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 3770-3783, 1 March 1, 2022, doi: [10.1109/JIOT.2021.3100063](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3100063).
- [23] J. Jeon, J. H. Park, and Y. -S. Jeong, "Dynamic Analysis for IoT Malware Detection With Convolution Neural Network Model," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 96899-96911, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2995887](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995887).
- [24] M. Ghahramani, R. Taheri, M. Shojafar, R. Javidan, and Sh. Wan, "Deep Image: A precious image based deep learning method for online malware detection in IoT Environment," *Internet of Things*, vol. 27, p. 101300, 2024, doi: [10.1016/j.iot.2024.101300](https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101300).
- [25] H. Dong and I. Kotenko, "Image-based malware analysis for enhanced IoT security in smart cities.," *Internet of Things*, vol. 27, p. 101258, 2024/10/01/ 2024, doi: [10.1016/j.iot.2024.101258](https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101258).
- [26] J. Su, D. V. Vasconcellos, S. Prasad, D. Sgandurra, Y. Feng, and K. Sakurai, "Lightweight Classification of IoT Malware Based on Image Recognition," *IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Tokyo, Japan, 2018, pp. 664-669, doi: [10.1109/COMPSAC.2018.10315](https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2018.10315).
- [27] B. Sen, A. Bhowmik, C. Prakash, and M. I. Ammarullah, "Prediction of specific cutting energy consumption in eco-benign lubricating environment for biomedical industry applications: exploring

- efficacy of GEP, ANN, and RSM models," *AIP Advances*, vol. 14, p. 085216, 2024, doi: [10.1063/5.0217508](https://doi.org/10.1063/5.0217508).
- [28] T. Liu ,R. Neware, M. W , Bhatt, and M. Shabaz, "A study on detection and defence of malicious code under network security over biomedical devices," *The Journal of Engineering*, vol. 2022, no.11, pp. 1041-1049, 2022, doi: [10.1049/tje2.12153](https://doi.org/10.1049/tje2.12153).
- [29] Yang, Limin, et al. "BODMAS: An open dataset for learning based temporal analysis of PE malware." In 2021 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), pp. 78-84. IEEE, 2021, doi: [10.1109/SPW53761.2021.00020](https://doi.org/10.1109/SPW53761.2021.00020).
- [30] N. Moustafa, B. Turnbull, and K. -K. R. Choo, "An Ensemble Intrusion Detection Technique Based on Proposed Statistical Flow Features for Protecting Network Traffic of Internet of Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4815-4830, June 2019, doi: [10.1109/JIOT.2018.2871719](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2871719).

Improving Wireless Sensor Network Lifetime Using a Combination of Compact Sensing and Swarm Intelligence for Sleep/Wake Scheduling and Routing

Mohammad Hassan Katebi Jahromi¹  | Karamollah Bagherifard^{2*}  | Razieh MalekHoseini³  | Saeed Mehrjoo⁴ 

¹Department of Computer Engineering, Yas.C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran, m.katebijahromi@iau.ac.ir

²Department of Computer Engineering, Yas.C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran, ka.bagherifard@iau.ac.ir

³Department of Computer Engineering, Yas.C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran, malekhoseini.r@iau.ac.ir

⁴Department of Computer Engineering, Dari.C, Islamic Azad University, Dariun, Iran, saeed.mehrjoo@iau.ac.ir

Correspondence

Karamollah Bagherifard, Assistant professor, Department of Computer Engineering, Yas.C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran, ka.bagherifard@iau.ac.ir

Main Subjects:

Wireless Sensor Network

Paper History:

Received: 19 September 2024

Revised: 22 October 2024

Accepted: 6 November 2024

Abstract

One of the main challenges in wireless sensor networks is the limited energy and operational lifespan of nodes. In this paper, compressive sensing theory is employed to reduce the number of required transmissions, thereby extending the network's lifetime. Data in many wireless sensor networks exhibits both spatial and temporal correlation. The proposed method leverages both forms of correlation to minimize the mean squared error of the reconstructed signal. Furthermore, a sleep/wake scheduling mechanism is applied to decrease node energy consumption. Selecting the optimal set of awake nodes is an NP hard problem; thus, a genetic algorithm is utilized to determine which nodes should remain active. Once the active nodes are identified, an ant colony optimization algorithm constructs an efficient data aggregation tree. Simulation results demonstrate that the proposed approach—combining node selection and routing—reduces reconstruction error by more than 48% and increases network lifetime by over 18% compared to existing methods.

Keywords: Wireless sensor network, Intensive sensing theory, Sleep-wake algorithm, Data aggregation routing, Energy consumption, Lifetime.

Highlights

- Choosing awake nodes intelligently, which will improve the reconstruction accuracy and increase the lifetime of the network.
- The reduction of reconstruction error in the proposed method is due to the use of a genetic algorithm to find awake nodes.
- The longer lifetime of the node is due to the intelligent selection of awake nodes with the genetic algorithm, and by considering the remaining energy of the sensors and using optimal routing with the ant algorithm.

Citation: M. H. Katebi Jahromi, K. Bagherifard, R. MalekHoseini, and S. Mehrjoo, "Simultaneous Application of Intensive Sensing and Sleep Scheduling to Increase the Lifetime of Wireless Sensor Network using Collective Intelligence," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 47-68, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1125970 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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

In recent years, significant advances in the manufacturing of high-performance, compact sensors with wireless communication capabilities have enabled the practical use of wireless sensor networks for monitoring physical phenomena across diverse applications. Examples include water quality monitoring [1], agricultural monitoring [2], and forest fire detection [3].

A key challenge in such networks is the limited energy available to sensor nodes, which often constrains network performance and longevity. To address this, various strategies have been proposed to reduce energy consumption and extend network lifespan. Among these, compressive sensing [4] offers a promising approach. Compressive sensing provides a novel framework for efficient data collection while preserving data reconstruction quality. This technique allows the base station, which acts as the fusion center, to reconstruct the observed physical phenomena using a significantly reduced volume of transmitted data.

2. Innovation and contributions

In this research, we focus on conventional wireless sensor networks, which comprise a large number of densely distributed sensor nodes deployed in a field of interest. Such networks are commonly used for data collection in geographic monitoring, industrial surveillance, security applications, and climate observation. Data in these networks often exhibits both spatial and temporal correlation. Due to the high temporal correlation of physical phenomena, the sensed signal typically changes very little between consecutive sampling rounds [6,7].

The proposed approach leverages this temporal correlation by using the reconstructed signal from the previous round to inform node activation in the next round. At the base station, a genetic algorithm first selects which nodes should be awake in the upcoming cycle. Subsequently, an ant colony optimization algorithm constructs a near-optimal Steiner tree to connect the active nodes to the base station. This intelligent node selection strategy enhances reconstruction accuracy and extends network lifetime compared to random node activation schemes [5,8,9]. The key innovations of this paper are outlined below.

In the proposed method, after determining the active nodes, an optimal compressed sensing data aggregation tree must be formed to route the data from the active nodes to the base station. The active nodes, serving as terminals, must be included in this tree. However, in most cases, a tree cannot be constructed using terminals alone, and additional (non-active) nodes must also participate in the tree's formation. This is known as the Steiner tree problem, which is an NP-hard combinatorial optimization challenge. To address this, we employ an ant colony optimization algorithm to efficiently approximate a near-optimal tree structure, enabling energy-efficient data routing while supporting accurate data reconstruction at the base station.

We employ the ant colony optimization algorithm to construct the routing tree. Initially, an ant is placed at each terminal node that must be connected. During each iteration, an ant moves from its current node to a neighboring sensor node. While the choice of the next node incorporates randomness, it is biased toward paths previously used by other ants, reinforcing desirable routes. Each ant maintains a tabu list—a record of visited nodes—to avoid cycles by preventing revisits.

When an ant encounters another ant or crosses a path previously laid by another ant, their routes merge, forming a common subtree. This process continues iteratively until all ants converge at the base station. At the end of each iteration, the combined paths of all ants yield a candidate Steiner tree, from which the best solution is selected based on a defined cost metric such as total transmission energy or path length.

The tree constructed in this phase is first used to deliver control packets to the nodes participating in the current round. Each node that receives a control packet identifies its parent and children within the tree and prepares accordingly. Subsequently, the same tree is reused for transmitting compressed sensing data from the awake nodes to the base station.

Our proposed method achieves lower reconstruction error compared to existing methods, which is attributed to the use of a genetic algorithm for intelligently selecting awake nodes. This selection process effectively leverages spatial and temporal correlations in the sensed data, thereby improving reconstruction accuracy.

Furthermore, the proposed method extends network lifetime beyond that of other evaluated approaches. This enhancement results from the energy-aware selection of awake nodes via the genetic algorithm—which accounts for residual sensor energy—combined with energy-efficient routing implemented through the ant colony optimization algorithm.

3. Materials and Methods

In this section, we demonstrate using synthetic data that the proposed method outperforms existing methods in both signal reconstruction accuracy and network lifetime. All simulations were performed in the MATLAB programming environment.

To evaluate energy consumption, the energy model from [11] is adopted. In this model, each sensor's radio operates in one of four states: transmitting, receiving, listening (active), or sleeping.

The relationship between energy and power is expressed as:

$$\text{Energy} = \text{Power} \times \text{Time}$$

For example, the amount of energy consumed by a transmitter to send a data packet can be calculated using the following equation:

$$\begin{aligned} \text{Energy} &= \text{Power} \times \text{Time} \\ \text{Energy} &= P_t \times \text{Time} \\ \text{Energy} &= P_t \times L \times T_B \\ \text{Energy} &= 60 \times 24 \times 0.416 \times 10^{-3} \\ \text{Energy} &= 0.00059904 \text{ J} \cong 599 \mu\text{J} \end{aligned}$$

All data and control packets are assumed to be 64 bits long. An AWGN channel is used for sensor transmissions, resulting in various data loss probabilities. We employ the CVX software package [12] for reconstructing the compressed sensor signal. The reconstruction performance is evaluated using the mean relative error $\frac{\|x\|_2^2}{\|\hat{x}-x\|_2^2}$.

Network lifetime is defined as the time from when the first sensor dies. In order to evaluate the performance, we compared the proposed method with method [5], which only utilizes spatial correlation, method [10], which utilizes both spatial and temporal correlation, and the proposed method in [9], which uses a model-free Q-learning algorithm for searching optimal decision-making strategies while simultaneously employing a compressed sensor and sleep scheduling.

In the simulations, n wireless sensor nodes are randomly distributed in a square environment with dimensions $d \times d \text{ m}^2$. The communication radius of the sensors is considered to be R meters. The base station is also located at one of the corners of the environment at coordinates $(0, 0)$. The initial energy of all sensor nodes is E_{int} . The data signal x is randomly generated with a dimension of n for different time instants, where s non-zero components are selected independently and identically distributed (i.i.d.) from a Gaussian distribution with zero mean and unit variance. The dictionary Ψ is initially constructed by creating an $n \times n$ matrix with i.i.d. selections from a Gaussian distribution $N(0,1)$, and then the columns of Ψ are normalized to a unit scale. The wireless channel SNR is considered to be 20 dB, which, along with the modulation type and packet length, determines the data loss probability [13].

A value of $\beta = 10^{-3}$ was considered. Additionally, sensor measurements were subjected to zero-mean Gaussian noise errors, resulting in a signal-to-noise ratio of 20 dB. Furthermore, it was assumed in all experiments that 20% of the estimated signal was inaccurate.

In the ant colony algorithm simulation, a population size of 50 and 100 iterations were considered. Additionally, the parameter values were set to $\rho = 0.1$, $\gamma = 5$, $\lambda = 2$, $\alpha = 1$, $\beta = 1.5$.

4. Results and Discussion

Figure I illustrates the reconstruction accuracy of the proposed method compared to those presented in [5] and [10] for different values of s^* , with m^* fixed at 200. As observed, all methods exhibit a decrease in reconstruction error as s^* decreases. The proposed method achieves a consistently lower reconstruction error than the alternatives.

Specifically, the proposed method yields approximately a **48% improvement** in reconstruction error over method [5]. This improvement stems from the intelligent selection of active nodes in each round, whereas method [5] employs random node activation.

Compared to method [10], the proposed approach demonstrates about a **59% improvement** in reconstruction error. This gain is attributed to the use of a genetic algorithm for selecting awake nodes, which provides a more optimal solution than the convex optimization with simplification used in [10].

Method [9] implements a distributed approach that cannot effectively identify the most suitable awake nodes, leading to suboptimal shadow matrix construction and consequently higher reconstruction error. Our proposed method reduces the reconstruction error by roughly **61%** relative to method [9].

In summary, the integration of genetic-algorithm-based node selection and ant-colony-optimized routing enables more accurate data reconstruction by efficiently leveraging spatial and temporal correlations while balancing energy consumption across the network.

Figure II presents a comparative evaluation of network lifetime for the proposed method and two reference methods, with the parameter s^* set to 100. The figure shows the network lifetime across different values of m^* , which represents the number of active nodes per round. The proposed method consistently outperforms the other approaches in terms of longevity.

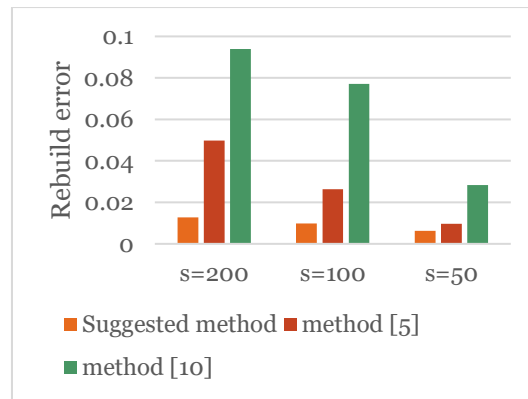


Figure I: Reconstruction error of different methods for various sparsity levels

The enhanced lifetime of the proposed method is attributed to two key factors: the intelligent selection of active nodes via a genetic algorithm that accounts for remaining sensor energy, and the construction of energy-efficient routing paths using an ant colony optimization algorithm.

The method introduced in [9] exhibits a network lifetime relatively close to that of our proposed approach. This comparable performance is largely due to the distributed nature of their algorithm and the reduced overhead associated with control packet transmission.

Specifically, the proposed method achieves an average **18% improvement** in network lifetime over the method in [5], and an approximately **32% improvement** compared to the method in [10]. When benchmarked against method [9], our approach yields a modest but consistent **1% increase** in network lifetime.

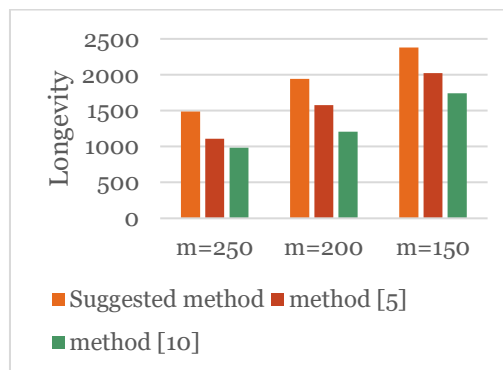


Figure II: Network lifetime versus the number of awake nodes

In Figure III, we also evaluate the reconstruction error for different simulation methods with varying values of m . For these experiments, we set $s=100$. In all evaluated methods, the reconstruction error decreases as the number of awake nodes in each round increases.

Even in this form, it is clearly evident that the reconstruction error of the proposed method is better than the two evaluated methods, the reasons for which were previously explained.

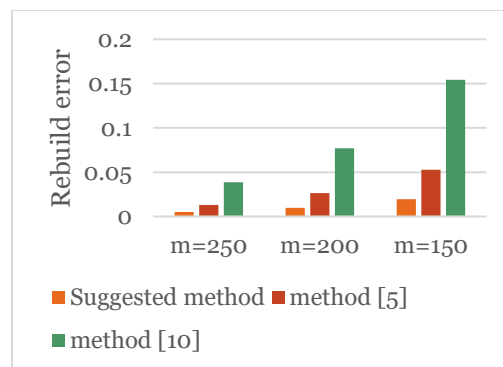


Figure III: Reconstruction error as a function of the number of awake nodes

In sensor networks, both the signal accuracy of the received data and the network's lifetime are of paramount importance. Figure IV simultaneously examines both the lifetime and reconstruction error parameters in the form of $P = \frac{\text{Longevity}}{\text{error} \times 10^4}$ for various values of m and s in the proposed method to determine the optimal value of m .

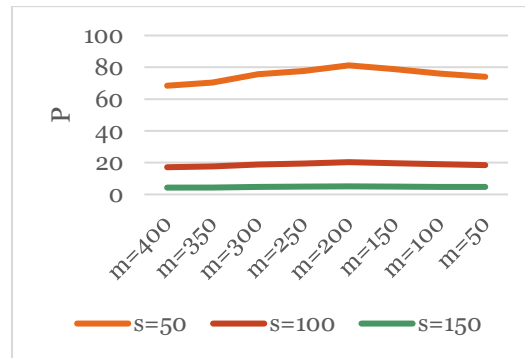


Figure IV: Simultaneous investigation of lifetime and accuracy for different numbers of awake nodes

The higher the value of m , representing the number of active nodes in each phase, the lower the reconstruction error; however, the network lifetime decreases. For the conducted experiments, $m=200$ was found to be the optimal number of active nodes.

As a final test and evaluation of the overall performance of all four methods, we have simultaneously examined both the lifetime parameter and the reconstruction error under the parameter $P = \frac{\text{Parameter length}}{\text{error} \times 10^4}$. In this experiment, the value of $m=200$ was considered.

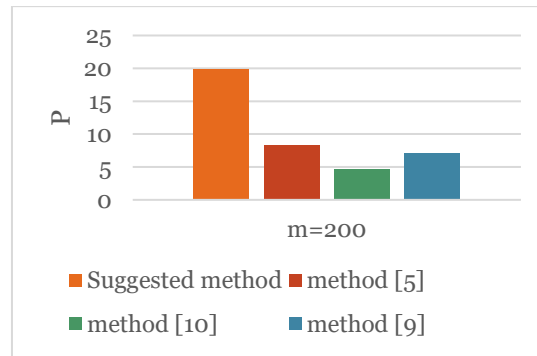


Figure V: A simultaneous examination of the lifespan and accuracy of the evaluation methods

As illustrated in Figure V, our proposed method outperforms all three compared methods when considering both network lifetime and reconstruction error simultaneously. The reasons for this superiority have been elaborated in the preceding sections.

5. Conclusion

To extend the lifetime of wireless sensor networks, compressive sensing can be effectively applied. When compressive sensing is used, only a subset of nodes actively transmit data, while the remaining nodes can enter sleep mode to conserve energy. Random or distributed selection of active nodes often leads to increased reconstruction error; hence, a centralized node selection strategy was adopted in this work.

In the proposed method, a genetic algorithm determines the optimal set of awake nodes, and an ant colony optimization algorithm constructs an energy-efficient routing tree between these nodes and the base station. Simulation results confirm that this approach increases network lifetime while reducing reconstruction error.

The proposed method utilizes a mathematical relation to select awake nodes based on the reconstructed signal from the previous round. For future work, we plan to integrate a predictor that estimates the next round's signal by exploiting temporal correlations in sensor data. This predicted signal will then be incorporated into the selection relation, enabling more accurate and adaptive node activation, further enhancing reconstruction quality and energy efficiency.

6. Acknowledgement

We extend our sincere gratitude to Dr. Bagherifard and Dr. Mehrjoo for their valuable guidance on the study design and their thorough review of the manuscript.

References

- [1] G. A. López-Ramírez and A. Aragón-Zavala, "Wireless Sensor Networks for Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 95120-95142, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3308905](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308905).
- [2] M. N. Mowla, N. Mowla, A. F. M. S. Shah, K. M. Rabie, and T. Shongwe, "Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 145813-145852, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3346299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299).
- [3] D. R. Zaidan, A. G. Wadday, M. M. Abbood, A. F. Al-Baghdadi, and B. J. Hamza, "Forest fire detection based wireless sensor networks-survey," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2776, no. 1: AIP Publishing.
- [4] D. L. Donoho, "Compressed sensing," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April 2006, doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [5] Q. Ling and Z. Tian, "Decentralized Sparse Signal Recovery for Compressive Sleeping Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 7, pp. 3816-3827, July 2010, doi: [10.1109/TSP.2010.2047721](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2047721).
- [6] N. Vaswani and W. Lu, "Modified-CS: Modifying Compressive Sensing for Problems With Partially Known Support," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4595-4607, Sept. 2010, doi: [10.1109/TSP.2010.2051150](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2051150).
- [7] W. Lu and N. Vaswani, "Regularized Modified BPDN for Noisy Sparse Reconstruction With Partial Erroneous Support and Signal Value Knowledge," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 1, pp. 182-196, Jan. 2012, doi: [10.1109/TSP.2011.2170981](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2170981).
- [8] S. Mehrjoo, F. Khunjush, and A. Ghaedi, "Fully distributed sleeping compressive data gathering in wireless sensor networks," *IET Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 830-837, 2020, doi: [10.1049/iet-com.2019.0077](https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.0077).
- [9] X. Wang, H. Chen, and S. Li, "A reinforcement learning-based sleep scheduling algorithm for compressive data gathering in wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2023, no. 1, p. 28, 2023, doi: [10.1186/s13638-023-02237-4](https://doi.org/10.1186/s13638-023-02237-4).
- [10] W. Chen and I. J. Wassell, "Optimized Node Selection for Compressive Sleeping Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 827-836, Feb. 2016, doi: [10.1109/TVT.2015.2400635](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2400635).
- [11] V. Shnayder, M. Hempstead, B.-r. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh, "Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications," in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 2004, pp. 188-200, doi: [10.1145/1031495.1031518](https://doi.org/10.1145/1031495.1031518).
- [12] M. Grant, S. Boyd, and Y. Ye, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta," ed, 2013.
- [13] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, Higher Education, 2008.

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

Author Contributions: **Mohammad Hassan Katebi Jahromi:** Software, methodology, writing original draft preparation; **Karamollah Bagherifard:** Resources, methodology, manuscript editing; **Razieh MalekHoseini:** Resources, manuscript editing; **Saeed Mehrjoo:** 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.

بهبود طول عمر شبکه حسگر بی سیم با استفاده از ترکیب حسگری فشرده و هوش جمعی برای زمانبندی خواب/بیدار و مسیریابی

محمد حسن کاتبی جهرمی^۱ | کرم الله باقری فرد^۲ | راضیه ملک حسینی^۳ | سعید مهرجو^۴

چکیده:

یکی از اصلی ترین چالش های شبکه های حسگر بی سیم انرژی محدود گره ها و طول عمر آنهاست. در این مقاله از تئوری حسگری فشرده به منظور کاهش تعداد ارسالات و نهایتا افزایش طول عمر شبکه حسگر بی سیم بهره می بریم. داده های برخی از شبکه های حسگر بی سیم علاوه بر همبستگی فضایی، همبستگی زمانی نیز دارند. روش پیشنهادی در این مقاله از هر دو نوع همبستگی بهره می برد تا مقدار خطای مربعات سیگنال داده ی بازسازی شده را کمینه کند. همچنین از الگوریتم خواب/بیدار جهت کاهش مصرف انرژی گره ها استفاده می نماییم. گره های بیدار در روش پیشنهادی با به کارگیری الگوریتم ژنتیک مشخص می شوند، چراکه یافتن گره های بهینه یک مسئله ی NP_Hard است. پس از مشخص شدن گره های بیدار با بهره گیری از الگوریتم مورچگان جهت ساخت درخت تجمیع بهینه ی گره های بیدار استفاده می شود. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که رویکرد پیشنهادی ما در انتخاب گره های بیدار و مسیریابی آنها منجر به بهبود خطای بازسازی بیشتر از ۴۸٪ و همچنین افزایش بیش از ۱۸٪ طول عمر شبکه نسبت به روش های مورد ارزیابی خواهد شد.

کلید واژه ها: شبکه حسگر بی سیم، تئوری حسگری فشرده، الگوریتم خواب و بیدار، مسیریابی تجمیع داده، مصرف انرژی، طول عمر.

^۱گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، m.katebijahromi@iau.ac.ir

^۲گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، ka.bagherifard@iau.ac.ir

^۳گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، malekhoseini.r@iau.ac.ir

^۴گروه مهندسی کامپیوتر، واحد دارپون، دانشگاه آزاد اسلامی، دارپون، ایران، saeed.mehrjoo@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

*کرم الله باقری فرد، استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران، ka.bagherifard@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

شبکه حسگر بی سیم

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۹ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱ آبان ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۶ آبان ۱۴۰۳

تازه های تحقیق:

- انتخاب هوشمندانه گره های بیدار، که باعث بهبود دقت بازسازی و افزایش طول عمر شبکه می شود.
- کاهش خطای بازسازی در روش پیشنهادی به دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک برای یافتن گره های بیدار است.
- طول عمر بیشتر گره به دلیل انتخاب هوشمندانه گره های بیدار با الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن انرژی باقیمانده حسگرها و استفاده از مسیریابی بهینه با الگوریتم مورچه است.

COPYRIGHTS

©2026 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، با پیشرفت‌های زیاد در تکنولوژی ساخت حسگرهایی با توان محاسباتی بالا، اندازه‌ی مناسب و قابلیت ارتباطات بی سیم، امکان بهره‌برداری از شبکه‌های حسگر بی سیم برای نظارت بر پدیده‌های فیزیکی در انواع مختلفی از کاربردها فراهم شده است. برای مثال، نظارت بر کیفیت آب [۱]، نظارت کشاورزی [۲]، نظارت بر آتش‌سوزی جنگل‌ها [۳] و غیره. یکی از چالش‌های اصلی چنین شبکه‌هایی، محدودیت انرژی گره حسگر است که به عنوان نقطه ضعف در عملکرد ظاهر می‌شود. راهکارهای زیادی جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه حسگر پیشنهاد شده است. یکی از راهکارها به کارگیری حسگری فشرده^۱ است. حسگری فشرده [۴] دیدگاهی نوین برای جمع‌آوری کارآمد داده بدون افت کیفیت در بازیابی داده فراهم می‌کند. این روش این امکان را فراهم می‌سازد که ایستگاه پایه که در واقع مرکز ادغام^۲ است با استفاده از حجم کمتری از داده‌ها، پدیده‌های فیزیکی را بازسازی کند. ویژگی‌های شبکه‌های حسگر بی سیم، که به طور معمول شامل یک ایستگاه پایه بدون محدودیت انرژی و قابلیت محاسباتی زیاد و چندین گره حسگر با ذخیره انرژی و قابلیت محاسباتی محدود است، استفاده از حسگری فشرده را پیشنهاد می‌دهد [۵، ۶]. از آنجا که این مدل فشرده سازی در هنگام کد کردن که توسط گره‌های حسگر انجام می‌شود، پیچیدگی بسیار کمی دارد و تنها هنگام بازسازی به محاسبات زیاد نیاز دارد و این محاسبات توسط مرکز ادغام صورت می‌پذیرد، بنابراین مناسب برای شبکه‌های حسگر بی سیم است.

در مقالات مختلفی از حسگری فشرده در سناریوهایی که در آن تعداد زیادی از گره‌های حسگر در میدان برای جمع‌آوری اطلاعات مورد علاقه پخش شده‌اند، استفاده شده است. به عنوان مثال، روش پیشنهادی در [۷] به عنوان یک طرح فشرده‌سازی و ارسال برای کمینه کردن تعداد بسته‌ها جهت انتقال استفاده می‌شود. در چندین مقاله نیز ترکیب حسگری فشرده و زمانبندی خواب/بیدار جهت افزایش طول عمر شبکه پیشنهاد شده است [۵، ۸-۱۰]. استراتژی بکارگرفته شده در تمامی این مقالات به گونه‌ای است که در هر دوره، تنها بخشی از گره‌های حسگر، بیدار هستند و سایر گره‌ها خاموش‌اند تا مصرف انرژی کاهش یابد. در هر سه مقاله، گره‌های حسگر به صورت تصادفی و با یک احتمال پیش فرض به صورت توزیع شده بیدار می‌شوند. اما انتخاب تصادفی گره‌های بیدار انعطاف‌پذیری لازم را برای تغییر تعداد گره‌های حسگر بیدار بر اساس میزان تنگی سیگنال یا شرایط کانال که ممکن است تغییر کند، ندارد. همچنین ماتریس سایه که به صورت تصادفی و نه به صورت بهینه ساخته شود عملکرد و کارایی بسیار کمتری نسبت به ماتریس سایه بهینه در انواع مختلفی از کاربردها دارد [۱۱].

در این تحقیق، تمرکز بر شبکه‌های حسگر بی سیم معمولی که از تعداد بسیار زیادی گره حسگر که در میدان به صورت چگال منتشر شده‌اند، است. این نوع شبکه‌ها برای جمع‌آوری اطلاعات مورد علاقه در کاربردهایی مانند نظارت جغرافیایی، نظارت صنعتی، امنیت و نظارت بر اقلیم استفاده می‌شود. در داده‌های شبکه‌های حسگر پدیده‌های فیزیکی، همبستگی فضایی و همچنین همبستگی زمانی وجود دارد. با توجه به اینکه سیگنال داده بخاطر همبستگی زمانی زیاد در هر دور مقدار کمی تغییر می‌کند [۱۲، ۱۳]، رویکرد پیشنهادی با بهره‌گیری از اطلاعات سیگنال بازسازی شده در دور قبل، ابتدا گره‌های بیدار در دور بعدی را در ایستگاه پایه و با بکارگیری الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌کند و سپس با الگوریتم مورچگان یک درخت بهینه‌ی اشتاینر را برای اتصال گره‌های بیدار به یکدیگر و به ایستگاه پایه می‌سازد. انتخاب گره‌های بیدار به صورت هوشمندانه باعث بهبود دقت بازسازی و افزایش طول عمر شبکه نسبت به زمانی که گره‌های حسگر به صورت تصادفی فعال شده‌اند [۵، ۸، ۹] خواهد شد.

روش پیشنهادی در [۱۰] نیز شبیه به روش پیشنهادی ما به صورت متمرکز در ایستگاه پایه، گره‌های بیدار دور بعد را مشخص می‌کند. اما از ارسال تک گامی استفاده شده که مشکلات زیادی دارد. اول اینکه در عمل و برای خیلی از شبکه‌های حسگر بی سیم این نوع ارسال امکان پذیر نیست چرا که ممکن است فاصله ایستگاه پایه تا گره‌ها زیاد باشد و در برد ارتباطی یکدیگر نباشند. دوم اینکه ارسال تک گامی و با فاصله‌ی زیاد، مصرف انرژی گره‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین نرخ خطای بسته‌ها و گم شدن آن‌ها نیز بخاطر فاصله زیاد به شدت افزایش می‌یابد. پس هم بر دقت هم بر طول عمر شبکه تاثیر منفی دارد.

¹ Compressive Sensing

² Fusion Center

همچنین در این مقاله از رها سازی محدب^۱ برای تبدیل مسئله ی غیر محدب^۲ به محدب استفاده شده است. رها سازی محدب با ساده کردن مسائل پیچیده، به جواب مسئله می رسد. با این حال، این روش محدودیت هایی نیز دارد و ممکن است بهترین راه حل را برای هر مسئله نیابد. محدودیت های روش رها سازی محدب از این واقعیت ناشی می شوند که شامل ساده کردن یک مسئله غیر محدب به یک مسئله ی محدب است، به این معنی که راه حل بهینه سراسری را تضمین نمی کند. این محدودیت می تواند منجر به راه حل های غیر بهینه شود و در برخی موارد، به بهینه ی محلی همگرا شود.

همچنین در [۹] نیز در کنار بکار گیری حسگری فشرده از یک الگوریتم زمان بندی خواب مبتنی بر یاد گیری تقویتی استفاده شده است. انتخاب گره های فعال به عنوان یک فرایند تصمیم گیری مارکوف محدود مدل سازی شده است. در این روش از الگوریتم یاد گیری Q بدون مدل برای جستجوی راهبردهای تصمیم گیری بهینه استفاده شده است. انرژی باقیمانده گره ها و یکنواختی نمونه برداری در تابع پاداش الگوریتم یاد گیری Q برای متعادل سازی مصرف انرژی گره ها در نظر گرفته شده است. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله از نوع توزیع شده است که می تواند منجر به کاهش هزینه ی ارسال بسته های کنترلی و افزایش عمر شبکه شود. اما این روش موضوع بسیار مهم خطای باز سازی را به نسبت طول عمر لحاظ نکرده و روش پیشنهادی در این مقاله نمی تواند ماتریس سایه ی بهینه را بسازد.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی آزمایش های مختلفی صورت گرفته که اثر پارامترهای مختلفی نظیر تنگی سیگنال و تعداد گره های حسگر بیدار را بررسی می کند. همچنین میزان مصرف انرژی و طول عمر شبکه را نیز مورد بررسی قرار می دهیم. ادامه مقاله به شکل زیر ساختاردهی شده است. در بخش دوم، فرایند جمع آوری، انتقال و باز سازی داده ها به طور دقیق شرح داده شده است. در بخش سوم، مسئله انتخاب گره های بیدار با به کار گیری الگوریتم ژنتیک و رویکرد پیشنهادی در ساخت درخت تجمیع داده با استفاده از الگوریتم کولونی مورچگان را تشریح می کنیم. نتایج شبیه سازی ها در بخش چهارم ارائه شده اند و در نهایت، نتیجه گیری ها در بخش پنجم آورده شده اند.

در ادامه نمادهای مورد استفاده را جهت شفاف شدن بیشتر توضیح می دهیم. حروف کوچک اعداد را نشان می دهند، حروف برجسته بزرگ، ماتریس ها را نشان می دهند، حروف برجسته کوچک، بردارهای ستونی را نشان می دهند و حروف بزرگ کالی گرافی مجموعه ها را نشان می دهند. نمادهای $(\cdot)^T$ و $(\cdot)^{-1}$ به ترتیب نمایانگر ترانپوز و معکوس یک ماتریس هستند. ماتریس افزوده با $Tr(\cdot)$ نشان داده می شود. x_i عنصر i ام از بردار x را نشان می دهد، $X_{i,i}$ عنصر قطری i ام از X را نشان می دهد، و X_c زیرماتریس X با انتخاب ستون ها با اندیس های مجموعه ی c را نشان می دهد. c مجموعه مکمل c را نشان می دهد. $\mathbb{E}_x(\cdot)$ امید ریاضی نسبت به توزیع تصادفی بردار x را نشان می دهد. $\binom{n}{m}$ تعداد ترکیب های m از مجموعه داده با n عنصر را نشان می دهد. $N(\mu, \Sigma)$ توزیع نرمال چندمتغیره با بردار میانگین μ و ماتریس کوواریانس Σ را نشان می دهد. I_n ماتریس یکانی $n \times n$ است. نرم l_0 ، نرم l_1 ، و نرم l_2 بردارها به ترتیب با $\|\cdot\|_0$ ، $\|\cdot\|_1$ ، $\|\cdot\|_2$ نشان داده می شوند

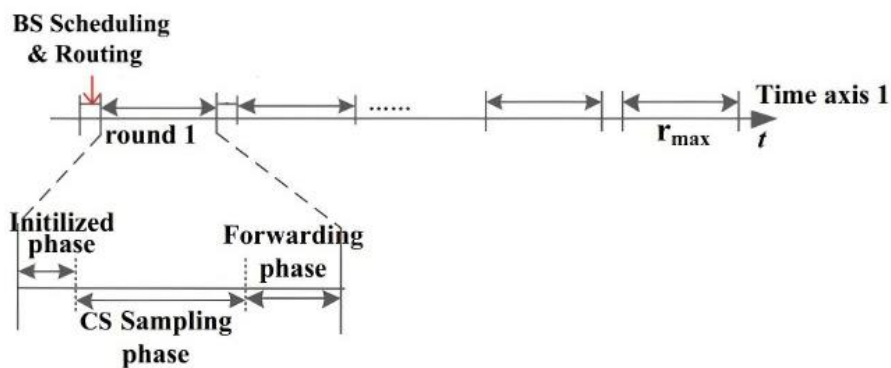
۲- پیش نیاز

در این مقاله، یک معماری معمولی از شبکه های حسگر بی سیم برای جمع آوری اطلاعات فیزیکی میدان با n گره حسگر و یک ایستگاه پایه در نظر گرفته شده است. در حالی که رویکرد پایه برای جمع آوری داده ها نیازمند جمع آوری تمام داده های خوانده شده توسط گره های حسگر است، یک شبکه حسگر بی سیم فشرده ی خوابیده تنها نیازمند فعال سازی بخشی از گره های حسگر برای نظارت و انتقال داده است [۵]. برای پیاده سازی چنین رویکرد مبتنی بر حسگری فشرده و زمان بندی خواب، از استراتژی که در شکل ۱ نشان داده شده است استفاده می کنیم. در مرحله ی اول و در ابتدای هر دور ایستگاه پایه با بکار گیری سیگنال داده ی مرحله ی قبل و الگوریتم ژنتیک گره هایی که باید در دور بعد بیدار باشند را مشخص می کند. سپس با بکار گیری الگوریتم مورچگان یک درخت بهینه را می سازد. این مرحله را BS Scheduling & Routing نامیدیم. در مرحله ی دوم ابتدا از طریق مسیر بهینه ی ساخته شده تنها به گره هایی که باید بیدار باشند بسته ی کنترلی ارسال می شود. هر گره ی که این بسته را دریافت کند،

¹ Convex relaxation

² Non-convex

می داند که باید در دور بعد بعنوان گره بیدار عملیات حسگری و ارسال را انجام دهد. بسته ی کنترلی، والد و فرزندان گره های بیدار را مشخص می کند. در شکل این مرحله را به نام Initialized Phase می بینید. سپس در مرحله ی CS Sampling Phase گره های بیدار، حسگری را انجام می دهند. در نهایت در Forwarding Phase به روش حسگری فشرده داده ها به ایستگاه پایه ارسال می شوند و ایستگاه پایه نیز سیگنال داده را بازسازی می کند.



شکل ۱: فازهای مختلف روش پیشنهادی
Figure 1. The Phases of the proposed method

۲-۱ جمع آوری و انتقال داده

فرض کنید هر گره حسگر یک پارامتر نظارت شده $f_i (i=1.2....n)$ دارد که باید به مرکز ادغام گزارش دهد. این داده های جمع آوری شده توسط گره های حسگر مختلف، دارای همبستگی فضایی زیادی هستند و به این ترتیب می توانیم سیگنال $f \in \mathbb{R}^n$ را به عنوان یک بردار تنک $x \in \mathbb{R}^n$ تحت پایهی $\Psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ نمایش دهیم به گونه ای که:

$$f = \Psi x. \quad (1)$$

که در آن پایهی تنک کننده ی Ψ می تواند از قبل مشخص شده باشد، یا با استفاده از یک رویکرد تطبیقی که از طریق تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) به روزرسانی می شود [۱۴] یا یادگیری دیکشنری [۱۵] مشخص گردد. در اینجا، "تنک" به معنای این است که تنها S ($S \ll n$) عنصر در بردار x مقادیر غیر صفر دارند، در حالی که سایر عناصر همگی صفر هستند، به عبارت دیگر $\|x\|_0 = S$

در یک شبکه حسگر بی سیم فشرده خوابیده همانند [۵، ۸]، تنها m ($m < n$) گره حسگر برای انتقال پارامتر فیزیکی نظارتی خود در بازه های زمانی مختلف فعال هستند و تمام گره های حسگر دیگر خاموش شده اند تا انرژی و منابع ذخیره شوند. از آنجاکه گم شدن داده در شبکه های بی سیم اجتناب ناپذیر است، بنابراین بردار سیگنال دریافتی $y \in \mathbb{R}^k$ در مرکز ادغام به صورت زیر خواهد بود:

$$y = H\Phi f + z \quad (2)$$

که در آن z خطای فرایند اندازه گیری را نشان می دهد، $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ماتریس سایه^۲ است که المان های آن همگی صفر هستند به جز m المان در m ستون و سطر مختلف، و $H \in \mathbb{R}^{k \times m}$ ($k < m$) ماتریس پاکت های گم شده که المان های آن همگی صفر می باشند به جز k المان در k ستون و سطر مختلف است. المان های ماتریس سایه Φ به وضعیت گره های حسگر اشاره دارند، به عبارت دیگر خواب یا بیدار بودنشان. به عنوان مثال، اگر گره حسگر i فعال باشد، یک المان ۱ در ستون i ام Φ وجود دارد؛ در غیر این صورت، تمام عناصر ستون i ام صفر هستند. به همین ترتیب، المان های ماتریس پاکت های گم شده H به اندازه گیری های جمع آوری شده ی موفق گره های حسگر مختلف اشاره دارد. به عنوان مثال، اگر مقدار ۱ در ستون i ام H وجود داشته باشد، به این معنی ست که بسته ی داده ی گره حسگر i دریافت شده است؛ در غیر این صورت، در هنگام ارسال این بسته

^۱ Sparse

^۲ Projection Matrix

گم شده است. مرکز ادغام می‌تواند با استفاده از الگوریتم^۱ CRC، ACK^۲ و Timeout بررسی کند که آیا بسته‌ی پیام گره حسگری گم شده است یا خیر و از الگوریتم CRC به منظور تشخیص تغییرات در بسته‌های ارسالی بهره‌برد. بنابراین، طبق ۱ و ۲ می‌توانیم بردار سیگنال دریافتی را به شکل زیر بازنویسی کنیم:

$$y = H\Phi\Psi x + z = Ax + z \quad (۳)$$

که در آن $A = H\Phi\Psi \in \mathbb{R}^{k \times n}$ ماتریس حسگری معادل است. توجه داشته باشید که خطای حسگری z ناشی از محدودیت‌های دستگاه‌های حسگر است، درحالی‌که نواقص محیط انتقال مانند گم شدن بسته داده منجر به خطاهای بسته می‌شوند و تأثیر آن توسط ماتریس H لحاظ می‌شود. همچنین فرض می‌شود اندازه بسته‌های داده مربوط به اندازه‌گیری‌ها یکسان است.

۲-۲ فرآیند بازسازی داده

پروژه معمولی بازسازی سیگنال در روش حسگری فشرده از طریق حل مسئله بهینه‌سازی زیر به دست می‌آید:

$$\min_x \|x\|_1 \quad (۴)$$

$$s.t. \|Ax - y\|_2^2 \leq \varepsilon.$$

که در آن ε یک تخمین از سطح خطای مربوط به حسگری فشرده است. همچنین اثبات شده است که فقط به $O\left(s \log \frac{n}{s}\right)$ اندازه‌گیری برای بازسازی مطلوب در تئوری حسگری فشرده نیاز است [۱۶].

در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرها در محیط‌های پدیده‌های طبیعی دارای همبستگی قابل توجهی هم در حوزه فضایی و هم در حوزه زمانی هستند. به عنوان مثال، داده‌های حس شده توسط حسگرها که توسط آزمایشگاه تحقیقات اینتل برکلی [۱۷] ارائه شده، هم همبستگی فضایی بالایی را از طریق مشاهده داده‌های تمام حسگرها در یک لحظه زمانی و هم همبستگی زمانی بالایی را از طریق مشاهده داده‌های یک حسگر در بازه‌های زمانی متوالی نشان می‌دهد که در [۱۸] نمایش داده شده است.

برای کاهش تعداد پروژکشن‌های مورد نیاز برای بازیابی سیگنال، بهتر است که علاوه بر همبستگی فضایی از همبستگی زمانی نیز بهره‌بریم. بنابراین در رویکرد پیشنهادی برای انتخاب حسگرهای بیدار از همبستگی زمانی نیز استفاده می‌شود. فرض شده است که به دلیل همبستگی زمانی، مقادیر سیگنال داده به آرامی در زمان تغییر می‌کنند و بنابراین می‌توان از سیگنال داده‌ی لحظه‌ی زمانی قبل به عنوان یک تخمین اولیه از سیگنال داده‌ی لحظه‌ی زمانی کنونی استفاده کرد [۱۲، ۱۳]. در [۱۳]، مسئله‌ی بهینه‌سازی زیر برای بازیابی سیگنال اصلی پیشنهاد شده است:

$$\min_x \|x\|_1 \quad (۵)$$

$$s.t. \|Ax - y\|_2^2 \leq \varepsilon.$$

در اینجا، ε بیانگر تخمین سیگنال داده است.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش، جزئیات روش پیشنهادی که شامل انتخاب گره‌های بیدار با به کارگیری الگوریتم ژنتیک و سپس ساخت درخت بهینه‌اشترین با بهره‌وری کولونی مورچگان جهت مسیریابی بهینه را تشریح می‌کنیم. در [۱۰] برای مشخص کردن اینکه کدام گره‌ها بهتر است در دور بعدی بیدار باشند تا خطای بازسازی کمینه گردد و همچنین طول عمر شبکه را نیز لحاظ کرده باشند، رابطه‌ی زیر را فرموله و پیشنهاد دادند:

^۱ Cyclic redundancy code

^۲ Acknowledgment

$$\begin{aligned} \min_{\tilde{\Phi}_{i,i}} & Tr \left(\left(\Psi^T \zeta Q^{\frac{1}{2}} \tilde{\Phi} Q^{\frac{1}{2}} \Psi \zeta \right)^{-1} \right) - \beta \sum_{i=1}^n \frac{e_i \tilde{\Phi}_{i,i}}{d_i} \\ s.t. & \tilde{\Phi}_{i,i} \in \{0,1\}, i=1,\dots,n. \\ & Tr(\tilde{\Phi}) = m. \end{aligned} \quad (6)$$

که $\tilde{\Phi}$ یک ماتریس قطری $n \times n$ است و به شکل زیر تعریف می شود:

$$\tilde{\Phi} = \begin{cases} 1.wake \\ 0.sleep \end{cases} \quad (7)$$

که $\tilde{\Phi}$ می تواند به عنوان یک جایگشت سطری از ادغام ماتریس حسگر Φ و یک ماتریس با $n-m$ سطر از صفرها نوشته شود که به صورت زیر است:

$$\tilde{\Phi} = \Pi \begin{bmatrix} \Phi \\ 0_{(n-m) \times n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن Π یک ماتریس جای گشت سطری است و $\tilde{\Phi} = \Phi^T \Phi$ است.

همچنین فرض شده است که سیگنال تخمینی $\hat{y}_i$ که در دور قبل بازسازی شده است، سیگنال داده واقعی است و در بازسازی از آن استفاده شده است.

ماتریس $Q \in \mathbb{R}^{m \times m}$ نیز یک ماتریس قطری با المان های قطری q_i ($i=1,\dots,m$) است که بیانگر احتمال دریافت موفقیت آمیز یک بسته را نشان می دهد.

در [۱۰] و به منظور لحاظ نمودن انرژی باقیمانده ی گره ها و فاصله تا ایستگاه پایه از یک پناستی استفاده شده است که منجر به انتخاب حسگر با انرژی بیشتر، e_i و فاصله ی کمتر، d_i خواهد شد.

مسئله بهینه سازی رابطه ۶، ماتریس انتخاب گرهی را منجر می شود که حد پایین خطای میانگین مربعات را کمینه می کند.

این مسئله ی بهینه سازی، یک مسئله ی غیر محدب است چراکه متغیرهای $\tilde{\Phi}_{i,i}$ اعداد صحیح دودویی هستند و $\binom{n}{m}$ ترکیب مختلف برای یافتن راه حل بهینه وجود دارد و برای شبکه های حسگر با تعداد بسیار زیاد گره، نیاز به جستجوی بسیار زیادی است.

در [۱۰] مسئله را با استفاده از روش رهاسازی محدب و با در نظر گرفتن $0 \leq \tilde{\Phi}_{i,i} \leq 1$ به یک مسئله ی محدب ساده سازی می کند و با به کارگیری روش حل عددی نقطه داخلی^۱ حل می کند. همانطور که پیشتر نیز بیان شد، رهاسازی محدب با ساده کردن مسائل پیچیده به جواب مسئله می رسد که ممکن است بهترین راه حل را برای هر مسئله ای نیابد.

بنابراین، در روش پیشنهادی این مقاله و به منظور یافتن جواب های بهینه تر از الگوریتم ژنتیک برای ساخت $\tilde{\Phi}_{i,i}$ بهره می بریم. کروموزوم ها به صورت دودویی، به طول n و بیانگر قطر ماتریس $\tilde{\Phi}$ هستند. مقدار ۱ در ژن i ام یعنی گره z بیدار است و مقدار ۰ یعنی آن گره در حالت خواب قرار دارد. تابع برازش نیز ۶ است.

پس از اینکه گره های بیدار در دور فعلی مشخص شدند نوبت به یافتن یک مسیر بهینه برای ارسال داده هایشان به ایستگاه پایه می رسد. از آنجایی که در [۱۰] ارسال داده به صورت تک گامی به ایستگاه پایه ارسال می شود مشکلات زیادی برای این روش وجود دارد که قبلتر به آن پرداختیم. همچنین با توجه به این فرض هیچ توجهی به مسئله ی اتصال گره های بیدار به یکدیگر و ایستگاه پایه نشده است.

در روش پیشنهادی پس از اینکه گره های بیدار مشخص شدند باید یک درخت تجميع داده حسگری فشرده برای ارسال داده گره های بیدار به ایستگاه پایه به صورت بهینه ساخته شود. گره های بیدار به عنوان ترمینال بایستی حتماً در درخت قرار بگیرند. اما در اکثر موارد نمی توان تنها با ترمینال ها درخت را ساخت و باید تعدادی گره دیگر نیز در ساخت درخت شرکت کنند. مسئله ساخت درخت مذکور مسئله ساخت درخت اشتاینر است که یک مسئله $NP-Hard$ است.

^۱ Interior-point

برای ساخت درخت از الگوریتم بهینه‌سازی کولونی مورچگان بهره برده‌ایم. در ابتدا در هر ترمینال که باید حتماً به یکدیگر متصل شوند، یک مورچه را قرار می‌دهیم. در هر تکرار، مورچه به یکی از گره‌های حسگر همسایه حرکت می‌کند. انتخاب گره بعدی کاملاً به صورت تصادفی تعیین می‌شود، اما به نحوی که مورچه‌ها به مسیرهای پیموده شده توسط یکدیگر جذب شوند. هر مورچه لیست جداگانه‌ای از گره‌هایی که قبلاً دیده است، را نگه می‌دارد که به آن لیست تابو^۱ می‌گوییم. این لیست برای جلوگیری از ورود مجدد مورچه به گره‌ای است که قبلاً ملاقات کرده‌اند. زمانی که یک مورچه با هر مورچه دیگری یا حتی با مسیر مورچه دیگری برخورد می‌کند، به آن می‌پیوندد تا مسیرهای دنبال شده توسط دو مورچه تشکیل یک زیر درخت مشترک دهند. زمانی که همه مورچه‌ها به ایستگاه پایه برسند یک درخت اشتاینر در هر تکرار توسط مسیرهای آن‌ها ساخته شده است. الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ به صورت شبه کد نشان داده شده است.

```

for each pair  $(i, j) \in V \times V$ , compute  $dist_{i,j}$ 
for  $k = 1$  to  $k_{max}$ 
    initialize:
    initialize  $A$  by placing ants at the nodes in  $T$ .
    for each edge  $(i, j) \in E$ ,  $\tau_{i,j} = \tau_0$ 
    for each ant  $m \in A$ ,  $T^{(m)} = \{ \}$ 
    for each ant  $m \in A$ ,  $S^{(m)} = \{ \}$ 
    while  $|A| > 1$  do
        select an ant  $m \in A$  in node  $i$  (using any rule)
        for each edge  $(i, j) \in E$ , compute  $\eta_{i,j}^{(m)}$ 
        determine next node  $j$  for ant  $m$  (greedily or stochastically)
        update:
         $T^{(m)} = T^{(m)} \cup \{j\}$ 
         $S^{(m)} = S^{(m)} \cup \{(i, j)\}$ 
        if  $\exists m' \in A$  such that  $j \in T^{(m')}$ 
            merge:
             $T^{(m')} = T^{(m')} \cup T^{(m)}$ 
             $S^{(m')} = S^{(m')} \cup S^{(m)}$ 
             $A = A - \{m\}$ 
            if location of  $m' = j$ 
                resolve conflict:
                compute  $N = \{n \in T^{(m')} \mid \exists n' \notin T^{(m')}, (n, n') \in E\}$ 
                for each  $n \in N$ , compute  $\psi_n^{(m')}$ 
                place  $m'$  in node  $n \in N$ 
                so that  $\forall n' \in N, \psi_n^{(m')} \leq \psi_{n'}^{(m')}$ 
            end if
        end if
    end while
    compute  $S = \bigcup_{m \in A} S^{(m)}$ 
    compute  $\Delta \tau = \frac{Q}{cost(S)}$ 
    for each edge  $(i, j) \in E$ , update  $\tau_{i,j}$ 
end for

```

شکل ۲: شبه کد ساخت درخت اشتاینر با الگوریتم مورچگان

Figure 2. Pseudocode for constructing a Steiner tree using the ant algorithm

در این شبه کد V مجموعه‌ای از رأس‌ها (حسگرها) در گراف (شبکه حسگر) و برابر تعداد گره‌های حسگر است. E مجموعه‌ای از یال‌ها در گراف است. هر یال دو گره را به هم متصل می‌کند. تعداد یال‌ها در هر شبیه‌سازی تغییر می‌کند. $dist_{i,j}$ فاصله بین گره‌های i و j است که برای هر زوج از گره‌ها در ابتدای الگوریتم محاسبه می‌شود. K شمارنده حلقه است. k_{max} حداکثر تعداد تکرارها است. A مجموعه‌ای از مورچه‌ها که در الگوریتم استفاده می‌شوند. مورچه‌ها فرایند پیدا کردن درخت اشتاینر کمینه را شبیه‌سازی می‌کنند. در ابتدا، مورچه‌ها در گره‌های درخت T قرار می‌گیرند. $\tau_{i,j}$ سطح فرومون روی یال i و j است. در ابتدا، سطوح فرومون روی همه یال‌ها برابر با صفر است. این پارامتر در طول الگوریتم با عبور مورچه‌ها از یال‌ها به‌روزرسانی می‌شود. T_m درختی که توسط مورچه m در حال ساخت است. در ابتدا، درخت هر مورچه خالی است. S_m مجموعه‌ای از یال‌هایی که توسط مورچه m بازدید شده‌اند. در ابتدا، مجموعه یال‌های هر مورچه خالی است. $\eta_{i,j}(m)$ مقدار مکاشفه برای مورچه m به منظور انتخاب یال i و j برای حرکت به گره بعدی است. $\psi_n(m')$ یک مکاشفه برای حل تعارض است که وقتی چندین مورچه

^۱ Tabu List

می‌خواهند درخت‌های خود را ادغام کنند، استفاده می‌شود. این مکاشفه به مورچه m' کمک می‌کند بهترین گره بعدی n را در صورت وقوع تعارض انتخاب کند. S مجموعه نهایی یال‌های درخت اشتاینر پس از اینکه همه مورچه‌ها مسیر خود را طی کرده و درخت‌ها را ادغام کردند. $cost(S)$ هزینه درخت اشتاینر که توسط مجموعه‌ای از یال‌های S نمایش داده می‌شود و برابر با مجموع وزن‌های یال‌ها در درخت است. Q یک ثابت یا پارامتر که در به‌روزرسانی سطوح فرمون استفاده می‌شود. $\Delta\tau_{i,j}$ مقدار فرمونی که باید بر روی یال i و j ، بر اساس راه‌حل پیدا شده، قرار داده شود. این مقدار در انتهای هر تکرار به‌روزرسانی می‌شود.

مورچه m که در حال حاضر در گره i قرار دارد، گره همسایه j که در لیست گره‌های قبلاً دیده شده، $T^{(m)}$ نیست، را انتخاب می‌کند. این در حالی‌ست که حرکت مورچه‌ها در امتداد آن یال‌هایی‌ست که فرمون $\tau_{(i,j)}$ بیشتری دارند. مورچه‌ها همچنین باید سریعتر به سمت مسیرهایی که توسط مورچه‌های دیگر پیموده شده‌اند، حرکت کنند. این کار به منظور اطمینان از این است که مورچه‌ها به سرعت با یکدیگر ادغام شوند و در نتیجه هزینه درخت اشتاینر ساخته شده کاهش یابد. به این منظور، ما یک پارامتر پتانسیل برای هر گره j ، به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$\Psi_j^{(m)} = \min_k \{dist(j,k)\}. \quad (9)$$

که

$$k \in \bigcup_{m' \neq m} T^{(m')} \quad (10)$$

در اینجا، m' مورچه دیگری است و $dist(j,k)$ کوتاهترین فاصله بین دو گره j و k است. این فاصله به عنوان جمع فواصل تمام یال‌هایی که از j به k منتهی می‌شود، محاسبه می‌شود. کوتاهترین فواصل بین گره‌ها به راحتی با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر بین تمام یال‌های فلویید محاسبه می‌شود.

بنابراین، پتانسیل یک گره، معیار اندازه‌گیری حداقل هزینه ممکن اضافی است که برای اتصال آن با هر یک از درخت‌های جزئی کامل شده موردنیاز است. در این روش سعی می‌شود مورچه‌ها به سمت گره با پتانسیل کمتر حرکت داده شوند، چراکه این گره‌ها نزدیک‌تر به درخت جزئی هستند، اما هزینه واقعی حرکت یک مورچه از مکان حال حاضرش به گره‌های دیگر را نیز باید در نظر گرفت؛ بنابراین با در نظر گرفتن هر دو دیدگاه، ما ترغیب‌پذیری یک گره j برای مورچه m که در حال حاضر در گره i است، به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$\eta_{i,j}^{(m)} = \frac{1}{w(i,j) + \gamma \Psi_j^{(m)}} \quad (11)$$

در معادله فوق، مقدار γ یک ضریب ثابت است. الگوریتم پیشنهادی مورچه‌ها را به سمت انتخاب یال‌های بهینه سوق می‌دهد.

$$w(i,j) \text{ نیز شامل دو پارامتر انرژی باقیمانده‌ی گره } j \text{ و فاصله‌ی گره } i \text{ و } j \text{ به صورت } w(i,j) = \frac{e_j}{d_{ij}} \text{ است.}$$

الگوریتم به طور هم‌زمان سعی می‌کند مورچگان را از طریق مسیرهایی با سطوح بالای فرمون و پتانسیل، هدایت کند. این الگوریتم با در نظر گرفتن هر دو عامل، با اجازه‌دادن به مورچگان، ترجیح می‌دهد که به آن لبه‌ها که ارزش بالاتری از حاصل ضرب فرمون و تمایل دارند، حرکت کنند. احتمال انتخاب گره j از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{i,j} = \frac{[\tau_{i,j}]^\alpha [\eta_{i,j}^{(m)}]^\beta}{\sum_{k \in T^{(m)}} [\tau_{i,k}]^\alpha [\eta_{i,k}^{(m)}]^\beta} \quad (12)$$

مقدار $p_{i,j}$ احتمال انتخاب یال $(i,j) \in E$ را نشان می‌دهد. در معادله فوق مقادیر α و β دو مقداری هستند که در طول الگوریتم ثابت نگه داشته می‌شوند.

به‌روزرسانی فرمون مسیر به این صورت انجام می‌شود. مورچگان با همکاری یکدیگر فرمون مسیر را در امتداد یال‌های آن می‌گذارند که به طور معکوس با هزینه کل درخت مرتبط است. به‌روزرسانی فرمون مسیر در پایان هر آزمایش انجام می‌شود. به‌روزرسانی فرمون طبق فرمول زیر انجام می‌شود:

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\tau_{i,j} + \rho\Delta\tau_{i,j} \quad (13)$$

که p نرخ تبخیر فرمون است و بیانگر میزان سرعت تبخیر فرمون مسیر است. شکل کلی به روزرسانی های تدریجی، توسط معادله زیر ارائه می شود:

$$\Delta \tau_{i,j} = \begin{cases} \frac{Q_i}{w(S_i)} & \text{if } (i,j) \in E_{S_i} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

که $w(S_i)$ هزینه درخت و برابر با مجموع فواصل یال های درخت است. در روش پیشنهادی دو نوع به روزرسانی صورت می پذیرد [۱۹]. در قانون به روزرسانی محلی، درخت اشتاینر S_i که برای تعیین به روزرسانی های تدریجی $\Delta \tau_{i,j}$ استفاده می شود، درختی است که در دور فعلی محاسبه شده است. به عبارت دیگر، به روزرسانی برای حالت $S_i = S_{local}$ انجام می پذیرد. ما مقدار Q را در سطح ثابت Q_{local} نگه می داریم، اما همچنین از به روزرسانی سراسری دورها استفاده می کنیم، جایی که عمل افزایش فقط برای آن یال هایی که بخشی از بهترین درخت اشتاینری است که از ابتدای تکرار تا آخرین دور به دست آمده است، انجام می شود. به عبارت دیگر، به روزرسانی برای حالتی که $S_i = S_{best}$ نیز هست انجام می پذیرد. مقدار Q در این حالت برابر Q_{global} است.

مقدار به روزرسانی که در معادله ۱۴ بیان شده است، رابطه ی معکوس نسبت به هزینه کل درخت اشتاینر بدست آمده دارد. این کار به منظور این است که اجازه داده شود بیشترین فرمون بر روی آن یال هایی که هزینه کمتری دارند، قرار بگیرد. درخت های بهتر فرمون بیشتری را بر روی یال ها قرار می دهند و مورچه های بعدی با احتمال بیشتری این مسیر را دنبال می کنند. از درخت ساخته شده در این مرحله ابتدا برای ارسال بسته های کنترلی به گره هایی که باید در دور مورد نظر مشارکت نمایند استفاده می شود. هر گره که بسته کنترلی را دریافت می کند والد و بچه های خود را در درخت تجمع داده می شناسد و منتظر دریافت آنها می ماند. سپس از همین درخت نیز برای ارسال داده حسگری فشرده خواب توسط گره های بیدار استفاده خواهد شد.

۴- شبیه سازی ها و نتایج

در این بخش، با استفاده از داده های ساختگی نشان می دهیم که روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش ها، عملکرد بهتری از نظر دقت بازسازی سیگنال و طول عمر شبکه دارد. شبیه سازی ها با استفاده از محیط برنامه نویسی متلب انجام شده است. برای ارزیابی مصرف انرژی، مدل ارائه شده در [۲۰] استفاده شده است. رادیوی حسگرها در یکی از چهار حالت زیر است: ارسال، دریافت، گوش دادن (حالت فعال) و خوابیدن.

جدول ۱ مصرف توان هر حالت و زمان مورد نیاز آن را نشان می دهد. فرمول انرژی و توان $\text{Energy} = \text{Power} \times \text{Time}$ است. به عنوان مثال، مقدار انرژی مصرفی برای ارسال یک بسته ی داده به طول L توسط فرستنده بر اساس معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Energy} &= \text{Power} \times \text{Time} \\ \text{Energy} &= P_t \times \text{Time} \\ \text{Energy} &= P_t \times L \times T_B \\ \text{Energy} &= 60 \times 24 \times 0.416 \times 10^{-3} \\ \text{Energy} &= 0.00059904 \text{ J} \cong 599 \mu\text{J} \end{aligned} \quad (15)$$

جدول ۱: پارامترهای و مقادیر آنها در مدل مصرف انرژی مورد استفاده

Discription	Label	Amount
Power consumption in sending mode	P_t	60mW
Energy consumption in receive mode	P_r	45mW
Energy consumption in listening mode	P_l	45mW
Energy consumption in sleep mode	P_s	90μW
Energy consumption of changing state	P_{pc}	5.75μW
Time to receive or send a byte	T_B	0.416*10 ⁻³ S
Time to change status	T_{pc}	3mS

طول تمام بسته‌های داده و بسته‌های کنترلی ۶۴ بیت فرض شده است. از کانال $AWGN$ برای ارسال حسگرها استفاده شده است که منجر به احتمالات مختلف از دست دادن داده می‌شود. ما از بسته‌ی نرم‌افزاری CVX [۲۱] برای بازسازی سیگنال

حسگری فشرده استفاده می‌کنیم. کارآیی بازسازی را با استفاده از خطای نسبی متوسط $\frac{\|x\|_2^2}{\|\hat{x} - x\|_2^2}$ ارزیابی می‌کنیم. طول عمر

شبکه زمانی تعیین می‌شود که اولین حسگر خاموش شود. به منظور ارزیابی کارآیی، روش پیشنهادی را با روش [۵] که تنها از همبستگی فضای بهره می‌برد، روش [۱۰] که هم از همبستگی فضایی و هم زمانی بهره می‌برد و روش پیشنهادی در [۹] که از الگوریتم یادگیری Q بدون مدل برای جستجوی راهبردهای تصمیم‌گیری بهینه استفاده کرده است و همزمان از حسگری فشرده و زمانبندی خواب استفاده می‌کند، مقایسه کردیم.

در شبیه‌سازی‌ها، n گره حسگر بی سیم به طور تصادفی در یک محیط مربعی با ابعاد $d \times d$ پراکنده شده‌اند. شعاع ارتباطی حسگرها R متر در نظر گرفته شده است. ایستگاه پایه نیز در یکی از گوشه‌های محیط به مختصات $(0, 0)$ قرار دارد. انرژی اولیه تمام گره‌های حسگر E_{int} است. سیگنال داده‌ی X به صورت تصادفی با ابعاد n برای لحظات زمانی مختلف تولید می‌شود که در آن s مؤلفه‌ی غیر صفر با یک توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس یک مستقل با توزیع یکسان ($i.i.d$) انتخاب می‌شود. دیکشنری Ψ ابتدا با ایجاد یک ماتریس $n \times n$ با انتخاب‌های $i.i.d$ از یک توزیع گوسی $N(0,1)$ ساخته می‌شود، و سپس ستون‌های Ψ به یک مقیاس واحد نرمالیزه می‌شوند. SNR کانال بی سیم ۲۰ دسی‌بل در نظر گرفته شده است که همراه با نوع مدولاسیون و طول بسته، احتمال از دست رفتن داده را تعیین می‌کند [۲۲].

جدول ۲: پارامترها و مقادیر آنها در شبیه‌سازی شبکه‌ی حسگر

Table 2. Wireless sensor network simulation parameters and their values		
Discription	Parameter	Amount
Number of nodes	n	1000
Communication distance	R	5 meters
Initial energy of nodes	E_{int}	5 Joules
Final energy of nodes	E_{death}	0.1 Joules
Network size	d	100*100 square meters

مقدار $\beta = 10^{-3}$ لحاظ شده است. همچنین، اندازه‌گیری‌های حسگرها با نویز گوسی با میانگین صفر متحمل خطا می‌شوند که منجر به SNR ۲۰ دسی‌بل می‌گردد. همچنین در تمام آزمایشات فرض شده که ۲۰٪ از سیگنال تخمین زده شده نادرست باشد.

در شبیه‌سازی الگوریتم مورچگان جمعیت برابر با ۵۰ و تعداد ۱۰۰ تکرار لحاظ شده است و نیز مقادیر پارامترها برابر است با:

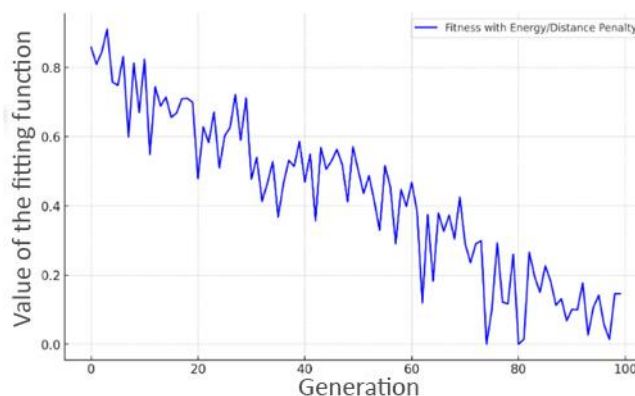
$$\beta = 1.5, \alpha = 1, \lambda = 2, \gamma = 5, \rho = 0.1 \text{ مقدار } Q \text{ به صورت تجربی و با تکرار آزمایشات برابر } 550 \text{ قرار گرفت.}$$

همانطور که پیشتر بیان شد در روش پیشنهادی این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای ساخت بهینه‌ی $\tilde{\Phi}_{i,i}$ استفاده می‌کنیم. طول کروموزوم‌های دودویی برابر $n = 1000$ است و جمعیت کروموزوم‌ها ۵۰ در نظر گرفته شد. از چرخ رولت^۱ جهت انتخاب کروموزوم‌ها با نرخ انتخاب ۰.۸، از برهم‌نهی دو نقطه‌ای^۲ و همچنین نرخ جهش^۳ با مقدار m/n استفاده کردیم. شرط قطع حلقه تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. شکل زیر همگرایی تابع برازش را در نسل‌های مختلف الگوریتم ژنتیک برای $m = 200$ و $s = 100$ نشان می‌دهد.

¹ Roulette Wheel

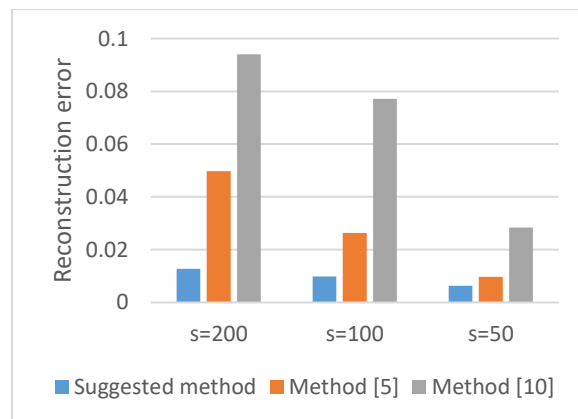
² Two-point crossover

³ Mutation rate



شکل ۳: همگرایی تابع برازش در نسل های مختلف الگوریتم ژنتیک پیشنهادی
Figure 3. Convergence of the fitness function in different generations of the proposed genetic algorithm

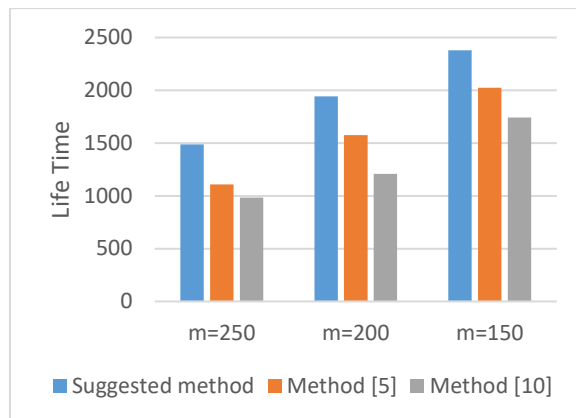
شکل ۴ دقت بازسازی را برای روش پیشنهادی و روش های ارائه شده در [۵] و [۱۰] به ازای s های مختلف نشان می دهد. مقدار $m = 200$ در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود برای تمام روش ها با کاهش مقدار s خطای بازسازی نیز کاهش می یابد. خطای بازسازی در روش پیشنهادی ما از دیگر روش ها کمتر است. روش پیشنهادی در مقایسه با روش [۵] حدود ۴۸٪ بهبود در خطای بازسازی منجر شده است. دلیل کاهش مقدار خطای بازسازی انتخاب گره های مناسب برای ارسال داده در هر دور است در حالیکه انتخاب گره های بیدار در [۵] کاملاً به صورت تصادفی صورت گرفته است. در مقایسه با روش [۱۰]، حدود ۵۹٪ بهبود در خطای بازسازی داریم که دلیل این مقدار کاهش خطای بازسازی، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای یافتن گره های بیدار است. در [۱۰] همانطور که پیشتر گفته شد از بازسازی محدب و با ساده سازی مسئله جواب را پیدا می کند که جواب های روش ژنتیک بهینه تر از روش بازسازی محدب است. روش پیشنهادی [۹] یک روش توزیع شده است و نمی تواند گره های بیدار مناسب که منجر به خطای نسبی کمتری شود را پیدا کند و ماتریس سایه ای را منجر می شود که بهینه نیست. از اینرو خطای بازسازی این روش نیز از روش پیشنهادی ما بیشتر است. الگوریتم پیشنهادی ما حدود ۶۱٪ خطای بازسازی را به نسبت این روش کاهش می دهد.



شکل ۴: خطای بازسازی روش های مختلف به ازای تنگی مختلف
Figure 4. Reconstruction error for different sparsity levels

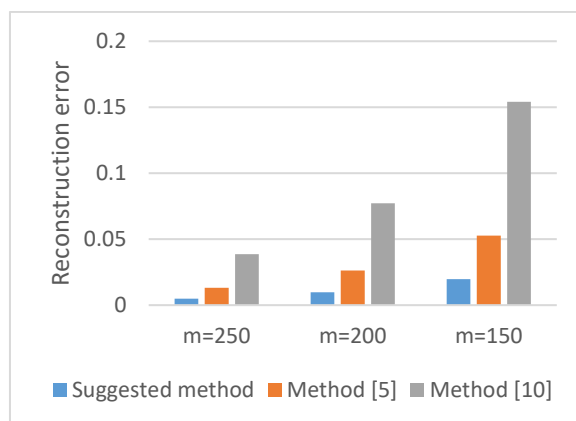
در شکل طول عمر شبکه را برای روش پیشنهادی و همچنین دو روش دیگر مورد ارزیابی قرار داده ایم. مقدار $s = 100$ است. در این شکل طول عمر را به ازای m های مختلف که بیانگر تعداد گره های بیدار در هر دور است مشخص شده است. روش پیشنهادی ما از لحاظ طول عمر از هر دو روش [۵] و [۱۰] عملکرد بهتری دارد. دلیل برتری عملکرد روش پیشنهادی انتخاب هوشمندانه ی گره های بیدار با الگوریتم ژنتیک و با لحاظ کردن انرژی باقیمانده ی حسگرها و همچنین بکارگیری مسیریابی بهینه با بکارگیری الگوریتم مورچگان است.

روش پیشنهادی در [۹] در قیاس با روش ما طول عمر نسبتاً مشابهی دارد. دلیل طول عمر مناسب روش [۹] توزیع‌شده بودن الگوریتم آنها و کاهش سربار ارسال بسته‌های کنترلی است. روش پیشنهادی ما نسبت به روش ارائه شده در [۵] به طور متوسط حدود ۱۸٪، در مقایسه با روش پیشنهادی [۱۰] حدود ۳۲٪ و در قیاس با روش [۹] حدود ۱٪ بهبود طول عمر شبکه را منجر شده است.



شکل ۵: طول عمر شبکه به ازای تعداد گره‌های بیدار
Figure 5. Network lifetime per number of awake nodes

در شکل نیز مقدار خطای بازسازی را برای روش‌های شبیه‌سازی شده به ازای m های مختلف مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. در این آزمایش نیز مقدار $s = 100$ قرار داده‌ایم. در تمام روش‌های مورد ارزیابی با افزایش تعداد گره‌های بیدار در هر دور مقدار خطای بازسازی کاهش می‌یابد. در این شکل نیز به وضوح مشخص است که خطای بازسازی روش پیشنهادی بهتر از دو روش مورد ارزیابی است که دلایل این برتری را پیشتر بیان کردیم.

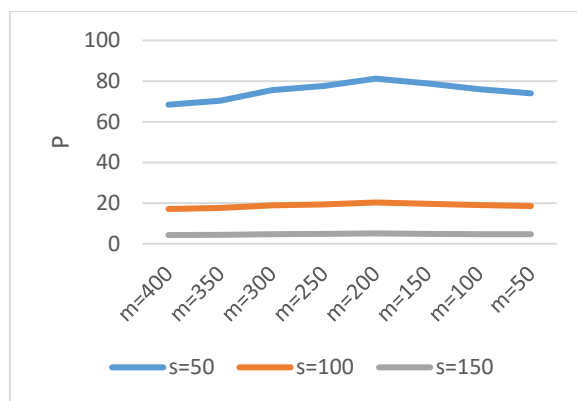


شکل ۶: خطای بازسازی به ازای تعداد گره‌های بیدار
Figure 6. Reconstruction error per number of awake nodes

در شبکه حسگر هم دقت سیگنال داده دریافتی و هم طول عمر مهم است. در شکل هر دو پارامتر طول عمر و خطای بازسازی را به صورت همزمان و به شکل $P = \text{Lifetime}/(\text{error} * 10^4)$ برای m و s های مختلف در روش پیشنهادی مورد بررسی قرار دادیم تا مقدار بهینه m را بدست آوریم.

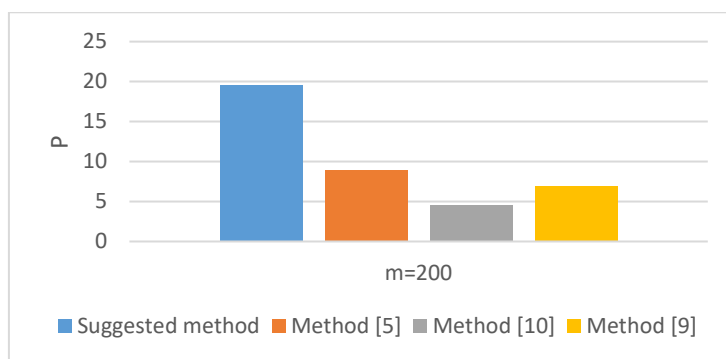
هرچه مقدار m یعنی تعداد گره‌های بیدار در هر مرحله بیشتر باشد خطای بازسازی کمتر است؛ ولی طول عمر شبکه کاهش می‌یابد. مقدار $m = 200$ برای آزمایش صورت گرفته شده تعداد گره‌های بیدار بهینه است.

بعنوان آخرین آزمایش و ارزیابی کارایی کلی هر چهار روش، همزمان هر دو پارامتر طول عمر و خطای بازسازی را در قالب پارامتر $P = \text{Lifetime}/(\text{error} * 10^4)$ بررسی کرده ایم. در این آزمایش مقدار $m = 200$ لحاظ شده است.



شکل ۷: بررسی همزمان طول عمر و دقت به ازای تعداد گره‌های بیدار مختلف

Figure 7. Simultaneous examination of lifetime and accuracy for the number of different awake nodes



شکل ۸: بررسی همزمان طول عمر و دقت روش‌های مورد ارزیابی

Figure 8. Simultaneous examination of the lifetime and accuracy of the evaluated methods

همانطور که از شکل مشخص است با در نظر گرفتن همزمان طول عمر شبکه و خطای بازسازی، روش پیشنهادی ما به نسبت هر سه روش مورد مقایسه عملکرد بهتری دارد. دلایل این برتری در بخش‌های قبل شرح داده شد.

۵- نتیجه‌گیری

به‌منظور افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توان از فشرده‌سازی حسگری فشرده بهره برد. هنگام به‌کارگیری حسگری فشرده برخی گره‌ها در ارسال داده شرکت می‌کنند و برخی دیگر نمی‌کنند. گره‌هایی که در ارسال داده شرکت نمی‌کنند را می‌توان به حالت خواب برد تا در مصرف انرژی آنها صرفه‌جویی شود. انتخاب گره‌های بیدار به‌صورت تصادفی و توزیع شده منجر به خطای بازسازی بیشتر می‌شود؛ بنابراین از روش متمرکز برای انتخاب گره‌ها استفاده کردیم. در روش پیشنهادی با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک گره‌های بیدار دور بعد مشخص شدند. همچنین برای ساخت مسیر بهینه در بین گره‌های بیدار تا ایستگاه پایه از الگوریتم مورچگان بهره بردیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیانگر افزایش طول عمر و کاهش میزان خطای بازسازی به‌واسطه به‌کارگیری روش پیشنهادی بود.

در روش پیشنهادی از یک رابطه برای یافتن گره‌های بیدار استفاده شد. در این رابطه از سیگنال داده دور قبل استفاده می‌شد. در کارهای آینده از یک پیش‌بینی‌کننده بهره خواهیم برد تا با توجه به وجود همبستگی زمانی بین سیگنال‌های داده حسگرها، سیگنال دور بعد را بسازیم و در رابطه قرار دهیم تا گره‌های بیدار بهتری مشخص شوند.

منابع

- [1] G. A. López-Ramírez and A. Aragón-Zavala, "Wireless Sensor Networks for Water Quality Monitoring: A Comprehensive Review," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 95120-95142, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3308905](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308905).

- [2] M. N. Mowla, N. Mowla, A. F. M. S. Shah, K. M. Rabie, and T. Shongwe, "Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 145813-145852, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3346299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299).
- [3] D. R. Zaidan, A. G. Wadday, M. M. Abbood, A. F. Al-Baghdadi, and B. J. Hamza, "Forest fire detection based wireless sensor networks-survey," in *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2776, no. 1: AIP Publishing.
- [4] D. L. Donoho, "Compressed sensing," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April 2006, doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [5] Q. Ling and Z. Tian, "Decentralized Sparse Signal Recovery for Compressive Sleeping Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 7, pp. 3816-3827, July 2010, doi: [10.1109/TSP.2010.2047721](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2047721).
- [6] Wei Chen and I. J. Wassell, "Energy efficient signal acquisition via compressive sensing in wireless sensor networks," *International Symposium on Wireless and Pervasive Computing*, Hong Kong, 2011, pp. 1-6, doi: [10.1109/ISWPC.2011.5751335](https://doi.org/10.1109/ISWPC.2011.5751335).
- [7] C. Caione, D. Brunelli, and L. Benini, "Distributed Compressive Sampling for Lifetime Optimization in Dense Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 30-40, Feb. 2012, doi: [10.1109/TII.2011.2173500](https://doi.org/10.1109/TII.2011.2173500).
- [8] S. Mehrjoo, F. Khunjush, and A. Ghaedi, "Fully distributed sleeping compressive data gathering in wireless sensor networks," *IET Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 830-837, 2020, doi: [10.1049/iet-com.2019.0077](https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.0077).
- [9] X. Wang, H. Chen, and S. Li, "A reinforcement learning-based sleep scheduling algorithm for compressive data gathering in wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2023, no. 1, p. 28, 2023, doi: [10.1186/s13638-023-02237-4](https://doi.org/10.1186/s13638-023-02237-4).
- [10] W. Chen and I. J. Wassell, "Optimized Node Selection for Compressive Sleeping Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 827-836, Feb. 2016, doi: [10.1109/TVT.2015.2400635](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2400635).
- [11] M. Elad, "Optimized Projections for Compressed Sensing," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 12, pp. 5695-5702, Dec. 2007, doi: [10.1109/TSP.2007.900760](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.900760).
- [12] N. Vaswani and W. Lu, "Modified-CS: Modifying Compressive Sensing for Problems With Partially Known Support," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4595-4607, Sept. 2010, doi: [10.1109/TSP.2010.2051150](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2051150).
- [13] W. Lu and N. Vaswani, "Regularized Modified BPDN for Noisy Sparse Reconstruction With Partial Erroneous Support and Signal Value Knowledge," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 1, pp. 182-196, Jan. 2012, doi: [10.1109/TSP.2011.2170981](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2170981).
- [14] G. Quer, R. Masiero, G. Pillonetto, M. Rossi, and M. Zorzi, "Sensing, Compression, and Recovery for WSNs: Sparse Signal Modeling and Monitoring Framework," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 10, pp. 3447-3461, October 2012, doi: [10.1109/TWC.2012.081612.110612](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.081612.110612).
- [15] M. Elad and M. Aharon, "Image Denoising Via Sparse and Redundant Representations Over Learned Dictionaries," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 15, no. 12, pp. 3736-3745, Dec. 2006, doi: [10.1109/TIP.2006.881969](https://doi.org/10.1109/TIP.2006.881969).
- [16] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, "A simple proof of the restricted isometry property for random matrices," *Constructive approximation*, vol. 28, pp. 253-263, 2008, doi: [10.1007/s00365-007-9003-x](https://doi.org/10.1007/s00365-007-9003-x).
- [17] W. H. P. Bodik, C. Guestrin, S. Madden, M. Paskin, and R. Thibaux. Intel lab data [Online] Available: <http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html>

- [18] W. Chen, M. R. D. Rodrigues, and I. J. Wassell, "A Frechet Mean Approach for Compressive Sensing Data Acquisition and Reconstruction in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 10, pp. 3598-3606, October 2012, doi: [10.1109/TWC.2012.081612.111908](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.081612.111908).
- [19] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, Feb. 1996, doi: [10.1109/3477.484436](https://doi.org/10.1109/3477.484436).
- [20] V. Shnayder, M. Hempstead, B.-r. Chen, G. W. Allen and M. Welsh, "Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications," in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 2004, pp. 188-200, doi: [10.1145/1031495.1031518](https://doi.org/10.1145/1031495.1031518).
- [21] M. Grant, S. Boyd, and Y. Ye, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta," ed, 2013.
- [22] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, Higher Education, 2008.

A Review of Event-Triggered Control of Fractional-Order Multi-Agent Systems

Fatemeh Gholami^{1,4}  | Mahnaz Hashemi^{2,4}  | Ghazanfar Shahgholian^{3,4} 

¹Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, gholami_iaun@iau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, mahnazhashemi100@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iau.ac.ir

⁴Smart Microgrid Research Center, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Correspondence

Dr. Mahnaz Hashemi, Associate Professor of Electrical Engineering, Na. C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Email: mahnazhashemi100@iau.ac.ir

Main Subjects:

Trigger event control

Paper History:

Received: 23 April 2025

Revised: 19 May 2025

Accepted: 21 May 2025

Abstract

The application of control theory to fractional-order systems has demonstrated superior performance in aspects such as system stability, observability, and controllability. Although extensive research has been conducted on multi-agent systems based on integer-order dynamics, it has been shown that in certain scenarios, ensuring system stability using integer-order models becomes problematic. In such cases, fractional-order modeling provides a more reliable alternative. This paper presents a comprehensive review of recent advances in event-triggered control strategies for fractional-order multi-agent systems. Event-triggered mechanisms are categorized into static and dynamic schemes, based on the nature of the system's dynamic dependencies. Accordingly, the study focuses on key challenges such as the Zeno phenomenon, performance degradation due to increased triggering thresholds, and communication resource constraints. To address these challenges, dynamic and adaptive event-triggered control mechanisms are proposed and discussed.

Keywords: Event-triggered mechanism, Multi-agent system, Fractional-order system, Event-based control.

Highlights

- A review of event-based control for fractional-order multi-agent systems is presented.
- Types of event-based control in systems are classified according to the nature of dependency.
- The importance of event-based control, especially for multi-agent systems, is examined.

Citation: F. Gholami, M. Hashemi, and G. Shahgholian, "A Review of Event-Triggered Control of Fractional-Order Multi-Agent Systems," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 69-95, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1204784 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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

In previous studies, the design of control algorithms has often been based on the assumption of continuous access to communication resources, so that the optimization of multi-agent systems has mainly focused on reducing tracking error or improving stability. However, recent research shows that in operational environments, especially in large-scale networks with distributed sensors and actuators, the requirements of intelligent management of resources such as bandwidth and energy are as critical as the system dynamics themselves. Control approaches are usually designed based on unlimited communication resources, and therefore the exchange of information in control loops is carried out periodically with the startup time of sensors and actuators. Recently, the investigation of event-based control strategies has been considered due to their potential applications in various fields. In the field of control of multi-agent systems, due to the large number of devices, it is very practical and necessary to make the best use of computational, communication, sampling and data transfer resources or control updates. An event-driven control system is a sampling data system in which sampling times are determined by events generated by the system state. Event-driven control requires sampling based on the minimum requirement to maintain desired control performance. Despite the advantages of event-driven control, implementing event-driven control for systems is not without challenges. Issues such as input saturation, fault occurrence, and controller design complexity can compromise performance and stability [1-7].

2. Innovation and contributions

In this review article, event-based control for fractional-order multi-agent systems is briefly discussed, and the evolutionary path of proposed control approaches in recent years is examined. First, a background of the application of event-based control is presented, and then, in continuation of the review of previous research, event-based approaches in integer-order and fractional-order multi-agent systems are examined. Also, the advantages and disadvantages of the approaches used are stated. In summary, the highlights of this study are:

- An examination of event-based control for fractional-order multi-agent systems is presented.
- Types of event-based control in systems are classified according to the nature of dependency.
- The importance of event-based control, especially for multi-agent systems, is examined.

3. Materials and Methods

Event-based control plays a fundamental role in reducing resource consumption and reducing operator depreciation. Each event structure consists of two parts: an error function and a threshold function. Based on the type of event threshold function, it is classified into two categories: static and dynamic. In terms of the nature of the dependence or non-dependence of the event structure on the system dynamics, event-based control can be classified into two categories: static event-based control and dynamic event-based control [8-13].

Zeno phenomenon is one of the challenges of event-based control. This phenomenon occurs when the system is out of equilibrium and the number of controller updates increases indefinitely. In such a case, an infinite number of events occur in a very short time interval, and in this case, event-based control becomes inefficient. Therefore, during the controller design, it must be proven analytically that Zeno phenomenon does not occur [14-16].

Since most of the studies initially used a fixed event structure, these structures are simple to design but less efficient in dealing with dynamic system changes. On the other hand, with the reduction in resource usage, it is not far from the fact that the overall performance of the control system will decrease to some extent, because less data is transmitted from the controller to the actuator. To address the challenge of reducing system performance with increasing threshold parameter, researchers have been looking for a way to reduce the number of events without sacrificing too much control performance, one solution being to increase the threshold function for the startup condition by adding a non-negative auxiliary dynamic variable. In fact, the difference between static and dynamic event-based control is in the event structure of each. Static event-based control is based on a fixed error threshold or a decreasing exponential function [17-19].

Fractional calculus is a growing research area due to its many applications in various fields of science and engineering. Since the advent of fractional calculus tools, countless literatures have been written, which have also improved the efficiency of control loops due to the improvement of modeling and improving the efficiency of controllers. Due to the high accuracy of fractional-order modeling for systems, many applications of applied systems, such as social networks and a fleet of spacecraft, unmanned underwater vehicles moving in the depths of the sea, and unmanned aircraft flying in dust storms, rain, or snow, can be considered as fractional-order systems. Also, many approaches to control integer-order nonlinear systems have been generalized to fractional-order nonlinear systems [20-23].

Multi-agent systems have attracted the attention of researchers in recent decades due to their wide applications in various sciences including applied mathematics, computer science and engineering. The collaborative control of these systems includes issues such as consensus, orchestration, containment, etc. Multi-agent systems with orchestration mode are systems in which agents are organized in a structured manner to achieve common goals. This configuration can be fixed or variable. Containment also means the control or restriction of agents by several leader agents to prevent undesirable and inconsistent behaviors. Consensus is also one of the important and vital

areas in the collaborative control of multi-agent systems, which is achieved when the follower agents agree on a common desired point by following the control rules and communicating with their neighbors. Leader-controlled consensus and leaderless consensus are two distinct approaches to achieving group consensus [24-32].

In recent years, the distributed event-based control approach for fractional-order multi-agent systems has attracted much attention from researchers and scholars in the control community due to its various advantages compared to the conventional time-based approach. Due to some limitations and technical challenges in controller design and stability analysis in fractional-order systems, the extension of event-based control protocols from integer-order multi-agent systems to fractional-order multi-agent systems has been slow, and very few research results have been reported in this field so far.

4. Results and Discussion

Despite the significant growth of research in the field of event-based control, this approach still faces several fundamental challenges, which prevent its widespread and practical implementation in industrial and complex applications. The most important of these challenges are the lack of a comprehensive theoretical framework for analyzing stability and efficiency, especially in distributed nonlinear fractional-order multi-agent systems, with guaranteed stability in the presence of delay and noise, prevention of Zeno behavior, robust designs, and the lack of experimental results and key practical challenges such as time delays and operator defects remain as major obstacles. On the other hand, the lack of practical experiments and experimental results and practical scenarios indicate a significant gap between theory and application. These challenges indicate that despite theoretical advances, the field for further research towards the practical realization of this approach is still vast and vital.

In summary, the research path based on the existing challenges can be stated as follows:

- Development of dynamic event-based methods for complex fractional-order systems
- Designs resistant to time delays and operator defects
- Development of frameworks that can be implemented in industry
- Increasing real-world experiences and practical tests to prove theoretical benefits in industrial conditions

5. Conclusion

By reviewing the research background in the field of event-based control of fractional-order multi-agent systems, it is observed that most of the existing studies have focused on simple linear or nonlinear systems, therefore, the design of event-based controllers for complex fractional-order nonlinear multi-agent systems can be investigated. Another limitation in previous research is the use of static event structures in most cases, which leads to unnecessary updates, and another gap in this regard is the lack of investigation of the effect of hardware defects such as locking defects or loss of efficiency defects in operators on the stability of fractional-order multi-agent systems has rarely been analyzed. Therefore, the investigation of dynamic event-based control for fractional-order multi-agent systems in the presence of operator defects can be considered. According to the research conducted, the application of dynamic event-based methods in fractional-order systems with complex structures, the expansion of implementation in industry, and robust design can be mentioned as challenges and future research directions.

6. Acknowledgement

This paper is an extract from a doctoral dissertation at the Islamic Azad University, Najafabad Branch. The authors would like to express their gratitude to the respected colleagues of the journal and the respected reviewers. They would also like to express their gratitude to the respected colleagues in the Research and Technology Department of the Najafabad Branch.

References

- [1] M. Parsa and M. Danesh, "Robust containment control of uncertain multi-agent systems with time-delay and heterogeneous lipschitz nonlinearity", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 4, pp. 2312-2321, April 2021, doi: 10.1109/TSMC.2019.2912268.
- [2] F. Gholami, M. Hashemi and G. Shahgholian, "Actuator fault event-triggered compensation for multiagent fractional-order nonlinear systems", *Signal Processing and Renewable Energy*, vol. 9, no. 1, Article Number: 092503, March 2025, doi: 10.57647/j.spre.2025.0901.03.
- [3] M. Chafii, S. Naoumi, R. Alami, E. Almazrouei, M. Bennis and M. Debbah, "Emergent communication in multi-agent reinforcement learning for future wireless networks", *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 18-24, Dec. 2023, doi: 10.1109/IOTM.001.2300102.

- [4] J. Chai, P. Casau and R.G. Sanfelice, "Analysis and design of event-triggered control algorithms using hybrid systems tools", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 30, no. 15, pp.5936-5965, Oct. 2020, doi: 10.1002/rnc.5141.
- [5] S.K. Mishra, A.V. Jha, V.K. Verma, B. Appasani, A.Y. Abdelaziz and N. Bizon, "An optimized triggering algorithm for event-triggered control of networked control systems", *Mathematics*, vol. 9, no. 11, Article Number: 1262, May 2021, doi: 10.3390/math9111262.
- [6] F. Mohammadzamani, M. Hashemi and G. Shahgholian, "Adaptive neural control of non-linear fractional order multi-agent systems in the presence of error constraints and input saturation", *IET Control Theory and Applications*, vol. 16, no. 13, pp. 1283-1298, Sept. 2022, doi: 10.1049/cth2.12291.
- [7] X. Meng, B. Jiang, H.R. Karimi and C. Gao, "Leader–follower sliding mode formation control of fractional-order multi-agent systems: A dynamic event-triggered mechanism", *Neurocomputing*, vol. 557, pp. 126691, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.neucom.2023.126691.
- [8] D.N.M. Abadi, A. Moarefianpour and N.M. Dehkordi, "Finite-time bounded model-based event-triggered control for distributed fuzzy T-S systems", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, March 2024, doi: 10.30486/mjee.2023.1994207.1226.
- [9] J. Yang, Q. Zhong, X. Liu, K. Shi, A.M.Y.M. Ghias and Z.Y. Dong, "Decentralized periodic event-triggered load frequency control for multiarea power systems", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 55, no. 2, pp. 1020-1030, Feb. 2025, doi: 10.1109/TSMC.2024.3493102.
- [10] D. Huong, T. Van and T. Hieu, "On static and dynamic triggered mechanisms for event-triggered control of uncertain systems", *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 39, no. 10, pp. 5020-5038, Oct. 2020, doi: 10.1007/s00034-020-01399-6.
- [11] A. Yesmin, A.K. Behera, M.K. Bera and B. Bandyopadhyay, "Dynamic event-triggering based design of sliding mode control", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 31, no. 12, pp. 5910-5925, Aug. 2021, doi: 10.1002/rnc.5604.
- [12] J. Chen, D. Yue, C. Dou, S. Weng, X. Xie, Y. Li and G. P.Hancke, "Static and dynamic event-triggered mechanisms for distributed secondary control of inverters in low-voltage islanded microgrids", *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. 52, no. 7, pp. 6925-6938, Dec. 2020, doi: 10.1109/TCYB.2020.3034727.
- [13] S. Shi, S. Miyata and Y. Akashi, "Event-driven model-based optimal demand-controlled ventilation for multizone VAV systems: Enhancing energy efficiency and indoor environmental quality", *Applied Energy*, vol. 377, Article Number: 124683, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124683.
- [14] M. Saghafi-Zanjani nad S. Mobayen, "Event-triggered global sliding mode controller design for anti-sway control of offshore container cranes", *Ocean Engineering*, vol. 268, Article Number: 113472, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113472.
- [15] A.T. Nguyen, T.B. Nguyen and S.K. Hong, "Dynamic event-triggered time-varying formation control of second-order dynamic agents: application to multiple quadcopters systems", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, Article Number: 2814, April 2020, doi: 10.3390/app10082814.
- [16] S. Koga, C. Demir and M. Krstic, "Event-triggered safe stabilizing boundary control for the Stefan PDE system with actuator dynamics", *Proceeding of the IEEE/ACC*, pp. 1794-1799, San Diego, CA, USA, May 2023, doi: 10.23919/ACC55779.2023.10156551 IEEE.
- [17] A. Girard, "Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 60, no. 7, pp. 1992–1997, Nov. 2014, doi: 10.1109/TAC.2014.2366855.
- [18] S. Hu, Y. Dong, X. Yu, X. Xiangpeng and M. Yong, "Adaptive event-triggered control for nonlinear discrete-time systems", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 26, no. 18, pp. 4104–4125, Dec. 2016, doi: 10.1002/rnc.3550.

- [19] W. Du, X. Yi, J. George, K.H. Johansson and T. Yang, "Distributed optimization with dynamic event-triggered mechanisms", *Proceedings of the IEEE/CDC*, pp. 969–974, Miami, FL, USA, Jan. 2019, doi: 10.1109/CDC.2018.8619311.
- [20] Y. Zhan, S. Sui and S. Tong, "Adaptive fuzzy decentralized dynamic surface control for fractional-order nonlinear large-scale systems", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 30, pp. 3373–3383, Sep. 2021, doi: 10.1109/TFUZZ.2021.3114746.
- [21] A.B. Albidah, "Application of riemann–liouville derivatives on second-order fractional differential equations: The exact solution. fractal and fractional", vol. 7, no. 12, Article Number: 843, Nov. 2023, doi: 10.3390/fractalfract7120843.
- [22] A. Naderolasli, M. Hashemi and K.H. Shojaei, "Approximation-based adaptive fault compensation backstepping control of fractional-order nonlinear systems: an output-feedback scheme", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 34, no. 3, pp. 298–313, Mar. 2020, doi: 10.1002/acs.3084.
- [23] R. Kavikumar, O.M. Kwon, S.H. Lee and R. Sakthivel, "Input-output finite-time IT2 fuzzy dynamic sliding mode control for fractional-order nonlinear systems", *Nonlinear Dyn.*, vol. 108, no. 4, pp. 3745–3760, June 2022, doi: 10.1007/s11071-022-07442-2.
- [24] X. Dong, B. Yu, Z. Shi and Y. Zhong, "Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 340–348, Apr. 2014, doi: 10.1109/TCST.2014.2314460.
- [25] B. Wang and A. Loria, "Leader-follower formation and tracking control of underactuated surface vessels", *arXiv preprint arXiv:2407.18844*, Jul. 2024 doi: 10.48550/arXiv.2407.18844.
- [26] J. Sui, C. Liu, B. Niu, X. Zhao, D. Wang and B. Yan, "Prescribed performance adaptive containment control for full-state constrained nonlinear multiagent systems: A disturbance observer-based design strategy", *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, vol. 22, pp. 179–190, June 2024, doi: 10.1109/TASE.2023.3348978.
- [27] T. Balch and R.C. Arkin, "Behavior-Based Formation Control for Multi-Robot Teams", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926–939, Dec. 1998, doi: 10.1109/70.736776.
- [28] M.A. Lewis and K.H. Tan, "High precision formation control of mobile robots using virtual structures", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 1, pp. 113–125, Feb. 2002, doi: 10.1109/70.988979.
- [29] Z. Li, Z. Duan, W. Ren and G. Feng, "Containment control of linear multi-agent systems with multiple leaders of bounded inputs using distributed continuous controllers", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 25, no. 13, pp. 2101–2121, Sep. 2015, doi: 10.1002/rnc.3195.
- [30] P. Ali, M. Rehan, W. Ahmed, A. Basit and I. Ahmed., "A novel output feedback consensus control approach for generic linear multi-agent systems under input saturation over a directed graph topology", *ISA Transactions*, vol. 148, pp. 128–139, May 2024, doi: 10.1016/j.isatra.2024.02.029.
- [31] F. Muñoz, "Leader–follower consensus control for a class of nonlinear multi-agent systems using dynamical neural networks", *Neurocomputing*, vol. 561, pp. 126888, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.neucom.2023.126888.
- [32] J. Huang, W. Wang, C. Wen, J. Zhou and G. Li, "Distributed adaptive leader–follower and leaderless consensus control of a class of strict-feedback nonlinear systems: A unified approach", *Automatica*, vol. 118, Article Number: 109021 Aug. 2020, doi: 10.1016/j.automatica.2020.109021.

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

Author Contributions: **Fatemeh Gholami:** Methodology, researcher, writing original draft preparation; **Mahnaz Hashemi:** Thesis supervisor, methodology, manuscript editing; **Ghazanfar Shahgholian:** Thesis advisor, 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.

مروری بر کنترل مبتنی به رویداد سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری

فاطمه غلامی^{۱*} | مهناز هاشمی^۲ | غضنفر شاهقلیان^۳ 

چکیده:

سیستم‌های مرتبه کسری با استفاده از معادلات دیفرانسیل کسری (دارای مشتقات غیر صحیح) برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده به کار می‌روند. همچنین، کاربرد تئوری کنترل در سیستم‌های مرتبه کسری در زمینه‌هایی مانند پایداری، ریت‌پذیری و کنترل‌پذیری سیستم‌ها عملکرد بهتری نشان داده است. تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه سیستم‌های چندعاملی مبتنی بر سیستم‌های مرتبه صحیح ارائه شده است که در حالت‌های خاصی نشان داده شده که پایداری سیستم بر اساس این مدل‌های مرتبه صحیح، دچار مشکل می‌شود. بنابراین در این حالت‌های خاص از راه‌حل سیستم‌های مرتبه کسری استفاده می‌شود. در این مقاله مروری بر پیشرفت‌های انجام شده در حوزه کنترل مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری پرداخته شده است. ساختارهای مبتنی بر رویداد بر اساس ماهیت وابستگی دینامیکی سیستم، به کنترل مبتنی بر رویداد استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. لذا به‌طور کلی با تمرکز بر چالش‌های کلیدی مانند پدیده زنو، کاهش عملکرد سیستم با افزایش آستانه و محدودیت‌های منابع ارتباطی، راه‌کارهایی شامل ساختار-های دینامیکی و تطبیقی ارائه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ساختار محرک رویداد، سیستم چندعاملی، سیستم مرتبه کسری، کنترل مبتنی به رویداد

^۱ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

gholami_iaun@iau.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

mahnazhashemi100@iau.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

shahgholian@iau.ac.ir

^۴ مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

نویسنده مسئول:

* دکتر مهناز هاشمی، دانشیار، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد

اسلامی، نجف‌آباد، ایران

mahnazhashemi100@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

کنترل رویداد تحریک

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۳ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

تازه‌های تحقیق:

- بررسی کنترل رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری ارائه شده است.
- از نظر ماهیت وابستگی انواع کنترل مبتنی رویداد در سیستم‌ها تقسیم‌بندی شده است.
- اهمیت کنترل مبتنی بر رویداد به‌ویژه برای سیستم‌های چندعاملی بررسی شده است.

COPYRIGHTS

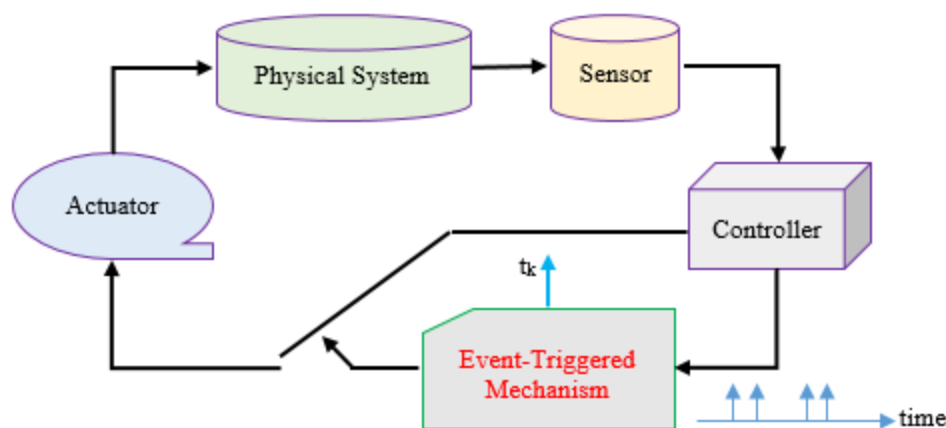
©2026 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



۱-مقدمه

در مطالعات پیشین، طراحی الگوریتم‌های کنترل اغلب بر مبنای فرض دسترسی پیوسته به منابع ارتباطی صورت گرفته است، به‌طوری‌که بهینه‌سازی سیستم‌های چندعاملی عمدتاً بر کاهش خطای ردیابی یا بهبود پایداری متمرکز بوده است [۱،۲]. بااین‌حال، پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که در محیط‌های عملیاتی به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ مقیاس با حسگرها و عملگرهای توزیع‌شده الزامات مدیریت هوشمند منابع مانند پهنای باند و انرژی، به‌اندازه خود دینامیک سیستم حیاتی است [۳،۴]. این تحول، محققان را به بازتعریف چارچوب‌های کنترل سوق داده است، به‌گونه‌ای که نمونه‌برداری و ارسال داده تنها در لحظات ضروری بر اساس تغییرات معنادار در وضعیت سیستم انجام می‌شود. در واقع رویکردهای کنترل معمولاً بر اساس منابع ارتباطی نامحدود طراحی شده است و لذا تبادل اطلاعات در حلقه‌های کنترل با زمان راه‌اندازی حسگرها و عملگرها به‌صورت دوره‌ای انجام می‌گیرد [۵،۶]. بااین‌حال، در سیستم‌های کنترل، محاسبات و منابع ارتباطی محدود هستند. اخیراً بررسی استراتژی‌های کنترل مبتنی بر رویداد به دلیل کاربردهای بالقوه آن‌ها در حوزه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است [۷،۸]. در حوزه کنترل سیستم‌های چندعاملی نیز با توجه به تعداد بالای تجهیزات، برای استفاده هرچه بهتر از منابع محاسباتی، ارتباطی، نمونه‌برداری و انتقال داده یا به‌روزرسانی‌های کنترل، امری بسیار کاربردی و ضروری است [۹،۱۰]. سیستم کنترل مبتنی بر رویداد، یک سیستم داده نمونه‌گیری است که در آن لحظه‌های زمان نمونه‌برداری با استفاده از رویدادهای ایجادشده توسط حالت سیستم تعیین می‌شوند. کنترل مبتنی بر رویداد، به نمونه‌برداری بر اساس حداقل نیاز برای حفظ عملکرد کنترل مطلوب نیاز دارد [۱۱،۱۲]. علیرغم مزایای کنترل رویداد، پیاده‌سازی کنترل رویداد محور برای سیستم‌ها، بدون چالش نیست. مسائلی مانند اشباع ورودی، رخ دادن عیب‌ها و پیچیدگی طراحی کنترل‌کننده می‌تواند عملکرد و پایداری را مختل کند [۱۳،۱۴]. از سال‌های قبل دیدگاه‌های مبتنی بر رویداد مورد توجه محققان قرار گرفته است و مطالعاتی مقایسه‌ای بین رویکردهای مبتنی بر زمان و مبتنی بر رویداد انجام شده است [۱۵،۱۶]، که می‌توان به طراحی کنترل مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های تصادفی مرتبه یک [۱۷]، طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر رویداد و معرفی ساختار تشخیص وقوع رویداد [۱۸]، مقایسه‌ای بین نمونه‌گیری دوره‌ای و مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های تصادفی مرتبه اول [۱۹] اشاره نمود. این در حالی است که متأسفانه، رویکرد کنترلی کلاسیک با تحریک زمان فعال‌سازی به‌صورت دوره‌ای در زمان و بدون توجه به وضعیت سیستم است، نه زمانی که سیستم نیاز دارد. کنترل مبتنی بر رویداد یک استراتژی کنترل رایانه‌ای است که تنها زمانی که سیستم نیاز داشته باشد، مقدار کنترل را بروز می‌کند و درعین‌حال پایداری و عملکرد را حفظ می‌کند. این یک رویکرد پیشرفته برای مدیریت سیستم‌ها است که بر اساس رویداد عمل می‌کند [۲۰،۲۱]. در دیدگاه کنترل مبتنی بر رویداد در هر زمان نمونه‌برداری یک شرط آستانه به نام ساختار تشخیص وقوع رویداد، در مورد به‌روزرسانی سیگنال کنترل تصمیم‌گیری می‌کند [۲۲،۲۳]. به‌عنوان نمونه می‌توان به طراحی کنترل مبتنی بر رویداد با رویکرد کنترلی تناسبی، مشتق‌گیر، انتگرالی که جزء اولین پژوهش‌ها در زمینه رویداد [۲۴] انجام شده، اشاره نمود. به‌طور خاص، در رویکرد کنترل مبتنی بر رویداد هر چه آستانه ساختار رویداد بزرگ‌تر باشد، تعداد رویدادها کمتر می‌شود [۲۵،۲۶]. با کمتر شدن تعداد رویدادها، منابع ارتباطی کمتری مصرف می‌گردد، بااین‌حال رویکرد رویداد تحریک در حین طراحی با چالش‌هایی روبرو می‌گردد. نمودار بلوکی کنترل مبتنی بر رویداد در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن ساختار تشخیص رویداد در هر لحظه تصمیم‌گیری می‌کند که چه موقع سیگنال کنترل به‌روزرسانی شده به عملگر اعمال گردد. در این مقاله مروری، مختصری به کنترل مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری پرداخته می‌شود و مسیر تکاملی رویکردهای کنترلی پیشنهادی در سال‌های اخیر بررسی شده است. در ابتدا پیشینه‌ای از به‌کارگیری کنترل مبتنی بر رویداد ارائه می‌شود و سپس در ادامه بررسی تحقیقات پیشین، رویکردهای مبتنی بر رویداد در سیستم‌های چندعاملی مرتبه صحیح و مرتبه کسری بررسی شده است. همچنین مزایا و معایب رویکردهای به‌کار گرفته شده بیان شده است. به‌طور خلاصه نکات برجسته این مطالعه عبارت‌اند از:

- بررسی کنترل رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری ارائه شده است.
- از نظر ماهیت وابستگی انواع کنترل مبتنی رویداد در سیستم‌ها تقسیم‌بندی شده است.
- اهمیت کنترل مبتنی بر رویداد به‌ویژه برای سیستم‌های چندعاملی بررسی شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم کنترل مبتنی بر رویداد
Figure 1. Block diagram of event-based control system

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است: در قسمت دوم به انواع کنترل مبتنی بر رویداد در سیستم‌ها و تقسیم‌بندی آن بر اساس تابع آستانه اشاره می‌شود. در قسمت سوم یکی از چالش‌های کنترل مبتنی بر رویداد به نام پدیده زنو توضیح داده شده است. در قسمت چهارم تأثیر افزایش پارامتر آستانه بر کاهش عملکرد سیستم بررسی شده است. سیستم‌های مرتبه کسری و سیستم‌های چندعاملی به ترتیب در قسمت‌های پنجم و ششم اشاره شده‌اند. در قسمت هفتم به چالش‌ها و ادامه تحقیقات اشاره شده است. در نهایت در قسمت هشتم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- انواع کنترل مبتنی بر رویداد در سیستم‌ها

کنترل مبتنی بر رویداد نقش اساسی در کاهش مصرف منابع و کاهش استهلاک عملگرها دارد [۲۷، ۲۸]. هر ساختار رویداد شامل دو قسمت تابع خطا و تابع آستانه است و رابطه آن (تعیین زمان نمونه‌برداری بعدی) به صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$t^{k+1} = \inf \{t > t^k : G(.) \geq F(.)\}, t \in [t^k, t^{k+1}) \quad (1)$$

که $G(.)$ تابع خطا یعنی انحراف بین آخرین حالت نمونه‌برداری شده و حالت فعلی است و $F(.)$ تابع آستانه است که بر اساس نوع تابع آستانه رویداد به دو دسته استاتیک و دینامیک دسته‌بندی می‌شود. از نظر ماهیت وابستگی یا عدم وابستگی ساختار رویداد به دینامیک سیستم می‌توان کنترل مبتنی بر رویداد را به دو دسته کنترل مبتنی بر رویداد استاتیک و کنترل مبتنی بر رویداد دینامیک دسته‌بندی کرد [۲۹، ۳۰]. همچنین $\inf$ این مجموعه به معنای کوچک‌ترین کران پایین این مجموعه است.

نحوه تنظیم آستانه رویداد یکی از جنبه‌های مهم این کنترل است که تعیین می‌کند چه زمانی به‌روزرسانی‌های کنترلی انجام شوند. انتخاب نوع آستانه در طراحی این سیستم‌ها تأثیر قابل توجهی دارد. این انتخاب بر کارایی، پایداری و مصرف انرژی سیستم مؤثر است. زمانی که تابع آستانه به صورت کلی زیر تعریف شود، ساختار رویداد طراحی شده استاتیک است، که در آن پارامتر ثابت طراحی است که با افزایش مقدار η مقدار تابع آستانه افزایش یافته و در نتیجه شرط رویداد دیرتر برقرار می‌شود، بنابراین تعداد رویدادها کاهش می‌یابد ولی این موضوع می‌تواند باعث افت عملکرد کنترل نیز شود.

$$\begin{cases} t^{k+1} = \inf \{t > t^k : G(.) \geq F(.)\} \\ F(.) = \eta \end{cases} \quad t \in [t^k, t^{k+1}) \quad (2)$$

با طراحی مناسب شرایط راه‌اندازی، بدیهی است که لحظه‌ها را می‌توان تنها زمانی فراخوانی کرد که داده‌ها واقعاً برای نمونه‌برداری و اطمینان از پایداری مورد نیاز باشد، که در نتیجه منجر به یک کاهش محسوس منابع محاسباتی و ارتباطی می‌شود. تابع آستانه $F(.)$ مستقیماً فرکانس رویدادها را محاسبه می‌کند. در کنترل مبتنی بر رویداد استاتیک، ساختار فعال‌سازی رویداد معمولاً بر پایه آستانه ثابت و از پیش تعیین‌شده تعریف می‌شوند که مستقل از تغییرات پویای سیستم هستند [۳۱، ۳۲]. این روش‌ها با وجود سادگی در پیاده‌سازی ممکن است در محیط‌های پویا یا تحت اغتشاشات، به دلیل ناتوانی در تطبیق با شرایط

متغیر، منجر به نمونه برداری بیش از حد و در نتیجه ناپایداری شوند. در بسیاری از مطالعات به جای تابع آستانه از یک تابع نمایی کاهشی که مقدار آستانه با گذر زمان کاهش می یابد به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۳۳]:

$$\delta(t) = \delta_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

که δ_0 مقدار اولیه آستانه و λ نرخ کاهش آن است. در نتیجه مقدار آستانه با گذر زمان کاهش می یابد و به روزرسانی های کنترلر بیشتر اتفاق می افتد. این روش به سیستم امکان می دهد که در ابتدا تعداد رویدادها کم باشد، اما به مرور حساسیت به تغییرات افزایش یابد. باین حال، زمانی که سیستم به حالت پایدار نزدیک می شود، کاهش آستانه ممکن است باعث به روزرسانی های بی مورد و افزایش بار پردازشی شود. در واقع توابع نمایی صرفاً بر اساس زمان تغییر می کنند و لزوماً با وضعیت فعلی سیستم مانند اندازه خطا یا سرعت تغییرات آن سازگار نیستند و در سیستم های با دینامیک پیچیده یا غیرخطی، ممکن است آستانه نمایی نتواند به طور بهینه با رفتار سیستم هماهنگ شود. همچنین هنگامی که آستانه نمایی به مقدار بسیار کمی می رسد، کوچک ترین نوسان ها در خطا ممکن است باعث فعال سازی مکرر رویدادها شود که می تواند منجر به افزایش مصرف منابع محاسباتی و ارتباطی و سایش اجزای مکانیکی در سیستم های فیزیکی شود، بنابراین سیستم هایی که با آستانه ثابت مانند آستانه هایی که توابع آن ها به اطلاعات سیستم (حالت و خروجی) و یا توابع زمانی (مانند تابع نمایی) وابسته است، گزینه خیلی مناسبی برای آستانه تشخیص رویداد نیستند و رویکردهای دینامیکی می تواند جایگزین خوبی باشد. ساختارهای رویداد دینامیک به عنوان ساختارهایی طبقه بندی می شوند که توابع آستانه آن ها نه تنها شامل اطلاعات سیستم یا اطلاعات زمانی است، بلکه شامل برخی متغیرهای کمکی یا پارامترهای دینامیک با دینامیک خاص خود نیز است [۳۴، ۳۵]. ساختارهای رویداد دینامیک با استفاده از متغیرهای وابسته به حالت سیستم مانند خطا و قوانین تطبیقی مانند آستانه های متغیر به صورت دینامیک بهینه سازی می شوند. این ساختارها که عمدتاً بر پایه تئوری پایداری لیاپانوف طراحی می شوند، قابلیت حفظ تعادل میان کارایی کنترل و مصرف منابع را در سیستم های غیرخطی را فراهم می کنند [۳۶]. زمانی که تابع آستانه به صورت زیر تعریف شود، ساختار رویداد طراحی شده یک ساختار رویداد دینامیک است، که در آن $m(t)$ متغیر دینامیکی و η پارامتر مثبت طراحی هستند.

$$\begin{cases} t^{k+1} = \inf \{ t > t^k : G(.) \geq F(.) \}, \\ F(.) = G(e(t)) + m(t) & t \in [t^k, t^{k+1}) \\ \dot{m}(t) = F(.) - \eta * m(t) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن $e(t)$ انحراف بین آخرین حالت نمونه برداری شده و حالت فعلی است. استفاده از متغیر دینامیک در تابع آستانه ساختار رویداد باعث افزایش انعطاف پذیری ساختار کنترل در مواجهه با دینامیک های متغیر سیستم می گردد. برخلاف آستانه های استاتیک که مقدار آن ها ثابت یا صرفاً تابع زمان است، آستانه های دینامیکی با بهره گیری از متغیرهای وابسته به وضعیت سیستم (مانند خطا یا مشتق آن) و ترکیب با پارامترهای تطبیقی، به صورت بلادرنگ با شرایط عملیاتی سازگار می شوند. این ویژگی باعث کاهش تعداد رویدادهای غیرضروری، بهبود بهره وری منابع محاسباتی و ارتباطی، و نیز حفظ کارایی سیستم کنترل در شرایط غیرخطی یا دارای اغتشاش می شود. همچنین استفاده از ساختارهای دینامیکی امکان تضمین بهتر پایداری سیستم و اجتناب مؤثر از پدیده زنو را فراهم می سازد.

۳- پدیده زنو

پدیده زنو یکی از چالش های کنترل مبتنی بر رویداد است. این پدیده زمانی رخ می دهد که سیستم از حالت تعادل خارج شود و تعداد به روزرسانی کنترل کننده به طور نامحدود افزایش یابد. در چنین حالتی، بی نهایت رویداد در بازه زمانی بسیار کوتاه رخ می دهد و در این حالت کنترل مبتنی بر رویداد ناکارآمد می گردد [۳۷، ۳۸]. بنابراین در طول طراحی کنترل کننده باید به صورت تحلیلی اثبات گردد که پدیده زنو رخ نمی دهد. برای اثبات تحلیلی عدم وقوع پدیده زنو نیاز است که در طول طراحی ثابت شود که بین رخداد های متوالی حداقل فاصله زمانی مثبت وجود دارد و یا به عبارت دیگر رابطه زیر برقرار است:

$$t_{k+1}^i - t_k^i \geq \tau \quad (5)$$

این نابرابری نشان می‌دهد هیچ دو رویدادی نمی‌توانند نزدیک‌تر از τ به هم رخ دهد که در این صورت تضمین می‌شود، رویدادها با فاصله زمانی کافی از هم رخ می‌دهند و در هر بازه زمانی $(0, T)$ تعداد رویدادها از T/τ تجاوز نمی‌کند که یک عدد متناهی است.

راه کارهای مقابله با چالش پدیده زنو به‌طور مختصر در زیر اشاره شده است.

- زمان سکون^۱: سیستم پس از هر رویداد، برای مدتی غیرفعال می‌ماند، حتی اگر شرایط رویداد جدیدی برقرار شود [۳۹].
- هیستریزیس^۲: افزودن یک ناحیه بی‌اثر^۳ به شرایط رویداد به‌طوری‌که اگر رویداد هنگام عبور خطا از آستانه تعیین شده خارج شود، هیستریزیس شرطی اضافه می‌کند که خطا باید به زیر مقدار تعیین شده باز گردد تا رویداد بعدی فعال شود که از نوسان سریع حول آستانه جلوگیری می‌کند و رویدادها را کاهش می‌دهد [۴۰].
- آستانه‌های تطبیقی^۴: آستانه رویداد بر اساس وضعیت سیستم تعیین می‌گردد و در حین حرکت به سمت تعادل، آستانه به تدریج افزایش می‌یابد تا از رویدادهای غیرضروری جلوگیری شود [۴۱].
- روش‌های مبتنی بر تابع لیاپانوف^۵: طراحی شرایط رویداد به‌گونه‌ای که تابع لیاپانوف در هر رویداد به اندازه کافی کاهش یابد و با تضمین کاهش متناهی تابع لیاپانوف، تعداد رویدادها قبل از رسیدن به پایداری محدود می‌شود [۴۲، ۴۳].
- تحلیل ریاضی: اثبات کران پایین برای زمان بین رویدادها بر اساس پارامترهای سیستم [۴۴].
- ترکیب زمان و رویداد^۶: استفاده هم‌زمان از ساختارهای مبتنی بر زمان و مبتنی بر رویداد یعنی سیستم در بازه‌های زمانی ثابت بررسی می‌شود، اما تنها در صورت برقراری شرایط رویداد، عمل می‌کند که از تراکم بی‌نهایت رویداد جلوگیری می‌کند [۴۵].
- پیش‌بینی مبتنی بر مدل^۷: استفاده از مدل سیستم برای پیش‌بینی زمان رویداد بعدی با پیش‌بینی رفتار آینده، رویدادها به‌طور بهینه برنامه‌ریزی می‌شوند تا از تراکم جلوگیری شود [۴۶].

۴- کاهش عملکرد سیستم با افزایش پارامتر آستانه

از آنجا که ابتدا در اکثر مطالعات انجام شده از یک ساختار رویداد ثابت بهره برده می‌شد که این ساختارها دارای سادگی در طراحی هستند ولی در مواجهه با تغییرات پویای سیستم کارایی کمتری داشته‌اند. از طرفی همراه با کاهش استفاده از منابع، دور از واقعیت نیست که عملکرد کلی سیستم کنترل تا حدی کاهش یابد زیرا داده‌های کمتری از کنترل‌کننده برای عملکرد مخابره می‌شود. برای مقابله با چالش کاهش عملکرد سیستم با افزایش پارامتر آستانه، محققین به دنبال روشی بودند که بتوانند تعداد رویدادها را بدون قربانی کردن بیش‌ازحد عملکرد کنترل کاهش دهند، که یک راه‌حل این بود که تابع آستانه را برای شرط راه‌اندازی با اضافه کردن یک متغیر دینامیکی کمکی غیرمنفی بزرگ‌تر کنند [۴۷، ۴۸]. در واقع تفاوت کنترل مبتنی بر رویداد استاتیکی و دینامیکی در ساختار رویداد هر کدام است [۴۹]. کنترل مبتنی بر رویداد استاتیک بر اساس آستانه خطای ثابت یا تابع نمایی کاهش می‌شود. از جمله مزایای آن ساده و قابل اجرا بودن آن است که در مقابل منابع ارتباطی بیشتری مصرف می‌گردد. کنترل مبتنی بر رویداد دینامیکی، این چالش را برطرف ساخته و کاهش بیشتر فرکانس فعال‌سازی و انعطاف پذیری بالاتری نسبت به حالت رویداد استاتیک دارد [۵۰، ۵۱]. در مقابل، پیچیدگی طراحی و نیاز به حل معادلات پیچیده به وجود می‌آید. در [۵۲] روش طراحی ساختارهای مختلف ارائه شده و به‌صورت تحلیلی نشان داده شده که فاصله دو رویداد متوالی در ساختار رویداد دینامیک بیشتر از حالت استاتیک است. در جدول ۱ مزایا و معایب دو رویکرد مقایسه شده است. روش‌های مختلف اجتناب از پدیده زنو در جدول ۲ با نحوه کاربرد آن‌ها آمده است.

¹ Dwell Time

² Hysteresis

³ Deadband

⁴ Adaptive Thresholds

⁵ Lyapunov-Based Methods

⁶ Hybrid Time-Event Triggers

⁷ Model-Based Prediction

۵- سیستم‌های مرتبه کسری

حسابان کسری شاخه‌ای از ریاضیات است با سابقه بیش از ۳۰۰ سال که به‌عنوان بسط حساب مرتبه صحیح سنتی در نظر گرفته شده است. رونق تحقیق در حسابان کسری در دهه ۱۹۷۰ رخ می‌دهد و دلیل اصلی آن این است که محققان دریافتند که فرآیندهای حافظه‌دار و سایر پدیده‌ها بهتر با حسابان کسری توصیف و مدل‌سازی می‌شوند [۵۳، ۵۴]. حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری به دلیل کاربردهای فراوانش در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی، یک حوزه تحقیقاتی رو به رشد است. از پیدایش ابزار حسابان کسری تا کنون ادبیات‌های بی شماری نگارش شده است که به دلیل ارتقا مدل‌سازی و ارتقا کارایی کنترل‌کننده‌ها باعث بهبود کارایی حلقه‌های کنترلی نیز گردیده است. با توجه به‌دقت زیاد مدل‌سازی مرتبه کسری برای سیستم‌ها، بسیاری از برنامه‌های سیستم‌های کاربردی، مانند شبکه‌های اجتماعی و دسته‌ای از فضاپیماها، وسایل نقلیه زیرآبی بدون سرنشین که در اعماق دریا حرکت می‌کنند و هواپیماهای بدون سرنشین که در طوفان گرد و غبار، باران یا برف پرواز می‌کنند را می‌توان به‌صورت سیستم‌های مرتبه کسری در نظر گرفت [۵۵، ۵۶]. همچنین بسیاری از رویکردهای کنترل سیستم‌های غیرخطی مرتبه صحیح به سیستم‌های غیرخطی مرتبه کسری عمومیت پیدا کرده است [۵۷، ۵۸].

جدول ۱: مزایا و معایب ساختار رویداد استاتیک و دینامیک

Table 1: Advantages and disadvantages of static and dynamic event mechanisms

Mechanisms	Event	Disadvantages	Advantages
Static	Constant	Lack of inflection dynamic situation	Incomplex, Stable
Dynamic	Variable	Computational complexity, Requires an accurate model of the system	Flexible, Suitable for nonlinear systems

جدول ۲: روش‌های مختلف دوری از پدیده زنو

Table 2: Different ways to avoid the Zeno phenomenon

Method	Aplication in static event	Aplication in dynamic event
Dwell Time	✓	✓
Hysteresis	✓	✓
Adaptive Thresholds	×	✓
Lyapunov-Based	✓	✓
Hybrid Time-Event Triggers	✓	✓
Model-Based Prediction	×	✓

ادغام حساب کسری در سیستم‌های کنترل امکان ثبت رفتارهای وابسته به حافظه را فراهم می‌کند. طراحی کنترل‌کننده و تحلیل پایداری پروتکل‌های کنترلی برای سیستم‌های مرتبه کسری در مقایسه با سیستم‌های مرتبه صحیح بسیار چالش برانگیز بوده است. در این موارد، پایداری کل سیستم کنترل‌شده نیز باید با استفاده از تکنیک‌های مرتبه کسری تحلیل شود. در تحلیل سیستم‌های دینامیکی مرتبه کسری، انواع مختلف پایداری نظیر پایداری لیاپانوف، پایداری مجانبی، پایداری نمایی و پایداری عملی قابل بررسی‌اند [۵۹، ۶۰]. پایداری لیاپانوف به معنای باقی‌ماندن پاسخ‌ها در همسایگی نقطه تعادل است، در حالی که در پایداری مجانبی، پاسخ‌ها در گذر زمان به نقطه تعادل میل می‌کنند. پایداری نمایی نسخه‌ای قوی‌تر از پایداری مجانبی است که نرخ همگرایی پاسخ‌ها به‌صورت نمایی در سیستم‌های کسری، با تابع میتاگ-لفلر مشخص می‌شود. در مقابل، پایداری عملی به ماندگاری پاسخ‌ها در یک ناحیه محدود اطراف تعادل بدون همگرایی دقیق اطلاق می‌شود و در کاربردهای عملی بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر، روش مقایسه به‌عنوان یک ابزار تحلیلی در اثبات پایداری لیاپانوف و مجانبی در تحلیل سیستم‌های مرتبه کسری به‌کار می‌رود، که در آن رفتار مشتق کسری تابع لیاپانوف با پاسخ یک معادله دیفرانسیل کسری ساده‌تر مقایسه می‌شود [۶۱]. با این حال به دلیل این که برخی از اصول مقدماتی ریاضیات پرکاربرد در طراحی و تحلیل کنترل‌کننده سیستم‌های مرتبه صحیح مانند قاعده مشتق زنجیره‌ای^۱ و همچنین قاعده لایبنیز^۲، برای سیستم‌های مرتبه کسری برقرار نیستند. به این

^۱ Chain Rule

^۲ Libniz's Rule

صورت که برای مثال در طراحی کنترل کننده غیرخطی پسگام^۱ برای سیستم‌های فیدبک اکید مرتبه کسری، محاسبه مشتق‌های جزئی کسری از کنترل کننده‌های مجازی^۲ در هر گام به دلیل برقرار نبودن قانون مشتق زنجیره‌ای به صورت دقیق امکان پذیر نیست. همچنین، گرفتن مشتق مرتبه کسری از توابع لیاپانف در مراحل اثبات پایداری سیستم کنترلی حلقه بسته نیز به صورت متعارف برقرار نیست. برای حل این چالش تاکنون راه کارهایی ارائه گردیده است به عنوان مثال در [۶۲] برای رفع این چالش از رویکرد کنترل سطح دینامیکی مرتبه کسری استفاده شده است. در [۶۳] نیز مشتق مرتبه کسری کنترل مجازی در هر گام توسط یک معادله مرتبه دو تخمین زده شده است. اکثر پژوهش‌ها در راستای طراحی کنترل کننده برای سیستم‌های مرتبه کسری معطوف به عواملی با ساختار دینامیکی معین خطی است در این صورت به راحتی با استفاده از تبدیل لاپلاس^۳ تحلیل پایداری سیستم‌ها بررسی می‌شود. در واقع با توجه به اینکه حسابان مرتبه صحیح به عنوان زیرمجموعه‌ای از حسابان مرتبه کسری است در سال‌های اخیر در علوم مهندسی کنترل از حسابان مرتبه کسری استفاده شده است و به اثبات رسیده که استفاده از رویکرد حسابان مرتبه کسری می‌تواند سبب بهبود عملکرد سیستم‌های کنترلی و مدل سازی دقیق تر سیستم‌ها در مقایسه با رویکردهای کلاسیک گردد [۶۴]. به دلیل بدیع بودن حسابان مرتبه کسری، تعاریف مختلفی برای عملگر مشتق و انتگرال مرتبه کسری وجود دارد که هر یک در جایگاه ویژه‌ای استفاده می‌گردد [۶۵، ۶۶].

بسیاری از سیستم‌های کاربردی و صنعتی مانند شناورهای روستی و زیرسطحی، سیستم‌های قدرت، فرآیندهای شیمیایی، شبکه‌های مخابراتی و سیستم‌های آشوب را می‌توان براساس معادلات دینامیکی سیستم‌های مرتبه کسری توصیف نمود. از این رو مطالعه و پژوهش پیرامون طراحی کنترل کننده و تحلیل پایداری آن برای سیستم‌های مرتبه کسری مسئله‌ای کاربردی است [۶۷، ۶۸]. در این میان بسیاری از سیستم‌های چندعاملی کاربردی دینامیک کسری را نشان می‌دهند، برای اولین بار در [۶۹] هماهنگی سیستم‌های چندعاملی با مدل مرتبه کسری مورد مطالعه قرار گرفته و در این راستا مقایسه‌ای بین مدل مرتبه کسری و مرتبه صحیح انجام شده است.

۶- سیستم‌های چندعاملی

سیستم‌های چندعاملی در دهه‌های اخیر به دلیل کاربردهای گسترده در علوم مختلف از جمله ریاضیات کاربردی، علوم کامپیوتر و مهندسی، توجه محققان را به خود معطوف کرده است [۷۰، ۷۱]. کنترل مشارکتی این سیستم‌ها شامل مسائلی مانند اجماع [۷۲]، آرایش بندی [۷۳]، مهار^۴ (خود نگه دارنده) [۷۴] و غیره است. سیستم‌های چندعاملی با حالت آرایش بندی، سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها عوامل به صورت ساختاریافته سازماندهی می‌شوند تا به اهداف مشترکی برسند. این پیکربندی می‌تواند ثابت یا متغیر باشد [۷۵، ۷۶]. مهار نیز به معنای کنترل یا محدود کردن عامل‌ها توسط چندین عامل رهبر برای جلوگیری از رفتارهای نامطلوب و ناسازگار است [۷۷]. اجماع نیز یکی از زمینه‌های مهم و حیاتی در کنترل مشارکتی سیستم‌های چندعاملی است که زمانی حاصل می‌شود که عامل‌های پیرو با پیروی از قوانین کنترل و ارتباط با همسایگان خود بر روی یک نقطه مورد نظر مشترک توافق کنند [۷۸]. کنترل اجماع با رهبر [۷۹] و اجماع بدون رهبر [۸۰]، دو رویکرد متمایز برای دستیابی به اجماع گروهی هستند. هدف در اجماع بدون رهبر همگرا کردن حالت‌های تمامی عامل‌ها به یک مقدار مشترک بدون وجود عامل رهبر است. هماهنگی سرعت در ربات‌های گروهی از جمله کاربردهای اجماع بدون رهبر است. با وجود کاربردها و مزایای این روش به دلیل نبود رهبر ممکن است سیستم در هماهنگی با مشکلاتی مواجه شود و هزینه‌های ارتباطی را افزایش دهد و تصمیم‌گیری مؤثر را پیچیده‌تر کند. در حالت اجماع با رهبر یک رهبر وجود دارد که حالت هدف را تعیین می‌کند و سایر عامل‌ها باید با دنبال کردن رهبر و تعامل با همسایگان به حالت هدف همگرا شوند که جهت وضوح بهتر، صورت بندی ریاضی و مراحل کلیدی تحلیل این رویکرد کنترلی ارائه می‌گردد، به این منظور در حالتی که دینامیک هر عامل به صورت (۶) (سیستم تک-انتگرال گیر مرتبه کسری) در نظر گرفته شود:

$$D^{\alpha} x_i(t) = u_i(t) \quad (6)$$

¹ Backstepping

² Virtual Control

³ Laplace transform

⁴ Containment

که $x_i(t)$ حالت عامل i ام و $u_i(t)$ سیگنال کنترل عامل i ام است. طراحی سیگنال کنترل اجماع بدون وجود رهبر به صورت رابطه (۷) در نظر گرفته می شود:

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) \quad (7)$$

که در آن N_i ، تعداد عامل های همسایه عامل i ام، a_{ij} وزن ارتباطات عامل ها است و در حالت اجماع با وجود رهبر سیگنال کنترل به صورت (۸) طراحی می گردد.

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) - b_i (x_i(t) - x_o(t)) \quad (8)$$

که در آن b_i وزن ارتباط عامل i ام به رهبر است. سپس برای تضمین پایداری اجماع مورد نظر تابع لیاپانوف مناسب طراحی می گردد.

اجماع سیستم های چندعاملی در دهه گذشته برای مدیریت وظایف پیچیده به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته است [۸۱، ۸۲]. در مطالعه های قبلی [۸۳، ۸۴]، تمرکز محققین برای اجماع، پرداختن به شرایط تئوری برای دستیابی به توافق عوامل پیرو بود. در حال حاضر، محققان در حال کار روی مسئله اجماع عملی هستند که هدف آن دستیابی به رفتارهای منسجم عوامل تحت برخی محدودیت های عملی است. در [۸۵] و [۸۶]، پروتکل های توافقی بازخورد حالت برای سیستم های مرتبه کسری نامشخص و غیرخطی، به ترتیب تحت محدودیت های عملی مانند توپولوژی تأخیر و سوئیچینگ مورد مطالعه قرار گرفته اند. با این حال در نظر گرفتن محدودیت های عملی مانند محدودیت پهنای باند ارتباطات، استهلاک عملگرها و همچنین وجود عیب عملگرها همیشه چالش برانگیز باقی مانده است. برای مقابله با مشکل پهنای باند، بدون شک کنترل مبتنی بر رویداد انتخاب خوبی خواهد بود، زیرا داده ها تنها زمانی منتقل می شود که خطا از آستانه رخداد فراتر رود. بنابراین مطالعه کنترل مبتنی بر رویداد به ویژه برای سیستم های چندعاملی مهم و کاربردی است [۸۷، ۸۸].

۶-۱- کنترل مبتنی بر رویداد سیستم های چندعاملی مرتبه صحیح

ایده استفاده از روش مبتنی بر رویداد به منظور اجماع سیستم های چندعاملی اولین بار توسط دیماروگوناس و همکاران در [۸۹]، در سال ۲۰۰۹ میلادی مطرح گردید، که در طراحی کنترل، اطلاع از حالت های همه همسایگان مورد نیاز است و کنترل کننده به صورت متمرکز عمل می کند. در همان سال برای حل این مشکل در [۹۰]، استراتژی کنترل رویداد محور متمرکز به غیرمتمرکز برای سیستم های با دینامیک مرتبه اول تعمیم داده شده است. در حالت متمرکز یک کنترل کننده مرکزی وجود دارد که اطلاعات همه عامل ها را جمع آوری می کند و با توجه به خطای همه عامل ها تصمیم می گیرد چه زمانی کنترل به روزرسانی شود. مزیت این روش سادگی تحلیل ریاضی است اما نیاز به ارتباط دائمی با همه عامل ها وجود دارد که در سیستم های بزرگ غیرعملی است. در حالت متمرکز هر عامل به صورت مستقل بر اساس اطلاعات همسایه های خود تصمیم می گیرد یعنی هر ربات فقط موقعیت ربات های مجاورش را بررسی می کند و هر عامل شرط رویداد خود را دارد و نیازی به اطلاعات سراسری نیست در واقع خطای هر عامل به صورت تفاوت بین حالت فعلی خودش و حالت ذخیره شده در آخرین رویداد تعریف می شود بنابراین کاهش بار ارتباطی و مصرف انرژی وجود دارد، در برابر طراحی پیچیده تری نسبت به حالت متمرکز دارد. در سال ۲۰۱۰ مسئله کنترل مبتنی بر رویداد را این بار برای حالت توزیع شده حل کرد که در این حالت هر عامل بر اساس اطلاعات محلی و همکاری با سایر عامل ها تصمیم می گیرد. جدول ۳ مقایسه ای بین این سه رویکرد انجام داده است.

در [۹۱]، کنترل اجماع تطبیقی رهبر-پیرو زمان محدود برای سیستم های چندعاملی مرتبه صحیح فیدبک اکید، با وجود عیب های عملگر نامعین متغیر با زمان در نظر گرفته شده است. هر عامل بر اساس اطلاعات همسایگان خود تصمیم می گیرد که براساس یک ساختار رویداد دینامیکی، فرکانس بروزرسانی کنترل کننده کاهش یافته است. از یک آستانه دینامیکی برای جلوگیری از وقوع زو استفاده شده است. همچنین از فیلتر فرمان^۱ برای جلوگیری از انفجار پیچیدگی کمک گرفته شده است. که این مرجع به دلیل فرض دسترسی به همه ی حالات محدودیت عملی دارد.

^۱ Command Filter

جدول ۳: مقایسه رویکردهای مختلف اجماع عامل‌ها

Table 3: Comparison of different agent consensus approaches

Criterion	Centralized	Decentralized	Distributed
Decision-making	Central	Local	Local
Energy consumption	High	Low	Average
Scalability	Weak	Excellent	Good
Fault tolerant	Weak	Excellent	Excellent
Implementation complexity	Simple	Medium	Complex
Practical example	Small systems	Swarm robots	Sensor networks

در [۹۲]، کنترل تطبیقی فازی تحمل پذیر عیب برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه صحیح غیرخطی با وجود عیب عملکرد نامعین در نظر گرفته شده است. کنترل کننده به صورت غیرمتمرکز عمل می‌کند یعنی هر عامل کنترل کننده خود را دارد، اما اطلاعات محدودی از دیگران دریافت می‌کند همچنین با استفاده از رویکرد کنترلی پسگام و طراحی یک ساختار مبتنی بر رویداد استاتیک باعث ایجاد یک رویداد غیرمتمرکز می‌شود، که در این مرجع برخلاف مرجع قبل برای تخمین حالت‌ها از یک مشاهده گر حالت بهره گرفته شده است. در [۹۳]، کنترل ردیابی و مسئله کنترل مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های غیرخطی مرتبه صحیح در برابر عیب‌های حسگر، اشباع ورودی و اختلال خارجی در نظر گرفته شده است. غیرخطی‌های در نظر گرفته شده در این مقاله نامعین فرض شده است که برای تقریب غیرخطی‌های ناشناخته از تقریب گر شبکه عصبی^۱ استفاده شده است، ساختار طراحی شده یک ساختار مبتنی بر رویداد استاتیکی است که فرکانس بروزرسانی کنترل کننده به خوبی کاهش یافته است اما عملکردها ایده‌آل فرض شده است. در [۹۴]، مسئله اجماع توسط رویکرد مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی تصادفی تحت گراف بی جهت با ورودی ناحیه مرده ناشناخته مورد مطالعه قرار گرفته است. دینامیک غیرخطی ناشناخته توسط سیستم‌های منطق فازی تقریب می‌شود. الگوریتم کنترل تطبیقی ایجاد شده توسط رویداد به گونه‌ای است که مسئله اجماع سیستم‌های چندعاملی غیرخطی تصادفی به خوبی به دست می‌آید و در نهایت همه سیگنال‌ها به صورت نیمه سراسری^۲ به طور یکنواخت^۳ پایدار می‌گردند و نیز ساختار رویداد استاتیک برای کاهش بروزرسانی کنترل کننده طراحی شده است در مرجع نیز فرض غیرعملی در دسترس بودن تمام عامل‌ها در نظر گرفته شده است. در [۹۵]، یک رویکرد ردیابی هماهنگ فیدبک خروجی توزیع شده برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی ناهمگن نامشخص در یک فرم بازخورد غیر-اکید^۴ ارائه شده است. همچنین برخلاف مطالعات اشاره شده قبلی مشاهده گرهای تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی برای تخمین حالت‌های غیرقابل اندازه گیری عوامل پیرو طراحی شده است. ساختار رویداد نیز همچون کارهای مورد بررسی در این زیر بخش یک ساختار رویداد استاتیک است که تا حدودی تعداد بروزرسانی هر عامل پیرو را کاهش می‌دهد. در [۹۶]، مسئله کنترل آرایش بندی فازی تطبیقی زمان محدود^۵ را برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه بالا بررسی می‌کند. سیستم‌های منطق فازی^۶ برای تقریب دینامیک غیرخطی ناشناخته به کار گرفته شده‌اند. با ترکیب تکنیک کنترل سطح دینامیکی و طراحی بازگشتی پسگام، یک الگوریتم کنترل آرایش بندی فازی تطبیقی توسعه داده می‌شود. برای کاهش انتقال غیرضروری منابع شبکه، یک ساختار جدید ایجاد شده توسط رویداد در روش کنترل پیشنهاد شده است. در غالب کارهای بررسی شده ساختار رویداد آستانه ثابت است به دلیل آستانه تغییرناپذیر کاربرد این ساختار محدود است.

¹ Neural Network² Semi-Globally³ Uniform⁴ Nonstrict Feedback⁵ Finit-Time⁶ Fuzzy Logic System

بنابراین، ساختار آستانه نسبی ایجاد شده توسط رویداد در [۹۷]، یک طرح آستانه نسبی با معرفی سیگنال کنترل به عنوان یک متغیر قابل انعطاف است که برای غلبه بر کاهش عملکرد سیستم‌ها زمانی که ورودی به میزان زیاد تغییر می‌کند. اکثر مطالعات انجام شده توسط ساختار رویداد استاتیک و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی از جمله عیوب عملکرد طراحی شده است.

۶-۲- کنترل مبتنی بر رویداد سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری

در سال‌های اخیر، دیدگاه کنترل توزیع شده مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری به دلیل مزایای متنوع، در قیاس با روش متداول مبتنی بر زمان در مجامع کنترلی بسیار مورد توجه پژوهشگران و محققان قرار گرفته است. همین‌طور که در زیر بخش قبل بیان شد ایده استفاده از روش مبتنی بر رویداد به منظور اجماع سیستم‌های چندعاملی اولین بار در سال ۲۰۰۹ میلادی مطرح گردید. با این حال به دلیل برخی از محدودیت‌ها و چالش‌های فنی در طراحی کنترل کننده و تحلیل پایداری در سیستم‌های مرتبه کسری، گسترش پروتکل‌های کنترلی مبتنی بر رویداد از سیستم‌های چندعاملی مرتبه صحیح به سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری به کندی صورت گرفته است و تاکنون نتایج بسیار اندکی در این زمینه تحقیقاتی گزارش شده است. در [۹۸]، اجماع توزیع شده برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری، ابتدا بر اساس استراتژی مبتنی بر رویداد مورد بررسی قرار می‌گیرد، آستانه رویداد ثابت و مبتنی بر خطای لحظه‌ای بین حالت فعلی و حالت مطلوب تعریف شده است. که در آن ورودی کنترل هر عامل به لحظه‌های رویداد خودش و همسایگانش بستگی دارد. با تحلیل حداقل زمان بین رویدادها، پدیده زو را رد می‌کند اما تحت این استراتژی کنترل، اگر هر عامل تعداد همسایگان زیادی داشته باشد، به روزرسانی کنترل کننده بسیار مکرر خواهد بود. در [۹۹]، کنترل مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی خطی مرتبه کسری بررسی شده است. هر عامل تنها بر اساس اطلاعات همسایگان خود و بدون نیاز به یک کنترل کننده مرکزی، به صورت توزیع شده تصمیم‌گیری می‌کند، ساختار رویداد در نظر گرفته شده یک ساختار رویداد دینامیکی است که فرکانس بروزرسانی کنترل کننده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین اثبات ریاضی مبتنی بر حداقل زمان بین رویدادها و تحلیل لیاپانوف پایه اصلی حذف پدیده زو است. در [۱۰۰]، کنترل کننده مبتنی بر رویداد به منظور کاهش تعداد به روزرسانی‌های سیگنال‌های کنترل برای دستیابی به اجماع مشارکتی رهبر-پیرو برای دسته‌ای از سیستم‌های مرتبه کسری غیرخطی نامعین با تبادل اطلاعات تحت گراف بی جهت مورد بررسی قرار گرفته است همچنین شرایط رویداد محور به صورت نمایی کاهشی برای اجماع سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری استفاده می‌شود. نویسندگان با استفاده از نظریه پایداری لیاپانوف و خواص سیستم‌های کسری نشان دادند که زمان بین دو رویداد متوالی همواره از یک مقدار مثبت بیشتر است و پدیده زو رخ نمی‌دهد. ایراد اساسی کنترل کننده پیشنهادی، طراحی ساختار تشخیص وقوع رویداد به صورت متمرکز بوده است. این امر سبب افزایش تعداد وقوع رویداد برای عوامل، افزایش بروزرسانی سیگنال کنترل هر عامل و کاهش قابلیت اطمینان در شبکه تحت کنترل می‌گردد. در [۱۰۱]، طراحی کنترل کننده مبتنی بر رویداد توزیع شده با ساختار رویدادی که به دینامیک سیستم وابسته است با توجه به خطا و دینامیک کسری سیستم بروزرسانی می‌شود، برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی نامعین بررسی شده است. که در مقایسه با مرجع قبلی تبادل اطلاعات در شبکه تحت کنترل به صورت جهت دار است. در [۱۰۲]، ردیابی اجماع ناشی از رویداد استاتیک برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری که توسط مدل‌های خطی عمومی توصیف می‌شوند، می‌پردازد. شرط فعال سازی تنها به مقادیر فعلی حالت‌ها وابسته است و از تاریخچه‌ی حالت‌ها یا سیستم دینامیکی اضافی استفاده نمی‌شود. در [۱۰۳]، اجماع بدون رهبر سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه کسری از طریق کنترل رویداد استاتیک بررسی شده است که کنترل کننده به صورت توزیع شده طراحی شده اما تشخیص رویداد توسط یک ساختار متمرکز صورت می‌گیرد که به روزرسانی‌های مکرر کارایی طرح پیشنهادی را کمتر می‌کند. در [۱۰۴]، یک کنترل رویداد استاتیک برای مشکل اجماع پیرو رهبر برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری طراحی شده است. ابتدا، یک نابرابری انتگرال مرتبه کسری برای تضمین بیشتر اجماع، پیشنهاد شده است و سپس یک ساختار رویداد توزیع شده به حالت نمایی تعریف شده است که تا حدودی تعداد به روزرسانی‌های کنترل کننده پیشنهادی را کاهش داده است. در [۱۰۵]، از الگوریتم رویداد دینامیک برای لحظات بعدی رویداد بکار گرفته شده است که به طور خاص، زمان بروزرسانی بعدی توسط اطلاعات وضعیت محلی عامل‌ها تعیین می‌شود. ساختار رویداد استفاده شده نه تنها به مقادیر فعلی حالت‌ها وابسته است، بلکه شامل پارامترهای تطبیقی می‌شود که به صورت پویا بر اساس خطای اجماع و تعاملات

همسایگی روزرسانی می‌شوند. تا اینجا تقریباً همه‌ی مطالعات بر روی سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری با دینامیک خطی انجام شده است. مسئله کنترل رویداد پویا تطبیقی برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی با توصیف ارتباطات توسط یک گراف بی‌جهت در [۱۰۶] بررسی شده است، با استفاده از تحلیل لیپانوف و تعیین کران پایین برای زمان بین رویدادها، اثبات شده است که پدیده زانو رخ نمی‌دهد. این طرح اجماع برای شرایط ایده‌ال عملگرها در نظر گرفته شده است و این دور از واقعیت است. در [۱۰۷]، مسئله کنترل مهار سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری سوئیچ‌شونده با حالت‌های اندازه‌گیری نشده، توسط ترکیب ساختار راه‌اندازی رویداد استاتیک و تکنیک کوانتیزه سازی ورودی بر بستر کنترل پسگام حل شده که می‌تواند فرکانس روزرسانی کنترل‌کننده را کاهش دهد و از این طریق تا حد زیادی باعث کاهش مصرف انرژی در سیستم مورد مطالعه شده است همچنین برای تقریب توابع غیرخطی نامعلوم از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی^۱ استفاده شده است. در [۱۰۸]، کنترل‌کننده پسگام شبکه عصبی تطبیقی با فیلتر فرمان برای مسئله مهار سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری پیشنهاد شده است که استفاده از فیلتر فرمان باعث جلوگیری از انفجار پیچیدگی شده است و سیستم‌های چندعاملی مورد بررسی شامل حالت‌های اندازه‌گیری نشده و توابع غیرخطی هستند که شبکه عصبی تابع پایه شعاعی برای تقریب توابع غیرخطی ناشناخته استفاده می‌شود و مشاهده‌گر حالت برای تخمین حالت‌های سیستم طراحی شده است همین‌طور برای کاهش روزرسانی سیگنال‌های ورودی کنترل، کنترل‌کننده مبتنی بر رویداد دینامیکی پیشنهاد می‌شود که کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند تضمین کند که همه عوامل پیرو می‌توانند به بدنه محدب رهبران^۲ همگرا شوند. در [۱۰۹]، کنترل ردیابی اجماع فازی تطبیقی با ورودی مبتنی بر رویداد استاتیک برای سیستم‌های فیدبک اکید مرتبه کسری با حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری و اغتشاشات ناسازگار نامعین طراحی شده است. همچنین عدم قطعیت‌های ذاتی سیستم توسط یک سیستم منطق فازی کنترل شده است. در [۱۱۰]، کنترل توزیع شده زمان محدود برای سیستم‌های فیدبک اکید مرتبه کسری در معرض محدودیت‌های حالت کامل^۳ و ورودی اشباع در نظر گرفته شده است. در نهایت در گام آخر یک شرط رویداد تحریک استاتیکی ارائه شده که بار ارتباطی کنترل‌کننده به عملکرد به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. در [۱۱۱] مسئله کنترل زمان محدود برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه کسری با ورودی رویداد اشاره می‌شود. برای کاهش بار ارتباطات یک شرط برای کنترل مبتنی بر رویداد استاتیک متشکل از ورودی کنترل و یک تابع از خطاهای مهار فراهم شده که شرایط ایجاد شده توسط رویداد متشکل از ورودی کنترل و یک تابع کاهش مربوط به خطاهای مهار ابداع شده است. در نهایت طرح کنترل مهار تطبیقی توزیع شده باعث می‌شود که هر عامل پیرو به بدنه محدب رهبران در زمان محدود هدایت شود. در [۱۱۲]، کنترل مبتنی بر رویداد توزیع شده فازی برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری طراحی شده است که همزمان دو چالش تاخیر زمانی و جهت کنترل ناشناخته را برطرف می‌کند در این مطالعه به‌روزرسانی‌های کنترل‌کننده توسط یک ساختار رویداد انجام شده است که علاوه بر آستانه ثابت به ورودی کنترل نیز بستگی دارد. زمانی که آستانه یک مقدار ثابت است به تغییرات کنترل‌کننده واکنشی نشان نمی‌دهد و آستانه ثابت باقی می‌ماند که در موقعیت‌های عملی این امری سازگار نیست. زمانی که مقدار کنترلر u بزرگ باشد، آستانه نیز بزرگ خواهد بود. در مواردی که مقدار کنترل‌کننده زیاد نباشد، کنترل‌کننده برای مدت‌هایی بدون تغییر باقی می‌ماند. از طرف دیگر، با تثبیت تدریجی وضعیت سیستم، مقدار u نیز بسیار کوچک خواهد بود و آستانه نیز برای دستیابی به کنترل حساس و دقیق‌تر کاهش می‌یابد. در [۱۱۳]، کنترل ردیابی مبتنی بر رویداد استاتیک برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری طراحی گردیده است برخلاف مطالعات قبلی که محدودیت‌های دنیای واقعی را در نظر نگرفته‌اند محدودیت‌های حالت و محدودیت ورودی اشباع در نظر گرفته شده است. برای اینکه آزادی طراحی بیشتری را برای متعادل کردن عملکرد سیستم و منابع ارتباطی فراهم شود اضافه کردن یک پارامتر آستانه غیر منفی است می‌تواند به‌صورت پویا مطابق با قوانین پویا تنظیم شود، که کاوش ساختارهای ایجادشده توسط رویداد پویا را تحریک می‌کند. در [۱۱۴]، ردیابی اجماع دوجانبه مبتنی بر مشاهده‌گر سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی را با استفاده از یک ساختار رویداد دینامیکی بررسی می‌کند. با توجه به اینکه اطلاعات وضعیت مربوطه هر عامل همیشه قابل اندازه‌گیری نیست، برای هر عامل یک مشاهده‌گر توزیع شده در نظر گرفته شده تا اطلاعات وضعیت آن را تخمین بزند. یک

¹ Radial Basis Function² Leader Convex Hull³ Full- State Constrain

ساختار رویداد دینامیک برای جلوگیری از به‌روزرسانی‌های مداوم کنترل‌کننده پیشنهاد شده، که در آن آستانه دینامیکی با توجه به شرایط از پیش تعیین‌شده مدوله می‌شود. ساختار رویداد دینامیک که در این مقاله طراحی شده است، هر عامل را قادر می‌سازد تا کنترل‌کننده را تنها بر اساس لحظه‌های رویداد خود بروزرسانی کند و می‌توان تعادل بهتری بین کاهش بیشتر رویدادها و اطمینان از عملکرد سیستم برقرار نماید و تا حد زیادی تعداد رویدادها نسبت به حالت‌های استاتیک قبلی کاهش یافته است. در [۱۱۵]، با ارائه یک ساختار دینامیک مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی با اشباع عملگر و اختلالات خارجی، رویکردی نوین در کنترل غیرمتمرکز ارائه می‌دهد. از طریق شبیه‌سازی‌های عملی بر روی ژنراتورهای سنکرون و مقایسه با سیستم مدار چوا، کارایی و مقاومت بالای روش در محیط‌های پویا و نامطمئن تأیید شده است. این روش با کاهش بار ارتباطی و اجتناب از رفتار زنون، گامی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف منابع در سیستم‌های چندعاملی پیچیده محسوب می‌شود. در ادامه جدول ۴ دسته‌بندی مقالات را براساس نوع رویداد انجام شده بیان می‌کند.

با بررسی مطالعات قبلی می‌توان دریافت که توسعه ساختارهای استاتیک و دینامیک تشخیص رویداد برای کاهش بار ارتباطی طراحی گردیده است.

جدول ۴: انواع ساختار رویداد در مطالعات پیشین
Table 4: Types of event mechanisms in previous studies

Event	Control	System and control approach	Fault tolerant control	Considering the delay	Ref
Centralized		Linear system and leaderless consensus control	×	×	[98]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[100]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[101]
		Nonlinear system and leaderless consensus control	×	×	[103]
Static		Linear system and leader follower consensus control	×	×	[102]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[104]
		Linear system and leaderless consensus control	×	×	[105]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[109]
	Distributed	Nonlinear strict feedback system and finit- time containment control	×	×	[107]
		Nonlinear strict feedback system and finit-time leader-follower consensus control	×	×	[110]
		Nonlinear strict feedback system and Command Filter containment control	×	×	[108]
		Nonlinear strict feedback system and consensus control	×	×	[113]
		Nonlinear strict feedback system and leader follower consensus control	×	✓	[112]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[115]
Dynamic	Distributed	Linear system and leader follower consensus control	×	×	[99]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[106]
		Nonlinear system and leader follower consensus control	×	×	[114]
		Nonlinear strict feedback system and finit- time containment control	×	×	[111]

۷- چالش‌ها و مسیرهای تحقیقاتی آینده

با وجود رشد قابل توجه پژوهش‌ها در حوزه کنترل مبتنی بر رویداد، این رویکرد همچنان با چالش‌های بنیادی متعددی مواجه است که مانع از پیاده‌سازی گسترده و عملی آن در کاربردهای صنعتی و پیچیده می‌شود. از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به نبود یک چارچوب نظری جامع برای تحلیل پایداری و کارایی، به‌ویژه در سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی توزیع‌شده، با تضمین پایداری در حضور تأخیر و نویز، جلوگیری از رفتار زنون، طراحی‌های مقاوم، و کمبود نتایج تجربی و چالش‌های عملی کلیدی از جمله تأخیرهای زمانی و عیب‌های عملگرها همچنان به‌عنوان موانع اصلی باقی‌مانده‌اند. از سوی دیگر، کمبود آزمایش‌های عملی و نتایج تجربی و سناریوهای عملی، شکاف قابل‌توجهی بین تئوری و کاربرد را نشان می‌دهد. این چالش‌ها نشان می‌دهند که علی‌رغم پیشرفت‌های نظری، زمینه برای تحقیقات بیشتر در راستای تحقق عملی این رویکرد همچنان گسترده و حیاتی است.

به‌طور خلاصه می‌توان مسیر تحقیقاتی بر اساس چالش‌های موجود را به شرح زیر بیان کرد:

- گسترش روش‌های مبتنی بر رویداد دینامیکی برای سیستم‌های مرتبه کسری پیچیده
- طراحی‌های مقاوم در برابر تأخیرهای زمانی و عیوب عملگرها
- توسعه چارچوب‌های قابل پیاده‌سازی در صنعت
- افزایش تجربیات واقعی و تست‌های عملی برای اثبات مزایای نظری در شرایط صنعتی

۸- نتیجه‌گیری

با بررسی پیشینه پژوهشی در حوزه کنترل مبتنی بر رویداد سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری، مشاهده می‌شود که اکثر مطالعات موجود بر روی سیستم‌های ساده خطی یا غیرخطی متمرکز شده‌اند از این‌رو طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه کسری پیچیده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. محدودیت دیگری که در پژوهش‌های پیشین وجود دارد به کارگیری ساختار رویداد استاتیک در اکثر موارد است که منجر به به‌روزرسانی‌های غیرضروری می‌شود و نیز شکاف دیگری که در این راستا وجود دارد عدم بررسی تأثیر عیب‌های سخت‌افزاری نظیر عیب قفل‌شونده یا عیب از دست‌دادن کارایی در عملگرها بر پایداری سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری به‌ندرت تحلیل شده است. از این‌رو بررسی کنترل مبتنی بر رویداد دینامیکی برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری در حضور عیب عملگر می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. با توجه به تحقیق انجام شده می‌توان کاربرد روش‌های مبتنی بر رویداد دینامیکی در سیستم‌های مرتبه کسری با ساختار پیچیده، گسترش پیاده‌سازی در صنعت و طراحی مقاوم را از چالش‌ها و مسیر تحقیقاتی آینده نام برد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. نویسندگان از زحمات همکاران محترم نشریه، داوران محترم و همکاران محترم حوزه پژوهش و فن‌آوری واحد نجف‌آباد تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] M. Parsa and M. Danesh, "Robust containment control of uncertain multi-agent systems with time-delay and heterogeneous lipschitz nonlinearity", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 4, pp. 2312-2321, April 2021, doi: 10.1109/TSMC.2019.2912268.
- [2] F. Gholami, M. Hashemi and G. Shahgholian, "Actuator fault event-triggered compensation for multiagent fractional-order nonlinear systems", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 9, no. 1, Article Number: 092503, March 2025, doi: 10.57647/j.spre.2025.0901.03.
- [3] M. Chafii, S. Naoumi, R. Alami, E. Almazrouei, M. Bennis and M. Debbah, "Emergent communication in multi-agent reinforcement learning for future wireless networks", IEEE Internet of Things Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 18-24, Dec. 2023, doi: 10.1109/IOTM.001.2300102.
- [4] H. Tabibi and M. Parsa, "Sliding mode control of gas turbine based on adaptive nonlinear observer", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 51, pp. 19-30, Dec. 2022, doi: 10.1001.1.23223871.1401.13.51.2.5.
- [5] A. Khosravi, A. Chatraei, G. Shahgholian and S.M.Kargar, "System identification using NARX and centrifugal compressor control through the intelligent, active method- Case study: K-250 centrifugal compressor", Asian Journal of Control, vol. 24, no. 6, pp. 3345-3364, Nov. 2022, doi: 10.1002/asjc.2799.
- [6] D. Sabzevari and A. Chatraei, "INS/GPS sensor fusion based on adaptive fuzzy EKF with sensitivity to disturbances", IET Radar, Sonar and Navigation, vol. 15, no. 11, pp. 1535-1549, Nov. 2021, doi: 10.1049/rsn2.12144.
- [7] J. Chai, P. Casau and R.G. Sanfelice, "Analysis and design of event-triggered control algorithms using hybrid systems tools", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 30, no. 15, pp. 5936-5965, Oct. 2020, doi: 10.1002/rnc.5141.

- [8] S.K. Mishra, A.V. Jha, V.K. Verma, B. Appasani, A.Y. Abdelaziz and N. Bizon, "An optimized triggering algorithm for event-triggered control of networked control systems", *Mathematics*, vol. 9, no. 11, Article Number: 1262, May 2021, doi: 10.3390/math9111262.
- [9] M. Parsa and M. Danesh, "Containment control of high-order multi-agent systems with heterogeneous uncertainties, dynamic leaders, and time delay", *Asian Journal of Control*, vol. 23, no. 2, pp. 799-810, March 2021, doi: 10.1002/asjc.2251.
- [10] F. Mohammadzamani, M. Hashemi and G. Shahgholian, "Adaptive neural control of non-linear fractional order multi-agent systems in the presence of error constraints and input saturation", *IET Control Theory and Applications*, vol. 16, no. 13, pp. 1283-1298, Sept. 2022, doi: 10.1049/cth2.12291.
- [11] X. Meng, B. Jiang, H.R. Karimi and C. Gao, "Leader-follower sliding mode formation control of fractional-order multi-agent systems: A dynamic event-triggered mechanism", *Neurocomputing*, vol. 557, pp. 126691, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.neucom.2023.126691.
- [12] M.A. Farahani and M. Haeri, "Hierarchical event-triggered online charging management of time-varying network of electric vehicles based on cooperative game theory", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, March 2024, doi: 10.30486/mjee.2023.1993787.1216.
- [13] P. Ellis, "Extension of phase plane analysis to quantized systems", *IRE Trans. Automatic Control*, vol. 4, no. 2, pp. 43-54, Nov. 1959, doi: 10.1109/TAC.1959.1104845.
- [14] B. Keyvani, B. Fani, G. Shahgholian and M. Hashemi, "Analysis and simulation of island mode operation in inverter-based microgrids with voltage droop controllers", *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 17-26, Dec. 2023.
- [15] H. Kopetz, "Should responsive systems be event-triggered or time-triggered?", *IEICE Trans. on Information*, vol. 76, no. 11, pp. 1325-1332, Nov. 1993.
- [16] K. Åström and B.M. Bernhardsson, "Comparison of riemann and lebesgue sampling for first order stochastic systems", *Proceedings of the IEEE/CDC*, vol. 2, pp. 2011-2016, Las Vegas, NV, Dec. 2002, doi: 10.1109/CDC.2002.1184824
- [17] K. Åström and B. Bernhardsson, "Comparison of periodic and event-based sampling for first-order stochastic systems", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 32, no. 2, pp. 5006-5011, July 1999, doi: 10.1016/S1474-6670(17)56852-4.
- [18] P. Tabuada, "Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 52, no. 9, pp. 1680-1685, Sept. 2007, doi: 10.1109/TAC.2007.904277.
- [19] W.P.M. H. Heemels, M.C.F. Donkers and A.R. Teel, "Periodic event-triggered control for linear systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 58, no. 4, pp. 847-861, April 2013, doi: 10.1109/TAC.2012.2220443
- [20] L. Xing, C. Wen, Z. Liu, H. Su and J. Cai, "Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 62, no. 6, pp. 2071-2076, July 2016, doi: 10.1109/TAC.2016.2594204.
- [21] F. Mohammadzamani, M. Hashemi and G. Shahgholian, "Adaptive control of nonlinear time delay systems in the presence of output constraints and actuator's faults", *International Journal of Control*, vol. 96, no. 3, pp. 541-553, March 2023, doi: 10.1080/00207179.2021.2005257.
- [22] R. Bhatthiya and M. Diagne, "Event-based boundary control of one-phase Stefan problem: A static triggering approach", *Proceedings of the IEEE/ACC*, pp. 2403-2408, Atlanta, GA, USA, June 2022, doi: 10.23919/ACC53348.2022.9867599.
- [23] W.H. Heemels, M.C.F. Donkers and A.R. Teel, "Periodic event-triggered control for linear systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 58, no. 4, pp. 847-861, Sept. 2012, doi: 10.1109/TAC.2012.2220443.

- [24] K.E. Årzen, "A simple event-based PID controller", IFAC Proceedings Volumes, vol. 32, no. 2, pp. 8687–8692, July 1999, doi: 10.1016/S1474-6670(17)57482-0.
- [25] X. Ge, Q.L. Han, X. Zhang and D. Derui, "Dynamic event-triggered control and estimation: A survey", International Journal of Automation and Computing, vol. 18, no. 6, pp. 857–886, Dec. 2021, doi: 10.1007/s11633-021-1306-z.
- [26] X. You, M. Shi, B. Guo, Y. Zhu, W. Lai, S. Dian and K. Liu, "Event-triggered adaptive fuzzy tracking control for a class of fractional-order uncertain nonlinear systems with external disturbance", Chaos, Solitons and Fractals, vol. 161, p. 112393, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.chaos.2022.112393.
- [27] D.N.M. Abadi, A. Moarefianpour and N.M. Dehkordi, "Finite-time bounded model-based event-triggered control for distributed fuzzy T-S systems", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 18, no. 1, March 2024, doi: 10.30486/mjee.2023.1994207.1226.
- [28] J. Yang, Q. Zhong, X. Liu, K. Shi, A.M.Y.M. Ghias and Z.Y. Dong, "Decentralized periodic event-triggered load frequency control for multiarea power systems", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 55, no. 2, pp. 1020-1030, Feb. 2025, doi: 10.1109/TSMC.2024.3493102.
- [29] D. Huong, T. Van and T. Hieu, "On static and dynamic triggered mechanisms for event-triggered control of uncertain systems", Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 39, no. 10, pp. 5020-5038, Oct. 2020, doi: 10.1007/s00034-020-01399-6.
- [30] A. Yesmin, A.K. Behera, M.K. Bera and B. Bandyopadhyay, "Dynamic event-triggering based design of sliding mode control", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 31, no. 12, pp. 5910-5925, Aug. 2021, doi: 10.1002/rnc.5604.
- [31] J. Chen, D. Yue, C. Dou, S. Weng, X. Xie, Y. Li and G. P.Hancke, "Static and dynamic event-triggered mechanisms for distributed secondary control of inverters in low-voltage islanded microgrids", IEEE Trans. on Cybernetics, vol. 52, no. 7, pp. 6925-6938, Dec. 2020, doi: 10.1109/TCYB.2020.3034727.
- [32] S. Shi, S. Miyata and Y. Akashi, "Event-driven model-based optimal demand-controlled ventilation for multizone VAV systems: Enhancing energy efficiency and indoor environmental quality", Applied Energy, vol. 377, Article Number: 124683, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124683.
- [33] C. Nowzari, E. Garcia and J. Cortés, "Event-triggered communication and control of networked systems for multi-agent consensus", Automatica, vol. 105, pp. 1-27, July 2019, doi: 10.1016/j.automatica.2019.03.009.
- [34] T. Xu, Z. Duan, G. Wen and Z. Sun, "A novel dynamic event-triggered mechanism for dynamic average consensus", Automatica, vol. 161, Article Number: 111495, March 2024, doi: 10.1016/j.automatica.2023.111495.
- [35] B. Huang, Y. Xiao, X. Jin, J. Feng, X. Li and L. Ding, "A novel dynamic event-triggered mechanism for distributed secondary control in islanded ac microgrids", Energies, vol. 15, no. 19, Article Number: 6883, Sept. 2022, doi: 10.3390/en15196883.
- [36] Z. Li, B. Hu, M. Li and G. Luo, "String stability analysis for vehicle platooning under unreliable communication links with event-triggered strategy", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 68, no. 3, pp.2152-2164, Jan. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2891681
- [37] M. Saghafi-Zanjani and S. Mobayen, "Event-triggered global sliding mode controller design for anti-sway control of offshore container cranes", Ocean Engineering, vol. 268, Article Number: 113472, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113472.
- [38] A.T. Nguyen, T.B. Nguyen and S.K. Hong, "Dynamic event-triggered time-varying formation control of second-order dynamic agents: application to multiple quadcopters systems", Applied Sciences, vol. 10, no. 8, Article Number: 2814, April 2020, doi: 10.3390/app10082814.

- [39] S. Koga, C. Demir and M. Krstic, "Event-triggered safe stabilizing boundary control for the Stefan PDE system with actuator dynamics", *Proceeding of the IEEE/ACC*, pp. 1794-1799, San Diego, CA, USA, May 2023, doi: 10.23919/ACC55779.2023.10156551.
- [40] J. Xu, X. Wang, P. Liu and Q. Duan, "Adaptive variable threshold event-triggered control for trajectory tracking of autonomous underwater vehicles with actuator saturation", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 1973-84, Dec. 2022, doi: 10.1175/JTECH-D-22-0056.1.
- [41] X. Liu, K. Shi, Y. Tang, L. Tang, Y. Wei and Y. Han, "A novel adaptive event-triggered reliable H_∞ control approach for networked control systems with actuator faults", *Electronic Research Archive*, vol. 1, no. 31, Apr. 2023, doi: 10.3934/era.2023095.
- [42] M. Abdelrahim and D. Almahkles, "Dynamic event-triggered control for sensor-controller-actuator networked control systems", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 5, pp. 61, Oct. 2024, doi: 10.3390/jsan13050061.
- [43] Y.F. Gao and L. Liu, "Lyapunov-based triggering mechanisms for event-triggered control", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 18, pp. 1392–1398, June 2020, doi: 10.1007/s12555-019-0340-x.
- [44] T.F. Li, J. Fu and Z. Ma, "Improved event-triggered control for a class of continuous-time switched linear systems", *IET Control Theory and Applications*, vol. 12, no. 7, pp. 1000-5, May 2018, doi: 10.1049/iet-cta.2017.1341.
- [45] H. Yu and H. Fei, "The existence of Zeno behavior and its application to finite-time event-triggered control", *Science China Information Sciences*, vol. 63, no. 1, Article Number: 13920, June 2020, doi: 10.1007/s11432-018-9655-4.
- [46] N. He, J. Du, Z. Xu and J. Chen, "Event-triggered MPC for linear systems with bounded disturbances: An accumulated error based approach", *IET Control Theory and Applications*, vol. 16, no. 8, pp. 816-27, May 2022, doi: 10.1049/cth2.12273.
- [47] A. Girard, "Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 60, no. 7, pp. 1992–1997, Nov. 2014, doi: 10.1109/TAC.2014.2366855.
- [48] S. Hu, Y. Dong, X. Yu, X. Xiangpeng and M. Yong, "Adaptive event-triggered control for nonlinear discrete-time systems", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 26, no. 18, pp. 4104–4125, Dec. 2016, doi: 10.1002/rnc.3550.
- [49] W. Du, X. Yi, J. George, K.H. Johansson and T. Yang, "Distributed optimization with dynamic event-triggered mechanisms", *Proceedings of the IEEE/CDC*, pp. 969–974, Miami, FL, USA, Jan. 2019, doi: 10.1109/CDC.2018.8619311.
- [50] T. Xu, X. Yi, Z. Duan, G. Chen and G. Wen, "Dynamic event-triggering mechanism and its application to dynamic average tracking", *IEEE Trans. on Automatic Control*, doi: 10.1109/TAC.2024.3524432.
- [51] F. Tang, H. Wang, X.H. Chang, L. Zhang and K.H. Alharbi, "Dynamic event-triggered control for discrete-time nonlinear Markov jump systems using policy iteration-based adaptive dynamic programming", *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 49, Article Number: 101338, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.nahs.2023.101338.
- [52] A. Girard, "Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 60, pp. 1992–1997, Nov. 2014, doi: 10.1109/TAC.2014.2366855.
- [53] O. Naifar, A.B. Makhlof, L. Mchiri and M. Rhaima, "Finite time stability for Hadamard fractional-order systems", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 16, no. 2, Article Number: 103263, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103263.

- [54] R. Agarwal, S. Hristova, D. O'Regan, "Basic concepts of riemann–liouville fractional differential equations with non-instantaneous impulses", *Symmetry*, vol. 11, no. 5, Article Number: 614, May 2019, doi: 10.3390/sym11050614
- [55] Y. Zhan, S. Sui and S. Tong, "Adaptive fuzzy decentralized dynamic surface control for fractional-order nonlinear large-scale systems", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 30, pp. 3373–3383, Sep. 2021, doi: 10.1109/TFUZZ.2021.3114746.
- [56] A.B. Albidah, "Application of riemann–liouville derivatives on second-order fractional differential equations: The exact solution. fractal and fractional", vol. 7, no. 12, Article Number: 843, Nov. 2023, doi: 10.3390/fractalfract7120843.
- [57] A. Naderolasli, M. Hashemi and K.H. Shojaei, "Approximation-based adaptive fault compensation backstepping control of fractional-order nonlinear systems: an output-feedback scheme", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 34, no. 3, pp. 298–313, Mar. 2020, doi: 10.1002/acs.3084.
- [58] R. Kavikumar, O.M. Kwon, S.H. Lee and R. Sakthivel, "Input-output finite-time IT2 fuzzy dynamic sliding mode control for fractional-order nonlinear systems", *Nonlinear Dyn.*, vol. 108, no. 4, pp. 3745–3760, June 2022, doi: 10.1007/s11071-022-07442-2.
- [59] N. Aguila-Camacho, M.A. Duarte-Mermoud and J.A. Gallegos, "Lyapunov functions for fractional order systems", *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, vol. 19, no. 9, pp. 2951–7, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.cnsns.2014.01.022.
- [60] J. Ren and C. Wu, "The asymptotic stability of caputo fractional order switching systems with only continuous vector field functions", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 81345–81351, March 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069475.
- [61] C. Wu, "Lyapunov stability theory for caputo fractional order systems: The system comparison method", *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 71, no. 6, pp. 3196–3200, June 2024, doi: 10.1109/TCSII.2023.3305316.
- [62] Z. Ma and H. Ma, "Adaptive fuzzy backstepping dynamic surface control of strict-feedback fractional-order uncertain nonlinear systems", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 122–133, Feb. 2019, doi: 10.1109/TFUZZ.2019.2900602.
- [63] Y. Wei, P.W. Tse, Z. Yao and Y. Wang, "Adaptive backstepping output feedback control for a class of nonlinear fractional order systems", *Nonlinear Dyn.*, vol. 86, pp. 1047–1056, Oct. 2016, doi: 10.1007/s11071-016-2945-4.
- [64] M.A.M. Sadik, M.A. Shaipul, K. Bingi, P.A. Devan and A. Ali, "Fractional-order model predictive controller for process plant's robust performance", *Proceedings of the IEEE/ISCAIE*, pp. 451–456, Penang, Malaysia, May 2024, doi: 10.1109/ISCAIE61308.2024.10576430.
- [65] R.P. Devi and I.T. Singh, "Fractional calculus operators in physical models: a comprehensive interpretation", *International Journal of Research in Science and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 26–49, 2025. doi: 10.37648/ijrst.v15i01.002.
- [66] A. Khurshaid and H. Khurshaid, "Comparative analysis and definitions of fractional derivatives," *Journal of Biomedical Research and Environmental Sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 1684–1688, Dec. 2023, doi: 10.37871/jbres1852.
- [67] J. Zhou, C. Wen, W. Wang and F. Yang, "Adaptive backstepping control of nonlinear uncertain systems with quantized states", *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 64, no. 11, pp. 4756–4763, Mar. 2019, doi: 10.1109/TAC.2019.2906931.
- [68] Y.X. Li, M. Wei and S. Tong, "Event-triggered adaptive neural control for fractional-order nonlinear systems based on finite-time scheme", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 52, no. 9, pp. 9481–9489, Mar. 2021, doi: 10.1109/TCYB.2021.3056990.

- [69] Y. Cao, Y. Li, W. Ren and Y. Chen, "Distributed coordination of networked fractional-order systems", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, vol. 40, no. 2, pp. 362–370, Jul. 2009, doi: 10.1109/TSMCB.2009.2024647.
- [70] M. Gholami, M. Mallaki, "Increase flexibility and improve resilience in smart microgrids by coordinating storage resources and distributed generation during contingencies", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 12, no. 45, pp. 45-60, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.692050 [in Persian].
- [71] S. Nemati, M. Sadeghzadeh, M. Ganjoo, "Use of classification models for optimize link prediction in the ego-social networks", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 10, no. 39, pp. 53-68, 2021, dor: 20.1001.1.29809231.1400.10.39.5.7 [in Persian].
- [72] X. Dong, B. Yu, Z. Shi and Y. Zhong, "Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 23, no. 1, pp. 340–348, Apr. 2014, doi: 10.1109/TCST.2014.2314460.
- [73] B. Wang and A. Loria, "Leader-follower formation and tracking control of underactuated surface vessels", arXiv preprint arXiv:2407.18844, Jul. 2024 doi: 10.48550/arXiv.2407.18844.
- [74] J. Sui, C. Liu, B. Niu, X. Zhao, D. Wang and B. Yan, "Prescribed performance adaptive containment control for full-state constrained nonlinear multiagent systems: A disturbance observer-based design strategy", IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, vol. 22, pp. 179–190, June 2024, doi: 10.1109/TASE.2023.3348978.
- [75] T. Balch and R.C. Arkin, "Behavior-Based Formation Control for Multi-Robot Teams", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 14, no. 6, pp. 926–939, Dec. 1998, doi: 10.1109/70.736776.
- [76] M.A. Lewis and K.H. Tan, "High precision formation control of mobile robots using virtual structures", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 18, no. 1, pp. 113–125, Feb. 2002, doi: 10.1109/70.988979.
- [77] Z. Li, Z. Duan, W. Ren and G. Feng, "Containment control of linear multi-agent systems with multiple leaders of bounded inputs using distributed continuous controllers", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 25, no. 13, pp. 2101–2121, Sep. 2015, doi: 10.1002/rnc.3195.
- [78] P. Ali, M. Rehan, W. Ahmed, A. Basit and I. Ahmed., "A novel output feedback consensus control approach for generic linear multi-agent systems under input saturation over a directed graph topology", ISA Transactions, vol. 148, pp. 128–139, May 2024, doi: 10.1016/j.isatra.2024.02.029.
- [79] F. Muñoz, "Leader–follower consensus control for a class of nonlinear multi-agent systems using dynamical neural networks", Neurocomputing, vol. 561, pp. 126888, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.neucom.2023.126888.
- [80] J. Huang, W. Wang, C. Wen, J. Zhou and G. Li, "Distributed adaptive leader–follower and leaderless consensus control of a class of strict-feedback nonlinear systems: A unified approach", Automatica, vol. 118, Article Number: 109021 Aug. 2020, doi: 10.1016/j.automatica.2020.109021.
- [81] J. Yi, J. Li and Z. Zhang, "Fixed-time connectivity-preserving consensus of periodically disturbed nonlinear multi-agent systems with limited communication ranges", ISA Transactions, vol. 138, pp. 291–300, July 2023, doi: 10.1016/j.isatra.2023.03.001.
- [82] S.A. Samy and P. Anbalagan, "Disturbance observer-based integral sliding-mode control design for leader-following consensus of multi-agent systems and its application to car-following model", Chaos, Solitons and Fractals, vol. 174, p. 113733, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.chaos.2023.113733.
- [83] M. Rehan, M. Tufail and S. Ahmed, "Leaderless consensus control of nonlinear multi-agent systems under directed topologies subject to input saturation using adaptive event-triggered mechanism", Journal of the Franklin Institute, vol. 358, no. 12, pp. 6217–6239, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jfranklin.2021.06.014.

- [84] M. Rehan, A. Ahmed and N. Iqbal, "Static and low order anti-windup synthesis for cascade control systems with actuator saturation: an application to temperature-based process control", *ISA Transactions*, vol. 49, no. 3, pp. 293–301, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.isatra.2010.03.003.
- [85] N. Us Saqib, M. Rehan, M. Hussain, N. Iqbal and H. Ur Rashid, "Delay-range-dependent static anti-windup compensator design for nonlinear systems subjected to input-delay and saturation", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 354, no. 14, pp. 5919–5948, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jfranklin.2017.07.028.
- [86] S.H. Mali, M. Tufail, M. Rehan and S. Ahmed, "State and output feedback local control schemes for nonlinear discrete-time 2-D Roesser systems under saturation, quantization and slope restricted input", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 423, p. 126965, June 2022, doi: 10.1016/j.amc.2022.126965.
- [87] G. Dong, H. Li, H. Ma and R. Lu, "Finite-Time Consensus Tracking Neural Network FTC of Multi-Agent Systems", *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 653–662, Feb. 2021, doi: 10.1109/TNNLS.2020.2978898.
- [88] W. Wu, Y. Li and S. Tong, "Neural Network Output-Feedback Consensus Fault-Tolerant Control for Nonlinear Multiagent Systems with Intermittent Actuator Faults", *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 34, no. 8, pp. 4728–4740, Aug. 2023, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3117364.
- [89] D.V. Dimarogonas and K.H. Johansson, "Event-triggered cooperative control", *Proceedings of the IEEE/ECC*, pp. 3015–3020, Budapest, Hungary, Dec. 2009, doi: 10.23919/ECC.2009.7074867.
- [90] D.V. Dimarogonas and K.H. Johansson, "Event-triggered control for multi-agent systems", *Proceedings of the IEEE/CDC*, pp. 7131–7136, Shanghai, China, Dec. 2009, doi: 10.1109/CDC.2009.5399776.
- [91] N. Zhang, J. Xia, T. Liu, C. Yan and X. Wang, "Dynamic event-triggered adaptive finite-time consensus control for multi-agent systems with time-varying actuator faults", *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 20, pp. 7761–7783, Jan. 2023, doi: 10.3934/mbe.2023335.
- [92] J. Zhang and S. Tong, "Event-triggered fuzzy adaptive output feedback containment fault-tolerant control for nonlinear multi-agent systems against actuator faults", *European Journal of Control*, p. 100887, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ejcon.2023.100887.
- [93] L. Cao, H. Li, G. Dong and R. Lu, "Event-triggered control for multiagent systems with sensor faults and input saturation", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 6, pp. 3855–3866, June 2021, doi: 10.1109/TSMC.2019.2938216.
- [94] C.E. Ren, J. Zhang and Y. Guan, "Prescribed Performance Bipartite Consensus Control for Stochastic Nonlinear Multiagent Systems Under Event-Triggered Strategy", *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. 53, no. 1, pp. 468–482, Jan. 2023, doi: 10.1109/TCYB.2021.3119066.
- [95] S.J. Yoo, "Distributed event-triggered output-feedback synchronized tracking with connectivity-preserving performance guarantee for nonstrict-feedback nonlinear multiagent systems", *Information Sciences*, vol. 624, pp. 451–466, May 2023, doi: 10.1016/j.ins.2022.12.087.
- [96] H. Zhou, S. Sui and S. Tong, "Finite-time adaptive fuzzy prescribed performance formation control for high-order nonlinear multiagent systems based on event-triggered mechanism", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 1229–1239, Aug. 2022, doi: 10.1109/TFUZZ.2022.3197938.
- [97] K. Chen, Y. Gu, H. Lin, Z. Zhang, X. Zhou and X. Wang, "Guaranteed Performance Event-Triggered Adaptive Consensus Control for Multiagent Systems under Time-Varying Actuator Faults", *Mathematics*, vol. 12, no. 10, p. 1528, May 2024, doi: 10.3390/math12101528.
- [98] G.H. Xu, M. Chi, D.X. He, Z.H. Guan, D.X. Zhang and Y. Wu, "Fractional-order consensus of multi-agent systems with event-triggered control", *Proceeding of the IEEE/ICCA*, pp. 619–624, Taichung, Taiwan, June 2024, doi: 10.1109/ICCA.2014.6870991.

- [99] B. Xu and B. Li, "Dynamic Event-Triggered Consensus for Fractional-Order Multi-Agent Systems without Intergroup Balance Condition", *Fractals and Fractional*, vol. 7, no. 3, p. 268, Mar. 2023, doi: 10.3390/fractalfract7030268.
- [100] F. Wang and Y. Yang, "Leader-following consensus of nonlinear fractional-order multi-agent systems via event-triggered control", *International Journal of Systems Science*, vol. 48, no. 3, pp. 571–577, Feb. 2016, doi: 10.1080/00207721.2016.1193258.
- [101] M. Shi, S. Hu and Y. Yu, "Generalised exponential consensus of the fractional-order nonlinear multi-agent systems via event-triggered control", *International Journal of Systems Science*, vol. 50, no. 6, pp. 1244–1251, Apr. 2019, doi: 10.1080/00207721.2019.1598510.
- [102] Y. Ye, H. Su and Y. Sun, "Event-triggered consensus tracking for fractional-order multi-agent systems with general linear models", *Neurocomputing*, vol. 315, pp. 292–298, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2018.07.024.
- [103] F. Wang and Y. Yang, "On leaderless consensus of fractional-order nonlinear multi-agent systems via event-triggered control", *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, vol. 24, no. 3, pp. 353–367, Apr. 2019, doi: 10.15388/NA.2019.3.3.
- [104] T. Hu, Z. He, X. Zhang and S. Zhong, "Leader-following consensus of fractional-order multi-agent systems based on event-triggered control", *Nonlinear Dynamics*, vol. 99, pp. 2219–2232, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11071-019-05390-y.
- [105] L. Luo, W. Mi and S. Zhong, "Adaptive consensus control of fractional multi-agent systems by distributed event-triggered strategy", *Nonlinear Dynamics*, vol. 100, no. 2, pp. 1327–1341, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11071-020-05586-7.
- [106] P. Xiao and Z. Gu, "Adaptive event-triggered consensus of fractional-order nonlinear multi-agent systems", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 213–220, Dec. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3136892.
- [107] J. Yuan and T. Chen, "Switched fractional order multiagent systems containment control with event-triggered mechanism and input quantization", *Fractals and Fractional*, vol. 6, no. 2, p. 77, Jan. 2022, doi: 10.3390/fractalfract6020077.
- [108] T. Chen and J. Yuan, "Command-filtered adaptive containment control of fractional-order multi-agent systems via event-triggered mechanism", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 45, no. 9, pp. 1646–1660, June 2023, doi: 10.1177/01423312221137618.
- [109] L. Wang and J. Dong, "Adaptive fuzzy consensus tracking control for uncertain fractional-order multiagent systems with event-triggered input", *IEEE Trans. Fuzzy System*, vol. 30, no. 2, pp. 310–320, Nov. 2020, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.3037957.
- [110] L. Hu and H. Yu, "Event-triggered finite-time tracking control for fractional-order multi-agent systems", *Applied Artificial Intelligence*, vol. 37, no. 2, pp. 145–162, Feb. 2023, doi: 10.1080/08839514.2023.2166689.
- [111] Y. Liu, H. Zhang, J. Sun and Y. Wang, "Event-triggered adaptive finite-time containment control for fractional-order nonlinear multiagent systems", *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1250–1260, Oct. 2022, doi: 10.1109/TCYB.2022.3208124.
- [112] X. Zhang, J. Shi, H. Liu and F. Chen, "Adaptive fuzzy event-triggered cooperative control for fractional-order delayed multi-agent systems with unknown control direction", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 220, pp. 552–566, June 2024, doi: 10.1016/j.matcom.2024.02.007.
- [113] L. Hu, H. Yu and X. Xia, "Fuzzy adaptive tracking control of fractional-order multi-agent systems with partial state constraints and input saturation via event-triggered strategy", *Information Sciences*, vol. 646, Article Number: 119396, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ins.2023.119396.

- [114] X. Li, J. Bai, G. Wen and X. Xia, "Observer-based bipartite consensus tracking of nonlinear fractional-order multi-agent systems with pull-based dynamic event-triggered mechanism", Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 47, no. 1, pp. 182-193, Apr. 2024, doi: 10.1177/01423312241239216.
- [115] G. Narayanan, M. Baskar, V. Gokulakrishnan and S. Ahn, "Dynamic adaptive event-triggered mechanism for fractional-order nonlinear multi-agent systems with actuator saturation and external disturbances: application to synchronous generators", Mathematics, vol. 13, no. 3, pp. 524, Feb. 2025, doi: 10.3390/math13030524.

A Novel Approach to mmWave Transmission in Cooperative Massive MIMO Systems Based on NOMA Technology

Pouria Salehi¹  | Naser Parhizgar^{2*}  | Farshad Pesaran³ 

¹Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, pouria.salehi1414@iau.ir

²Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, parhizgar@iaushiraz.ac.ir

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

Correspondence

Naser Parhizgar, Associate Professor of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, parhizgar@iaushiraz.ac.ir

Main Subjects:

Massive MIMO systems

Paper History:

Received: 10 August 2023

Revised: 19 October 2023

Accepted: 18 December 2023

Abstract

With the increasing traffic in wireless networks, the need for new techniques to improve connectivity, bandwidth, and spectrum access is essential. The combination of massive multiple-input multiple-output (MIMO) and non-orthogonal multiple access (NOMA) technologies has been proposed as a promising solution to meet the increasing data rate demand, using the millimeter wave (mmWave) band and improving system performance. In this research, a mmWave transmission method based on NOMA technology and massive MIMO with a cooperative structure and distributed antenna is presented. The problem of optimizing the total rate in the proposed system is considered under the constraints of the same power and total power of the base station. In order to reduce the complexity of the proposed method, the maximum ratio combining method based on the repetitive strategy (MRC-RS) was used. The main problem in achieving multi-user gain in massive MIMO systems is the dependence on channel state information (CSI). To solve this problem, insertion division multiple access (IDMA) and data-aided channel estimation (DACE) were proposed. Simulation results show that the proposed method performs better than other previous methods in terms of energy efficiency, and spectrum efficiency. Also, the proposed method has achieved significant performance against the pilot contamination problem and reduced complexity in the receiver.

Keywords: Distributed antenna, Interleave division multiple access, Non-orthogonal multiple access, Massive MIMO, mmWave

Highlights

- Significantly reducing the computational complexity by utilizing MRC-RS.
- Applying the DACE method in the mmWave communication environment, to increase the estimation accuracy and improve the system performance in difficult channel conditions.
- Enhancing the system stability against pilot contamination using the proposed architecture.

Citation: P. Salehi, N. Parhizgar, and F. Pesaran, "A Novel Approach to mmWave Transmission in Cooperative Massive MIMO Systems Based on NOMA Technology," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 96–125, 2026, doi:10.30495/jce.2023.1994457.1218 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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 increasing number of devices connected to wireless networks, the growth of data traffic, and the diversification of user-demanded services in recent years have made it essential to develop efficient service delivery to a large number of users while minimizing resource consumption [1]. Improving spectral efficiency, energy efficiency, network capacity, reliability, reducing latency, and so on are among the fundamental requirements of next-generation cellular networks. Emerging applications such as the Internet of Things (IoT), machine-to-machine (M2M) communications, self-organizing networks, green communications, and the ever-increasing number of mobile phones and tablets clearly highlight this issue [2, 3]. From a broader perspective, over time, providing services based on current techniques not only fails to fully meet the requested traffic demands but also becomes less cost-effective for operators. Current techniques lack the necessary efficiency for this purpose, necessitating a reevaluation of information storage, processing, and transmission techniques. Serving such a volume of traffic, coupled with the need for very low latency in some cases, are among the main challenges facing fifth-generation (5G) networks and beyond [4]. Therefore, we observe that in the coming years, we will face a significant increase in demand for higher data rates. Hence, one of the issues that must be addressed in future-generation telecommunication systems is responding to this level of demand.

One of the methods that has recently attracted considerable attention from researchers and is considered a critical candidate for future-generation systems is Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) [5, 6]. Unlike Orthogonal Multiple Access (OMA) techniques, NOMA can efficiently serve a large number of users in shared time-frequency resources without increasing bandwidth. This leads to increased system capacity, improved spectral efficiency, energy efficiency, reduced latency, and more [7, 8]. The core idea of NOMA is to allocate non-orthogonal resources among different users, which increases receiver complexity due to the need for non-orthogonal signal separation [9]. NOMA systems can be integrated with Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems, where each base station has M antennas and each receiver has N antennas. MIMO systems, by employing multiple antennas at the base station, enhance the spatial domain for signal processing, leading to increased capacity and improved system performance. In general, the greater the number of antennas at the base station, the higher the spatial degrees of freedom, which improves multiplexing gain and enables serving a large number of users in shared time-frequency resources. On the other hand, NOMA also enhances system capacity by serving multiple users in shared resource blocks. Therefore, integrating these two technologies can significantly improve system performance [10, 11]. Additionally, the need for larger bandwidths requires moving to higher frequencies, particularly the millimeter wave (mmWave) spectrum, with carrier frequencies ranging from 30 to 300 GHz [12, 13]. These high frequencies necessitate the use of a large number of antennas to overcome path loss.

The severe path loss of mmWave channels and their limited penetration capabilities necessitate the redesign of multiple access techniques, especially when aiming to support massive connectivity in ultra-dense networks where hundreds or thousands of users need to be served in a small area. Additionally, the use of mmWave enables directional communications, which ensures that transmissions in the mmWave spectrum reduce interference and achieve higher data rates. Recently, significant research efforts have been devoted to exploring the application of NOMA in 5G systems to achieve optimal solutions [14, 15]. In [16], a power allocation scheme for each user is proposed to mitigate both inter-beam and intra-beam interference. By formulating the power allocation problem while considering all relevant constraints, the problem is transformed into a dual problem using Lagrangian duality, and the optimal power allocation is obtained with the optimal dual value. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can achieve better spectral efficiency compared to existing methods, and the massive MIMO-NOMA system outperforms the MM-OMA system.

In [17], an optimization problem is analyzed to maximize the sum rate under constraints such as transmit power, quality of service (QoS), minimum power gap, and maximum user limits per subchannel. For the NOMA network, subchannel allocation and power allocation are treated as two-stage problems to ensure that the proposed method can be solved in polynomial time. After obtaining the subchannel allocation, upper bounds for QoS and minimum power gap constraints are calculated separately for each subchannel. The intersection of these upper bounds is then used to determine the power allocation. In [18], the sum rate and outage probability are analyzed in a dynamic NOMA system. The maximum sum rate of the system is achieved using the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) technique. A comparison of the sum rate between dynamic NOMA and static NOMA systems is also presented. In [19], a trade-off between energy efficiency and spectral efficiency in downlink MIMO-NOMA systems under equal rate constraints is investigated. Maximum fairness in the MIMO-NOMA system is achieved by ensuring equal data rates for all active users in the system. The optimization problem is solved using the ϵ -constraint (ϵ -C) method combined with nonlinear programming techniques, such as sequential quadratic programming and the Dinkelbach method. Numerical results demonstrate the ability of the ϵ -C method to find a trade-off between energy efficiency and spectral efficiency on the Pareto frontier. In [20], to support secure transmission, a beamforming-based transmission scheme in NOMA is proposed to maximize the sum transmission rate of a base station with sufficient and insufficient transmit power. For base stations with sufficient transmit power, an artificial noise-based beamforming method is proposed without affecting legitimate transmissions. Furthermore, for base stations with insufficient transmit power, a modified successive interference cancellation (SIC) decoding

order is used to reduce the impact of artificial noise on legitimate transmissions. Specifically, an iterative algorithm is proposed to convexify the sequence for joint optimization of beamforming vectors and artificial noise. In [21], a mmWave MIMO–NOMA system is introduced in which cooperative structures and distributed antennas are integrated under the concept of a virtual cell to enhance both spectral and energy efficiency. In this framework, each user selects a set of neighboring antennas to form its own virtual cell, thereby benefiting from spatial diversity and the high directionality inherent to mmWave propagation. Although this study incorporates distributed architectures with NOMA and MIMO techniques in the mmWave domain, its analytical scope remains largely confined to introducing the virtual-cell concept and conducting preliminary evaluations of sum-rate, spectral efficiency, and energy efficiency. Critical aspects—such as advanced resource-allocation optimization, rigorous modeling of computational complexity, and the integration of emerging multiple-access schemes—remain underdeveloped. Consequently, the framework proposed in [21] requires further refinement and methodological enhancement to meet the operational demands and challenges of massive MIMO deployments in mmWave environments. Building upon the preliminary ideas presented in [21], the present study proposes an enhanced and comprehensive framework for mmWave transmission in massive MIMO systems. The principal contributions of this work include:

Employing a maximum ratio combining method based on the repetitive strategy (MRC-RS) to improve multi-user performance while significantly reducing computational cost.

Integrating a data-aided channel estimation (DACE) scheme to increase channel-estimation accuracy in challenging mmWave environments.

Developing an advanced power-allocation model capable of mitigating pilot contamination in cooperative distributed architectures.

Accordingly, this paper substantially extends the system objectives, methodological foundations, channel modeling strategy, mathematical formulation, optimization tools, and implementation details beyond those presented in [21]. Moreover, the simulation scenarios and analytical investigations conducted herein explore more advanced performance dimensions—including the impact of distributed architectures on channel-estimation quality, the notable reduction of computational complexity, the benefits of data-aided channel estimation for improving estimation reliability under harsh channel conditions, and the strengthened robustness against pilot contamination—none of which were addressed in the earlier study.

Collectively, this work not only complements prior research but also establishes an independent and advanced framework for mmWave transmission in massive MIMO systems integrating NOMA and IDMA. Furthermore, given that achieving multi-user gains in massive MIMO architectures critically depends on accurate channel-state information, the proposed combination of IDMA and the DACE framework serves as an effective solution to this fundamental challenge.

2. Innovation and contributions

In this paper, to reduce system complexity, the proposed method divides cellular networks into multiple cells. In this approach, users in each cell are served by a base station located at the center of the cell. The proposed distributed antenna system offers efficient use of spatial resources compared to traditional array antennas. To further reduce complexity, the maximum ratio combining based on repetitive strategy (MRC-RS) method is employed. The main challenge in achieving multiuser gain in massive MIMO systems is the dependence on channel state information. To address this issue, Interleave-Division Multiple Access (IDMA) and Data-Aided Channel Estimation (DACE) techniques have been proposed. These methods aim to improve channel estimation accuracy and reduce the overhead associated with acquiring channel state information, thereby enhancing the overall performance of massive MIMO systems. Among the innovations of this paper, the following can be stated:

- Improving system performance in terms of user energy efficiency, and spectral efficiency by 5%, and 9%, respectively, compared to previous methods.
- Reducing system complexity in the proposed method using MRC-RS.
- Enhancing the performance of the proposed method against the pilot contamination issue by approximately 21% compared to previous methods.

3. Materials and Methods

In this study, a virtual-cell-based distributed antenna system (DAS) utilizing mmWave transmission is proposed. In this model, a base station equipped with omnidirectional antennas is deployed within a circular area to serve users. Each user is independently served through its own virtual cell, while multiple users are grouped together and jointly utilize their virtual cells. The adopted channel model follows the Saleh-Valenzuela framework, which accounts for multipath components with specific time delays and attenuated amplitudes. This model incorporates both line-of-sight (LoS) and non-line-of-sight (NLoS) components. The proposed system leverages a collaborative structure with distributed antennas, which are spatially dispersed and operate in a coordinated manner. This configuration enables high-speed data transmission with improved signal quality while mitigating interference in dense environments. To further reduce inter-user interference, an IDMA technique is employed. By assigning

distinct interleavers to different users, IDMA facilitates user separation and enhances resistance against interference and fading. For improved signal reception, MRC-RS is utilized. This method combines multiple received signals to maximize the signal-to-noise ratio (SNR), effectively mitigating fading effects. Finally, an iterative DACE technique is implemented to estimate the channel response and enhance the received signal quality. By leveraging known data symbols, this approach accurately estimates the channel response and aids in signal equalization.

4. Results and Discussion

In this section, the performance of the proposed method, based on mmWave transmission and a cooperative antenna structure, is evaluated in terms of energy efficiency, and spectral efficiency. Simulation results demonstrate that the proposed method outperforms other existing approaches.

A) Spectral Efficiency:

- The proposed method delivers higher spectral efficiency compared to other methods such as fully digital M-MIMO, beamspace M-MIMO, and beamspace NOMA-MM.
- As the SNR increases, the spectral efficiency of the proposed method improves significantly.
- For a larger number of users ($K \gg 1$), the proposed method performs exceptionally well, whereas other methods like beamspace M-MIMO show degraded performance with increasing users.

B) Energy Efficiency:

- The proposed method, utilizing distributed antennas and a cooperative structure, achieves higher energy efficiency compared to other methods such as [22, 23, 24].
- With increasing SNR, the energy efficiency of the proposed method improves, and the performance gap with other methods becomes more pronounced at higher SNR levels.
- As the number of users grows, the performance gap between the proposed method and other approaches widens, stabilizing after approximately 40 users.

C) Data-Aided Channel Estimation (DACE):

- The DACE-MRC-RS method converges quickly and outperforms other methods such as MRC and ZF.
- As β (inter-cell interference coefficient) increases, the performance of DACE-MRC-RS improves, further widening the gap with other methods.

D) Effect of Pilot Contamination:

- The proposed DACE-MRC-RS method demonstrates superior performance in the presence of pilot contamination compared to other methods like MRC and ZF.
- DACE-MRC-RS exhibits significantly lower γ (power cost due to pilot contamination), indicating its reduced sensitivity to pilot contamination.
- This improvement is attributed to the increased effective pilot length and reduced correlation between pilots of different users.

5. Conclusion

In this study, a mmWave communication structure for MM-NOMA systems is investigated, wherein multiple users share a common resource block (time and frequency domains) and are assigned different power levels. Since users operate over shared resources, intra-cluster and inter-cluster interference are inevitable—interference that, if not properly managed, can severely degrade data-rate performance, link reliability, and overall network efficiency. One of the key strategies for interference mitigation lies in the optimal configuration of the virtual-cell size. The conducted analyses reveal that achieving maximum ratio transmission for users within virtual cells requires selecting a relatively small virtual-cell size; otherwise, a larger virtual cell would compel users to share base-station antennas, thereby increasing interference and degrading system performance. Consequently, the design of the virtual-cell size must be dynamic and adaptive to channel conditions and user density. Another fundamental challenge in massive MIMO and mmWave systems is the lack of accurate channel state information (CSI). Most existing schemes exhibit suboptimal performance under such conditions. To address this issue, the present work adopts a hybrid solution based on IDMA and DACE, which not only mitigates interference but also reduces the system's dependence on highly accurate channel estimation. Simulation results and numerical analyses demonstrate that the proposed approach significantly outperforms conventional methods in terms of energy efficiency, spectral efficiency, and robustness against pilot contamination. These findings confirm that integrating NOMA-based cooperative structures with intelligent resource-allocation mechanisms and advanced multi-user detection can substantially enhance the performance of mmWave networks.

6. Acknowledgement

This research has received no external funding.

References

- [1] J. C. Lin, "Synchronization Requirements for 5G: An Overview of Standards and Specifications for

- Cellular Networks,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 91-99, Sept. 2018, doi: [10.1109/MVT.2018.2813339](https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2813339).
- [2] M. Abbasi, A. Shahraki, H. R. Barzegar, and C. Pahl, “Synchronization Techniques in Device to Device- and Vehicle to Vehicle-Enabled Cellular Networks: A survey,” *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, p. 106955, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.compeleceng.2020.106955](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106955).
- [3] H. Fourati, R. Maaloul, L. Chaari, and M. Jmaiel, “Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5G networks,” *Computer Networks*, vol. 199, p. 108435, Sept. 2021, doi: [10.1016/j.comnet.2021.108435](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108435).
- [4] A. Azab, M. Khasawneh, S. Alrabaee, K. R. Choo, and M. Sarsour, “Network traffic classification: Techniques, datasets, and challenges,” *Digital Communications and Networks*, Sept. 2022, doi: [10.1016/j.dcan.2022.09.009](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.009).
- [5] A. Akbar, S. Jangsher, and F. A. Bhatti, “NOMA and 5G emerging technologies: A survey on issues and solution techniques,” *Computer Networks*, vol. 190, p. 107950, May 2021, doi: [10.1016/j.comnet.2021.107950](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107950).
- [6] U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, and M. Naeem, “NOMA and future 5G & B5G wireless networks: A paradigm,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 204, p. 103413, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.jnca.2022.103413](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103413).
- [7] S. C. Rajendran and P. Sudheesh, “Sum Data Rate and Energy Efficiency optimization of MIMO NOMA using CDNN,” *Proceeding of the IEEE/ICCCSP*, Chennai, India, May 2021, pp. 1-7, doi: [10.1109/ICCCSP52374.2021.9465525](https://doi.org/10.1109/ICCCSP52374.2021.9465525).
- [8] U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, M. Naeem, and I. Rashid, “Energy Efficiency Optimization for Hybrid NOMA based Beyond 5G Heterogeneous Networks,” *Proceeding of the IEEE/VTC2021-Fall*, Sept. 2021, pp. 1-5, doi: [10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625334](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625334).
- [9] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, “A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017, doi: [10.1109/JSAC.2017.2725519](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519).
- [10] Y. Dursun, K. Wang, and Z. Ding, “Secrecy sum rate maximization for a MIMO-NOMA uplink transmission in 6G networks,” *Physical Communication*, vol. 53, p. 101675, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.phycom.2022.101675](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101675).
- [11] M. Zeng *et al.*, “On the Sum Rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 534-537, Aug. 2017, doi: [10.1109/LWC.2017.2712149](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2712149).
- [12] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Feb. 2014, doi: [10.1109/JPROC.2014.2299397](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397).
- [13] B. De Beelde, M. Vantorre, G. Castellanos, M. Pickavet, and W. Joseph, “MmWave Physical Layer Network Modeling and Planning for Fixed Wireless Access Applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1-24, Feb. 2023, doi: [10.3390/s23042280](https://doi.org/10.3390/s23042280).
- [14] R. H. Y. Perdana, T. V. Nguyen, and B. An, “Adaptive User Pairing in Multi-IRS-aided Massive MIMO-NOMA Networks: Spectral Efficiency Maximization and Deep Learning Design,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 7, pp. 4377-4390, July 2023, doi: [10.1109/TCOMM.2023.3277533](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3277533).
- [15] A. Gholamrezaee and H. Farrokhi, “Spectrum-efficient mode selection and fair resource allocation for D2D-enabled uplink/downlink MC-NOMA networks,” *Digital Signal Processing*, vol. 137, p. 104050, June 2023, doi: [10.1016/j.dsp.2023.104050](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104050).
- [16] S. Wang, Y. Long, R. Ruby, and X. Fu, “Clustering and power optimization in mmWave massive MIMO-NOMA systems,” *Physical Communication*, vol. 49, p. 101469, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.phycom.2021.101469](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101469).

- [18] S. Trankatwar and P. Wali, "Subchannel and power optimization for sum rate maximization in downlink multicarrier NOMA networks," *Physical Communication*, vol. 58, p. 102050, June 2023, doi: [10.1016/j.phycom.2023.102050](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102050).
- [19] A. Pandey and P. Kumar, "Performance analysis of dynamic ordered NOMA system," *Digital Signal Processing*, vol. 133, p. 103865, March 2023, doi: [10.1016/j.dsp.2022.103865](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103865).
- [20] J. L. Jacob, C. A. Pendeza Martinez, A. L. Machado Martinez, and T. Abrão, "Non-linear biobjective EE-SE optimization for NOMA-MIMO systems under user-rate fairness and variable number of users per cluster," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 138, p. 153870, Aug. 2021, doi: [10.1016/j.aeue.2021.153870](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153870).
- [21] Y. Zhang *et al.*, "Secure beamforming designs for maximizing secrecy sum rate in MISO-NOMA networks," *Digital Communications and Networks*, May 2023, doi: [10.1016/j.dcan.2023.04.001](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.04.001).
- [22] P. Salehi, N. Parhizgar, and F. Pesaran, "A New Cooperative and Distributed Antenna Structure in Massive MIMO-NOMA Based on mmWave Transmission Scheme," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, p. 6717077, Oct. 2021, doi: [10.1155/2021/6717077](https://doi.org/10.1155/2021/6717077).
- [23] B. Wang, L. Dai, Z. Wang, N. Ge, and S. Zhou, "Spectrum and Energy-Efficient BeamSpace MIMO-NOMA for Millimeter-Wave Communications Using Lens Antenna Array," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2370-2382, Oct. 2017, doi: [10.1109/JSAC.2017.2725878](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725878).
- [24] X. Gao, L. Dai, Z. Chen, Z. Wang, and Z. Zhang, "Near-Optimal Beam Selection for BeamSpace MmWave Massive MIMO Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 1054-1057, March 2016, doi: [10.1109/LCOMM.2016.2544937](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2544937).
- [25] M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, "Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6325-6343, Aug. 2016, doi: [10.1109/ACCESS.2016.2604821](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2604821).

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

Author Contributions: **Pouria Salehi:** Software, methodology, writing original draft preparation, manuscript editing; **Naser Parhizgar:** Resources, 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.

رویکردی جدید برای انتقال موج میلیمتری در سیستم‌های مایمو انبوه مبتنی بر تکنولوژی دسترسی چندگانه غیرمتعامد

پوریا صالحی^۱ | ناصر پرهیزگار^{۲*} | فرشاد پسران^۳

چکیده:

با توجه به رشد ترافیک در شبکه‌های بی‌سیم، ارائه تکنیک‌های جدید برای تحقق اتصال گسترده، پهنای باند بیشتر و افزایش دسترسی به طیف را ضروری می‌سازد. ادغام معماری چندرودی چندخروجی (MIMO) انبوه و تکنولوژی دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA) به‌عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای گره‌گشایی تقاضای روزافزون نرخ داده از طریق گسترش فرکانس ارتباطی به باند موج میلیمتری و بهبود عملکرد سیستم در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، یک روش انتقال موج میلیمتری جدید با استفاده از فناوری NOMA و مایمو انبوه با ساختار مشارکتی و سیستم آنتن توزیع شده معرفی شده است. به‌منظور کاهش پیچیدگی روش پیشنهادی، از روش ترکیب حداکثر نسبت بر اساس استراتژی تکراری (MRC-RS) استفاده شد. مسئله اصلی در دستیابی به بهره چندکاربره در سیستم‌های مایمو انبوه وابستگی به اطلاعات وضعیت کانال است. برای حل این مسئله، دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری (IDMA) و تخمین کانال به کمک داده (DACE) ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از نظر بهره‌وری انرژی و بهره‌وری طیف به ترتیب حدود ۵٪ و ۹٪ بهبود نسبت به روش‌های پیشین ارائه می‌دهد. همچنین این روش در مقابله با آلودگی پایلوت و در کاهش پیچیدگی گیرنده عملکرد بهتری داشته و در مجموع حدود ۲۱٪ نسبت به روش‌های قبلی بهبود یافته است.

کلیدواژه‌ها: آنتن‌های توزیع شده، دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری، دسترسی چندگانه غیرمتعامد، مایمو انبوه، موج میلیمتری.

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

pouria.salehi1414@iau.ir

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

parhizgar@iaushiraz.ac.ir

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

farshad.pesaran@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*ناصر پرهیزگار، دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

parhizgar@iaushiraz.ac.ir

موضوع اصلی:

سیستم‌های مایمو انبوه

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۹ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۷ مهر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۷ آذر ۱۴۰۲

تازه‌های تحقیق:

- کاهش چشمگیر پیچیدگی محاسباتی از طریق بهره‌گیری از روش ترکیب حداکثر نسبت بر اساس استراتژی تکراری.
- به‌کارگیری روش تخمین کانال به کمک داده در محیط ارتباطی امواج میلی‌متری، به‌منظور افزایش دقت تخمین و بهبود عملکرد سیستم در شرایط کانال سخت.
- تقویت پایداری سیستم در برابر آلودگی پایلوت با استفاده از معماری پیشنهادی.

COPYRIGHTS

©2026 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

افزایش تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه‌های بی‌سیم، رشد ترافیک داده و متنوع شدن سرویس‌های مورد تقاضای کاربران در سالیان اخیر، توسعه سرویس‌دهی مطلوب به تعداد زیادی کاربر با مصرف حداقل منابع را ضروری می‌سازد [۱]. افزایش بهره‌وری طیفی^۱، بهره‌وری انرژی^۲، ظرفیت شبکه، قابلیت اطمینان، کاهش تأخیر و غیره از نیازمندی‌های اساسی شبکه‌های سلولی نسل جدید است. کاربردهای جدید نظیر اینترنت اشیا^۳، ارتباطات ماشین به ماشین^۴، شبکه‌های خودسامان، مخابرات سبز و نیز افزایش روزافزون تعداد تلفن‌های همراه و تبلت‌ها این مسئله را به‌خوبی نشان می‌دهد [۲، ۳]. در یک نگاه کلان، باگذشت زمان ارائه سرویس مبتنی بر تکنیک‌های کنونی، نه‌تنها ترافیک درخواستی را به‌طور کامل برطرف نمی‌کند؛ بلکه برای اپراتورها نیز مقرون‌به‌صرفه نیست. شکل ۱ دلایل عمده بازنگری سیستم‌های ارتباطی از دید کاربران و اپراتورها را نشان می‌دهد. در شکل ۱ (a) چالش عدم تعادل درآمد اپراتورهای تلفن همراه نسبت به ترافیک تحمیلی یکی از دلایل مهم بازنگری تکنیک‌های ارائه سرویس از دید اپراتورها است. شکل ۱ (b) روند روبه رشد تولید اطلاعات توسط کاربران را نشان می‌دهد که نیاز به ذخیره، پردازش و مخابره اطلاعات دارد. تکنیک‌های کنونی بازدهی مناسبی برای این کار ندارند و از این منظر نیازمند بازنگری در تکنیک ذخیره‌سازی، پردازش و مخابره اطلاعات هستیم. سرویس دادن به این حجم از ترافیک و در کنار آن نیاز به تأخیر بسیار کم در بعضی از موارد، از چالش‌های اصلی هستند که در برابر نسل پنجم و شبکه‌های فراتر از آن قرار دارند [۴]؛ بنابراین، مشاهده می‌کنیم که در سال‌های آینده با حجمی از افزایش قابل توجه تقاضای نرخ روبه‌رو هستیم. از این‌رو، از جمله مسائلی که باید در سیستم‌های مخابرات نسل آینده به آن توجه شود، پاسخ به این حجم از تقاضا است.

یکی از روش‌هایی که اخیراً بسیار مورد توجه محققین و پژوهشگران قرار گرفته است و به‌عنوان یک کاندید حیاتی برای سیستم‌های نسل‌های آتی معرفی شده، تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد^۵ (NOMA) است [۵، ۶] که برخلاف تکنیک‌های دسترسی چندگانه متعامد^۶ (OMA)، می‌تواند تعداد زیادی کاربر را در منابع مشترک زمان-فرکانس، بدون افزایش پهنای باند، به نحو مطلوب سرویس دهند. این امر، افزایش ظرفیت سیستم، افزایش بازدهی طیفی، بازدهی انرژی، کاهش تأخیر و غیره را به دنبال دارد [۷، ۸]. ایده اصلی NOMA این است که منابع غیرمتعامد در میان کاربران مختلف تخصیص داده شود که هزینه این کار افزایش پیچیدگی در سمت گیرنده است، چرا که باید جداسازی سیگنال غیرمتعامد را انجام دهد [۹]. سیستم‌های NOMA می‌تواند در سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی^۷ (MIMO) یا مایمو مورد استفاده قرار گیرد، جایی که هر ایستگاه پایه^۸ دارای M آنتن و هر گیرنده دارای N آنتن است. سیستم‌های مایمو، با استفاده از چند آنتنی کردن ایستگاه پایه، دامنه فضایی برای پردازش سیگنال را افزایش می‌دهند که منجر به افزایش ظرفیت و بهبود عملکرد سیستم می‌گردد. در حالت کلی، هرچه تعداد آنتن‌ها در ایستگاه پایه بیشتر باشد، درجه آزادی فضایی بیشتری فراهم می‌شود و این امر موجب افزایش بهره تسهیم و سرویس‌دهی به تعداد زیادی کاربر در منابع مشترک زمان-فرکانس می‌گردد. از طرف دیگر، سیستم NOMA نیز با سرویس‌دهی چندین کاربر در منابع بلوکی مشترک، باعث افزایش ظرفیت سیستم می‌گردد؛ بنابراین، با ادغام این دو فناوری می‌توان عملکرد سیستم را بهبود بخشید [۱۰، ۱۱]. از طرف دیگر، پهنای باندهای بزرگ نیاز به رفتن به فرکانس‌های بالاتر، به‌ویژه طیف میلیمتری^۹ (mmWave) فرکانس‌های حامل ۳۰ تا ۳۰۰ گیگاهرتز دارد [۱۲، ۱۳]. این فرکانس‌های بالا نیاز به آنتن‌های زیادی برای غلبه بر تلفات مسیر دارند.

کاهش شدید مسیر انتشار کانال‌های موج میلیمتری و قابلیت‌های نفوذ کم آن‌ها، طراحی مجدد تکنیک‌های چندگانه را ضروری می‌کند؛ به‌خصوص زمانی که با هدف حمایت از اتصال انبوه در شبکه‌های فوق متراکم^{۱۰}، جایی که صدها/هزاران کاربر باید در یک منطقه کوچک سرویس‌دهی کنند. همچنین، استفاده از موج میلیمتری سبب ارتباطات جهت‌دار می‌شود که این ویژگی

¹ Spectral Efficiency

² Energy Efficiency

³ Internet of Things

⁴ Vehicle-to-Vehicle

⁵ Non-Orthogonal Multiple Access

⁶ Orthogonal Multiple Access

⁷ Multiple-Input Multiple-Output

⁸ Base Stations

⁹ Millimeter Wave

¹⁰ Ultra-Dense Network

تضمین می‌کند که انتقال در طیف موج میلیمتری تداخل را کاهش می‌دهد و نرخ داده بالاتری را به دست می‌آورد. اخیراً فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه کاربرد NOMA در سیستم‌های نسل پنجم برای دستیابی به راه‌حل‌های بهینه انجام شده است [۱۴، ۱۵]. در [۱۶]، یک طرح تخصیص توان برای هر کاربر در نظر گرفته شده است که از تداخل بین پرتو و درون پرتو جلوگیری می‌کند. بدین صورت که پس از فرمول‌بندی مسئله تخصیص توان با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های مربوطه، از طریق قضیه دوگانگی لاگرانژ^۱ به یک مسئله دوگانه تبدیل می‌شود و سپس تخصیص توان بهینه با مقدار دوگانه بهینه به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که طرح پیشنهاد شده می‌تواند عملکرد بهتری از نظر بهره‌وری طیف در مقایسه با روش‌های موجود داشته باشد، و سیستم مایمو انبوه^۲ و NOMA (MM-NOMA) از سیستم MM-OMA بهتر عمل می‌کند. در [۱۸]، یک مسئله بهینه‌سازی را برای به حداکثر رساندن نرخ مجموع توان انتقال، کیفیت خدمات^۳، حداقل شکاف توان و حداکثر محدودیت‌های کاربران در هر کانال فرعی تجزیه و تحلیل شده است. به گونه‌ای که برای شبکه NOMA، تخصیص کانال فرعی و تخصیص توان به عنوان مسائل دومرحله‌ای در نظر گرفته شدند تا اطمینان حاصل شود که روش پیشنهاد شده می‌تواند در مسائل چندجمله‌ای حل شود. پس از به دست آوردن تخصیص کانال فرعی، کران‌های بالایی برای کیفیت خدمات و محدودیت‌های حداقل شکاف توان برای هر زیر کانال به‌طور جداگانه محاسبه شد. سپس از ناحیه مشترک بین این دو حد بالایی برای تعیین تخصیص توان استفاده گردید. در [۱۹]، تجزیه و تحلیل مجموع نرخ و احتمال قطع در یک سیستم NOMA پویا انجام شده است. حداکثر نرخ جمع سیستم با استفاده از تکنیک کروش کان تا کر^۴ انجام گرفت. همچنین مقایسه نرخ جمع بین سیستم NOMA پویا و سیستم NOMA ثابت انجام گرفت. در [۲۰]، یک شبکه سلولی فراسو تمام‌دوبلکس مبتنی بر NOMA بررسی شد که در آن با استفاده از شکل‌دهی پرتو اعمال صفر^۵ (ZF) در ایستگاه پایه چندآنتنی، خودتداخل حذف و نرخ مجموع سیستم بیشینه می‌شود. دو طرح دریافت ZF و انتقال ZF برای لغو خودتداخل پیشنهاد شده و بیان فرم بسته احتمال قطع کاربران نزدیک و دور استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد آنتن‌ها عملکرد قطع را به‌ویژه برای کاربر دور در طرح دریافت ZF بهبود می‌دهد. در [۲۱]، یک مصالحه بین بهره‌وری انرژی و بهره‌وری طیف در سیستم‌های MIMO-NOMA فروسو^۶ تحت محدودیت نرخ برابر مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر عدالت در سیستم MIMO-NOMA زمانی حاصل می‌شود که از نرخ داده یکسان برای همه کاربران فعال در سیستم اطمینان حاصل شود. مسئله بهینه‌سازی با استفاده از روش مقیاس‌پذیری ϵ -C همراه با تکنیک‌های برنامه‌نویسی غیرخطی، به عنوان برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی و روش دینکلک^۷ حل شد. نتایج عددی توانایی روش ϵ -C را در یافتن مصالحه بین بهره‌وری انرژی و بهره‌وری طیف در مرز پارتو^۸ نشان می‌دهد. در [۲۲]، یک شبکه ناهمگون مبتنی بر سلول‌های کوچک با استفاده از NOMA و حذف تداخل متوالی^۹ (SIC) مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن چالش‌هایی مانند تداخل هم‌کانال، عدم توازن بار ترافیکی و مصرف بالای انرژی ناشی از تحرک کاربران، مسئله بهینه‌سازی دگرسپاری در مسیر بالارونده همراه با کنترل توان و تخصیص ایستگاه پایه با لحاظ انصاف تناسبی بررسی شده است. مسئله بهینه‌سازی ترکیبی ارائه‌شده با بهره‌گیری از نظریه بازی‌های ائتلافی و تجزیه اولیه حل شد و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های مرجع از نظر کاهش تعداد دگرسپاری و بهبود عدالت عملکرد بهتری دارد. در [۲۳]، برای پشتیبانی از انتقال ایمن، روش انتقال مبتنی بر شکل‌دهی پرتو^{۱۰} در NOMA برای به حداکثر رساندن نرخ مجموع انتقال یک ایستگاه پایه با توان ارسال کافی و ناکافی پیشنهاد شده است. برای ایستگاه پایه با توان انتقال کافی، یک روش شکل‌دهی پرتو اختلال مصنوعی بدون تأثیر بر انتقال‌های قانونی پیشنهاد شده است.

¹ Lagrange Duality Theorem

² Massive MIMO (MM)

³ Quality of Service

⁴ Karush-Kuhn-Tucker

⁵ Zero-Forcing

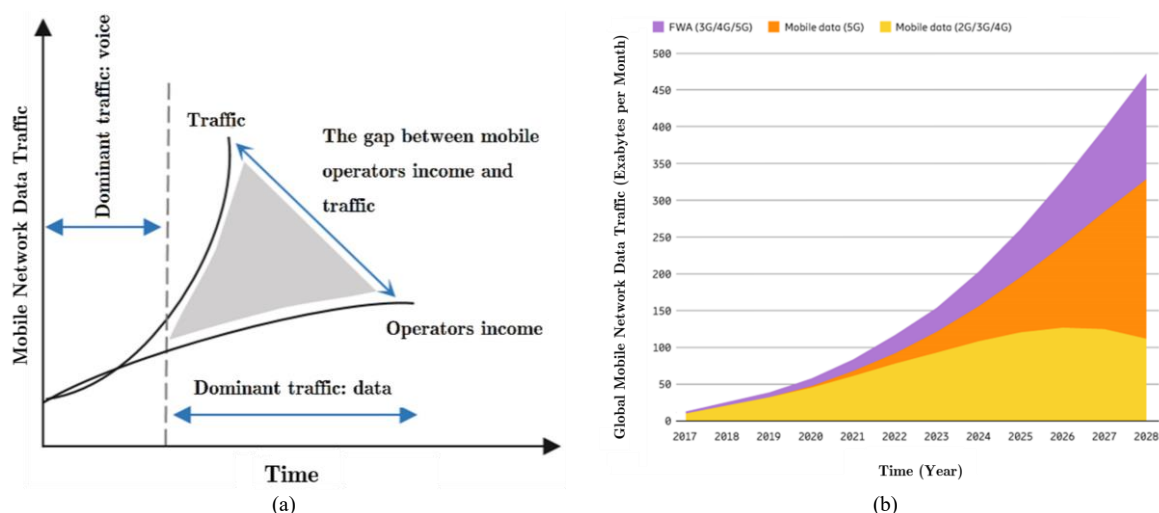
⁶ Downlink

⁷ Dinkelback

⁸ Pareto

⁹ Successive Interference Cancellations

¹⁰ Beamforming



شکل ۱: دلایل عمده بازنگری سیستم‌های سلولی از دید (a) اپراتورها و (b) کاربران [۱۷].
Figure 1. Major reasons for revising cellular systems from the point of view of (a) operators, and (b) users.

علاوه بر این، برای ایستگاه پایه با قدرت انتقال ناکافی، یک توالی رمزگشایی SIC اصلاح شده برای کاهش تأثیر اختلال مصنوعی بر انتقال‌های قانونی استفاده می‌شود. به‌طور خاص، الگوریتم تکراری برای تقریب محدب توالی برای بهینه‌سازی مشترک بردارهای شکل‌دهی پرتو و اختلال مصنوعی ارائه شده است. در [۲۴]، یک معماری جدید از شبکه ناهمگن دولایه مبتنی بر MIMO-NOMA مبتنی بر تکنیک انتقال هم‌زمان اطلاعات و توان بی‌سیم^۱ (SWIPT) در ایستگاه پایه سلول کوچک برای برداشت انرژی^۲ استفاده شده است. ابتدا، نسبت سیگنال به تداخل به‌اضافه نویز^۳ (SINR) و معادلات نرخ برای شبکه پیشنهادی مدل‌سازی می‌شوند که در آن برداشت انرژی و بهره‌وری انرژی نیز تعریف شده‌اند. سپس بهره‌وری انرژی با تعیین تخصیص ضریب تقسیم زمانی، تخصیص پهنای باند و تخصیص توان با توجه به محدودیت‌های بک‌هال^۴، حداقل توان برداشت شده و کیفیت خدمات بهینه می‌شود.

در [۲۵]، یک سیستم بی‌سیم ارائه شده است که از مزایای کدگذاری بلوک فضا-زمان^۵ (STBC) و سیستم‌های MIMO-NOMA در مقیاس بزرگ به‌طور هم‌زمان استفاده می‌کند. این سیستم از قابلیت طرح انتقال mmWave و شکل‌دهی تصادفی پرتو بهینه بکار گرفته است. برای کاهش بار ارتباط و تأخیر در سیستم، از شکل‌دهی پرتو تصادفی با ضرایب بهینه در ایستگاه پایه و ترکیب کاربر تصادفی-نزدیک تصادفی-دور^۶ (RNRF) در پیاده‌سازی روش NOMA استفاده گردید. یافته‌ها نشان می‌دهند که MIMO-NOMA و STBC در مقیاس بزرگ موج میلی‌متری در مقایسه با روش‌های MIMO-NOMA در مقیاس بزرگ موج میلی‌متری قبلی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در [۲۶]، یک تخصیص بهینه توان مشترک و پرتو دهی برای MIMO-NOMA در ارتباطات موج میلی‌متری ارائه می‌دهد. در این روش، برای کاهش بار سیستم، از یک روش ترکیبی RNRF در انتقال داده‌های NOMA استفاده شد. مسئله بهینه‌سازی برای یافتن تخصیص بهینه توان و ضرایب پرتو دهی تصادفی با به حداقل رساندن احتمال قطع ارائه گردید. نتایج بدست آمده نشان از عملکرد بهتر تخصیص بهینه توان و پرتو دهی تصادفی را نشان می‌دهند. در سیستم‌های mmWave-MIMO مرسوم، اگرچه طیف گسترده‌ای وجود دارد، اما این سیستم‌ها قادر نیستند اتصالات زیادی را فراهم آورند و کاربران زیادی را پوشش دهند. با ترکیب این سیستم‌ها با سیستم NOMA می‌توان میزان پوشش‌دهی را به‌صورت چشم‌گیری افزایش داد. از طرفی برای بهره‌مندی از ظرفیت‌های سیستم‌های NOMA بایستی بلوک‌های منابع به‌صورت بهینه تخصیص داده شود. یکی از پارامترهای مورد بررسی مسئله مجموع نرخ سیستم تحت محدودیت‌های حداکثر توان ایستگاه پایه و برآورده نمودن حداقل نرخ مدنظر کاربران است. تخصیص توان و خوشه به کاربران در این مسئله اهمیت زیادی دارد که

¹ Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

² Energy Harvesting

³ Signal to Interference Plus Noise Ratio

⁴ Backhauling

⁵ Space-Time Block Coding

⁶ Random-Near Random-Far

می‌توان کاربران را در خوشه‌های متفاوتی گروه‌بندی کرد و با تخصیص مناسب توان به کاربران در هر خوشه، مجموع نرخ کاربران را افزایش داد. در آنتن مشارکتی و توزیع شده پیشنهاد شده، چند ایستگاه پایه همسایه برای ایجاد یک سلول مجازی توسط کاربر انتخاب می‌شود. طول موج کوتاه در امواج میلیمتری افت مسیر شدید و سایه‌افکنی منجر به استفاده از آنتن‌های بزرگ می‌شود، به‌طوری‌که هر آنتن به یک حلقه رادیویی اختصاصی احتیاج دارد که عملاً امکان‌پذیر نیست.

در پژوهش [۲۷] یک سیستم MIMO-NOMA مبتنی بر انتقال موج میلی‌متری معرفی شده است که در آن، ساختار مشارکتی و آنتن‌های توزیع شده^۱ در قالب مفهوم «سلول مجازی» برای بهبود بهره‌وری طیفی و انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این رویکرد، هر کاربر با انتخاب مجموعه‌ای از آنتن‌های مجاور، سلول مجازی خود را تشکیل داده و از مزایای تنوع فضایی و جهت‌داری امواج میلی‌متری بهره‌مند می‌شود. با وجود پرداختن این پژوهش به ترکیب ساختارهای توزیع شده با فناوری‌های NOMA و MIMO در امواج میلی‌متری، دامنه تحلیل آن عمدتاً به معرفی مفهوم سلول مجازی و ارزیابی‌های اولیه در حوزه نرخ مجموع، بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی محدود است. جنبه‌های کلیدی همچون بهینه‌سازی پیشرفته تخصیص منابع، مدل‌سازی دقیق پیچیدگی محاسباتی و بهره‌گیری از روش‌های نوین دسترسی چندگانه در آن توسعه نیافته‌اند. از این‌رو، چارچوب پیشنهادی این پژوهش برای پاسخ‌گویی به نیازهای عملیاتی و چالش‌های مایمو انبوه در محیط‌های انتقال موج میلی‌متری، مستلزم بازنگری و تقویت در سطح مدل‌سازی و روش‌شناسی است. پژوهش حاضر با الهام از ایده‌های اولیه ارائه شده در [۲۷]، یک چارچوب ارتقایافته و جامع برای انتقال موج میلی‌متری در سیستم‌های مایمو انبوه ارائه می‌دهد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- استفاده از استراتژی روش حداکثر نسبت بر اساس استراتژی تکراری^۲ (MRC-RS) برای ارتقای بهره چندکاربره و کاهش هزینه محاسباتی؛

- به‌کارگیری روش تخمین کانال به کمک داده^۳ (DACE) به منظور افزایش دقت تخمین کانال در محیط‌های چالش‌برانگیز امواج میلی‌متری؛

- ارائه یک مدل پیشرفته تخصیص توان همراه با کاهش آلودگی پایلوت در ساختارهای مشارکتی توزیع شده. بر این اساس، مقاله حاضر علاوه بر توسعه اهداف سیستم، از منظر روش‌شناسی، مدل‌سازی کانال، ساختار ریاضی، ابزارهای بهینه‌سازی و نحوه پیاده‌سازی، نسبت به کار ارائه شده در [۲۷] به‌طور معناداری گسترش یافته است. همچنین سناریوهای شبیه‌سازی و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش، ابعاد عملکردی پیشرفته‌تری - از جمله نحوه تأثیر ساختار توزیع شده بر کیفیت تخمین کانال، کاهش محسوس پیچیدگی محاسباتی، بهره‌گیری از تخمین کانال مبتنی بر داده در محیط امواج میلی‌متری برای افزایش دقت تخمین در شرایط کانال سخت، و ارتقای مقاومت سیستم در برابر آلودگی پایلوت - را مورد بررسی قرار می‌دهند؛ مواردی که در مطالعه پیشین پوشش داده نشده بود. از این‌رو، این پژوهش ضمن تکمیل کارهای گذشته، یک چارچوب مستقل و پیشرفته برای انتقال امواج میلی‌متری در سیستم‌های مایمو انبوه مبتنی بر ترکیب NOMA و IDMA ارائه می‌دهد. از طرفی، مسئله اصلی در دستیابی به بهره چندکاربره در معماری‌های مایمو انبوه، وابستگی شدید به اطلاعات وضعیت کانال است؛ و در پاسخ به این چالش، ترکیب IDMA و چارچوب DACE به‌عنوان یک راهکار اثربخش پیشنهاد شده است. ادامه مقاله به‌صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲، مدل سیستم ارائه شده است. تکنیک IDMA، تکنیک MRC-RS و روش DACE در بخش ۳ آورده شده است. با هدف ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ ارائه شده است. در پایان، نتیجه‌گیری در بخش ۵ مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مدل سیستم

در این پژوهش، یک سیستم آنتن توزیع شده^۴ (DAS) مبتنی بر سلول مجازی فراسو^۵ با روش انتقال موج میلیمتری پیشنهاد شده است. در این مدل، یک ایستگاه پایه با تعداد M آنتن همه‌جهته با شعاع واحد در یک ناحیه دایره‌ای در نظر گرفته شده‌اند، جایی که ایستگاه پایه به کاربران سرویس می‌دهد. فرض کنید هر کاربر به‌طور مستقل از دیگر کاربران با استفاده از سلول مجازی

^۱ Cooperative and Distributed Antenna Structure

^۲ Maximum Ratio Combining Based on Repetitive Strategy

^۳ Data-Aided Channel Estimation

^۴ Distributed Antenna System

^۵ Uplink

خود سرویس داده شود که چندین کاربر به طور مشترک گروه بندی می شوند و با هم با استفاده از سلول های مجازی خود سرویس داده می شوند. سیگنال دریافتی در فراسو توسط کاربر به صورت زیر تعریف می شود:

$$\bar{y} = H^H W P s + n \quad (1)$$

که $H = [h_1, h_2, \dots, h_K]$ با ابعاد $N \times K$ ، نشان دهنده ماتریس کانال است که h_k با ابعاد $N \times 1$ نشان دهنده بردار کانال فضایی بین ایستگاه پایه و کاربر k ام است؛ $W = [w_1, w_2, \dots, w_K]$ ماتریس پیش کدکننده با ابعاد $N \times K$ با $\|w_k\|_2 = 1$ برای $k=1, 2, \dots, K$ و $n \sim CN(0, 1)$ بردار نویز گوسی سفید افزودنی^۱ (AWGN) است، $S = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T$ بردار سیگنال ارسالی با ابعاد $K \times 1$ برای تمامی k کاربر است و $E(ss^H) = I_K$ ، توان ارسال شده به همه k کاربر با $P = \text{diag}(P)$ نشان داده می شود که $P = [\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_K}]$ و حداکثر توان انتقالی در ایستگاه پایه برابر است با [۲۸]:

$$\sum_{k=1}^K p_k \leq P \quad (2)$$

در شکل ۲، معماری مایمو مدل سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. در سیستم پیشنهادی، مدل کانال صالح-والنزونلا^۲ برای ارتباطات موج میلیمتری در نظر گرفته شده است که مؤلفه ها چند مسیری را به صورت مدل مبتنی بر خوشه بندی^۳ با زمان تأخیر و دامنه های ضعیف شده به گیرنده در نظر می گیرد [۲۹، ۳۰]؛ بنابراین h_k را می توان به صورت رابطه ۳ نمایش داد [۲۹]:

$$h_k = \beta_k^{(0)} a(\theta_k^{(0)}) + \sum_{l=1}^L \beta_k^{(l)} a(\theta_k^{(l)}) \quad (3)$$

که $\beta_k^{(0)} a(\theta_k^{(0)})$ مؤلفه دید مستقیم^۴ (LoS) کاربر k ام است، که $\beta_k^{(0)}$ نشان دهنده بهره مختلط و $a(\theta_k^{(0)})$ جهت فضایی را نشان می دهد. $\beta_k^{(l)} a(\theta_k^{(l)})$ به ازای $1 \leq l \leq L$ ، l امین مؤلفه دید غیرمستقیم کاربر k ام است، که L برابر تعداد کل مؤلفه های دید غیرمستقیم^۵ (NLoS) است. $a(\theta)$ بردار هدایت کننده آرایه^۶ با ابعاد $N \times 1$ است. بنابراین، بر اساس موج میلیمتری و با در نظر گرفتن ماتریس کانال $H = [h_1, h_2, \dots, h_K]^T$ با ابعاد $K \times N$ که بردار بین k امین کاربر و ایستگاه پایه می تواند به صورت h_k مدل سازی شود [۲۸]:

$$h_k = \sqrt{M} \frac{\alpha_{k,L} a(\theta_{k,L})}{\sqrt{1 + d_k^{\alpha_L}}} + \sqrt{M} \sum_{l=1}^L \frac{\alpha_{k,NL} a(\theta_{k,NL}^l)}{\sqrt{1 + d_k^{\alpha_{NL}}}} \quad (4)$$

که L نشان دهنده تعداد مسیرها، $\alpha_{k,l}$ بهره مختلط مسیر دید مستقیم را برای کاربر k نشان می دهد و از توزیع گوسی پیچیده پیروی می کند. جهت نرمالیزه شده مسیر دید مستقیم برای کاربر k با $\theta_{k,l}$ نشان داده می شود که از توزیع های یکنواخت در بازه ۱ الی ۱- پیروی می کند. تلفات مسیر برای مسیرهای دید مستقیم و دید غیرمستقیم به ترتیب با α_L و α_{NL} نشان داده می شود. فواصل بین ایستگاه پایه تا کاربر k و تعداد مسیرهای دید غیرمستقیم به ترتیب با d_k و L نشان داده می شوند. همچنین، بهره مختلط از مسیرهای دید غیرمستقیم برای کاربر k با $\alpha_{k,NL}$ نشان داده می شود که از توزیع پیچیده گوسی پیروی می کند. جهت نرمال شده مسیرهای دید غیرمستقیم برای کاربر k با $\theta_{k,NL}$ نشان داده می شود که از توزیع های یکنواخت در بازه ۱ الی ۱- پیروی می کند. علاوه بر این، $a(\theta)$ یک بردار هدایت کننده آرایه است که می تواند به صورت بیان شود [۲۸]:

$$a(\theta) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, e^{-j\pi\theta}, \dots, e^{-j\pi(M-1)\theta}]^T \quad (5)$$

که $[.]^T$ نشان دهنده ترانپوز ماتریس است. در رابطه ۵، $a(\theta)$ دارای نرم واحد است، به همین دلیل، ضریب نرمال سازی $\sqrt{M}$ در رابطه ۵ وجود دارد. از طرفی، θ نشان دهنده جهت فضایی است که تابعی از زاویه حرکت فیزیکی $\phi \in [-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2]$ است، به صورت رابطه ۶ نشان داده می شود:

$$\theta = \frac{2d \sin \phi}{\lambda_c} \quad (6)$$

¹ Additive White Gaussian Noise

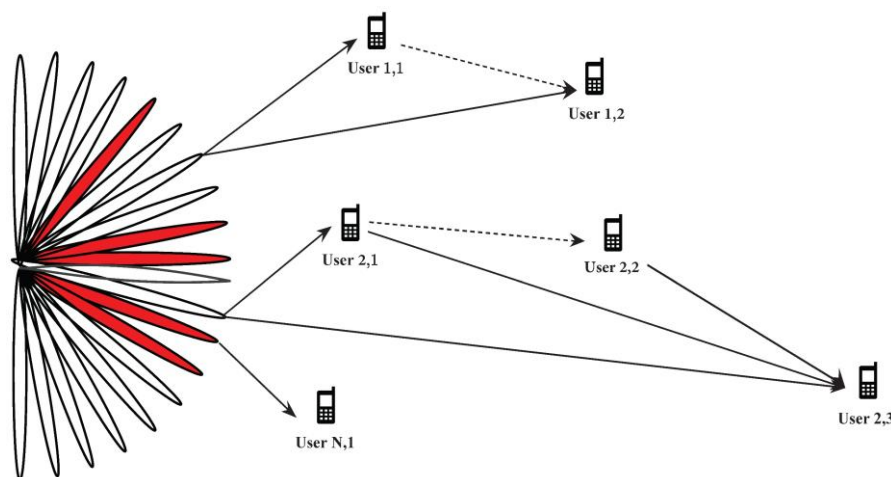
² Saleh-Valenzuela channel

³ Clustering

⁴ Line of Sight

⁵ Non-Line of Sight

⁶ Array Steering Vector



شکل ۲: معماری مایمو مدل سیستم پیشنهادی

Figure 2. The MIMO architecture of the proposed system model.

که λ طول موج سیگنال حامل و d فاصله بین آنتن‌ها است. دامنه اجزای دید غیرمستقیم $\{\{\beta_k^{(0)}\}\}_{k=1}^L$ ، نسبت به دامنه دید مستقیم $\beta_k^{(0)}$ بسیار ضعیف‌تر است و کانال موج میلیمتری را پراکنده می‌کند. مسیر غالب در ارتباطات موج میلیمتری مسیر دید مستقیم است. اگر مسیر دید مستقیم به دلایلی مانند مسدود شدن توسط موانع وجود نداشته باشد، مسیر دید غیرمستقیم با بالاترین بهره، مسیر غالب خواهد بود؛ بنابراین مدل کانال در رابطه ۴ را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$h_k = \frac{\alpha_{K,NL} a(\theta_{K,NL}^l)}{\sqrt{1 + d_k^{\alpha_{K,NL}}}} \quad (7)$$

در ارتباط کانال موج میلیمتری، ساختار مشارکتی به معنای استفاده از چندین آنتن برای انتقال و دریافت سیگنال است. در سیستم آنتن‌های توزیع شده، آنتن‌ها به صورت توزیع شده در فضا قرار دارند و به صورت هماهنگ با یکدیگر عمل می‌کنند. در ارتباط کانال موج میلیمتری، استفاده از ساختار مشارکتی و سیستم آنتن‌های توزیع شده به عنوان دو رویکرد مؤثر برای بهبود کیفیت ارتباط و افزایش کارایی شبکه هستند. با استفاده از ساختار مشارکتی، امکان ارسال و دریافت اطلاعات با سرعت بسیار بالا و با کیفیت بهتر فراهم می‌شود. همچنین، با استفاده از سیستم آنتن‌های توزیع شده، امکان تعیین جهت بهتر ارتباط و کاهش تداخل در محیط‌های پر تداخل فراهم می‌شود. از این رو، استفاده از ساختار مشارکتی و سیستم آنتن‌های توزیع شده در سیستم‌های ارتباطی موج میلیمتری، بهبود کارایی شبکه و افزایش سرعت و کیفیت ارتباط را فراهم می‌کنند که در ادامه به تشریح این دو رویکرد پرداخته شده است.

۲-۱- ساختار مشارکتی و آنتن‌های توزیع شده

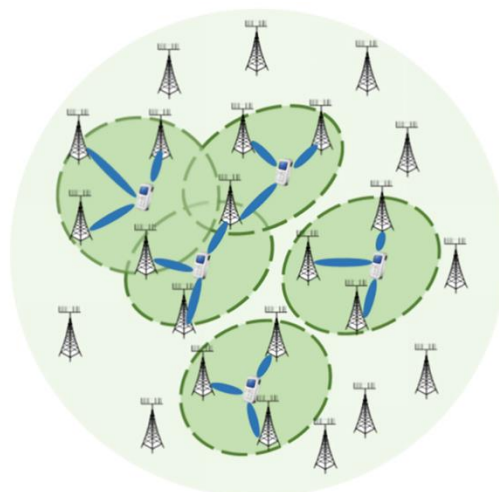
سیستم آنتن توزیع شده، شبکه‌ای از گره‌های آنتن است که از نظر مکانی یا جغرافیایی از هم جدا شده‌اند و از طریق یک رسانه ارتباطی به یک منبع مشترک متصل می‌شوند تا خدمات ارتباطی بی‌سیم را در یک محل یا ساختمان خاص ارائه دهند. سیستم آنتن توزیع شده راهی برای گسترش پوشش یک شبکه مشخص مانند شبکه سلولی یا شبکه کامپیوتری بی‌سیم است. همه آنتن‌ها به گونه‌ای از یکدیگر فاصله دارند که هر یک قادر به پوشش کامل بدون همپوشانی زیاد با مناطق تحت پوشش سایر آنتن‌ها هستند و تعداد آنتن‌های مورد نیاز برای پوشش یک منطقه خاص را به حداقل می‌رساند. تمام آنتن‌های یک سیستم آنتن توزیع شده صرفاً گسترش‌دهنده‌هایی برای پوشش سیگنال هستند و همگی به یک کنترل‌کننده مرکزی متصل هستند که به نوبه خود به ایستگاه پایه حامل متصل است. یک راهکار مناسب جهت کاهش پیچیدگی سیستم در شبکه‌های سلولی، تقسیم یک منطقه بزرگ به تعدادی سلول کوچک است که در آن یک ایستگاه پایه در مرکز هر سلول قرار می‌گیرد و به کاربرانی که تحت پوشش آن قرار می‌گیرند سرویس می‌دهد [۲۷]. از آنجایی که کاربران به طور تصادفی در هر سلول قرار می‌گیرند، فواصل دسترسی مشخصی به ایستگاه پایه سرویس‌دهنده خود دارند، و کاربرانی که در مناطق مرزی سلول قرار

می‌گیرند از بهره‌وری انرژی کمتر و تداخل بین سلولی بالاتری رنج می‌برند. در صورت استفاده از آنتن‌های ایستگاه پایه توزیع شده در شبکه‌های سلولی، اختلاف عملکرد کاربران در مرکز و لبه سلول می‌تواند تشدید یابد؛ زیرا آنتن‌های ایستگاه پایه در مناطق مرزی سلول از تداخل بین سلولی بسیار بالاتری نسبت به آنتن‌های مرکز سلول در فراسو برخوردارند [۳۱] و به منابع تداخلی قوی برای کاربران لبه سلولی همسایه در فروسو تبدیل شوند [۳۲]. همان‌طور که در [۳۱] اشاره شد، مشکل لبه سلولی ریشه در ساختار سلولی دارد که در آن سلول‌ها بر اساس پوشش هر ایستگاه پایه تشکیل می‌شوند؛ بنابراین، زمانی که کاربران و آنتن‌های ایستگاه پایه در اطراف پراکنده هستند، چنین ساختار ایستگاه پایه محوری قابل توجه نیست. در عوض، پردازش سیگنال ممکن است بر اساس واحد "سلول‌های مجازی" [۳۳، ۳۴] انجام شود. در یک سیستم آنتن‌های توزیع شده مبتنی بر سلول مجازی، هر کاربر مجموعه آنتن ایستگاه پایه سرویس‌دهنده خود را به‌عنوان سلول مجازی خود انتخاب می‌کند. دلیل اینکه سلول‌های مجازی به شیوه‌ای کاربرمحور تشکیل می‌شوند دو مورد است:

- با تراکم بالای آنتن‌های ایستگاه‌های پایه توزیع شده، هر کاربر معمولاً ممکن است بیش از یک آنتن ایستگاه پایه را در مجاورت خود بیابد تا با آن ارتباط برقرار کند.
 - مجموعه آنتن ایستگاه پایه که به هر کاربر سرویس می‌دهد با موقعیت مکانی کاربر متفاوت باشد.
- با انتخاب چند آنتن ایستگاه پایه به‌عنوان سلول مجازی هر کاربر، تعداد کانال‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند کم می‌شود که منجر به سربار^۱ اندازه‌گیری اطلاعات وضعیت کانال^۲ (CSI) بسیار کمتری در مقایسه با سیستم‌های سلولی با آرایه‌های آنتن بزرگ می‌شود. مهمتر از آن، با افزایش تراکم آنتن‌های توزیع شده ایستگاه پایه، هم میانگین تعداد کاربرانی که سلول‌های مجازی خود را به اشتراک می‌گذارند و هم میانگین تعداد کاربرانی که توسط هر آنتن ایستگاه پایه سرویس می‌شوند کاهش می‌یابد [۳۱] که نشان می‌دهد پردازش سیگنال در یک سیستم آنتن توزیع شده در مقیاس بزرگ می‌تواند به‌صورت محلی و مقیاس‌پذیر انجام شود. خوشه‌بندی پویا ایستگاه پایه اخیراً در [۳۵، ۳۶] به‌عنوان راهی برای تشکیل خوشه‌های هماهنگ ایستگاه پایه بر اساس مکان‌های کاربران پیشنهاد شد. باین حال متفاوت از ایده سلول مجازی، همچنان از ساختار سلولی مرسوم پیروی می‌کند که در آن هر کاربر صرفاً توسط نزدیکترین ایستگاه پایه خود مرتبط است و به آن سرویس می‌دهد. برای سیستم‌های آنتن توزیع شده مبتنی بر سلول مجازی، اندازه سلول مجازی، به‌عنوان مثال، تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه باید در سلول مجازی هر کاربر گنجانده شود، یک پارامتر کلیدی سیستم است [۳۷، ۳۸]. به‌طور خاص، ما بر روی یک سیستم آنتن توزیع شده فروسو در مقیاس بزرگ تمرکز می‌کنیم که در آن کاربران $K \gg 1$ و ایستگاه پایه $L \gg 1$ به‌طور یکنواخت در یک منطقه خاص توزیع شده‌اند و هر کاربر V آنتن‌های ایستگاه پایه با بالاترین ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ را به‌عنوان سلول مجازی خود انتخاب می‌کند. هدف ما تجزیه و تحلیل اثر اندازه سلول مجازی V بر عملکرد میانگین نرخ کاربر تحت دو سناریو به‌صورت زیر است:

- هر کاربر توسط سلول مجازی خود مستقل از دیگران سرویس‌دهی می‌شود.
 - چندین کاربر با انتقال مشترک از سلول‌های مجازی خود با هم گروه‌بندی می‌شوند.
- در مدل پیشنهادی این مقاله، برای اتصال کاربران به چندین آنتن توزیع شده در ناحیه تحت پوشش، از ساختار مشارکتی و توزیع شده استفاده می‌شود. مبانی این ساختار و نحوه تشکیل سلول‌های مجازی کاربران، مطابق با چارچوب ارائه شده در مرجع [۲۷] است. شکل ۳، با اقتباس از [۲۷]، ساختار مشارکتی و توزیعی مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در [۲۷] تشریح شده است، هر کاربر برخی از آنتن‌های ایستگاه پایه را بر اساس بزرگ‌ترین ضرایب محوشدگی در مقیاس بزرگ انتخاب کرده و سلول مجازی خود را تشکیل می‌دهد. پس از تعیین سلول‌های مجازی کاربران، فرض می‌شود هر کاربر به‌صورت مستقل توسط سلول مجازی مختص خود سرویس‌دهی می‌شود. سپس این مدل به حالت مشارکتی توسعه می‌یابد که طی آن چندین کاربر می‌توانند به‌صورت مشترک گروه‌بندی شده و از سلول‌های مجازی ترکیبی استفاده کنند.

¹ Overload² Channel State Information



شکل ۳: ساختار مشارکتی و توزیع شده [۲۷]
Figure 3. (a) Cooperative and distributed structure [27].

این موضوع بهبود بهره‌وری طیفی و کاهش نیاز به زنجیره‌های RF را به دنبال دارد. همچنین سیگنال دریافتی کاربر در یک فراسو مطابق با رابطه ۸ [۳۸] تعریف می‌شود. در این مدل، با کاهش ابعاد ماتریس کانال، تعداد فرکانس‌های رادیویی مورد استفاده در سیستم نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از ساختار مشارکتی و توزیع شده، سیگنال دریافتی توسط کاربر در یک فراسو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{H}}_r^H \mathbf{W}_r \mathbf{P} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (8)$$

که $\mathbf{H}_r = [h_{r,1}, h_{r,2}, \dots, h_{r,K}]$ با ابعاد $M \times K$ است ($\bar{\mathbf{H}}_r = \bar{\mathbf{H}}(i, :)_{i \in M}$). از سوی دیگر، اگر تعداد کاربران K افزایش یابد، اندازه سلول مجازی V باید کاهش یابد تا از همپوشانی سلول‌های مجازی مختلف جلوگیری شود. اندازه هر سلول مجازی باید یک عدد صحیح و بزرگتر یا مساوی یک باشد. بنابراین، اندازه بهینه سلول مجازی بهینه V^* می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود [۳۴]:

$$V^* = \left\lceil 0.2 \frac{L}{K} \right\rceil \quad (9)$$

باتوجه به رابطه فوق، زمانی که تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه در مقایسه با تعداد کاربران افزایش یابد، اندازه سلول مجازی بهینه V^* نیز باید افزایش یابد. جزئیات مربوط به استنتاج رابطه ۹ در پیوست (الف) ارائه شده است. روش مؤثر دیگری که در این مقاله جهت کاهش تداخل بین کاربران مورد استفاده قرار گرفته است، روش دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری است که در بخش سوم به آن خواهیم پرداخت. این روش، به دلیل استفاده از بافرهای حافظه‌ای، قابلیت اعمال خطا در ارسال اطلاعات را دارد. به این ترتیب، با اعمال خطا و تکرار ارسال اطلاعات، کیفیت ارتباط بهبود می‌یابد، تداخل کاهش می‌یابد و منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.

۳- دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری

به منظور جلوگیری از تداخل «تداخل درون سلولی»^۱، سیگنال‌های راهنمای کاربران، باید دوبه‌دو برهم عمود باشند. همچنین برای اجتناب از تداخل «بین سلولی»^۲، سیگنال‌های راهنمای کاربران در سلول‌های مختلف نیز باید دوبه‌دو برهم عمود باشند. استفاده از سیگنال‌های راهنمای غیرمتعامد توسط کاربران باعث بروز تداخل در تخمین کانال می‌شود. به این تداخل در اصطلاح «آلودگی پایلوت»^۳ گفته می‌شود [۳۹]. آلودگی پایلوت مشکلی است که حتی با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه مرکزی نیز باقی می‌ماند. از این رو، به عنوان یک مشکل اساسی در سیستم‌های مایمو آنبوه به شمار می‌آید. این در حالی است که اثر نویز ناهمبسته و محوشدگی سریع با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه مرکزی از بین می‌رود [۴۰]. برای رفع این مسئله راه‌حلی بر اساس

^۱ Intra-Cell Interference

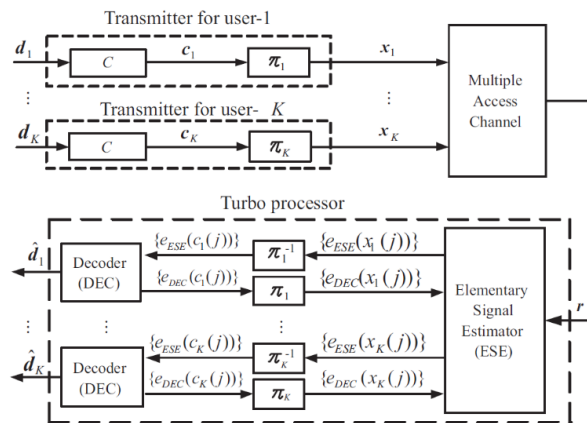
^۲ Inter-Cell Interference

^۳ Pilot Contamination

دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری و برآورد کانال به کمک داده‌های تکراری پیشنهاد می‌کنیم. این طرح می‌تواند توان عملیاتی بالایی ارائه کرده و در مقابل مسئله آلودگی پایلوت نیز مقاوم باشد. تکنیک دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری، یک تکنیک NOMA است که با استفاده از جاگذاری‌های گوناگونی که به کاربران مختلف تخصیص می‌دهد، امکان جداسازی کاربران را ایجاد می‌کند [۴۲، ۴۱]. ایده اصلی در طراحی دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری این است که جاگذاری‌ها بایستی برای کاربران مختلف، متفاوت باشند و به‌صورتی آرایش دنباله کدها را به هم می‌ریزند که چیپ‌های (هر المان دنباله کد را چیپ می‌گوییم) مجاور تقریباً ناهمبسته باشند و این امکان آشکارسازی چیپ را فراهم می‌کند. از جمله مزایای این تکنیک می‌توان به مقاومت در برابر تداخل و محوشدگی، هزینه کم آشکارسازی چندکاربره^۱، عملکرد بهتر نرخ خطای بیت^۲ (BER)، بازده طیفی بالا و کاهش پیچیدگی گیرنده اشاره کرد. شکل ۴ ساختار گیرنده و فرستنده IDMA را نشان می‌دهد. دنباله داده ورودی d_k مربوط به کاربر k بر اساس یک کد با نرخ کم C ، یک دنباله کد به صورت $c_k = [c_k(1), \dots, c_k(j), \dots, c_k(J)]^T$ را تولید می‌کند که J طول فریم است. عناصر موجود در c_k به عنوان بیت‌های کد شده معرفی می‌شوند. سپس از بلوک اینترلیور^۳ عبور می‌کند، دنباله x_k تولید می‌شود، آن‌گاه داده‌های همه کاربران با هم ترکیب می‌شوند و به کانال بی‌حافظه با نویز سفید گوسی فرستاده می‌شوند. سپس c_k توسط یک میان گذر π_k نگاشت می‌یابد و دنباله $x_k = [x_k(1), \dots, x_k(j), \dots, x_k(J)]^T$ ایجاد می‌گردد و هر المان x_k در یک چیپ نامیده می‌شود [۴۱]. کاربران صرفاً توسط میان گذرهای خود متمایز می‌شوند، از این‌رو، نام دسترسی چندگانه با تقسیم جاگذاری می‌شود. ایده اصلی IDMA این است که اینترلیورها (π_k) می‌بایست برای کاربران مختلف متفاوت باشند. فرض می‌شود که اینترلیورها به‌طور مستقل و تصادفی ایجاد گردند. این اینترلیورها دنباله‌های کدگذاری شده را به‌گونه‌ای پراکنده می‌کنند که چیپ‌های مجاور تقریباً همبستگی نداشته باشند. محدودیت‌های دسترسی چندگانه و کدگذاری به‌طور جداگانه در برآوردگر سیگنال اولیه^۴ (ESE) و رمزگشا^۵ (DEC) در نظر گرفته می‌شوند. خروجی‌های ESE و DEC نسبت لگاریتم درست‌نمایی^۶ (LLR) در $\{x_k(j)\}$ هستند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۴۳]:

$$LLR_{\text{extrinsic}}(c_k(j)) = \log \left(\frac{\Pr(c_k(j) = +1)}{\Pr(c_k(j) = -1)} \right) - LLR_{\text{a priori}}(c_k(j)), \forall k, j \quad (10)$$

بسته به اینکه توسط ESE یا DEC تولید شده باشند، LLRها با $e_{\text{ESE}}(x_k(j))$ و $e_{\text{DEC}}(x_k(j))$ متمایز می‌شوند. یک فرایند تکراری نوع توربو کلی برای پردازش LLRهای تولید شده توسط ESE و DEC اعمال می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار خواهیم داد. در ادامه این بخش، فرستنده IDMA را مورد بررسی قرار داده و عملکرد ESE و تابع رمزگشا را به تفصیل بیان می‌کنیم. به‌منظور کاهش پیچیدگی سیستم پیشنهادی، الگوریتم MRC مبتنی بر استراتژی تکراری مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴: ساختار گیرنده و فرستنده روش IDMA با K کاربر.
Figure 4. Structure of IDMA transmitter and receiver with K users.

¹ Multiuser Detection

² Bit Error Rate

³ Interleaver

⁴ Elementary Signal Estimator

⁵ Decoder

⁶ Log-Likelihood Ratios

۳-۱- فرستنده IDMA

برای سهولت ابتدا یک سیستم تک ورودی تک خروجی را در نظر می‌گیریم. فرض کنید $c_k = \{c_k(j)\}$ کلمه رمز به طول J باشد که توسط کاربر k تولید شده است. فرض کنید $c_k(j)$ در قالب کلیدزنی جابه‌جایی فاز دوگانه^۱ (BPSK) باشد و $c_k(j) \in \{-1, +1\}$. نماد مخابره شده با سیگنال‌دهی BPSK از کاربر k در زمان j به صورت زیر است [۴۳]:

$$x_k(j) = \sqrt{p_k} c_k(j) \quad (۱۱)$$

که $\sqrt{p_k}$ ضریب کنترل توان است و j' با جاگذار $\pi_k(\cdot)$ مختص کاربر تعیین می‌شود. از طرفی دیگر، نماد مخابره شده با سیگنال‌دهی کلیدزنی جابه‌جایی فاز چهارگانه^۲ (QPSK) از کاربر k در زمان j به صورت $\text{Re}[x_k(j)] = \sqrt{p_k/2} c_k(j')$ و $\text{Im}[x_k(j)] = \sqrt{p_k/2} c_k(j'')$ است، که j' و j'' با جاگذاری تعیین می‌شوند. نماد دریافت شده $y(j)$ در زمان j به صورت زیر است:

$$y(j) = \sum_{k=1}^K h_k x_k(j) + \eta(j) \quad (۱۲)$$

که h_k ضریب کانال برای کاربر k و $\eta(j)$ نمونه‌هایی از یک AWGN با واریانس $\sigma^2 = N_0/2$ است.

۳-۲- عملکرد ESE برای کانال‌های چندمسیره

اکنون تابع ESE را در یک کانال محوشدگی چندمسیره شبه‌استاتیکی^۳ با طول حافظه $L-1$ در نظر می‌گیریم. ضرایب محوشدگی مربوط به کاربر k را $\{h_{k,0}, \dots, h_{k,L-1}\}$ قرار می‌دهیم. پس از فیلتر منطبق با چیپ، سیگنال دریافتی را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۴۱]:

$$r(j) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L-1} h_{k,l} x_k(j-l) + n(j), \quad j = 1, \dots, J+L-1 \quad (۱۳)$$

که $\zeta_{k,l}(j) = r(j+l) - h_{k,l} x_k(j)$ و $\zeta_{k,l}(j) = r(j+l) - h_{k,l} x_k(j)$ در گام اول، میانگین و واریانس تداخل را به صورت زیر تخمین می‌زنیم:

$$E(r(j)) = \sum_{k,l} h_{k,l} E(x_k(j-l)) \quad (۱۴-الف)$$

$$\text{var}(r(j)) = \sum_{k,l} |h_{k,l}|^2 \text{var}(x_k(j-l)) + \sigma^2 \quad (۱۴-ب)$$

$$E(\zeta_{k,l}(j)) = E(r(j+l)) - h_{k,l} E(x_k(j)) \quad (۱۴-ج)$$

$$\text{var}(\zeta_{k,l}(j)) = \text{var}(r(j+l)) - |h_{k,l}|^2 \text{var}(x_k(j)) \quad (۱۴-د)$$

سپس در گام دوم، تولید و ترکیب LLR را به دست می‌آوریم [۴۱]:

$$e_{\text{ESE}}(x_k(j))_l = 2h_{k,l} \frac{r(j+l) - E(\zeta_{j,l}(j))}{\text{var}(\zeta_{j,l}(j))} \quad (۱۵-الف)$$

$$e_{\text{ESE}}(x_k(j)) = \sum_{l=0}^{L-1} e_{\text{ESE}}(x_k(j))_l \quad (۱۵-ب)$$

فرض می‌شود شرایط اعوجاج باتوجه‌به $x_k(j)$ در این نمونه‌های L ، یعنی $\{\zeta_{k,0}(j), \zeta_{k,1}(j), \dots, \zeta_{k,L-1}(j)\}$ همبستگی ندارند. سپس یک احتمال پسین^۴ برای $x_k(j) = \pm 1$ حاصل ضرب احتمالات پسین است که از $\{r(j), r(j+1), \dots, r(j+L-1)\}$ تولید می‌شود؛ بنابراین LLRها برای $x_k(j)$ می‌توان مستقیم مانند رابطه ۱۵-ب جمع کرد. از این الگوریتم، می‌توان نتیجه گرفت که همگام‌سازی فریم برای IDMA ضروری نیست؛ زیرا ناهمگام‌سازی فریم همان اثر تأخیر چند مسیری را دارد. فرض عدم همبستگی ذکر شده به صورت تقریبی است، ولی درعین حال موضوع را بسیار ساده می‌کند؛ بنابراین، پیچیدگی (به‌ازای هر بیت کدگذاری شده برای هر کاربر) برابر $O(L)$ است.

^۱ Binary Phase-Shift Keying

^۲ Quadruple Phase Shift Keying

^۳ Quasi-Statically

^۴ A Posteriori Probability

۳-۳- تابع رمزگشا

دیکودرها در شکل ۴ رمزگشایی احتمالی پسین را با استفاده از خروجی ESE به عنوان ورودی انجام می‌دهد. با سیگنالینگ BPSK، خروجی آن‌ها LLRهای بیرونی $e_{DEC}(x_k(j))$ از $x_k(j)$ است که برای تولید میانگین و واریانس به صورت زیر استفاده می‌شود [۴۱]:

$$E(x_k(j)) = \tanh(e_{DEC}(x_k(j)) / 2) \quad (۱۶-الف)$$

$$\text{var}(x_k(j)) = 1 - (E(x_k(j)))^2 \quad (۱۶-ب)$$

در ابتدا به ازای تمامی k و j ، $E(x_k(j))=0$ و $\text{var}(x_k(j))=1$ در نظر گرفته می‌شود که به معنای عدم وجود اطلاعات از دیکودرها است. دنباله داده‌های ورودی هر کاربر ابتدا توسط C کدگذاری می‌شود و $b_k(i)$ به ازای $i=1,2,\dots$ تولید می‌شود. دیکودر برای به دست آوردن C مراحل زیر را انجام می‌دهد:

مرحله ۱: تخمینی از هر $b_k(i)$ بر اساس $\{e_{ESE}(x_k(j))\}$ از ESE به دست می‌آوریم. فرض می‌شود $\{E_{ESE}(x_k(j)), \forall j\}$ همبسته نباشند که تقریباً به دلیل درهم آمیختگی درست است. از طرفی $c_k(i)=x_k(\pi_k(j))$ است، بنابراین $b_k(i)$ می‌تواند به صورت زیر محاسبه گردد:

$$L(b_k(i)) = \sum_{j=1}^S \log \left(\frac{p(r(\pi_k(j)) | x_k(\pi_k(j)) = +1)}{p(r(\pi_k(j)) | x_k(\pi_k(j)) = -1)} \right) = \sum_{j=1}^S e_{ESE}(x_k(\pi_k(j))) \quad (۱۷)$$

مرحله ۲: رمزگشایی استاندارد یک احتمال پسین را برای C با استفاده از $L(b_k(i))$ به عنوان ورودی انجام می‌دهیم و LLRهای پسین $\{L_{APP}(b_k(i))\}$ را برای $b_k(i)$ ایجاد می‌کنیم.

مرحله ۳: از آنجایی که $c_k(j)=b_k(1)$ برای $j=1,\dots,S$ است، خواهیم داشت:

$$e_{DEC}(x_k(\pi_k(j))) = e_{DEC}(c_k(j)) = L_{APP}(b_k(1)) - e_{ESE}(x_k(\pi_k(j))) \quad (۱۸)$$

از سوی دیگر، رابطه ۱۸ را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

$$e_{DEC}(x_k(\pi_k(j))) \approx L_{APP}(b_k(1)), \quad j=1,\dots,S \quad (۱۹)$$

به این ترتیب، تمامی $b_k(i)$ بازخورد یکسانی از رمزگشایی دارند، بنابراین می‌توان مصرف حافظه را تا حد زیادی کاهش داد. رمزنگاری و رمزگشایی ایده آل برای دستیابی به ظرفیت در اینجا فرض می‌شود. یک کد عملی می‌تواند افت مازاد در هر گام حذف تداخل متوالی ایجاد کند. این افت در طی روند حذف تداخل متوالی انباشته می‌شود و می‌تواند به افت شدید منجر گردد. آشکارسازی تکراری تشریح شده در بخش ۳-۴، می‌تواند این افت را جبران کند.

۳-۴- MRC مبتنی بر استراتژی تکراری

ترکیب حداکثر نسبت بر اساس استراتژی تکراری، تکنیکی است که در سیستم‌های ارتباطی بی سیم برای بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان سیگنال‌های دریافتی استفاده می‌شود. در سیستم‌های ارتباطی بی سیم، سیگنال‌ها می‌توانند به دلیل عواملی مانند تداخل، نویز و محوشدگی تخریب شوند. MRC بر اساس استراتژی تکراری چندین سیگنال دریافتی را برای به دست آوردن سیگنال قوی‌تر و قابل اعتمادتر ترکیب می‌کند. MRC مبتنی بر استراتژی تکراری شامل تکرارهای متعدد سیگنال با ترکیب برای بهبود کیفیت سیگنال‌های دریافتی است. در هر تکرار، سیگنال‌های دریافتی با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی حداکثر نسبت وزن شده و ترکیب می‌شوند، که دامنه و فاز سیگنال‌های دریافتی را در نظر می‌گیرد تا نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) را به حداکثر برساند. MRC مبتنی بر استراتژی تکراری به‌ویژه در محیط‌هایی که سیگنال‌های دریافتی در معرض محوشدگی هستند، مؤثر است که می‌تواند باعث نوسان قدرت سیگنال در طول زمان شود. با ترکیب چندین سیگنال دریافتی، MRC مبتنی بر استراتژی تکراری می‌تواند به کاهش اثرات محوشدگی و بهبود کیفیت کلی و قابلیت اطمینان سیگنال دریافتی کمک کند. برخلاف روش MRC-SIC [۲۷] که بر حذف صریح و ترتیبی تداخل بین کاربران متکی است، تکنیک پیشنهادی MRC-RS بر پایه یک استراتژی تکراری نرم طراحی شده است که در آن تداخل به صورت آماری و تدریجی کاهش می‌یابد. در MRC-RS، تخمین نمادها با استفاده از اطلاعات غیرذاتی دیکدر و به روزرسانی مکرر میانگین و واریانس انجام می‌شود، بدون آنکه نیازی به

^۱ Signal to Noise Ratio

رمزگشایی ترتیبی کاربران یا حذف صریح سیگنال‌های تداخلی باشد. این ویژگی نه تنها از پدیده انتشار خطا که در روش‌های مبتنی بر SIC رایج است جلوگیری می‌کند، بلکه پیچیدگی محاسباتی را نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، به‌طوری که پیچیدگی مختص هر کاربر با افزایش تعداد کاربران تغییر نمی‌کند. در مقابل، روش MRC-SIC که در [۲۷] مورد استفاده قرار گرفته است، به‌شدت به ترتیب رمزگشایی کاربران و اختلاف توان آن‌ها وابسته بوده و عمدتاً برای سناریوهای NOMA طراحی شده است. درحالی‌که روش پیشنهادی MRC-RS یک چارچوب عمومی‌تر و مقیاس‌پذیرتر برای سیستم‌های با تعداد زیاد کاربران و آنتن‌ها فراهم می‌کند. بر این اساس، برای پیاده‌سازی عملی چارچوب پیشنهادی MRC-RS و تبیین نحوه ترکیب سیگنال‌ها در هر تکرار، در ادامه برآوردگر MRC در فرم نماد به‌نماد ارائه می‌شود. برآوردگر MRC در فرم نماد به‌نماد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{x}_k(j) = \lambda_k x_k(j) + \xi_k(j) \quad (20)$$

که $\lambda_k = \|h_k\|^2 = h_k^H h_k$ به صورت یک اسکالر است و

$$\xi_k(j) \equiv \sum_{k'=1, k' \neq k}^K (h_k^H h_{k'}) x_{k'}(j) + h_k^H \eta(j) \quad (21)$$

با استفاده از اطلاعات غیرذاتی DEC، میانگین و واریانس را برای $x_k(j)$ محاسبه می‌کنیم [۴۱]:

$$\mu_k^x(j) = E(x_k(j)) \quad (22\text{-الف})$$

$$v_k^x = \text{Var}(\text{Re}(x_k(j))) = \text{Var}(\text{Im}(x_k(j))) \quad (22\text{-ب})$$

برای کاهش پیچیدگی، فرض می‌کنیم که واریانس برای هر z و نیز برای بخش‌های حقیقی و موهومی یکسان می‌باشد که به‌طور گسترده در رمزگشایی توربو و برابرسازی توربو استفاده شده است [۴۴، ۴۵]. در عمل اگر واریانس‌ها واقعاً متفاوت باشند، می‌توانیم میانگین‌گیری کنیم. با استفاده از روابط ۲۰ تا ۲۲ محاسبه می‌کنیم:

$$E(\xi_k(j)) = h_k^H \sum_{k'=1, k' \neq k}^K h_{k'} \mu_{k'}^x(j) \quad (23\text{-الف})$$

$$\text{Var}(\text{Re}(\xi_k(j))) = \sum_{k'=1, k' \neq k}^K \text{Var}(\text{Re}(h_k^H h_{k'} x_{k'}(j))) + \|h_k\|^2 N_0/2 \quad (23\text{-ب})$$

رابطه ۲۱ را می‌توان با یک متغیر تصادفی گوسی تقریب زد، به‌طوری که رابطه ۱۰ را بتوان به‌صورت زیر ارزیابی کرد [۴۱]:

$$\text{LLR}_{\text{extrinsic}}(c_k(j')) = \frac{2\lambda_k \sqrt{p_k}/2}{\text{Var}(\text{Re}(\xi_k(j)))} \text{Re}(\hat{x}_k - E(\xi_k(j))) \quad (24)$$

پیچیدگی اصلی MRC-RS به‌نگام‌سازی عملیات در رابطه ۲۳-الف و ۲۳-ب برای کاهش پیچیدگی، رابطه ۲۱ را به‌صورت جمع و تفریق بازنویسی می‌کنیم:

$$\text{LLR}_{\text{extrinsic}}(c_k(j')) = \frac{2\lambda_k \sqrt{p_k}/2}{\text{Var}(\text{Re}(\xi_k(j)))} \text{Re}(\hat{x}_k - E(\xi_k(j))) \quad (25)$$

زمانی که N_{BS} بزرگ باشد، $k' \neq k$ $\|h_k^H h_{k'}\|^2 \rightarrow |H_k^{\text{slow}}|^2 |H_{k'}^{\text{slow}}|^2 N_{BS}$ می‌کند. می‌توان رابطه ۲۳-ب را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\text{Var}(\text{Re}(\xi_k(j))) \approx |H_k^{\text{slow}}|^2 N_{BS} \left(\sum_{k'=1}^K |H_{k'}^{\text{slow}}|^2 v_{k'}^x - |H_k^{\text{slow}}|^2 v_k^x \right) + |H_k^{\text{slow}}|^2 N_{BS} N_0/2 \quad (26)$$

پیچیدگی مختص هر کاربر در روابط ۲۵ و ۲۶ با K افزایش نمی‌یابد؛ زیرا جمع‌های این روابط را می‌توان با K کاربر به اشتراک گذاشت. پس پیچیدگی کلی MRC-RS به میزان قابل توجهی کمتر از الگوریتم بیشترین شباهت^۱ است.

۳-۵- برآورد تکراری کانال به کمک داده

تکنیک DACE روشی است که در پردازش سیگنال دیجیتال برای تخمین ویژگی‌های یک کانال ارتباطی بر اساس داده‌های دریافتی استفاده می‌شود [۴۶، ۴۷]. در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم، کانال بین فرستنده و گیرنده می‌تواند در معرض انواع

^۱ Maximum Likelihood

مختلفی از اعوجاج، مانند محوشدگی، انتشار چندمسیره و تداخل باشد. DACE برای تخمین پاسخ کانال به این اعوجاجها و جبران اثرات آنها بر سیگنال دریافتی استفاده می‌شود. DACE با استفاده از نمادهای داده شناخته شده که همراه با داده‌های واقعی منتقل می‌شوند، عمل می‌کند. این نمادهای شناخته شده برای تخمین پاسخ کانال بر اساس تفاوت بین نمادهای ارسالی و دریافتی استفاده می‌شود. سپس پاسخ کانال تخمین زده شده برای یکسان‌سازی سیگنال دریافتی و بهبود کیفیت آن استفاده می‌شود. DACE را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی مانند الگوریتم حداقل مربعات^۱، الگوریتم خطی حداقل میانگین مربعات خطا^۲ و الگوریتم بیشترین شباهت انجام داد. این الگوریتم‌ها از مدل‌های ریاضی مختلفی برای تخمین پاسخ کانال استفاده می‌کنند و می‌توانند برای انواع مختلف سیستم‌های ارتباطی و شرایط کانال بهینه شوند. DACE به‌طور طبیعی می‌تواند با MRC در چارچوب NOMA ترکیب شود که این کار یک راه‌حل کارآمد برای مایمو انبوه ارائه می‌کند. یک رویکرد پرکاربرد برای تکنیک DACE این است که توالی‌ها را چندین بار تکرار کنیم تا یک تابع انتقال کانال تخمینی بر اساس میانگین تخمین‌های متعدد به دست آوریم. ارتباط متقابل بین پایلوت‌های مورد استفاده توسط کاربران مختلف می‌تواند به تضعیف قابل ملاحظه عملکرد و مسئله آلودگی پایلوت منجر شود. DACE در [۴۸] برای این مسئله تحلیل شده است. DACE را می‌توان به‌صورت مشترک با MRC بکار برد که شامل تکرار دو عملیات است: (۱) استفاده از داده‌های رمزگشایی شده به‌صورت نسبی به‌عنوان پایلوت برای اصلاح برآورد کانال؛ (۲) استفاده از برآورد بهبودیافته کانال برای اصلاح برآورد داده‌ها با MRC. دنباله داده‌ها معمولاً طولانی‌تر از پایلوت است و بدین ترتیب، همبستگی در بین آنها پایین می‌باشد. DACE توان مؤثر پایلوت را افزایش و آلودگی پایلوت را کاهش می‌دهد. اصل DACE به شرح زیر بیان می‌شود:

- یک قاب سیگنال مخابره شده به طول J را به بلوک‌ها تفکیک می‌کنیم که هر یک طول J' دارند و K نماد پایلوت را به هر بلوک اضافه می‌کنیم.
- طول کل هر پایلوت $J'+K$ می‌شود.
- فرض کنید ضریب کانال در هر بلوک بدون تغییر باقی بماند.
- در هر بلوک، سیگنال دریافت شده نماد داده‌ها در آنتن n را می‌توان به‌صورت دنباله زمانی بازنویسی کرد:

$$\mathbf{y}_n = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{n,k} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_n \quad (27)$$

که $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_k(1), \dots, \mathbf{x}_k(j), \dots, \mathbf{x}_k(J')]^T$, $\mathbf{y}_n = [\mathbf{y}_n(1), \dots, \mathbf{y}_n(j), \dots, \mathbf{y}_n(J')]^T$, $\boldsymbol{\eta}_n = [\eta_n(1), \dots, \eta_n(j), \dots, \eta_n(J')]^T$ فرض کنید فیدبک رمزگشا به‌صورت $\{\bar{\mathbf{x}}_k = E(\mathbf{x}_k), \forall k\}$ باشد و $\{\bar{\mathbf{H}}_{n,k} = E(\mathbf{H}_{n,k}), \forall n, k\}$ از تکرار قبلی به دست آید که برای گیرنده معلوم است. برای کاربر k می‌توان محاسبه کرد:

$$\mathbf{z}_{n,k} = \mathbf{y}_n - \sum_{k'=1, k' \neq k}^K \bar{\mathbf{H}}_{n,k'} \bar{\mathbf{x}}_{k'} \quad (28)$$

با جایگزینی رابطه ۲۷ در رابطه ۲۸ داریم:

$$\mathbf{z}_{n,k} = \bar{\mathbf{x}}_k \bar{\mathbf{H}}_{n,k} + \boldsymbol{\xi}_{n,k} \quad (29)$$

که

$$\boldsymbol{\xi}_{n,k} = \mathbf{H}_{n,k} \cdot (\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}}_k) + \sum_{k'=1, k' \neq k}^K (\mathbf{H}_{n,k'} \mathbf{x}_{k'} - \bar{\mathbf{H}}_{n,k'} \bar{\mathbf{x}}_{k'}) + \boldsymbol{\eta}_n \quad (30)$$

یک عبارت معادل نویز است. می‌توان دید که عملیات رابطه ۲۸ به‌منظور حداقل کردن توان از طریق حذف تداخل از کاربران دیگر صورت می‌گیرد. فرض کنید که $\{\xi_{n,k}(j), \forall j\}$ (درایه $\xi_{n,k}$) متغیرهای مستقل با توزیع یکسان^۳ با میانگین صفر و واریانس $V_{n,k}^{\xi} = E(|\xi_{n,k}(j)|^2)$ باشد. برای هر بلوک، یک دنباله پایلوت p_k منحصر به فرد به طول K به کاربر k تخصیص داده می‌شود که متعامد بر دنباله پایلوت سایر کاربران در همان سلول است؛ بنابراین، کاربران عاری از تداخل پایلوت هم سلول هستند.

¹ Least-Square

² Linear Minimum Mean Square Error

³ Independent and identically distributed

۴- نتایج شبیه‌سازی

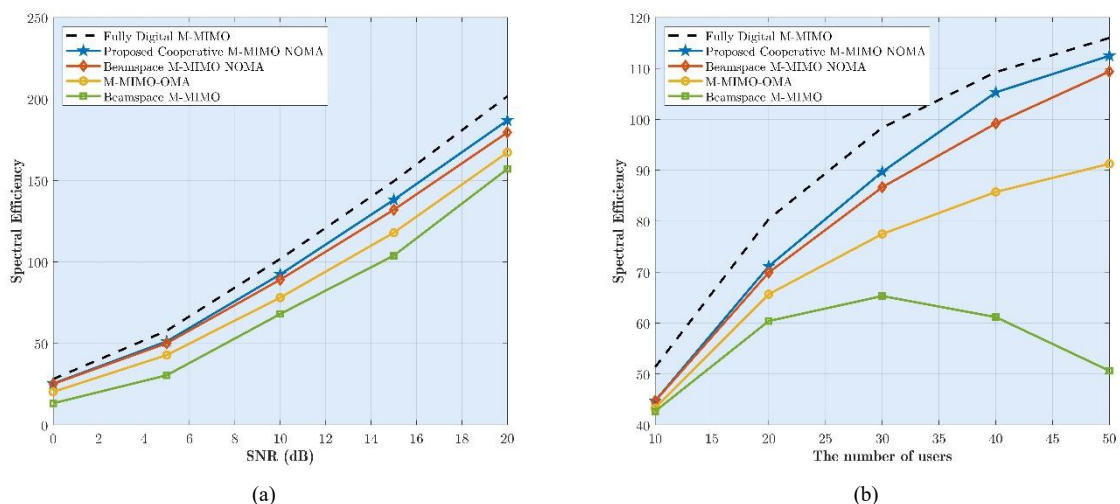
در این بخش، مدل انتقال موج میلیمتری پیشنهاد شده و ساختار آنتن مشارکتی در فراسو برحسب بهره‌وری انرژی و بهره‌وری طیف ارزیابی می‌شوند. به منظور بررسی عملکرد بهتر، طرح پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی سایر روش‌ها مقایسه می‌شود. در مدل کانال پیشنهادی به دلیل فرکانس حامل در ۲۸ گیگاهرتز، مقدار λ برابر با ۰/۰۱۰۷ در نظر گرفته شده است. سایر مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی سیستم مدل پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است. برای همه کاربران کانال، یک مؤلفه دید مستقیم و دو مؤلفه دید غیرمستقیم در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب ارائه شده است. تعداد آنتن در ایستگاه پایه، ۶۴ در نظر گرفته شده که شامل ضرایب محوشدگی کند و سریع است. شکل ۵ (a)، بهره‌وری طیف را برای SNRهای مختلف در روش پیشنهادی نشان می‌دهد. تعداد کاربران برای این شبیه‌سازی ۳۲ و تعداد تکرارها برابر ۲۰ برای غلبه بر مشکل بهینه‌سازی تخصیص توان در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ (a) نشان داده شده است، ساختار مشارکتی و توزیع شده روش پیشنهادی بهتر از M-MIMO تمام دیجیتال، M-MIMO پرتوفضایی [۴۹]، MM-OMA [۵۰] و MM-NOMA پرتوفضایی [۲۸] است. از شکل ۵ (a) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش SNR، بهره‌وری طیف در روش پیشنهادی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی سیستم مدل پیشنهادی

Table 1: Simulation parameters of the proposed model system

Parameter	Value
Operating frequency	28 GHz
Cell radius	289 m
Number of base stations	64
Δ	0.0107
Number of LoS components	1
$\alpha_{K,L}$	CN(0,1)
$\theta_{K,L}$	UD(-0.5,0.5)
Number of NLoS components	2
$\alpha_{K,NL}$	CN(0,0.01)
$\theta_{K,NL}$	UD(-0.5,0.5)
Loss coefficient	-3.76 dB
Log-normal fading deviation	8 dB



شکل ۵: (a) عملکرد بهره‌وری طیف برای SNRهای مختلف برای K=۳۲ کاربر، (b) عملکرد بهره‌وری طیف برای تعداد کاربران مختلف به‌ازای SNR=۱۰ dB.

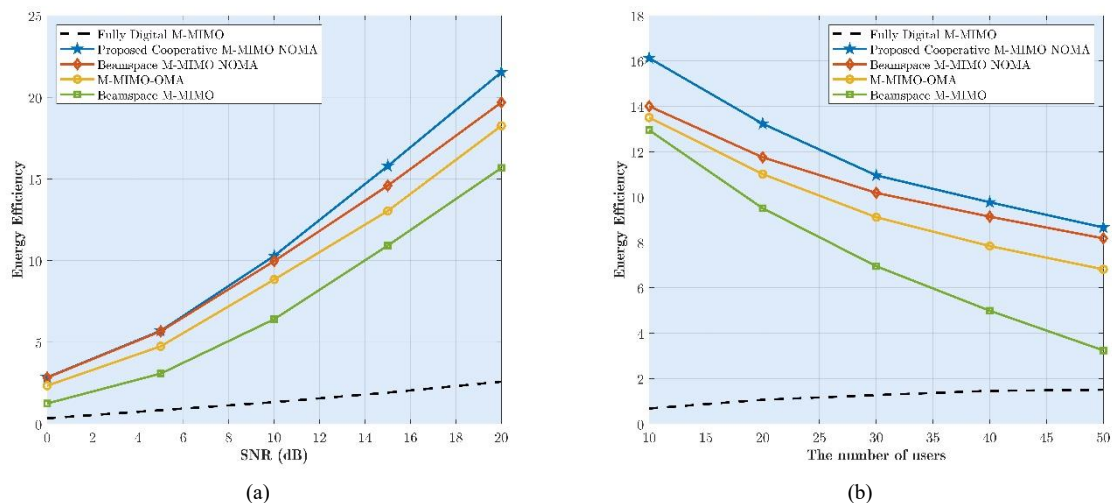
Figure 5. (a) Spectrum efficiency Performance for different SNRs for K=32, (b) Spectrum efficiency performance for different number of users per SNR=10 dB.

مقایسه عملکرد بر حسب بهره‌وری طیف برای تعداد کاربران مختلف برای SNRهای مختلف در شکل ۵ (b) نشان داده شده است که به طور وضوح مشخص است که برای $K \gg 1$ ، عملکرد روش پیشنهادی بسیار مناسب است. مطابق شکل ۵ (b) عملکرد روش M-MIMO پرتوفضایی برای تعداد کاربران بیشتر از ۳۰ کاهش می‌یابد که نشان دهنده ضعف عملکرد پرتو این روش برای کاربران زیاد است.

بهره‌وری انرژی نسبت بین توان مصرفی و نرخ کل قابل دستیابی به شرح زیر است:

$$\varepsilon = \frac{R_{\text{sum}}}{P_t + N_{\text{RF}}(P_{\text{RF}} + P_{\text{SW}}) + P_{\text{BB}}} \text{ (bps / Hz / W)} \quad (31)$$

که P_t حداکثر توان انتقال، P_{RF} توان مصرفی برای هر زنجیره فرکانس رادیویی، P_{SW} توان مصرفی توسط پرتو و P_{BB} توان مصرفی باند پایه است. مطابق [۵۱]، $P_{\text{RF}}=300 \text{ mW}$ ، $P_{\text{SW}}=5 \text{ mW}$ و $P_{\text{BB}}=200 \text{ mW}$ در نظر گرفته شده است. بهره‌وری انرژی سیستم پیشنهادی برای ۳۲ کاربر در SNRهای مختلف در شکل ۶ (a) ارائه شده است. همان طور که نشان داده شده است، روش انتقال موج میلیمتری پیشنهادی توسط آنتن‌های توزیع شده و مشارکتی مبتنی بر MM-NOMA می‌تواند بهره‌وری انرژی بالاتری نسبت به روش‌های دیگر به دست آورد. علاوه بر این، در مقایسه با طرح دیگری [۲۸، ۴۹، ۵۰]، روش پیشنهادی که از سیستم‌های مشارکتی و توزیع شده بهره می‌برد، منجر به بهبود قابل توجهی در بهره‌وری انرژی شده است.



شکل ۶: (a) عملکرد بهره‌وری انرژی برای SNRهای مختلف برای $K=32$ کاربر، (b) عملکرد بهره‌وری انرژی برای تعداد کاربران مختلف به‌ازای $\text{SNR}=10 \text{ dB}$.

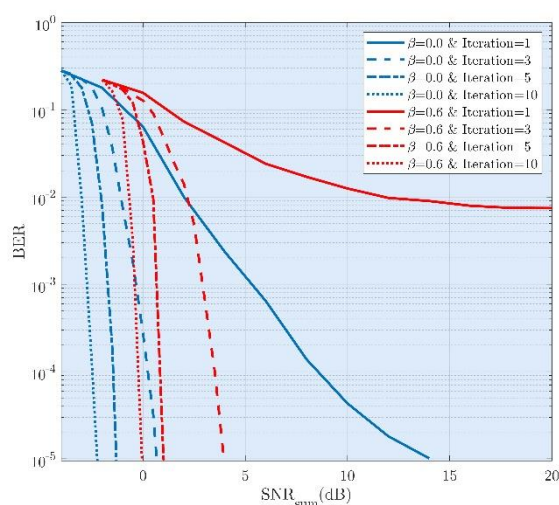
Figure 6. (a) Energy efficiency Performance for different SNRs for $K=32$, (b) Energy efficiency performance for different number of users per $\text{SNR}=10 \text{ dB}$.

از شکل ۶ (a)، می‌توان نتیجه گرفت که بهره‌وری انرژی در سیستم پیشنهادی نسبتاً بالاتر از سیستم معمولی در SNRهای مختلف است. علاوه بر این، بهره‌وری انرژی در SNRهای بالاتر نسبت به سیستم معمولی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. مقایسه عملکرد بهره‌وری انرژی در برابر تعداد کاربران مختلف در شکل ۶ (b) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد کاربران، شکاف عملکرد سیستم پیشنهادی و سایر روش‌ها افزایش یافته است و پس از حدود ۴۰ کاربر، اختلاف با سایر روش‌ها تقریباً ثابت می‌ماند؛ زیرا احتمال انتخاب یک پرتو برای انواع مختلف کاربران با افزایش تعداد کاربران افزایش می‌یابد. در نهایت، نتایج عددی DACE تکراری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. کد توربو با دو کد مؤلفه ماتریس مولد کانولوشن و نرخ کدگذاری برای هر کاربر به ترتیب $1/3$ و $8/1066$ در نظر گرفته شد. برای طرح پیشنهادی DACE و MRC تکراری (DACE-MRC-RS)، هر تکرار شامل یک عملیات DACE-MR برای هر کاربر و یک عملیات رمزگشایی برای هر کد مؤلفه است. اطلاعات ورودی رمزگشای هر مؤلفه، ترکیبی از فیدبک آشکارساز نماد و خروجی کد مؤلفه کناری در تکرار آخر است. تکرار داخلی برای کد توربو هر کاربر برای DACE وجود ندارد. برای MRC-RS، هر تکرار شامل یک عملیات MRC برای هر کاربر و یک عملیات رمزگشایی برای هر کد مؤلفه است. برای MRC و ZF، تکرار تنها در رمزگشای توربو برای هر کاربر انجام

می‌شود. همه نمادهای پایلوت و داده دارای میانگین توان یکسان هستند. مدل ساده SINR در ایستگاه پایه روی یک شکاف برای انتقال فروسو یک کاربر خاص به شرح زیر است [۵۲]:

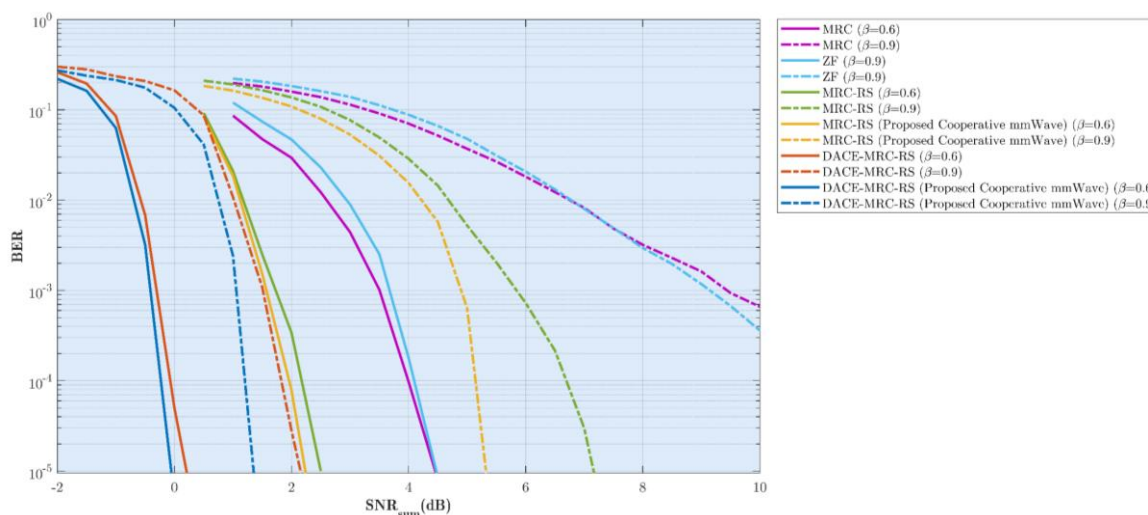
$$\text{SINR}_{\text{sum}} = \frac{P_{\text{sum}}}{N_0 + I_{\text{cross-cell}}} \quad (32)$$

که در آن کل تداخل بین سلولی تمام سلول‌های همسایه با $I_{\text{cross-cell}}$ نشان داده می‌شود، و نرخ مجموع هر سلول با P_{sum} نشان داده می‌شود [۴۳، ۵۲]. فرض می‌کنیم $I_{\text{cross-cell}} = \beta P_{\text{sum}}$ که در آن مقدار β متأثر از عوامل متعددی است. سیستم تک‌سلولی $\beta=0$ دارد و مقدار معمول برای سیستم چندسلولی $\beta=0.6$ است. نمای کوچکتر افت مسیر منجر به مقدار β بزرگتر می‌شود که در محیط دارای دید مستقیم رخ می‌دهد. در شکل ۷، اثرات β بر روی DACE-MRC-RS برای تعداد تکرار متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی DACE-MRC-RS با و بدون تداخل میان سلولی، نسبتاً به سرعت همگرا می‌شود. در شکل ۸، اثر β بر روی روش‌های مختلف مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که DACE-MRC-RS نسبت به گزینه‌های دیگر عملکرد بسیار بهتری را ایفا می‌کند، و این اختلاف زمانی که β بزرگ باشد، قابل توجه می‌شود.



شکل ۷: ارزیابی عملکرد DACE-MRC-RS با و بدون تداخل سلول به سلول برای تعداد تکرار مختلف در روش پیشنهادی.

Figure 7. The performance assessment of DACE-MRC-RS with and without cell-to-cell interference for various iteration numbers in the proposed method.



شکل ۸: مقایسه عملکرد روش‌های مختلف در مقادیر β متفاوت با تعداد تکرار ۲۰.

Figure 8. Comparing the performance of different schemes at β different values with iteration number=20.

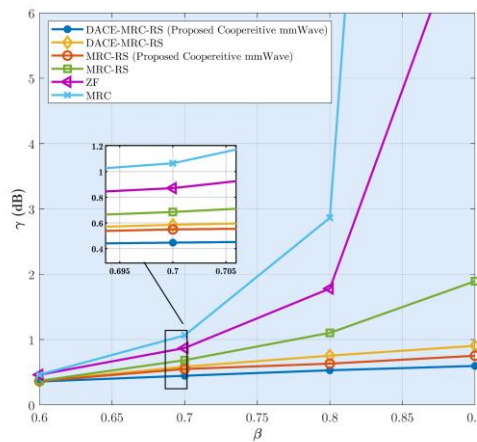
به منظور بررسی اثرات آلودگی پیلوت، فرض می‌کنیم که میانگین توان تداخل برابر βP_{sum} باشد. مقدار SNR_{sum} مورد نیاز برای دستیابی به یک BER معین باید با β افزایش یابد. بنابراین، $\text{SNR}_{\text{sum}}(\beta)$ و $P_{\text{sum}}(\beta)$ به صورت تابعی از β در نظر گرفته می‌شود $(\text{SNR}_{\text{sum}}(\beta) = P_{\text{sum}}(\beta)/N_0)$. بدون آلودگی پیلوت، تداخل میان سلولی را می‌توان نویز مستقل در نظر گرفت. در این سناریو، SINR لازم برای BER ثابت نباید با β تغییر کند. بنابراین،

$$\text{SINR}_{\text{sum}}(\beta) = \frac{P_{\text{sum}}(\beta)}{N_0 + \beta P_{\text{sum}}(\beta)} = \frac{\text{SNR}_{\text{sum}}(\beta)}{1 + \beta \text{SNR}_{\text{sum}}(\beta)} \xrightarrow[\text{SINR}_{\text{sum}} = \text{SNR}_{\text{sum}}(0)]{\text{For } \beta=0} \text{SNR}_{\text{sum}}(\beta) = \left(\frac{1}{\text{SNR}_{\text{sum}}(0)} - \beta \right)^{-1} \quad (33)$$

از طرفی، با توجه به آلودگی پیلوت، تداخل میان سلولی نمی‌تواند نویز مستقل در نظر گرفته شود و رابطه فوق برقرار نیست. بنابراین با مقایسه مقدار در معادلات ۳۳ و مقدار حاصل از شکل ۸ می‌توان نتایج به دست آمده برای اثر آلودگی پیلوت را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\gamma = \frac{\text{SNR}_{\text{sum}1}(\beta)}{\text{SNR}_{\text{sum}2}(\beta)} \quad (34)$$

در رابطه فوق، صورت کسر از شکل ۸ برای $\text{BER} = 10^{-5}$ و مخرج کسر با استفاده از رابطه ۳۳ به دست می‌آید. مقدار γ بزرگ نشان‌دهنده هزینه بالای توان است که از آلودگی پیلوت تحمیل می‌شود و ناشی از همبستگی بین پیلوت‌های کاربران مختلف می‌باشد. این همبستگی به هدایت نادرست سیگنال تداخل و افزایش توان مؤثر تداخل ناشی از هر کاربر منجر می‌شود. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی برای تلفات در حضور آلودگی پیلوت با سایر روش‌ها (DACE-MRC-RS, ZF, MRC) مقایسه شد، که نتایج آن در شکل ۹ قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، نتایج شبیه‌سازی برای روش DACE-MRC-RS پیشنهادی بهتر از روش‌های دیگر حاصل گردید. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که DACE-MRC-RS دارای γ بسیار کمتری از گزینه‌های دیگر است که حاکی از عدم حساسیت آن به آلودگی پیلوت می‌باشد. دلیل این امر این است که DACE طول مؤثر پیلوت را افزایش می‌دهد و مسئله همبستگی فوق‌الذکر را برطرف می‌کند.



شکل ۹: ارزیابی عملکرد تلفات در حضور آلودگی پیلوت برای روش‌های مختلف.

Figure 9. The performance assessment of loss in the presence of pilot contamination for different methods.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک ساختار ارتباطی موج میلی‌متری برای سیستم‌های MM-NOMA مورد بررسی قرار گرفت؛ که در آن چندین کاربر در یک بلوک منبع مشترک (از نظر زمان و فرکانس) قرار دارند و توان‌های متفاوتی برای آن‌ها تخصیص می‌یابد. از آنجا که کاربران با منابع مشترک سروکار دارند، بروز تداخل درون‌خوشه‌ای و بین‌خوشه‌ای امری اجتناب‌ناپذیر است؛ تداخلی که در صورت مدیریت‌نشدن می‌تواند تأثیرات مخربی بر نرخ انتقال داده، قابلیت اطمینان لینک و کارایی کلی شبکه داشته باشد. یکی از راهکارهای کلیدی برای کاهش تداخل، تنظیم بهینه اندازه سلول مجازی است. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که اتخاذ حداکثر نسبت انتقال برای کاربران در سلول‌های مجازی، نیازمند انتخاب اندازه کوچک برای سلول مجازی است؛ زیرا در صورت بزرگ بودن سلول مجازی، کاربران مجبور به اشتراک‌گذاری آنتن‌های ایستگاه پایه خواهند شد و این موضوع منجر به افزایش

تداخل و کاهش عملکرد خواهد شد. بنابراین، طراحی اندازه سلول مجازی باید به صورت پویا و براساس شرایط کانال و تراکم کاربران صورت گیرد. از سوی دیگر، عدم وجود اطلاعات دقیق CSI یکی از چالش‌های بنیادی در شبکه‌های مایموانبوه و مخابرات موج میلی‌متری است. اغلب طرح‌های موجود در چنین شرایطی عملکرد مطلوبی ندارند. به همین دلیل در این پژوهش، یک راهکار ترکیبی مبتنی بر IDMA و DACE مورد استفاده قرار گرفت تا علاوه بر کاهش تداخل، وابستگی سیستم به تخمین دقیق کانال نیز کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های مرسوم، از نظر بهره‌وری انرژی، بهره‌وری طیف، و پایداری عملکرد در برابر آلودگی پیلوت برتری چشمگیری دارد. این نتایج اثبات می‌کنند که ترکیب ساختارهای مشارکتی مبتنی بر NOMA با سازوکارهای هوشمند تخصیص منبع و تشخیص چندکاربره قادر است عملکرد شبکه‌های موج میلی‌متری را به طور معنی‌داری ارتقا دهد.

در آینده می‌توان توسعه این چارچوب را در سناریوهای با تحرک بالا، مدل‌های کانال واقع‌گرایانه‌تر، و همچنین طراحی بهینه‌سازی مشترک میان لایه فیزیکی و MAC دنبال کرد تا بستر لازم برای بهره‌برداری عملی از این ساختار در شبکه‌های 5G و نسل‌های فراتر فراهم گردد.

مراجع

- [1] J. C. Lin, "Synchronization Requirements for 5G: An Overview of Standards and Specifications for Cellular Networks," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 91-99, Sept. 2018, doi: [10.1109/MVT.2018.2813339](https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2813339).
- [2] M. Abbasi, A. Shahraki, H. R. Barzegar, and C. Pahl, "Synchronization Techniques in Device to Device- and Vehicle to Vehicle-Enabled Cellular Networks: A survey," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, p. 106955, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.compeleceng.2020.106955](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106955).
- [3] H. Fourati, R. Maaloul, L. Chaari, and M. Jmaiel, "Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5G networks," *Computer Networks*, vol. 199, p. 108435, Sept. 2021, doi: [10.1016/j.comnet.2021.108435](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108435).
- [4] A. Azab, M. Khasawneh, S. Alrabae, K. R. Choo, and M. Sarsour, "Network traffic classification: Techniques, datasets, and challenges," *Digital Communications and Networks*, Sept. 2022, doi: [10.1016/j.dcan.2022.09.009](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.009).
- [5] A. Akbar, S. Jangsher, and F. A. Bhatti, "NOMA and 5G emerging technologies: A survey on issues and solution techniques," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107950, May 2021, doi: [10.1016/j.comnet.2021.107950](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107950).
- [6] U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, and M. Naeem, "NOMA and future 5G & B5G wireless networks: A paradigm," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 204, p. 103413, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.jnca.2022.103413](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103413).
- [7] S. C. Rajendran and P. Sudheesh, "Sum Data Rate and Energy Efficiency optimization of MIMO NOMA using CDNN," *Proceeding of the IEEE/ICCCSP*, Chennai, India, May 2021, pp. 1-7, doi: [10.1109/ICCCSP52374.2021.9465525](https://doi.org/10.1109/ICCCSP52374.2021.9465525).
- [8] U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, M. Naeem, and I. Rashid, "Energy Efficiency Optimization for Hybrid NOMA based Beyond 5G Heterogeneous Networks," *Proceeding of the IEEE/VTC2021-Fall*, Sept. 2021, pp. 1-5, doi: [10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625334](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625334).
- [9] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017, doi: [10.1109/JSAC.2017.2725519](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519).
- [10] Y. Dursun, K. Wang, and Z. Ding, "Secrecy sum rate maximization for a MIMO-NOMA uplink

- transmission in 6G networks,” *Physical Communication*, vol. 53, p. 101675, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.phycom.2022.101675](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101675).
- [11] M. Zeng *et al.*, “On the Sum Rate of MIMO-NOMA and MIMO-OMA Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 534-537, Aug. 2017, doi: [10.1109/LWC.2017.2712149](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2712149).
- [12] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Feb. 2014, doi: [10.1109/JPROC.2014.2299397](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397).
- [13] B. De Beelde, M. Vantorre, G. Castellanos, M. Pickavet, and W. Joseph, “MmWave Physical Layer Network Modeling and Planning for Fixed Wireless Access Applications,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1-24, Feb. 2023, doi: [10.3390/s23042280](https://doi.org/10.3390/s23042280).
- [14] R. H. Y. Perdana, T. V. Nguyen, and B. An, “Adaptive User Pairing in Multi-IRS-aided Massive MIMO-NOMA Networks: Spectral Efficiency Maximization and Deep Learning Design,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 7, pp. 4377-4390, July 2023, doi: [10.1109/TCOMM.2023.3277533](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3277533).
- [15] A. Gholamrezaee and H. Farrokhi, “Spectrum-efficient mode selection and fair resource allocation for D2D-enabled uplink/downlink MC-NOMA networks,” *Digital Signal Processing*, vol. 137, p. 104050, June 2023, doi: [10.1016/j.dsp.2023.104050](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104050).
- [16] S. Wang, Y. Long, R. Ruby, and X. Fu, “Clustering and power optimization in mmWave massive MIMO-NOMA systems,” *Physical Communication*, vol. 49, p. 101469, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.phycom.2021.101469](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101469).
- [17] Ericsson Mobility Report, Mobile data traffic outlook, June 2023 white paper at <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>.
- [18] S. Trankatwar and P. Wali, “Subchannel and power optimization for sum rate maximization in downlink multicarrier NOMA networks,” *Physical Communication*, vol. 58, p. 102050, June 2023, doi: [10.1016/j.phycom.2023.102050](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102050).
- [19] A. Pandey and P. Kumar, “Performance analysis of dynamic ordered NOMA system,” *Digital Signal Processing*, vol. 133, p. 103865, March 2023, doi: [10.1016/j.dsp.2022.103865](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103865).
- [20] A. Memarinejad, M. Mohammadi, and M. B. Tavakoli, “Outage Performance Analysis of Multi-Antenna Full-Duplex NOMA Cellular Systems,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 45, pp. 1-18, 2022. doi: [10.30495/jce.2022.692365](https://doi.org/10.30495/jce.2022.692365) [in Persian].
- [21] J. L. Jacob, C. A. Pendeza Martinez, A. L. Machado Martinez, and T. Abrão, “Non-linear biobjective EE-SE optimization for NOMA-MIMO systems under user-rate fairness and variable number of users per cluster,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 138, p. 153870, Aug. 2021, doi: [10.1016/j.aeue.2021.153870](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153870).
- [22] S. Pirnia, H. Bakhshi, M. Dosaranian-Moghadam, and R. Khosravi, “Handoff Optimization for Joint Base Station Association and Power Control with Proportional Fairness in NOMA Small-Cell Networks,” *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 47, pp. 17-36, 2023., doi: [10.30495/jce.2022.1967097.1172](https://doi.org/10.30495/jce.2022.1967097.1172) [in Persian].
- [23] Y. Zhang *et al.*, “Secure beamforming designs for maximizing secrecy sum rate in MISO-NOMA networks,” *Digital Communications and Networks*, May 2023, doi: [10.1016/j.dcan.2023.04.001](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.04.001).
- [24] S. Rajoria, A. Trivedi, and W. W. Godfrey, “Energy efficiency optimization for MM-NOMA heterogeneous network with wireless backhauling and energy harvesting,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 159, p. 154477, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.aeue.2022.154477](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154477).
- [25] M.R. Ghavidel Aghdam, B. Mozaffari Tazehkand, R. Abdolee, and M. Mohassel Fegghi, “Space-time block coding in millimeter wave large-scale MIMO-NOMA transmission scheme,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 33, no. 9, p. e4392, 2020, doi: [10.1002/dac.4392](https://doi.org/10.1002/dac.4392).

- [26] M.R. Ghavidel Aghdam, B. Mozaffari Tazehkand, and R. Abdolee, "Joint Optimal Power Allocation and Beamforming for MIMO-NOMA in mmWave Communications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 938-941, 2022, doi: [10.1109/LWC.2022.3150217](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3150217).
- [27] P. Salehi, N. Parhizgar, and F. Pesaran, "A New Cooperative and Distributed Antenna Structure in Massive MIMO-NOMA Based on mmWave Transmission Scheme," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, p. 6717077, Oct. 2021, doi: [10.1155/2021/6717077](https://doi.org/10.1155/2021/6717077).
- [28] B. Wang, L. Dai, Z. Wang, N. Ge, and S. Zhou, "Spectrum and Energy-Efficient Beamspace MIMO-NOMA for Millimeter-Wave Communications Using Lens Antenna Array," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2370-2382, Oct. 2017, doi: [10.1109/JSAC.2017.2725878](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725878).
- [29] A. Meijerink and A. F. Molisch, "On the Physical Interpretation of the Saleh-Valenzuela Model and the Definition of Its Power Delay Profiles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 9, pp. 4780-4793, July 2014, doi: [10.1109/TAP.2014.2335812](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2335812).
- [30] S. Li, J. Sun, S. Ma, and H. Zhou, "Parameterization of channel characteristics based on statistical analysis at refuge chamber," *Physical Communication*, vol. 48, p. 101429, Oct. 2021, doi: [10.1016/j.phycom.2021.101429](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101429).
- [31] L. Dai, "An Uplink Capacity Analysis of the Distributed Antenna System (DAS): From Cellular DAS to DAS with Virtual Cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, pp. 2717-2731, May 2014, doi: [10.1109/TWC.2014.033114.130557](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.033114.130557).
- [32] Z. Liu and L. Dai, "A Comparative Study of Downlink MIMO Cellular Networks With Co-Located and Distributed Base-Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 11, pp. 6259-6274, May 2014, doi: [10.1109/TWC.2014.2355833](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2355833).
- [33] D. Lin, Z. Shi-dong, and Y. Yan, "Capacity with MRC-based macrodiversity in CDMA distributed antenna systems," *Proceeding of the IEEE/GLOBECOM*, vol. 1, pp. 987-991, Nov. 2002, doi: [10.1109/GLOCOM.2002.1188225](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2002.1188225).
- [34] D. Lin, Z. Shidong, and Y. Yan, "Capacity analysis in CDMA distributed antenna systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 2613-2620, Nov. 2005, doi: [10.1109/TWC.2005.858011](https://doi.org/10.1109/TWC.2005.858011).
- [35] N. Lee, D. Morales-Jimenez, A. Lozano, and R. W. Heath, "Spectral Efficiency of Dynamic Coordinated Beamforming: A Stochastic Geometry Approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 1, pp. 230-241, Jan. 2015, doi: [10.1109/TWC.2014.2337305](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2337305).
- [36] K. Humadi, I. Trigui, W. P. Zhu, and W. Ajib, "Dynamic Base Station Clustering in User-Centric mmWave Networks: Performance Analysis and Optimization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 7, pp. 4847-4861, July 2021, doi: [10.1109/TCOMM.2021.3070357](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3070357).
- [37] J. Joung, Y. K. Chia, and S. Sun, "Energy-Efficient, Large-Scale Distributed-Antenna System (L-DAS) for Multiple Users," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 954-965, Oct. 2014, doi: [10.1109/JSTSP.2014.2309942](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2309942).
- [38] J. Wang and L. Dai, "Downlink Rate Analysis for Virtual-Cell Based Large-Scale Distributed Antenna Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 3, pp. 1998-2011, March 2016, doi: [10.1109/TWC.2015.2497678](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2497678).
- [39] S. Deshpande, P. Sharma, M. Aggarwal, and S. Ahuja, "Mitigating pilot contamination in Rician faded massive MIMO 5G systems using enhanced zero forcing precoding and ring partitioning," *Physical Communication*, vol. 49, p. 101467, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.phycom.2021.101467](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101467).
- [40] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010, doi: [10.1109/TWC.2010.092810.091092](https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092).

- [41] P. Li, L. Lihai, W. Keying, and W. K. Leung, "Interleave division multiple-access," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 4, pp. 938-947, April 2006, doi: [10.1109/TWC.2006.1618943](https://doi.org/10.1109/TWC.2006.1618943).
- [42] Y. Hu, C. Liang, L. Liu, C. Yan, Y. Yuan, and L. Ping, "Interleave-Division Multiple Access in High Rate Applications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 476-479, April 2019, doi: [10.1109/LWC.2018.2876538](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2876538).
- [43] C. Xu, Y. Hu, C. Liang, J. Ma, and L. Ping, "Massive MIMO, Non-Orthogonal Multiple Access and Interleave Division Multiple Access," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14728-14748, July 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2725919](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2725919).
- [44] D. Raphaeli and Y. Zorai, "Combined turbo equalization and turbo decoding," *IEEE Communications Letters*, vol. 2, no. 4, pp. 107-109, April 1998, doi: [10.1109/4234.664220](https://doi.org/10.1109/4234.664220).
- [45] Z. Pan, C. Xie, H. Wang, Y. Wei, and D. Guo, "Blind Turbo Equalization of Short CPM Bursts for UAV-Aided Internet of Things," *Sensors*, vol. 22, no. 17, Aug. 2022, doi: [10.3390/s22176508](https://doi.org/10.3390/s22176508).
- [46] J. Ma and L. Ping, "Data-Aided Channel Estimation in Large Antenna Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 12, pp. 3111-3124, June 2014, doi: [10.1109/TSP.2014.2321120](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2321120).
- [47] I. Khan, M. Cheffena, and M. M. Hasan, "Data Aided Channel Estimation for MIMO-OFDM Wireless Systems Using Reliable Carriers," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47836-47847, April 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3269659](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3269659).
- [48] A. Belhabib, J. Amadid, M. Boulourd, M. R. Hassani, and A. Zeroual, "Pilot Contamination Suppression Based Coordination in Multi-cell Massive MIMO Systems," *Wireless Personal Communications*, vol. 125, no. 2, pp. 1883-1894, Feb. 2022, doi: [10.1007/s11277-022-09638-6](https://doi.org/10.1007/s11277-022-09638-6).
- [49] X. Gao, L. Dai, Z. Chen, Z. Wang, and Z. Zhang, "Near-Optimal Beam Selection for BeamSpace MmWave Massive MIMO Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 1054-1057, March 2016, doi: [10.1109/LCOMM.2016.2544937](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2544937).
- [50] M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, "Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6325-6343, Aug. 2016, doi: [10.1109/ACCESS.2016.2604821](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2604821).
- [51] L. Dai, B. Wang, M. Peng, and S. Chen, "Hybrid Precoding-Based Millimeter-Wave Massive MIMO-NOMA With Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 131-141, Jan. 2019, doi: [10.1109/JSAC.2018.2872364](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2872364).
- [52] D. Tse, P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, doi: [10.1017/CBO9780511807213](https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213).

پیوست

الف) استنتاج رابطه (۹)

برای ارزیابی تأثیر اندازه سلول مجازی V بر عملکرد نرخ، ابتدا شعاع سلول مجازی کاربر را به عنوان فاصله از این کاربر تا نزدیکترین آنتن ایستگاه پایه آن V امین سلول مجازی تعریف می‌کنیم. شکل ۱۰ شعاع سلول‌های مجازی کاربر k و نزدیکترین کاربر j^* در تداخل با آن را نشان می‌دهد. به طور کلی، با افزایش اندازه سلول مجازی V ، شعاع r_k سلول مجازی کاربر k بزرگتر می‌شود، که نشان می‌دهد آنتن‌های ایستگاه پایه بیشتری در سلول مجازی کاربر k گنجانده شده است و بنابراین میانگین قدرت سیگنال دریافتی کاربر k افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با یک V بزرگتر، شعاع r_{j^*} سلول مجازی کاربر j^* نیز افزایش می‌یابد، که با آن آنتن‌های ایستگاه پایه بیشتری به نزدیکترین کاربر j^* مزاحم کاربر k ارسال می‌شود، که منجر به تداخل بالاتر برای کاربر k می‌شود. اگر اندازه V بسیار بزرگ باشد، سلول‌های مجازی کاربر k و کاربر j^* با یکدیگر همپوشانی پیدا می‌کنند، در این صورت کاربر k به دلیل آنتن‌های مشترک ایستگاه پایه از تداخل شدید کاربر j^* رنج می‌برد؛ بنابراین، برای رسیدن به یک تعادل خوب بین میانگین قدرت سیگنال دریافتی و تداخل، پیشنهاد می‌شود که بزرگترین اندازه سلول مجازی را بدون ایجاد همپوشانی بین سلول‌های مجازی کاربر k و کاربر j^* انتخاب کنیم. به این صورت که [۳۴]،

$$\max V \quad \text{s.t.} \quad d_{k,j^*} \geq r_k + r_{j^*} \quad (35)$$

که d_{k,j^*} مسافت بین کاربر k و کاربر j^* است. از آنجایی که روی میانگین نرخ کاربر تمرکز می‌کنیم، محدودیت را به ازای $\bar{d}_{k,j^*} = E_{\{\gamma_j, l\}}[r_k + r_{j^*}] \leq d_{k,j^*}$ بیشتر کاهش می‌دهیم که $\bar{d}_{k,j^*} = E_{\{\gamma_j, l\}}[d_{k,j^*}]$ ، مجموعه کاربران را با k و مجموعه آنتن‌های ایستگاه پایه را به صورت B نشان داده شده است. مسئله بهینه‌سازی فرموله شده در رابطه ۳۵ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\max V \quad \text{s.t.} \quad r_k + r_{j^*} \leq \bar{d}_{k,j^*} \quad (36)$$

که $\bar{r}_k = E_{\{\gamma_j, l\}}[r_k]$ و $\bar{r}_{j^*} = E_{\{\gamma_j, l\}}[r_{j^*}]$. همان‌طور که آنتن‌های ایستگاه پایه L به طور یکنواخت توزیع شده‌اند، یعنی $\bar{r}_k = \bar{r}_{j^*} = V/L$ ، محدودیت رابطه ۳۶ را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V \leq \frac{L}{4} (\bar{d}_{k,j^*})^2 \quad (37)$$

از روابط ۳۶ و ۳۷ مشخص است که اندازه سلول مجازی بهینه V^* برابر است با $\frac{L}{4} (\bar{d}_{k,j^*})^2$. تابع چگالی احتمال از فاصله کاربر k تا نزدیکترین کاربر آن j^* (d_{k,j^*}) ، به صورت $fd_{k,j^*}(x) = (K-1)(1-x^2)^{K-2} \cdot 2x$ تعریف می‌شود؛ بنابراین:

$$\begin{aligned} \bar{d}_{k,j^*} &= 2 \int_0^1 x^2 (K-1) (1-x^2)^{K-2} dx \approx 2 \int_0^1 x^2 (K-1) e^{-(K-2)x^2} dx \\ &= \frac{K-1}{\sqrt{(K-2)^3}} \int_0^{K-2} y^{\frac{1}{2}} e^{-y} dy = \frac{K-1}{\sqrt{(K-2)^3}} \left\{ -\sqrt{K-2} e^{-(K-2)} + \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}, 0\right) - \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}, K-2\right) \right\} \end{aligned} \quad (38)$$

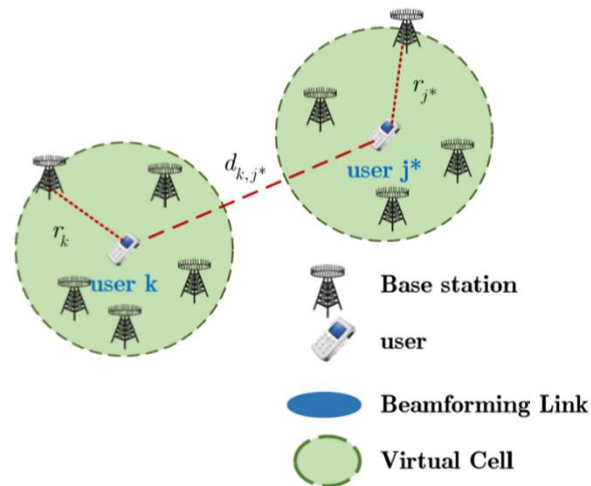
که $\Gamma(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt$ به ازای تعداد زیاد کاربران ($K \gg 1$) تقریب‌های $\sqrt{K-2} e^{-(K-2)} \approx 0$ ، $\Gamma\left(\frac{1}{2}, K-2\right) \approx 0$ و

$$\text{در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین، رابطه ۳۸ را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:} \quad \frac{K-1}{\sqrt{(K-2)^3}} \approx \frac{1}{\sqrt{K}}$$

$$\bar{d}_{k,j^*} \approx \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}, 0\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{K}} \approx \frac{0.89}{\sqrt{K}} \quad (39)$$

در نهایت، از ترکیب روابط ۳۷ و ۳۸ و تقریب‌های در نظر گرفته شده، می‌توان اندازه V^* را به صورت زیر نوشت:

$$V^* = \frac{L}{4} \left(\frac{K-1}{\sqrt{(K-2)^3}} \left(-\sqrt{K-2} e^{-(K-2)} + \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}, 0\right) - \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}, K-2\right) \right) \right)^2 \quad (40)$$



شکل ۱۰: شعاع سلول‌های مجازی کاربر k و نزدیکترین کاربر j در تداخل با آن.

Figure 10. The radius of virtual cells of user k and the nearest user j in interference with it.

به‌ازای تعداد کاربران زیاد ($K \gg 1$) رابطه ۴۰ به‌صورت $V^* = 0.2L/K$ تقریب زده می‌شود، که نشان می‌دهد اندازه سلول مجازی بهینه V^* تنها با نسبت تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه به تعداد کاربران تعیین می‌شود. از سوی دیگر، اندازه هر سلول مجازی باید یک عدد صحیح و کوچکتر از یک نباشد. از این‌رو، اندازه سلول مجازی بهینه V^* می‌تواند به‌صورت زیر بازنویسی شود:

$$V^* = \left\lceil 0.2 \frac{L}{K} \right\rceil \quad (41)$$

بنابراین رابطه ۹ حاصل می‌گردد.

Fractal Slotted Leaky-Wave Antenna Based on SIW and Balanced CRLH Transmission Line with Enhanced Backward Bandwidth Scanning and Gain in X-Band

Hossein Mashhadi¹  | Loghman Asadpor²  | Yashar Zehforoosh³  | Tohid Sedghi⁴ 

¹Department of Electrical Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
h.mashhadi@iau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
yashar.zehforoosh@iau.ac.ir

⁴Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
tohid.sedghi@iau.ac.ir

Correspondence

Loghman Asadpor, Assistant Professor of Department of Electrical Engineering, Microwave & Antenna Research Center, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

Main Subjects:

Antenna Design

Paper History:

Received: 13 August 2024

Revised: 25 August 2024

Accepted: 3 September 2024

Abstract

This paper presents the design and analysis of a slotted leaky-wave antenna (LWA) based on a first-order Vicsek fractal geometry integrated with a balanced composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL). The proposed antenna, realized on a substrate-integrated waveguide (SIW) platform, aims to enhance frequency bandwidth and maintain a stable high gain across the X-band. The upper layer of the SIW is etched with a Vicsek-shaped fractal slot, while two radiating patches are embedded beneath these slots. The balanced CRLH unit cell enables continuous beam scanning from backward to forward directions without any cutoff at broadside. Experimental results confirm that the antenna achieves a scanning range from -79° to $+81^\circ$ with a nearly constant gain exceeding 14 dB over the 7.3–13 GHz band. Compared with the previous non-fractal SIW slot antenna, the proposed design demonstrates a 16.3 % improvement in effective bandwidth and increases the peak gain from 12.83 dB to 14.2 dB. The good agreement between simulation and measurement validates the effectiveness of integrating Vicsek fractal geometry for improving radiation performance, gain uniformity, and scanning bandwidth in SIW-based leaky-wave antenna applications.

Keywords: Leaky-wave antenna, Beam scanning, Antenna gain, Composite Right/Left-Handed Transmission Line (CRLH), Slotted waveguide, Substrate-Integrated Waveguide (SIW).

Highlights

- Using fractal structure to enhance bandwidth and achieve broader frequency coverage.
- Antenna design based on balanced CRLH-TL for cutoff-free broadside scanning.
- Maintaining a constant gain across entire frequency band and improving of backward scanning bandwidth.

Citation: H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Fractal Slotted Leaky-Wave Antenna Based on SIW and Balanced CRLH Transmission Line with Enhanced Backward Bandwidth Scanning and Gain in X-Band," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 126–145, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1129061 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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

Leaky Wave Antennas (LWAs) are traveling-wave radiators capable of scanning the main beam direction with frequency variation [1, 2]. Compared with conventional array antennas, they provide high gain, broad bandwidth, and simple feeding networks, making them suitable for beam-steering and frequency-scanning systems. The integration of Composite Right/Left-Handed Transmission Lines (CRLH-TLs) has introduced metamaterial-based LWAs enabling continuous backward-to-forward beam scanning [3]. To realize such functionalities, Substrate-Integrated Waveguide (SIW) technology offers a low-loss and planar platform that inherits the advantages of traditional waveguides—such as high-quality factor and excellent isolation—while remaining compact and compatible with integrated planar circuits [4].

In this study, a new Vicsek fractal slot-based balanced CRLH-SIW LWA is proposed to address these limitations. The first-order Vicsek geometry enhances current distribution, extends the effective scanning bandwidth by approximately 16 %, and raises the maximum gain from 12.83 dB to 14.2 dB compared with the previous design [5].

2. Innovation and contributions

This work is based on the previously balanced CRLH-SIW leaky-wave antenna (LWA) reported in [6]. While the overall transmission-line configuration remains balanced, the slot geometry in the top metal layer has been replaced and optimized—from a conventional H-shaped slot to a first-order Vicsek fractal pattern—to achieve higher efficiency and wider scanning bandwidth. This geometric modification leads to several important improvements, summarized as follows:

Bandwidth Enhancement:

The adoption of the first-order Vicsek slot increases the effective surface current path and coupling capacitance between unit cells. As a result, the proposed antenna achieves an approximately 16 % broader scanning bandwidth with continuous backward-to-forward radiation and no stopband at broadside.

Improved and Stable Gain Performance:

Benefiting from the refined field confinement of the Vicsek geometry within the balanced CRLH-SIW framework, the maximum gain rises from 12.83 dB to 14.2 dB (≈ 10.6 % improvement). Additionally, the antenna maintains gain fluctuations below 3 dB across 7.3–13 GHz, indicating stable radiation efficiency throughout the operating band.

Smoother and Wider Beam Scanning:

The modified dispersion characteristics of the Vicsek-based unit cell enhance the phase-constant variation, allowing a more uniform scanning response from the backward to forward regions without broadside distortion or scanning discontinuity.

3. Materials and Methods

The proposed leaky wave antenna (LWA) is developed using Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology and a balanced Composite Right/Left-Handed Transmission Line (CRLH TL) configuration. The final design is composed of 15 identical unit cells aligned along the longitudinal axis, forming a periodic balanced structure responsible for controlled phase progression and continuous radiation.

The slots are etched into the upper ground layer of the SIW, and the rectangular patches are placed beneath the slots. Metal vias are used to form the lateral walls of the SIWs. For the design of the unit cell with length P_{uc} , two substrates of 5880 RT Duroid with physical characteristics ($\epsilon_r = 2.2$ and $\tan\delta = 0.0009$) are used. The total height of the SIW structure is $h_1 + h_2 = 41$ mils, and the rectangular patches are placed within the SIW structures at a height of $h_1 = 31$ mils.

4. Results and Discussion

The results that were examined after the simulation are as follows, and we will explain each of them in detail

Dispersion diagram for the Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW unit cell.

The dispersion curve of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH-SIW unit cell demonstrates a smooth transition from the left-handed to the right-handed region, confirming the balanced CRLH property. The intersection of the air line with the dispersion curve occurs at 8.48 GHz, marking the broadside radiation point without any stopband. The left-handed region extends from 7.3 to 8.48 GHz, while the right-handed region covers 8.48 to 13 GHz. Compared with the previous H-slot design [5], introducing the Vicsek fractal slot increases the effective series capacitance CL , lowers the transition frequency, and consequently improves radiation efficiency and gain stability. The dispersion diagram, extracted from simulated S-parameters, verifies continuous beam scanning through the entire X-band with high agreement to theoretical CRLH behavior.

Bloch impedance diagram for the Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW unit cell.

The Bloch impedance diagram of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH-SIW unit cell confirms proper impedance balance and matching for the full-length leaky-wave antenna. The real part of the Bloch impedance is averaged across the radiating region to determine the optimal width of the tapered line that transforms a

50- Ω microstrip line into the antenna input. At the balanced frequency (8.48 GHz), the imaginary part of the Bloch impedance reaches its minimum, indicating excellent matching and complete transition between LH and RH bands.

Beam scanning versus frequency for Vicsek Fractal Slotted CRLH SIW antenna.

The frequency scanning behavior of the proposed Vicsek fractal slotted CRLH SIW LWA demonstrates continuous and stable beam steering across the 7.3–13 GHz band. As frequency increases, the main beam smoothly scans from the backward (-79°) region to the forward ($+81^\circ$) region, passing through the broadside (0°) direction without any cut-off or radiation gap. This seamless scanning behavior confirms the balanced CRLH condition with proper left-handed to right-handed transition. Compared to the previous H-slotted design [5], the proposed Vicsek fractal slot significantly broadens the effective scanning range and maintains higher gain uniformity at extreme angles.

5. Conclusion

In this paper, a leaky wave antenna (LWA) employing first-order Vicsek fractal-shaped slots on the upper ground layer and implemented on a CRLH-based substrate integrated waveguide (SIW) platform has been proposed and experimentally validated. The design achieves a continuous backward-to-forward beam scanning over the frequency range of 7.3 GHz to 13 GHz, covering angles from -79° to 81° , without exhibiting any broadside cutoff at 0° . Throughout the scanning band, the antenna maintains a nearly constant gain above 12 dB, with a maximum measured gain of 14.2 dB and a gain variation below 3 dB across the X band. These results confirm that the proposed Vicsek fractal slotted CRLH SIW LWA offers stable and high directive radiation, representing a practical solution for wide-angle beam scanning applications in modern X-band communication systems.

6. Acknowledgement

The authors extend their gratitude to the Microwave Laboratory of Urmia Islamic Azad University (in particular) and the Antenna Laboratory of K. N. Toosi University of Technology for providing the experimental facilities that significantly contributed to the progress of this study.

References

- [1] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Balanced Right-Handed/Left-Handed Transmission Lines," *23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, 2015 [in Persian].
- [2] Y. J. Guo and R. W. Ziolkowski, *Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications*. John Wiley & Sons, inc., Hoboken, New Jersey, 2022, doi: [10.1002/9781119712947](https://doi.org/10.1002/9781119712947).
- [3] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Compact CRLH Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4407-4414, Sept. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2851278](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851278).
- [4] A. M. Malekshah, A. R. Attari, and M. S. Majedi, "Improved design of uniform SIW leaky wave antenna by considering the unwanted mode", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6378–6382, Feb. 2020, doi: [10.1109/TAP.2020.2975292](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2975292).
- [5] H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Slotted Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna with Improved Backward Scanning Bandwidth and Constant Gain in X-band," *IETE Journal of Research*, vol. 70, no. 6, pp. 5510-5517, 2023, doi: [10.1080/03772063.2023.2265866](https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2265866).

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

Author Contributions: **Hossein Mashhadi:** Software, methodology, writing; **Loghman Asadpor:** Resources, methodology, original draft preparation; **Yashar Zehforoosh:** Resources, manuscript editing; **Tohid Sedghi:** 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.

آنتن موج نشستی شکافدار فرکتالی بر پایه SIW و خط انتقال CRLH متعادل با قابلیت اسکن پهنای باند پشت‌تاب بهبود یافته و افزایش گین در باند X

حسین مشهدی^۱ | لقمان اسدیپور^۲ | یاشار زهفروش^۳ | توحید صدقی^۴

چکیده:

در این پژوهش، طراحی و تحلیل یک آنتن موج‌نشستی شکافدار مبتنی بر هندسه‌ی فرکتال جعبه‌ای مرتبه‌اول Vicsek بر پایه‌ی خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل (Balanced CRLH-TL) ارائه شده است. هدف از این ساختار، بهبود پهنای‌باند فرکانسی و دستیابی به بهره‌ی ثابت بالا در کل باند X است. آنتن پیشنهادی از آرایه‌ای از سلول‌های واحد موجبر مجتمع‌شده روی زیرلایه (SIW) تشکیل شده که لایه‌ی فوقانی آن با شکافی به فرم فرکتال Vicsek برش داده شده و دو پیچ تشعشی در زیر این شکاف‌ها تعبیه شده‌اند. سلول CRLH متعادل به کار رفته، امکان اسکن پیوسته‌ی فرکانسی از ناحیه‌ی پشت‌تاب تا جلوتاب را بدون وقوع باند قطع در پهلوتاب فراهم می‌سازد. در مقایسه با آنتن موج‌نشستی SIW مسطح معرفی شده در کار پیشین (مقاله اول نویسنده‌گان)، ساختار فعلی با بهره‌گیری از هندسه‌ی Vicsek توانسته است بهره را از ۸۳dB12 به ۱۶/۳dB2/14 افزایش دهد و پهنای باند مؤثر را نیز حدود ۱۶/۳ درصد گسترش دهد. الگوی تشعشی اندازه‌گیری شده در دامنه‌ی فرکانسی ۳/۷GHz تا ۱۳GHz دارای زاویه‌ی اسکن ۷۹- تا ۸۱ درجه و بهره‌ی ثابت بزرگ‌تر از ۱۴dB در کل باند X است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری سازگاری خوبی نشان می‌دهند و استفاده از هندسه‌ی Vicsek به عنوان شکاف فرکتالی، روش مؤثری برای افزایش بهره و بهبود عملکرد تشعشی آنتن‌های موج‌نشستی SIW در کاربردهای میکروویوی محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آنتن موج نشستی، اسکن پرتو، بهره آنتن، خط انتقال راستگرد-چپگرد (CRLH)، موجبر شکافدار، موجبر مجتمع شده بر روی زیرلایه (SIW).

^۱ گروه برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
h.mashhadi@iau.ac.ir

^۲ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

^۳ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
yashar.zehforoosh@iau.ac.ir

^۴ گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
tohid.sedghi@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*لقمان اسدیپور، استادیار، گروه برق، مرکز تحقیقات آنتن و میکروویو، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
loghman.asadpour@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

طراحی آنتن

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳ شهریور ۱۴۰۳

تازه‌های تحقیق:

- استفاده از ساختار فرکتال برای افزایش پهنای باند و پوشش وسیع‌تری از فرکانس‌ها.
- طراحی آنتن بر پایه خط انتقال راستگرد-چپگرد متعادل جهت اسکن بدون باند قطع در پهلوتاب.
- حفظ گین ثابت در کل باند فرکانسی، و بهبود پهنای باند اسکن رو به عقب.

COPYRIGHTS

©2026 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

آنتن ها انواع مختلفی دارند که از نظر نوع تشعشع نیز باهم متفاوت هستند [۱،۲] و آنتن های موج نشتی^۱ نوعی از آنتن های انتشار امواج هستند که معمولاً در یک باند فرکانسی گسترده تشعشع می کنند و قادرند بخشی از فضا را به صورت زاویه ای اسکن کنند. در این آنتن ها، با تغییر فرکانس، زاویه پرتو اصلی تشعشع نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن تغییر می کند. آنتن موج نشتی نوعی از ساختار موج رونده است که هم زمان با انتشار موج در طول ساختار خود، تشعشع نیز انجام می دهد [۳،۴]. آنتن های موج نشتی (LWA) دارای روزه تشعشعی الکتریکی بزرگی به اندازه چندین طول موج هستند. از مزایای LWA نسبت به آنتن های آرایه ای معمولی، می توان به ساختار تغذیه ساده با افت کم و توانایی ارائه بهره بالا بدون نیاز به شبکه پیچیده تغذیه اشاره کرد. این آنتن ها معمولاً در کاربردهای اسکن فضا با فرکانس استفاده می شوند و به دلیل عدم نیاز به شبکه تغذیه پیچیده، گزینه ای مناسب و اقتصادی برای جایگزینی با آنتن های آرایه ای هستند. آنتن های موج نشتی معمولی از پهلوتاب^۲ تا جلوتاب^۳ را اسکن فرکانسی می کنند. همچنین، خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی^۴ (CRLHTLs) ساختارهای ماکروویوی مصنوعی هستند که ویژگی های خاص الکترومغناطیسی، از جمله انتشار معکوس موج، را از خود بروز می دهند. این ساختارها تحت عنوان گروهی از ساختارهای مهندسی شده با نام فراماده^۵ در علم الکترومغناطیس طبقه بندی می شوند و در دهه اخیر کاربردهای زیادی یافته اند. ترکیب این دو ایده، یعنی طراحی یک آنتن موج نشتی مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی، ویژگی ممتاز جدیدی به آنتن های موج نشتی می افزاید و آن اسکن فرکانسی در الگوی پشت تاب^۶ است. این ساختارها به عنوان آنتن های موج نشتی فراماده نیز شناخته می شوند. [۵]. برای پیاده سازی چنین ایده ای، نیاز به یک ساختار مناسب برای طراحی آنتن وجود دارد. در سال های اخیر، موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه^۷ به عنوان گزینه ای مطلوب برای ساخت انواع آنتن های موج نشتی مطرح شده اند [۶]. آنتن های موج نشتی معمولاً یا بر روی موجبرهای فلزی یا با استفاده از خطوط ریزنواری طراحی می شوند. موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه در واقع حد واسطی بین خطوط ریزنواری و موجبرها هستند که علاوه بر حفظ ویژگی های موجبرهای مستطیلی معمولی، از جمله ضریب کیفیت بالا، توان حمل بالا و ایزولاسیون عالی، قابلیت ترکیب با سایر ساختارهای ریزنواری را نیز دارند. این فناوری مزایای اضافی مانند کم بودن تلفات، هزینه پایین و حجم کوچک را نیز ارائه می دهد. مهم ترین مزیت فناوری SIW این است که امکان تجمیع تمامی اجزاء سیستم، شامل ساختارهای غیرفعال، عناصر فعال و حتی آنتن ها، بر روی یک زیرلایه واحد را فراهم می آورد [۷،۸].

به طور کلی، اولین مد مرتبه بالا برای تشعشع در جهت جلوتاب، فقط در آنتن های موج نشتی معمولی و مسطح مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، ساختارهای متناوب مبتنی بر آنتن های موج نشتی می توانند در جهت پشت تاب نیز تشعشع کنند. در دهه گذشته، از پیکربندی های ترکیبی راستگرد-چپگرد (CRLH) در طراحی آنتن های موج نشتی فراماده برای دستیابی به اسکن پیوسته پرتو اصلی از پشت تاب تا جلوتاب با تغییرات فرکانس بهره برداری شده است [۵]. طراحی های مختلفی از آنتن های موج نشتی مبتنی بر فراماده ارائه شده است. در مرجع [۹]، آنتن موج نشتی با ساختار موجبر مجتمع شده در زیرلایه (SIW) بر اساس CRLH معرفی شده است که می تواند پرتو را از 65° تا 58° اسکن کرده و بهره ای برابر با 1 dBi ارائه دهد. در مرجع [۱۰]، آنتن موج نشتی با ساختار SIW دارای شکاف های اینتردیجیتال، با بهره ای حدود 8 dB و زوایای اسکن از 70° تا 60° به نمایش گذاشته شده است. در مرجع [۱۱]، از موجبر مستطیلی در آنتن موج نشتی CRLH استفاده شده است که در آن به بهره ای برابر با $8/64 \text{ dB}$ و اسکن پیوسته پرتو از 70° تا 70° دست یافته است. در مرجع [۱۲]، آنتن موج نشتی با ساختار SIW صفحه ای دارای شکاف با بهره ای ثابت در دامنه اسکن از 66° تا 78° پیشنهاد شده است.

همچنین در مقاله پیشین نویسندگان [۱۷]، تمرکز اصلی بر بهبود پهنای باند اسکن، حذف باند قطع در Broadside، و حفظ گین بالا در سراسر باند X بود. این دستاورد با استفاده از سلول های مبتنی بر CRLH متعادل و شکاف های H شکل در لایه

¹ Leaky Wave Antenna² Broadside³ Forward⁴ Composite Right/Left Handed Transmission lines⁵ Metamaterial (MTM)⁶ Backward⁷ Substrate Integrated Waveguide (SIW)

بالایی SIW حاصل شد. طراحی مزبور با حفظ یکپارچگی ساختار توانست محدودیت‌های متداول آنتن‌های موج‌نشتی کلاسیک، از جمله پهنای‌بند محدود در اسکن پشت‌تاب را تا حد زیادی برطرف کند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچنان باقی مانده بود؛ از جمله عدم کنترل کافی بر مسیر جریان سطحی برای بهبود خلوص الگو در تمام زوایای اسکن، محدودیت عملکرد پایدار در فرکانس‌های پایین‌تر، و نیاز به افزایش بیشتر پهنای‌بند اسکن با حفظ گین یکنواخت در محدوده‌ای وسیع‌تر. در کار حاضر، این محدودیت‌ها با معرفی هندسه فرکتالی Vicsek در طراحی شکاف‌های سطحی لایه بالایی SIW مورد هدف قرار گرفته‌اند. در نتیجه، آنتن پیشنهادی علاوه بر حفظ گین ثابت در باند X، افزایش تقریبی ۱۶٪ در پهنای‌بند اسکن و افزایش مقدار گین از ۱۲/۸۳dB در مقاله اول [۱۷] به ۱۴/۲dB را به نمایش می‌گذارد.

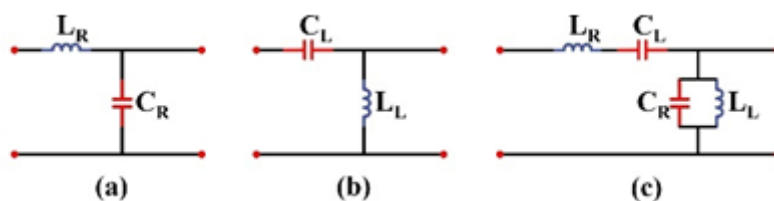
در این مقاله، یک آنتن موج‌نشتی (LWA) با شکاف‌هایی به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و ساختار SIW-CRLH جهت بهبود زاویه اسکن در جهت پشت‌تاب با بهره ثابت در باند X ارائه شده است. در این ساختار، امکان اسکن فرکانسی پشت‌تاب تا جلوتاب بدون باند قطع در پهلوتاب فراهم آمده است. سلول واحد شکاف‌دار پیشنهادی شامل یک لایه بالایی با شکاف به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و دو پچ مستطیل شکل بین لایه‌های بالایی و پایینی SIW است. آنتن موج‌نشتی (LWA) پیشنهادی شکاف‌دار برای افزایش اسکن بیم در جهت پشت‌تاب و جلوتاب با بهره ثابت بالا بهینه شده است.

۲- مبانی تئوری

در ابتدا به بررسی مبانی تئوری خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی و همچنین به اصول و ساختار آنتن‌های موج‌نشتی می‌پردازیم و سپس روش‌های طراحی این نوع آنتن‌ها را بیان می‌کنیم و در نهایت ساختار آنتن پیشنهادی و عملکرد آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۱- خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی

در شکل ۱ مدار معادل خط انتقال راستگرد^۱، خط انتقال چپگرد^۲ و خط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی نشان داده شده است. در مدارهای معادل، L_L ، C_L ، L_R ، C_R به ترتیب خازن و اندوکتانس در یک سلول RH-TL و LH-TL هستند.



شکل ۱: مدار معادل (a) RH-TL (b) LH-TL (c) CRLH-TL

Figure 1. Equivalent circuit of (a) RH-TL, (b) LH-TL, and (c) CRLH-TL

طول هر سلول از طول موج خط انتقال بسیار کوچک‌تر است. از روابط (۱-۳) به ترتیب ثابت فاز این خطوط به دست می‌آید [۴، ۱۳].

$$\beta_{RH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} > 0 \quad (1)$$

$$\beta_{LH-TL} = -\frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} < 0 \quad (2)$$

$$\beta_{Balanced-CRLH-TL} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}} \quad (3)$$

در این روابط ω فرکانس زاویه‌ای است. با توجه به روابط ۱ و ۲ ثابت فاز در خطوط انتقال راستگرد (RH-TL) مقداری مثبت و در خطوط انتقال چپگرد (LH-TL) مقداری منفی دارد. از روابط ۴ و ۵ به ترتیب سرعت فاز و سرعت گروه را می‌توان به دست آورد.

¹ Right Hand Transmission Line

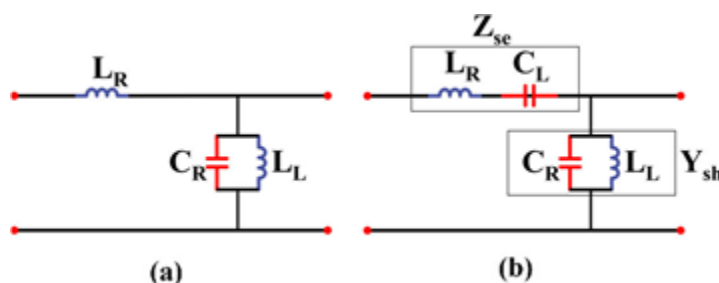
² Left Hand Transmission Line

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (4)$$

$$V_g = \frac{1}{d\beta/d\omega} \quad (5)$$

بر طبق روابط ۴ و ۵ و با توجه به روابط ۱ و ۳ سرعت فاز در RH-TL، مثبت و در LH-TL، منفی و سرعت گروه در هر سه خط انتقال، مثبت است و بنابراین توان در هر سه خط انتقال از سمت مولد به سمت بار (در آنتن موج نشستی فراماده از دهانه ورودی به دهانه خروجی) انتقال می‌یابد. ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) معادل در خط راستگرد، مثبت و در خط چپگرد، منفی هستند. محیطی که هم‌زمان دارای ضریب گذردهی و نفوذپذیری منفی باشد، فراماده چپگرد نامیده می‌شود [۴،۱۳].

CRLH-TL یک کاندید و گزینه مناسب برای پیاده‌سازی آنتن‌های موج نشستی (LWA) در دامنه فرکانسی ماکروویو و میلی‌متری است. آنتن موج نشستی یکی از کاربردهای ساختار CRLH-TL است که به‌طور مستقیم از این ساختار استفاده می‌کند. مدار CRLH از دو پارامتر اصلی تئوری مدار یعنی اندوکتانس و ظرفیت تشکیل شده است. (مقاومت در نظر گرفته نمی‌شود). امپدانس سری (Z_{se}) ترکیبی از اندوکتانس سری (L_R) و خازن (C_L) است، درحالی‌که ادمیتانس موازی، ترکیبی از اندوکتانس موازی (L_L) و خازن (C_R) است. ما در این مقاله تصمیم به استفاده از فناوری SIW برای طراحی آنتن موج نشستی خود گرفته‌ایم زیرا این فناوری امکان ادغام آسان با سایر اجزای ماکروویو را فراهم می‌آورد و برای ادغام با ساختارهای ریزنواری نیز بسیار مناسب است. با توجه به شکل ۱ و با مقایسه مدار معادل پایه SIW و مدار معادل پایه CRLH در شکل ۲، تنها چیزی که برای تکمیل مدار CRLH با استفاده از SIW نیاز است، خازن سری است که می‌توان آن را از شرایط متعادل CRLH استنباط کرد [۱۱،۱۴،۱۷]. مدار معادل پایه ساختار SIW-CRLH بر اساس طراحی گزارش‌شده در مقاله قبلی نویسندگان [۱۷] در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این کار، هندسه شکاف H-شکل مقاله اول با هندسه فرکتال Vicsek جایگزین شده تا ویژگی‌های امپدانس و ناحیه تشعشعی در باند X بهبود یابد.



شکل ۲: مدار معادل (a) SIW، (b) CRLH
Figure 2. Equivalent circuit of (a) SIW, (b) CRLH

۲-۲- آنتن موج نشستی

آنتن‌های موج نشستی (LWA) ساختارهای دو پورت هستند که در آنها موج درحالی‌که از پورت ورودی به پورت خروجی حرکت می‌کند، نشسته و الگوی پرتو آنتن را تشکیل می‌دهد. این شکاف‌ها موج را از طریق مسیر جریان نشسته می‌دهند. ساختار CRLH-TL متعادل به‌عنوان کاندید و گزینه‌ای امیدوارکننده برای طراحی آنتن‌های موج نشستی با قابلیت اسکن پیوسته فرکانس از جهت پشت‌تاب به جلوتاب، با پوشش کامل جهت پهلوتاب و بدون باند توقف، شناخته شده است و به همین دلیل کاربرد جذابی در زمینه مهندسی آنتن‌ها دارد. آنتن پیشنهادی با استفاده از ساختار CRLH-TL متعادل طراحی شده است، جایی که رزونانس‌های LH و RH برابر هستند. ثابت فاز CRLH-TL متعادل می‌تواند با استفاده از رابطه ۳ به دست آید [۴،۱۷]. آنتن موج نشستی CRLH پیشنهادی دارای قابلیت اسکن از جهت پشت‌تاب به جلوتاب (شامل جهت پهلوتاب) است، همان‌طور که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است. طراحی SIW آنتن موج نشستی پیشنهادی می‌تواند با استفاده از روش‌هایی که در روابط ۶ تا ۸ خلاصه شده‌اند، انجام شود [۴،۱۷].

$$W_{eff} = W_{SIW} - \frac{d^2}{0.95p} \quad (6)$$

$$W_{eff} = W_{SIW} - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{W_{SIW}} \quad (7)$$

$$W_{SIW} = \frac{2W_{eff}}{\pi} \cot^{-1} \left(\frac{\pi p}{4W_{eff}} \ln \frac{\pi p}{2d} \right) \quad (8)$$

که در آن d قطر وایاها، p فاصله بین وایاها و W_{eff} فاصله مرکز به مرکز بین دو ردیف وایاها است. زاویه اسکن در آنتن‌های موج نشستی معمولی می‌تواند از رابطه ۹ به دست آید [۴].

$$\theta = \sin^{-1}(\beta(\omega)/k_0) \quad (9)$$

که در آن θ زاویه پرتو اصلی آنتن و k_0 عدد موج فضای آزاد است. در رابطه ۹ زاویه θ تابعی از ω است. مقادیر منفی و صفر $\beta(\omega)$ به ترتیب می‌توانند منجر به مقادیر منفی و صفر θ (زاویه‌های پشت‌تاب و پهلوتاب) شوند. طبق روابط ۱-۳ و ۹ پرتو آنتن در باند چپگرد (LH) از پشت‌تاب تا پهلوتاب ($0 < \theta \leq 90^\circ$) و در باند راستگرد (RH) از پهلوتاب تا جلوتاب ($0 \leq \theta < 90^\circ$) را اسکن می‌کند. در $\beta = 0$ پرتو آنتن در جهت پهلوتاب ($\theta = 0^\circ$) قرار دارد. برای هر دو باند چپگرد (LH) و راستگرد (RH)، باید شرط $|\beta| \leq k_0$ برقرار باشد تا موج به بیرون نشت کند و ساختار به‌عنوان آنتن عمل کند. ناحیه $|\beta| \leq k_0$ ناحیه موج سریع (مد نشستی یا آنتنی) و خارج از این ناحیه، ناحیه موج آهسته (مد هدایتی یا موجبری) است. البته این رابطه در تئوری صادق است. در حالت عملی، زمانی که پرتو آنتن به پشت‌تاب یا جلوتاب نزدیک می‌شود، به دلیل افزایش اندازه β ، تحریک مد موج سطحی بیشتر از تحریک مد موج نشستی می‌شود که در این حالت موج کمتری به بیرون نشت می‌کند. یکی از چالش‌های طراحی آنتن‌های موج نشستی، نزدیک‌تر کردن هر چه بیشتر پرتو آنتن به جلوتاب یا پشت‌تاب است.

۳- روش طراحی و ساختار آنتن پیشنهادی و شرح عملکرد آن

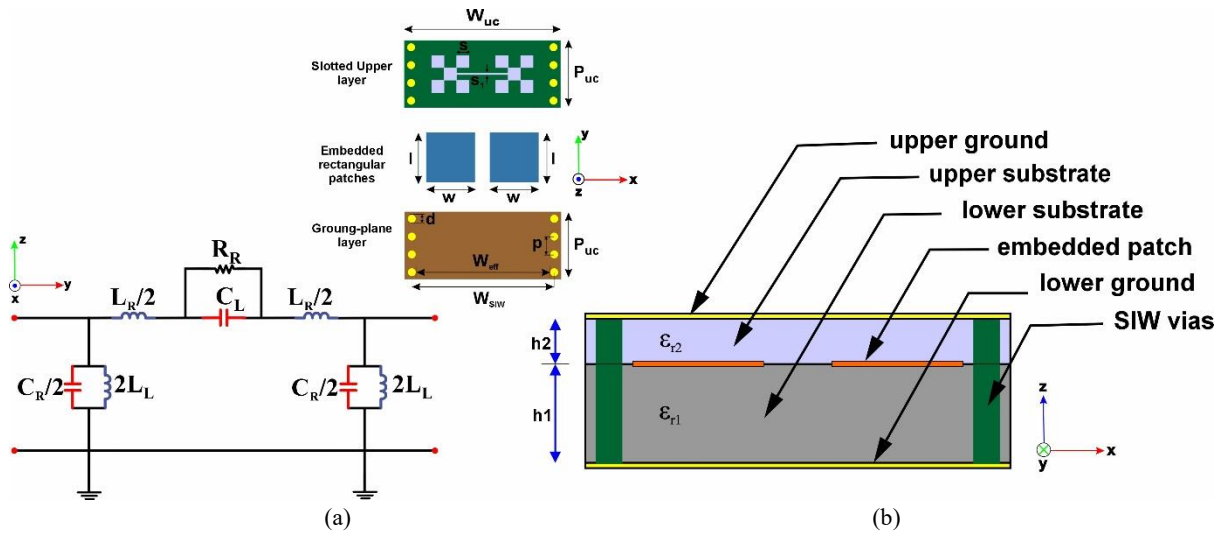
آنتن موج نشستی پیشنهادی بر اساس فناوری SIW و مبتنی بر خطوط انتقال راستگرد-چپگرد ترکیبی (CRLH-TLs) با قابلیت اسکن فرکانسی از پشت‌تاب تا جلوتاب طراحی شده است. طراحی این آنتن را می‌توان در دو مرحله تحلیل کرد. مرحله اول تحلیل ساختار سلول واحد و مرحله دوم تحلیل ساختار آنتن آرایه‌ای شکافدار نهایی.

۳-۱- طراحی و آنالیز سلول واحد آنتن CRLH-SIW

سلول واحد به کار گرفته شده در ساختار آنتن، یک سلول متعادل CRLH مبتنی بر SIW است که شامل یک شکاف به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek و دو پچ میکرواستریپ مستطیلی است که بین صفحات زمین بالایی و پایینی قرار گرفته‌اند. شکاف‌ها در لایه زمین بالایی SIW برش داده شده‌اند و پچ‌های مستطیلی در زیر شکاف‌ها قرار گرفته‌اند. برای تشکیل دیواره‌های جانبی SIW‌ها، از وایا‌های فلزی (vias) استفاده شده است. ساختار و نمای مقطعی سلول واحد SIW-CRLH و همچنین مدار معادل سلول واحد در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. برای طراحی سلول واحد به طول P_{uc} ، از دو زیرلایه $5880 \mu m$ RT Duroid با مشخصات فیزیکی ($\epsilon_r = 2.2$ و $\tan \delta = 0.0009$) استفاده شده است. ارتفاع کل ساختار SIW برابر با $h_1 + h_2 = 4 \text{ mil}$ بوده و پچ‌های مستطیلی در ارتفاع $h_1 = 3 \text{ mil}$ بین ساختارهای SIW قرار داده شده‌اند. عرض ساختار سلول واحد و عرض مؤثر SIW به ترتیب W_{uc} و W_{eff} هستند. ابعاد پچ‌های تعبیه‌شده و شکاف‌های فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek با نمادهای l ، w ، S ، S_1 نشان داده شده است.

مدار معادل ارائه‌شده در مقاله دوم نویسندگان با مدار معادل مقاله اول یکسان است و در هر دو، از مدل شبکه π متامتریال CRLH متعادل به‌عنوان توصیف پایه رفتار الکتریکی سلول واحد استفاده شده است. این مدل، شکل کلی و روابط حاکم بر ترکیب مؤلفه‌های LH و RH را مستقل از جزئیات هندسه فیزیکی نشان می‌دهد و تغییرات تنها در مقادیر پارامترهای المان‌ها مانند (C_L, L_L, C_R, L_R) به‌واسطه تغییر ساختار، ایجاد شده است. مدل مدار معادل به «نوع رفتار» خط و نه «شکل فیزیکی شکاف» بستگی دارد. به عبارت دیگر، چه شکاف به‌صورت H ساده باشد، چه از هندسه فرکتالی پیچیده مانند Vicsek استفاده شود، شکل کلی مدار معادل (شبکه π متعادل CRLH) بدون تغییر باقی می‌ماند و تنها مقادیر المان‌ها به‌واسطه تغییر در هندسه

و ابعاد فیزیکی، تغییر می کنند.



شکل ۳: نمای سطح مقطع سلول واحد آنتن موج نشتی پیشنهادی، جزئیات سلول واحد SIW-CRLH و مدار معادل سلول واحد
Figure 3. Cross-sectional view of the proposed LWA unit cell, details of the SIW-CRLH unit cell, and the equivalent circuit of the unit cell.

فرآیند طراحی باید از تجزیه و تحلیل سلول واحد آغاز شود، که در آن، نمودارهای پراکندگی و همچنین امپدانس بلوخ^۱ سلول واحد پیشنهادی بررسی می شود. مطابق دستورالعمل های اصلی برای طراحی آنتن های موج نشتی فراماده، مسئله اساسی برای ساختار سلول واحد آنتن، به دست آوردن نمودار Dispersion است. نمودار Dispersion همان نمودار ثابت فاز سلول واحد CRLH-TL بر حسب فرکانس است که قدرمطلق ضریبی از آن و بر حسب رادیان رسم شده است. از قطع نمودار Dispersion با خط نوری^۲، ناحیه موج سریع (مد تشعشعی یا آنتنی) و ناحیه موج آهسته (مد هدایتی یا موجبری) برای ساختار نهایی پیش بینی می شود. همچنین از متعادل بودن ساختار CRLH-TL یعنی عدم وجود فاصله بین باند راستگرد و چپگرد و در نتیجه داشتن تشعشع در پهلوتاب (در فرکانس ۸/۴۸GHz) اطمینان حاصل می شود. این نمودار از پارامترهای پراکندگی حاصل از شبیه سازی در نرم افزار HFSS به دست می آید. این نمودار از پارامترهای S سلول واحد با استفاده از رابطه ۱۰ یا توسط پارامترهای ABCD آن با استفاده از رابطه ۱۱ و خط ایرلاین (AirLine) با استفاده از رابطه ۱۲ استخراج شده است [۴،۵].

$$\beta p = \cos^{-1} \left[\frac{1 - s_{11}s_{22} + s_{12}s_{21}}{2s_{21}} \right] \quad (10)$$

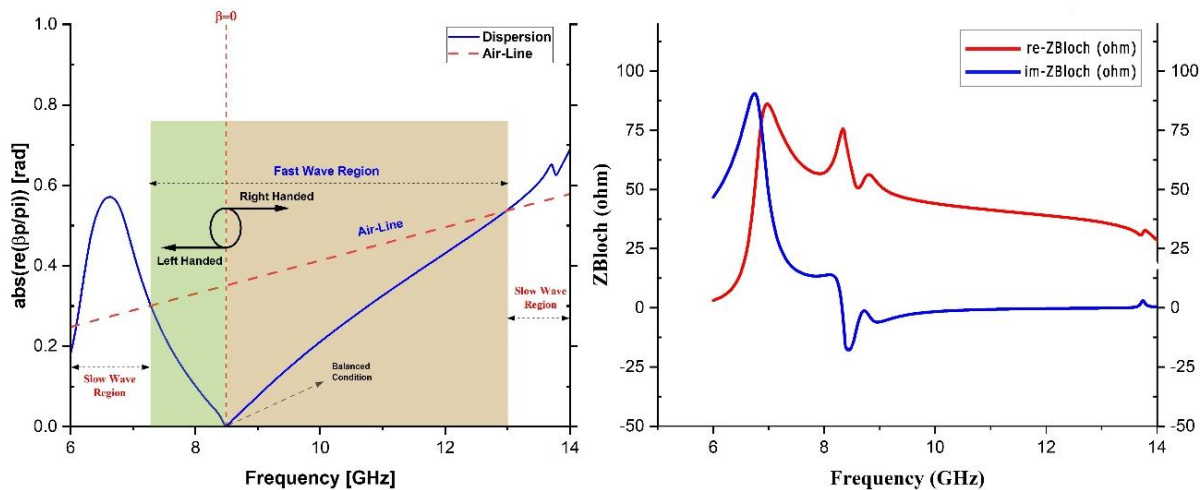
$$\beta p = \text{phase} \left(A \pm \sqrt{A^2 - 1} \right) \quad (11)$$

$$\text{Airline} = \omega p / c_0 \quad (12)$$

خط ایرلاین مناطق موج سریع $\beta \leq k_0$ و همچنین موج آهسته $\beta \geq k_0$ را مشخص می کند (که در آن k_0 عدد موج فضای آزاد است). در شکل ۴، نمودار پراکندگی سلول واحد CRLH SIW و نمودار امپدانس بلوخ برای سلول واحد نشان داده شده است.

¹ Bloch Impedance

² Air Line



شکل ۴: نمودار پراکندگی سلول واحد CRLH SIW پیشنهادی و نمودار امپدانس بلوخ برای سلول واحد.

Figure 4. Dispersion diagram of the proposed CRLH SIW unit cell and Bloch impedance diagram for the unit cell.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شرایط تعادل در حدود ۸/۴۸GHz برآورده می‌شود. خطوط نقطه‌چین در شکل ۴ خط Air Line است ($k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$) که از بالاترین فرکانس حدود ۱۳GHz و کمترین فرکانس حدود ۷/۳GHz عبور می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی برای ناحیه دست چپی (LH) حدوداً از ۷/۳GHz تا ۸/۴۸GHz است، درحالی‌که برای ناحیه دست راستی (RH) محدوده فرکانسی حدوداً از ۸/۴۸GHz تا ۱۳GHz است. مطابق شکل ۴ و مقایسه با نتایج مقاله اول نویسندگان [۱۷]، نقطه تعادل در ساختار پیشنهادی از حدود ۹/۰۲GHz به ۸/۴۸GHz انتقال یافته است. این کاهش فرکانس تعادل ناشی از افزایش ظرفیت سری C_L اثر هندسه فرکتال Vicsek است. در شکاف فرکتالی Vicsek مسیرهای موازی و زوایای متعدد بین لبه‌های فلزی، سطح مؤثر صفحات خازنی را زیاد می‌کند، CL بزرگ‌تر بنابراین عملکرد بهتر در فرکانس‌های پایین و پایداری بهره را خواهیم داشت. برای تطبیق امپدانس LWA، نمودار امپدانس بلوخ سلول واحد می‌تواند اطلاعات مفیدی را ارائه دهد. امپدانس بلوخ را می‌توان از پارامترهای S یا پارامترهای ABCD سلول واحد به ترتیب توسط رابطه ۱۳ یا ۱۴ با استفاده از شبیه‌سازی حالت هدایت سریع در HFSS استخراج کرد [۴،۵].

$$Z_B = \frac{2jZ_0 S_{21} \sin(\beta p)}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (13)$$

$$Z_B = \frac{-(A - D) \pm \sqrt{(A + D)^2 - 4}}{2C} \quad (14)$$

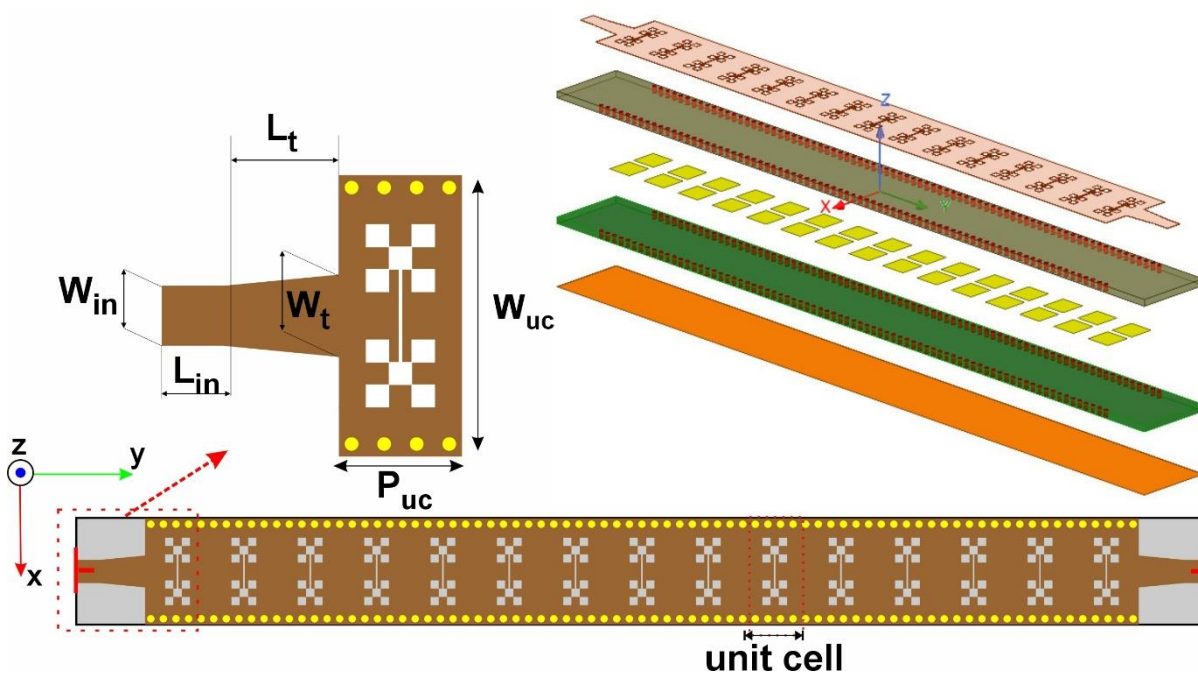
که در آن Z_0 امپدانس مشخصه ماتریس S است (اینجا ۵۰ اهم). میانگین بخش حقیقی امپدانس بلوخ در کل منطقه تشعشی محاسبه می‌شود و این مقدار برای تعیین عرض مناسب برای یک taper line استفاده می‌شود که باید یک خط میکرواستریپ ۵۰ اهم را به میانگین امپدانس بلوخ تبدیل کند. قسمت موهومی امپدانس بلوخ در ناحیه تشعشی RH بسیار نزدیک به صفر است و تطابق خوبی را ارائه می‌دهد.

در ساختار CRLH-SIW پیشنهادی، فرکانس ۸/۴۸GHz نقطه‌ی تعادل بین باند چپ‌گرد و راست‌گرد است ($\beta = 0$)، که در آن موج از حالت باند LH به باند RH منتقل می‌شود. در همین فرکانس، نمودار امپدانس بلوخ نیز کمینه‌ی قسمت موهومی و بیشینه‌ی تطابق را نشان می‌دهد، که به‌طور دقیق‌تر به معنای تعادل کامل امپدانی در این نقطه است. این ویژگی باعث می‌شود که موج در حالت پهلوتاب با کمترین بازتاب تشعشع کند و عملکرد تشعشی بهینه‌ای را ارائه دهد. نوسانات موجود در نمودار امپدانس بلوخ در نزدیکی $\beta = 0$ بخش طبیعی و مفیدی از ساختار CRLH متعادل هستند و به بهبود تطابق امپدانس و کارایی سیستم کمک می‌کنند، بدون اینکه بر عملکرد کلی آنتن تأثیر منفی بگذارند. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که آنتن در این فرکانس خاص عملکردی بهینه و کم‌نوسان داشته باشد و در نهایت منجر به بهبود بهره و ثبات در کل باند فرکانسی شود. قسمت موهومی امپدانس بلوخ در ناحیه تشعشی RH بسیار نزدیک به صفر است و تطابق خوبی را ارائه می‌دهد. مقدار منفی

آن بر روی ناحیه تشعشعی LH ممکن است با خاصیت القایی وایاهای SIW لغو شود. همچنین، موقعیت اولین سلول واحد را می توان تغییر داد تا تطبیق راکتانس بهتری ارائه شود.

۳-۲- ساختار آرایه شکاف دار نهایی آنتن موج نشتی

همان گونه که در مقاله اول نویسندگان [۱۷] نیز بیان شده است، آرایش سلول های واحد CRLH-SIW در راستای محور طول موجبر، اساس ایجاد موج نشتی محسوب می شود. در این پژوهش، همان پیکربندی پایه از [۱۷] به عنوان ساختار مرجع در نظر گرفته شده، اما شکاف H-شکل در سلول واحد به شکاف فرکتال جعبه ای مرتبه اول Vicsek جایگزین شده است تا ضمن حفظ تعادل، ظرفیت سری را افزایش دهد و در نتیجه پهنای باند و زاویه اسکن بهبود یابد. هندسه شکاف ها یکی از عوامل تعیین کننده اصلی در عملکرد آنتن، به ویژه در زمینه آنتن های آرایه فازی، محسوب می شود. شکل، اندازه و موقعیت شکاف ها بر روی پارامترهای مختلفی مانند فرکانس رزونانس، پهنای باند، الگوی تابشی، و قابلیت اسکن زاویه پرتو تأثیر می گذارد. ساختار نهایی آنتن شامل یک آرایه از ۱۵ سلول واحد است که به صورت طولی در امتداد طول موجبر در جهت P_{uc} قرار گرفته اند. همچنین دو خط انتقال ریزنواری Tapered line در دو سمت و به منظور تطبیق امپدانس با دهانه ورودی ۵۰ اهم به این ساختار اضافه شده است. شکل ۵ نمای بالایی ساختار آنتن نهایی و نمای سه بعدی و تفکیک شده از لایه های ساختار آنتن نهایی را نمایش می دهد.



شکل ۵: نمای بالایی ساختار آنتن و نمای سه بعدی و تفکیک شده لایه های آنتن پیشنهادی.

Figure 5. Top view of the antenna structure and three-dimensional, segmented view of the proposed antenna layers.

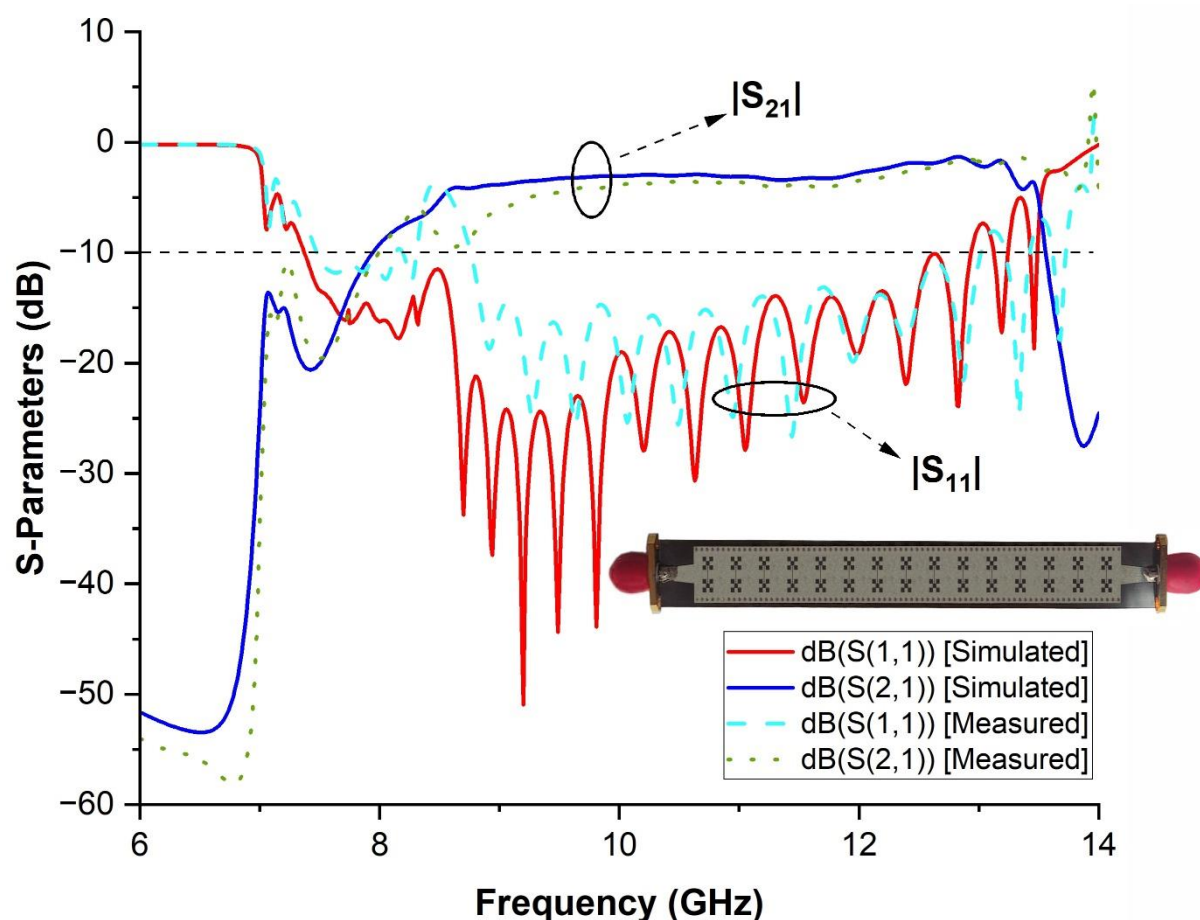
ساختار پایه بر مبنای مدل CRLH-SIW مرجع [۱۷] طراحی شده و هندسه شکاف با فرکتال Vicsek اصلاح گردیده است. پارامترهای طراحی ساختار سلول واحد و پارامترهای فیزیکی آنتن بهینه شده نهایی (نگاه کنید به شکل ۳) عبارتند از: $d=4/4$, $p=1/8$, $d=0/9$, $L_{in}=3$, $W_{in}=2/9$, $L_t=5/7$, $W_t=4$, $W_{eff}=12$, $P_{uc}=6/2$, $W_{uc}=13/45$, $W=4/4$ هستند. اندازه کلی آنتن ۱۳۵/۵ میلی متر در ۱۳/۴۵ میلی متر است.

استفاده از پیچ ها و شکاف های فرکتال جعبه ای مرتبه اول VICSEK در لایه زمین بالایی و ماهیت خازنی آنها باعث شده تا این شکاف ها علاوه بر تشعشع، نقش خازن سری برای خط انتقال چپگرد را هم بازی کنند. وایاهای دیواره SIW نیز همانطور که در فرکانس های راستگرد، نقش دیواره موجبری را ایفا می کنند، در فرکانس های چپگرد، نقش اندوکتانس موازی برای خط انتقال چپگرد را بر عهده می گیرند [۱۲، ۱۷]. بنابراین خازن دست چپی (C_L) توسط شکاف های روی لایه زمین بالایی و پیچ های تعبیه شده در زیر شکاف ها و اندوکتانس دست چپی (L_L) توسط دیوارهای وایای فلزی مدل می شوند. گرادیان ولتاژ که بین لایه

زمین بالایی شکافدار و لایه زمین پایینی SIW توسعه می‌یابد، خازن موازی توزیع شده (خازن دست راستی C_R) را فراهم می‌کند، همچنین توزیع جریانی که در لایه زمین بالایی جریان دارد، اندوکتانس سری توزیع شده (اندوکتانس دست راستی L_R) را ایجاد می‌کند. پس اندوکتانس دست راستی (L_R) و خازن دست راستی (C_R) توسط لایه زمین بالایی شکافدار و لایه زمین پایینی مدل می‌شوند. شرایط متعادل ساختار زمانی رخ می‌دهد که تأثیرات LH و RH دقیقاً در فرکانس معین به توازن برسند. یعنی حاصل ضرب خازن دست چپ و اندوکتانس دست راست برابر با حاصل ضرب اندوکتانس دست چپ و خازن دست راست باشد ($L_R C_L = L_L C_R$). به این ترتیب امکان ایجاد یک باند LH و تشعشع در پشت تاب فراهم می‌آید. بنابراین آنتن نهایی طراحی شده، یک آنتن موج نشی SIW مبتنی بر CRLH-TL و با قابلیت اسکن فرکانسی از سمت پشت تاب تا جلوتاب است.

۴- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آنتن پیشنهادی با نرم افزار Ansoft HFSS انجام شده است. آنتن پیشنهادی LWA ساخته شده و پارامترهای S شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمای بالایی از CRLH-SIW LWA ساخته شده و پارامترهای S آنتن پیشنهادی نسبت به فرکانس.

Figure 6. Top view of the fabricated CRLH-SIW LWA and S-parameters of the proposed antenna versus frequency.

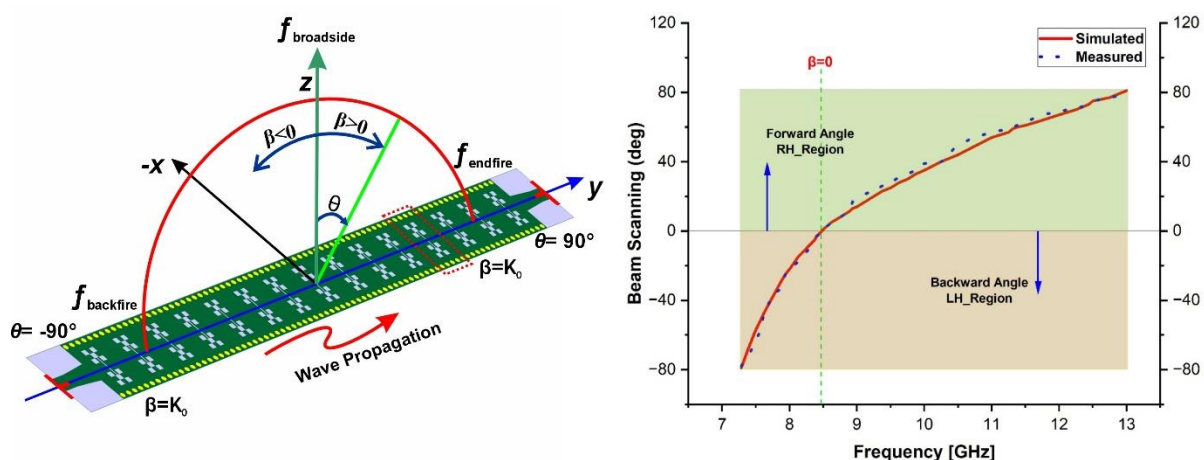
نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تطابق بسیار خوبی را در کل باند کارکرد (۷/۳ تا ۱۳ گیگاهرتز) نشان می‌دهند. نمودار S_{11} بیانگر بازتاب توان در دهانه ورودی آنتن است و مقدار آن در بیشتر نقاط باند پایین‌تر از -۱۰ dB قرار دارد؛ این موضوع نشان می‌دهد که بخش تغذیه و خط انتقال به درستی با ساختار تشعشعی تطبیق داده شده‌اند. همچنین S_{21} به عنوان شاخص انتقال توان در کل ساختار، در محدوده صفر تا -۲ dB قرار دارد که بیانگر انتقال تقریباً کامل توان به ناحیه تشعشعی است.

در فرکانس‌های پایین (ناحیه دست چپی LH) مقدار S_{21} نسبتاً کمتر است زیرا بخشی از توان به صورت پرتو پشت تاب نشت می‌کند، اما با افزایش فرکانس و ورود به ناحیه دست راستی RH، بازدهی تشعشع افزایش یافته و S_{21} به مقادیر نزدیک به صفر

دسی‌بل می‌رسد. تغییرات پیوسته S_{11} و S_{21} در کل باند بدون باند قطع، تأییدی بر برقراری شرط تعادل CRLH در فرکانس $۸/۴۸\text{GHz}$ است.

باید توجه داشت که در آنتن‌های موج نشستی، S_{21} به تنهایی نمایانگر تلفات بیرونی (تشعشع) و درونی (رسانا و دی‌الکتریک) است. در این ساختار، محاسبه ثابت نشستی توسط روابط (۱۵) تا (۱۸) نشان می‌دهد که بیش از ۸۵ درصد از توان ورودی به صورت تشعشعی در طول آنتن پخش می‌شود و تلفات رسانا و دی‌الکتریک ناچیزند. بنابراین، پارامترهای S به‌طور کامل اثبات می‌کنند که آنتن پیشنهادی دارای تطبیق پایدار و بازده تشعشعی بالاست.

شکل ۷ نمودار زاویه اسکن پرتو اصلی آنتن را نسبت به فرکانس نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پرتو اصلی با افزایش فرکانس از جهت پشت‌تاب به سمت پهلوتاب و سپس به جهت جلوتاب اسکن می‌شود. زاویه اسکن پرتو اصلی به‌طور پیوسته از -۷۹° درجه تا ۸۱° درجه به صورت پیوسته و بدون باند قطع در صفر درجه در باند فرکانسی $۷/۳\text{GHz}$ تا ۱۳GHz است.



شکل ۷: اسکن پرتو شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در برابر فرکانس.

Figure 12. Simulated and measured beam scanning versus frequency.

دامنه اسکن در این مقاله -۷۹° تا ۸۱° ، کمی وسیع‌تر از مقاله اول نویسندگان [۱۷] -۷۹° تا ۸۰° است، هرچند تفاوت چشمگیر نیست اما نکته مهم حفظ پارامترهای عملکردی (که معمولاً در نمودارها نمایش داده می‌شوند) در این زوایا است. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، استفاده از ساختار شکاف فراکتال در مقاله دوم، به احتمال زیاد منجر به پایداری بهتر گین و تطابق امپدانس در زوایای اسکن دورتر می‌شود. حداکثر زاویه اسکن آنتن در جهت جلوتاب، نسبت به کارهای پیشین به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. همچنین، داشتن تشعشع در جهات پهلوتاب و پشت‌تاب، نسبت به ساختارهای معمولی آنتن‌های موج نشستی یک امتیاز محسوب می‌شود. پهنای باند مد تشعشعی حدود $۵/۷\text{GHz}$ است و نسبت به ساختارهای [۱۰، ۱۸، ۲۲] بهبود یافته است.

برای دستیابی به پارامتر S_{11} پایین به‌منظور به حداقل رساندن بازتاب و تضمین انتقال کارآمد توان، و داشتن پارامتر S_{21} بالا که نشان‌دهنده اتصال قوی بین خط تغذیه و آنتن موج نشستی (LWA) است، درحالی‌که تلفات داخلی (تلفات دی‌الکتریک و رسانا) کم هستند، تضمین می‌کند که مقدار قابل‌توجهی از تشعشع (تلفات خارجی) از طریق شکاف‌ها به دست می‌آید. ثابت نشستی یا ثابت تضعیف ساختار نشستی توسط پارامترهای S در رابطه ۱۵ و یا پارامترهای ABCD در رابطه ۱۶ تعریف می‌شود که L طول ساختار نشستی است. ثابت نشستی در مفهوم LWA تابعی از فرکانس است. ثابت نشستی نمایانگر تشعشع در طول آنتن است و معمولاً می‌توان از آن برای محاسبه بازدهی تشعشع همان‌طور که در رابطه ۱۷ آمده است، استفاده کرد. توجه داشته باشید که ثابت تضعیف به‌طور کلی به‌عنوان تلفات کل در طول خط انتقال و آنتن تعریف می‌شود. این ثابت تنها در صورت خطوط انتقال بدون تلفات می‌تواند به‌عنوان ثابت نشستی در نظر گرفته شود. این موضوع را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۸ با α_c و α_d که ثابت‌های تضعیف به دلیل تلفات رسانا و دی‌الکتریک هستند، و α که ثابت نشستی واقعی است، بیان کرد [۴، ۵].

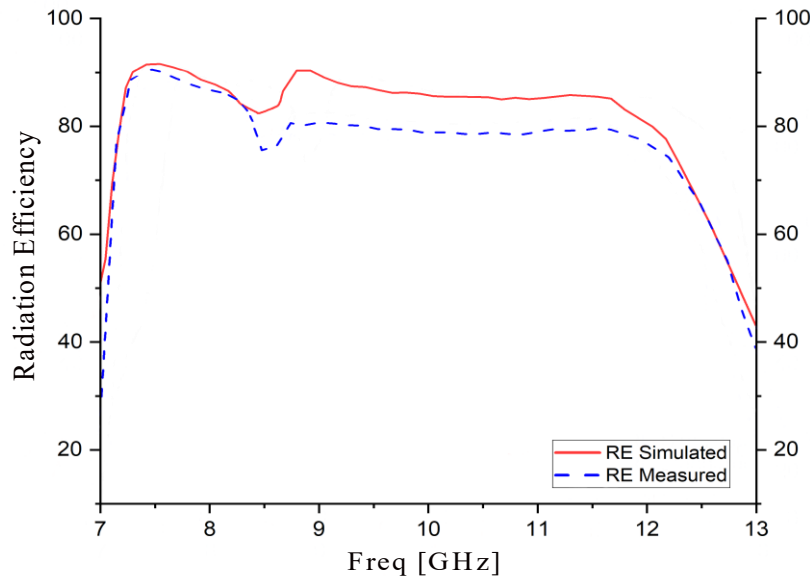
$$\alpha = \frac{-1}{2L} \ln \frac{|s_{21}|^2}{(1-|s_{11}|^2)} = \frac{-1}{L} \ln |s_{21}| \Rightarrow \text{for } |s_{21}| \ll 1 \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\ln A \pm \sqrt{A^2 - 1} \right) \quad (16)$$

$$R_e = 1 - \frac{P(L)}{P(0)} = [1 - \exp(-2\alpha L)] \quad (17)$$

$$\alpha_{tot} = \alpha + \alpha_d + \alpha_c \quad (18)$$

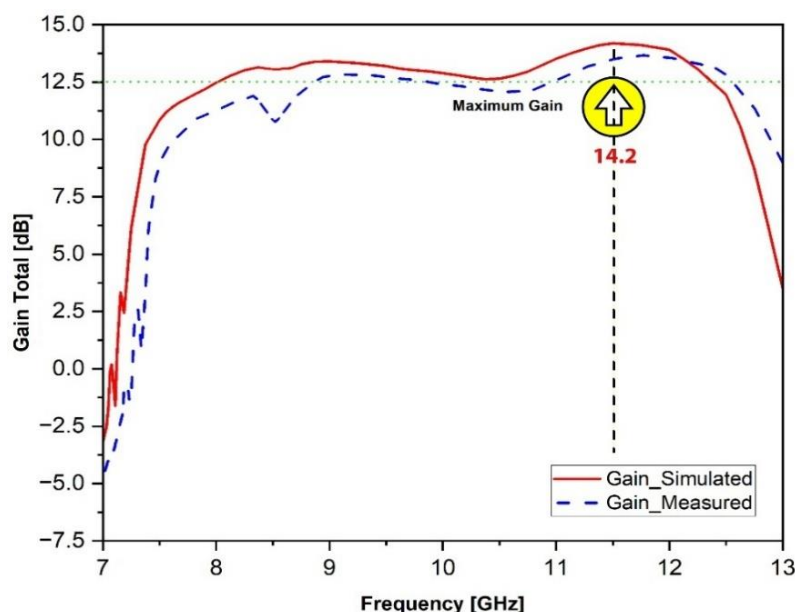
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، راندمان تشعشع بالا است و به‌طور متوسط به ۸۷٪ در باند X می‌رسد.



شکل ۸: بازده تشعشعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی در برابر فرکانس.

Figure 8. Simulated and measured radiation efficiency of the proposed antenna versus frequency.

می‌توان مشاهده کرد که بازده تشعشع آنتن پیشنهادی در کل باند فرکانسی باند X به‌طور متوسط حدود ۸۷٪ است که نسبت به ساختار پایه [۱۷] با بازده تقریبی ۸۳٪ بهبود قابل‌توجهی دارد. این افزایش مستقیماً ناشی از هندسه Vicsek و افزایش یکنواختی میدان در طول شکاف‌های فرکتالی است که موجب کاهش تلفات رسانا و دی‌الکتریک در بدنه SIW می‌شود. نمودار بهره پرتو اصلی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی به ازای فرکانس‌های مختلف در شکل ۹ مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بهره اندازه‌گیری شده پرتو اصلی در پهنای باند فرکانسی ۷/۳GHz تا ۱۳GHz به‌طور تقریبی بیش از ۱۲dB است. بهره پرتو اصلی با تغییر کمتر از ۳dB در باند فرکانسی موردنظر ثابت و دارای بیشینه بهره ۱۴/۲dB در باند X است که نسبت به ساختار پایه [۱۷] با بیشینه ۱۲/۸۳dB، بهبودی معادل ۱۰/۶ درصد را نشان می‌دهد. یکنواختی منحنی‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری بیانگر پایداری شرایط تشعشعی و صحت تعادل CRLH در کل باند فرکانسی است. افزایش بهره حاصل از هندسه Vicsek مرتبه اول، به‌دلیل افزایش خازن سری C_L و توزیع یکنواخت‌تر میدان تشعشعی بر روی شکاف‌های فرکتالی، سبب کاهش تلفات رسانا و افزایش چگالی جریان مؤثر در دیواره‌های SIW گردیده است. نتیجه آن، تشکیل پرتو با تمرکز بهتر و کاهش نوسانات بهره در محدوده گذار از ناحیه LH به RH است.

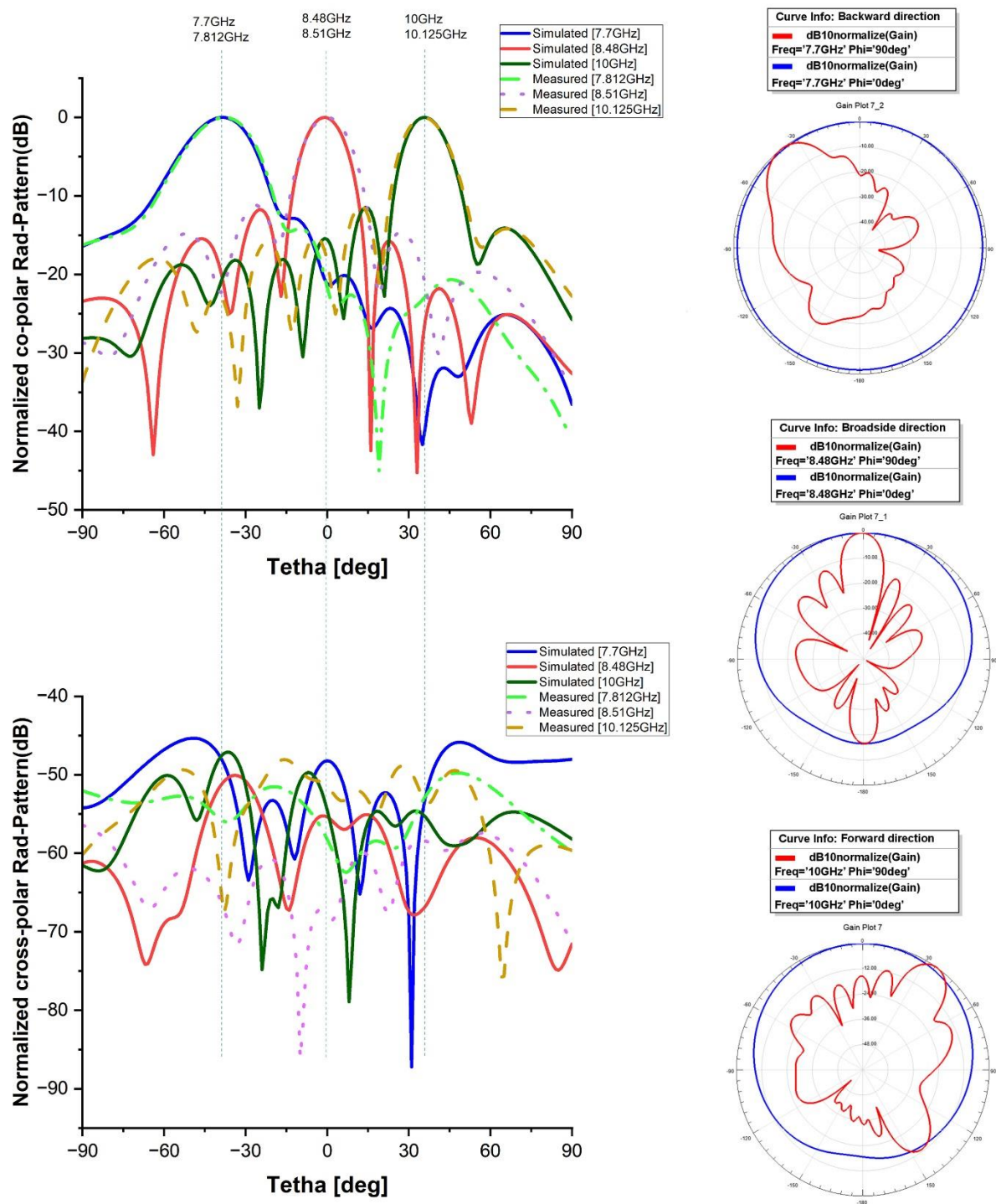


شکل ۹: نمودار بهره تشعشی آنتن پیشنهادی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر حسب فرکانس.
Figure 9. Simulated and measured radiation gain versus frequency for the proposed antenna.

در ادامه، بهره تشعشی نرمالیزه شده در صفحه اصلی تشعشع آنتن در شکل ۱۰ برای چند فرکانس دلخواه به‌منظور نمایش اسکن فرکانسی در تمامی جهت‌ها رسم شده است. پترن‌های تشعشی نرمالیزه اندازه‌گیری شده در صفحه E-Plane (y-z) و در صفحه H-Plane (x-z) در فرکانس ۷/۷GHz (در جهت پشت‌تاب)، در فرکانس ۸/۴۸GHz (در جهت پهلوتاب) و فرکانس ۱۰GHz (در جهت جلوتاب) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

این رفتار پیوسته بیانگر تحقق کامل شرط تعادل CRLH است که موجب تغییر علامت مؤلفه β در ساختار موجبر و انتقال پرتو از ناحیه LH به RH می‌شود. در تمام فرکانس‌های بررسی‌شده، بیشینه تشعشع در راستای زاویه اصلی تابش متمرکز بوده و سطوح کناری (Side Lobes) کمتر از -۱۵dB باقی مانده است، که نشان‌دهنده هدایت منسجم انرژی تابشی و طراحی مناسب آرایه ۱۵ سلولی طولی است. پترن‌ها همچنین نشان می‌دهند که پهنای باند زاویه‌ای (Angular Beamwidth) در حالت پهلوتاب کاهش محسوسی دارد، که با افزایش بهره در همان فرکانس هم‌راستا است. این رفتار ناشی از افزایش مؤلفه تشعشع اصلی و کاهش تلفات جانبی در هندسه Vicsek است.

در سیستم‌های مخابراتی و راداری، بالا بودن co-polarization و پایین بودن cross-polarization به معنای بهینه بودن عملکرد آنتن است، زیرا نشان‌دهنده این است که آنتن بیشتر انرژی را در جهت و قطبش صحیح انتقال می‌دهد. این موضوع به کاهش تلفات سیگنال، افزایش برد سیستم، و بهبود کیفیت کلی ارتباط کمک می‌کند. منحنی پترن تشعشی نرمالیزه شده co-polar و cross-polar در صفحه اصلی تشعشع آنتن، عملکرد آنتن پیشنهادی برای اسکن فرکانسی در تمامی جهت‌ها را نمایش می‌دهد. برای چند فرکانس دلخواه در جهت‌های پشت‌تاب، پهلوتاب و جلوتاب الگوهای تشعشی co-polar و cross-polar در شکل ۱۰ برای نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تحلیل و ارائه شده‌اند. اختلاف زیاد اندازه co-polar نسبت به cross-polar نشان‌دهنده عملکرد بهینه آنتن در حفظ جهت قطبش موردنظر است. co-polarization تعیین‌کننده میزان انرژی است که آنتن در جهت درست قطبش تشعشع می‌کند یا دریافت می‌کند. این مؤلفه باید تا حد امکان قوی باشد تا اطمینان حاصل شود که سیگنال اصلی با قدرت و وضوح کافی انتقال یا دریافت می‌شود. به‌طور کلی، بهینه‌سازی co-polarization یک هدف اصلی در طراحی آنتن‌ها است، زیرا مستقیماً بر کارایی و عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد. همچنین کاهش cross-polarization به بهبود بهره آنتن، افزایش دقت و کارایی سیستم‌های مخابراتی، و کاهش تداخل کمک می‌کند. بالا بودن cross-polarization می‌تواند باعث ایجاد تداخل در سیگنال‌های هم‌قطبش شود. در بسیاری از کاربردهای حساس، کاهش cross-polarization یک هدف مهم در طراحی آنتن است. پرتو اصلی با افزایش فرکانس از پشت‌تاب تا جلوتاب را اسکن می‌کند. باید توجه داشت که در بعضی نقاط اختلاف کوچکی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد که احتمالاً به دلیل خطای ساخت است.



شکل ۱۰: بهره تشعشی شبیه‌سازی شده نرمالیزه (سمت راست) در صفحات E-Plane (y-z) و H-Plane (x-z)، در جهت‌های پشت‌تاب، پهلوتاب و جلوتاب و پترن تشعشی (سمت چپ) co-polar و cross-polar نرمالیزه شده آنتن پیشنهادی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای فرکانس‌های مختلف از LH تا RH

Figure 10: Normalized simulated radiation gain (right) in the E-Plane (y-z) and H-Plane (x-z) planes, in the backward, broadside, and forward directions, and the normalized co-polar and cross-polar radiation patterns (left) of the simulated and measured proposed antenna for different frequencies from LH to RH.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ برای پترن‌های تشعشی مشاهده می‌شود، الگوهای co-polar و cross-polar آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۷/۳ تا ۱۳ گیگاهرتز، نسبت تفکیک قطبشی قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که نسبت به ساختار پایه [۱۷] به‌طور محسوسی بهبود یافته است. در ساختار مرجع [۱۷]، اختلاف میان مؤلفه‌های co-polar و cross-polar به‌طور میانگین حدود

۱۸ dB در محدوده ۸ تا ۱۲/۵ گیگاهرتز بود، درحالی که در آنتن فعلی این اختلاف به بیش از ۲۵dB افزایش یافته است. این افزایش نشان دهنده کاهش تلفات ناشی از جریان‌های عرضی و میدان‌های ناخواسته در اطراف شکاف‌های فرکتالی است. هندسه Vicsek مرتبه اول، با افزایش خازن سری C_L و بهبود توزیع میدان در ناحیه لبه‌های شکاف، موجب کاهش نشستی انرژی در جهات متقاطع و پایداری قطبش غالب TM_{10} گردیده است. همچنین به لطف تعادل دقیق بین شاخه‌های LH و RH در ساختار CRLH، انحنای پرتو در گذار LH-RH بدون افزایش cross-polar صورت گرفته است، به گونه‌ای که در فرکانس‌های بالا (ناحیه جلوتاب) بیشترین قدرت تشعشع در جهت قطبش مطلوب و کمتر از ۲۵dB- در مؤلفه متقاطع اندازه‌گیری شده است.

در مجموع، مقایسه با آنتن مرجع [۱۷] نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی ضمن حفظ توان اسکن پیوسته از 79° تا 81° ، موفق به افزایش حدود ۳۳٪ در نسبت co/cross polarization شده است، که این بهبود مستقیماً بیانگر کاهش تداخل قطبشی و افزایش کارایی تابش در کل مسیر اسکن است. این ویژگی‌ها، آنتن پیشنهادی را برای کاربردهای پیشرفته راداری و ارتباطات با حساسیت قطبشی بالا کاملاً مناسب می‌سازند.

به منظور ارزیابی جامع عملکرد آنتن CRLH-SIW پیشنهادی، مقایسه‌ای عددی بین این آنتن و ساختارهای مطرح قبلی از جمله آنتن مرجع [۱۷] انجام شده است. این تحلیل به‌طور کامل در جدول ۱ ارائه شده و شامل مقایسه پارامترهای کلیدی عملکردی مانند نوع آنتن، قابلیت تشعشع در پهلوتاب، تعداد سلول‌های واحد، پهنای باند فرکانسی، حداکثر بهره و دامنه اسکن فرکانسی است. نتایج این مقایسه نشان‌دهنده برتری آنتن پیشنهادی در مقایسه با سایر آنتن‌های مورد بررسی از لحاظ ویژگی‌های عملکردی است. علاوه بر این، تحلیل‌های بیشتر حاکی از این است که آنتن پیشنهادی در حوزه‌های خاصی نظیر پایداری بهره و گستردگی دامنه اسکن نیز بهبودهایی قابل توجه را نسبت به آنتن‌های موجود ارائه می‌دهد. این مزایا، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آنتن پیشنهادی برای کاربردهای پیشرفته در حوزه‌های مختلف ارتباطات و رادار هستند. همچنین این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم هندسه Vicsek در افزایش C_L و تثبیت تعادل CRLH در سراسر باند X است.

جدول ۱: مقایسه آنتن موج نشستی متعادل مبتنی بر SIW-CRLH-TL مطالعه شده در این مقاله با آنتن‌های مرجع.

Table 1. Comparison Between the SIW-Based Balance CRLH-TL LWA studied in this Paper and Reference Antennas.

References	Antenna Type	Beam at Broadside	Unit Cell	Frequency Band (GHz)	Scanning Range	Maximum Gain
T.Yang et al. [7]	Folded SIW LWA	Yes	25	5.1 to 6.9	58° to -65°	3.5
Dong and Itoh. [4]	HM SIW LWA	Yes	15	12.8 to 8.6	60° to -70°	10.8
Y.Weitsch et al. [9]	LWA	Yes	50	3 to 5.3	70° to -70°	10.15
Nasimuddin et al. [10]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.5 to 13	78° to -66°	10
Karmokar et al. [16]	SIW LWA	Yes	14	7.6 to 11	45° to -74°	10.6
Zhang et al. [17]	SIW LWA	Yes	6	13.5 to 17.8	30° to -57°	9.15
Wu et al. [18]	LWA	Yes	20	3.9 to 4.9	67° to -61°	10.5
Pravesh Belwal et al. [19]	SIW LWA	Yes	10	9.5 to 15.2	30° to -28°	13.8
Nasimuddin et al. [20]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	8.25 to 13	66° to -60°	13.1
Cao et al. [21]	SIW LWA	Yes	12	24 to 27	13° to -17°	13
H. Mashhadi et al. [15]	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.6 to 12.5	80° to -79°	12.83
Proposed Antenna	Multilayered SIW LWA	Yes	15	7.3 to 13	81° to -79°	Max 14.2

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک LWA با شکاف‌های به شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول Vicsek در لایه زمین بالایی، مبتنی بر CRLH-SIW برای بهبود پهنای باند اسکن پشت‌تاب-جلوتاب با بهره ثابت بیشتر از ۱۲dB ارائه شده است. این طراحی ادامه و توسعه کار انجام‌شده در آنتن مرجع [۱۷] است، با این تفاوت که در نسخه فعلی، هندسه فرکتالی Vicsek موجب افزایش خازن سری C_L و در نتیجه کاهش فرکانس تعادل از ۹/۰۲ به ۸/۴۸ گیگاهرتز، افزایش پهنای باند از ۴/۹ به ۷/۵ گیگاهرتز (بهبود تقریباً ۱۶/۳ درصد) و افزایش بیشینه بهره از ۱۲/۸۳dB به ۱۴/۲dB (بهبود ۱۰/۶ درصد) شده است. برای دریافت اطلاعات بیشتر در مورد شکل فرکتال جعبه‌ای مرتبه اول و مرتبه‌های بالای Vicsek به مرجع [۲۴] رجوع شود. آنتن پیشنهادی قادر به اسکن کامل فضا از سمت پشت‌تاب تا جلو تاب (79° تا 81° درجه) بدون باند قطع در پهلوتاب (صفر درجه) در باند فرکانسی از ۷/۳GHz تا ۱۲GHz است. LWA پیشنهادی برای دستیابی به اسکن بیم با بهره ثابت در باند فرکانس موردنظر مفید و کاربردی است.

این آنتن پیشنهادی می‌تواند به‌طور عملی بهره‌ثابتی با تغییر کمتر از ۳dB در باند فرکانسی موردنظر فراهم کند و حداکثر بهره‌ای برابر با ۱۴/۲dB در باند X ارائه دهد. عملکرد و قابلیت‌های آنتن پیشنهادی به‌طور تجربی در آزمایشگاه میکروویو دانشگاه آزاد واحد ارومیه و آزمایشگاه آنتن دانشگاه «خواجه نصیرالدین طوسی» مورد تأیید قرار گرفته است.

مراجع

- [1] 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].
- [2] MM. Maleki, T. Aribi, and A. Shadmand, "Implementation of a Miniaturized Planar 4-Port Microstrip Butler Matrix for Broadband Applications," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol 9, no.1, January 2020 ,doi: [10.22070/jce.2020.5295.1154](https://doi.org/10.22070/jce.2020.5295.1154), [in Persian].
- [3] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Balanced Right-Handed/Left-Handed Transmission Lines" *23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran , 2015 [in Persian].
- [4] Y. J. Guo and R. W. Ziolkowski, "Advanced Antenna Array Engineering for 6G and Beyond Wireless Communications," *John Wiley& Sons, inc.*, Hoboken, New Jersey, Online ISBN:9781119712947, 2022, doi :[10.1002/9781119712947](https://doi.org/10.1002/9781119712947).
- [5] M. M. Sabahi, A. A. Heidari, and M. Movahhedi, "A Compact CRLH Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4407-4414, Sept. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2851278](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851278).
- [6] A. M. Malekshah, A. R. Attari, and M. S. Majedi, "Improved Design of Uniform SIW Leaky Wave Antenna by Considering the Unwanted Mode," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6378-6382, Aug. 2020, doi: [10.1109/TAP.2020.2975292](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2975292).
- [7] S. Asadi, H. Zahra, A. Kiyani, A. Pourziad, and S. M. Abbas, "Composite Right/Left Handed Leaky Wave Antenna Using Complementary Omega Shape on Half Mode Substrate Integrated Waveguide," *IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 1-2, doi: [10.1109/ISAP57493.2023.10388549](https://doi.org/10.1109/ISAP57493.2023.10388549).
- [8] H. Dolatkah and Z. Atlasbaf, "An improved SIW Leaky Wave Antenna Based on a Compact CRLH unit cell," *arXiv:2305.07897v1*, 2023, doi: [10.48550/arXiv.2305.07897](https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07897).
- [9] T. Yang, P.-L. Chi, and R. Xu, "Novel composite right/left-handed leaky-wave antennas based on the folded substrate integrated waveguide structures," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 29, pp. 235-248, 2012, doi: [10.2528/PIERC12040215](https://doi.org/10.2528/PIERC12040215).
- [10] Y. Dong and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 3, pp. 767-775, March 2011, doi: [10.1109/TAP.2010.2103025](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2103025).
- [11] Y. Weitsch and T. F. Eibert, "Analysis and design of a composite left/right-handed leaky wave antenna based on the H10 rectangular waveguide mode," *Advances in Radio Science*, vol. 6, pp. 49-54, 2008, doi: [10.5194/ars-6-49-2008](https://doi.org/10.5194/ars-6-49-2008).

- [12] Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing, "Slotted SIW leaky-wave antenna with improved backward scanning bandwidth and consistent gain," *11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Paris, France, 2017, pp. 752-755, doi: [10.23919/EuCAP.2017.7928339](https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928339).
- [13] M. Z. Ali and Q. U. Khan, "High Gain Backward Scanning Substrate Integrated Waveguide Leaky Wave Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 1, pp. 562-565, Jan. 2021, doi: [10.1109/TAP.2020.3006389](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3006389).
- [14] X. Zou, D. Yu, Y. Fan, J. Li, and W. Luo, "A Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna Based on Eye-Shaped Transverse Slot," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 11, pp. 7947-7952, Nov. 2021, doi: [10.1109/TAP.2021.3083758](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3083758).
- [15] R. Agarwal, R. L. Yadava, and S. Das, "A Multilayered SIW-Based Circularly Polarized CRLH Leaky Wave Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 10, pp. 6312-6321, Oct. 2021, doi: [10.1109/TAP.2021.3082618](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3082618).
- [16] P. Kumar, T. Ali, and M. M. M. Pai, "Electromagnetic Metamaterials: A New Paradigm of Antenna Design," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 18722-18751, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3053100](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053100).
- [17] H. Mashhadi, L. Asadpor, Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "Slotted Substrate-Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna with Improved Backward Scanning Bandwidth and Constant Gain in X-band," *IETE Journal of Research*, 2023, doi: [10.1080/03772063.2023.2265866](https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2265866).
- [18] D. K. Karmokar, Y. J. Guo, P. -Y. Qin, S. -L. Chen, and T. S. Bird, "Substrate Integrated Waveguide-Based Periodic Backward-to-Forward Scanning Leaky-Wave Antenna With Low Cross-Polarization," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3846-3856, Aug. 2018, doi: [10.1109/TAP.2018.2835502](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2835502).
- [19] H. Zhang, Y. Jiao, G. Zhao, and C. Zhang, "CRLH-SIW based leaky wave antenna with low cross-polarisation for Ku-band applications," *Electron Lett*, vol. 52, no. 17, pp. 1426-1428, 2016, doi: [10.1049/el.2016.1825](https://doi.org/10.1049/el.2016.1825).
- [20] G.C. Wu, G.M. Wang, H.X. Peng, J.G. Liang, and X-J. Gao, "Design of leaky-wave antenna with wide beam-scanning angle and low cross-polarisation using novel miniaturized composite right/left-handed transmission line," *IET Microw Antennas Propag*, vol. 10, no. 7, pp. 777-783, 2016, doi: [10.1049/iet-map.2015.0462](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0462).
- [21] P. Belwal, R. Agrawal, and SC. Gupta "Substrate integrated waveguide leaky wave antenna with low cross polarization in X-Ku band," *Int J RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 28, no. 5, 2018, doi: [10.1002/mmce.21590](https://doi.org/10.1002/mmce.21590).
- [22] N. Nasimuddin, Z. N. Chen, and X. Qing, "Substrate Integrated Metamaterial-Based Leaky-Wave Antenna With Improved Boresight Radiation Bandwidth," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 7, pp. 3451-3457, July 2013, doi: [10.1109/TAP.2013.2256094](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2256094).
- [23] W. Cao, Z. N. Chen, W. Hong, B. Zhang, and A. Liu, "A Beam Scanning Leaky-Wave Slot Antenna With Enhanced Scanning Angle Range and Flat Gain Characteristic Using Composite Phase-Shifting Transmission Line," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5871-5875, Nov. 2014, doi: [10.1109/TAP.2014.2350512](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2350512).
- [24] Sh. Yang , R. Cui , J. Liu, M. Wang, and L. Gao, "Fractal study of interporosity flow function and shape factor in rough fractured dual porous media," *Chemical Engineering Science*, vol. 280, p. 118960, 2023, doi: [10.1016/j.ces.2023.118960](https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118960).

Optimal Dispatch Program for Thermal Units in Power Systems with High Wind Farm Penetration and Flexible Loads

Ali Heydari¹  | Reza Ebrahimi^{2*}  | Mahmood Ghanbari³ 

¹Department of Electrical Engineering,
Gorgan Branch, Islamic Azad University,
Gorgan, Iran.
uni.heydari@iau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering,
Gorgan Branch, Islamic Azad University,
Gorgan, Iran.
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering,
Gorgan Branch, Islamic Azad University,
Gorgan, Iran.
ma.ghanbari@iau.ac.ir

***Correspondence**

Reza Ebrahimi, Assistant Professor of
Electrical Engineering, Gorgan Branch,
Islamic Azad University, Gorgan, Iran.
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

Main Subjects:
Power system

Paper History:

Received: 19 November 2024

Revised: 14 December 2024

Accepted: 18 December 2024

Abstract

With the increasing energy consumption in the grid, greater utilization of renewable resources and the implementation of demand response programs have become inevitable. Accordingly, achieving an optimal economic dispatch to minimize operational costs is of critical importance. This study proposes a probabilistic, scenario-based framework to enable more precise modeling of the problem and its associated uncertainties. To generate scenarios with distinct weighting coefficients, a Monte Carlo simulation is employed. The test system utilized for simulation is a standard 10-unit grid. For solving the optimization problem, a single-objective metaheuristic algorithm is applied to determine the contribution of each thermal and renewable unit throughout the 24-hour horizon. The proposed model is examined under four different operating cases to independently and jointly assess the effects of uncertainty, demand response, and cost of energy not supplied on system operational costs. Furthermore, by comparing the obtained results with those of similar algorithms, the optimization accuracy is evaluated. The findings reveal that incorporating uncertainties increases operational costs by 2.6% and reduces the contribution of renewable units in meeting the demand. Conversely, participation of a portion of the loads in demand response and outage programs during peak hours leads to a reduction in operational costs.

Keywords: Demand response, Economic dispatch, Renewable resources, Operational cost, Outage cost

Highlights

- Developing an economic dispatch that incorporates renewable resources alongside demand response and outage costs.
- Applying a scenario-based function to characterize load behavior and the production of renewable resources.
- Implementing an appropriate metaheuristic algorithm tailored to the economic aim of the problem.

Citation: A. Heydari, R. Ebrahimi, and M. Ghanbari, "Optimal Dispatch Program for Thermal Units in Power Systems with High Wind Farm Penetration and Flexible Loads," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 58, pp. 146–171, 2026, doi:10.71656/jce.2026.1190866 [in Persian].

COPYRIGHTS

©2026 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 increasing energy consumption in power system, the integration of renewable energy sources and the implementation of demand response programs have become essential. Consequently, economic dispatch (ED) problems have grown more complex, rendering conventional methods such as Newton and Lambda unsuitable for solving these problems [1]. Traditional ED methods include linear programming (LP) [2], nonlinear programming (NLP) [3], and dynamic programming [4]. In addition, heuristic algorithms have been widely utilized for ED problems. In [5], the Meta-heuristic optimizer was proposed for ED in power grids, considering both operational and investment costs and Optimal dispatch for transmission expansion planning has been carried out in [6].

2. Innovation and contributions

A refined economic dispatch framework is formulated that integrates renewable energy resources with demand response programs. A scenario-based weighted objective function is employed to represent both load variations and renewable generation output. The model further incorporates a metaheuristic optimization algorithm specifically selected to align with the economic criteria of the dispatch problem.

3. Materials and Methods

The test system used for simulation is a standard 10-unit grid. A single-objective metaheuristic algorithm is applied to solve the optimization problem. This study adopts a probabilistic, scenario-based framework. To generate scenarios with distinct weighting coefficients, Monte Carlo Simulation is employed, ensuring closer alignment of the model with realistic operating conditions.

4. Results and Discussion

The proposed model is evaluated under three operating cases to independently and jointly analyze the effects of uncertainty, demand response programs and outage programs on system operational costs. Economic dispatch is performed in four stages. In the first stage, ED is executed without considering either parameter, resulting in operational costs of 731765 \$. In the second stage, DRP alone is not considered and increases operational costs to 751038 \$ and reduces the contribution of renewable. In the third stage, ED is performed considering both parameters, which reduces operational costs to 743461 \$. Finally, in the fourth stage, the operation was performed considering the unsupplied energy and the LPSP reliability constraint. In this situation, the operation costs were reduced to 740685 \$.

5. Conclusion

In this paper, a stochastic model for economic dispatch in power systems with renewable energy resources, demand response programs and outage programs was proposed. The model was designed as scenario-based, with each scenario generated through Monte Carlo simulation. A metaheuristic algorithm was employed to solve the resulting optimization problem. Furthermore, the optimization accuracy was assessed by comparing the obtained results with those of similar algorithms. The economic dispatch problem was evaluated in four stages. In the first stage, ED was solved without considering uncertainties, demand response programs and outage. In the second stage, the demand response program was excluded, resulting in a 2.6% increase in operational costs and a decrease in the share of renewable resources. In the third stage, both parameters were incorporated into the problem, leading to an approximately 1% reduction in operational costs attributable to the implementation of the demand response program. Finally, in the fourth stage, the operation was performed considering the unsupplied energy and the LPSP reliability constraint. In this situation, by removing a percentage of the load during hours with high electricity prices and paying the outage penalty, the operation costs were reduced to 1.38%.

6. Acknowledgement

We want to extend our sincere gratitude to the editorial board of "The Journal of Southern Communication Engineering" for providing the opportunity to publish this article

References

- [1] F. Marzbani and A. Abdelfatah, "Economic dispatch optimization strategies and problem formulation: A comprehensive review," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 550, 2024, doi: [10.3390/en17030550](https://doi.org/10.3390/en17030550).
- [2] M.R. Gholami Dehbalae, G.H. Shaeisi, and M. Valizadeh, "A novel exclusive binary search algorithm to solve the nonlinear economic dispatch problem," *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 48-56, 2020, doi: [10.22109/jemt.2020.207784.1207](https://doi.org/10.22109/jemt.2020.207784.1207).

- [3] B. Postolov and A. Iliev, "New metaheuristic methodology for solving security constrained hydrothermal unit commitment based on adaptive genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, p. 107163, 2022, doi: [10.1016/j.ijepes.2021.107163](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107163).
- [4] J. Zou, S. Ahmed, and X. A. Sun, "Multistage Stochastic Unit Commitment Using Stochastic Dual Dynamic Integer Programming," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1814-1823, May 2019, doi: [10.1109/TPWRS.2018.2880996](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2880996).
- [5] K. Srikanth *et al.*, "Meta-heuristic framework: quantum inspired binary grey wolf optimizer for unit commitment problem," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 243-260, 2018, doi: [10.1016/j.compeleceng.2017.07.023](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.07.023).
- [6] M. Najafi, H. Gorjipour, and N. Moaddabi Pirkolachi, "A Single Stage Dynamic Transmission Expansion Planning Model in the Competitive Market," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 1528, 2024, doi: [10.30495/jce.2022.1961298.1163](https://doi.org/10.30495/jce.2022.1961298.1163), [in Persian].

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

Author Contributions: Ali Heydari: Software, writing original draft preparation; Reza Ebrahimi: Resources, methodology, manuscript editing; Mahmood Ghanbari: 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.

ارائه برنامه بهینه پخش بار واحدهای حرارتی در سیستم قدرت در حضور مزرعه بادی با ضریب نفوذپذیری بالا و بارهای انعطاف پذیر

علی حیدری^۱ | رضا ابراهیمی^{۲*} | محمود قنبری^۳

چکیده:

با افزایش مصرف انرژی در شبکه، استفاده بیشتر از منابع تجدیدپذیر و به کارگیری برنامه پاسخگویی بار امری اجتناب ناپذیر است. بدین سبب دستیابی به پخش بار اقتصادی بهینه در شبکه برای به حداقل رساندن هزینه های بهره برداری اهمیت ویژه ای می یابد. این مقاله رویکردی احتمالی و سناریو محور برای مدل سازی دقیق تر مسئله و عدم قطعیت های مرتبط با آن را ارائه می دهد و جهت تعیین سناریوهایی با ضرایب وزنی منحصر به هریک، از شبیه سازی مونت کارلو بهره می برد. سیستم نمونه مورد استفاده برای شبیه سازی یک شبکه استاندارد ۱۰ واحدی است که برای حل مسئله بهینه سازی، از یک الگوریتم فرا ابتکاری به صورت تک هدفه بهره برده شده تا سهم هر واحد تولید توان حرارتی و تجدیدپذیر، در طول ساعات شبانه روز مشخص گردد. بررسی مدل پیشنهادی در چهار حالت مختلف اجرا شده تا بتوان تأثیر عدم قطعیت، برنامه پاسخ به بار و هزینه انرژی تأمین نشده را در هزینه های سیستم مشاهده کرد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، هزینه های بهره برداری را به میزان ۲/۶ درصد افزایش می دهد و سهم منابع تجدیدپذیر در تأمین بار کاهش می یابد. از طرفی، مشارکت بخشی از بارها در برنامه پاسخگویی و خاموشی در ساعات اوج مصرف، موجب کاهش هزینه ها شده است.

^۱ گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
uni.heydari@iau.ac.ir

^۲ گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
ma.ghanbari@iau.ac.ir

نویسنده مسئول:

*رضا ابراهیمی، استادیار گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران،
reza.ebrahimi@iau.ac.ir

موضوع اصلی:

پخش بار بهینه

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۹ آبان ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۲۴ آذر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۸ آذر ۱۴۰۳

کلیدواژه ها: پاسخگویی بار، پخش بار اقتصادی، منابع تجدیدپذیر، هزینه بهره برداری، هزینه خاموشی.

تازه های تحقیق:

- دستیابی به مدلی جامع تر از پخش بار اقتصادی با حضور منابع تجدیدپذیر، برنامه پاسخگویی بار و هزینه خاموشی.
- استفاده از یک تابع هدف به صورت وزنی و سناریو محور برای مدل سازی مقدار بار و میزان تولید منابع تجدیدپذیر.
- بهره گیری از الگوریتمی فرا ابتکاری، متناسب با هدف اقتصادی مسئله بهینه سازی.

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

تأمین انرژی الکتریکی توسط واحدهای نیروگاهی با کمترین هزینه همواره از مسائل مهم سیستم‌های قدرت بوده است. این امر به دلیل محدودیت‌های فنی و اقتصادی و رشد نیاز به انرژی الکتریکی پیچیده‌تر شده است. روش‌های سنتی توزیع بار، اغلب ناکارآمد و غیراقتصادی هستند. با افزایش تعداد ژنراتورها و پیچیدگی سیستم‌ها، مسئله توزیع اقتصادی بار پیچیده‌تر شده و روش‌های سنتی نظیر نیوتن و لامبدا برای حل این مسائل مناسب نیستند [۱]. همچنین، با توجه به بحران انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، منابع تجدیدپذیر نظیر باد به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی موردتوجه قرار گرفته‌اند. تولید برق از باد، به دلیل تغییرات تصادفی سرعت باد، عدم قطعیت بالایی دارد و باید در مطالعات سیستم قدرت مدنظر قرار گیرد. عدم قطعیت در پارامترهای مختلف از جمله بار مصرفی و توان تولیدی مزارع بادی نیز می‌تواند بر نتایج تأثیر بگذارد و نیاز به مدل‌سازی دقیق این عوامل وجود دارد تا عملکرد سیستم قدرت بهبود یابد [۲، ۳].

روش‌های گوناگونی برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدها در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است. روش‌های سنتی پخش بار اقتصادی^۱ (ED) شامل برنامه‌ریزی خطی^۲ (LP) [۴]، برنامه‌ریزی غیرخطی^۳ (NLP) [۵] و برنامه‌ریزی دینامیکی [۶] هستند. در [۷]، یک پخش بار اقتصادی ترکیبی برای مدیریت واحدهای تولید توان به کمک روش‌های برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی خطی ترکیبی با اعداد صحیح^۴ (MILP) پیشنهاد شده و در [۸]، مدل MILP برای بهینه‌سازی تولید توان با استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار^۵ (DRP) در جهت کاهش اوج بار معرفی شده است. مرجع [۹] به حداکثر سازی درآمد واحدهای تولیدی و منابع تولید پراکنده با استفاده از برنامه پاسخگویی بار پرداخته است. الگوریتم‌های ابتکاری نیز به‌طور گسترده در پخش بار اقتصادی استفاده شده‌اند. در [۱۰]، الگوریتم گرگ خاکستری برای برنامه توزیع اقتصادی بار در شبکه‌های قدرت پیشنهاد شده که شامل هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری است. الگوریتم نهنگ در [۱۱] برای کاهش هزینه سیستم و بهبود تابع هدف به‌کاررفته است. در [۱۲]، پخش بار اقتصادی مبتنی بر منطق فازی برای کاهش نوسانات بار در شبکه‌های دارای منابع تولید پراکنده ارائه شده است و روش‌های هوش مصنوعی نیز در [۱۳] و [۱۴] برای این منظور به‌کاررفته‌اند. مرجع [۱۵] به بررسی پاسخگویی بار و منابع ذخیره‌ساز پرداخته و نشان داده که این روش‌ها موجب کاهش هزینه و اوج بار می‌شوند. در [۱۶] و [۱۷]، روش‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسائل پخش بار اقتصادی بررسی شده‌اند و در [۱۸]، بهینه‌سازی مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند ازدحام ذرات و روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی^۶ (NN) انجام یافته است.

برنامه‌های مشارکت واحدها مبتنی بر تصادف نیز در [۱۹] و [۲۰] برای مدیریت عدم قطعیت‌های تولید از منابع تجدیدپذیر بررسی گردیده و در [۲۱]، مشارکت واحدها مبتنی بر قابلیت اطمینان و امنیت ارائه شده است. پخش بار بهینه برای برنامه‌ریزی توسعه انتقال در [۲۲] انجام یافته و عدم قطعیت‌ها در [۲۳] برای پخش بار اقتصادی بررسی شده‌اند. عدم قطعیت‌های مرتبط با شرایط جوی در سیستم‌های قدرت نیز در [۲۴] و [۲۵] بررسی شده و تأثیر آن بر منابع تجدیدپذیر مانند منابع بادی و خورشیدی مورد بحث قرار گرفته است. در [۲۶] روش‌هایی برای مدیریت خطاهای پیش‌بینی و کاهش عدم قطعیت ارائه شده و مرجع [۲۷] به برنامه پاسخگویی بار و هزینه توقف ارائه توان پرداخته است. مرجع [۲۸] نیز امنیت تأمین انرژی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و هزینه خاموشی بررسی نموده است. در [۲۹] سیستم قدرت با حضور منابع بادی و بارهای انعطاف پذیر بررسی شده و از طرفی با لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها، پخش بار سیستم را از جنبه اقتصادی و آلاینده‌گی توسط الگوریتمی دوهدفه ارزیابی نموده است.

مطالعات انجام شده نشان دادند که برای داشتن پخش بار اقتصادی بهینه و واقع بینانه‌تر در شبکه، می‌بایست بارهای پاسخگو، هزینه عدم تأمین توان و منابع تجدیدپذیر را به همراه عدم قطعیت‌های سیستم، به‌درستی مدل‌سازی کرد. لذا در این مقاله، با

¹ Economic Dispatch

² Linear Programming

³ Non-linear Programming

⁴ Mixed-Integer Linear Programming

⁵ Demand Response Programming

⁶ Neural Network

عنایت به مرجع [۲۹]، یک مدل احتمالاتی از پخش بار اقتصادی سیستم قدرت در حضور مزارع تجدیدپذیر بادی و با در نظر گرفتن مشارکت بارهای انعطاف‌پذیر و جریمه خاموشی، پیشنهاد شده است.

در مرجع یاد شده علاوه بر مسائل اقتصادی، به آلاینده‌گی به عنوان تابع هدف دوم پرداخته شده که چالش‌های بهینه‌سازی‌های چندهدفه از قبیل تعارض جواب‌های به دست آمده را به همراه خواهد داشت و در نتیجه آن، شرایط مسئله با خواسته‌های بسیاری از بازارهای برق که تنها به مسائل اقتصادی می‌پردازند، انطباق کمتری خواهد داشت. بدین جهت در این مقاله، مدل‌سازی مرجع [۲۹] به صورت مسئله‌ای احتمالاتی و تک‌هدفه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا بتوان تحلیل سازگاری با هدف اقتصادی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت ارائه داد. در این راستا، الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی ارائه شده در مرجع مورد نظر، که ترکیبی از دو الگوریتم ازدحام ذرات و جستجوی صاعقه (HLSA-PSO)^۱ است، به صورت تک‌هدفه استفاده گردیده است. در نسخه پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی، ضرایب الگوریتم ازدحام ذرات توسط الگوریتم جستجوی صاعقه تنظیم می‌گردد تا دقت الگوریتم برای حل مسئله پخش بار اقتصادی در شرایط عدم قطعیت‌ها افزایش یابد. نوآوری‌های این مقاله موارد زیر هستند:

- ارائه مدل احتمالاتی پخش بار بهینه در شبکه در حضور مزارع تجدیدپذیر بادی و برنامه پاسخگویی بار و هزینه خاموشی.
 - استفاده از تابع هدف وزنی و سناریو محور برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار و منابع تجدیدپذیر
 - بهره‌گیری از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و جستجوی صاعقه به صورت تک‌هدفه برای بهینه‌سازی.
- در ادامه مقاله، در بخش دوم مدیریت بار در مسئله پخش بار اقتصادی سیستم قدرت شامل دو مؤلفه توان تأمین نشده در شبکه و تأثیر مشارکت بارهای انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، عدم قطعیت‌های تأثیرگذار بر مسئله پخش بار اقتصادی و روش مدل‌سازی آن‌ها ارائه شده است. تابع هدف و قیود برنامه پخش بار اقتصادی در بخش چهارم و الگوریتم پیشنهادی ترکیبی ازدحام ذرات-جستجو صاعقه نیز در بخش پنجم مختصراً معرفی شده‌اند. تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌ها در چهار قسمت در بخش ششم انجام شده است. در نهایت این مقاله با ارائه نتیجه گیری و پیشنهاد موضوعات تحقیق آتی در بخش هفتم به پایان می‌رسد.

۲- مدیریت بار در پخش بار اقتصادی

با رشد روزافزون تقاضا در شبکه، علاوه بر مدیریت تولید انرژی الکتریکی، مدیریت مصرف و برنامه‌ریزی برای آن جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. بدین سبب، مسئله توان تأمین نشده در شبکه و از طرفی برنامه پاسخگویی بار، نقش مهمی در بهره‌برداری از سیستم قدرت پیدا می‌کند. مدل‌سازی و لحاظ نمودن هزینه‌های مربوط به این دو مؤلفه می‌تواند امکان رسیدن به مدلی نزدیک‌تر به شرایط بهینه پخش بار اقتصادی را فراهم آورد.

۲-۱- توان تأمین نشده در شبکه

در بهره‌برداری از سیستم قدرت، مدیریت قابلیت اطمینان و هزینه انرژی تأمین نشده (CENS)^۲ یا هزینه خاموشی^۳ به یکی از جنبه‌های مهم مطالعات بهره‌برداری و برنامه‌ریزی برای آن تبدیل گردیده است. تأمین نشدن توان به طور مستقیم بر رفاه اجتماعی، فعالیت‌های اقتصادی و رضایت مشترکین تأثیرگذار است و نادیده گرفتن آن در مدل‌های بهینه‌سازی می‌تواند منجر به برنامه‌های بهره‌برداری غیرواقع‌بینانه و پرهزینه گردد. بدین جهت، در نظر گرفتن هزینه خاموشی به صورت یک جریمه در تابع هدف، امکان اتخاذ تصمیم‌های بهینه‌تری را فراهم می‌آورد. این رویکرد به بهره‌بردار سیستم اجازه می‌دهد تا در شرایطی که هزینه تأمین برق از طریق راه‌اندازی واحدهای گران‌قیمت یا خرید انرژی از بازار به سطح غیراقتصادی می‌رسد، بتواند بخشی از بار را با پرداخت جریمه، خاموش نماید [۲۷].

^۱ Hybrid lightning search algorithm-particle swarm optimization

^۲ Cost of Energy Not Supplied

^۳ Outage Cost

هزینه کل خاموشی در یک بازه زمانی مانند یک شبانه روز را می توان به صورت مجموع هزینه های انرژی تأمین نشده در هر ساعت مدل کرد. این هزینه تابعی از مقدار انرژی قطع شده و ارزش هر کیلووات ساعت توان قطع شده بار در آن ساعت، برای انواع مشترکین (مسکونی، تجاری و صنعتی) است که در رابطه ۱ آمده است [۲۸].

$$C_{ENS} = \sum_{i=1}^{N_i} (VOLL_i \times EC_i) \quad (۱)$$

در رابطه ۱، C_{ENS} هزینه کل خاموشی در ساعت t ، $VOLL$ قیمت هر مگاوات ساعت توان تأمین نشده و EC مقدار توان تأمین نشده برای مصرف کننده نوع i در آن ساعت خواهد بود. در بسیاری از مطالعات برای ساده سازی، یک مقدار متوسط برای قیمت توان تأمین نشده مشترکین متفاوت در نظر گرفته می شود و رابطه فوق به صورت زیر نوشته می شود [۲۸].

$$C_{ENS} = VOLL \times EC \quad (۲)$$

اعمال هزینه خاموشی به تنهایی ممکن است منجر به قطعی های گسترده و غیر قابل قبول از دید قابلیت اطمینان شود. بنابراین، معمولاً یک قید بر اساس شاخص قابلیت اطمینان به مدل اضافه می گردد. یکی از پرکاربردترین این شاخص ها، احتمال از دست دادن منبع توان (LPSP)^۲ است که به صورت رابطه ۳ تعریف می شود [۲۱].

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T P_{ENS}(t)}{\sum_{t=1}^T P_D(t)} \quad (۳)$$

که در آن $PD(t)$ کل بار مورد نیاز در ساعت t و T کل ساعات مورد مطالعه خواهد بود. برای اطمینان از سطح قابل قبول برای ارائه توان، معمولاً محدودیتی به میزان ۲ یا ۵ درصد برای این شاخص در نظر گرفته می شود.

۲-۲- برنامه پاسخگویی بار

برنامه های پاسخگویی بار در بازار برق که شامل تنظیم تقاضای برق توسط مصرف کنندگان در واکنش به نوسانات قیمت برق است، مورد استفاده قرار می گیرند. این برنامه ها به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: برنامه های مبتنی بر انگیزه و برنامه های مبتنی بر قیمت، که هدف آن ها تشویق مصرف کنندگان به کاهش مصرف در ساعات اوج و کاهش فشار بر شبکه است. روش های قیمت گذاری برق به مصرف کنندگان اجازه می دهند به عنوان بارهای انعطاف پذیر تصمیمات آگاهانه تری درباره هزینه های برق مصرفی خود بگیرند و این امر به افزایش بهره وری کلی سیستم کمک می کند [۳۰]. انعطاف پذیری بار به ظرفیت سیستم قدرت برای تنظیم پویا و هماهنگ سازی عرضه و تقاضای برق با شرایط متغیر بازار انرژی اشاره دارد و یکی از جنبه های کلیدی بهره برداری سیستم قدرت است که به سیستم امکان می دهد با حفظ پایداری و صرفه جویی در هزینه ها، به طور مؤثری با عدم قطعیت ها سازگار شود. برای دستیابی به این انعطاف پذیری در سیستم، روش های مختلفی به کار گرفته می شوند؛ از جمله سیستم های ذخیره سازی انرژی، برنامه های پاسخگویی بار، و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر. این عناصر به طور هم زمان عمل می کنند تا تقاضا و عرضه بار سیستم را به صورت لحظه ای تنظیم و مدیریت کنند و عملکردی قابل اعتماد و کارآمد به دست آید. از سوی دیگر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد، به سیستم قدرت اجازه می دهد تا از برق پاک و پایدار بهره مند شود. با این حال، به دلیل ماهیت متغیر این منابع، حفظ پایداری در تأمین انرژی چالش برانگیز است. انعطاف پذیری بار می تواند به حل این چالش کمک کند، چرا که با تنظیم تقاضای برق بر اساس الگوهای تولید، بهره وری از انرژی بهینه می شود. در بهره برداری از سیستم قدرت، با توجه به میزان توان مشارکت داده شده برای بارهای منعطف، می توان هزینه های مربوطه را از رابطه ۴ به دست آورد.

^۱ Value Of Lost Load

^۲ Loss of Power Supply Probability

$$C_{DR}(t) = \sum_{n=1}^{N_{DR}} (\Delta P(n,t) \times R_{DR}(n,t)) \quad (۴)$$

در رابطه ۴، C_{DR} هزینه بارهای انعطاف‌پذیر در ساعت t برای تغییرات توان و R_{DR} مقدار پاداش بار n در زمان t ، در نظر گرفته می‌شوند. معمولاً برای بارهای انعطاف‌پذیر محدودیت میزان مشارکت در برنامه پاسخگویی به صورت رابطه ۵ لحاظ می‌گردد.

$$Pn_{\min} \leq \Delta Pn \leq Pn_{\max} \quad (۵)$$

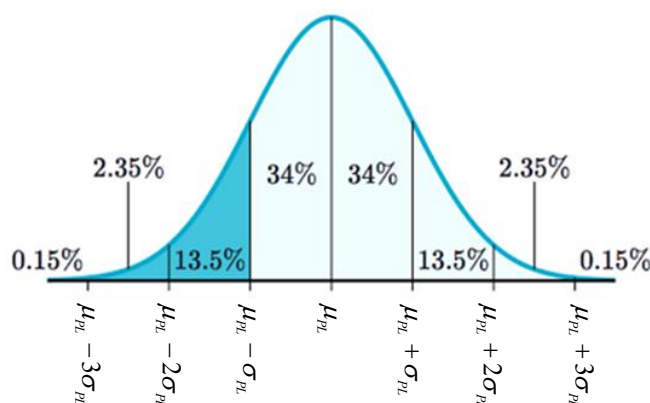
همانطور که در مشاهده می‌شود، تغییرات توان بار انعطاف‌پذیر می‌بایست در یک محدوده حداقل و حداکثر تعریف شده باشند. بدین ترتیب با مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی، تاب‌آوری سیستم انرژی افزایش یابد و آسیب‌پذیری آن را در برابر عدم قطعیت‌ها، مانند نوسانات عرضه یا رویدادهای پیش‌بینی‌نشده، کاهش می‌دهد و از طرفی به کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند، زیرا با بهینه‌سازی استفاده از منابع و کاهش هدر رفت در دوره‌های کم تقاضا، بهره‌وری را افزایش می‌دهد.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در برنامه پخش بار اقتصادی سیستم قدرت

عدم قطعیت بخشی جدایی‌ناپذیر از مطالعات سیستم‌های قدرت است و نادیده گرفتن آن باعث کاهش اعتبار نتایج می‌شود. با شناسایی و مدل‌سازی مناسب منابع عدم قطعیت می‌توان اثرات آن‌ها را کاهش داده و عملکرد سیستم را بهبود بخشید. از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در برنامه‌های پخش بار اقتصادی در این مقاله می‌توان به عدم قطعیت بار مصرفی، عدم قطعیت توان تولیدی مزرعه بادی و همچنین عدم قطعیت قیمت انرژی در بازار اشاره کرد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار، مدل‌های مختلفی ارائه شده‌اند که در این میان، استفاده از تابع چگالی احتمال (PDF)^۱ نرمال می‌تواند مدلی مناسب برای تغییرات بار باشد. تابع توزیع احتمال نرمال برای پیش‌بینی بار مصرفی به صورت رابطه ۶ بیان شده است [۳۲].

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_{PL}} \exp\left(-\frac{(P_L - \mu_{PL})^2}{2 \times \sigma_{PL}^2}\right) \quad (۶)$$

که در رابطه ۳۱، P_L ، μ_{PL} و σ_{PL} به ترتیب توان بار، مقدار متوسط از توان بار و انحراف معیار هستند. یک تابع چگالی احتمال نرمال به صورت شکل (۱)، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱: تابع چگالی احتمال نرمال
Figure 1. Normal Probability Density Function

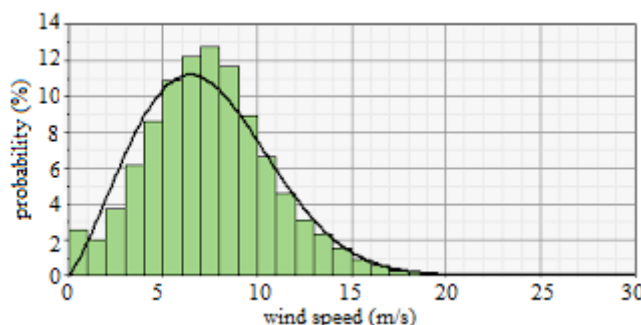
توان تولیدی در مزارع بادی به پارامترهایی مثل دسترس‌پذیری بادی، منحنی توان بادی، سرعت باد، شکل و اندازه توربین وابسته است. تابع توزیع احتمال ویبول^۲، می‌تواند مناسب‌ترین مدل برای عدم قطعیت سرعت باد باشد که ضرایب آن بر اساس داده‌های قبلی سرعت باد و اطلاعات هواشناسی تعیین می‌شود [۳۳].

$$f_t^{WT}(v) = \frac{\beta_t}{\alpha_t} \times \left(\frac{v_t}{\alpha_t}\right)^{\beta_t-1} \exp\left(-\left(\frac{v_t}{\alpha_t}\right)^{\beta_t}\right), \text{ for } \alpha_t > 1, \beta_t > 0 \quad (۷)$$

¹ Probability Density Function

² Weibull

که در مدل تابه چگالی احتمال ویبول، v_t (m/s) متغیر تصادفی سرعت باد و β_t و α_t به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس توزیع ویبول هستند که این ضرایب بر اساس اطلاعات ثبت شده از سرعت باد برای بازه‌های زمانی مشخص، محاسبه می‌شوند.



شکل ۲: تابع چگالی احتمال ویبول [۳۳]

Figure 2. Weibull probability density function

عدم قطعیت قیمت در بازار بستگی به انتخاب روش قیمت‌گذاری دارد. اگر نوع قیمت‌گذاری به‌صورت زمان استفاده یا قیمت‌گذاری زمان بحرانی باشد به دلیل آنکه قیمت انرژی الکتریکی از پیش تعیین شده است، عدم قطعیت قیمت بازار وجود نخواهد داشت اما در صورتیکه قیمت‌گذاری به‌صورت زمان حقیقی انتخاب شود، باید عدم قطعیت قیمت برق در بازار را در نظر گرفت. مناسب عدم قطعیت بازار، اغلب از تابع چگالی احتمال نرمال استفاده می‌شود [۳۴]. در این مقاله به دلیل اینکه معمولاً در شبکه با قیمت‌گذاری زمان استفاده روبرو هستیم، از عدم قطعیت بازار صرف‌نظر شده است.

پس از مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، باید از روش مناسبی برای انتخاب سناریوها و تعریف توابع هدف استفاده کرد. یکی از بهترین روش‌های تصادفی انتخاب سناریو، روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)^۱ است. روش MCS برای تحلیل عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های پیچیده و غیرخطی کاربرد دارد. این روش نیازی به دانستن دقیق تابع انتقال ندارد و می‌تواند با استفاده از انواع توابع چگالی احتمال عمل کند. همچنین، اجرای آن ساده، شهودی و مناسب برای حفظ ویژگی‌های زمانی منابع انرژی و بار متغیر است، و به دلیل استفاده از اعداد تصادفی، برای سیستم‌های پیچیده عملکرد مطلوبی دارد. گام‌های اساسی محاسبه عدم قطعیت به روش مونت کارلو به شرح زیر است [۳۵].

گام ۱: تعریف مدل ریاضی سیستم اندازه‌گیری

رابطه ریاضی میان کمیت مورد اندازه‌گیری (اندازه y) و عوامل مؤثر بر آن (کمیت‌های ورودی یا X_i ها)

گام ۲: اختصاص توابع چگالی احتمال به کمیت‌های ورودی

اختصاص توابع چگالی احتمال به کمیت‌های ورودی X_i داده می‌شود. کمیت‌های ورودی که از هم مستقل نیستند.

گام ۳: به دست آوردن توابع چگالی احتمال کمیت خروجی

برای هر یک از کمیت‌های ورودی، تعدادی زیادی اعداد تصادفی (M دفعه) مطابق با تابع توزیع آن‌ها ایجاد می‌شود. اعداد تصادفی ایجاد شده برای هر یک از کمیت‌های ورودی در مدل ریاضی سیستم اندازه‌گیری قرار داده می‌شود و بر اساس آن M مقدار $(X_1, X_2, \dots, X_m)$ برای متغیر خروجی Y به دست می‌آید. در نهایت بر اساس مقادیر به دست آمده، تابع چگالی احتمال متغیر خروجی به دست می‌آید.

گام ۴: تعیین عدم قطعیت سیستم اندازه‌گیری

در این مرحله با استفاده از تابع چگالی احتمال تعیین شده برای کمیت خروجی Y ، امید ریاضی Y (مقدار تخمینی کمیت خروجی)، انحراف استاندارد Y (عدم قطعیت استاندارد نسبت داده شده به متغیر خروجی) و فاصله اطمینانی که در برگیرنده Y با احتمالی مشخص شده است یا همان احتمال پوشش تعیین می‌شود.

¹ Monte Carlo Simulation

در چارچوب تحلیل احتمالی تابع هدف، مسئله به صورت $y=f(Z)$ بیان می‌شود، که در آن Z ، بردار متغیرهای احتمالی مسئله بوده و تابع چگالی احتمال منحصر به فردی دارند. در این صورت برای تحلیل احتمالی مسئله با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو سناریوهای مختلف تولید شده، و تابع هدف به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۲۹].

$$y = \sum_{s \in \Omega_s} \psi_s^{norm} \times f(Z_s) \quad (۸)$$

که در آن، ψ_s^{norm} احتمال هر سناریو است که به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌گردد:

$$\psi_s^{norm} = \frac{\prod_{i=1}^{N_U} Prob_{i,s}}{\sum_{s=1}^{N_s} \prod_{i=1}^{N_U} Prob_{i,s}} \quad (۹)$$

۴-تابع هدف و محدودیت‌ها

در مسائل بهینه‌سازی بایستی تابع هدفی مطلوب برای مسئله انتخاب شود تا با حداقل‌سازی آن تابع، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شوند. با توجه به مسئله پخش بار اقتصادی مورد نظر، با استفاده از مرجع [۲۹] تابع هزینه بهره‌برداری به صورت رابطه ۱۰، تعریف می‌شود.

$$\text{Min } f_1 = \text{Min} \sum_{s=1}^{N_s} \psi_s \sum_{t=1}^T \text{cost}(t) = \text{Min} \sum_{s=1}^{N_s} \psi_s \sum_{t=1}^T \left(\sum_{u=1}^{N_u} C_U^k(t) + \sum_{i=1}^{N_{WT}} C_{WT}^i(t) + \sum_{k=1}^{N_{FL}} C_{FL}^k(t) + C_{Loss}(t) + C_{ENS}(t) \right) \quad (۱۰)$$

که $C_U^k(t)$ ، $C_{WT}^i(t)$ ، $C_{Loss}(t)$ ، $C_{FL}(t)$ و $C_{ENS}(t)$ به ترتیب هزینه توان تولید شده واحد نیروگاهی، هزینه مزرعه بادی، هزینه تلفات، هزینه مشارکت بارهای انعطاف‌پذیر در برنامه پاسخگویی بار و در نهایت هزینه انرژی تأمین نشده در دوره زمانی t و از طرفی N_s تعداد نمونه‌های تصادفی در شرایط مختلف بهره‌برداری در دوره t هستند. در این مقاله، طول دوره t برابر با یک ساعت در نظر گرفته شده و T ، تعداد کل ساعت‌های شبانه‌روز ($t = 1, 2, \dots, 24$) است. هزینه تولید توان واحدها به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [۳۶].

$$C_U(i, t) = C_U^F(i, t) + C_U^{SC}(i, t) \quad (۱۱)$$

که $C_U^F(i, t)$ هزینه سوخت واحد و $C_U^{SC}(i, t)$ هزینه خاموش و روشن کردن واحد نام است. هزینه سوخت با در نظر گرفتن تأثیر شیر بخار توسط رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود که تأثیر شیر بخار در محاسبه هزینه سوخت به صورت ترم سینوسی در آن آمده است. این رابطه نسبت به سایر روابط در نظر گرفته شده برای محاسبه سوخت نیروگاه، از دقت بالاتری برخوردار است [۳۶].

$$C_U^F(i, t) = a_i P^2(i, t) + b_i P(i, t) + c_i + \left| d_i \sin(e_i (P_{\min(i)} - P(i, t))) \right| \quad (۱۲)$$

هزینه خاموش و روشن کردن واحد نیروگاهی، توسط رابطه ۱۳ به دست می‌آید که در آن SUC با توجه به مدت زمان از مدار خارج بودن واحد، توسط رابطه ۱۴، تعیین می‌شود [۳۶].

$$C_U^{SC}(i, t) = SUC(i) \times |(U(i, t) - U(i, t-1))| \quad (۱۳)$$

$$SUC(i) = \begin{cases} HSC(i) & T_{off} \leq CST(i) + MDT(i) \\ CSC(i) & T_{off} > CST(i) + MDT(i) \end{cases} \quad (۱۴)$$

در رابطه ۱۱، HSC هزینه راه‌اندازی گرم و CSC هزینه راه‌اندازی سرد است. همچنین T_{off} زمان از مدار خارج بودن واحد، $CST(i)$ زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی سرد و $MDT(i)$ حداقل زمان خاموش بودن واحد حرارتی نام هستند.

میزان تلفات اهمی در هر ساعت با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه و در نتیجه هزینه تلفات نیز با انجام پخش بار ساده و ضرب انرژی تلف شده در قیمت برق در هر ساعت مطابق رابطه ۱۶ به دست خواهد آمد [۳۶].

$$P_{Loss} = B_{oo} + \sum_{j=1}^{N_g} B_{jo} P_j + \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} P_i B_{ij} P_j \quad (۱۵)$$

$$C_{Loss}^E(t) = P_{Loss}(t) \times C_E(t) \quad (۱۶)$$

برای هزینه مزارع بادی می‌توان مدل مرتبه اول را در نظر گرفت که ضرایب آن به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا تمامی هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه تمیزکاری، هزینه پرسنل و هزینه انتقال انرژی را شامل شود. استفاده از معادلات مرتبه بالاتر سبب پیچیدگی مسئله خواهد شد و در دقت پاسخ نهایی تأثیر چندانی ندارد و ممکن است سبب به دام افتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی گردد [۳۳].

$$C_{WT}^i(t) = A + BP_{wt}(t) \quad (۱۷)$$

در رابطه فوق، A ، B ضرایب هزینه مزارع بادی و $P_{wt}(t)$ توان تولیدی مزرعه بادی هستند. اگر در برنامه پاسخگویی بار بارهای انعطاف‌پذیر مشارکت داشته باشند، آنگاه برنامه‌ریزی‌ها متفاوت خواهد بود که مراجع کمتری در پخش بار اقتصادی بدان توجه کردند. اگر بجای خاموشی‌های با برنامه و بی‌برنامه، رصد کلی بر رفتار مصرفی مشترکین خرد و کلان وجود داشته باشد و بتوان با ایجاد برنامه‌های تشویقی، بارهای منعطف را مجاب به همکاری کرد، دیگر مشکل خاموشی بدین وسعت وجود نداشت. با فرض آنکه میزان پاداش به بارهای انعطاف‌پذیر برای کاهش هر مگاوات ساعت یکسان است، هزینه بارهای منعطف، به‌واسطه مشارکت در برنامه پاسخگویی بار، توسط رابطه ۱۸، محاسبه می‌شود [۲۹].

$$C_{FL}(t) = P_{FL}(t) \times R_{DR}(t) \quad (۱۸)$$

که در اینجا P_{FL} میزان توان کاهش داده شده توسط مجموع بارهای انعطاف‌پذیر و R_{DR} میزان پاداشی است که به ازای هر مگاوات کاهش توان مصرفی به آن پرداخت می‌گردد.

برای مدل کردن هزینه انرژی تأمین نشده در سیستم به ازای هر ساعت، از رابطه ۱۹ بهره می‌بریم [۲۸].

$$C_{ENS}(t) = VOLL(t) \times EC(t) \quad (۱۹)$$

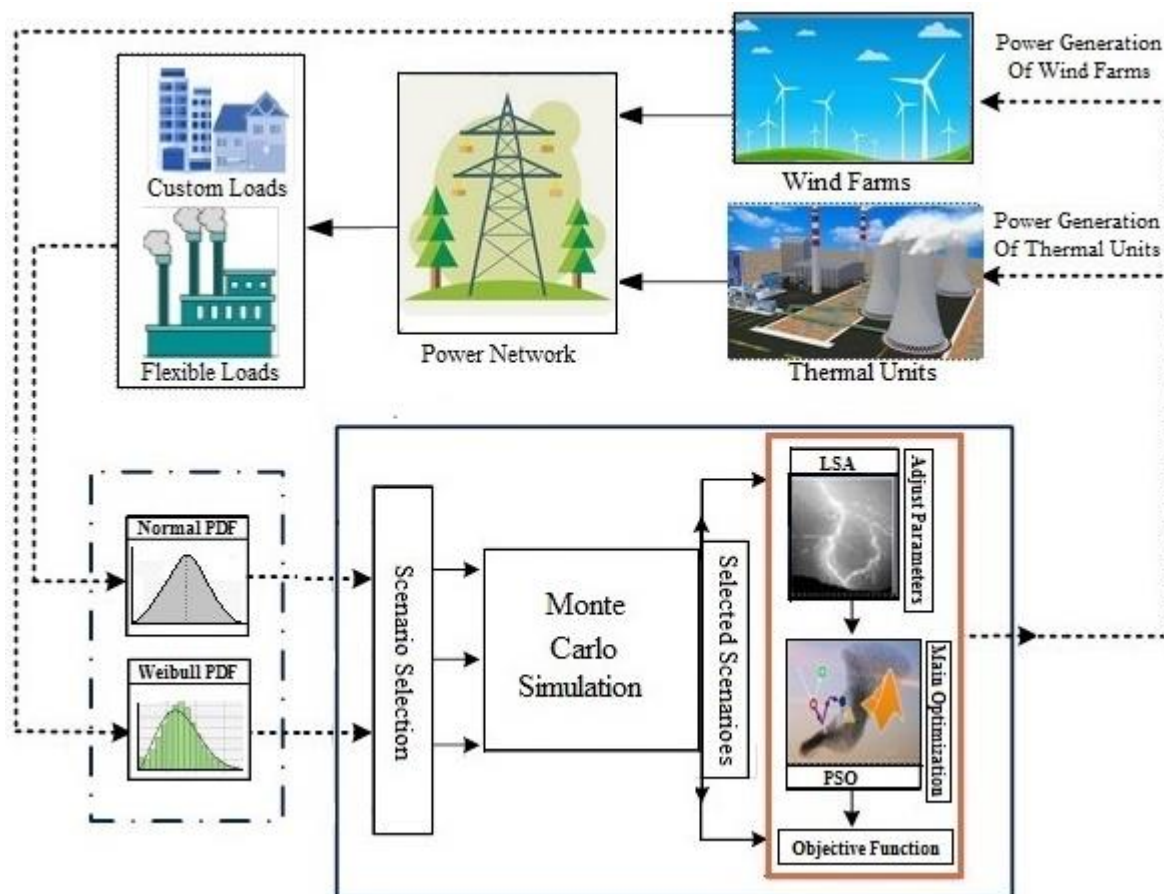
لازم به ذکر است که جریمه در نظر گرفته شده برای انرژی تأمین نشده، جدا از ظرفیت مشارکت بارهای انعطاف‌پذیر و مشارکت آن‌ها در برنامه پاسخ‌گوئی بار است. همانطور که گفته شد، در نظر گرفتن خاموشی برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌تواند منجر به نارضایتی مشترکین شود. به همین دلیل محدودیت شاخص احتمال از دست رفتن منبع توان، کمتر از ۲٪ در مدل پیشنهادی، در نظر گرفته شده است.

۵- الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات-صاعقه

عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای آن‌ها است. اگر پارامترها به‌درستی انتخاب نشوند، ممکن است الگوریتم دچار عدم همگرایی شود یا در نقاط بهینه محلی گیر کند. در این مقاله، با الهام از الگوریتم پیشنهاد شده در مرجع [۲۹] با نام HLSA-MOPSO، برای حل مسئله پخش بار اقتصادی از نسخه تک‌هدفه این الگوریتم استفاده شده است. این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم جستجوی صاعقه (LSA)^۱ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۲ است. در الگوریتم مذکور، ضرایب ازدحام ذرات در هر تکرار توسط الگوریتم جستجوی صاعقه به‌طور بهینه انتخاب می‌شوند. نمای کلی حل مسئله با الگوریتم تک‌هدفه پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

^۱ Lightning Search Algorithm

^۲ Particle Swarm Optimization



شکل ۳: نمای کلی حل مسئله با الگوریتم HLSA-PSO

Figure 3. The overview of problem solving with HLSA-PSO algorithm

الگوریتم ازدحام ذرات، الگوبرداری شده از رفتار جمعیت پرندگان و حیوانات در طبیعت برای یافتن غذا است. در این الگوریتم، ابتدا جمعیت به صورت تصادفی با توزیع نرمال مقداردهی می‌شوند و مقدار تابع هدف برای تمام آن‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به مقادیر تابع هدف به دست آمده، بهترین پاسخ جمعی (Gbest) و بهترین پاسخ‌های شخصی (Pbest) تعیین می‌شوند. به‌روزرسانی موقعیت ذرات در تکرارهای بعدی الگوریتم نیز توسط رابطه ۲۰ انجام می‌شود [۳۷].

$$X_k(i+1) = X_k(i) + V_k(i+1) \quad (20)$$

$$V_k(i+1) = D \times \omega \times V_k(i) + C_1 \times r_1 \times (P_{best,i}^k - X_k(i)) + C_2 \times r_2 \times (G_{best,i} - X_k(i)) \quad (21)$$

در اینجا، i تعداد تکرارهاست، $X_k(i+1)$ نسل جدید است، r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ با توزیع نرمال، P_{best} و G_{best} به ترتیب بهترین پاسخ‌های شخصی و جمعی، ω ضریب وزنی سرعت، C_1 و C_2 ضرایب تنظیم حرکت در مسیر بهترین پاسخ‌های شخصی و جمعی و در نهایت D نیز ضریب همگرایی خواهد بود. ضریب D برای به‌روزرسانی موقعیت ذرات با مقداری کمتر در نتیجه افزایش تکرارهای الگوریتم استفاده شده است تا بهینه‌سازی با دقت بیشتری انجام شود. فرآیند به‌روزرسانی موقعیت ذرات تا رسیدن به بهترین راه‌حل ادامه می‌یابد. عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات به پارامترهای آن (C_1 ، C_2 ، D و ω) بستگی دارد و برای مسئله پخش بار اقتصادی، این پارامترها باید بهینه انتخاب شوند. همانطور که اشاره گردید در این مقاله، از الگوریتم جستجوی صاعقه در این راستا بهره برده شده است.

الگوریتم جستجوی صاعقه از سازوکار انتشار فرمانده الهام گرفته از ردوبرق استفاده می‌کند. این روش از ترکیب سریع ذرات، که به پرتابه معروف است، بهره می‌گیرد که به صورت یک ساختار جستجوی دودویی برای فرمانده سازمان‌دهی شده است. به

هنگام حرکت پرتابه در جو، انرژی جنبشی آن از طریق برخورد با مولکول‌های هوا کاهش می‌یابد. سرعت (v_p) و انرژی جنبشی (E_p) پرتابه به ترتیب توسط روابط ۲۲ و ۲۳ محاسبه می‌شوند [۳۸].

$$v_p = \left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c} \right)^2} - \frac{SF_i}{(mc^2)}} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

$$E_p = \left(\left(1 / \sqrt{1 - (v_p / c)^2} \right) - 1 \right) mc^2 \quad (23)$$

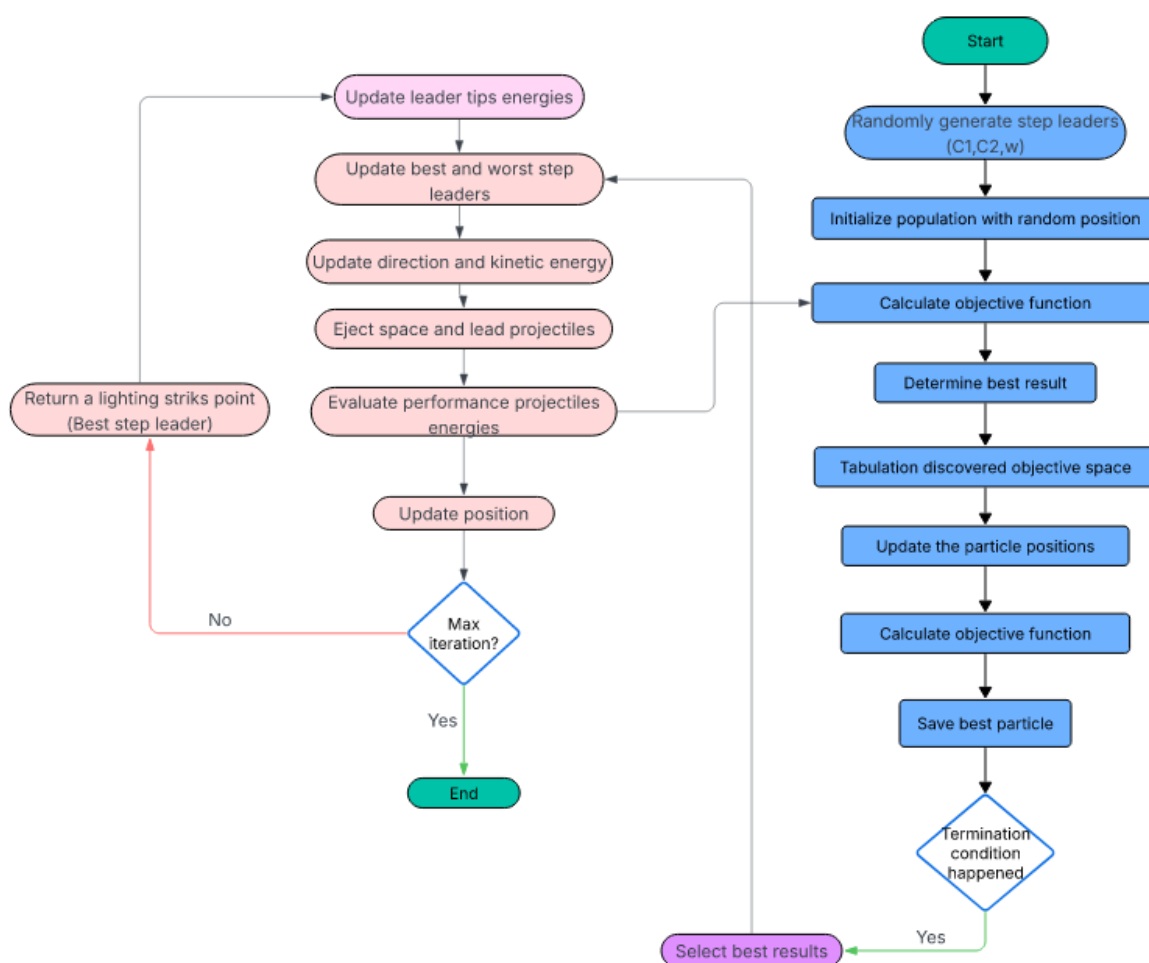
که در روابط فوق، v_0 سرعت اولیه، s طول مسیر حرکت، F_i نرخ یونیزاسیون، m جرم پرتابه و c سرعت نور است. سرعت انرژی جنبشی به موقعیت گام فرمانده و جرم پرتابه بستگی دارد. بنابراین، زمانی که جرم کوچک باشد یا مسافت طولانی باشد، پرتابه پتانسیل کمتری برای یونیزاسیون دارد. پرتابه را می‌توان به صورت یک مدل احتمالی نمایی یا احتمالی نرمال مدل‌سازی کرد. برای مدل نمایی، موقعیت جدید پرتابه توسط رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود [۳۸].

$$P_{new}^S = P^S \pm Erand(\mu_L) \quad (24)$$

که در آن، μ_i فاصله بین پرتابه رهبر و پرتابه فضایی، $Erand$ یک عدد تصادفی نمایی است. همچنین، برای مدل نرمال، موقعیت جدید پرتابه توسط رابطه ۲۵ به‌روزرسانی می‌شود [۳۸].

$$P_{new}^L = P^L \pm norm_rand(\mu_L, \sigma) \quad (25)$$

با استفاده از فلوچارت مرجع [۲۹] می‌توان فلوچارت الگوریتم مورد نظر را به صورت تک هدفه به شکل ۴ نشان داد:



شکل ۴: روند نمای الگوریتم پیشنهادی HLSA-PSO
Figure 4. Flowchart of the proposed HLSA-PSO algorithm

۶- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله در دو قسمت انجام شده است. در قسمت اول، عملکرد الگوریتم تک‌هدفه پیشنهادی از طریق بهینه‌سازی توابع معیار محک و مقایسه نتایج آن با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در قسمت دوم نیز از این الگوریتم برای حل مسئله پخش بار اقتصادی در یک سیستم نمونه استاندارد استفاده شده است. در هر دو بخش، نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج مقالات دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

۶-۱- ارزیابی دقت الگوریتم تک‌هدفه پیشنهادی

در بخش اول تحلیل نتایج، کارایی و دقت الگوریتم پیشنهادی (HLSA-PSO) مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجاکه در مرجع [۲۹] سنجش عملکرد الگوریتم چندهدفه مورد استفاده (HLSA-MOPSO)، روی توابع معیار استاندارد دوهدفه انجام پذیرفته است، در این مقاله برای اطمینان از عملکرد آن به شکل تک‌هدفه، از توابع معیار استاندارد مناسب این ارزیابی استفاده شده است. این توابع و محدودیت‌های آن‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این بین، توابع f1 تا f4 توابع تک‌وجهی، f5 تا f7 توابع چندوجهی و f8 تا f10 توابع چندوجهی با ابعاد ثابت هستند. الگوریتم پیشنهادی برای هر تابع آزمون به‌منظور اثبات پایداری و ویژگی‌های همگرایی آن، ۳۰ بار اجرا شده است [۳۹].

جدول ۱: توابع معیار استاندارد
Table 1. Standard benchmark functions

	Function	Dimensions	Domain	f_{min}
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100 100]	0
Schwefel 2.22	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	30	[-10 10]	0
Schwefel 1.2	$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	30	[-100 100]	0
Schwefel 2.21	$f_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n \}$	30	[-100 100]	0
Rastrigin	$f_5(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5.12 5.12]	0
Ackley	$f_6(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$	30	[-32 32]	0
Griewank	$f_7(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	30	[-600 600]	0
Shekel 5	$f_8(x) = -\sum_{i=1}^5 \left[(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i \right]^{-1}$	4	[0 10]	-10.1532
Shekel 7	$f_9(x) = -\sum_{i=1}^7 \left[(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i \right]^{-1}$	4	[0 10]	-10.4028
Shekel 10	$f_{10}(x) = -\sum_{i=1}^{10} \left[(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i \right]^{-1}$	4	[0 10]	-10.5363

علاوه بر الگوریتم مورد نظر، الگوریتم‌های بهینه‌سازی گاز خاکستری (GGO) [۴۰]، ازدحام ذرات [۴۱] و الگوریتم جستجوی صاعقه [۴۲] نیز برای مقایسه بکار گرفته شده‌اند. بدین ترتیب با مقایسه مقادیر میانگین و انحراف معیار می‌توان دقت بهینه‌سازی را برای این ده تابع به‌طور واضح مشاهده نمود. برای ۳۰ اجرای مختلف، مقادیر کمینه جواب‌های به‌دست‌آمده در جدول ۲ آورده شده است.

¹ Goose Grey Optimization

جدول ۲: نتایج بهینه‌سازی

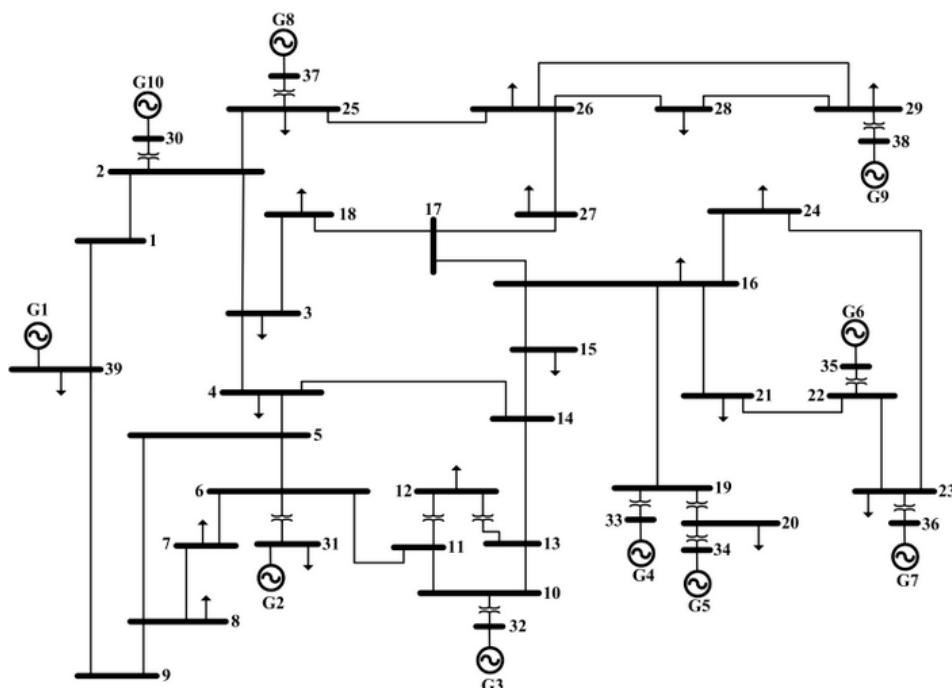
Table 2. Optimization results

	GGO		LSA		PSO		HLSA-PSO	
	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std	Ave	Std
f1	0.000192	3.35e-05	0.000158	3.27e-05	0.00016	2.81e-05	0.000133	2.29e-05
f2	0.001448	2.75e-05	0.001326	3.52E-05	0.001206	2.82e-05	0.00097	2.32e-05
f3	0.000666	2.75e-05	0.00075	2.69e-05	0.000647	2.76e-05	0.000535	1.92e-05
f4	0.00081	1.63e-05	0.001097	1.79e-05	0.000843	1.84e-05	0.000811	1.24e-05
f5	0.000386	1.73e-05	0.000443	1.68e-05	0.00036	1.79e-05	0.0003	1.17e-05
f6	0.00041	1.57e-05	0.000396	1.57e-05	0.000377	1.61e-05	0.000326	1.19e-05
f7	0.00048	1.55e-05	0.000474	1.58e-05	0.000368	1.58e-05	0.000355	1.13e-05
f8	-13.7677	0.000177	-14.0066	0.000223	-10.763	0.000188	-9.30455	0.000157
f9	-14.6894	4.30e-05	-13.0061	4.29e-05	-13.1115	4.67e-05	-9.32704	3.41e-05
f10	-12.7074	0.000163	-12.8983	0.000165	-12.5357	0.000176	-10.2845	0.000145

اگرچه برای توابع تست تک‌وجهی (f1-f4)، نتایج فرآیند بهینه‌سازی توسط بهینه‌سازی گاز خاکستری کمی دقیق‌تر است، اما الگوریتم پیشنهادی نیز به‌اندازه کافی دقیق است. در حالی که در بهینه‌سازی سیستم‌های تست چندوجهی (f5-f7) و سیستم‌های تست چندوجهی با ابعاد ثابت (f8-f10)، نتایج الگوریتم پیشنهادی بهتر از سایر الگوریتم‌ها است.

۶-۲- نتایج پخش بار اقتصادی سیستم قدرت

پس از اطمینان از دقت و کارایی الگوریتم پیشنهادی HLSA-PSO، از این الگوریتم برای حل مسئله پخش بار اقتصادی سیستم قدرت استفاده شد. در این مقاله، یک سیستم قدرت استاندارد شامل ۱۰ واحد تولید حرارتی، به‌همراه دو مزرعه بادی، برای انجام شبیه‌سازی‌ها در این بخش انتخاب شده است. دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مورد مطالعه، در شکل ۵، نشان داده شده است [۴۲].



شکل ۵: دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مورد مطالعه

Figure 5. The single-line diagram of the power system under study

ضرایب هزینه و فواید فنی این سیستم قدرت در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: ضرایب هزینه سیستم قدرت ۱۰ واحدی استاندارد [۴۳]

Table 3. Cost coefficients of the standard 10-unit power system

unit	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
$p^{min}(\text{MW})$	150	135	70	60	70	50	20	47	20	10
$p^{max}(\text{MW})$	470	470	340	300	240	160	130	120	80	55
MUT (h)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
MDT (h)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
Startup cost (cold) (\$)	9000	10000	1100	1120	1800	340	520	60	60	60
Startup cost (HOT) (\$)	4500	5000	550	560	900	170	260	30	30	30
CST (h)	5	5	4	4	4	2	2	0	0	0
Initial status	8	8	-5	-5	-6	-3	-3	-1	-1	-1
a_i	0.00043	0.00063	0.00039	0.0007	0.0008	0.00056	0.00211	0.00480	0.10908	0.00951
b_i	21.60	21.05	20.81	23.90	21.62	17.87	16.51	23.23	19.58	22.54
c_i	958.20	1313.60	604.97	471.60	480.29	601.75	502.70	639.40	455.60	692.40
d_i	450	600	320	260	280	310	300	340	270	380
e_i	0.0410	0.036	0.028	0.052	0.063	0.048	0.086	0.0820	0.098	0.0943

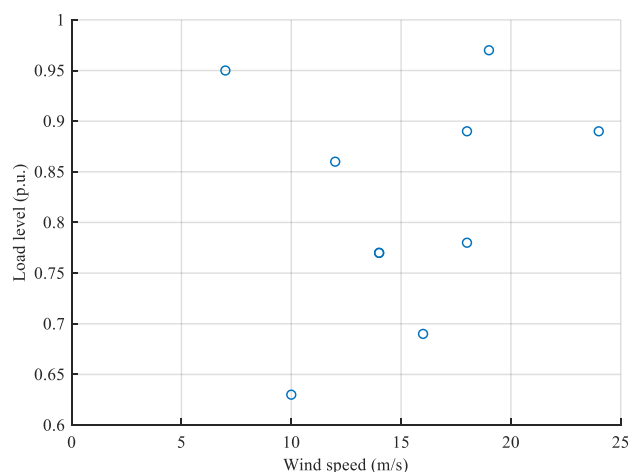
مشخصه‌های دو مزرعه بادی و ضرایب هزینه آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است. ظرفیت نامی هر مزرعه بادی ۱۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ضرایب تابع ویبول برای تخمین سرعت در منطقه برابر با $\alpha_t = 15$ و $\beta_t = 2/2$ در نظر گرفته شد [۲۹].

جدول ۴: پارامترهای مزارع بادی

Table 4. Parameters of the wind farms

	PWF	$C_{ov,j}$	$C_{un,j}$	U_o	U_i	U_r	d
Wind Farm I	100	300	80	45	5	15	120
Wind Farm II	100	310	100	45	5	15	150

شبیه‌سازی‌ها برای ۱۰ سناریو مختلف از سرعت باد و بار در سیستم قدرت، مشابه شکل ۶ انجام شده است.



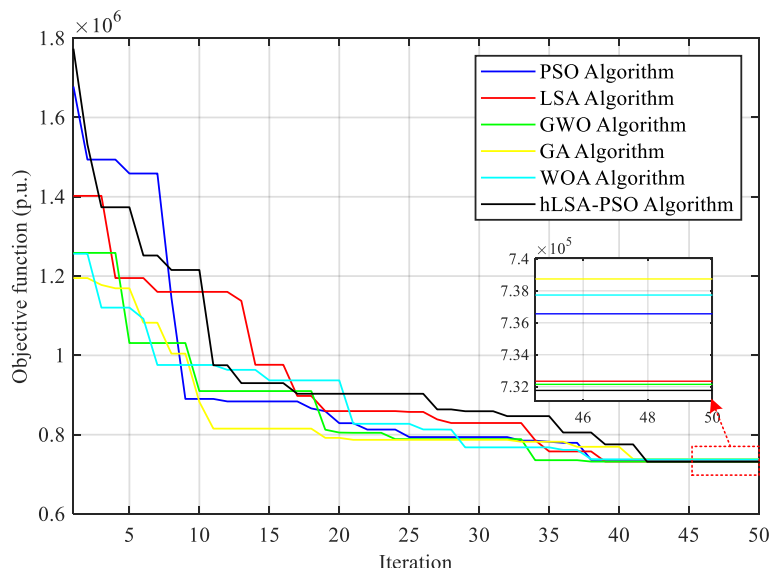
شکل ۶: سناریوهای انتخابی توسط روش MCS

Figure 6. Scenarios selected by the MCS method

پخش بار اقتصادی در چهار بخش انجام می‌شود. در بخش اول بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و برنامه پاسخویی بار و جریمه انرژی تأمین نشده، در بخش دوم با لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها و چشم‌پوشی از پاسخگویی بار و جریمه خاموشی و در بخش سوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و پاسخگویی بار و همچنین صرف‌نظر از جریمه خاموشی و در نهایت در بخش چهارم با در نظر گرفتن هر سه مؤلفه شبیه‌سازی انجام می‌گیرد.

۶-۲-۱- صرف نظر از عدم قطعیت، برنامه پاسخگویی بار و جریمه خاموشی

در بخش اول، مسئله پخش بار اقتصادی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، برنامه پاسخگویی بار و جریمه خاموشی انجام شده است. برای حل این مسئله، به جز الگوریتم پیشنهادی، به جهت مقایسه از الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم جستجوی صاعقه، الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)^۱، الگوریتم ژنتیک (GA)^۲ و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)^۳ استفاده شده است. روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای مسئله در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷: روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در بخش اول

Figure 7. Convergence process of optimization algorithms in Section One

نتایج بهینه‌سازی حاکی از آن است که الگوریتم HLSA-PSO به مقدار کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی همگرا شده است. هزینه بهره‌برداری به‌دست‌آمده توسط الگوریتم پیشنهادی برابر با ۷۳۱۷۶۵ دلار تخمین زده شده است. در صورت به‌کارگیری برنامه‌های پیشنهادی توسط الگوریتم‌های PSO، LSA، GWO، GA و WOA، هزینه‌های بهره‌برداری به ترتیب برابر با ۷۳۶۵۶۱ دلار، ۷۳۲۳۴۱ دلار، ۷۳۲۱۴۵ دلار، ۷۳۸۷۴۳ دلار و ۷۳۷۷۳۶ دلار محاسبه شدند. برای راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی در این بخش، نتایج حاصله از بهینه‌سازی‌ها با نتایج الگوریتم توسعه یافته پروانه (IBOA)^۴ [۴۴]، الگوریتم خرگوش مصنوعی (ARO)^۵ [۴۵] و الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO)^۶ [۴۶] مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج آن به صورت مشخص در جدول ۵، آورده شده است.

جدول ۵: هزینه‌های بهره‌برداری

Table 5. Operational costs

HLSA-PSO	HBMO	RBO	IBOA	WOA	GA	GWO	LSA	PSO	Operational costs (\$)
731765	733245	734341	732149	737736	738743	732145	732341	736561	

مقدار کمتر تابع هدف در بهینه‌سازی الگوریتم پیشنهادی، به معنای دقت بالاتر الگوریتم در حل مسئله پخش بار اقتصادی است. در ادامه در شکل ۸، مقادیر توان تولیدی واحدهای تولید توان (GenCo) در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم HLSA-PSO در بخش اول شبیه‌سازی‌ها به نمایش درآمده است.

¹ Gray Wolf Optimizer

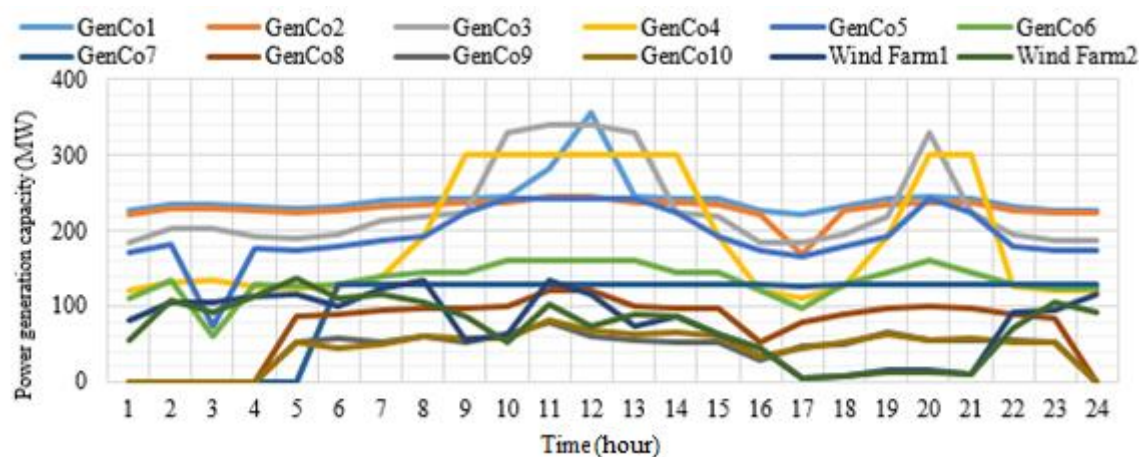
² Genetic algorithm

³ Whale Optimization Algorithm

⁴ Improved butterfly optimization algorithm

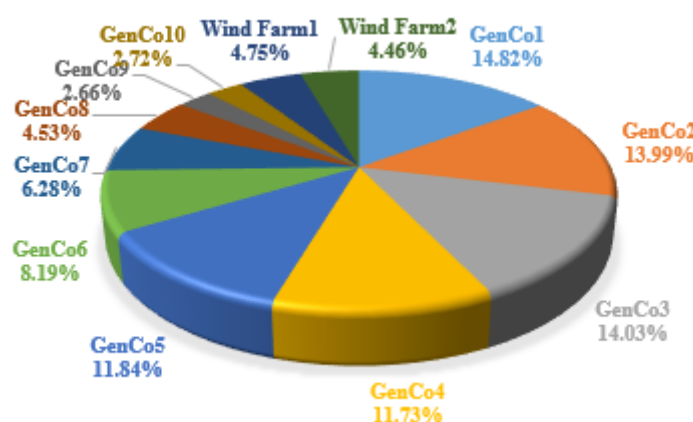
⁵ Artificial rabbits optimization

⁶ Honey Bee Mating Optimization



شکل ۸: ظرفیت تولید توان واحدها در صورت صرف نظر از عدم قطعیت‌ها، پاسخگویی بار و خاموشی
Figure 8. Power generation capacity of units, disregarding uncertainties, demand response and outage

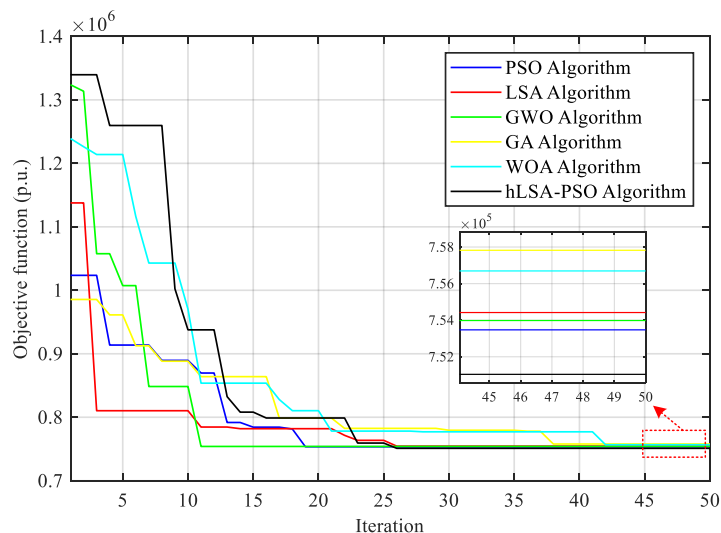
بر اساس نتایج به دست آمده، واحدهای تولید GenCo1 تا GenCo3 به ترتیب با ۱۴/۸۲ درصد، ۱۳/۹۹ درصد و ۱۴/۰۳ درصد بیشترین سهم از تقاضای انرژی الکتریکی را فراهم کرده‌اند. برخی از واحدها در ساعاتی از شبانه‌روز به دلیل بار کم شبکه وارد مدار نشده‌اند و مزارع بادی نیز با تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز، بخصوص در ساعات پیک، هزینه بهره‌برداری سیستم را کاهش داده‌اند. هریک از مزارع بادی حدود ۴/۵ درصد از توان مورد نیاز را تأمین کردند. سهم هر کدام از واحدها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: سهم منابع در تأمین بار کل در صورت صرف نظر از عدم قطعیت‌ها، پاسخگویی بار و خاموشی
Figure 9. Share of resources in meeting the total load, disregarding uncertainties, demand response and outage

۶-۲-۲- با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و صرف نظر از برنامه پاسخگویی بار و جریمه خاموشی

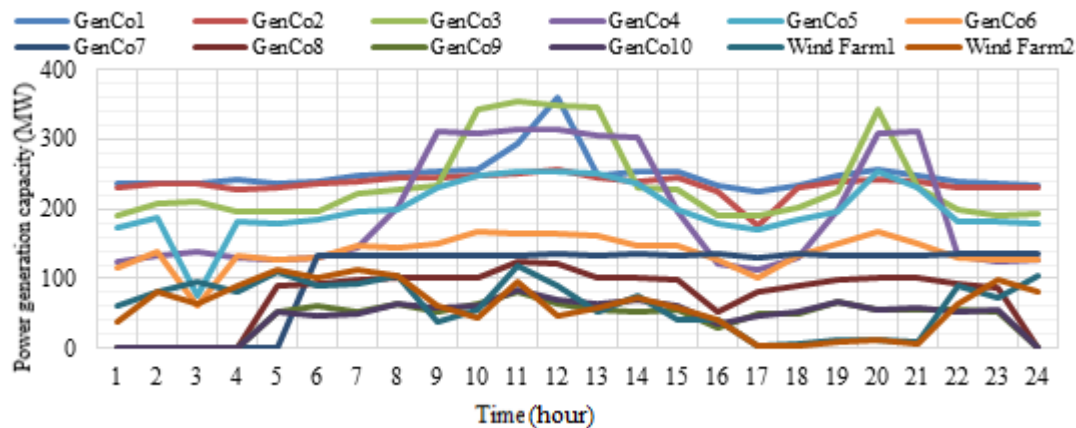
در بخش دوم شبیه‌سازی‌ها، پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار و مزارع بادی و صرف نظر از مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار و جریمه خاموشی انجام شده است. همانند بخش قبلی، برای حل مسئله پخش بار، از برخی الگوریتم‌های بهینه‌سازی به همراه الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. روند همگرایی الگوریتم‌ها برای این بخش در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰: روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در بخش دوم

Figure 10. Convergence process of optimization algorithms in Section Two

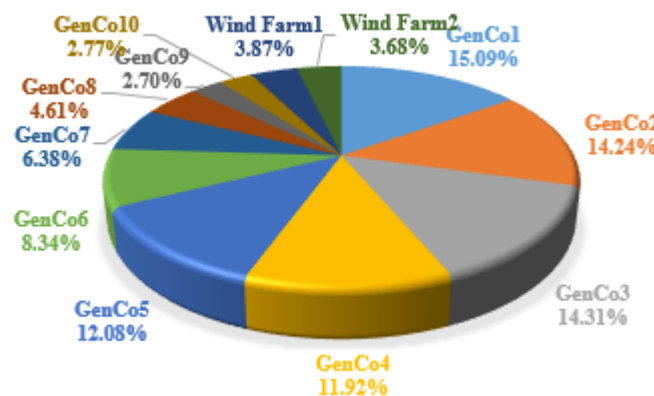
در این بخش نیز، هزینه بهره‌برداری در صورت به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی کمتر از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به میزان ۷۵۱۰۳۸ دلار به‌دست‌آمده است. مقدار تابع هدف برای الگوریتم‌های PSO، LSA، GWO، GA و WOA به ترتیب برابر با ۷۵۳۴۷۱ دلار، ۷۵۴۴۱۸ دلار، ۷۵۳۹۸۱ دلار، ۷۵۷۸۲۳ دلار و ۷۵۶۶۹۳ دلار محاسبه شدند. نتایج حاکی از افزایش ۲/۶ درصد هزینه‌های بهره‌برداری در صورت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در سیستم قدرت است. در شکل ۱۱، ظرفیت توان تولیدی واحدها و مزارع تجدیدپذیر بادی در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم HLSA-PSO در بخش دوم شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۱: ظرفیت تولید توان واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و صرف‌نظر از پاسخگویی بار و خاموشی

Figure 11. Power generation capacity of units considering uncertainties and excluding the demand response and outage

نتایج حاکی از آن است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، ظرفیت توان تولیدی واحدهای حرارتی افزایش پیدا کرده و به‌واسطه ماهیت تصادفی باد، از ظرفیت مزارع بادی کمتر استفاده شده است. سهم کمتر مزارع بادی از تولید، سبب کاهش عدم قطعیت در سیستم قدرت خواهد شد. در این بخش، از شبیه‌سازی‌ها، مزارع بادی هر کدام حدود ۳/۷ درصد از بار شبکه را تأمین می‌کنند. از طرفی واحد GenCo1 حدود ۱۵/۰۹ درصد از بار شبکه را تأمین می‌کند که بیشترین سهم را نسبت به سایر واحدها به خود اختصاص داده است. واحدهای GenCo2 و GenCo3 نیز به ترتیب ۱۴/۲۴ درصد و ۱۴/۳۱ درصد از بار شبکه را تأمین می‌کنند. سهم هر منبع در تأمین بار کل سیستم قدرت در شکل ۱۲ به‌صورت نمودار دایره‌ای به نمایش درآمده است.

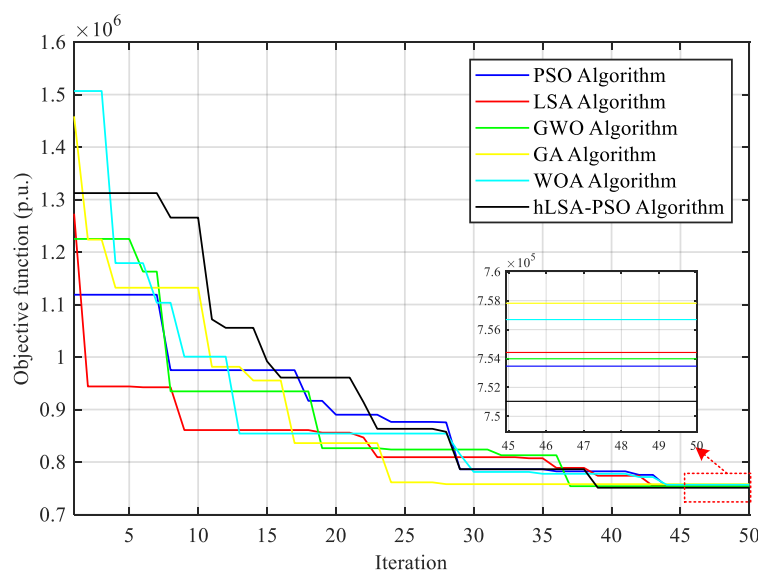


شکل ۱۲: سهم منابع در تأمین بار کل در شرایط عدم قطعیتها و صرف نظر از برنامه پاسخگویی بار و خاموشی

Figure 12. Share of resources in meeting the total load under uncertainty conditions and excluding the demand response and outage

۳-۲-۶ با در نظر گرفتن عدم قطعیتها و مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار و صرف نظر از جریمه خاموشی

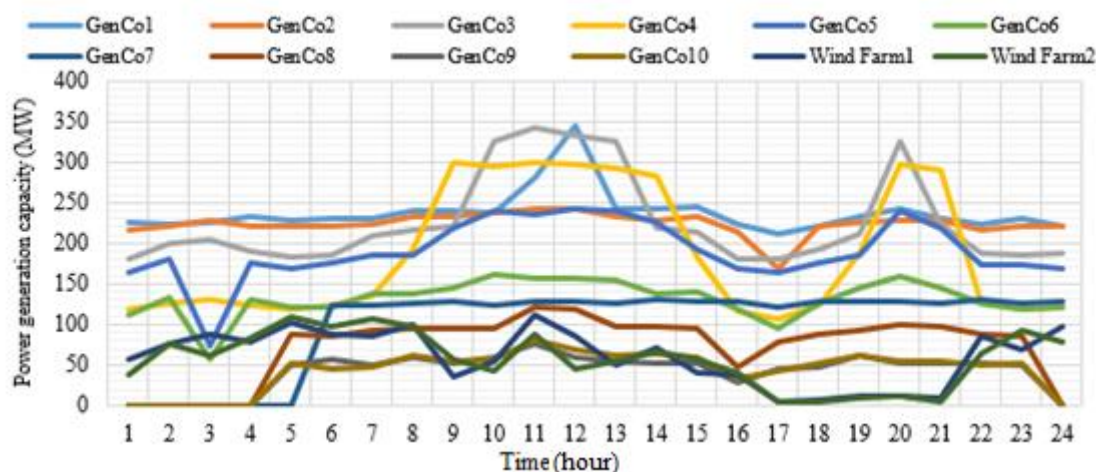
در بخش سوم شبیه سازیها، پخش بار اقتصادی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیتهای بار و مزارع بادی و همچنین مشارکت بارهای پاسخگو در برنامه پاسخگویی و صرف نظر از جریمه خاموشی انجام شده است. در این قسمت ۱۰ درصد از بار شبکه در برنامه پاسخگویی مشارکت دارند. همانند دو بخش قبل، روند همگرایی الگوریتمهای بهینه سازی را در شکل ۱۳ نشان داده شده اند.



شکل ۱۳: روند همگرایی الگوریتمهای بهینه سازی در بخش سوم

Figure 13. Convergence process of optimization algorithms in Section Three

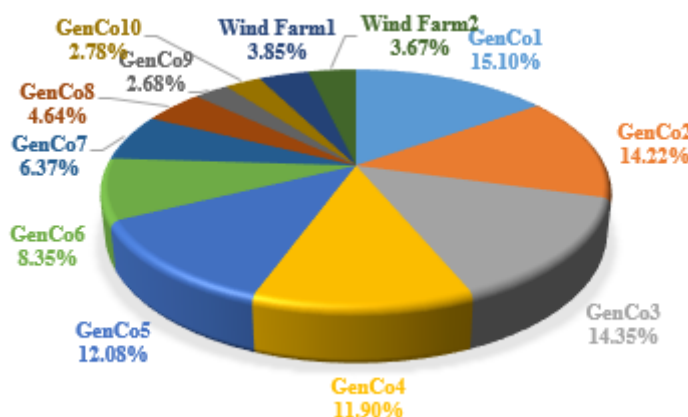
نتایج نشان از کاهش هزینه ها نسبت به بخش قبلی شبیه سازیها است. دلیل این امر نیز مشارکت بارها در برنامه های پاسخگویی بار است. با کاهش بار ساعات اوج بار و پرداخت پاداش به بارهای پاسخگو، می توان هزینه های بهره برداری را کاهش داد. مقدار تابع هدف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برابر با ۷۴۳۴۶۱ دلار به دست آمده است که مقداری کمتر نسبت به سایر الگوریتمها دارد. در حالی که، الگوریتمهای PSO، LSA، GWO، GA و WOA به ترتیب به مقادیر ۷۴۵۶۷۷ دلار، ۷۴۴۰۲۳ دلار، ۷۴۷۸۴۳ دلار، ۷۴۸۰۲۷ دلار و ۷۴۴۱۸۹ دلار همگرا شدند. هزینه های بهره برداری بیانگر آن است که در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار سبب کاهش یک درصدی هزینه ها شده است که با مشارکت درصد بیشتری از بارهای شبکه در برنامه پاسخگویی، هزینه ها کاهش بیشتری خواهند داشت. در ادامه در شکل ۱۴، ظرفیت توان تولیدی هر واحد تولید توان پس از بهینه سازی توسط الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۱۴: ظرفیت تولید توان واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیتها و برنامه پاسخگویی و صرف نظر از خاموشی

Figure 14. Power generation capacity of units considering uncertainties and demand and excluding the outage

نتایج این بخش از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار سبب کاهش تولید توان در ساعاتی اوج بار شده و در نتیجه هزینه‌های بهره‌برداری کاهش یافته است. همچنان به دلیل عدم قطعیتها، مزارع بادی سهم کمتری را در تأمین بار شبکه به خود اختصاص داده‌اند. مزارع بادی Wind Farm 1 و Wind Farm 2 به ترتیب ۳/۸۵ درصد و ۳/۶۷ درصد از کل بار شبکه را تأمین کردند. سهم منابع تولید توان در تأمین بار کل شبکه به صورت درصدی در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

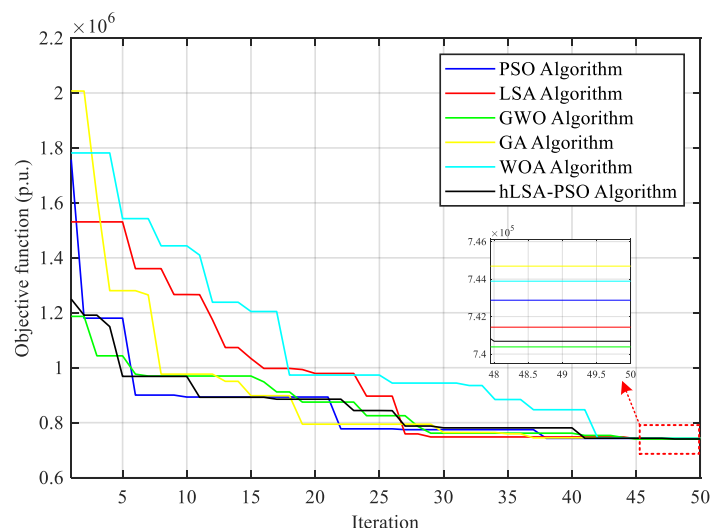


شکل ۱۵: سهم منابع در تأمین بار کل در شرایط عدم قطعیتها و پاسخگویی و صرف نظر از خاموشی

Figure 15. The share of resources in supplying the total load considering uncertainty and demand response and excluding the outage

۶-۲-۴- با در نظر گرفتن عدم قطعیتها و مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار و جریمه خاموشی

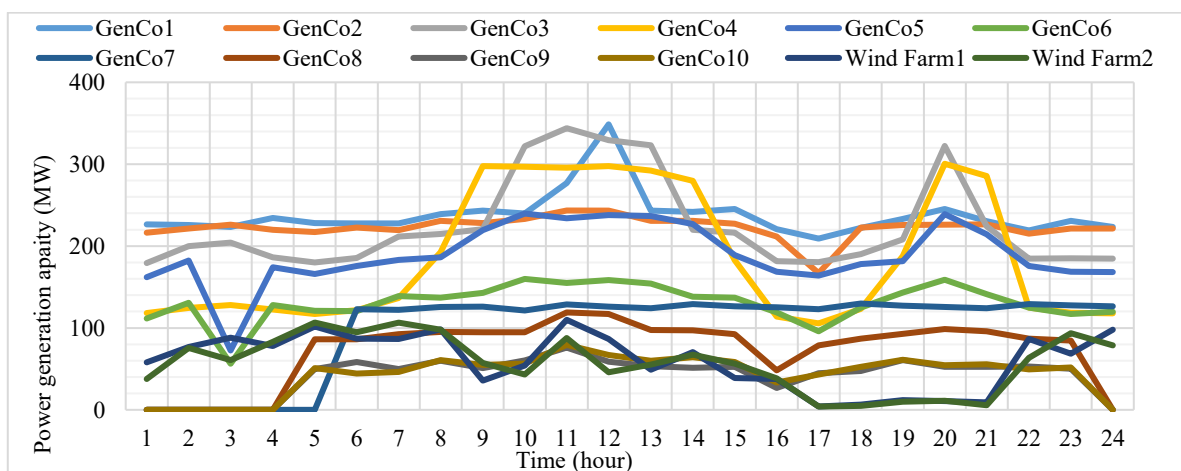
در بخش چهارم شبیه‌سازیها، پخش بار اقتصادی در شرایطی انجام پذیرفته است که عدم قطعیتهای بار و مزارع بادی در نظر گرفته شده و مشارکت بارهای پاسخگو در برنامه پاسخگویی و جریمه خاموشی نیز لحاظ گردیده است. در این بخش نیز ۱۰ درصد از بار سیستم قدرت در برنامه پاسخگویی مشارکت داشته‌اند. روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این بخش در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در بخش چهارم

Figure 16. Convergence process of optimization algorithms in Section Four

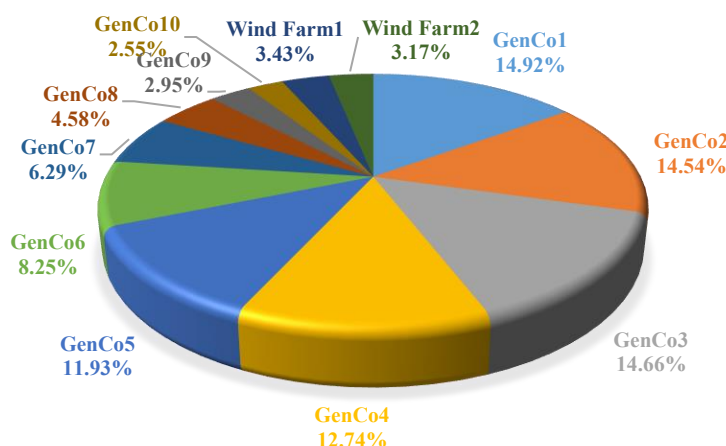
در نظر گرفتن جریمه انرژی تأمین نشده برای شبیه‌سازی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری تأثیرگذار بوده است. این کاهش به دلیل پایین‌تر بودن هزینه مربوط به جریمه خاموشی نسبت به تأمین برق از منابع یا شبکه سراسری در ساعت‌های با قیمت بالای برق، پدید آمده است. مقدار تابع هدف با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برابر با ۷۴۰۶۸۵ دلار گردیده که بسیار نزدیک به الگوریتم GWO و مقداری کمتر نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر است. مقدار نهایی تابع هدف برای الگوریتم‌های PSO، LSA، GWO، GA و WOA به ترتیب به مقادیر ۷۴۲۸۷۵ دلار، ۷۴۱۴۳۶ دلار، ۷۴۰۳۸۳ دلار، ۷۴۴۶۹۳ دلار و ۷۴۳۸۹۰ دلار همگرا شدند. در شکل ۱۷، ظرفیت تولید هر واحد تولید توان پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۱۷: ظرفیت تولید توان واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، برنامه پاسخگویی و خاموشی

Figure 17. Power generation capacity of units considering uncertainties, demand response and outage

نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم حاکی از آن است که حذف بار، در شرایط ضرورت و پرداخت جریمه با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان LPSP، سبب کاهش تولید توان در ساعت‌های با قیمت‌های بالای برق و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شده است. در این بخش، مزارع بادی Wind Farm 1 و Wind Farm 2 به ترتیب ۳/۴۳ درصد و ۳/۱۷ درصد از کل بار الکتریکی مورد نیاز در سیستم قدرت را تأمین توان کردند. سهم هر یک از منابع در تأمین بار کل شبکه، در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸: سهم منابع در تأمین بار کل در شرایط عدم قطعیت‌ها با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و خاموشی

Figure 18. The share of resources in supplying the total load under uncertainty conditions considering the demand response and outage

۶-۲-۵- آنالیز نتایج

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام یافته، می‌توان نتایج بخش‌های چهارگانه را به‌صورت جدول ۶ مقایسه نمود. در بخش اول، بدون در نظر گرفتن سه مؤلفه مورد ارزیابی، میزان هزینه‌های بهره‌برداری ۷۳۱۷۵۶ دلار شد که با ورود عدم قطعیت‌ها به سیستم در بخش دوم، هزینه‌ها با افزایش ۲/۶ درصدی همراه شدند. لذا در بخش سوم به‌واسطه شرکت بارهای پاسخگو در برنامه پاسخگویی بار، هزینه‌ها با کاهش ۱ درصدی نسبت به مرحله قبل مواجه گردیدند و از طرفی در بخش چهارم، با لحاظ کردن جریمه خاموشی در تابع هدف، هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به مرحله دوم کاهش به میزان ۱/۳۸ درصد دارند.

۶: مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری

Table 6. Operational costs comparison

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
Operational costs (\$)	731765	751038	743461	740685
Cost reduction (%)	-	-2.6	+1	+1.38

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی تصادفی برای پخش بار اقتصادی سیستم قدرت، در حضور منابع تجدیدپذیر و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پیشنهاد گردید که بارها در برنامه پاسخگویی بار و خاموشی مشارکت داشتند. مدل پیشنهادی سناریو محور بود و هریک از سناریوها توسط شبیه‌سازی مونت کارلو انتخاب شدند. برای حل مسئله بهینه‌سازی از یک الگوریتم فرا ابتکاری به‌صورت تک‌هدفه استفاده گردید تا بتوان تحلیل سازگارتری با هدف اقتصادی بهره‌برداری ارائه داد و بدین منظور دقت و صحت عملکرد آن نیز با حل توابع معیار استاندارد به اثبات رسید. در بخش اول شبیه‌سازی‌ها، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، برنامه پاسخگویی بار و خاموشی، پخش بار اقتصادی انجام یافت. در بخش دوم، با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و صرف‌نظر از پاسخگویی بار و خاموشی، نتایج حاکی از افزایش ۲/۶ درصدی هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش تولید مزارع بادی به‌واسطه ماهیت تصادفی باد بود. در بخش سوم، با مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی، تولید توان در ساعت‌های اوج بار کمتر گردید و در نتیجه هزینه‌های سیستم با کاهش حدود ۱ درصدی مواجه شد. در نهایت در بخش چهارم، بهره‌برداری با در نظر گرفتن انرژی تأمین نشده و قید قابلیت اطمینان LPSP انجام شد. در این شرایط، با حذف درصدی از بار در ساعات با قیمت بالای برق و پرداخت جریمه خاموشی، هزینه‌های بهره‌برداری به میزان ۱/۳۸ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین در تمامی بخش‌ها، الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری در حل مسئله و کاستن هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به سایر الگوریتم‌ها از خود نشان داد. برای مطالعات آتی می‌توان شاخص‌های تاب‌آوری و قابلیت اطمینان را نیز در مطالعات پخش بار اقتصادی سیستم قدرت در نظر گرفت.

مراجع

- [1] F. Marzbani and A. Abdelfatah, "Economic dispatch optimization strategies and problem formulation: A comprehensive review," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 550, 2024, doi: [10.3390/en17030550](https://doi.org/10.3390/en17030550).
- [2] S. Bhavsar *et al.*, "Stochastic economic dispatch of wind power under uncertainty using clustering-based extreme scenarios," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110158, 2024, doi: [10.1016/j.epsr.2024.110158](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110158).
- [3] M. Dehvan *et al.*, "Economic Dispatch Optimization in Multi-Area Power Distribution Considering Wind Farms and Hydro Power Plants," *SSRN*, 2024, doi: [10.2139/ssrn.4824218](https://doi.org/10.2139/ssrn.4824218).
- [4] M.R. Gholami Dehbalae, G.H. Shaeisi, and M. Valizadeh, "A novel exclusive binary search algorithm to solve the nonlinear economic dispatch problem," *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 48-56, 2020, doi: [10.22109/jemt.2020.207784.1207](https://doi.org/10.22109/jemt.2020.207784.1207).
- [5] B. Postolov and A. Iliev, "New metaheuristic methodology for solving security constrained hydrothermal unit commitment based on adaptive genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, p. 107163, 2022, doi: [10.1016/j.ijepes.2021.107163](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107163).
- [6] J. Zou, S. Ahmed, and X. A. Sun, "Multistage Stochastic Unit Commitment Using Stochastic Dual Dynamic Integer Programming," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1814-1823, May 2019, doi: [10.1109/TPWRS.2018.2880996](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2880996).
- [7] X. Zhang *et al.*, "Short-circuit current constrained unit commitment and transmission switching model for improving renewable integration: An MILP formulation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 9, pp. 1743-1755, 2022, doi: [10.1049/gtd2.12393](https://doi.org/10.1049/gtd2.12393).
- [8] Z.K. Feng *et al.*, "A mixed integer linear programming model for unit commitment of thermal plants with peak shaving operation aspect in regional power grid lack of flexible hydropower energy," *Energy*, vol. 175, pp. 618-629, 2019, doi: [10.1016/j.energy.2019.03.117](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.117).
- [9] M. Nozarian *et al.*, "Hydro Thermal Unit Commitment involving Demand Response resources: a MILP formulation," *Electrical Engineering*, vol. 105, pp. 175-192, 2023, doi: [10.1007/s00202-022-01651-z](https://doi.org/10.1007/s00202-022-01651-z).
- [10] K. Srikanth *et al.*, "Meta-heuristic framework: quantum inspired binary grey wolf optimizer for unit commitment problem," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 243-260, 2018, doi: [10.1016/j.compeleceng.2017.07.023](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.07.023).
- [11] S. Reddy K *et al.*, "Binary whale optimization algorithm: a new metaheuristic approach for profit-based unit commitment problems in competitive electricity markets," *Engineering Optimization*, vol. 51, no. 3, pp. 369-389, 2019, doi: [10.1080/0305215X.2018.1463527](https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1463527).
- [12] N.K. Navin and R. Sharma, "A fuzzy reinforcement learning approach to thermal unit commitment problem," *Neural Computing and Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 737-750, 2019, doi: [10.1007/S00521-017-3106-5](https://doi.org/10.1007/S00521-017-3106-5).
- [13] N. V. Panossian, D. McLarty, and M. E. Taylor, "Artificial Neural Network for Unit Commitment on Networks with Significant Energy Storage," *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 2019, pp. 1-5, doi: [10.1109/GreenTech.2019.8767137](https://doi.org/10.1109/GreenTech.2019.8767137).
- [14] N.E. Koltsaklis and A.S. Dagoumas, "Incorporating unit commitment aspects to the European electricity markets algorithm: An optimization model for the joint clearing of energy and reserve markets," *Applied energy*, vol. 231, pp. 235-258, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.09.098](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.098).
- [15] E.A. Bakirtzis *et al.*, "Storage management by rolling stochastic unit commitment for high renewable energy penetration," *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 240-249, 2018, doi: [10.1016/j.epsr.2017.12.025](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.12.025).

- [16] D. Deka and D. Datta, "Optimization of unit commitment problem with ramp-rate constraint and wrap-around scheduling," *Electric Power Systems Research*, vol. 177, p. 105948, 2019, doi: [10.1016/j.epsr.2019.105948](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105948).
- [17] K. Poncelet *et al.*, "Unit commitment constraints in long-term planning models: Relevance, pitfalls and the role of assumptions on flexibility," *Applied Energy*, vol. 258, p. 113843, 2020, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113843](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113843).
- [18] Y. Zhai *et al.*, "A two-layer algorithm based on PSO for solving unit commitment problem," *Soft Computing*, vol. 24, no. 12, pp. 9161-9178, 2020, doi: [10.1007/s00500-019-04445-x](https://doi.org/10.1007/s00500-019-04445-x).
- [19] E. Du *et al.*, "Operation of a high renewable penetrated power system with CSP plants: A look-ahead stochastic unit commitment model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 140-151, 2018, doi: [10.1109/TPWRS.2018.2866486](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2866486).
- [20] W. van Ackooij, E. C. Finardi, and G. M. Ramalho, "An exact solution method for the hydrothermal unit commitment under wind power uncertainty with joint probability constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6487-6500, 2018, doi: [10.1109/TPWRS.2018.2848594](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2848594).
- [21] S. Malekshah *et al.*, "A zonal optimization solution to reliability security constraint unit commitment with wind uncertainty," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 99, p. 107750, 2022, doi: [10.1016/j.compeleceng.2022.107750](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107750).
- [22] M. Najafi, H. Gorjipour, and N. Moaddabi Pirkolachi, "A Single Stage Dynamic Transmission Expansion Planning Model in the Competitive Market," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 1528, 2024, doi: [10.30495/jce.2022.1961298.1163](https://doi.org/10.30495/jce.2022.1961298.1163), [in Persian].
- [23] M.Q. Wang *et al.*, "Optimizing probabilistic spinning reserve by an umbrella contingency constrained unit commitment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 187-197, 2019, doi: [10.1016/j.ijepes.2019.01.034](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.034).
- [24] Y. Du, Y. Li, C. Duan, H. B. Gooi, and L. Jiang, "An Adjustable Uncertainty Set Constrained Unit Commitment with Operation Risk Reduced through Demand Response," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, doi: [10.1109/TII.2020.2979215](https://doi.org/10.1109/TII.2020.2979215).
- [25] F. Jabari *et al.*, "Implementation of Demand Response Programs on Unit Commitment Problem," in *Demand Response Application in Smart Grids*, pp. 37-54, Springer, Cham, 2020, doi: [10.1007/978-3-030-32104-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32104-8_2).
- [26] S.P. Roukerd *et al.*, "Uncertainty-based unit commitment and construction in the presence of fast ramp units and energy storages as flexible resources considering enigmatic demand elasticity," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101290, 2020, doi: [10.1016/j.est.2020.101290](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101290).
- [27] A. Praktiknjo, "The value of lost load for sectoral load shedding measures: The German case with 51 sectors," *Energy, Energies*, vol. 9, p. 116, 2016, doi: [10.3390/en9020116](https://doi.org/10.3390/en9020116).
- [28] A. J. Praktiknjo *et al.*, "Assessing energy supply security: Outage costs in private households," *Energy Policy*, vol. 39, no. 1, pp. 7825-7833, 2011, doi: [10.1016/j.enpol.2011.09.028](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.028).
- [29] A. Heydari *et al.*, "Eco-environmental dispatch of power system with high penetration wind farms considering demand/source side uncertainties," *Electric Power Systems Research*, vol. 236, p. 110925, 2024, doi: [10.1016/j.epsr.2024.110925](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110925).
- [30] K. Nagarajan *et al.*, "Optimizing dynamic economic dispatch through an enhanced Cheetah-inspired algorithm for integrated renewable energy and demand-side management," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 3091, 2024, doi: [10.1038/s41598-024-53688-8](https://doi.org/10.1038/s41598-024-53688-8).

- [31] L. Fan, C. Zhao, G. Zhang, and Q. Huang, "Flexibility management in economic dispatch with dynamic automatic generation control," *IEEE Transaction On Power Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 876-886, 2020, doi: [10.1109/TPWRS.2021.3103128](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3103128).
- [32] M. Xu *et al.*, "Bilinear-DRTFT: Uncertainty prediction in electricity load considering multiple demand responses," *Energy*, vol. 309, p. 133067, 2024, doi: [10.1016/j.energy.2024.133067](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133067).
- [33] M. Ramezani *et al.*, "Uncertainty models for the structural design of floating offshore wind turbines: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 185, p. 113610, 2023, doi: [10.1016/j.rser.2023.113610](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113610).
- [34] B. Sukumar *et al.*, "A hybrid BCMPO technique for optimal scheduling of electric vehicle aggregators under market price uncertainty," *IETE Journal of Research*, vol. 70, no. 3, pp. 2974-2988, 2024, doi: [10.1080/03772063.2023.2177756](https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2177756).
- [35] L. Wang *et al.*, "Quantification of model uncertainty and variability for landslide displacement prediction based on Monte Carlo simulation," *Gondwana Research*, vol. 123, pp. 27-40, 2023, doi: [10.1016/j.gr.2023.03.006](https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.006).
- [36] Y. Zhu, B. Qiao, Y. Dong, B. Qu, and D. Wu, "Multiobjective dynamic economic emission dispatch using evolutionary algorithm based on decomposition," *IEEJ Trans. Electric. Electron. Eng.*, vol. 14, pp. 1323-1333, 2019, doi: [10.1002/tee.22933](https://doi.org/10.1002/tee.22933).
- [37] M. Jain *et al.*, "An overview of variants and advancement of PSO algorithm" *Applied Sciences*, vol. 12, p. 8392, 2022, doi: [10.3390/app12178392](https://doi.org/10.3390/app12178392).
- [38] W.M. Hamanah, "A Lightning Search Algorithm for optimal planning of power systems with short/long-term storage," *Research Article*, vol. 12, p. 56726, 2024, doi: [10.101109/ACCESS.20243356726](https://doi.org/10.101109/ACCESS.20243356726).
- [39] T. Lubinski *et al.*, "Optimization applications as quantum performance benchmarks," *ACM Transactions on Quantum Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 1-44, 2024, doi: [10.1145/3678184](https://doi.org/10.1145/3678184).
- [40] E.S.M. El-Kenawy *et al.*, "Greylag goose optimization: nature-inspired optimization algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 238, p. 122147, 2024, doi: [10.1016/j.eswa.2023.122147](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122147).
- [41] L. Kumar *et al.*, "Parallel global best-worst particle swarm optimization algorithm for solving optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 142, p. 110329, 2023, doi: [10.1016/j.asoc.2023.110329](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110329).
- [42] C. Qu *et al.*, "Learning search algorithm: framework and comprehensive performance for solving optimization problems," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, no. 6, p. 139, 2024, doi: [10.1007/s10462-024-10767-6](https://doi.org/10.1007/s10462-024-10767-6).
- [43] M. Afroozeh *et al.*, "Apply a mutation in gray wolf optimization algorithm to solve the economic-environmental dispatch problem of integrated power plants including thermal and wind," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 56, pp. 59-76, 2024, doi: [10.22108/jipet.2024.139452.2104](https://doi.org/10.22108/jipet.2024.139452.2104).
- [44] B.N. Alhasnawi *et al.*, "A novel economic dispatch in the stand-alone system using improved butterfly optimization algorithm," *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101135, 2023, doi: [10.1016/j.esr.2023.101135](https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101135).
- [45] B. Ozkaya *et al.*, "Optimal solution of the combined heat and power economic dispatch problem by adaptive fitness-distance balance based artificial rabbits optimization algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 238, p. 122272, 2024, doi: [10.1016/j.eswa.2023.122272](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122272).
- [46] S. Habib *et al.*, "Economic dispatch optimization considering operation cost and environmental constraints using the HBMO method," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1718-1725, 2023, doi: [10.1016/j.egy.2023.08.032](https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.032).



Journal of Southern Communication Engineering



Islamic Azad University Bushehr Branch

Online ISSN: 2980-9231

Vol. 15, Issue 58, Winter 2026

Contents

Combination of Robust PID and Neuro-Fuzzy Controllers for Multi-Objective Optimization of Anti Lock Braking System.....1	
Rasoul Hosseini; Javad MashayekhiFard; Sepehr Soltani	
An Edge-Aware Learning Framework for IoT Malware Classification Using Block-Average-Based Adaptive Dimensionality Reduction.....24	
Shohreh Ajoudanian; Maryam Nooraei Abadeh	
Improving Wireless Sensor Network Lifetime Using a Combination of Compact Sensing and Swarm Intelligence for Sleep/Wake Scheduling and Routing.....47	
Mohammad Hassan Katebi Jahromi; Karamolah BagheriFard; Razieh MalekHoseini; Saeed Mehrjoo	
A Review of Event-Triggered Control of Fractional-Order Multi-Agent Systems.....69	
Fateme Gholami; Mahnaz Hashemi; Ghazanfar Shahgholian	
A Novel Approach to mmWave Transmission in Cooperative Massive MIMO Systems Based on NOMA Technology.....96	
Pouria Salehi; Naser Parhizgar; Farshad Pesaran	
Fractal Slotted Leaky-Wave Antenna Based on SIW and Balanced CRLH Transmission Line with Enhanced Backward Bandwidth Scanning and Gain in X-Band.....126	
Hossein Mashhadi; Loghman Asadpor; Yashar Zehforoosh; Tohid Sedghi	
Optimal Dispatch Program for Thermal Units in Power Systems with High Wind Farm Penetration and Flexible Loads.....146	
Ali Heydari; Reza Ebrahimi; Mahmood Ghanbari	

**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:**